



Korrosion på stål i betong i kylvattenvägar

Delrapport 2 – Relativa fuktighetens inverkan
på kloridinitierad armeringskorrosion



Elforsk rapport 10:83

Bertil Sandberg, Johan Ahlström, Bror Sederholm,
Lars-Olof Nilsson, Sture Lindmark

April 2010

ELFORSK

Korrosion på stål i betong i kylvattenvägar

Relativa fuktighetens inverkan på
kloridinitierad armeringskorrosion

Elforsk rapport 10:83

Bertil Sandberg, Johan Ahlström,
Bror Sederholm, Lars-Olof Nilsson,
Sture Lindmark

April 2010

Förord

Sedan 2007 pågår inom Elforsk ett forskningsprogram kring betongkonstruktioner inom kärnkraftverken. Det finns ett behov av att både bygga upp kompetens inom området och att utveckla teknikbasen för teknisk förvaltning av byggnader och konstruktioner inom kärnkraftindustrin. Det övergripande målet med det betongtekniska programmet är att säkerställa avsedd livslängd och hög tillgänglighet för svenska kärnkraftverk med bibehållen säkerhet. Programmet finansieras av Vattenfall, av kärnkraftverken i Forsmark, Ringhals samt OKG i Oskarshamn, av Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) samt av Teollisuuden Voima Oy (TVO) i Finland. Inom ramen för detta forskningsprogram har föreliggande projekt "Korrosion på stål i betong i kylvattenvägar Delrapport 2 - Relativa fuktighetens inverkan på kloridinitierad armeringskorrosion" beställts. Projektet är avrapporterat i tre delrapporter, utöver föreliggande rapport;

- Elforsk rapport 10:82 Delrapport 1 – Litteraturgranskning
- Elforsk rapport 10:84 Delprojekt 3 – Korrosion på stål i vattenmättad betong.

Projektet har utförts av Swerea KIMAB med Bertil Sandberg som projektledare och i samarbete med Lunds Universitet där professor Lars-Olof Nilsson, avdelningen för Byggnadsmaterial varit ansvarig.

Projektet har följts av Betongprogrammets styrgrupp bestående av Jonas Bergfors EON OKG, Jan Gustavsson Vattenfall Ringhals, Daniel Eklund och Manouchehr Hassanzadeh Vattenfall Research and Development, Kostas Xanthopoulos SSM, Lars-Erik Berglund, Marcus Edin och Philip Persson Vattenfall Forsmark samt Juha Riihimäki TVO. Elforsk tackar styrgruppen för värdefulla synpunkter och kommentarer.

Elforsk i september 2010
Lars Wrangén
Programområde Kärnkraft

Sammanfattning

Stål som gjuts in i betong skyddas mot korrosion av betongens höga pH-värde. Skyddet kan dock brytas om klorider kan tränga in till stålet. Så vitt känt krävs en viss mängd klorider för att skyddet skall brytas. Denna mängd kallas (det kritiska) tröskelvärde. Trots omfattande försök har något säkert tröskelvärde ännu inte rapporterats. En av orsakerna till detta är att tröskelvärde med stor sannolikhet påverkas av fukttillståndet i betongen. Vid mycket högt fukttinnehåll försvåras transporten av syrgas fram till korrosionsstället och vid lågt fukttillstånd ökar den elektriska resistansen i betongen så kraftigt att korrosionen inte kan fortgå. I de flesta försök som finns rapporterade hittills har man inte tagit hänsyn till detta fuktberoende.

Syftet med denna studie har varit att försöka bestämma den relativa fuktighet vid vilken korrosionshastigheten är som högst. Med detta värde som grund kan man sedan utforma nya försök där man kan bestämma det kritiska tröskelvärde för kloridkoncentrationen.

Resultaten visar att det finns med stor sannolikhet ett kritiskt kloridtröskelvärde för varje betongkvalitet. Vid kloridhalter överstigande tröskelvärde förlorar stålet sin passivitet. Om allvarlig korrosion sker eller inte vid kloridhalter överstigande tröskelvärde påverkas kraftigt av den relativa fuktigheten.

I ett snävt intervall kring 95 % RF uppstår gropfrätning då tröskelvärde överskridits. Vid lägre RF respektive mycket hög RF har stålet en ofullständig passivitet och korrosionen blir i de flesta fallen marginell.

Framtida undersökningar av kritiska tröskelvärden bör utföras vid en relativ fuktighet av 95 % och med referensprover enligt föreslagen procedur.

Summary

Steel in concrete is protected against corrosion by the high pH value of the concrete. The passivity can however be broken if chloride ions penetrate into the concrete. It is presumed that a certain amount of chloride is needed to activate the steel. This value is called the threshold level. Even though many attempts have been performed no reliable value has been found. One of the reasons for this is probably that the threshold value is influenced by the humidity of the concrete. At very high humidity the transport of oxygen to the steel surface is slow and at low humidity the electrical resistance increases.

The aim of this investigation has been to determine at what humidity the corrosion rate reaches its highest value. With this as a background new tests can be performed to predict the chloride threshold value.

The results indicate that it most probably do exist a threshold value for each concrete quality. At chloride contents above the threshold value the steel loses its passivity. If severe corrosion takes place or not is however strongly dependent on the humidity of the concrete.

In a close interval around 95 % relative humidity the steel is attacked by pitting corrosion when the threshold value is exceeded. At lower and higher humidity the passivity is incomplete and the corrosion rate in most cases marginal.

Future investigations concerning chloride threshold values is recommended to be performed at a relative humidity of 95 % and by using reference samples according to proposed procedure.

Innehåll

1	Inledning	1
2	Syfte	2
3	Teknisk bakgrund	3
4	Metodik och material	6
4.1	Huvudprincip för bestämning av optimal RF-nivå.....	6
4.1.1	Moment och tider	7
4.2	Försöksmaterial: stål	7
4.3	Försöksmaterial: Cementbruk	7
4.3.1	Sammansättning	7
4.3.2	Gjutning och hårdning	7
4.4	Tillsättning av klorider	9
4.5	RF-nivåer	9
4.6	Potentialmätning	10
4.7	Metodik för bestämning av massförlust till följd av korrosion	10
4.8	Metodik för bestämning av kloridinnehåll	11
5	Resultat	12
5.1	Basdata för cementbruket	12
5.2	Uppmätt RF i proverna.....	13
5.3	Samband korrosionshastighet – RF-nivå	14
6	Diskussion	20
7	Slutsatser	24
8	Litteraturförteckning	25
9	Appendix	26
9.1	Uppmätta potentialer under klimatisering.....	26
9.2	Massförluster och korrosionshastigheter för uttag 1.....	27
9.3	Massförluster och korrosionshastigheter för uttag 2.....	28
9.4	Provernas yta efter uttag 1 och före betning	30
9.5	Provernas yta efter uttag 2 och före betning	34
9.6	Protokoll från kloridanalys	38

1 Inledning

Projektet **Korrosion på stål i betong i kylvattenvägar** initierades under 2008 och finansieras av Elforsk; Svenska Elföretagens Forsknings och Utvecklings AB, och Korrosionsinstitutets intressentförening. Projektet är uppdelat i tre delprojekt:

1. Kloridhalter i betong i bräckt vatten
2. Metodik för fastställande av tröskelvärden
3. Korrosion på stål i vattenmättad betong

I delprojekt 1 genomfördes en litteraturstudie som även omfattade metoder att fastställa tröskelvärden och i litteraturen redovisade tröskelvärden för klorider. I delprojekt 2 har laborativa försök genomförts vars syfte har varit att fastställa den relativa fuktighetens inverkan på kloridtröskelvärdet.

Under cirka 40 års tid har försök gjorts att fastställa tröskelvärden för armeringskorrosion. Teorin bygger på att man efter en initieringstid uppnår ett tröskelvärde. Därefter startar ett propageringsskede. Spridningen i rapporterade tröskelvärden har dock varit stor. Orsaken till detta är sannolikt att propageringshastigheten kan variera från noll till mycket hög beroende på de yttre miljöfaktorerna. Detta har medfört att man i många fall inte konstaterat något mätbar korrosion även då tröskelvärdet har passerats med bred marginal. Sättet att exponera det ingjutna stålet för relevanta klimatbetingelser är också avgörande för vilka tröskelvärden som erhålles.

Om vi bortser från korrosionshastighetshöjande faktorer som aktiv/passiv-celler, galvanisk inverkan och olämplig ballast är det med stor sannolikhet betongens fuktnivå som bestämmer korrosionshastigheten i propageringsskedet. Vid låg fuktnivå begränsas korrosionen av hög resistans i korrosionscellen och vid hög fukthalt är syretillförseln den begränsande faktorn. Vid en viss fukthalt bör således korrosionshastigheten ha ett maximum.

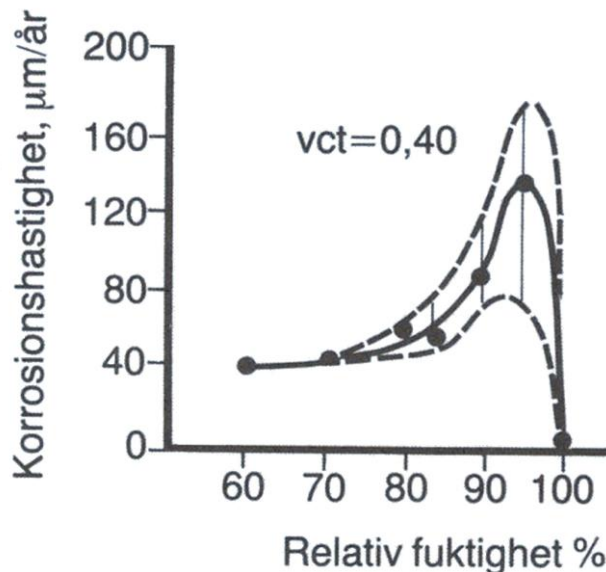
För att kunna fastställa relevanta tröskelvärden bör man därför börja i andra änden, nämligen att fastställa betingelserna då propageringshastigheten är mätbart hög. När väl detta är gjort kan tröskelvärden för t.ex. kloridhalt, inverkan av täcksiktstjocklek, vct osv studeras under förhållanden då tolkbara resultat erhålls (konstant fuktnivå).

2 Syfte

Syftet med denna studie har varit att försöka bestämma den relativa fuktighet vid vilken korrosionshastigheten är som högst. Med detta värde som grund kan man sedan utforma nya försök där man kan bestämma det kritiska tröskelvärdet för kloridkoncentrationen.

3 Teknisk bakgrund

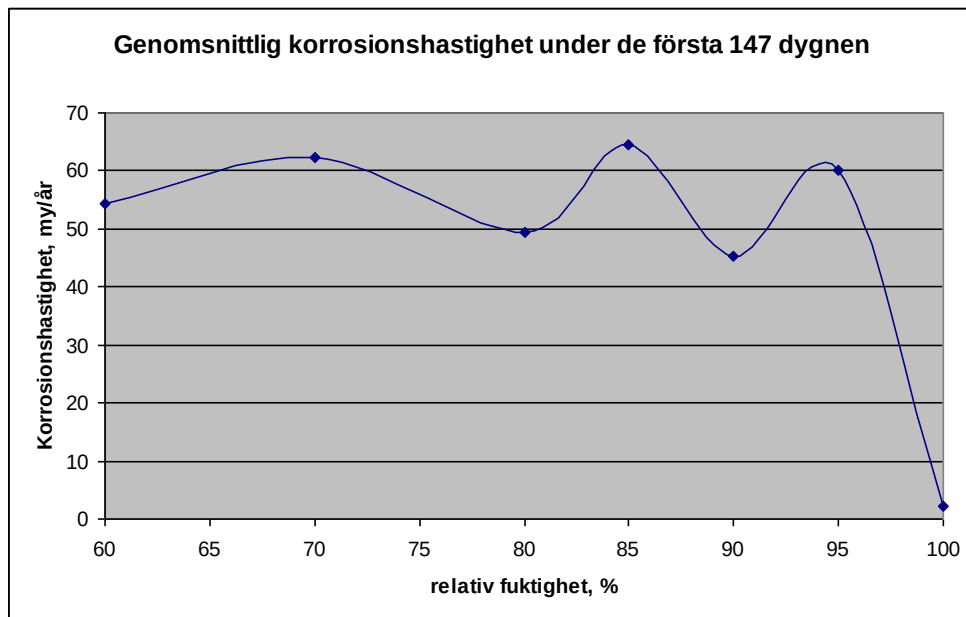
Sedan tidigare är det känt att betongens relativa fuktighet har stor betydelse för den korrosionshastighet som uppstår i propageringsfasen [1,2]. I figur 1 visas ett exempel.



Figur 1. Korrosionshastigheter uppmätta i slaggcement, vct 0,40, vid olika relativa fuktigheter. Korrosionshastigheten är beräknad som lokal korrosion på angripna ytor dvs den genomsnittliga korrosionshastigheten på hela ytan är avsevärt lägre.

