

## Rapporter från arbetet:

# DRÄNERING AV FUKT I BETONG GENOM ELEKTROKEMISK METODIK (ELEKTROOSMOS)

## SBUF-projekt ID: 13362

1: Carl-Johan Högberg

Litteraturstudie: Dränering av fukt i betong genom elektrokemisk metodik

Stockholm 2017-06-02

Referensnr: 13893-1

Refereras till som : Swerea 1

2: Tommy Zavalis och Carl-Johan Högberg

Dränering av betong med elektroosmos - Modelleringsstudie

Stockholm 2017-11-01

Referensnr: 13893-2

Refereras till som Swerea 2

3: Jan Trägårdh

Förutsättningar för betong som medium för transport av fukt under inverkan av elektroosmos

Rapportnummer: 7P00151

Stockholm 2018-06-16

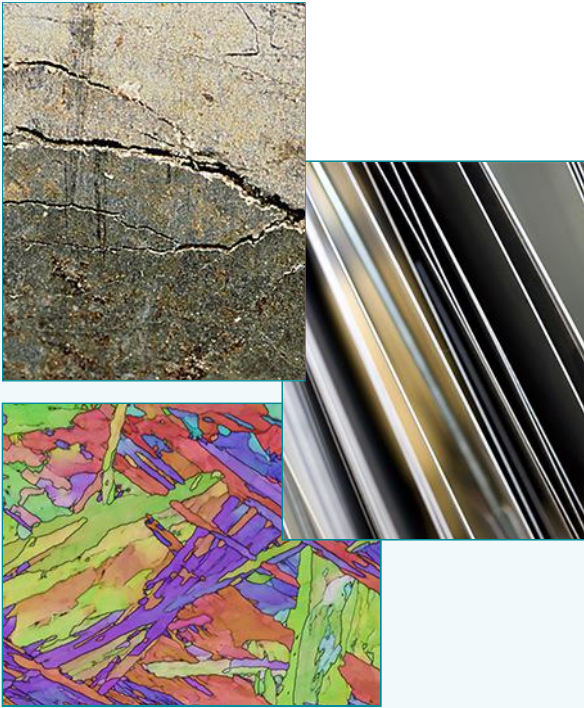
Refereras till som CBI

4: Minnesanteckningar av studiebesök på fem elektroosmosanläggningar 2017

Refereras till som Studiebesök

5: Noteringar från mätningar vid Röda Korsets sjukhus

Refereras till som Mätrapporten



Uppdragsrapport  
Konfidentiell

# Litteraturstudie: Dränering av fukt i betong genom elektrokemisk metodik

170602

Utredare: Carl-Johan Högberg

carl-johan.hogberg@swerea.se, 08-545 274 57

Avdelning: Korrosion

Vårt referensnr: 13893-1

Er referens: Folke Björk

Företag: KTH

Ert referensnr: [Ert referensnr]

swerea | KIMAB

Datum: 170602

Godkänd av:

Utredare: Carl-Johan Högberg

2017-06-02

Vårt  
referensnr: 13893-1

X 

Er referens: Folke Björk

Signerat av: Bror Sederholm

Ert referensnr: [Ert referensnr]

[Forskningsledare]

---

# Litteraturstudie: Dränering av fukt i betong genom elektrokemisk metodik

## Sammanfattning

I litteraturstudien har erfarenheter och dokumentation kring elektroosmos som metod för att avfukta betong sammanställts. Den grundläggande teorin för elektroosmos i kappillära medier har studerats. Likheter och lärdomar från andra typer av elektrokemiska metoder som katodiskt skydd och kloridutdrivning finns att tillgå gällande framför allt användning och utformning av elektroder samt elektrodreaktioner. I litteraturstudien har resultaten av ett antal fältförsök och laboratorieprovningar sammanställts.

Litteraturstudien medger följande slutsatser: Teorin medger fukttransport genom porösa material men de exakta mekanismerna i betong är inte helt klarlagda. Det finns få till inga publikationer i vetenskapliga tidsskrifter kring elektroosmos i betong. Design på elektroder och hur dessa placeras har stor betydelse för effektiv dränering. Inga tydliga belägg för de positiva effekterna för elektroosmos med pulsad ström har hittats. Övervakning av utmatad ström och spänning samt fukt i betongen kontinuerligt är nödvändigt och bör mätas under en relativt lång tid.

# Innehållsförteckning

1	Inledning .....	1
2	Tekniken .....	1
2.1	Teori.....	1
2.2	Likheter med katodiskt skydd och elektrokemisk kloridutdrivning .....	4
2.3	Reaktioner vid elektroderna.....	5
2.4	Elektrosmotisk puls .....	6
2.5	Läckströmskorrosion på armeringen .....	7
2.6	Provningar gjorda av US Army Corps of Engineers .....	9
2.7	Trinitydammen, Kalifornien [21] .....	10
2.8	MTRC's Hong Kong Pedestrian system och tunnelbanestation Walthamstow i London [22].....	11
2.9	Elektroosmos på tegelsten och tegelvägg [23] .....	11
2.10	Laboratorieundersökning av elektroosmos i sandsten och tegel [24] .....	12
2.11	Utvärdering av SINTEF [25].....	12
3	Diskussion.....	12
4	Slutsatser.....	14
5	Fortsatt arbete .....	14
6	Litteraturförteckning .....	15

# 1 Inledning

Elektroosmos är ett fenomen som är känt sedan 1809 då F.F. Reuss såg att vatten drogs mot den negativa elektroden när fuktig jord utsattes för ett elektriskt fält [1]. Detta fenomen har sedan använts till en rad olika praktiska tillämpningar inom till exempel jordbruksindustrin för att stabilisera fuktiga jordar, extrahera faser ur varandra [2] eller mikrofluidik. När ett kapillärt medium utsätts för ett elektriskt fält bär lösta hydratiserade joner med sig vattenmolekyler och man kan på så sätt avfukta kapillära material.

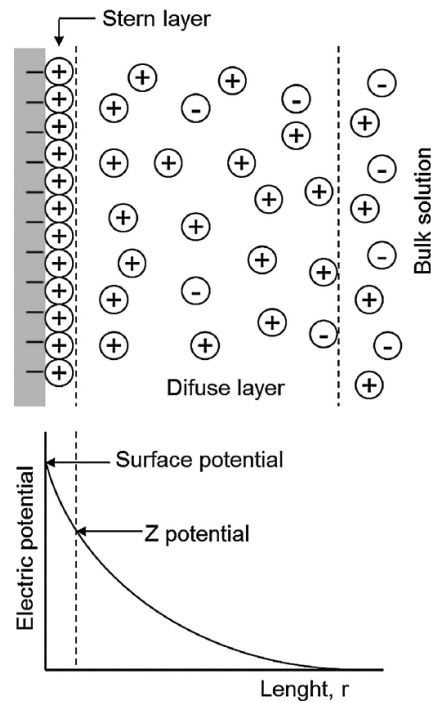
För utrymmen under mark med betongväggar och golv kan fukt innebära problem. Avfuktning av betongväggar under mark är kostsamt då det kräver markarbeten som till exempel uppgrävning. Som en alternativ metod för att torka betongen har elektroosmos föreslagits kunna användas eftersom betong är ett material som innehåller kapillärer. Både laborativa tester och fullskaliga installationer har gjorts på betongväggar och vissa andra byggnadsmaterial sedan början 1990-talet. Elektroosmos har använts på flera håll i världen men en stor del av det arbete som dokumenterats har genomförts av US Army Corps of Engineers vilket finns att läsa i flertalet rapporter [3] [4] [5]. Elektroosmotisk dränering av betong har även tillämpats i Sverige men inga genomgående svenska studier i ämnet finns idag.

Denna litteraturstudie syftar till att undersöka hur långt forskningen kommit idag och vilka erfarenheter som finns inom dränering med elektroosmos. [6]

## 2 Tekniken

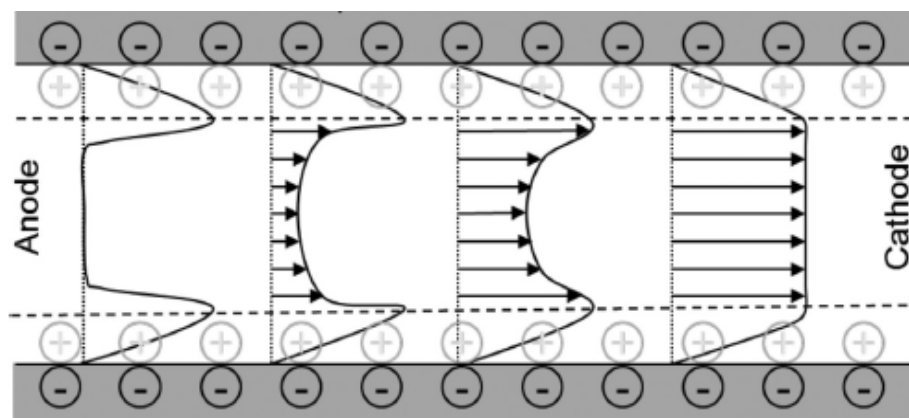
### 2.1 Teori

Dränering med elektroosmos bygger på att man med hjälp av en spänning flyttar vatten ut ur objektet som ska dräneras. I litteraturen anges det att för att få en elektroosmotisk effekt behövs ett kapillärt medium som innehåller tillräckligt med elektrolyt för att kunna bilda ett så kallat elektriskt dubbelskikt på kapillärväggarna. Tanken med elektroosmos i betong är att porerna i betongen fungerar som kapillärer och i dessa kan det elektriska dubbelskiktet bildas. Det krävs att kapillärväggen i betong har en negativ laddning och att katjoner bildar ett skikt på väggen som balanserar de negativa laddningarna. Detta gör att det finns ett överskott av katjoner i elektrolyten vilket är nödvändigt för att skapa ett nettoflöde. Det finns flera mer ingående modeller för hur det elektriska dubbelskiktet är uppbyggt [7]. Ett inre skikt med katjoner som kan anses vara stationärt finns närmast kapillärväggen kallat Stern-skiktet, se Figur 1. Närmast detta skikt är koncentrationen av katjoner högre än i bulkelektrolyten men jonerna här har en viss rörlighet. Detta skikt kallas det diffusiva skiktet [8]. Potentialskillnaden mellan ytan på kapillärväggen och yttre delen av det mobila skiktet kallas zeta-potentialen [9].



Figur 1 Uppbyggnad av det elektriska dubbelskiktet vid kapillärväggen med överskott av katjoner i det diffusiva skiktet [10].

När en spänning läggs mellan två elektroder över ett kapillärt system transporteras strömmen i det kapillära mediet genom att joner migrerar i kapillärerna. De positiva katjonerna vandrar mot den negativa elektroden, katoden, och de negativa anjonerna vandrar mot den positiva elektroden, anoden. På grund av överskottet av katjoner närmast kapillärväggen kommer jonerna i det diffusiva skiktet att föra med sig vattenmolekyler mot katoden. Genom vattnets viskositet skapas en rörelse i hela kapillären vilket resulterar i ett flöde av vatten mot katoden. För att elektroosmosen ska få någon praktisk betydelse måste det finnas tillräckligt med katjoner i det diffusiva skikt så att effekten av vattentransport ska bli märkbar.



Figur 2 Utveckling av flödesprofil för elektroosmotiskt flöde [10].

Jonerna, är hydratiserade, det vill säga har vatten bundet till sig vilket beror på att vatten är en dipol och binder den ena av sina polära sidor till den laddade jonen. Även om det i litteraturen kring elektroosmos anges att det krävs ett kapillärt medium med ett elektriskt dubbelskikt som skapar en vattentransport kan det tänkas att effekten till stor del kommer av att de hydratiserade katjonerna i hela poren för med sig vatten mot katoden. I ett sådant fall är

elektroosmos inte beroende på det elektriska dubbelskiktet. Då blir en avgörande parameter för hur väl vattentransporten fungerar hur många vattenmolekyler som koordinerar till de olika jonerna. Betongens bindemedel till stor del består av kalcium men eftersom kalciumföreningar är svårslösliga består porlösningen inte av så mycket  $\text{Ca}^{2+}$ . Antal vattenmolekyler bundna till  $\text{Ca}^{2+}$  är inte en helt trivial fråga vilket har undersökts i litteraturen där det anges att antalet vattenmolekyler är fler än 6 stycken men att ett temperaturberoende finns [11] [12].

Andra vanliga element i porlösningen är natrium, kalium, hydroxid och i mindre mängd klor. Dessa kan antas förekomma i lösta som joner. För både  $\text{Na}^+$  och  $\text{Cl}^-$  finns flera litteraturkällor som tyder på att antalet vattenmolekyler är sex stycken [13]. Hydratiseringen för  $\text{Cl}^-$  är dock också ett område som är omdiskuterat i litteraturen, både koordinationsstal för vattenmolekylerna och hur starkt vattenmolekylerna binder till kloridjoner. Det finns teorier om att  $\text{K}^+$  och  $\text{Cl}^-$  inte är hydratiserade i över huvud taget [6]. Si, Al och Fe finns också till viss del i betongen vilka kan bidra till vattentransport. Ju fler vattenmolekyler bundna till en katjon desto bättre eftersom det är dessa joner som rör sig mot katoden.

Det som driver fukten från marken in i betongen är ett hydrodynamiskt flöde från en tryckgradient. Den pålagda spänningen måste skapa en elektroosmotisk drivkraft som är starkare än den hydrodynamiska kraften för att vatten ska transporteras ut ur betongen. Vätsketransport i kapillärer påverkas av ett antal faktorer men för till exempel en betongvägg med pålagd spänning kan de dominerande parametrarna anses vara tryckskillnaden som driver fukt in i väggen, ett så kallat hydrodynamiskt flöde, och den pålagda spänningen, som ger ett elektroosmotiskt flöde. Det elektroosmotiska flödet måste således vara i motsatt riktning och högre än flödet från en tryckskillnad som driver fukt in i väggen. Masstransporten av vatten i porer kan beskrivas av viskositet, en tryckgradient och en pålagd spänning [14]:

$$\rho \frac{dv}{dt} = \eta \nabla^2 v - \text{grad } p - \left( \frac{z^+ e_0 \rho^+}{m^+} + \frac{z^- e_0 \rho^-}{m^-} \right) \times \text{grad } \phi \quad (1)$$

Där:

$\rho$  = densitet

$v$  = flödes hastighet

$t$  = tid

$\eta$  = viskositet

$\nabla$  = nablaoperatör

$p$  = tryck

$z^{+/-}$  = jonvalens

$e_0$  = dielektriska konstanten

$m^{+/-}$  = jonmassa

$\phi$  = fältstyrkan

Ekvation (1) härrör från Navier-Stokes ekvationer om rörelsemängd och ur dessa kan Helmholtz-Smoluchowski ekvationen härledas där det finns ett beroende av zeta-potentialen. Helmholtz-Smoluchowski ekvationen (2) beskriver flödet som uppstår på grund av elektroosmos under stationära betingelser [14]:

$$q_e = -\frac{\varepsilon\zeta I}{4\pi\eta\kappa_e} \quad (2)$$

Där:

$q_e$  = elektrolytens flödes hastighet

$\varepsilon$  = dielektriska konstanten

$\zeta$  = zeta-potentialen

$I$  = strömmen

$\eta$  = viskositet

$\kappa_e$  = lösningens konduktivitet

I ekvation (2) framgår det att flödet är beroende av zeta-potentialen, pålagd potential, viskositet och avstånd mellan elektroder. Flödet från elektroosmos är dock enligt Helmholtz-Smoluchowski ekvationen inte beroende av kapillärdiametern för enskilda kapillärer. Dock ökar flödet då arean av alla kapillärer i ett medium ökar. Zeta-potentialen har en viktig betydelse för elektroosmosen och behöver vara tillräckligt hög för att det ska bli ett flöde. Zeta-potentialen är beroende av koncentrationen av elektrolyt [15]. När koncentrationen ökar minskar zeta-potentialen eftersom potentialskillnaden mellan ytan av kapillären och bulklösningen minskar. Effekten av elektroosmos blir således mindre vid för höga koncentrationer av elektrolyt. Eftersom denna modell endast är giltig under stationära betingelser vilket inte kan anses vara fallet i elektroosmos bör den endast ses som en fingervisning om hur parametrarna påverkar det elektroosmotiska flödet. Detta beror bland annat på att zeta-potentialen är teoretiskt svår att förutsäga, särskilt när parametrar som koncentration varierar över tiden. Detta medför att Helmholtz-Smoluchowski ekvationen är svår att använda praktiskt eftersom zeta-potentialen och lösningens konduktivitet är svåra att mäta.

De parametrar som framför allt påverkar flöde i kapillärer är påverkan från ett yttre tryck och den pålagda spänningen

## 2.2 Likheter med katodiskt skydd och elektrokemisk kloridutdrivning

Flera likheter finns mellan dränering med elektroosmos, katodiskt skydd och elektrokemisk kloridutdrivning. För katodiskt skydd och kloridutdrivning används armeringen som katod och en anod, till exempel mixed metal oxide (MMO) belagt titannät, installeras på utsidan av betongväggen. Kloridutdrivning bygger liksom elektroosmotisk dränering på att de jonerna migrerar mot de olika elektroderna när betongen utsätts för ett elektriskt fält. De negativa kloridjonerna rör sig mot anoden. Katodiskt skydd används som korrosionsskydd över tiden medan kloridutdrivning är en temporär insats tills man anser att man drivit ut tillräckligt med klorider. För kloridutdrivningen används höga strömmar, ett fåtal A/m<sup>2</sup> medan vid katodiskt skydd används lägre strömmar kring cirka 10 mA/m<sup>2</sup>. Elektroosmotisk dränering bör ligga närmare katodiskt skydd i storlek på ström och är mer lik eftersom den också används över tiden. Erfarenheter från katodiskt skydd och i vissa fall elektrokemisk kloridutdrivning bör

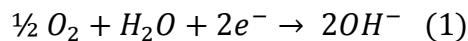


vara tillämpbara på elektroosmotisk dränering, till exempel elektrodreaktioner samt hur betongen påverkas av att olika joner drivs mot elektroderna.

## 2.3 Reaktionen vid elektroderna

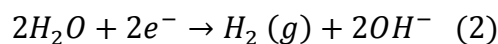
I kapillärerna i betongen leds strömmen med hjälp av joner och vid anoden och katoden sker laddningsöverföring genom elektrokemiska reaktioner. Vilka reaktioner som sker bestäms av den kemiska omgivningen runt elektroderna, material hos elektroderna och pålagda strömtätheter och potentialer [16]. För elektroosmotisk dränering av betong bör elektrodreaktionerna vara de samma som för katodiskt skydd så erfarenheter från katodiskt skydd bör vara direkt tillämpbara på elektroosmotiska system.

För katodiskt skydd i betong är reaktionerna vid elektroderna relativt välstuderade. För katodiskt skydd fungerar armeringen som katod och vid denna sker en alkalisering genom att den dominerande katodreaktionen är:



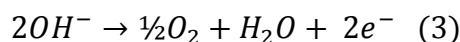
Denna reaktion konsumerar syre och vatten och ger hydroxidjoner som produkt. Detta betyder att när det inte finns något syre eller vatten vid katoden kan inte den katodiska reaktionen ske och strömmen avtar. Katjoner vandrar till katoden vilket i betong till stor del består av kalciumjoner. Dessa reagerar med hydroxidjoner vid katoden och bildar kalciumhydroxid vilket höjer pH och förstärker det passiva oxidskiktet på armeringen. För elektroosmos sker katodreaktionerna oftast utanför objektet som ska dräneras och påverkar således inte betongen.

En annan möjlig katodreaktion vid låga potentialer är vätgasutveckling. I betong sker det teoretiskt vid -1,06 V mot en Cu/CuSO<sub>4</sub> referenselektrod vid pH 12, temperaturen 25 °C och atmosfärs tryck. Dock krävs en viss överspänning och laboratorieundersökningar har visat att den praktiska potentialen är cirka -1,15 V mot Cu/CuSO<sub>4</sub> [16]. Reaktionen för vätgasutveckling ses nedan:

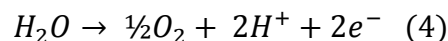


På grund av vätgasutvecklingen begränsar man skyddsströmmen så att man ligger positivare än potentialer som ger vätgasutveckling på grund av att vätgasen har flera negativa effekter. Beroende på katodens placering i fallet med elektroosmos kanske vätgasutveckling är ett problem eftersom katoden är placerad utanför betongen.

Om anoden består av ett olösligt material är den dominerande anodreaktionen för katodiskt skydd i alkalisk betong:

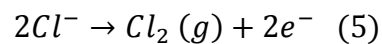


Som framgår av reaktion (3) bildas syrgas och vatten från hydroxidjoner. Detta leder till att en viss pH sänkning sker genom att hydroxidjonerna förbrukas. Av reaktionen framgår det också att det bildas vatten vid anoden. Från den balanserade reaktionsformeln framgår det att det bildas en vattenmolekyl per två elektroner. För dränering med elektroosmos är det negativt att vatten produceras vid anoden men eftersom det endast bildas en vattenmolekyl per två elektroner och att jonerna transporterar flera vattenmolekyler kan det antas att nettoeffekten fortfarande är vattenutdrivning mot katoden. I mindre alkalisk betong, som till exempel äldre karbonatiserad betong, kan en alternativ anodreaktion ske:



En av produkterna från reaktionen är vätejoner vilka bidrar till en sänkning av pH. Denna reaktion är icke önskvärd eftersom den leder till försurning runt elektroden vilket påverkar betongens egenskaper.

Den väsentliga skillnaden mellan katodiskt skydd och elektroosmos är att katoden för katodiskt skydd är armeringen och att den för elektroosmos ofta ligger utanför betongen. Detta betyder att de joner som vandrar in till armeringen vid katodiskt skydd kommer att vandra ur betongen för elektroosmos. För elektroosmos kommer katjoner som finns i betongen, till exempel  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  och  $\text{K}^+$  att vandra ut ur betongen till katoden medan anjoner som  $\text{Cl}^-$  kommer vandra in i betongen och ackumuleras vid anoden. Förutom en negativ inverkan ur korrosionssynpunkt, nämligen att klorider vandrar in i betongen, kan även i alkalisk betong klorgasutveckling ske vid anoden:



Vid för höga pålagda strömmar och potentialer kan ogynnsamma reaktioner ske vid både anod och katod. Vid för höga strömmar då större mängder vätgas vid katoden och syrgas vid anoden produceras kan strömmen blockeras på grund av att gaserna inte hinner diffundera bort från elektrodytorna. Det är därför viktigt att kontrollera strömmar och mäta potentialer vid elektroderna. Potentialer kan mätas med referenselektroder, till exempel av  $\text{MnO}_2/\text{Mn}_2\text{O}_3$ . Standardpotentialer för ovan beskrivna reaktioner kan ses i Tabell 1. Dessa gäller vid standardförhållanden men bör ändå kunna ge en fingervisning om reaktionsbetingelserna vid elektroderna och vilka potentialer som bör undvikas.

Tabell 1 Standardpotentialer för reaktioner relaterade till elektroosmos där potentialen är angiven mot vätgaselektrod [17].

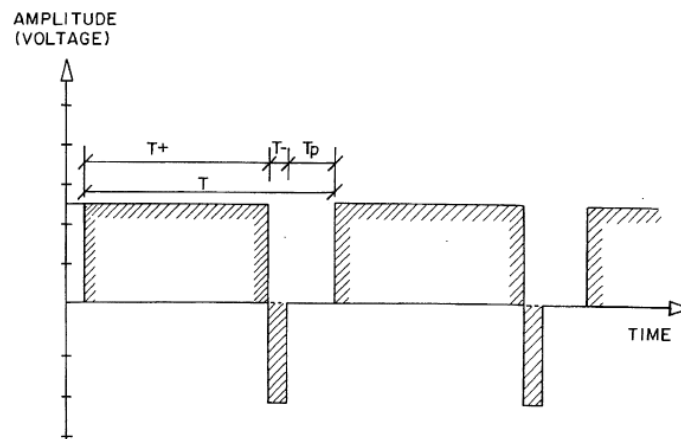
Reaktion	$E^\circ$ [V]
1	0,4
2	-0,83
3	-0,4
4	-1,23
5	-1,4

Standardpotentialerna är termodynamiska värden och talar enbart om vad som är möjligt. Kinetiken, det vill säga hur fort reaktionerna går, spelar stor roll i praktiken. Kinetiken brukar sägas vara kontrollerad av masstransport och elektronöverföringshastigheten och för elektroosmos bör det hastighetsbestämmande steget för reaktionerna och därmed strömmen vara masstransport. För att få en ström mellan elektroderna krävs tillräckligt med reaktanter, det vill säga syre, hydroxidjoner och vatten för de dominerande reaktionerna vid elektroderna. När vattnet i betongen förbrukats av elektrodreaktionerna eller transporterats ut ur betongen ökar resistiviteten och strömmen går ner på grund av att joner inte längre kan migrera mot elektroderna.

## 2.4 Elektroosmotisk puls

Användning av en pulsad likström för elektroosmos började få genomslag på 1990-talet. En av de första källorna är ett svenskt patent från 1983, Elektrisk och elektronisk metod för uttorkning och försegling av byggnadsväggar av sten och betong [18], där det anges att en växelström används för upptorkning av väggar. Detta patent följdes upp av ytterligare ett

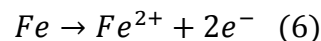
patent 1987, Förfarande och anordning för avvissning av fukt i armerade byggnadselement och för förhindrande av inträngning av fukt i byggnadselementen [19]. Utformningen på hur de elektriska pulserna ska utformas, tider för positiv, neutral och negativ potential har sedan dess utvecklats. Det finns många patent inom området med olika utvecklingar av hur den elektriska pulsen ska se ut, se Figur 3 som exempel. Dock finns få vetenskapliga artiklar där pulsning jämförs med likström eller effekten av olika utformning på de elektriska pulserna. Anledningen till att man använder pulsad teknik sägs vara att den är mer effektiv än likström och påverkar elektroderna och betongen mindre. Det anges också att den pulshade tekniken inte torkar ut betongen och att en viss fukthalt är bra för betongen. Det skrivs även att om betongen torkat ut helt och zeta-potentialen inte längre finns, så strömmar vatten tillbaka in i väggen.



Figur 3 Exempel på utformning av puls med korta perioder av omvänd polaritet och en kort period utan pålagd spänning [20].

## 2.5 Läckströmskorrosion på armeringen

För elektroosmos i betong installeras elektroder i närheten av ytan av en betongvägg. Emellan elektroderna finns ofta armering. Eftersom armeringen hamnar i potentialfältet mellan elektroderna finns det risk för läckströmskorrosion. Där strömmen går in i armeringen kommer katodreaktioner att ske och där strömmen går ut sker anodreaktioner. Eftersom armeringen inte består av ett olösligt material utan av stål kommer anodreaktionen vara upplösning av järn:



Hur kraftig läckströmskorrosionen blir beror på hur stor del av strömmen som går genom armeringen vilket beror på skillnaden i motståndet att leda strömmen via armeringen och via betongen. I och med att järn har en mycket låg resistivitet jämfört med betong kan resistansen genom armeringen försummas. Den dominerande resistansen för ström genom armeringen blir övergångsmotståndet mellan betong och armering. En grov uppskattning av övergångsmotståndet ges av McCoy's formel:

$$R = \frac{0,315 * \rho}{\sqrt{A}} \quad (2)$$

Där  $\rho$  är resistivitet och  $A$  arean. Låt säga att en fuktig betongvägg har en area av  $1 \text{ m}^2$  och att resistiviteten är  $100 \Omega\text{m}$ . Av denna area utgörs 5% av armering och armeringens diameter är 1 cm. För denna uppställning kan jordtagsmotståndet för ströminträdet i armeringen uppskattas till:

$$R = \frac{0,315 * 100}{\sqrt{0,05}} = 630 \Omega$$

Eftersom strömmen går ut på andra sidan armeringen behövs det dubbla jordtagsmotståndet vilket ger 1260  $\Omega$  för ström genom armeringen. För strömmen genom betongen vid sidan av armeringen kan elektrolytmotståndet beräknas genom:

$$R = \frac{L * \rho}{A} \quad (3)$$

Där L är längden,  $\rho$  resistansen och A arean. För ström genom betongen blir motståndet då:

$$R = \frac{0,01 * 100}{0,95} = 1,05 \Omega$$

I exemplet är motståndet genom betongen cirka en tusendel jämfört med övergångsmotståndet för ström genom armeringen vilket betyder att i princip all ström går genom betongen. Ökar däremot längden där strömmen kan gå genom armeringen istället för betong blir situationen annorlunda. Om betongväggen har två lager armering med ett avstånd från varandra på 10 cm som har elektrisk kontakt kommer 1% av strömmen gå igenom armeringen (L ökar från 0,01 m till 0,1 m). Detta är ingen stor siffra men i och med att systemet står på under en lång tid kan det ändå påverka armeringen. För en given strömutmätning kan massförlusten genom läckströmskorrosionen beräknas med hjälp av Faradays formel:

$$m = \frac{I * t * M}{F * z} \quad (4)$$

Där I [A] är strömmen, t [s] tiden, M [g/mol] molmassan, F [C/mol] Faradays konstant och z antal överförda elektroner. För en ström i på 20 mA/m<sup>2</sup> i exemplet ovan med dubbelarmering som står på i en månad blir massförlusten på armeringen:

$$m = \frac{(0,02 * 0,01)[A] * (60 * 60 * 24 * 30)[s] * 55,933[\frac{g}{mol}]}{96485 [\frac{C}{mol}] * 2} = 0,15 g$$

Denna beräkning förutsätter konstant ström över perioden men i och med att resistiviteten ökar i takt med att betongen torkar ut kommer både strömmen och läckströmskorrosionen att minska.

Om strömmen kan gå längre sträckor genom armeringen istället för betongen, till exempel på grund av hur elektroderna är placerade, kommer större delar av strömmen gå genom armeringen. För att minimera sådana effekter är det viktigt att strömmen kan gå rakt genom väggen mellan elektroderna. Om till exempel ett nät används som anod på insidan som täcker en hel vägg behöver många katoder finnas fördelade på andra sidan väggen.

Om armeringen tar upp ström och går genom armeringen är inte bara läckströmskorrosionen ett problem. Strömmen genom armeringen kommer inte bidra till den elektroosmotiska effekten eftersom denna ström inte transporterar några vattenmolekyler.

Nedan följer ett antal publikationer som rapporterar om erfarenheter både från laboratorieprovningar och också fältförsök som har gjorts. Värt att notera är att ingen av dessa publikationer är publicerade i vetenskapliga tidsskrifter utan är mer i formen av konferensbidrag eller tekniska rapporter från företaget.

## 2.6 Provningar gjorda av US Army Corps of Engineers

US Army Corps of Engineers kan vara de som har mest samlad erfarenhet av pulsad elektroosmos då de genomfört både laborativa och fullskaliga tester. Mycket av det som testats finns beskrivet i rapporterna ERDC/CERL TR-02-21 [4] och ERDS/CERL TR-09-23 [5].

En av de första källorna inom elektroosmos från US Army Corps of Engineers är från 1998 [3]. Ett elektroosmos system installerades i källare där problem fanns med vatteninträngning. Källarens golvyta var  $12,2 \times 5,5$  m. Sprickor i golv lagades med cement. 83 stycken instickselektroder av gummigrafit användes som anoder i borrarade hål i alla fyra väggar med 46 cm mellanrum. Tre katoder i form av kopparstavar fanns utanför, varav två fanns utanför samma vägg. Grundvattennivån direkt utanför källarväggen loggades under provningsperioden. Effekten för systemet loggades och gick från cirka 43 W till 8 W på 5 månader. Väggens relativa fuktighet gick från 96% till 88%.

I en andra rapport har en laboratorieundersökning genomförts för att undersöka förmågan att flytta vatten genom betongblock med hjälp av en likström. Permeabiliteten för olika vattencementtal (vct) provades med olika metoder. För provningarna användes betong med vct 0,45 – 0,72, och två olika tjocklekar på betongblock användes, 5 cm och 10 cm. 30 V lades på mellan elektroderna på varsin sida om betongblocket där vatten fanns på två sidor. NaCl hade tillförts vattnet med 580 mg/l för att öka konduktiviteten. Mängden vatten som flödat genom betongen samlades upp och vägdes för att kunna beräkna flödes hastigheten. En referensuppställning utan pålagd ström användes och där kunde inget vattenflöde konstateras. För test med pålagd spänning har mängden vatten som dissociats på grund av elektrodreaktioner beräknats. För detta har reaktioner där vatten är reaktant använts både för katod- och anodreaktion.

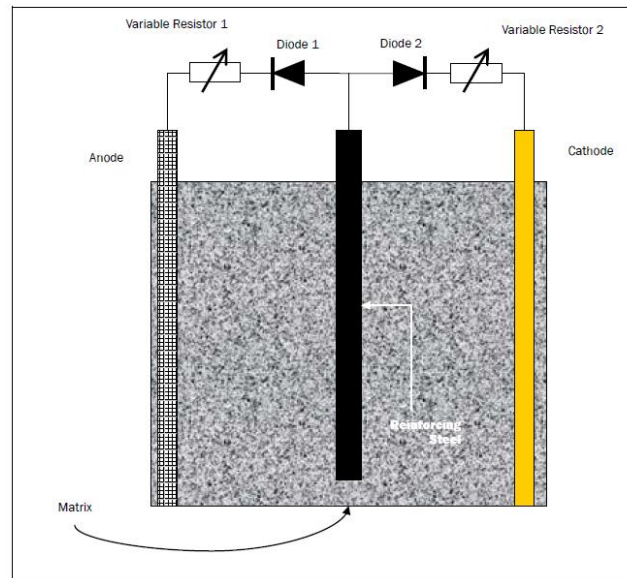
Provning med vct 0,72 och tjocklek 10 cm visade att det sker först en topp av strömmen som sedan dalar följt av en plåtå. Därefter avtar strömmen linjärt ner till noll efter 140 h. Värt att notera är att strömmen gått ner till noll även fast det är gott om vatten vid sidan av betongblocket. Plåtån kallas för steady state och i detta läge var strömmen relativt konstant. Att strömmen går ner till noll förklaras med att porerna sätts igen och att jonerna tar slut. För steady state plåtån beräknas medelflödet för de olika proverna. Olika vct visade sig spela liten roll då proverna med samma tjocklek hade samma storleksordning på flödet, ~0,1-0,4 g/h. För tjocklek på 5 cm var flödet 0,20-1,3 g/h. Detta elektroosmotiska flöde jämfördes med ett hydrauliskt flöde från en 305 cm vattenpelare (10 fot) där det elektroosmotiska flödet då var två cirka hundra gånger större.

Elektroderna undersöktes efter provningarna med elektronmikroskopi och energidispersiv spektroskopi varvid det verifierades att det vid katodsidan av betongen samlats kalcium. Vid anodsidan hade halterna av kisel och aluminium ökat. Enligt värdena hade kloridhalten ökat på katodsidan medan inga klorider detekterats på anodsidan. Detta är tvärt om mot vad man förväntar sig men ingen kommentar finns i rapporten kring detta. Elektroosmotiska permeabiliteten,  $K_e$ , anges vara  $6,5 \times 10^{-7}$  cm/s/V/cm vilket anges vara cirka 100 gånger lägre än för lerig jord.

Ett elektroosmotiskt pulssystem installerades sedan i två olika källare på källarväggarna för att utvärdera tekniken praktiskt. Här påpekas vikten av att täta ordentligt mellan anoden och betongen så att vatten ej kan samlas här vilket skulle öka risken för sänkt pH med efterföljande negativa effekter.