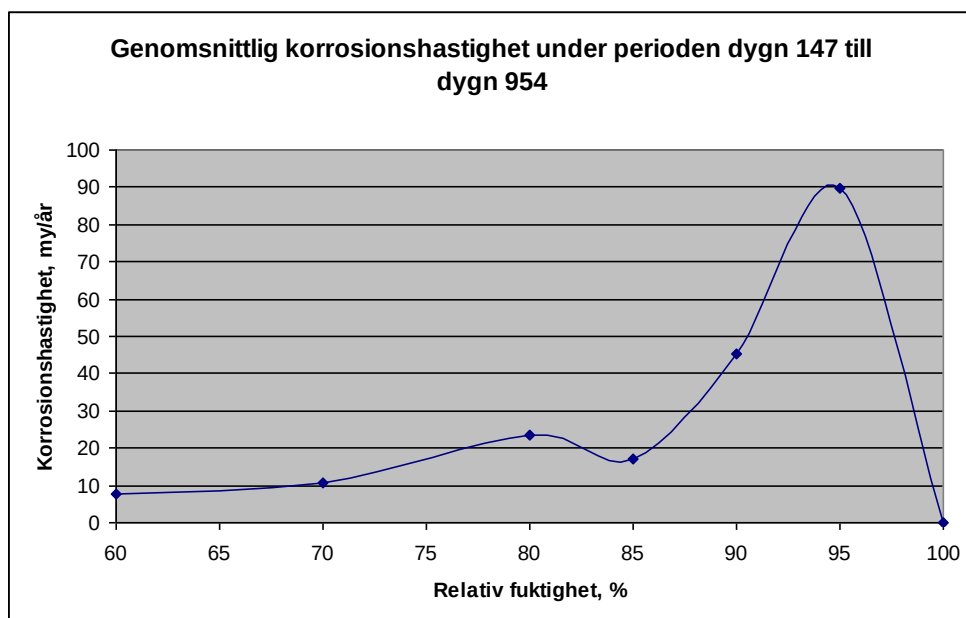
Resultaten (3) bygger på exponeringsförsök (1). Stålstavar, diameter 10 mm centrerades i provrör med en innerdiameter på 17 mm och kringgjöts med bruk vilket gav ett täcksikt på 3,5 mm. Bruket innehöll 5 % CaCl_2 . Efter 24 timmars härdning överfördes proverna till klimatskåp och hölls vid olika relativa fuktigheter under 2,5 års tid. Som framgår av figuren är korrosionshastigheten nära noll vid 100 % RF. Vid lägre fuktighet än 80 % planar korrosionshastigheten ut. De relativt höga korrosionshastigheterna vid lägre relativ fuktighet kan emellertid vara en effekt av att stålproverna under en längre tid varit exponerade för en betong med högre fuktighet och därmed högre korrosionshastighet.

Vid försöken utvärderades prover efter 67, 147, 225, 323, 417 och 954 dygn. Om vi går in i Tuuttis ursprungsdata kan vi konstatera att skillnaden i korrosion efter de första 147 dygnen inte varierar stort med den relativa fuktigheten, utom för provet som varit exponerat för 100 % RF, se figur 2.



Figur 2. Korrosionshastigheter efter 147 dygns exponering beräknade som jämn avfrätning på hela ytan.

Vi kan således utgå från att alla prover med RF <100 % erhöi en initiell korrosion motsvarande ca 55 $\mu\text{m}/\text{år}$ under de första 147 dyggen. Om den resulterande massförlusten subtraheras från den uppmätta massförlusten efter 954 dygn erhålls det resultat som återges i figur 3.



Figur 3. Beräknade korrosionshastigheter vid olika relativa fuktigheter under perioden 147 till 954 dygn.

Effekten av den relativa fuktigheten på korrosionshastigheten blir då mycket tydlig. Det är dock inte säkert att stabila förhållanden hade inställt sig efter 147 dygn. Eventuellt är skillnaderna ändå större dvs korrosion av betydelse sker endast i ett smalt intervall kring 95 % RF.

Om man inte beaktar den relativa fuktighetens betydelse finns en uppenbar risk att man får en stor spridning i försök där man avser att fastställa tröskelvärden. Hänsyn måste också tas till den historik proverna har haft innan stabila förhållanden inställt sig.

För att komma runt denna problematik bör man exponera dubbelprover. Då förmodat eller uppmätt stabila förhållanden ställt in sig bryts referensprovet och uppmätt korrosion på detta prov subtraheras från det resultat som erhålls på det långtidsexponerade provet.

4 Metodik och material

4.1 Huvudprincip för bestämning av optimal RF-nivå

Armering av kolstål i betong korroderar olika fort i atmosfär med olika relativa fuktigheter (RF). I fuktig betong (med högt RF) sker korrosionen långsamt pga att syrediffusionen går långsammare i vätskefas än i gasfas vilket gör att syrekonzentrationen blir låg vid armeringen. Vid en låg syrekonzentration sker syrgasreduktion långsamt vilket begränsar korrosion eftersom elektroner på armeringsytan inte kan konsumeras av syrgasreduktionen. Vid torr betong begränsas korrosionshastigheten av betongens höga resistivitet. Att inte beakta fuktigheten i betongen leder till att man felbedömer kloridtröskelvärdet. Detta är en av förklaringarna till varför en mängd olika kloridtröskelvärden finns rapporterade i litteraturen. I detta försök har vi undersökt vilken relativ fuktighet som ger den högsta korrosionshastigheten. Det tar tid innan ett betongprov kommer till jämvikt med en viss relativ fuktighet och under den tiden kan armeringen korrodera. Därför har försöksserien haft två exponeringstider, en längre och en kortare. Den kortare perioden var så lång som bedömdes erforderlig för att betongproverna skulle komma till jämvikt med omgivande fuktighet. Massförlusten bestämdes både efter den kortare och efter den längre perioden. För att sedan bestämma korrosionshastigheten för respektive RF (efter acklimatisering) subtraherades massförlusten vid den kortare perioden från massförlusten vid den längre perioden.

Det principiella försöksförloppet kan sammanfattas enligt följande:

1. Härdade provkroppen lagras i saltlösning (NaCl) under så lång tid att jämn kloridkonzentration uppnås tvärs igenom hela provet, dvs ända in till det ingjutna stålprovet från samtliga sidor.
2. Provet placeras sedan i klimatbox för konditionering till den RF vid vilken man vill mäta korrosionshastigheten. (Under uttorkningsförloppet i klimatboxen startar korrosionen och fortgår sedan med varierande hastighet fram till att avsedd RF uppnåtts).
3. Efter avslutad acklimatisering tas varannan provkropp ut och massförlusten under insvängningsförloppet bestäms. Denna mängd utgör nu referensvärde för den fortsatta utvärderingen. Korrosionshastigheten förväntas härefter vara konstant i respektive provkropp.
4. Efter ytterligare en tid (i detta fall sju månader) avbryts försöket för resterande provkroppar. Stålproverna tas ut och massförlusten bestäms. Detta är slutvärdet.
5. Korrosionshastigheten vid konstant RF beräknas genom att referensvärdet (som mättes efter insvängningsförloppet) subtraheras från slutvärdet. Därmed är också korrosionshastigheten under stabila RF-förhållanden bestämd.

4.1.1 Moment och tider

Total försökstid 17 månader

Gjutning

Härdning 3 månader

Kloridbad 5 veckor

Klimatisering 6 månader (första uttag)

Konstant RF 7 månader (andra uttag)

4.2 Försöksmaterial: stål

Kolstålplåt med beteckningen 1.0330 enligt EN 10027-2 klipptes till mindre bitar med dimensionen: 80 x 10 x 1 mm. Kolstålets sammansättning visas i tabell 1. Efter klippningen avfettades plåtarna i trikloreten: 5 minuter i kall trikloreten med ultraljudsomsrörning därefter 30 sekunder i trikloretenång. Denna procedur upprepades 4 gånger. Efter avfettningen stansades plåtarna med ett nummer och därefter vägdes plåtarna.

Tabell 1. Kemisk sammansättning

C	P	S	Mn	Fe
0,12	0,045	0,045	0,6	Bal.

4.3 Försöksmaterial: Cementbruk

4.3.1 Sammansättning

Försöken utfördes på ett cementbruk med vct 0,50. Cementet var Cementa Anläggningscement CEM I 42,5 N MH/SR/LA (lågalkaliskt, sulfatresistent). Sanden var Åstorp Betonggrus ur vilken allt material större än 2 mm siktades bort.

4.3.2 Gjutning och härdning

Gjutningen genomfördes på Lunds Tekniska Högskola den 20:e och 23 juli 2008.

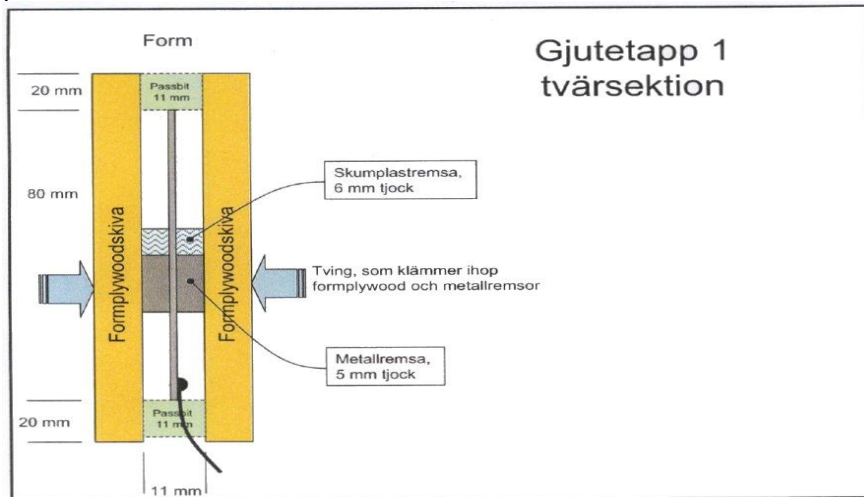
För att få plåtarna helt omgivna av bruk och utan störande gjutfogar utfördes gjutningen i två steg. Det första steget visas i figur 4. Formen utgjordes av plywoodskivor som väggar. Mellan skivorna sattes plåtarna med två 5 mm distanser som klämdes ihop med en tving på utsidan av skivorna, täckskiktet blev således 5 mm. Flera plåtar klämdes fast i samma form med ca 30 mm mellanrum. Ovanför distanserna sattes skumplast som fungerade som botten när första delen göts.

När den första delen hade gjutits vändes formen uppochner och distanserna och skumplasten togs bort såsom visas i figur 5. Därefter göts den andra delen. Fördelen med denna gjutmetod är att man kan gjuta vått-i-vått, vilket minskar risken att gjutfogen skall få annan porstruktur än övriga delar av

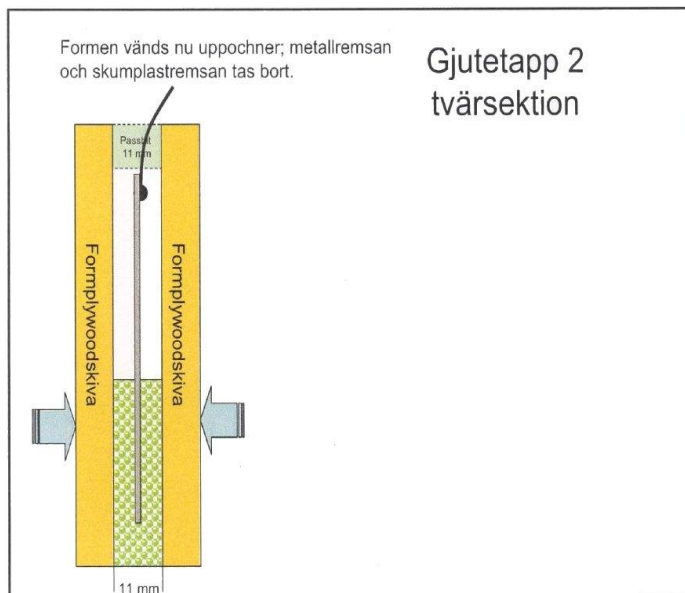
bruket. Detta hade kunnat medföra annan transporthastighet för både fukt och klorider just i fogen.

Dagen efter gjutning avformades göten och placerades i täta plastpåsar, där de förvarades under ett antal månader.

Provkroppar sågades ut ur göten så att de ingjutna stålbitarna kom att ligga mitt i provet och med ett täckskikt av cirka 5 mm, se figur. Efter sågningen placerades provbitarna återigen i täta plastpåsar fram till att proverna placerades i saltbad.



Figur 4. Schematisk bild av gjutform och placering av stålprov i gjutformen vid den första fyllningen av formen (till halva höjden).



Figur 5. Schematisk bild av gjutform och stålprov vid den fortsatta gjutningen (sedan formen vänts upp och ned).

4.4 Tillsättning av klorider

Efter härdning tillfördes klorider till betongen genom att sänka ner betongproverna i ett kloridbad. Kloridbadet hade koncentrationen 165 g NaCl per dm^3 och proverna var nedsänkta i 5 veckor. Denna koncentration valdes enligt Nordtest Method NT BUILD 443.

4.5 RF-nivåer

När kloridexponeringen var klar fördelades provkropparna i klimatlådor med olika relativ fuktighet, se figur 6. De relativa fuktigheterna i klimatlådorna skapades med en mättad saltlösning i en skål som placerades i botten av klimatlådan. Luften i lådan cirkulerades med hjälp av en liten fläkt utan väsentlig värmeavgivning. För att uppnå stabila förhållanden förvarades lådorna i ett klimatrums med styrt klimat 20°C/55%RF.

De mättade saltlösningarna och avsedda RF-nivåer redovisas i tabell 2.



Figur 6. Prover i klimatlådor.

4.6 Potentialmätning

Den elektrokemiska potentialen för stål ingjutet i betong påverkas starkt av betongens relativa fuktighet. Detta samband avsågs utnyttjas i försöken genom att extra provkroppar göts upp. I dessa hade en kabel anslutits till stålplåten möjliggörande potentialmätning med en extern referenselektrod. För varje relativ fuktighet tillverkades således två extra provkroppar med denna mätmöjlighet. Syftet var att fastställa då en jämvikt inställt sig mellan betongens fuktighet och den omgivande luftens konstanta relativa fuktighet. Då detta skett skulle referensproverna (uttag ett) brytas. Spridningen var dock stor mellan de enskilda proven vid samma RF och förändringarna i tiden svårtolkade. Mätresultaten återfinns i appendix 9.1, men någon ingående tolkning har inte utförts.

Istället förlängdes exponeringstiden innan referensproverna bröts (uttag ett) till dess att stabila förhållanden antagits råda.

Tabell 2. Mättad saltlösning och avsedd relativ fuktighet samt antal prover

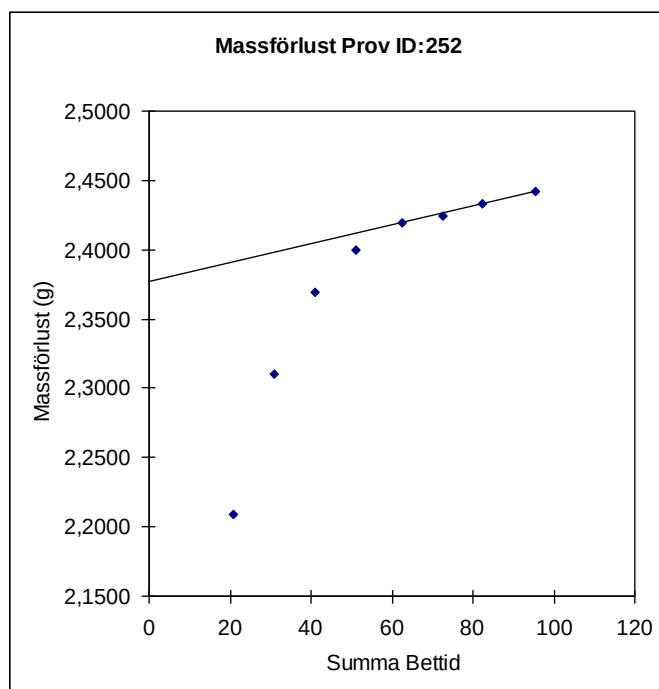
Mättad saltlösning	Relativ fuktighet	Antal prover Uttag 1	Antal prover Uttag 2
NaCl	75%	2	3
NH ₄ Cl	80%	2	3
KCl	85%	2	3
K ₂ CrO ₄	88%	2	3
ZnSO ₄	90%	2	3
BaCl ₂	91%	2	3
KNO ₃	94,7%	3	3
CaHPO ₄	95%	3	3
K ₂ SO ₄	97%	3	3
CaSO ₄	98%	3	3
H ₂ O	100%	2	3

4.7 Metodik för bestämning av massförlust till följd av korrosion

Med en bestämd massförlust under en viss tid kan en korrosionshastighet beräknas. För att bestämma massförlusten tas korrosionsprodukterna bort från armeringsytan. Detta sker genom betning i ett syrabad, Clark's lösning, bestående av 1000 ml saltsyra (HCl, $\rho = 1,84$ g/ml), 20 g antimontrioxid (Sb₂O₃) samt 50 g tenn(II) klorid (SnCl₂).

Lika viktigt som att alla korrosionsprodukter tas bort är att betsyran inte angriper grundmaterialet. Detta motverkas genom tillsats av inhibitorer. Eftersom det är mycket svårt att avgöra när alla korrosionsprodukter är borta och angrepp startar på grundmaterialet utförs så kallad upprepad betning. Efter varje betning, sköljning, torkning vägs provet. Då ytan är renbetad från

korrosionsprodukter kommer förändringen i massförlust att vara konstant för varje därpå följande betperiod. Genom att plotta massförlust mot bettid erhålls en kurva liknande den i figur 7. Från denna kurva kan massförlusten pga korrosion mycket exakt beräknas. Slutligen beräknas en korrosionshastighet mha massförlust, stålarea, kolstålets densitet och exponeringstid. Massförlustbestämningen utfördes enligt ISO 8407 med undantaget att betperioden valdes till 30 sekunder och inte 1-25 minuter p.g.a. små mängder korrosionsprodukter.



Figur 7.Exempel på betkurva.

4.8 Metodik för bestämning av kloridinnehåll

Kloridhalterna bestämdes genom upplösning av provkroppsmaterialet i salpetersyra följt av mätning med jonselektiv elektrod i den erhållna lösningen. Mätningen utfördes av Cement- och Betonginstitutet (CBI) enligt intern, ackrediterad provningsmetod. Separat protokoll redovisas i appendix 9.6. Mätning enligt denna metod utfördes endast på proverna i uttag 2.

5 Resultat

5.1 Basdata för cementbruket

Porositet, densitet och vattenmättnadsgrad efter lagring i klimatboxar bestämdes dels då proverna för bakgrundsvärden togs ut, dels då de slutgiltiga mätningarna gjordes. Proceduren var följande:

Provkropparna togs ur klimatboxarna och bröts till mindre prover om cirka $1 \times 3 \times 4 \text{ cm}^3$ för bestämning av nämnda parametrar.

Proverna vägdes omedelbart och placerades sedan i plastpåsar.

Proverna torkades i 60°C (varierande 2-5 dygn). Torrsvikt m_{60} vägdes.

Proverna evakuerades under vakuum ca tre timmar. Vatten tillfördes, vakuumpumpning gjordes ytterligare ca 15 minuter. Proverna fick sedan stå i vatten över natten.

Därefter bestämdes vattenmättad vikt i vatten (vägning under vatten), $m_{s,w}$, och därefter vattenmättad vikt i luft, $m_{s,a}$.

Slutligen torkades proverna i 105°C över natt för bestämning av torrsvikt, m_{dry} (efter avsvälning).

Därefter beräknades följande parametrar:

- Provvoly $V = (m_{s,a} - m_{s,w}) / \rho_{water}$
- Skrymdensitet $\rho = m_{dry} / V$
- Porvoly $V_p = m_{s,a} - m_{dry}$
- Porositet $P = V_p / V$

Provkropparna för bestämning av dessa parametrar blev med nödvändighet små, vilket gör att standardavvikelsen i mätresultaten är större än normalt. Totalt mättes ett 60-tal prover både i juni 2009 och i januari 2010.

Tabell 3. Densitet och porositet för använt cementbruk vct 0,50

	Skrymdensitet [kg/m ³]		Porositet [%]	
	Medelvärde	Stdavv.	Medelvärde	Stdavv.
Bestämning 1 (juni 2009)	2088,4	21,8	51,8	1,3
Bestämning 2 (januari 2010)	2078,6	53,7	22,2	1,9

5.2 Uppmätt RF i proverna

När proverna togs ut ur klimatlåden mättes RF över proverna genom att grova bitar från de krossade proverna placerades i provrör. RF mättes med kalibrerad RF-givare typ Vaisala. Mätvärdena redovisas i tabell nedan.

Tabell 4. Uppmätta RF-värden för varje provbit vid avslutande mätning i januari 2010.

RF-nivåer mätta 2010-01/02					
Prov	Avsedd RF	Givare	Avläst, mV	Korr RF%	Diff (är-bör)
A171	75,0%	36	610	58,5	-16,5
B079	75,0%	26	618	60	-15
B103	75,0%	40	603	60	-15
A096	80,0%	64	804	77,5	-2,5
A107	80,0%	36	766	76	-4
A121	80,0%	29	746	74	-6
A094	85,0%	29	783	78,5	-6,5
A119	85,0%	28	807	81	-4
A158	85,0%	40	793	81,5	-3,5
A196	88,0%	40	589	58	-30
B076	88,0%	26	624	60,5	-27,5
B077	88,0%	28	603	58,5	-29,5
A073	90,0%	35	498	50	-40
A074	90,0%	34	524	50	-40
A149	90,0%	35	497	50	-40
C183	91,0%	64	542	50	-41
C194	91,0%	28	525	50	-41
C195	91,0%	34	543	50	-41
B153	94,7%	34	920	92	-2,7
B167	94,7%	35	902	93	-1,7
B175	94,7%	64	932	92,5	-2,2
B129	95,0%	64	892	87,5	-7,5
B137	95,0%	29	828	83,5	-11,5
B142	95,0%	35	871	89	-6
B111	97,0%	36	679	66,5	-30,5
B113	97,0%	26	682	67	-30
B118	97,0%	40	656	65,5	-31,5
C091	98,0%	35	935	96,5	-1,5
C143	98,0%	34	965	97,5	-0,5
C146	98,0%	28	934	96,5	-1,5
C123	100,0%	29	908	93	-7
C124	100,0%	36	845	85	-15
C166	100,0%	26	951	99	-1

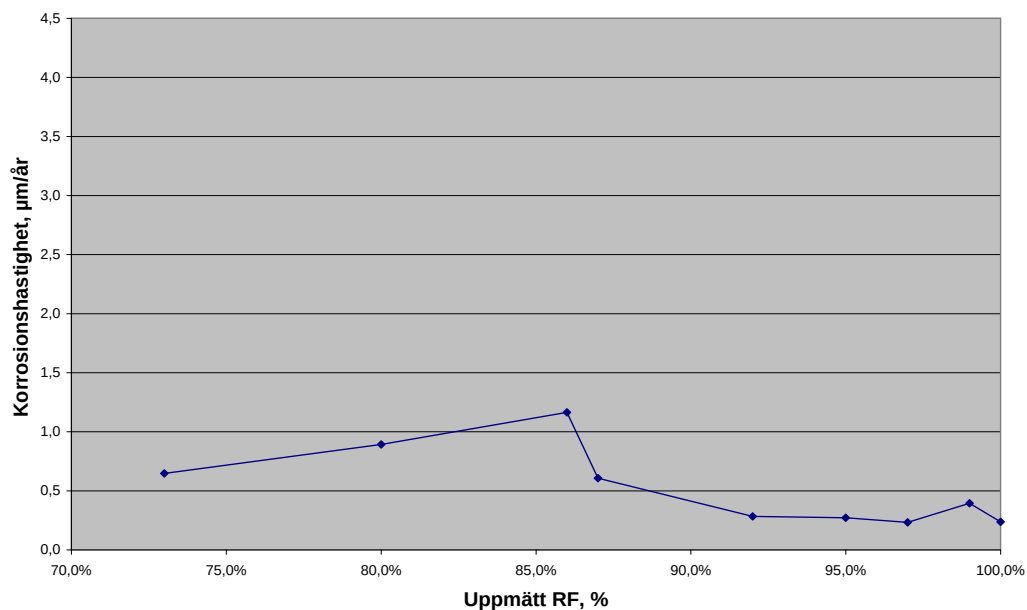
Resultaten visar på förhållandevis stor spridning mellan enskilda prov när det gäller betongens relativa fuktighet. Vidare konstaterades skillnader mellan den förväntade relativa fuktigheten i klimatlådorna och uppmätt RF. I den fortsatta utvärderingen redovisas resultaten i förhållande till uppmätt RF i lådorna.

Tabell 5. Avsedd och uppmätt luftfuktighet

Avsedd RF%	Uppmätt RF%
75%	73%
80%	80%
85%	87%
88%	87%
90%	86%
91%	92%
94,7%	92%
95%	97%
97%	95%
98%	99%
100%	100%

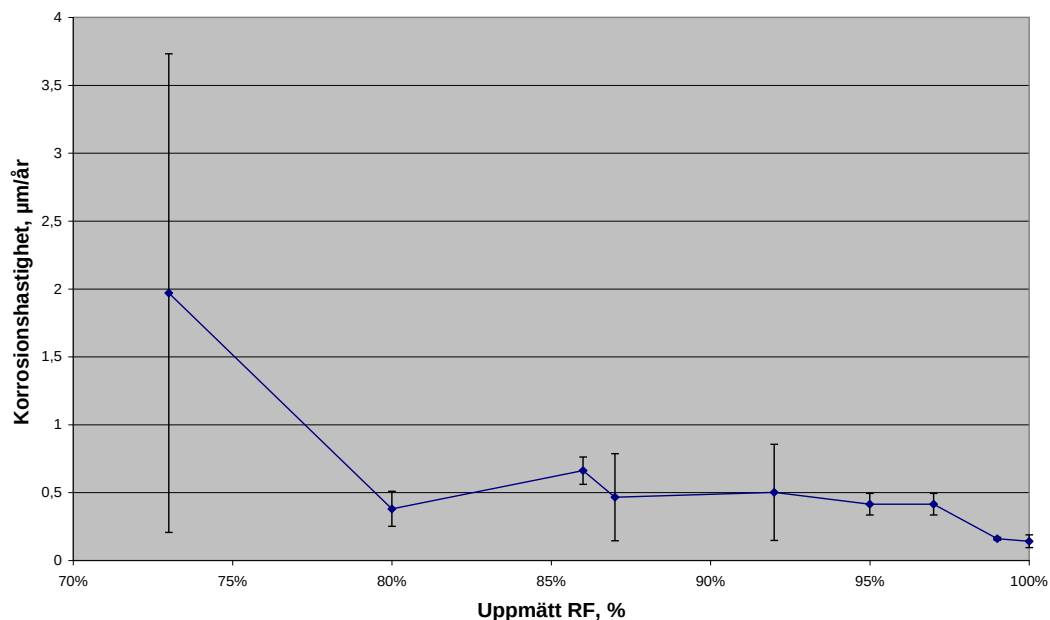
5.3 Samband korrosionshastighet – RF-nivå

Uppmätta massförluster och beräknade korrosionshastigheter återges i appendix 9.2 och 9.3. Korrosionshastigheterna efter det första uttaget återges i figur 8. De i figuren redovisade värdena är beräknade som jämn korrosion över hela stållytan. Korrosionshastigheterna är mycket låga, i intervallet 0,2 till 1,2 $\mu\text{m}/\text{år}$. Detta beror på att angreppen till den helt dominerande delen var av lokal karaktär, gropfrätning, och att andelen av den totala ytan som uppvisade angrepp var liten.