Den senare rapporten ERDC/CERL TR-09023 är mer inriktad på praktiska tester och utvärdera huruvida det finns risk för gnistbildning ett elektroosmotiskt dräneringssystem och hur stor

vätgasproduktionen blir. Fältförsök med fullskalig installation genomfördes på en typ av förråd under mark. Innan de fullskaliga testerna byggdes en miniatyrmodell av förrådet som provades i laboratorium. Det provades också ett system för att hindra läckströmskorrosion på armeringen, se Figur 4. Varistorer och dioder användes på ett sådant sätt att ström som går in i armeringen leds den tillbaka till anoden. Eftersom pulssad teknik med en kort tid med omvänd polarisation användes behövdes varistorer och dioder mellan både anod och armering, och armering och katod.



Figur 4 Schematisk uppställning över ett system för att minska läckströmskorrosionen på armeringen [5].

Provbitar av armeringsjärn med möjlighet att mäta potentialen på installerades också på olika djup i betongen. Provbitarna av armeringsjärn uppvisade katodisk polarisation. Anledningen till detta tros vara att provbitarna fick en katodisk ström från den riktiga armeringen. Mätresultaten är svårtolkade och kan påverkas av att läckström läckt från andra föremål än bara armeringen. Det föreslogs att det elektrosmotiska pulssystemet skapar läckström på armeringen.

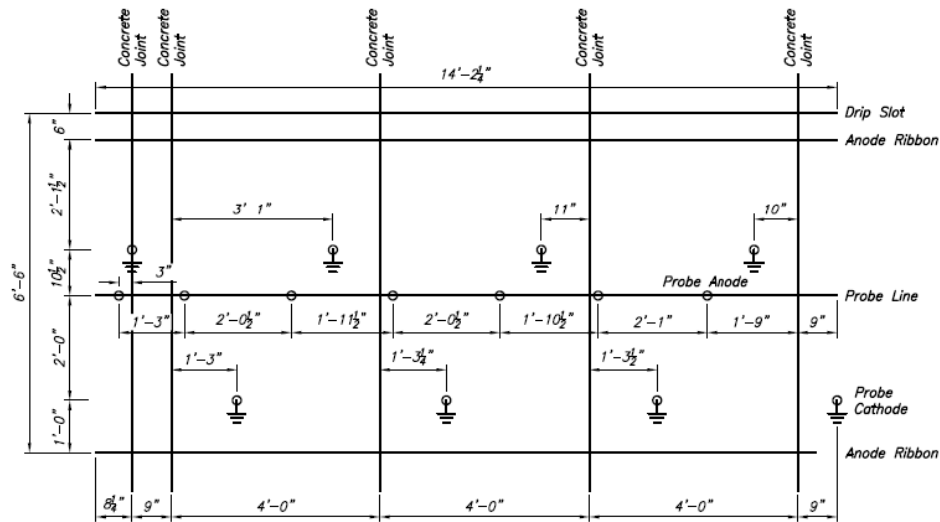
Den relativa fuktigheten loggades över tiden på tre olika platser för olika djup i väggen; ytan, 2,5, 12,7 och 25,4 cm in i väggen (1, 5 och 10 tum). För djupet 12,7 och 25,4 cm var den relativa fuktigheten inledningsvis 90-100% men efter cirka fem månader låg den stabilt på 20-40%.

## 2.7 Trinitydammen, Kalifornien [21]

Ett elektrosmotiskt dräneringssystem installerades i en betongvägg i ett bergumslignande kammare med RH på 100%. Som elektroder användes mixed metal oxide (MMO) belagda titannätsband. Även insticksliknande elektroder av MMO belagda titanelektroder användes som anod. Skårer för remsorna gjordes i väggen och fylldes sedan igen med cement. För katoderna borrades hål igenom betongen in i berget på andra sidan som katoden stacks in i. Två MMO belagda titanband horisontellt placerade på väggen som var ca 14 × 2 m installerades. En skiss över installationen framgår i Figur 5.

Den pålagda totala strömmen för systemet var inledningsvis 4,4 A för en vägg på cirka 14,3 × 2 m. Under 15 veckors provning så sjönk strömmen och resistansen ökade vilket tyder

på att betongväggen torkade, vilket också kunde ses på bilder före och efter att elektrosmosystemet installerats. Efter 15 veckor hade strömmen sjunkit till cirka 1,6 A. I detta system hade armeringen anslutits och en viss skyddsström matades till armeringen.



Figur 5 Elektroosmotiskt dräneringssystem installerat på betongvägg vid Trinity dammen [21].

## 2.8 MTRC's Hong Kong Pedestrian system och tunnelbanestation Walthamstow i London [22]

I artikeln ges exempel på installationer där man installerat elektroosmotiskt dränering. I tunnelbanan i Hong-Kong installerades ett elektroosmos system i en vägg för att skydda konst på väggen mot fukt. I källaren på Hong Kong International Financial Centre finns även data från ett elektroosmossystem. Det finns inga uppgifter om storlek på installationen men man visar att initialt var strömmen 200 mA men efter en vecka var den mindre än 10 mA. Den relativa fuktigheten i väggen hade då gått från 100% till 83%. London Underground Walthamstow station och Tafjord dammen i Norge anges även som lyckade installationer.

## 2.9 Elektroosmos på tegelsten och tegelvägg [23]

I laboratorium fuktades tegelstenar tills de innehöll 10% vatten. En spänning på 50 V lades på vilket gav en strömtäthet på 700 mA/m<sup>2</sup>.

På grund av experimentets utformning leddes inget vatten ur tegelstenarna men man kunde se att vatten flyttade sig mot katoden. En sänkning av pH-värdet vid anoden var tydlig.

På en vägg till ett tegelhus installerades ett elektroosmotiskt dräneringssystem som ett fältförsök. Väggen var 191×247×11 cm. På grund av att inerta elektroder ansågs vara för dyrt användes järnbaserade elektroder.

Inledningsvis lades en ström på 20 mA på men den höjdes till 60 mA och försöket pågick i nio dagar. I sex dagar var motståndet konstant men ökade sedan kraftigt. Denna ökning antogs bero på att kontakten mellan anod och vägg blivit dålig vilket kan berott på elektroosmosen. Det konstaterades att fuktigheten runt katoden ökat efter 2-3 dagar. Fältförsöket ansågs fungera bättre än laboratorieundersökningarna.

## 2.10 Laboratorieundersökning av elektroosmos i sandsten och tegel [24]

I denna undersökning bestäms den elektroosmotiska transportkoefficienten för sandsten och tegel. Sandstenens porradie bestämdes till 10  $\mu\text{m}$  och teglets till 0,4  $\mu\text{m}$ . Proverna hade förvarats i saltlösningar innan en spänning lades på dem. För förhandslagring i NaCl användes koncentrationen 1,7 M och för Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> var koncentrationen 0,6 M. Fältstyrkan 200 V/m lades på sandstenen och 100 V/m för tegel. Ingen information om strömmar ges.

För sandstenen bestämdes den elektroosmotiska rörligheten till cirka  $10^{-9} \text{ m}^2/\text{Vs}$  och för tegel cirka  $10^{-10} \text{ m}^2/\text{Vs}$ . För prover med förhandslagring i Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> kunde inte genomströmningen av vatten mätas på grund av att saltet kristallerade och täppte igen porerna. De framtagna värdena för den elektroosmotiska rörligheten jämförs sedan med koefficienter för kapillärkraften och man kommer fram till att den elektroosmotiska rörligheten endast medger att man kan motverka en stigningshöjd på 1 mm i sandsten och 10 cm i tegel. Ingen utvärdering av betong har gjorts i denna studie.

## 2.11 Utvärdering av SINTEF [25]

SINTEF har i en rapport utvärderat olika typer av metoder för att torka fuktiga betongväggar, bland annat elektroosmos. Ett elektroosmotiskt dräneringssystem installeras i en äldre källarvägg där det uppstått problem med fukt. En del av väggen låg under mark och en del över men ingen information erhålls om hur det elektroosmotiska dräneringssystemet var installerat eller strömmar och potentialer som använts.

Under testperioden minskade inte fukten i väggen som mättes på olika höjder. Författarna anser dock att man inte ska dra för stora slutsatser av försöket eftersom omgivningens fukthalt varit mycket hög och det konstaterades stora sprickor i betongen.

## 3 Diskussion

Teorin för elektroosmos har sedan 1800-talet utvecklats och det finns idag modeller för varför fenomenet uppkommer och vilka parametrar som har betydelse. Kunskapen har framför allt använts för att stabilisera leriga jordar. Där finns det mycket erfarenhet eftersom man tillämpat elektroosmos under en lång tid. Tillämpning av elektroosmos för att dränera betong är dock ett område som inte är väl undersökt. En anledning till detta är att dränering med elektroosmos inte fått fotfäste förrän på 1990-talet. Metoden har dessutom mötts av stor skepsis från många håll. Detta kan bero på att det inte klarlagts på ett vetenskapligt sätt vari metodens begränsningar och möjligheter ligger. Provningar har genomförts där man på olika sätt påvisat ett vattenflöde genom till exempel betong. Där som installationer gjorts och dokumenterats är det inte alltid klart hur stor den elektroosmotiska effekten är eftersom man ofta genomför reparationer och dylikt vid installation av ett elektroosmotiskt dräneringssystem. En annan viktig faktor som har stor betydelse är den omgivande miljön som varierar med väder och årstider. Det är dock inte helt enkelt att genomföra provningar av elektroosmotisk dränering helt fritt från yttre påverkan.

För att få en så bra strömspridning som möjligt bör anoder av MMO belagda titannät användas. Dessa kan fästas så att de täcker en hel vägg som ska torkas. Om anoder av instickstyp används finns risk att vissa områden inte får en tillräcklig ström så att ingen fuktutdrivning kan ske. Viktigt är också katodens utformning för att få ett effektivt potentialfält för avfuktning. Dels har katoder använts i form av kopparspett eller förkopptrade



spett som drivits ner i marken utanför väggen och dels genom att borra genomgående hål i betongen och placera katoden utanför betongväggen. I praktiken bör flera katoder användas jämnt fördelade över ytan som ska torkas, antingen via ett flertal kopparspett i marken utanför eller genom att flertalet katoder borrar och förs igenom väggen.

En pH sänkning vid anoden kommer att ske för ett elektroosmotiskt dräneringssystem men andra effekter av elektrodreaktioner bör kunna kontrolleras genom att använda referenselektroder och andra övervakningssystem för strömmar, potentialer och fuktigheter. Ökad övervakning av flera yttre parametrar är också nödvändig för fältprovningar som till exempel grundvattennivå och nederbörd för att utvärdera effekten av elektroosmos.

I flera av både laboratorieprovningarna och fältförsöken minskade strömbehovet efter att elektroosmotiskt dräneringssystem installerats och låtits verka en period. Detta ligger i linje med att för en pålagd spänning så kommer strömmen att minska då resistiviteten ökar vilket sker vid en avfuktning av betongen. Dock rapporterades det också fall där strömmen gick ned på grund av att betongens porer blivit igentäppta under provperioden. Detta är ytterligare en anledning till varför flera olika parametrar bör övervakas för ett elektroosmotiskt dräneringssystem. Att enbart titta på ström för att avgöra väggens fuktighet kan vara missvisande eftersom resistiviteten i betongen kan öka av andra anledningar än att den blir mindre fuktig.

I praktiska fall där betongen varit väldigt fuktig har elektroosmos inte fungerat för att torka betongen. Det finns flera tänkbara orsaker till varför elektroosmosen inte varit effektiv i dessa fall. En anledning kan vara att det funnits ett för starkt hydrodynamiskt flöde in i betongen och att det elektroosmotiska flödet varit för lågt för att motverka detta. I litteraturen skiljer sig åsikterna åt om hur stor den teoretiska effekten av elektroosmos kan vara [4] [24]. En annan tänkbar anledning till att elektroosmosen inte kan avfukta en betongvägg utsatt för en fuktpåverkan från omgivningen kan också vara att det funnits för stora sprickor eller andra defekter i betongen där fukt kan tränga in. Elektroosmos fungerar effektivt endast i kapillärer där flödet från elektroosmos är högre än flödet in i betongen. I praktiken kan det vara svårt att på förhand avgöra vilka av dessa som påverkar mest.

Katodiskt skydd har använts i betong sedan 1970-talet. Här används en likström för att polarisera armeringen så att denna skyddas mot korrosion. Potentialer och strömmar kontrolleras noggrant för att undvika icke önskvärda reaktioner som till exempel vätgasutveckling. De problem som anges vara grunden för att använda en pulsad likström med korta intervall av omvänd potential har inte påträffats under användning av katodiskt skydd i betong. Hänvisningar finns till ryska och tyska studier angående elektroosmos med pulsad ström men dessa har inte gått att hitta, eventuellt på grund av språkförbistring. Eftersom det inte finns några tydliga källor som visar på de positiva effekterna med att använda en pulsad ström för elektroosmotisk dränering kan nyttan med den pulshade tekniken ifrågasättas. Vidare studier behövs för att klargöra skillnaden i dräneringsförmåga och inverkan på elektroderna mellan ren likström och en pulsad likström.

Det finns en rad parametrar som behöver studeras både i laboratorium och i fält för att definiera vilka begränsningar och möjligheter som finns för dränering med elektroosmos i betongväggar. Eftersom det finns indikationer på att elektroosmos kan ha en bättre effekt med pulsad ström än ren likström bör detta område undersökas närmare. En jämförelse i laboratorium mellan ren likström, pulsad likström och pulsad likström med kort tid av omvänd polarisation kan möjligen utreda dessa fenomen. Provningar i laboratorium kan också genomföras på olika konfigurationer av armering för att avgöra hur stor läckströmspåverkan blir. Det kan innefatta både olika typer av armeringar samt placering av elektroder men också lösningar för att minska läckströmspåverkan.

## 4 Slutsatser

Från litteraturstudien kring elektroosmotisk dränering kan följande slutsatser medges:

- Teorin medger fukttransport genom elektroosmos i porösa material, de exakta mekanismerna i betong är dock inte helt klarlagda.
- Det finns inga till få publikationer i vetenskapliga tidskrifter kring elektroosmos i betong.
- Design på elektroder och hur dessa placeras har stor betydelse för effektiv dränering.
- Inga tydliga belägg för de positiva effekterna för elektroosmos med pulsad ström har hittats.
- Övervakning av utmatad ström och spänning samt fukt i betongen kontinuerligt är nödvändigt. Betongens fuktighet bör mätas under en relativt lång period.

## 5 Fortsatt arbete

För fortsatt arbete rekommenderas framför allt provningar i kontrollerade miljöer där yttre faktorer kan kontrolleras för att verkligen utvärdera effekten av elektroosmos i betong. Sådana studier kan innefatta utvärdering av placering och geometrier av anod och katod. Vidare bör även en pulsad ström utvärderas för att avgöra om olika typer av pulsning har några positiva effekter på vattentransporten. Fortsatt arbete kan även innefatta att hitta lösningar för att minimera läckströmskorrosion på armeringen i betongen. Insamling av mätvärden från någon eller några befintliga installationer i fält bör också göras kontinuerligt under en längre period.

## 6 Litteraturförteckning

- [1] F. F. von Reuss, "Sur un nouvel effet de l'électricité galvanique," *Memoires de la Société Impériale des Naturalistes de Moscou*, pp. 327-337, 1809.
- [2] N. Mosavat, E. Oh och G. Chai, "A review of electrokinetic treatment technique for improving engineering characteristics of low permable problematic soils," *International Journal of GEOMATE*, pp. 266-272, 2012.
- [3] M. McInerney, "Demonstration of Electro-Osmotic Pulse Technology for Groundwater Intrusion Control In Concrete Structures," US Army Corps of Engineers, 1998.
- [4] M. K. McInerney, S. Morefield, S. Cooper, P. Malone, C. Weiss, M. Brady, J. Taylor och V. F. Hock, "Electro-Osmotic Pulse (EOP) Technology for Control of Water Seepage in Concrete Structures ERDC/CERL TR-02-21," US Army Corps of Engineers, 2002.
- [5] O. S. J. Marshall, "Demonstration of Electro-Osmotic Pulse Technology in Earth-Covered Magazines at Fort A.P. Hill, VA ERDC/CERL TR-09-23," US Army Corps of Engineers, 2009.
- [6] R. Buchner, "What can be learnt from dielectric relaxation spectroscopy about ion solvation and association?," *Pure applied chemistry*, vol. 80, nr 6, pp. 1239-1252, 2008.
- [7] P. Atkins och J. de Paula, *Physical Chemistry* 9th edition, New York: W.H. Freeman and Company, 2010.
- [8] Z. Stojek, "The electrical double layer and its structure," i *Electroanalytical Methods*, Berlin, Springer, 2010, pp. 3-9.
- [9] IUPAC, "IUPAC," 07 10 2008. [Online]. Available: <http://goldbook.org/E01968.html>. [Använd 01 02 2017].
- [10] C. Cameselle, "Enhancement of electro-osmotic flow during the electrokinetic treatment of a contaminated soil," *Electrochimica Acta*, vol. 181, pp. 31-38, 2015.
- [11] G. Bai, H.-B. Yi, H.-J. Li, Xu och Jia-Jia, "Hydration characteristics of Ca<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup>: a density functional theory, polarized continuum and molecular dynamic investigation," *Molecular Physics*, vol. 111, nr 4, pp. 553-568, 2013.
- [12] A. A. Zavitsas, "Aqueous solutions of calcium ions: Hydration numbers and the effect of temperature," *The Journal of Physical Chemistry*, vol. 109, nr 43, pp. 20636-20640, 2005.
- [13] B. A. Bauer, S. Ou och S. Patel, "Solvation structure and energetics of single ions at the aqueous-liquid interface," *Chemical Physics letters*, vol. 527, pp. 22-26, 2012.
- [14] K. P. Tikhomolova, *Electro-osmosis*, Chichester, West Sussex: Ellis Horwood limited, 1993.
- [15] R. Hunter och H. L. Wright, "Dependence of electrokinetic potential on concentration of electrolyte," *Journal of Colloid and Interphase Science*, vol. 37, nr 3, pp. 564-580, 1971.
- [16] G. Camitz, *Korrosionsskydd av stål i betongkonstruktioner*, Stockholm: Swerea KIMAB, 2011.
- [17] G. Aylward och T. Findlay, *SI Chemical Data 6th Edition*, Milton: John Wiley and sons Australia, 2008.