Figur 8. Medelvärden för prov från uttag ett (insvängningsperioden) som funktion av i klimatlådnorna uppmätta relativa fuktigheter.

Motsvarande resultat efter uttag två presenteras i figur 9.



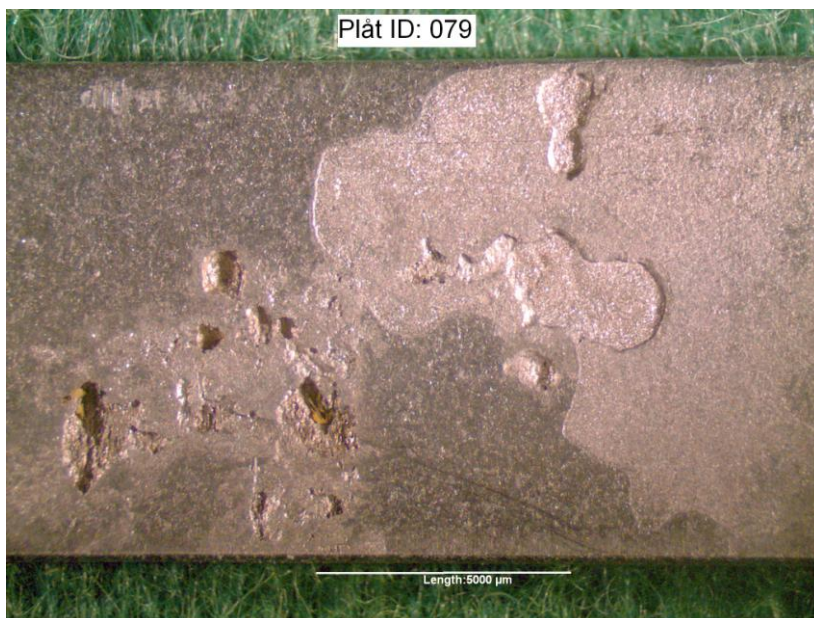
Figur 9. Medelvärden för prov från uttag två som funktion av i klimatlådnorna uppmätta relativa fuktigheter.

Som framgår av diagrammet är korrosionshastigheterna av samma storleksordning som efter uttag ett, med undantag för proven exponerade vid 73 % relativ fuktighet. I diagrammet redovisas även spridningen i resultaten

som var mycket stor vid just 73 % fuktighet. Störst angrepp konstaterades vid "gjutfog" och hörn på de två prov som uppvisade höga korrosionshastigheter, se figur 10 och 11. Vår bedömning är att det funnits defekter i betongen som påverkat korrosionsförloppet och att proven vid 73 % inte är direkt jämförbara med övriga prov.

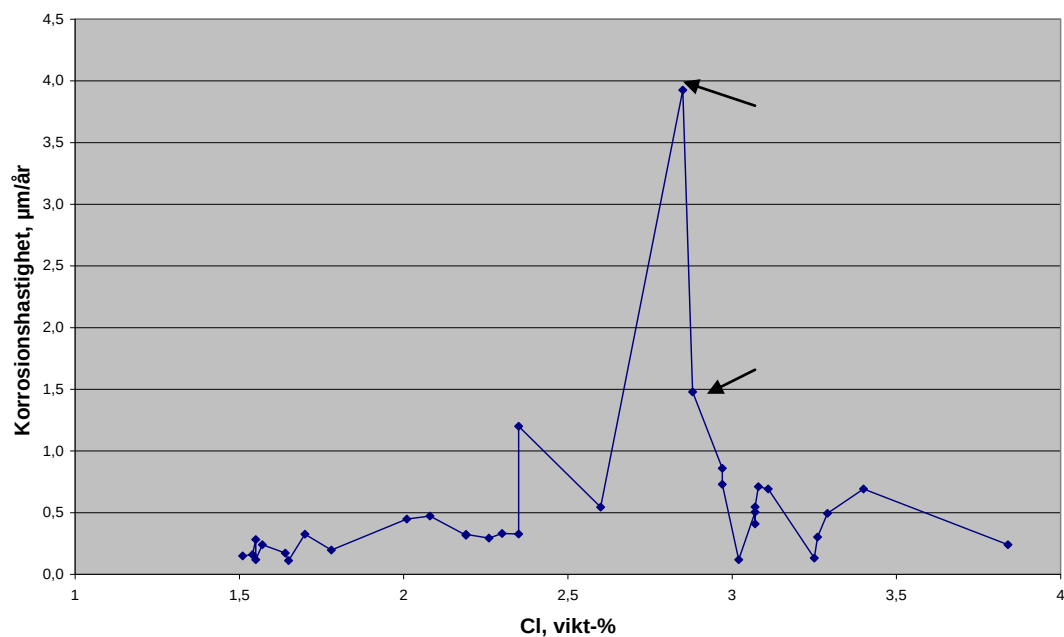


Figur 10. Lokala angrepp vid hörn på prov 171 (uttag 2), exponerat vid 73 % relativ fuktighet.



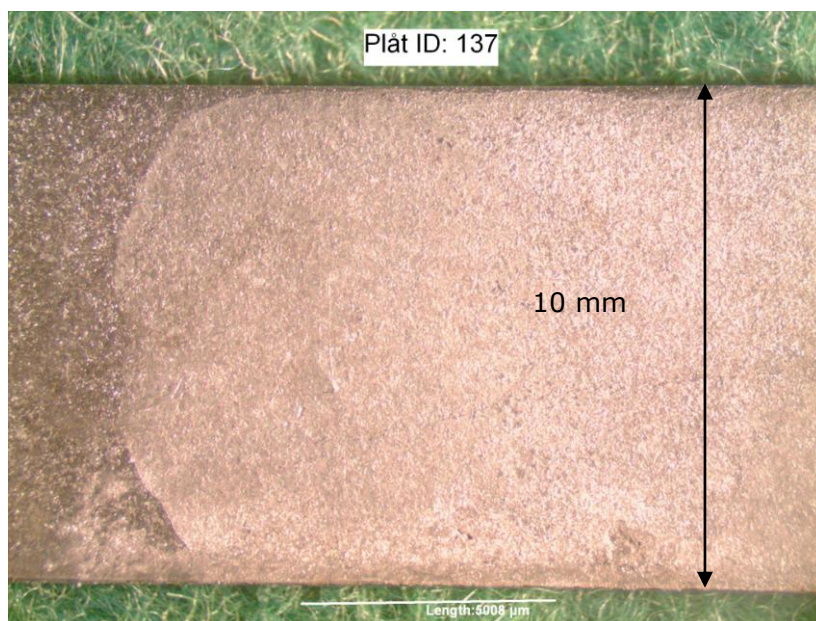
Figur 11. Lokala angrepp vid hörn på prov 79 (uttag 2), exponerat vid 73 % relativ fuktighet.

Dessa prov sticker också ut då vi jämför korrosionshastigheten mot uppmätt kloridhalt, se figur 12. För övriga prov finns inget tydligt samband mellan korrosionshastigheten och kloridhalten, vilket är det förväntade resultatet vid kloridhalter överstigande 1,5 % eftersom rimligtvis "kloridtröskelvärde" är passerat för samtliga prov. I propageringsfasen bestäms inte korrosionshastigheten av kloridhalten. Vattenhalten dvs optimal tillgång på syre och vatten är styrande.



Figur 12. Förhållandet mellan uppmätt korrosionshastighet och provernas kloridhalt i uttag två.

Resterande 31 prov uppvisade enstaka frätgropar och i vissa fall en jämn korrosion, se figur 13. Hur en helt oangripen yta ser ut åskådliggörs i figur 14. Ytan hos samtliga prover återges i bilaga 3. Trots ansträngningarna att minimera inverkan av en gjutfog har de flesta angreppen initierats på provernas mittparti.

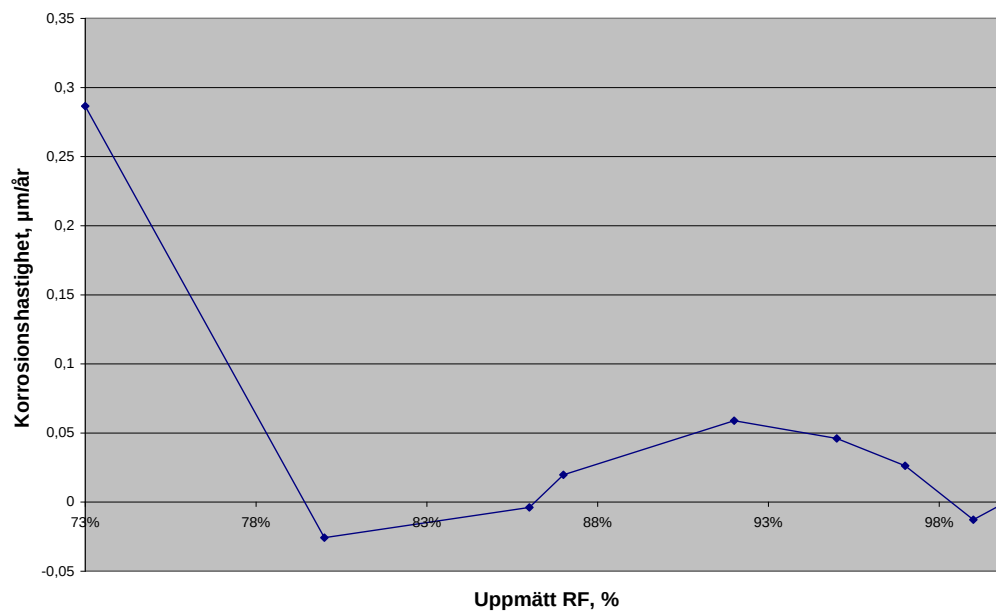


Figur 13. Allmän korrosion på prov 137 (uttag 2), exponerat vid 97 % relativ fuktighet.



Figur 14. Oangripen yta på prov 111 (uttag 2), exponerat vid 95 % relativ fuktighet.

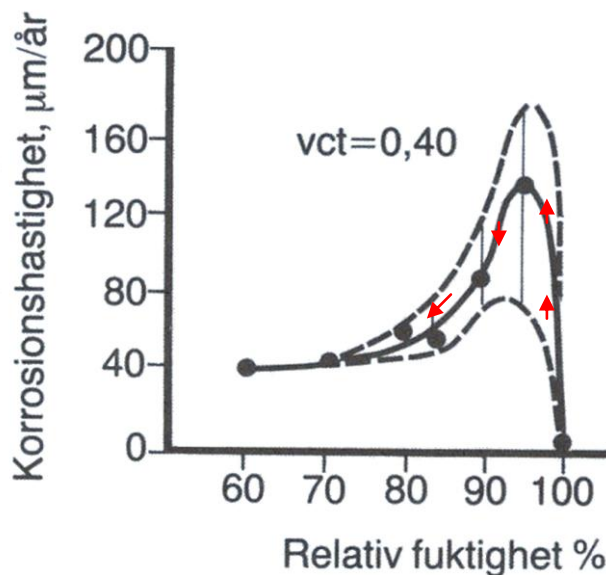
Om vi subtraherar den för varje fuktighetsnivå uppmätta korrosionen under period ett, räknat som medelvärde av alla prov vid en och samma fuktighet, från motsvarande värde efter period två erhålls det resultat som visas i figur 15. Bortser vi från resultatet för 73 % relativ fuktighet syns en tendens till att mätbar korrosion endast uppstår i intervallet 90 till 97 % relativ fuktighet.



Figur 15. Beräknad korrosionshastighet under perioden från 182 till 405 dygn dvs perioden då förväntat konstanta fuktighetsförhållanden förelegat.

6 Diskussion

Våra försök antyder att mätbar korrosion endast uppstår i ett snävt fuktighetsintervall, 90-97 % relativ fuktighet. Att uttag ett uppvisade högre korrosionshastigheter vid lägre fuktighet än vid högre fuktighet tror vi beror på provernas historia. Dessa prover har nämligen under exponeringsperioden befunnit sig i ett fuktillstånd där korrosionshastigheten är hög, se figur 16. Under denna inledande period hade proverna som exponerades vid hög relativ fuktighet ännu inte erhållit en för korrosionen kritisk fuktighet och uppvisade lägre korrosionshastighet.



Figur 16. Fuktighetens och därmed korrosionshastighetens förändring för prover förvarade vid låg relativ fuktighet under period ett.

Inverkan av den relativa fuktigheten har också studerats av Karin Pettersson (2). Hon redovisade hur kloridtröskelvärdet varierar med den relativa fuktigheten.