- [18] T. Eliasson. Sverige Patent SE8106785, 1981.
- [19] T. Eliasson. Sverige Patent SE 8601888L, 1986.
- [20] H. Kristiansen, "Method for dehydrating capillary materials". USA Patent 5755945, 26 Maj 1998.
- [21] D. A. Little, "Electro-Osmotic Pulse Leak Repair Method: Evaluation in Trinity Dam Bonnet Chamber," Bureau of Reclamation, Technical Service Center, Materials Engineering and Research Laboratory, Denver, 2012.
- [22] C. Stanley och I. McFeat-Smith, "Electro-Osmosis using multipulse sequencing for removing and repelling water out of buildings and other structures," 2008.
- [23] L. M. Ottosen, "Drying brick masonry by electro-osmosis," i "*Masonry (10)*", *Proceedings of the Seventh International Masonry Conference*, London, 2006.
- [24] G. Scherpke och U. Schneider, "Elektroosmose - Ein vergleich theoretischer Ergebnisse mit experimentellen resultaten," Berlin, 1999.
- [25] S. Geving, P. Blom, M. Kvalvik och E. Martinsen, "Utbedring av fuktskadade kjelleryttervegger Delrapport 2 Prosjektrapport 84," Sintef, 2011.

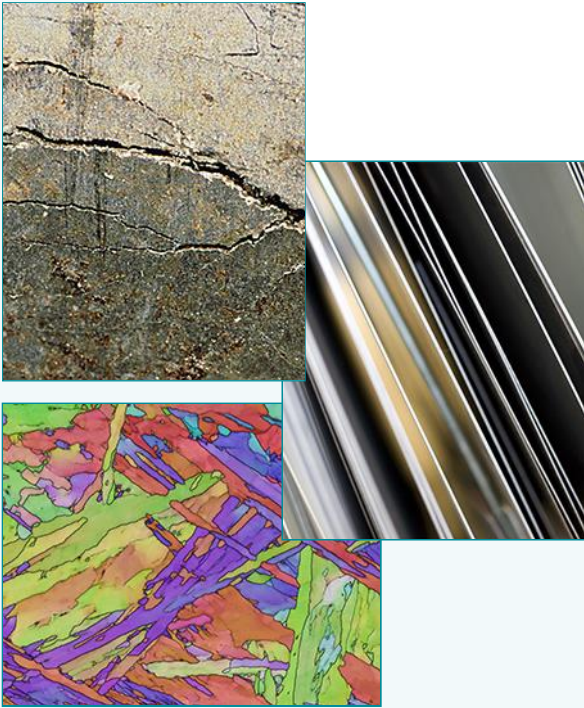


**swerea|KIMAB**

Box 7047, 164 07 Kista

Besöksadress Isafjordsgatan 28 A, 164 40 Kista

08-440 48 00, kimab@swerea.se, www.swreakimab.se



Uppdragsrapport  
Konfidentiell

## Dränering av betong med elektroosmos - Modelleringsstudie

171101

Utredare: Tommy Zavalis, Carl-Johan Högberg

carl-johan.hogberg@swerea.se, 08-545 274 57

Avdelning: Korrosion

Vårt referensnr: 13893

Er referens: Folke Björk

Företag: KTH

Ert referensnr: [Ert referensnr]

swerea | KIMAB

Datum: 171101

Godkänd av:

2017-11-02

Utredare: Tommy Zavalis, Carl-Johan Högberg

Vårt referensnr: 13893

X 

Er referens: Folke Björk

Signerat av: Bror Sederholm

Ert referensnr: [Ert referensnr]

[Forskningsledare]

---

# Dränering av betong med elektroosmos - Modelleringsstudie

## Sammanfattning

Det finns idag kommersiella metoder för att minska fuktigheten i material med hjälp av elektroosmos. Exempel på områden där elektroosmos används är till exempel för att avfukta jordar och betong. Mekanismerna är dock inte helt klargjorda vilket gör det svårt att förutsäga när elektroosmotisk dränering kommer att fungera eller inte.

I den här rapporten används en mekanistisk modell för att undersöka elektroosmotisk dränering av vatten från betong. Fokus ligger i huvudsak på att förstå hur sammansättningen av joner i betongen påverkar vattentransporten. Grundidén är att vattenmolekyler binds till laddade joner som rör sig i ett elektriskt fält.

Studien tyder på att den traditionella elektroosmostekniken fungerar dåligt i de undersökta betongtyperna. Sammansättningen av porlösningen i betongen saknar den koncentration av katjoner som behövs för att effektivt dränera vatten. Det höga pH-värdet i porlösningen gör istället att vatten dras in i betongen eftersom de negativt laddade hydroxidjonerna (anjoner) binder vattenmolekyler. Dessutom sker utarmning av joner nära anoden ganska fort vilket försvårar flödet av vatten. Ett sätt att kringgå att vatten dras in i betongen kan vara att istället flytta ut anoden från betongen och istället placera den i jorden i betongens närhet.

Betongens armering kan korrodera vid elektroosmos. Armeringens form och placering påverkar hur stort korrosionsangreppet blir.



# Innehållsförteckning

1	Inledning .....	1
2	Teori.....	2
2.1	Matematisk modell .....	2
2.2	Modellparametrar .....	4
3	Resultat och diskussion.....	7
3.1	Förmåga att dränera vatten .....	7
3.1.1	Effekt av laddad vägg (Elektroosmotiskt flöde).....	7
3.1.2	Betongtyper och hydratiseringstal .....	8
3.1.3	Betydelsen av zetapotentialen i jord .....	12
3.1.4	Artificiell elektrolyt .....	14
3.2	Syrereduktionsreaktioner .....	16
3.3	Placering av anod i jord .....	18
3.4	Påverkan på armering .....	20
4	Slutsatser.....	23
5	Fortsatt undersökning .....	24
6	Lista över symboler .....	25
7	Referenser .....	26

# 1 Inledning

Vid elektroosmos rör sig laddade partiklar (joner) i ett elektriskt fält mellan en positiv elektrod (anod) och en negativ elektrod (katod). Denna rörelse ger ett vattenflöde.

Generellt så sker masstransport av laddade partiklar i bulklösning på grund av koncentrationsgradienter (diffusion), ett pålagt elektriskt fält (migration) och det konvektiva flödet från till exempel tryck (konvektion). [1] Dessa processer påverkar vattenflödet eftersom många laddade partiklar kan bilda komplex med vattenmolekyler genom så kallad hydratisering. [2, 3] Antalet vattenmolekyler som anges bindas varierar för många joner i litteraturen. Det primära hydratiseringstalet är det vanligaste för att ange antalet molekyler som är starkt bundna till jonen och medföljer när jonen rör sig. [3]

För porösa material kan kapillärväggarna också ha en viss roll för vattenflödet om dessa är laddade och bildar ett elektriskt dubbelskikt. Anledningen är att dubbelskiktet ger en laddningsseparation för partiklarna i kapillären och att partiklarna kan föra med sig vatten. Partiklarna i det elektriska dubbelskiktet är immobila och nära kapillärväggen semi-immobila inom det diffusiva lagret eller fullt mobila i bulklösningen. För en negativt laddad vägg laddar katjoner dubbelskiktet och finns i överskott i det diffusiva lagret. När ett elektriskt fält läggs på skapas först ett flöde av vatten i det diffusiva lagret där katjonkoncentrationen är som högst. Eventuellt inducerar detta flöde ett flöde i resten av kapillären som rör sig mot katoden. Ett mått på i vilken mån vatten kan dras ut ur ett material på grund av den laddade kapillärväggen är zetapotentialen ( $\zeta$ ). Denna potential är potentialskillnaden mellan kapillärväggen och utsidan av dubbelskiktet. Ett krav för att skapa ett vattenflöde är att det finns tillräckligt med katjoner för att ladda dubbelskiktet och som kan röra sig i det diffusiva lagret. [4]

När det talas om elektroosmos är det enkelt att felaktigt endast ta hänsyn till flödet till följd av de laddade kapillärväggarna, det så kallade elektroosmotiska flödet. Bidraget från masstransport från vattenbärande partiklar genom diffusion, migration och konvektion i bulken av porerna är ofta betydande och bör därför tas med i beräkningar. Normalt så minskar bidraget till vattenflödet från dubbelskiktet om diametern på kapillären ökar. En mekanistisk modell gör det möjligt att undersöka vikten för dessa processer på ett enkelt sätt. En sådan modell används i denna rapport för att i detalj studera dränering av vatten från betong med den elektroosmotiska tekniken.

## 2 Teori

Tillvägagångssättet för att analysera elektroosmosen är att sätta upp och använda en mekanistisk modell som innehåller de flesta viktiga masstransportegenskaperna i en lösning. Symbolerna som används i modelleringsekvationerna förklaras i kapitel 6.

### 2.1 Matematisk modell

Denna modell tar hänsyn till den elektrokemiska drivkraften skapad av det elektriska fält som genereras av elektroderna. Trycket från omgivningen och förändringar av lösningens volymsfraktion (d.v.s. fyllning och tömning av porerna) utelämnas för enkelhetens skull.

Modellen löser massbalanser för varje jonslag,  $i$ , över de vätskefyllda porerna i ett poröst medium. Balanserna uttrycks som [1]:

$$\varepsilon \frac{\partial c_i}{\partial t} = -\nabla \cdot (N_i) \quad (1)$$

Flödet,  $N$ , av varje jonslag ges av följande förenklade uttryck:

$$N_i = -\frac{c_i D_i \varepsilon^\beta}{RT} \cdot \frac{\partial \mu_i}{\partial x} \approx -D_i \varepsilon^\beta \cdot \frac{\partial c_i}{\partial x} - c_i \cdot D_i \varepsilon^\beta \cdot \frac{z_i F}{RT} \frac{\partial V}{\partial x} \quad (2)$$

Bidraget från den laddade kapillärväggen kan införas i modellen genom att lägga till följande flödesterm i högerledet av ekvation (2) (härledd från [4]):

$$N_{\text{charged wall}} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \zeta}{\tau \eta} \frac{\partial V}{\partial x} \quad (3)$$

Porlösningen är inte ideal, vilket tas med i modellen genom användning av aktiviteter istället för koncentrationer. Aktiviteten fås genom multiplikation av koncentrationen med aktivitetskonstanten, enligt:

$$a_i = \gamma_i \cdot c_i \quad (4)$$

Aktivitetskonstanten ges av Davies lag [5]:

$$\lg \gamma_i = -0.51 \cdot z_i^2 \left( \frac{\sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}} - 0.2 \cdot I \right) \quad (5)$$

där jonstyrkan beräknas från:

$$I = 1/2 \cdot \sum_i z_i^2 \cdot c_i \quad (6)$$

För att bevara elektroneutralitet i lösningen ska villkoret för elektroneutralitet uppfyllas, vilket beskrivs av:

$$\sum_i z_i \cdot c_i = 0 \quad (7)$$

Den elektriska potentialen beräknas från att laddningen är oförändrad över porlösningen, enligt uttrycket:

$$\nabla \cdot i = 0 \quad (8)$$

Strömtätheten är lika med summan av flödet av joner, enligt:

$$i = F \sum_i z_i \cdot N_i \quad (9)$$

Transporten av vatten till eller från betongen fås från flödet av varje jonslag multiplicerat med hydratiseringstalet. Hydratiseringstal är tagna från litteraturen och finns i Tabell 4.

De elektrokemiska reaktionerna vid anod och katod beskrivs med följande anodiska och katodiska Tafelkvationer:

$$i_a = i_0 \cdot 10^{(0-V-E_{0a})/A_a} \quad (10)$$

$$i_c = -i_0 \cdot 10^{-(V_{app}-V-E_{0c})/A_c} \quad (11)$$

## 2.2 Modellparametrar

Elektroden i den elektroosmotiska utrustningen utsätts för elektrokemiska reaktioner. Då lösningen i betongens porer vanligtvis är alkalisk är det följande reaktioner som med största sannolikhet sker:

Vid anoden



Vid katoden



I Tabell 1 anges de elektrokemiska reaktionsparametrarna. Katoden antas bestå mest av koppar och anoden av titan belagt med ädelmetallskikt (MMO).

Tabell 1. Kinetiska parametrar för elektrokemiska reaktioner vid elektrodena.

Reaktion	Utbytesströmtäthet, $i_0$	Tafellutning, A	Normalpotential, $E_0$
R1	$1 \cdot 10^{-7} \text{ A/m}^2$ [6]	40 mV/decade [6]	-0,642 V vs SCE [7]
R2	$1 \cdot 10^{-5} \cdot c_{\text{O}_2} \text{ A/m}^2$ [8]	180 mV/decade [8]	0,242 V vs SCE [8]
R3	$0,01 \text{ A/m}^2$ [9]	37 mV/decade [9]	-1,070 V vs SCE [7]

Systemet av möjliga reaktioner i porlösningen visas i Tabell 2.

Tabell 2. Reaktionssystem i porlösningen. [10, 11]

Reaktion	Jämviktskonstant
$\text{Al}^{3+} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{AlOH}^{2+} + \text{H}^+$	$\log K = -4,997$
$\text{Al}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Al}(\text{OH})_2^+ + 2\text{H}^+$	$\log K = -10,094$
$\text{Al}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+$	$\log K = -16,791$
$\text{Al}^{3+} + 4\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Al}(\text{OH})_4^- + 4\text{H}^+$	$\log K = -22,688$
$\text{Ca}^{2+} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CaOH}^+ + \text{H}^+$	$\log K = -12,697$
$\text{H}^+ + \text{SO}_4^{2-} \leftrightarrow \text{HSO}_4^+$	$\log K = 1,99$
$\text{Al}^{3+} + \text{SO}_4^{2-} \leftrightarrow \text{AlSO}_4^+$	$\log K = 3,89$
$\text{Al}^{3+} + 2\text{SO}_4^{2-} \leftrightarrow \text{Al}(\text{SO}_4)_2^-$	$\log K = 4,92$
$\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} \leftrightarrow \text{CaSO}_4$	$\log K = 2,36$
$\text{Na}^+ + \text{SO}_4^{2-} \leftrightarrow \text{NaSO}_4^-$	$\log K = 0,73$

I Tabell 3 visas några typiska sammansättningar för porlösningar i betong. [12] Reaktionerna i Tabell 2 är baserade på dessa sammansättningar. Det bör påpekas att värdena i referens [12] inte ger en laddningsneutral lösning. Detta kompenseras genom att beräkna kaliumjonskoncentration från elektroneutralitetsvillkoret (ekv. 7).

Tabell 3. Sammansättning för två typer av tre månader gammal porvätska från olika betongkvaliteter. [12]

Species	I - Anläggningscement	II - Slite std
$\text{Na}^+$	28 mol/m <sup>3</sup>	63 mol/m <sup>3</sup>
$\text{K}^+$	83 mol/m <sup>3</sup> (från elektroneutralitet)	280 mol/m <sup>3</sup> (från elektroneutralitet)
$\text{Ca}^{2+}$	0,9 mol/m <sup>3</sup>	1,0 mol/m <sup>3</sup>
Si	0,8 mol/m <sup>3</sup> (försummad i modellen)	-
$\text{Al}^{3+}$	0,04 mol/m <sup>3</sup>	-
OH <sup>-</sup>	114 mol/m <sup>3</sup>	380 mol/m <sup>3</sup>
$\text{SO}_4^{2-}$	0,04 mol/m <sup>3</sup>	-
Cl <sup>-</sup>	< 2 mg/l (2 mg/l i modellen)	2-5 mg/l (2 mg/l i modellen)
$\text{Fe}^{2+}$	< 0,02 mol/m <sup>3</sup> (försummad i modellen)	< 0,02 mol/m <sup>3</sup> (försummad i modellen)
pH	13,06	13,6

På grund av skillnader i litteraturen prövas två uppsättningar med hydratiseringstal. Hydratiseringstalen visas i Tabell 4. För salt med hydroxidjoner antas det att varje hydroxidjon ersätts med en vattenmolekyl. Till exempel så har  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  ett hydratiseringstal på 4,68.

Tabell 4. Hydratiseringstal.

Jonslag	Uppsättning 1	Uppsättning 2
Na <sup>+</sup>	0,30 [4]	4 [4, 5]
K <sup>+</sup>	0 [4, 5]	0 [4, 5]
Ca <sup>2+</sup>	2,09 [4]	10 [5]
Al <sup>3+</sup>	8,68 [4]	8,68 [4]
OH <sup>-</sup>	2,80 [4]	5 [5]
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1,83 [4]	1,83 [4]
Cl <sup>-</sup>	0 [4, 5]	0 [4, 5]
H <sup>+</sup>	1,93 [4]	1,93 [4]

De fysikaliska egenskaperna för masstransporten är tabulerade i Tabell 5.

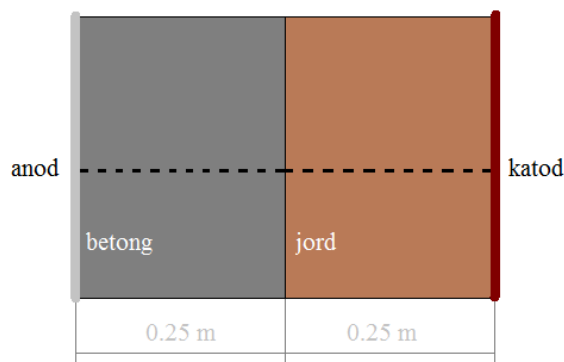
Tabell 5. Fysikaliska egenskaper för masstransport.