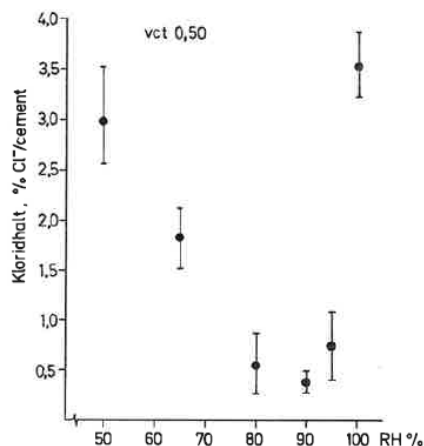
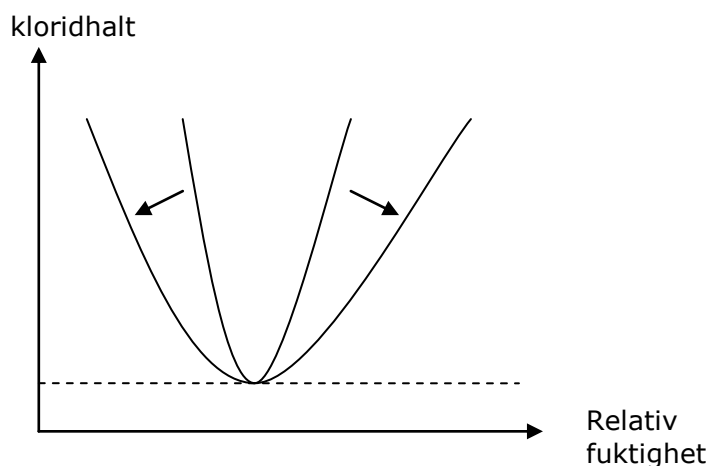


FIG 27. Kloridtröskelvärden för bruksprover, vct 0,50, vid olika relativa fuktigheter.

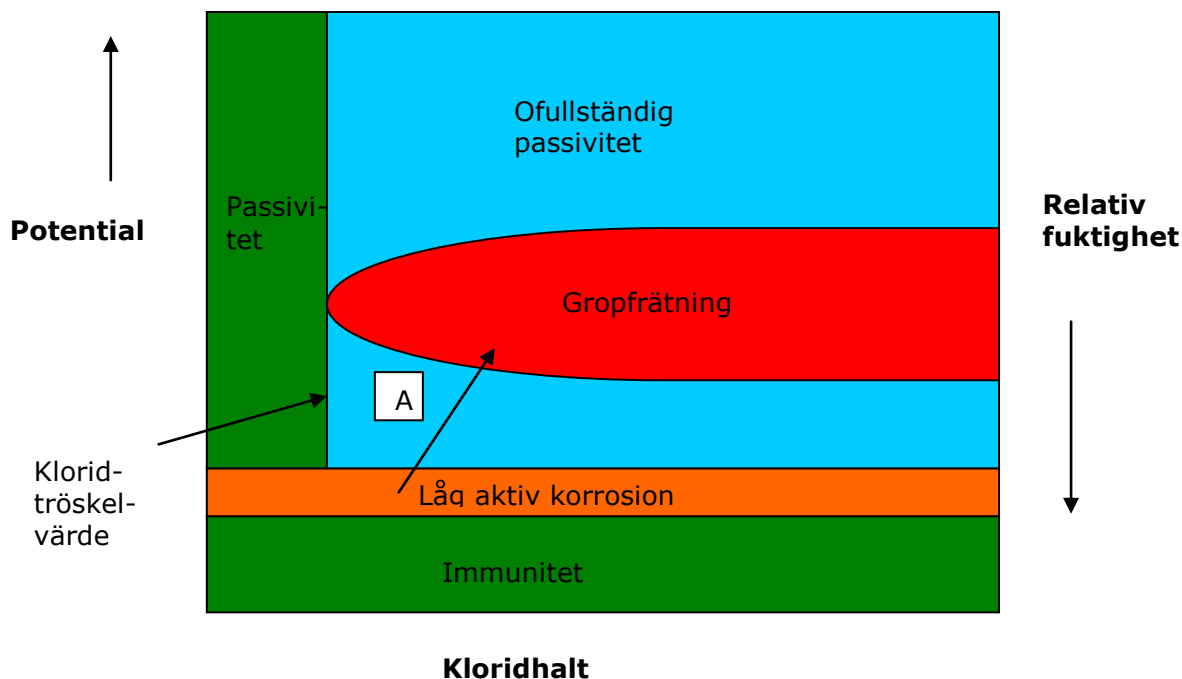
Figur 17. Kloridtröskelvärden vid olika relativa fuktigheter (2).

De höga tröskelvärdena vid låga fuktigheter ansåg Pettersson berodde på hög resistans i betongen. Motsvarande förklaring vid mycket högt fuktillstånd ansåg hon vara försvårad syrediffusion. Det är riktigt att korrosionshastigheten påverkas av både betongens resistivitet och syrepermeabilitet. Viktigt att uppmärksamma är dock att det i undersökningen valda kriteriet för initiering hade satts till en anodisk strömtäthet på $10 \mu\text{A}/\text{m}^2$. Detta motsvarar en korrosionshastighet på $0,1 \text{ mm}/\text{år}$, vilket är en hög korrosionshastighet om man betänker att en korrosion på $0,15 \text{ mm}$ räcker för att spjälka av täcksiktet. Hade kriteriet satts lägre hade kurvan fått ett annat utseende, se figur 18.



Figur 18. Principiell förändring av "Kloridtröskelvärden" vid olika relativa fuktigheter då kriteriet för initiering sänks.

Vår bedömning är att det finns ett kloridtröskelvärde då stålet inte längre är passivt, se streckad linje i figur 18. Detta tröskelvärde är oberoende av den relativa fuktigheten. Propageringshastigheten styrs dock av den relativa fuktigheten. Följande principiella diagram kan åskådliggöra förhållandena.



Figur 19. Principiellt potential – kloriddiagram.

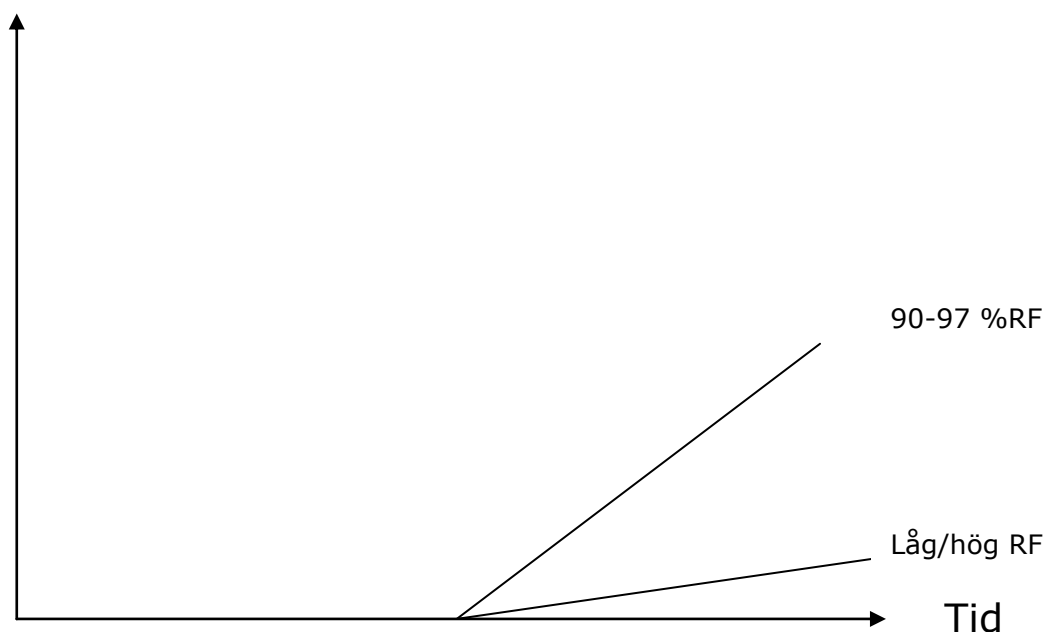
Stålets potential är beroende av betongens relativa fuktighet (y-axeln). Vid mycket negativa potentialer är stålet immunt. Detta motsvarar ett fullständigt katodiskt skydd. Vid något mer positiva potentialer korroderar stålet aktivt men med en försumbar hastighet. Detta motsvarar förhållandena i vattenmättad betong (oranget område).

Vid låga kloridhalter, under tröskelvärdet, är stålet passivt. Kloridhalter överstigande tröskelvärdet medför att stålet förlorar sin passivitet. För att gropfrätning, med en propageringshastighet av betydelse, ska ske måste dock den relativa fuktigheten ligga inom ett snävt intervall, kring 95% (rött område). Vid högre eller lägre relativa fuktigheter blir korrosionshastigheten avsevärt lägre, stålet har en ofullständig passivitet. För att korrosionen ska bli besvärande vid dessa fuktigheter krävs kloridhalter som är betydligt högre än tröskelvärdet.

Att angreppen endast var av lokal karaktär indikerar att defekter i betongen är av stor betydelse. Angrepp initieras troligen i porer/håligheter. I dessa kan mikroklimatet vara annorlunda än i bulken. Låt oss anta att vi har en kloridrik vattenmättad betong och en hålighet nära armeringen som är helt vattenfylld. Om betongen tillåts torka kommer, vid en viss relativ fuktighet,

vatteninnehållet i håligheten att minska. I och med detta ökar kloridkoncentrationen i håligheten. Vi rör oss enligt pil A i ovanstående figur. Vi kan således konstatera att det sannolikt finns ett specifikt kloridtröskelvärde då stålet förlorar sin passivitet. Över detta värde kan stålet vara ofullständigt passivt (låg respektive mycket hög relativ fuktighet) eller angripas av allvarlig gropfrätning (ca 90-97 % RF). I båda fallen är initieringsskedet slut och man befinner sig i propageringsfasen. Korrosionshastigheten kan dock skilja med tiopotenser och avgöra om angreppen har praktisk betydelse eller inte, se figur 20.

Korrosion



Figur 20. Propageringshastigheter vid olika relativa fuktigheter.

Framtida bestämmningar av tröskelvärden bör utföras vid 95% RF och med den procedur som föreslagits, nämligen med referensprover som bryts då den relativa fuktigheten i betongen har stabiliserats.

7 Slutsatser

Den genomförda undersökningen medger följande slutsatser:

- Det finns med stor sannolikhet ett kritiskt kloridtröskelvärde för varje betongkvalite.
- Vid kloridhalter överstigande tröskelvärdet förlorar stålet sin passivitet.
- Huruvida allvarlig korrosion sker eller inte vid kloridhalter över tröskelvärdet avgörs av den relativa fuktigheten.
- I ett snävt intervall kring 95 % RF uppstår gropfrätning då tröskelvärdet överskridits. Vid lägre RF respektive mycket hög RF har stålet en ofullständig passivitet och korrosionen blir i de flesta fallen marginell.
- Framtida undersökningar av kritiska tröskelvärden bör utföras vid en relativ fuktighet av 95 % och med referensprover enligt föreslagen procedur.

8 Litteraturförteckning

1. Tuutti, K: Corrosion of steel in concrete, Cement- och Betonginst., CBI Research 4.82, 1982
2. Pettersson, K. (1992). Corrosion threshold value and corrosion rate in reinforced concrete, CBI R2:92. Stockholm: CBI.
3. Fagerlund, G: betongkonstruktioners beständighet – En översikt. Cementa. Danderyd. Nov 1992.

9 Appendix

9.1 Uppmätta potentialer under klimatisering

Avsett RF%	Uppmätt RF%	Provkropp	Avläst 081219	Avläst 090105	Avläst 090130	Avläst 090220	Avläst 090318	Avläst 090910
90,0%	86%	E005	-0,455	-0,420	-0,391	-0,373	-0,210	-0,151
		E006	-0,308	-0,370	-0,432	-0,409	-0,317	-0,188
		E007	-0,428	-0,236	-0,393	-0,400	-0,248	-0,110
91,0%	92%	D038	-0,426	-0,304	-0,532	-0,396	-0,262	-0,212
		E001	-0,389	-0,388	-0,479	-0,348	-0,312	-0,301
97,0%	95%	D016	-0,410	-0,175	-0,182	-0,195	-0,151	-0,203
		D019	-0,166	-0,524	-0,400	-0,308	-0,444	-0,099
		D020	-0,232	-0,480	-0,579	-0,465	-0,500	-0,360
75,0%	73%	E028	-0,195	-0,180	-0,474	-0,503	-0,511	-0,273
		E035	-0,470	-0,395	-0,374	-0,364	-0,345	-0,270
		E037	-0,491	-0,446	-0,433	-0,415	-0,519	-0,365
98,0%	99%	D009	-0,370	-0,491	-0,380	-0,291	-0,276	-0,235
		D010	-0,271	-0,286	-0,386	-0,312	-0,203	-0,118
		D011	-0,550	-0,469	-0,390	-0,400	-0,416	-0,513
88,0%	87%	E015	-0,325	-0,275	-0,250	-0,230	-0,216	-0,397
		E021	-0,440	-0,454	-0,490	-0,488	-0,419	-0,203
94,7%	92%	D033	-0,615	-0,606	-0,619	-0,589	-0,537	-0,457
		D036	-0,424	-0,432	-0,350	-0,318	-0,409	-0,228
		D038	-0,560	-0,447	-0,464	-0,260	-0,256	-0,223
85,0%	87%	E012	-0,415	-0,341	-0,277	-0,204	-0,171	-0,146
		E014	-0,370	-0,414	-0,314	-0,307	-0,369	-0,172
		E026	-0,469	-0,417	-0,404	-0,388	-0,332	-0,182
95,0%	97%	D030	-0,676	-0,537	-0,438	-0,355	-0,679	-0,158
		D031	-0,609	-0,628	-0,683	-0,673	-0,622	-0,352
		D032	-0,488	-0,614	-0,636	-0,616	-0,363	-0,395
80,0%	80%	E023	-0,152	-0,106	-0,499	-0,405	-0,362	-0,500
		E024	-0,292	-0,359	-0,413	-0,375	-0,312	-0,173
		E025	-0,474	-0,449	-0,352	-0,287	-0,137	-0,165
100,0%	100%	D007	-0,460	-0,498	-0,467	-0,472	-0,477	-0,423
		D008	-0,348	-0,315	-0,400	-0,397	-0,420	-0,424