Egenskap	Värde	Kommentar
$D_{Na^+}$	$1,33 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$	Från mobilitet [13]
$D_{K^+}$	$1,96 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$	Från mobilitet [13]
$D_{Ca^{2+}}$	$1,58 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$	Från mobilitet [13]
$D_{Al^{3+}}$	$5,59 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$	[14]
$D_{OH^-}$	$5,30 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$	Från mobilitet [13]
$D_{SO_4^{2-}}$	$2,13 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$	Från mobilitet [13]
$D_{Cl^-}$	$2,03 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$	Från mobilitet [13]
$D_{H^+}$	$9,30 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$	Från mobilitet [13]
$D_{O_2}$	$2,42 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$	[13]
$\epsilon_{betong}$	0,2	[15]
$\epsilon_{jord}$	0,5	Antagande
$\beta_{betong}$	3	Uppskattad från [15]
$\beta_{jord}$	1,5	Antagande
$\tau_{betong}$	3	[15]
$\tau_{jord}$	1	[16]
$\zeta_{concrete}$	-10 mV	[17, 18, 19]

## 3 Resultat och diskussion

### 3.1 Förmåga att dränera vatten

Dränering av vatten från betong simulerades med de sammansättningar och uppsättningar med hydratiseringstal givna i Tabell 3, Tabell 4 och Tabell 5 undersöktes. I Figur 1 ges geometrin för undersökningen. Betongen och jorden antas ha samma sammansättning i porerna. Tillgången på syre vid elektroderna antogs vara obegränsad. 1 V lades på systemet om inget annat anges.



Figur 1. Del av betong och jord liggandes intill anod och katod som visar uppställning för modelleringen. Den streckade linjen anger geometrin (i 1D) för undersökningen.

#### 3.1.1 Effekt av laddad vägg (Elektroosmotiskt flöde)

Zetapotentialen,  $\zeta$ , angiven i Tabell 5 är ett medelvärde av de negativa zetapotentialerna som hittades i litteraturen. Det finns en stor osäkerhet i denna potential hos betong då det finns många olika uppgifter i litteraturen beträffande värdet på potentialen. De flesta källor anger negativa värden men det finns också några referenser som anger svagt positiva värden, vilket betyder att anjoner istället binder till kapillärväggen och vatten förs in i materialet. [17, 18, 19] För pH 12,4 och högre är effekten på vattentransporten från de laddade kapillärväggarna 1,1 % eller mindre för de scenarior som studeras här. Det beräknade bidraget till det totala flödet visas i Tabell 6. Eftersom bidraget är väldigt litet och på grund av osäkerheten på värdet försummas denna effekt i de kommande resultaten. För att rättfärdiga detta ytterligare testades en zetapotential på -100 mV (fem gånger mer negativ än något rapporterat värde). Bidraget till vattenflödet visar sig då vara mindre än 7 %.

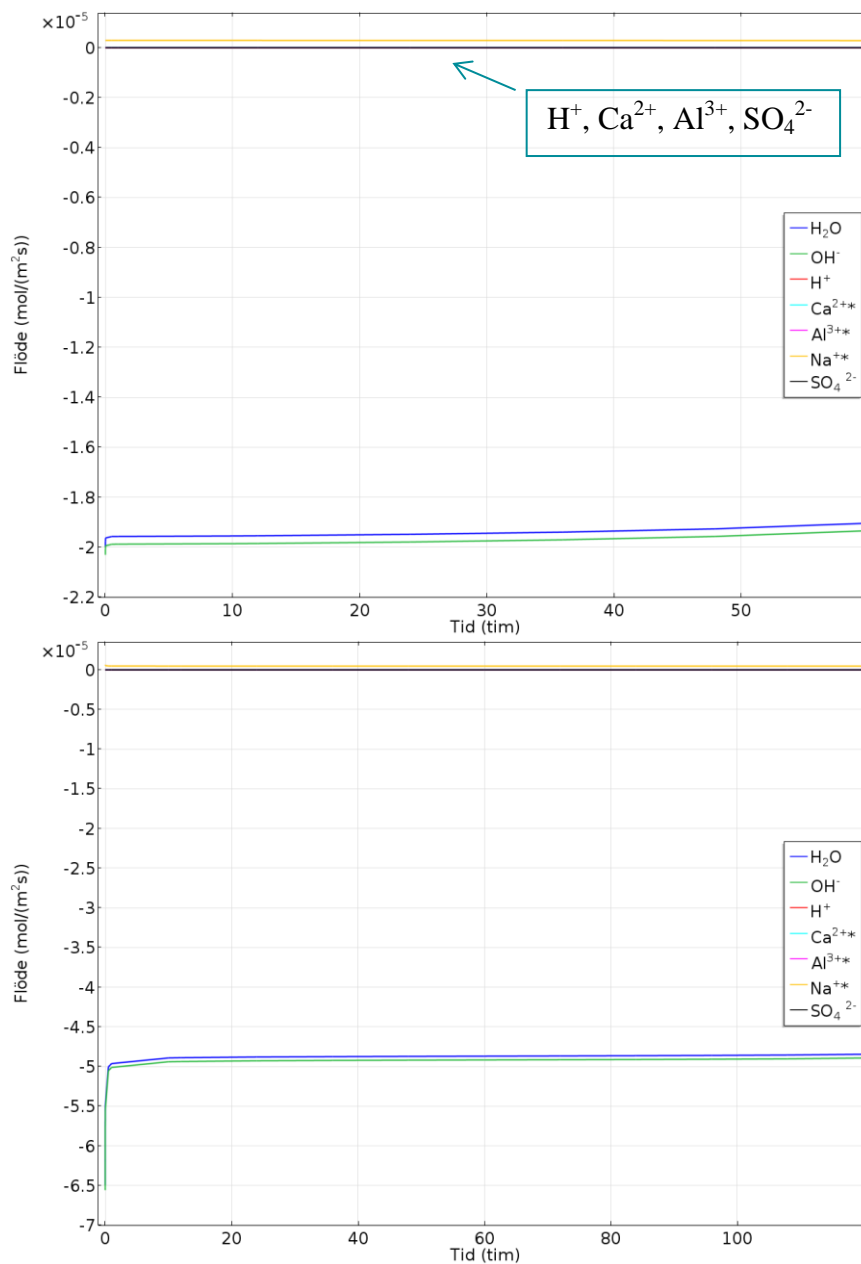
Tabell 6. Bidrag till vattenflödet från det elektroosmotiska flödet för olika scenarios.

Scenario	Bidrag till vattenflöde (efter 1 h)
Betong I, Set 1 hydratiseringstal	0,7 %
Betong I, Set 2 hydratiseringstal	0,8%
Betong I, Set 1 hydratiseringstal, pH=12.4	0,8%
Betong II, Set 1 hydratiseringstal	0,7 %
Betong II, Set 2 hydratiseringstal	1,1 %
Betong II, Set 1 hydratiseringstal, pH=12.4	0,9 %



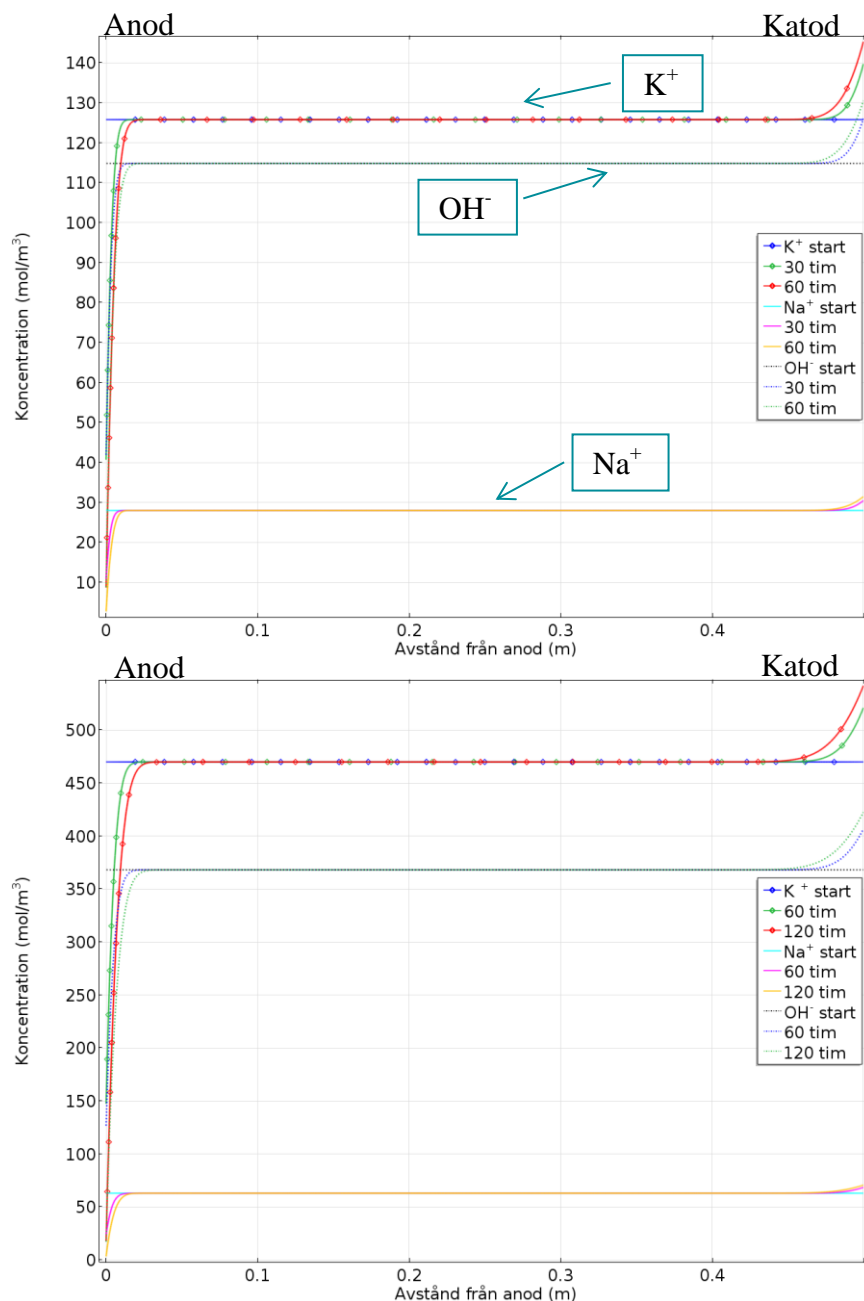
### 3.1.2 Betongtyper och hydratiseringstal

I Figur 2 visas flödet av vatten med olika typer av vattenbärande joner för de två betongkvaliteterna med uppsättning 1 av hydratiseringstalen. Ett negativt flöde indikerar flöde in i betongen och positivt ur betongen. Figuren visar ett nettoflöde in i betongen för båda betongtyperna (blå linje i figuren). Förutom för natriumjonen och hydroxidjonen, så har de flesta jonerna ett försumbart bidrag till nettoflödet av vatten (linjerna för  $H^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Al^{3+}$  och  $SO_4^{2-}$  överlappar vid noll). Det stora bidraget från hydroxidjonerna, som migrerar mot anoden, kommer från att dessa finns i hög koncentration och har god förmåga att transportera vatten. Å andra sidan ger natriumjonerna ett väldigt litet bidrag eftersom dessa inte finns i tillräckligt hög koncentration och har sämre förmåga att transportera vatten.



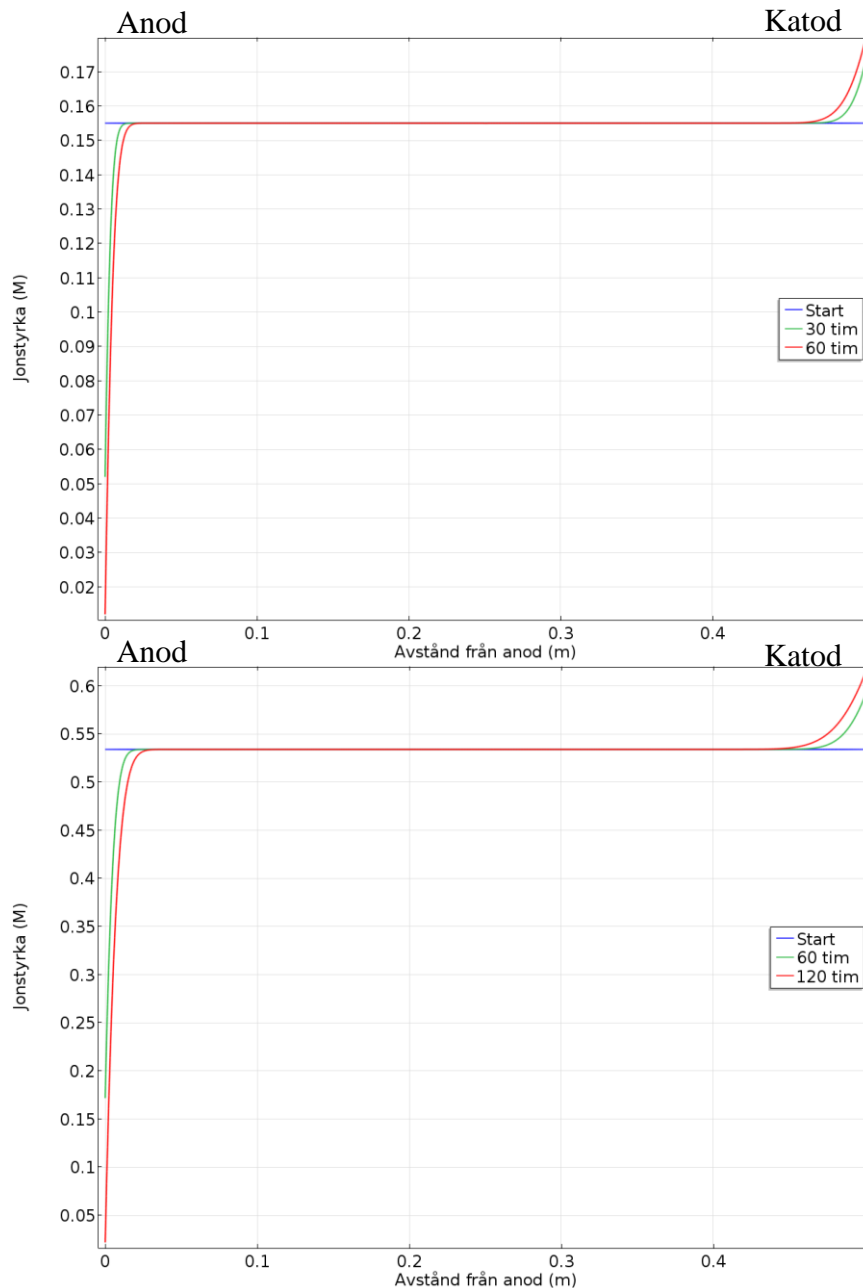
Figur 2. Vattenflöde med joner över gränssfasen mellan betong och jord. Övre bilden avser betong I och nedre bilden betong II med uppsättning 1 av hydratiseringstalen. \* både atomära och sammansatta joner.

Beräkningarna stoppades vid 60 (betong I) och 120 (betong II) timmar då strömmen efter denna tid minskade avsevärt. Vid dessa tidpunkter hade 40 ml respektive 190 ml vatten rört sig in i betong I och II. Anledningen till minskningen i ström var utarmningen av joner i närheten av anoden vilket drastiskt minskar konduktiviteten hos elektrolyten och därför ökar resistansen i systemet. Detta visas i Figur 3. Det elektriska fältet driver positivt laddade partiklar till katoden och hydroxidjonerna förbrukas i den elektrokemiska reaktionen vid anoden.



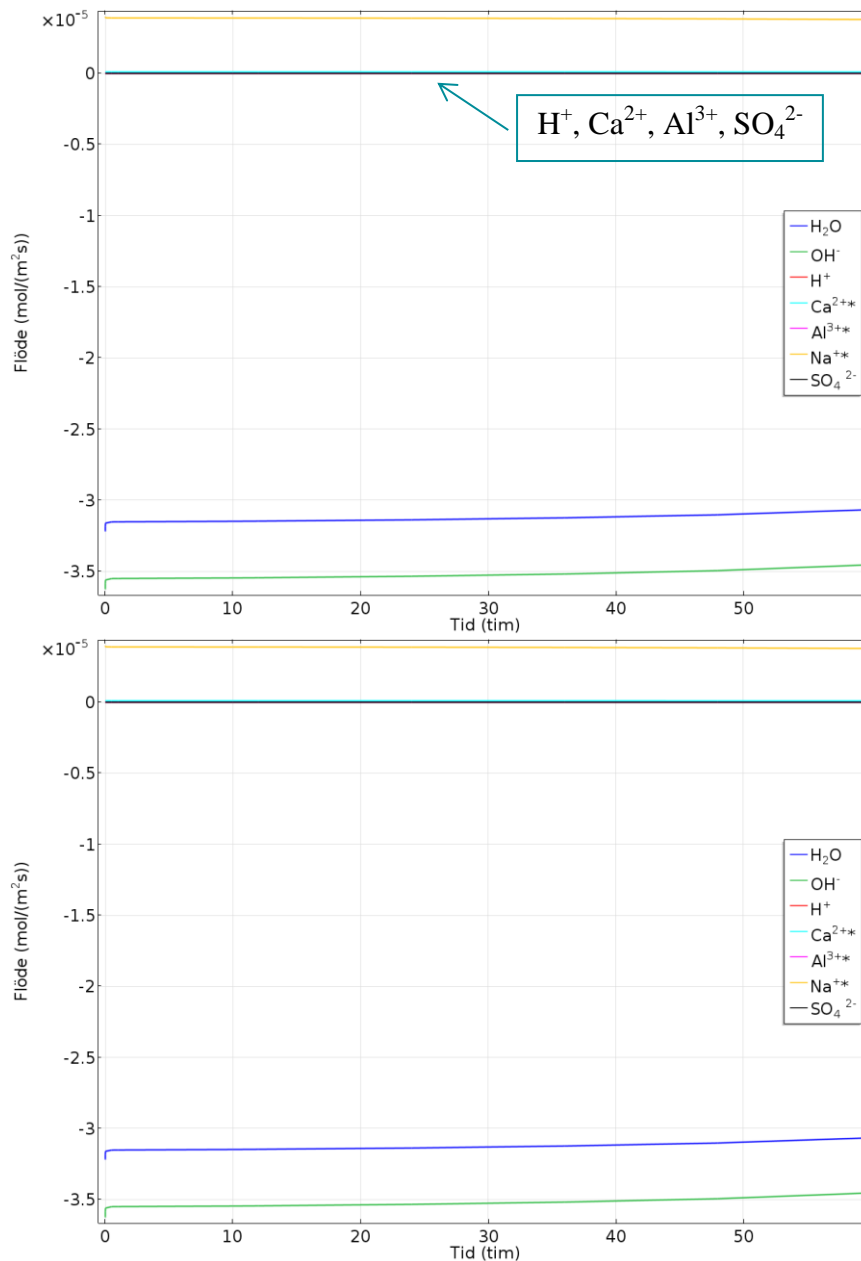
Figur 3. Koncentrationsprofiler mellan elektroderna för betongtyperna. Övre bilden avser betong I och nedre bilden betong II. Uppsättning 1 av hydratiseringstalen har använts.

Utarmningen av joner nära anoden ges uttryck av jonstyrkan i lösningen vilket illustreras i Figur 4.



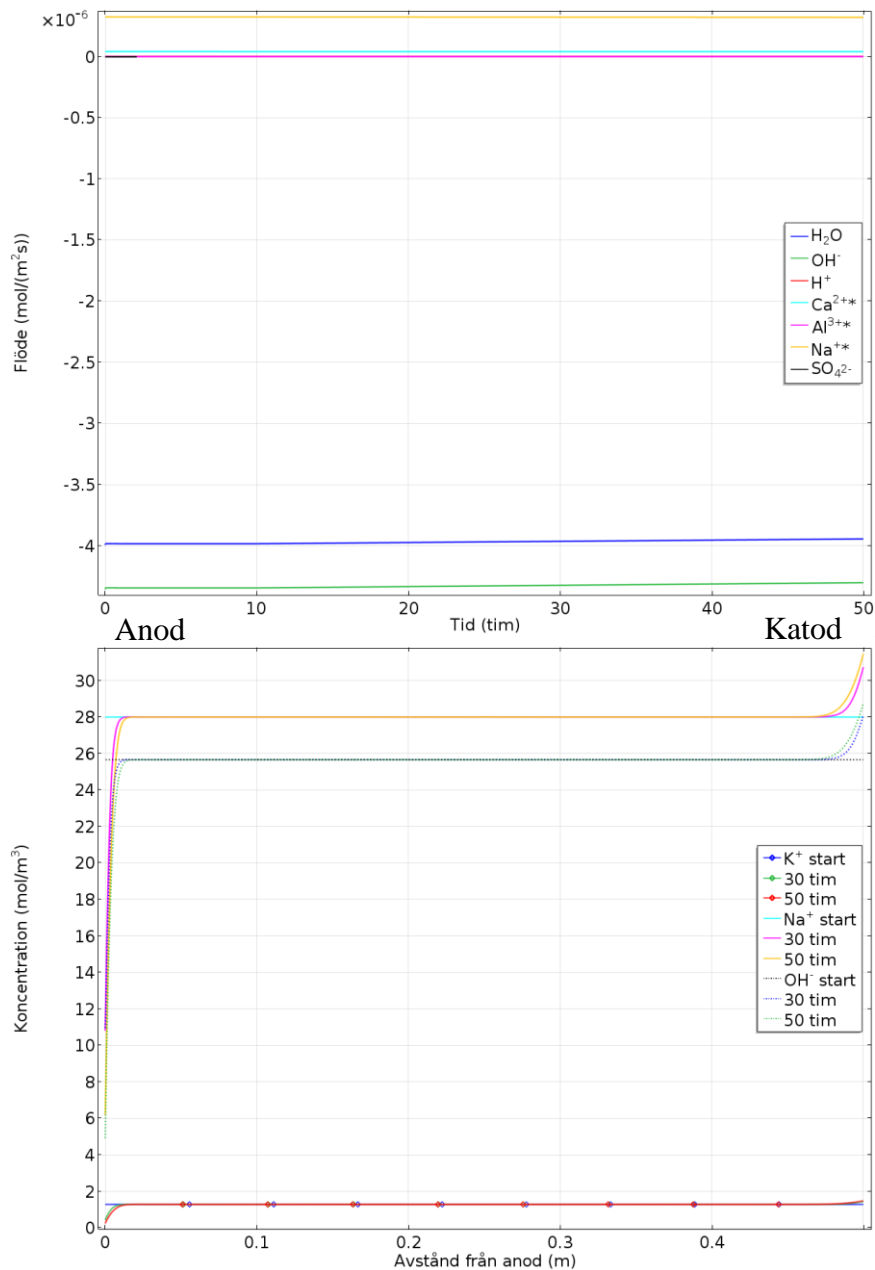
Figur 4. Jonstyrka mellan elektroderna för betongtyperna. Övre bilden avser betong I och nedre bilden betong II. Uppsättning 1 av hydratiseringstalen har använts.

I Figur 5 visas vattenflödet för betongtyperna med uppsättning 2 av hydratiseringstalen tills tidpunkten då strömmen sjunker avsevärt. Ingen dränering av vatten sker här heller och situationen är till och med sämre än föregående scenario. Anledningen är densamma som tidigare: En hydroxidjon kan bära mer vatten än en natriumjon och finns här i hög koncentration. När strömmen går ner har 61 ml respektive 282 ml vatten transporterats in i betong I och II.



Figur 5. Flöde av vatten över gränssytan mellan betong och jord. Övre bilden avser betong I och nedre bilden betong II med uppsättning 2 av hydratiseringstalen. \* både atomära och sammansatta joner.

Ett scenario med lägre pH undersöktes också. Tanken var att den lägre koncentrationen av hydroxidjoner skulle ge en ökad effekt på dräneringen. Ett lägre pH är möjligt eftersom jorden normalt sett har ett lägre pH än 13,06. Sammansättningen för betong I i Tabell 3 var möjlig att anpassa till ett pH av 12,4 och fortfarande erhålla elektroneutralitet i vätskan (KCl koncentrationen är då cirka 1 mol/m<sup>3</sup>). Trots det lägre pH-värdet erhålls ingen dränering i betongen. Exemplet i Figur 6 visar att nettoflödet av vatten är mycket lägre än vid pH 13,06 men fortfarande sker flödet in i betongen. Efter 50 timmar, när strömmen går ner på grund av utarmning av joner, har 6 ml vatten flyttats till betongen.



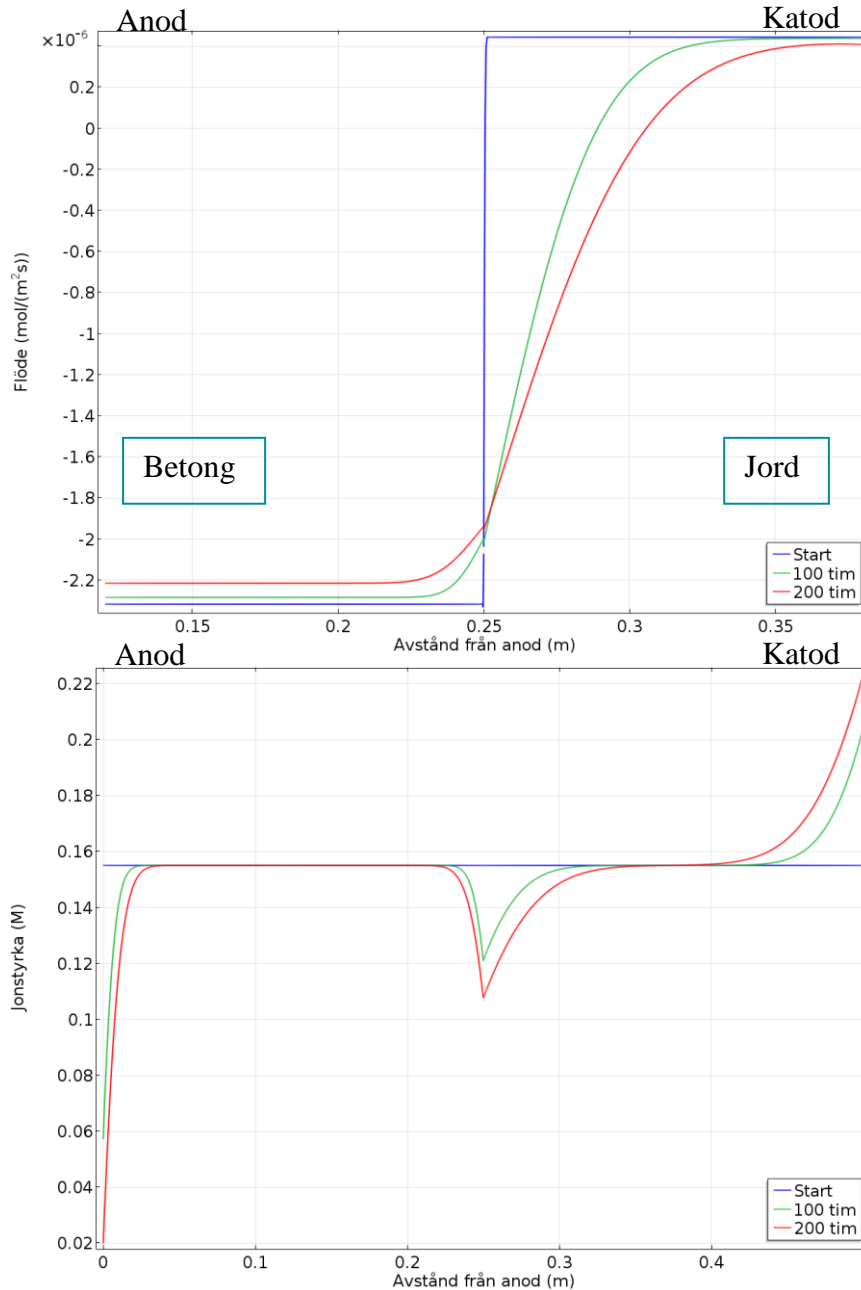
Figur 6. Övre bild: Flöde av vatten över gränssytan mellan betong och jord. Nedre bild: Koncentrationsprofiler mellan elektroderna. Betong I med uppsättning 1 av hydratiseringstalen vid pH 12,4.

### 3.1.3 Betydelsen av zetapotentialen i jord

I avsnitt 3.1.1-3.2.3 har effekten från det elektroosmotiska flödet bortsetts från även för jorden utanför betongen. För jord finns dock publikationer och rapporter från tester som tyder på att negativt laddade kolloider bidrar till att dränera vatten från jorden när den utsätts för ett elektriskt fält. [20] Zetapotentialens negativa värde är vanligen tio gånger större för jord än för betong och ger upphov till ett större elektroosmotiskt flöde. För jord är zetapotentialen cirka -100 mV, [21] Den möjliga påverkan för denna zetapotential testades för betong I och uppsättning 1 av hydratiseringstalen.

Figur 7 visar att jämfört med fallen med inget elektroosmotiskt flöde i jorden så uppstår dränering av vatten till viss del i jorden men inte inom betongen (positivt flöde i jorden och

negativt flöde i betongen). Torrare jord nära betongen motverkar att vatten tar sig in i betongen och resultaten visar på att flödet av vatten in i betongen minskar. Däremot kommer redan existerande fukt i betongen inte att kunna försvinna. Jonstyrkan i Figur 7 visar även på en risk för utarmning av joner i gränssfasen mellan betong och jord.



Figur 7. Övre bild: Vattenflöde inom en sektion mellan elektroderna. Nedre bild: Jonstyrka mellan elektroderna. Betong I med uppsättning 1 av hydratiseringstalen vid pH 13,06.

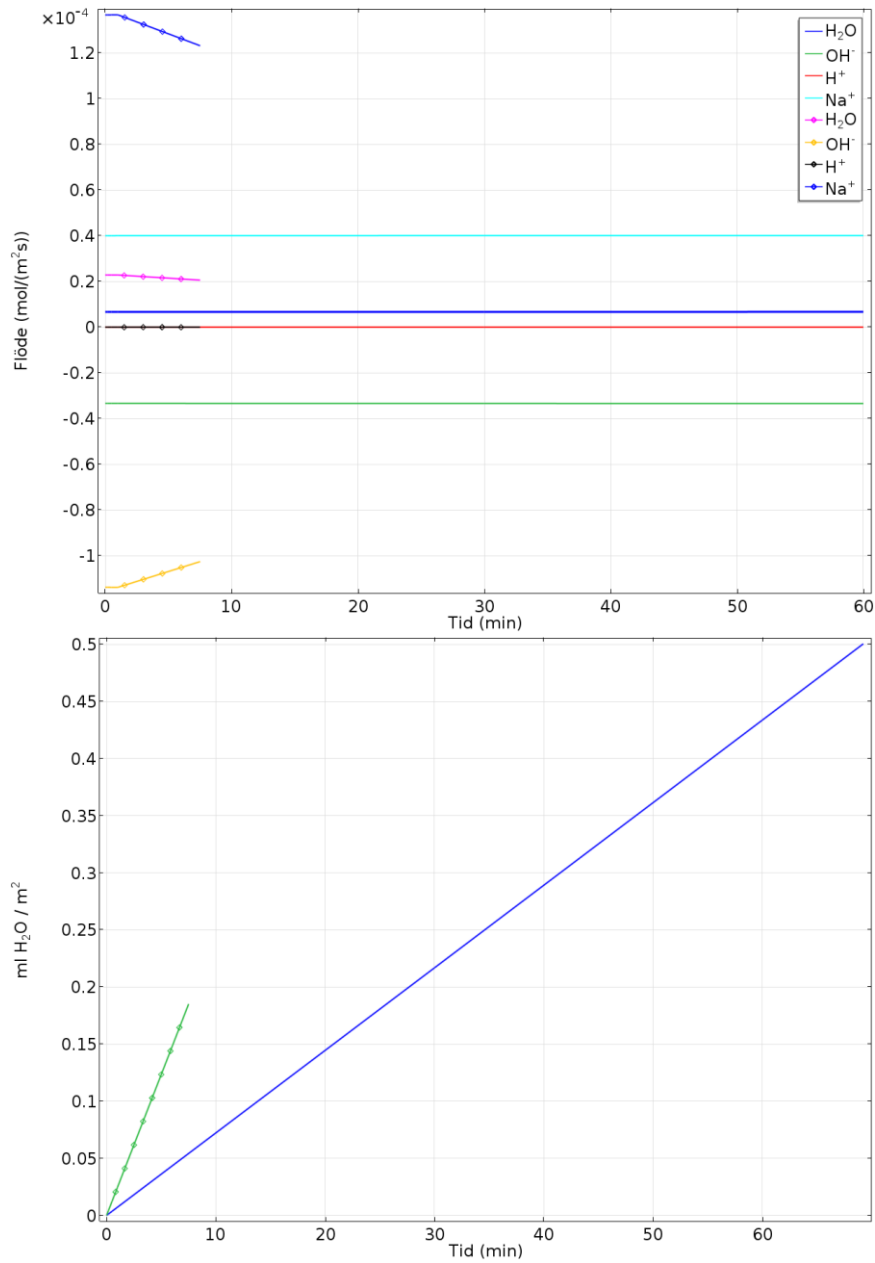
### 3.1.4 Artificiell elektrolyt

Resultaten har hittills visat att sammansättningen av porlösningen i betongen är av yttersta vikt om den elektroosmotiska metoden ska fungera. I Tabell 7 visas en artificiell elektrolyt med en sammansättning med hög koncentration av både katjoner och anjoner vid pH 13. Sammansättningen skapades för att ge bättre förutsättningar för dränering. Kloridjoner är särskilt passande som anjon i hög koncentration eftersom dessa inte transporterar något vatten och bidrar till laddningsneutralitet även vid höga natriumjonskoncentrationer.

Tabell 7. Sammansättning hos artificiell elektrolyt.

Jonslag	Koncentration ( $\text{mol/m}^3$ )
$\text{Na}^+$	Från elektroneutralitet, ekv. (7), s 2.
$\text{Cl}^-$	750
$\text{OH}^-$	105

I Figur 8 visas att den artificiella elektrolyten ger god dränering av vatten. Resultaten är beräknade för fallet med uppsättning 2 av hydratiseringstalen, eftersom det med uppsättning 1 inte sker någon dränering. Figurerna visar att för 5 V kan hastigheten för vattentransporten ökas om nödvändigt. Liksom visat tidigare så utarmas jonerna nära anoden, vilket begränsar tiden som dräneringen kan ske. Utarmningen sker fortare för högre pålagda spänningar.

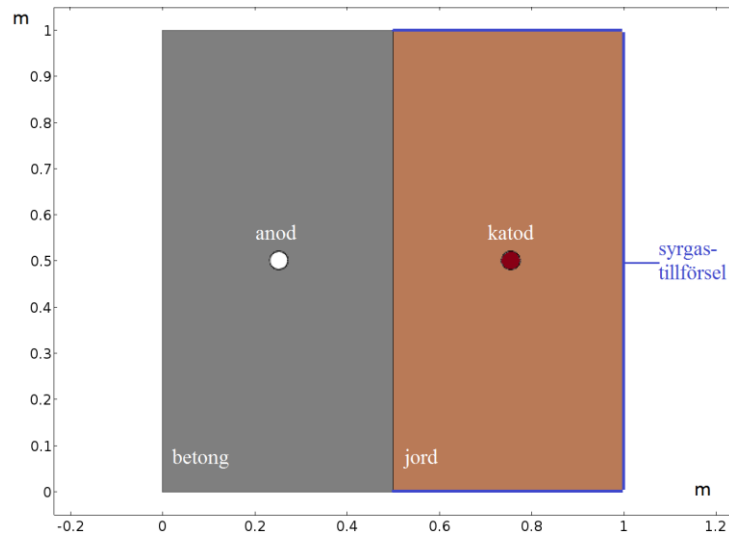


Figur 8. Övre bild: Vattenflöde med olika joner över gränssytan mellan betong och jord. Nedre diagram: Mängd dränerat vatten. Linje utan markeringar avser 1 V och den med markeringar 5 V. Uppsättning 2 av hydratiseringstalen.