9.2 Massförluster och korrosionshastigheter för uttag 1

Mättad saltlösning	Låda med uppmätt RF%	Prov ID	Massförlust [g]	Korrosionshastighet [$\mu\text{m}/\text{år}$]
NaCl	73,0	90	0,0082	0,896
		141	0,0036	0,397
		Medel	0,006	0,65
NH ₄ Cl	80,0	101	0,0130	1,428
		105	0,0033	0,357
		Medel	0,008	0,89
ZnSO ₄	86,0	75	0,0059	0,651
		110	0,0153	1,677
		Medel	0,011	1,16
KCl	87,0	84	0,0019	0,210
		89	0,0020	0,215
		Medel	0,002	0,21
K ₂ CrO ₄	87,0	72	0,0116	1,269
		187	0,0067	0,733
		Medel	0,009	1,00
BaCl ₂	92,0	87	0,0046	0,507
		146	0,0024	0,262
		Medel	0,004	0,38
KNO ₃	92,0	140	0,0015	0,169
		173	0,0037	0,405
		183	0,0006	0,070
		Medel	0,002	0,215
K ₂ SO ₄	95,0	91	0,0020	0,219
		123	0,0038	0,422
		195	0,0016	0,172
		Medel	0,002	0,271

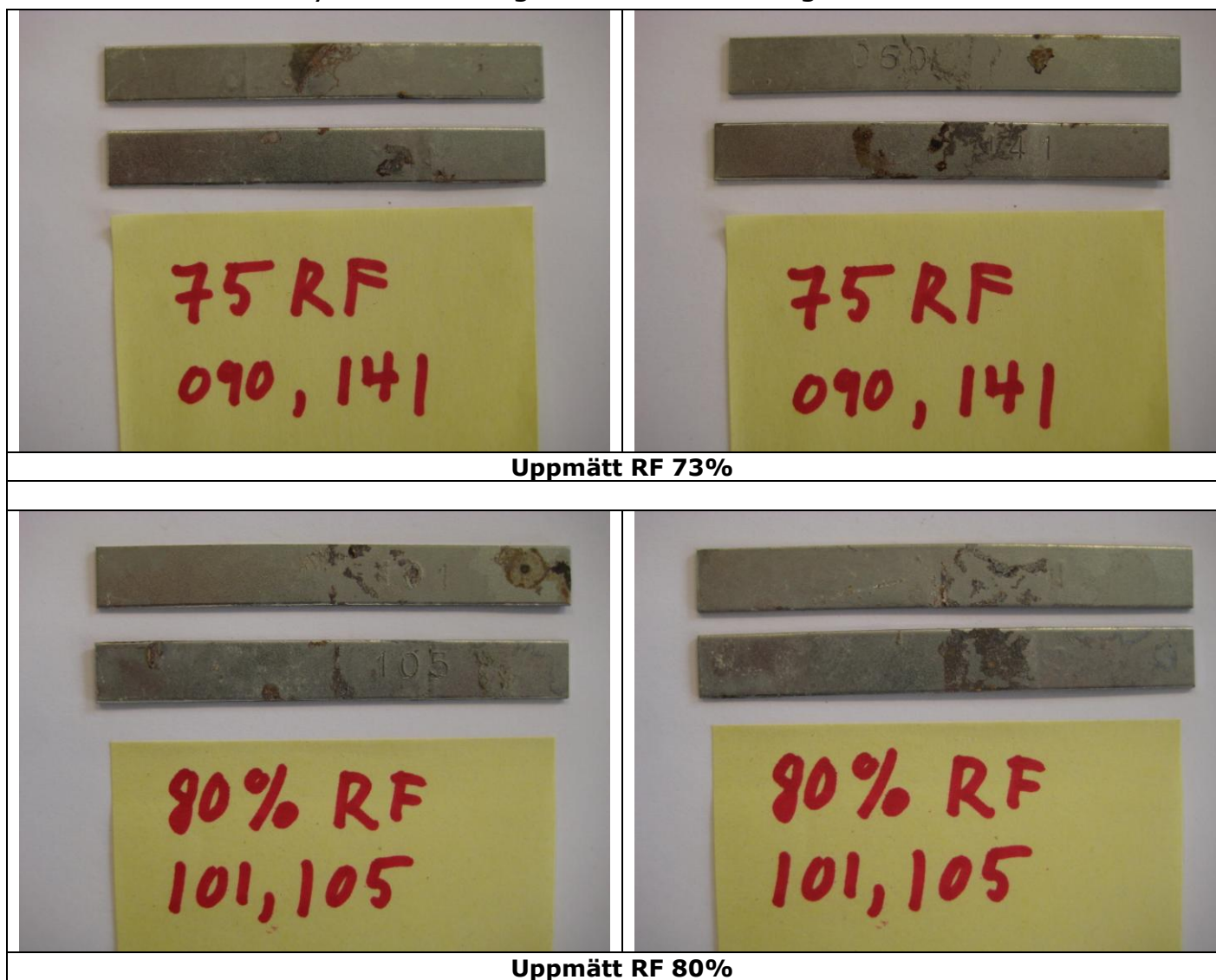
Mättad saltlösning	Låda med uppmätt RF%	Prov ID	Massförlust [g]	Korrosionshastighet [$\mu\text{m}/\text{år}$]
CaHPO₄	97,0	127	0,0034	0,376
		147	0,0016	0,175
		161	0,0014	0,148
		Medel	0,002	0,233
CaSO₄	99,0	106	0,0043	0,472
		108	0,0052	0,571
		169	0,0013	0,138
		Medel	0,004	0,394
H₂O	100,0	122	0,0026	0,280
		166	0,0018	0,193
		Medel	0,002	0,237

9.3 Massförluster och korrosionshastigheter för uttag 2

Mättad saltlösning	Låda med uppmätt RF%	Prov ID	Massförlust [g]	Korrosionshastighet [$\mu\text{m}/\text{år}$]
NaCl	73,0	79	0,023	1,478
		103	0,008	0,504
		171	0,061	3,926
		Medel	0,031	1,97
NH₄Cl	80,0	96	0,008	0,493
		107	0,006	0,408
		121	0,004	0,240
		Medel	0,006	0,38
ZnSO₄	86,0	73	0,011	0,710
		74	0,008	0,546
		149	0,011	0,729
		Medel	0,010	0,66

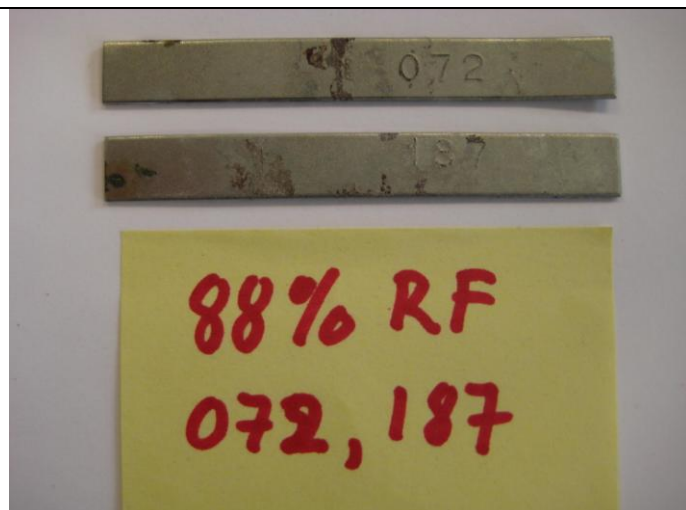
Mättad saltlösning	Låda med uppmätt RF%	Prov ID	Massförlust [g]	Korrosionshastighet [µm/år]
KCl	87,0	94	0,002	0,119
		119	0,002	0,132
		158	0,005	0,301
		Medel	0,003	0,18
K ₂ CrO ₄	87,0	76	0,011	0,692
		77	0,013	0,859
		196	0,011	0,692
		Medel	0,012	0,75
BaCl ₂	92,0	124	0,005	0,327
		131	0,019	1,200
		157	0,008	0,544
		Medel	0,011	0,69
KNO ₃	92,0	153	0,005	0,294
		167	0,005	0,317
		175	0,005	0,331
		Medel	0,005	0,31
K ₂ SO ₄	95,0	111	0,007	0,472
		113	0,007	0,448
		118	0,005	0,324
		Medel	0,006	0,41
CaHPO ₄	97,0	129	0,004	0,240
		137	0,005	0,325
		142	0,004	0,282
		Medel	0,004	0,28
CaSO ₄	99,0	130	0,002	0,149
		154	0,003	0,172
		182	0,002	0,159
		Medel	0,002	0,16
H ₂ O	100,0	125	0,002	0,118
		139	0,003	0,196
		194	0,002	0,110
		Medel	0,002	0,14

9.4 Provernas yta efter uttag 1 och före betning

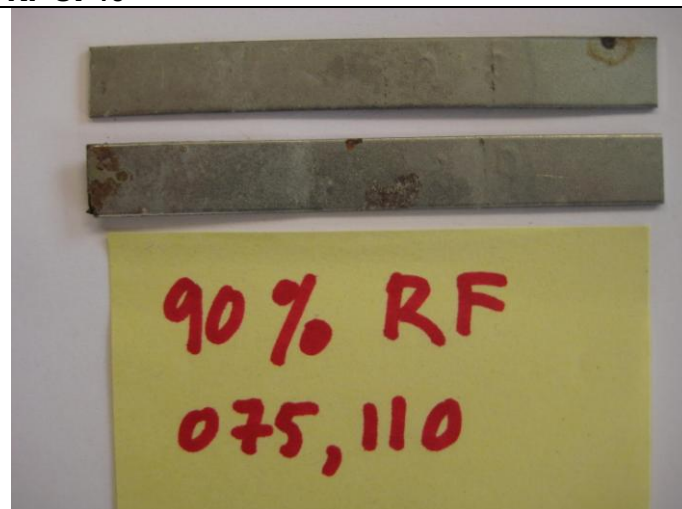




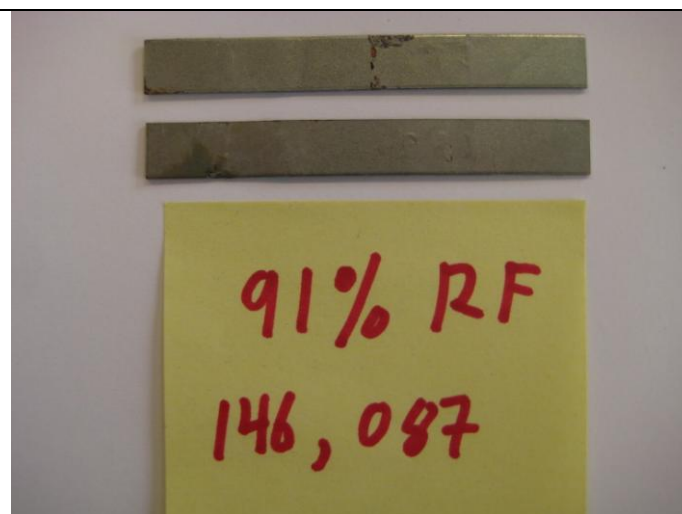
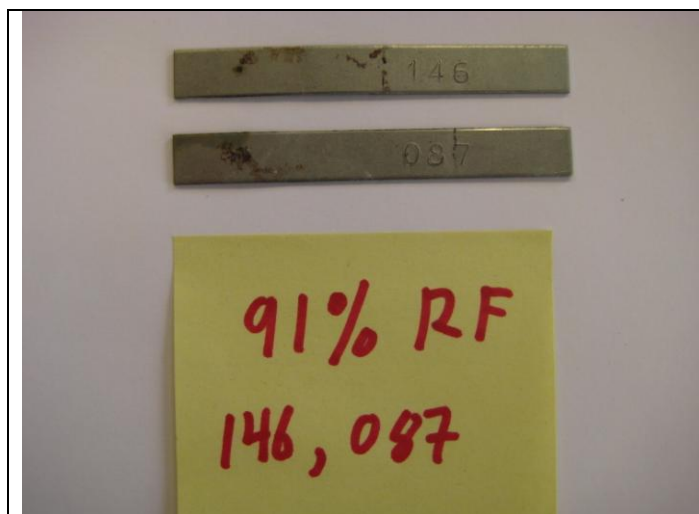
Uppmätt RF 87%



Uppmätt RF 87%



Uppmätt RF 86%



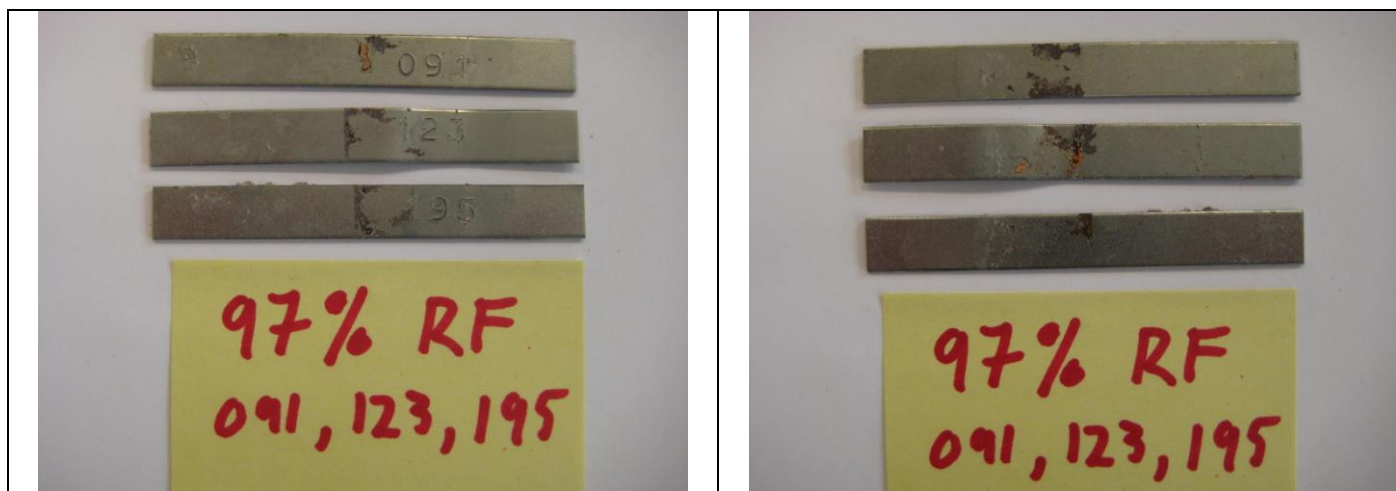
Uppmätt RF 92%



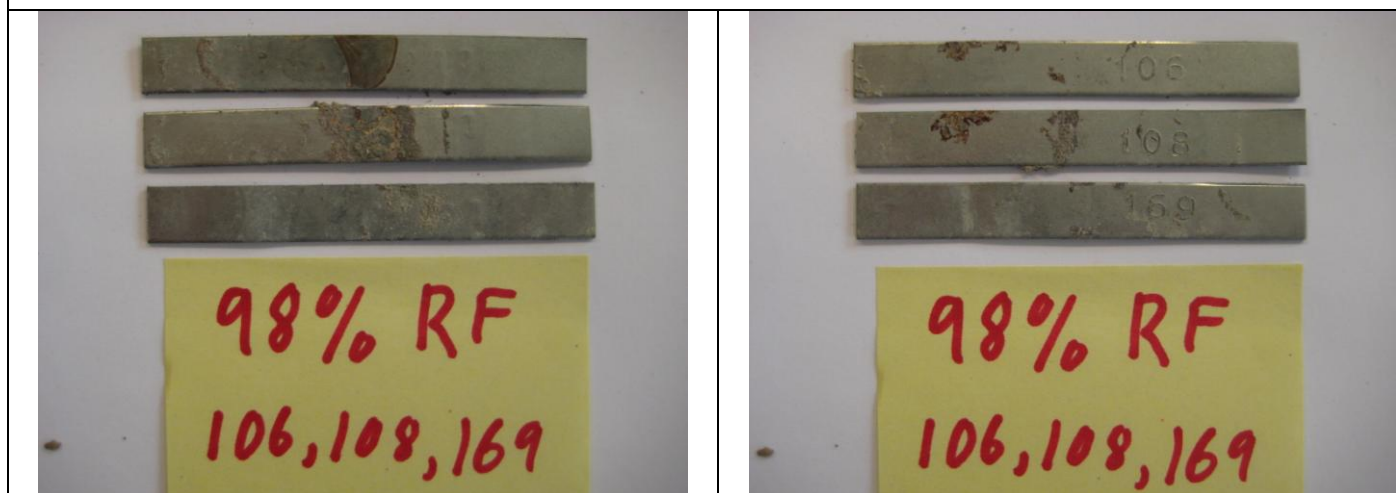
Uppmätt RF 92%



Uppmätt RF 97%



Uppmätt RF 95%

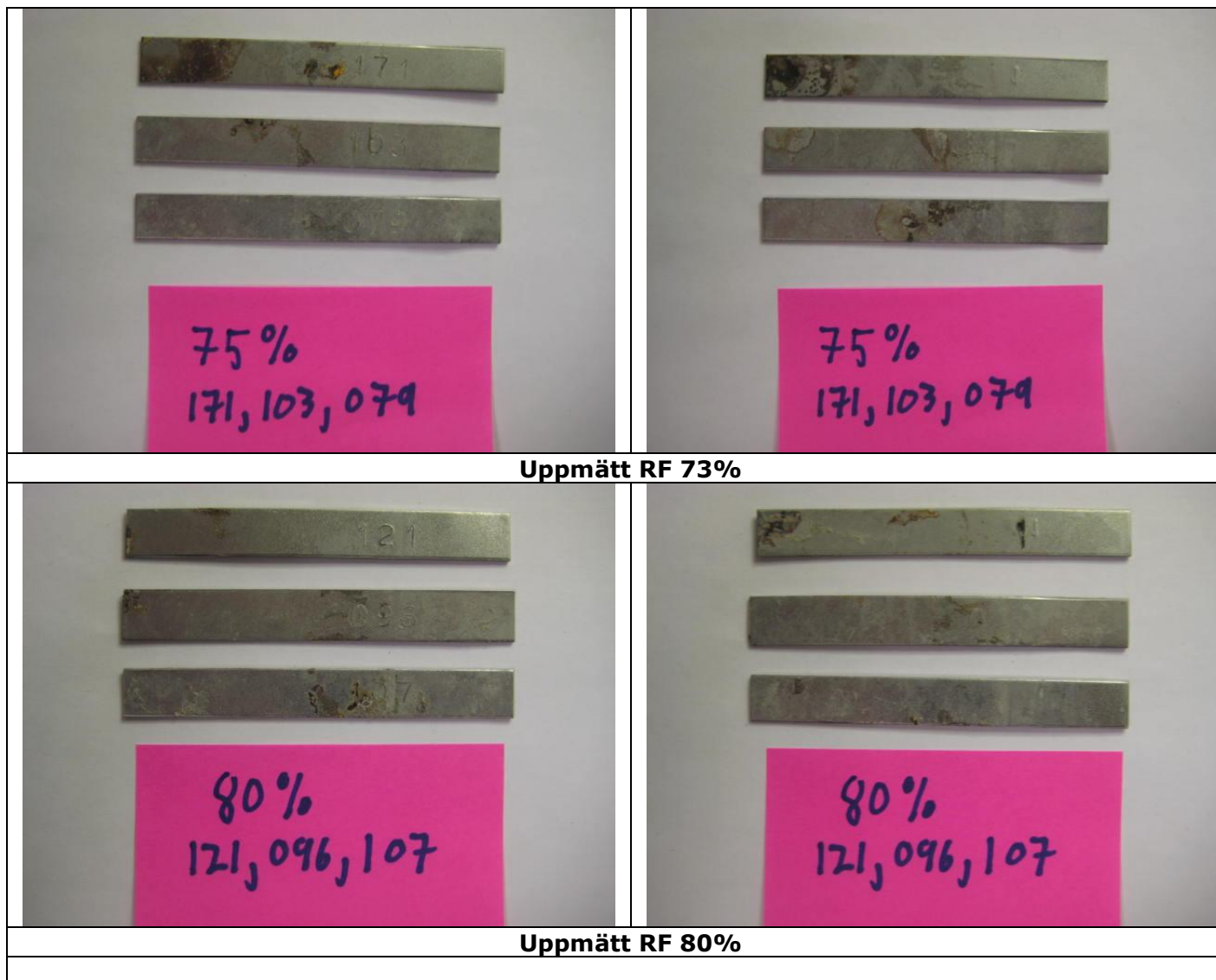


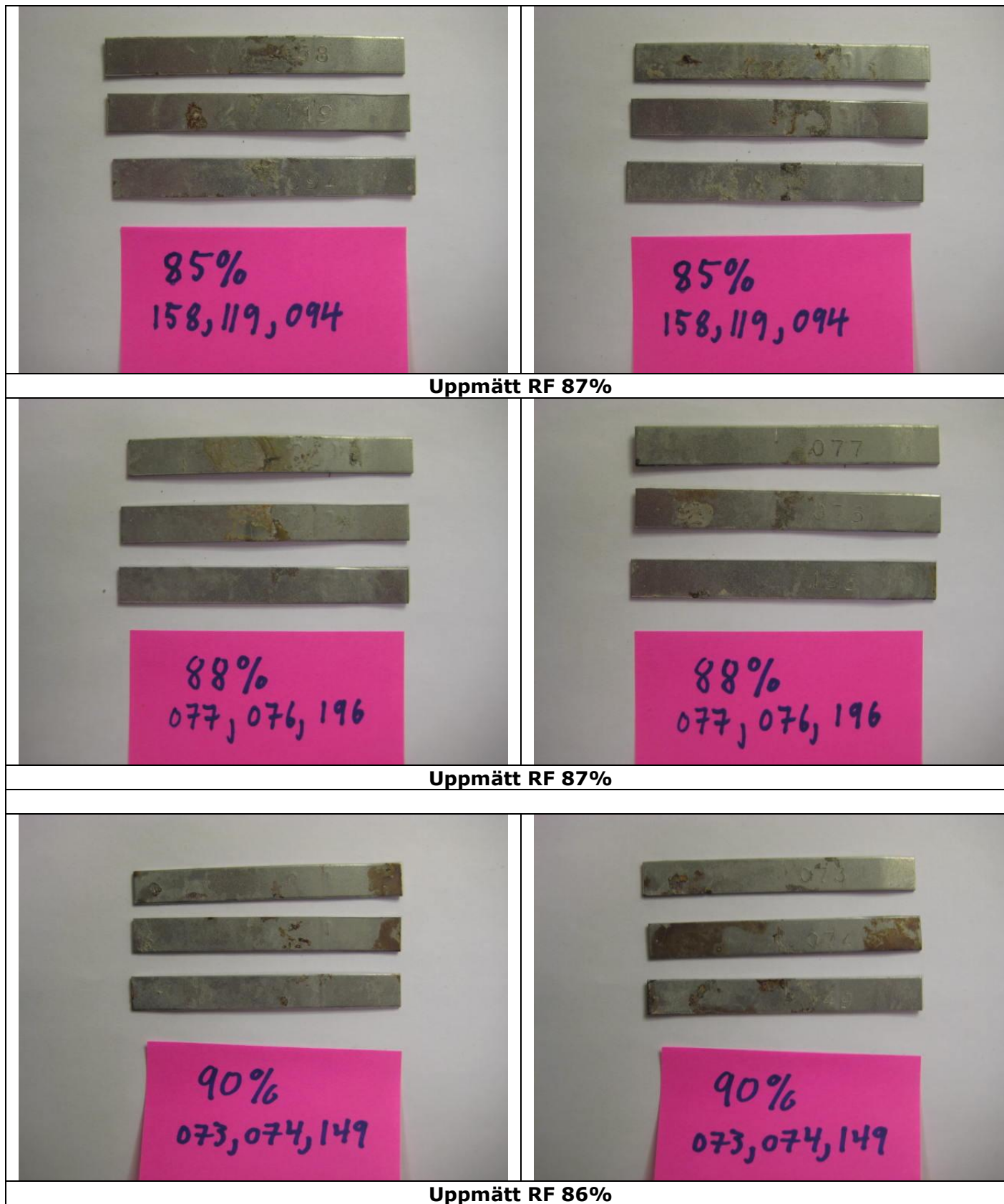
Uppmätt RF 99%

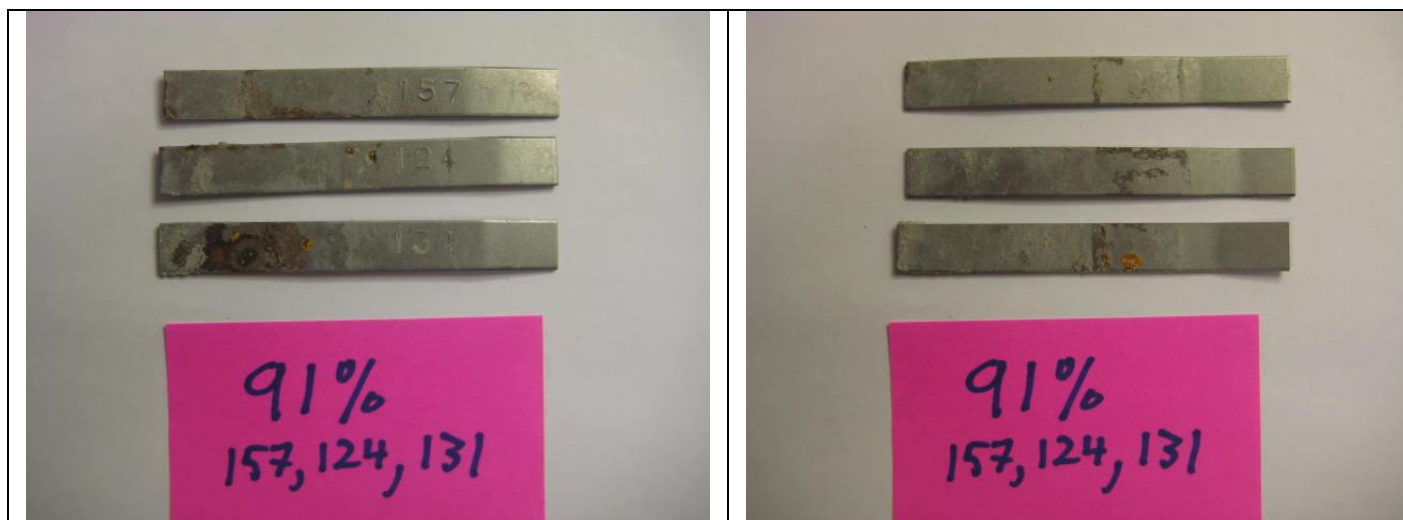


Uppmätt RF 100%

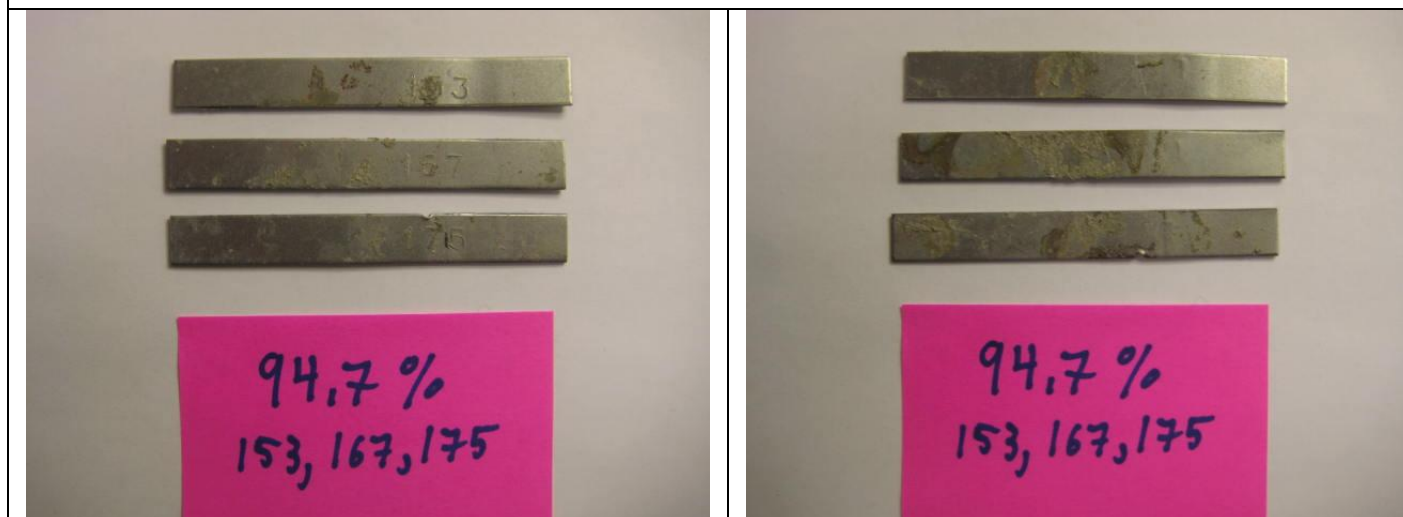
9.5 Provernas yta efter uttag 2 och före betning



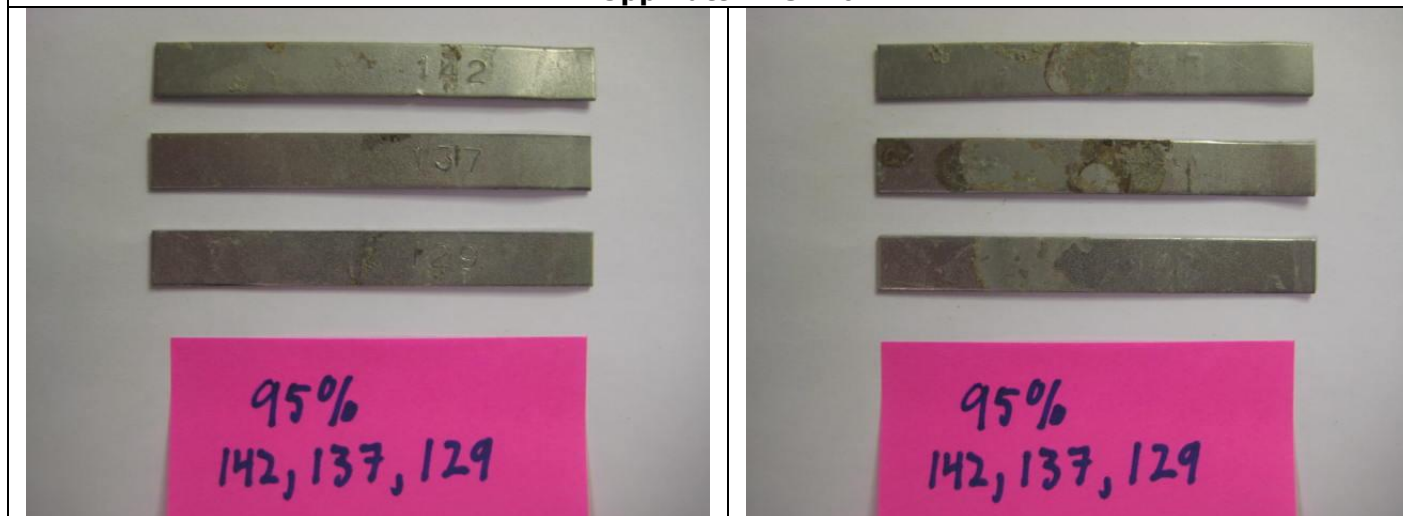




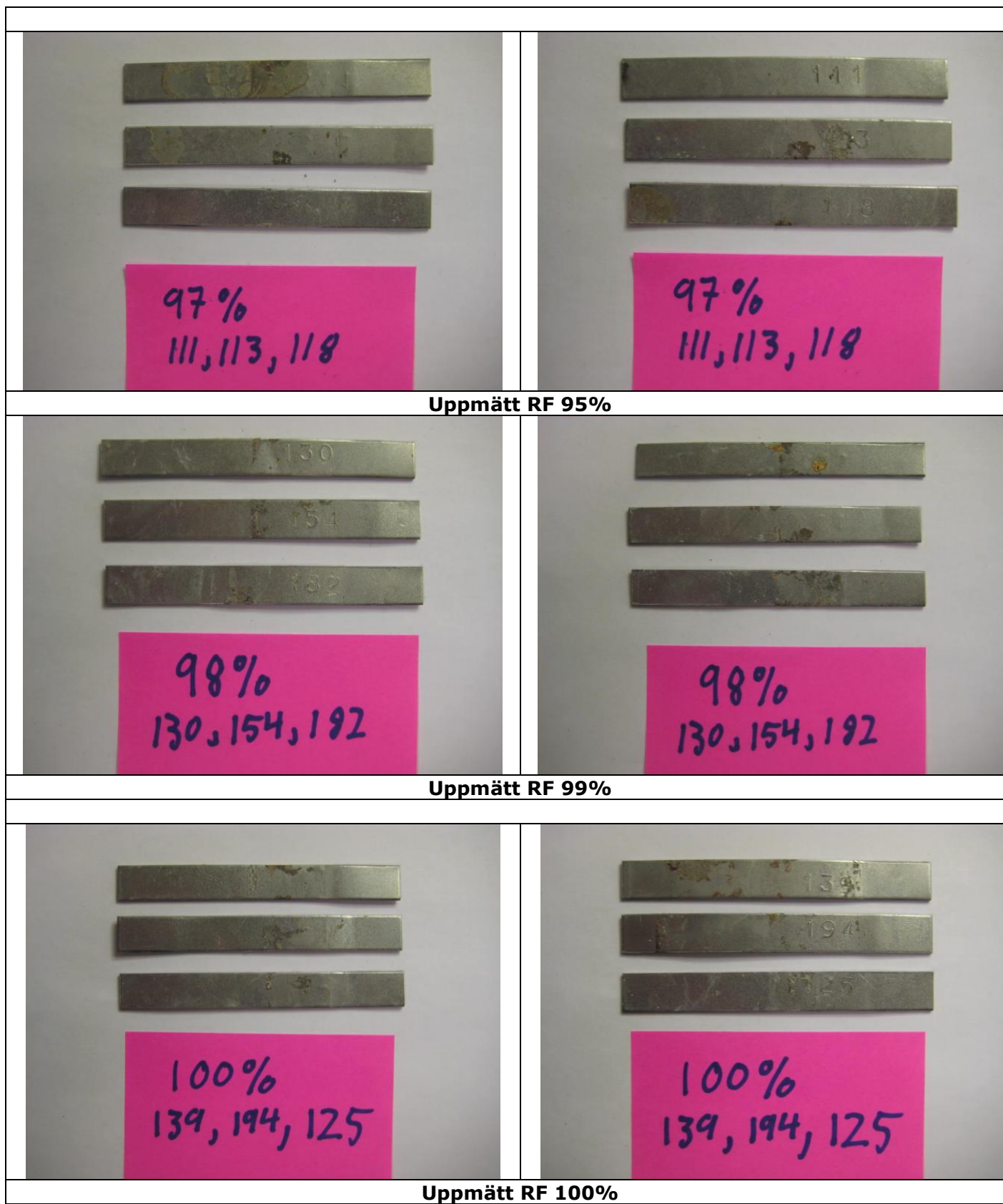
Uppmätt RF 92%



Uppmätt RF 92%



Uppmätt RF 97%



9.6 Protokoll från kloridanalys



CBI Betonginstitutet

Handläggare

Camilla Westerholm

Provning och kontroll, Stockholm

010-516 68 36, Camilla.Westerholm@cbi.se

RAPPORT

utfärdad av ackrediterat provningslaboratorium
TEST REPORT
issued by an Accredited Testing Laboratory

Datum

2010-01-22

Uppdragsnummer

FX000074

Side

1 (3)

Lunds Tekniska Högskola
Avdelningen Byggnadsteknik
Sture Lindmark
Box 118
221 00 Lund

Kloridanalys på krossat cementbruk

Provföremål

33 st. prov påsar med krossat cementbruk inkom till CBI 2010-01-19. Proverna var märkta enligt tabell 1. CBI ansvarar ej för provtagningen.

Provningsmetod

Kloridhalten bestämdes enligt CBI: metoden 5.1995, Total klorid i hårdnad betong. Bestämning av klorid har utförts direkt efter kalibreringen med direktpotentiometrisk metod med jonselektiv elektrod. Kloridhalten redovisas som kloridjonhalt i procent av cementets vikt.

Cementhaltsbestämningen har utförts genom titrering med EDTA och fotometrisk mätning av färgomslaget med murexidindikator.

Provningsresultat

Resultat från analysen redovisas i TABELL 1 och avser enbart de analyserade proverna.

Provningens mätosäkerhet för enskilt värde är $\pm 0,1$ vikt-% vid en kloridhalt på 1,0 vikt-%.

Den angivna utvidgade mätosäkerheten är produkten av standardmätosäkerheten och täckningsfaktorn $k = 2$, vilket för en normalfördelning svarar mot en täckningssannolikhet av ungefär 95 %. Standardmätosäkerheten har bestämts i enlighet med EA:s publikation EA-4/16.

CBI Betonginstitutet AB

Ingår i SF-koncernen

Stockholm

100 44 Stockholm
Besök Drott Kristinas väg 26
Tel 08-698 11 00