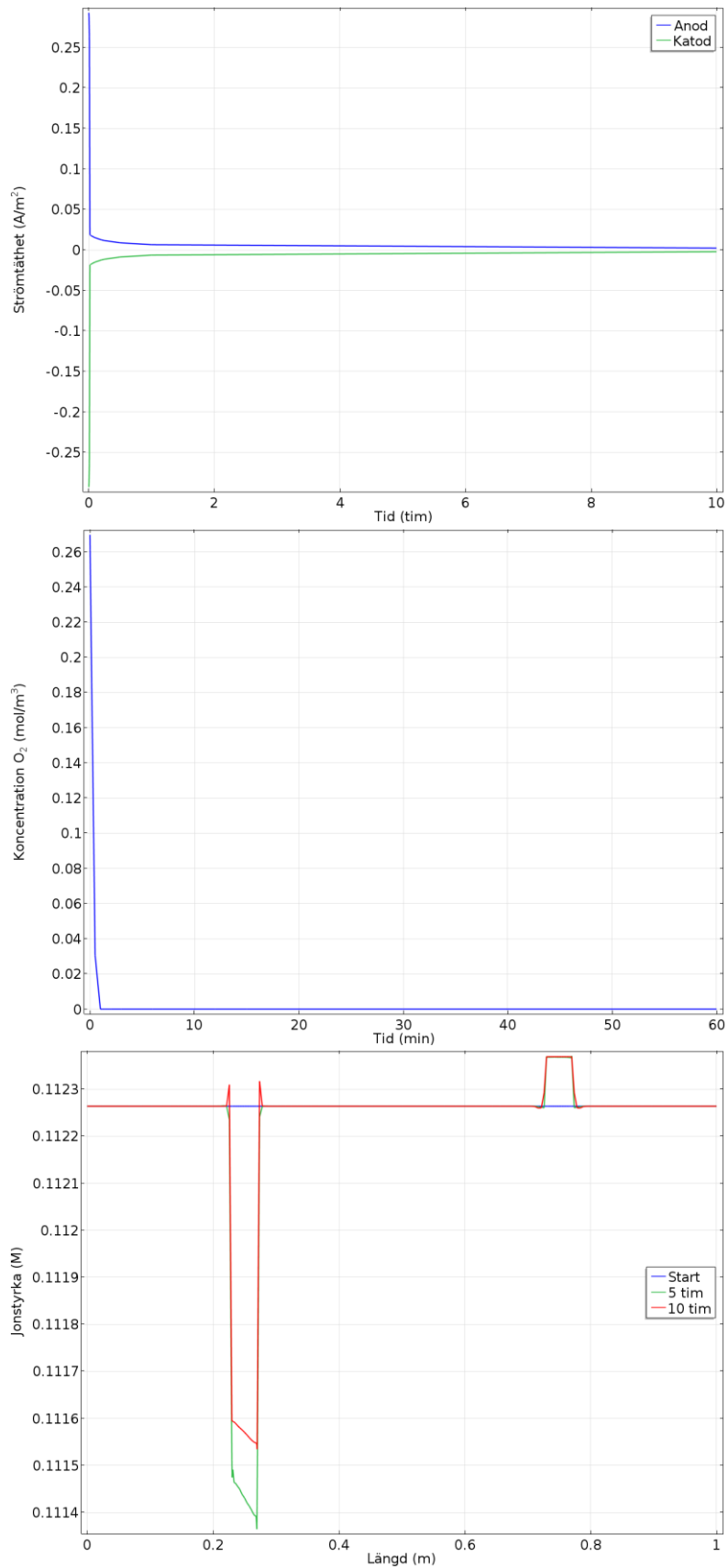
## 3.2 Syrereduktionsreaktioner

Syrereduktionsreaktionerna sker vid katoden. Hittills har påverkan av syretransporten på vattenflödet varit försumbar. Geometrin i Figur 9 användes för att undersöka påverkan av syretransport för 1 V. Figuren visar en gränssyta av betong och jord och elektroder (sedda från ovan). Diametrarna på elektroderna sattes båda till 4 cm.



Figur 9. 2D geometri för betong och jord med elektroder och område för syrgastillförsel markerade.

Resultaten i Figur 10 för betong I med uppsättning 1 av hydratiseringstalen visar att trots ett ganska kort avstånd för syre att vandra och en låg pålagd potential (1 V) så sker nästan fullständig utarmning av syre vid katoden inom några få minuter. Denna begränsande faktor är viktigare än utarmningen av joner (jonstyrkan är nästan konstant, Figur 10 nedre bilden) och strömmen går ner till en låg nivå ganska snabbt. Vätgasutvecklingen ((R3) i modellen) är också för obetydlig för dessa förhållanden för att kunna upprätthålla en relativt hög ström för systemet. Därför måste stor hänsyn tas vid placering av katoder för att kunna upprätthålla ett betydande flöde av vatten.

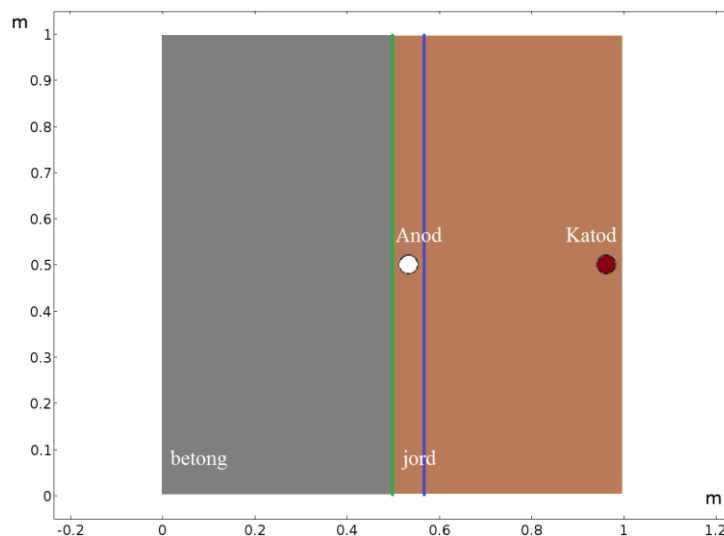


Figur 10. Övre bild: Strömtäthet vid anod och katod. Mittenbild: Medelkoncentration av syre vid ytan på katod. Nedre bild: Jonstyrkans profil genom mitten av geometrin. Betong I med uppsättning 1 av hydratiseringstalen.

### 3.3 Placering av anod i jord

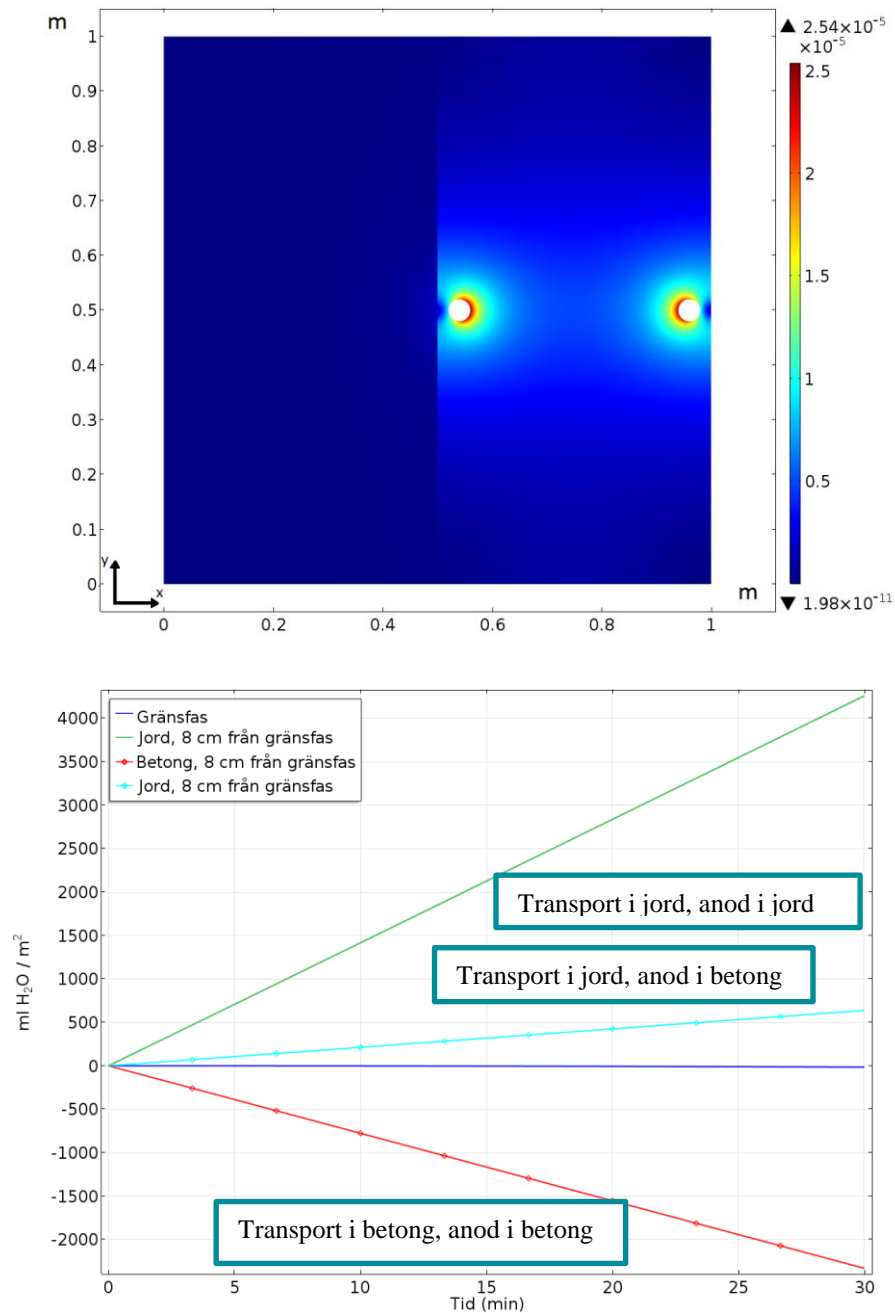
Av resultaten att döma är tillvägagångssättet att placera anoden i betongen under elektroosmos oftast inte det rätta sättet att uppnå dränering eller torkning av betongen. Om anoden istället placeras i jorden strax utanför betongen så kan vattentransporten ske som önskat från anod till katod (se sektion 3.1.3). Detta kan bidra till en torr omgivning utan att det elektriska fältet hindrar vattnet från att lämna betongen.

I Figur 11 visas den geometri, i 2D, som användes för att undersöka vattenflödet då anoden placeras i jorden nära betongen. Elektrodena har en diameter på 4 cm och anodens center är placerad 2 cm från gränssytan mellan betong och jord. Syrgastillförseln till systemet ansätts till obegränsad.



Figur 11. 2D geometri för betong och jord med elektroder och undersökta tvärsnitt (grön och blå linje) markerade.

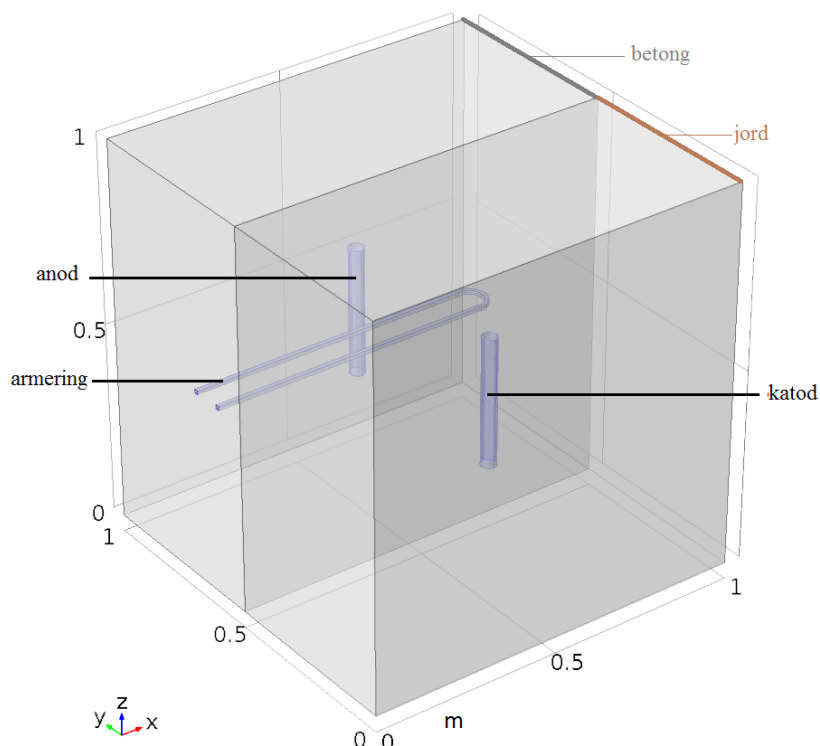
Den övre bilden i Figur 12 visar storleken av flödet av vatten då anoden är placerad i jorden. Det positiva värdet på flödet visar på att jorden i närområdet till betongen torkas ut då vattnet rör sig mot katoden. Den nedre bilden i Figur 12 visar den ackumulerade mängden vatten som passerat olika gränssnitt i riktning mot katoden i fallen med anoden placerad i jorden och med anoden i betongen. Resultaten visar på att placering av anoden i jorden inte kommer att driva vatten in i betongen. Sannolikt kommer vattnet istället att rinna ut (via tryck/konvektion) från betongen och föras bort med det pålagda elektriska fältet då jorden torkas ut. Konvektionen är som nämnt tidigare inte inkluderad i modellen, där av ett vattenflöde lika med eller nära noll i betongen enligt figuren.



Figur 12. Övre bild: Flöde av vatten ( $\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$ ) då anoden är placerad i jorden (se Figur 11). Nedre bild: Vattenmängd som totalt passerat olika tvärsnitt i riktning mot katoden då anoden är placerad i jorden (linje utan markeringar, geometri enligt Figur 11) eller i betongen (linje med markeringar, geometri enligt Figur 9). Negativt värde motsvarar vatten transporterat i motsatt riktning, d.v.s. mot anoden. Betong I med uppsättning 1 av hydratiseringstalen har använts.

### 3.4 Påverkan på armering

Betong förstärks vanligtvis med armering av stål. Det elektriska fältet som skapas i betongen när den elektroosmotiska tekniken används kan ge upphov till korrosion av armeringen till en viss grad. Detta undersöktes med 3D geometrin i Figur 13 och den artificiella elektrolyten (Tabell 7) med uppsättning 2 av hydratiseringstalen för en pålagd spänning av 1 V.



Figur 13. 3D geometri för betong och jord med elektroder och armering markerade.

Följande elektrokemiska reaktioner kan ske på armering av stål under alkaliska förhållanden:



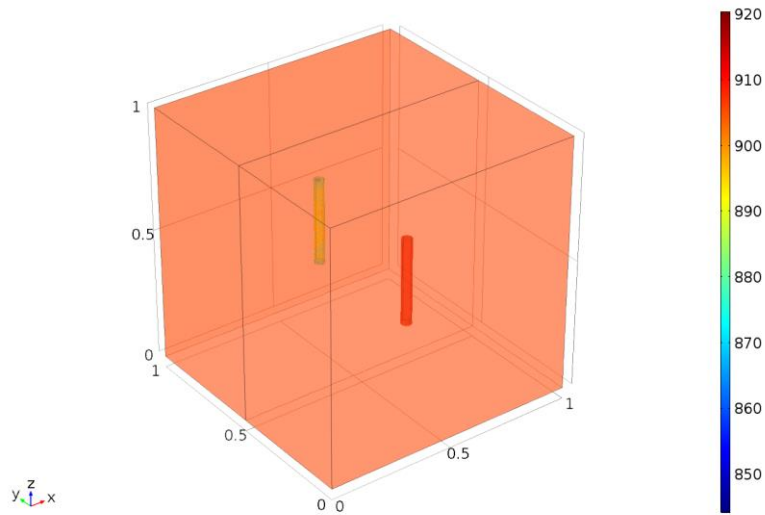
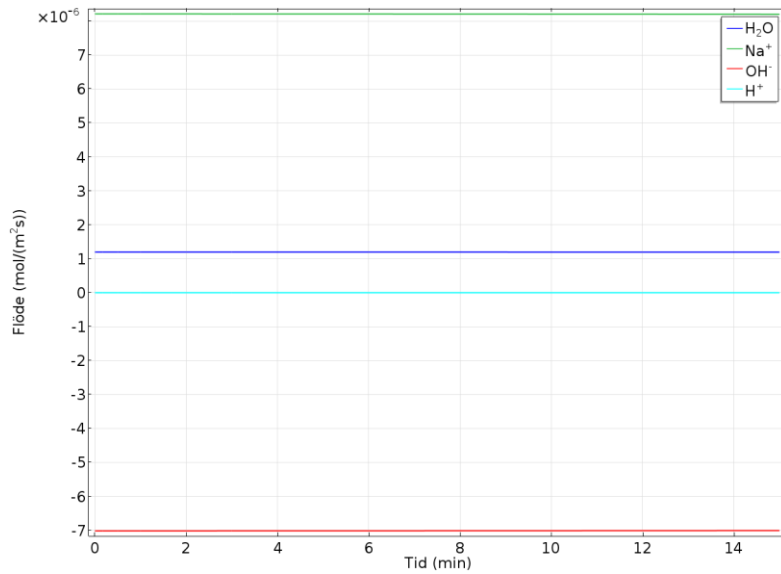
Tabell 8 listar de elektrokemiska egenskaperna för reaktionerna ovan.