Fax 08-24 31 37

Borås

c/o SP
Box 857
501 15 Borås
Tel 010-516 50 00
Fax 033-13 45 16Internet / e-post
www.cbi.se
cbi@cbi.sePlusgiro
454538-0
Bankgiro
243-9412
Bank
Svenska HandelsbankenOrg.nummer
556352-5699
VAT No.
SE556352569901
Säte: Stockholm

Detta dokument får endast återges i sin helhet, om inte CBI i förväg skriftligen godkänt annat.



CBI Betonginstitutet

RAPPORT

Datum

2010-01-22

Uppdragsnummer

FX000074

Sida

2 (2)

TABELL 1.

Prov nr	kloridjoner/cement (vikt-%)	totalklorid (mg/l)	cement (mg)	cementhalt (vikt-%)
A 073	3,08	964,90	313,76	23,1
A 074	3,07	697,09	226,99	16,4
A 094	3,02	726,00	240,30	17,8
A 096	3,29	726,00	220,64	16,0
A 107	3,07	697,09	226,99	16,7
A 119	3,25	926,48	284,85	21,1
A 121	3,84	854,15	222,50	16,6
A 149	2,97	726,00	244,79	18,1
A 158	3,26	697,09	213,76	15,8
A 171	2,85	697,09	244,79	18,1
A 196	3,40	726,00	213,59	15,5
B 076	3,11	483,55	155,73	11,0
B 077	2,97	726,00	244,79	17,9
B 079	2,88	756,11	262,60	19,3
B 103	3,07	642,67	209,19	15,2
B 111	2,08	592,50	284,81	20,9
B 113	2,01	464,30	231,40	17,4
B 118	2,19	568,91	259,35	19,1
B 129	1,57	363,83	231,91	16,8
B 137	1,70	411,00	241,20	17,4
B 142	1,55	349,34	225,64	16,1
B 153	2,26	524,50	231,57	17,0
B 167	2,19	546,25	249,32	18,3
B 175	2,30	503,61	219,09	16,0
C 091	1,51	322,07	213,41	15,6
C 123	1,78	411,00	230,39	16,9
C 124	1,65	363,83	220,63	16,1
C 143	1,64	322,07	196,68	14,3
C 146	1,54	349,34	226,99	16,3
C 166	1,55	349,34	225,50	16,5
C 183	2,60	464,30	178,71	12,9
C 194	2,35	642,67	274,05	20,2
C 195	2,35	617,08	262,60	19,5

Detta dokument får endast återges i sin helhet, om inte CBI i förväg skriftligen godkänt annat.



CBI Betonginstitutet

RAPPORT

Datum
2010-01-22

Uppdragsnummer
FX000074

Sida
3 (3)

CBI Betonginstitutet
Provning och kontroll, Stockholm

A blue ink signature of Camilla Westerholm.

Camilla Westerholm
Ansvarig för provningen

A blue ink signature of Göran Olsson.

Göran Olsson
Vidimerad av

Detta dokument får endast återges i sin helhet, om inte CBI i förväg skriftligen godkänt annat.

ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS - ELFORSK - AB

Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31
Telefon: 08-677 25 30, Telefax: 08-677 25 35
www.elforsk.se