Tabell 8. Kinetiska parametrar för elektrokemiska reaktioner på stål. [22]

Reaktion	Utbytesströmtäthet, $i_0$	Tafellutning, A	Normalpotential, $E_0$
R4	$7,1 \cdot 10^{-5} \text{ A/m}^2$	410 mV/dekad	-0,651 V vs SCE
R5	$7,7 \cdot 10^{-7} \text{ A/m}^2$	180 mV/dekad	0,159 V vs SCE

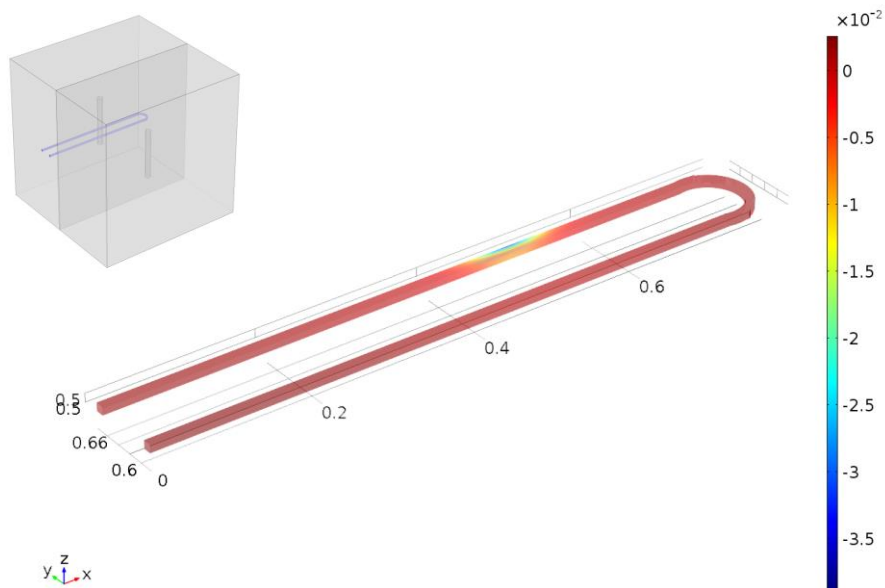
Följande antaganden gjordes: Reaktionerna på armeringen har försumbar inverkan på lösningens sammansättning och tillgången på syre vid katoden ansattes till obegränsad.

I Figur 14 visas några resultat för 3D geometrin ovan. Det positiva nettoflödet indikerar att dränering sker. Koncentrationen av natriumjoner efter 15 minuter visar att natriumjoner har migrerat mot katoden.



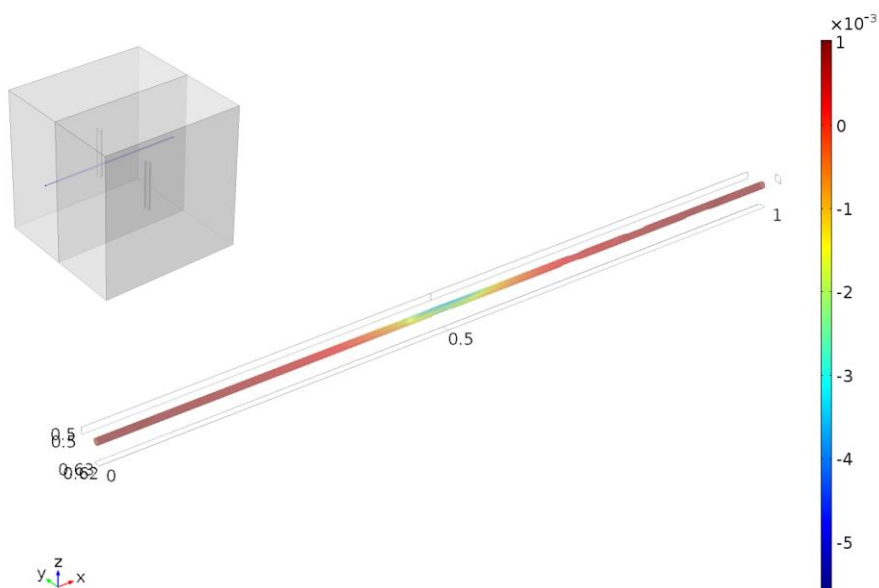
Figur 14. Övre bild: Vattenflöde med joner över gränssfasen mellan betong och jord. Nedre bild: Koncentration av Na<sup>+</sup> (mol/m<sup>3</sup>) efter 15 min.

Figur 15 visar den lokala strömtätheten på ett fall med armering i betongen. Figuren visar på att både positiva och negativa strömmar finns. De positiva strömmarna indikerar var upplösning av järn är att förvänta.



Figur 15. Strömtäthet ( $A/m^2$ ) på armeringen. Efter 1 minut av pålagd spänning.

Strömmarna på armeringen i Figur 15 är ganska betydande. Som jämförelse har ett enskilt armeringsjärn som ligger mellan elektroderna simulerats. Där är strömmarna lägre och mer jämt fördelade, vilket kan ses i Figur 16. Detta visar på mindre korrosion i fallet med enskild armering.



Figur 16. Strömtäthet ( $A/m^2$ ) på enskilt armeringsjärn. Efter 1 minut av pålagd spänning.

I de punkter där den utläckande strömmen blir som högst motsvarar detta en korrosionshastighet på cirka  $0,5 \mu\text{m}/\text{år}$  vilket är en låg korrosionshastighet. Läckströmskorrosionen på armeringen är således att betrakta som låg i de simulerade fallen. Det ska dock poängteras att endast 1 V använts för dessa simuleringar vilket i sammanhanget är en låg spänning.

## 4 Slutsatser

Följande slutsatser kan dras från denna modelleringsstudie om dränering av betong genom elektroosmos:

- Matematisk modellering är ett användbart sätt att undersöka möjliga effekter av vätskesammansättning, material och geometrier vid tillämpning av elektroosmostekniken.
- Dränering av vatten från material genom elektroosmos beror till stor del av sammansättningen hos vätskan i kapillärerna. Relativt små förändringar kan sänka flödet av vatten eller till och med ändra vattenflödets riktning.
- För de två betongkvaliteterna som studerats har den höga koncentrationen av hydroxidjoner (högt pH-värde) samt förhållandet att jonerna utarmas vid anoden stor betydelse. Utarmningen gör det svårt att driva processen över en längre tid.
- De laddade väggarna i kapillärerna/porerna har en försumbar påverkan på nettoflödet av vatten till eller från betongen (Det vill säga det elektroosmotiska flödet är väldigt litet i betongen).
- Placering av anoden i jorden strax utanför gav resultatet att vatten transporteras bort från betongen så att jorden närmast betongen torkas utan att vatten drivs in i betongen.
- En elektrolyt med hög koncentration av vattenbärande katjoner och icke-vattenbärande anjoner kan göra det möjligt med elektroosmos dränera vatten från betong även vid högt pH.
- För god dränering krävs det att katoden har god tillgång på syre.
- Det elektriska fältet mellan elektroderna kan ge upphov till korrosion på armeringen i betongen. Resultaten visar att så låga spänningar på 1 V kan ge upphov till korrosion.



## 5 Fortsatt undersökning

Eftersom sammansättningen för porvätskan har stor betydelse för att elektroosmosen ska fungera behöver fler sammansättningar testas. Särskilt från äldre betong med omgivning borde data samlas in och testas med modellen.

Förhållanden längre ifrån elektroderna såsom vattentryck och vätskerörelse behöver också undersökas mer än vad som gjorts här. Dessa egenskaper påverkar storleken på den pålagda potentialen som behövs för att uppnå dränering. Med kunskap om detta kan även bättre modeller sättas upp vilket ger bättre förutsägelser.

Korrosionen av betongens armering beror både på anodens och på armeringens placering och utformning. Modellen passar särskilt väl till undersökningar av detta slag och bör göras för varje fall då elektroosmos kan tänkas användas. Det kan även vara applicerbart att använda modellen för att studera katodiskt skydd. Exempelvis för att beräkna optimalt antal anoder/katoder, storlek på ström och lämplig elektrodgeometri.

Pulsning av den pålagda potentialen kan också vara intressant att studera. Perioderna utan pålagd potential kan eventuellt ge tid för att fylla på porer med nya joner och därmed kanske förbättra dräneringen av vatten.

Hur elektroosmosen påverkas av olika utformningar av anod och katod kan modelleras för att undersöka vilka utformningar som ger den bästa dräneringen. Detta kan också innefatta tester där katoden placeras i betongen och anoden utanför eftersom modelleringen visat att den höga koncentrationen av hydroxidjoner medför vattentransport in i betongen med den konventionella uppställningen.

## 6 Lista över symboler

$A$	Tafel lutning	[V/decade]
$a$	aktivitet	[mol m <sup>-3</sup> ]
$c$	koncentration	[mol m <sup>-3</sup> ]
$D$	diffusionskoefficient	[m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]
$E_0$	jämviktpotential	[V]
$F$	Faradays konstant, 96487	[As mol <sup>-1</sup> ]
$I$	jonstyrka	[mol dm <sup>-3</sup> ]
$i$	strömtäthet	[A m <sup>-2</sup> ]
$i_0$	utbytesströmtätheten per elektrodyta	[A m <sup>-2</sup> ]
$N$	flöde i elektrolyt/vätska	[mol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]
$R$	gaskonstanten, 8,3143	[J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$T$	temperatur	[K]
$V$	potential i elektrolyten	[V]
$V_{app}$	pålagd potential på ett system	[V]
$\alpha$	överföringskoefficient	[-]
$\gamma$	aktivitetskoefficient	[-]
$\varepsilon$	porositet (volymfraktion vätska)	[-]
$\varepsilon_0$	vätkepermittivitet (vatten)	[F m <sup>-1</sup> ]
$\eta$	dynamisk viskositet	[Pa s]
$\zeta$	zetapotential	[V]
$\tau$	tortuositet	[-]
Index		
$a$	anodisk	
$c$	katodisk	
$i$	index för partiklar	
$betong$	betongfas	
$jord$	jordfas	
Exponent		
$\beta$	Bruggeman konstanten	[-]

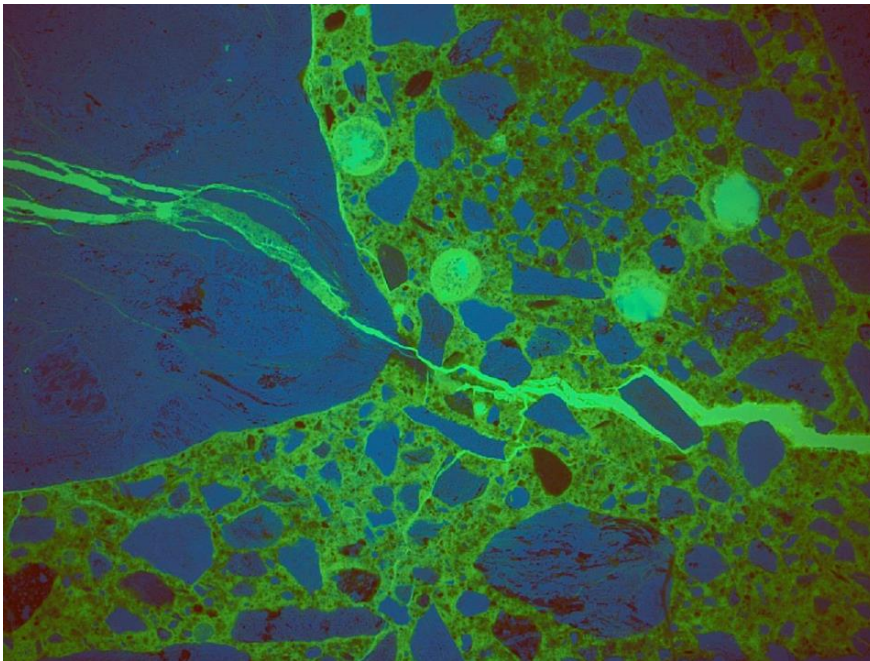
## 7 Referenser

- 1 J. S. Newman, *Electrochemical Systems*, 2<sup>nd</sup> Ed., Prentice-Hall, U.S.A. (1991)
- 2 Z. Abbas, *Interaction of Chloride with Cementitious Materials*, Presentation material Department of Chemistry and Molecular Biology at University of Gothenburg
- 3 M. Y. Kiriukhin and K. D. Collins, Dynamic hydration numbers for biologically important ions, *Biophysical Chemistry* 99 (2002) 155-168
- 4 K. P. Tikhomolova, *Electro-osmosis*, Chichester, West Sussex: Ellis Horwood limited, (1993)
- 5 R. A. Robinson and R. H. Stokes, *Electrolyte Solutions*, 2<sup>nd</sup> Ed., Dover publications, U.S.A. (2002)
- 6 K. Zeng and D. Zhang, Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications, *Progress in energy and combustion Science* 36 (2010) 307-326
- 7 C.H. Hamann, A. Hamnett, and W. Vielstich, *Electrochemistry*, 2<sup>nd</sup> Ed., p. 96, Wiley Germany (2007)
- 8 C. Taxén, A model of pitting corrosion of copper, Confidential report Swerea KIMAB (2011)
- 9 U. Frese and U. Stimming, Hydrogen evolution on copper, silver and gold electrodes in aqueous perchloric acid from 130 to 300 K, *Journal of Electroanalytical Chemistry* 198 (1986) 409-416
- 10 C.F. Baes and R. E. Mesmer, *The Hydrolysis of Cations*, Reprint Ed., Wiley, U.S.A. (1986)
- 11 Software program: MINEQL+ 4.6
- 12 Lagerblad & Trägårdh, Conceptual model for concrete long time degradation in a deep nuclear waste repository, CBI-rapport 2:96, 1996.
- 13 P. Atkins, J. de Paula, and D. Smith, *Elements of Physical Chemistry*, 6<sup>th</sup> Ed., p. 215, Oxford University Press, UK (2013)
- 14 Y.-H. Li and S. Gregory, Diffusion of ions in sea water and in deep-sea sediments, *Geochimica et Cosmochimica Acta* 38 (1974) 703-714
- 15 D.M. Roy, P.W. Brown, D. Shi, B.E. Sheetz, and W. May, *Concrete Microstructure Porosity and Permeability*, Technical report, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C. (1993)
- 16 H. S. Salem and G. V. Chilingarian, Influence of Porosity and Direction of Flow on Tortuosity in Unconsolidated Porous Media, *Energy Sources* 22 (2000) 207-213
- 17 E. Nägele, The zeta-potential of cement, *Cement and concrete research* 15 (1985) 435-462
- 18 E. Nägele, The zeta-potential of cement. Part II: Effect of pH-Value, *Cement and concrete research* 16 (1986) 853-863

- 19 R. Durauraj, *Rheology – New Concepts, Applications and Methods*, Chapt. 4, InTech (2013)
- 20 N. Mosavat, E. Oh, and G. Chai, A review of electrokinetic treatment technique for improving engineering characteristics of low permable problematic soils, *International Journal of GEOMATE* (2012) 266-272
- 21 K. Boussu, A. Belpaire, A. Volodin, and B. Van der Bruggen, Influence of membrane and colloid characteristics on fouling of nanofiltration membranes, *Journal of Membrane Science* 289 (1-2) (2007) 220-230
- 22 E. B. Muehlenkamp, M. D. Koretsky, and J. C. Westall, Effect of Moisture on the Spatial Uniformity of Cathodic Protection of Steel in Reinforced Concrete, *Corrosion* 61(6) (2005) 519-533

**swerea** | **KIMAB**

Box 7047, 164 07 Kista  
Besöksadress Isafjordsgatan 28 A, 164 40 Kista  
08-440 48 00, [kimab@swerea.se](mailto:kimab@swerea.se), [www.swreakimab.se](http://www.swreakimab.se)



## Förutsättningar för betong som medium för transport av fukt under inverkan av elektroosmos

Jan Trägårdh

Rapportnummer: 7P00151

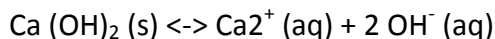
Stockholm 2018-06-16

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Bakgrund</b> .....	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Förutsättningar</b> .....	<b>3</b>
2.1	Porlösningskemi.....	3
2.2	Fukttransport i betong.....	4
2.3	Naturlig fukttransport.....	6
<b>3</b>	<b>Synpunkter på laboratorieförsök utförda av US Army Corps Engineers</b> .....	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>Diskussion</b> .....	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>Slutsatser</b> .....	<b>9</b>
<b>6</b>	<b>Referenser och Litteratur</b> .....	<b>10</b>

# 1 Bakgrund

Cement reagerar med vatten och bildar en mättad kalciumhydroxidlösning i kapillär- och gelporer under hydratationsutvecklingen. De fasta faser som bildas är huvudsakligen kalcium-silikat-hydrat (C-S-H) och kalciumhydroxid (CH, portlandit). När betongen mognat och hydratiserat färdigt, vilket kan ta från en till flera månader beroende på cementets sammansättning, råder jämviktsförhållande mellan de fasta faserna och lösningen i porerna med avseende på kalciumhydroxid. Under hydratationsförloppet binds alkalierna (Na, K) i mycket liten utsträckning i fasta faser. Istället går de i lösning som fria joner (lösta alkalisulfater och hydroxider). Det medför att pH i betongens porlösningar från början är mycket högt, ca.13-13,5. Allt eftersom betongen utsätts för fuktrörelser under vattenmättade förhållande så sänks pH vanligen till ca 12,5 eftersom alkalierna lakas ur utan att tillförsel kan ske från upplösning av fasta faser i betongen. Under vattenmättade förhållanden där fortssatt lakning råder, d.v.s under diffusionsstyrd transport eller mycket låga flödes hastigheter, så börjar portlanditen ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) i cementpastan att lösas upp. Under dessa förhållanden buffrar cementpastan porlösningen med  $\text{Ca}^{2+}$  joner. Lösningens jonkoncentration kommer därför till stor del efterhand som fukt i vätskefas transporteras genom betongen att bestå av  $\text{Ca}^{2+}$  och  $\text{OH}^-$ . En jämvikt kommer att inställa sig med portlandit (kalciumhydroxid). Det sker genom jämviktsreaktionen;



Transport av fukt genom en betongvägg som står mot jord (t.ex. källare) kan ske med hjälp av tre mekanismer:

- 1 Diffusion i ångfas. Huvudsakligen i betong som har ett RF < 60 % och som inte står i kontakt med vatten i vätskefas.
- 2 Kapillär transport av fukt i vätskefas. Huvudsakligen i betong med RF > 85 % och som står i kontakt med fritt vatten. Avdunstning sker mot insidan av betongväggen. Ofta syns kristalliserade produkter från betongporlösningen på insidan. Kristalliseringsprodukten består av  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  som snabbt karbonatiseras till  $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ . Det kan ske med en viss avflagnings av ytan som konsekvens på grund av en saltsprängningseffekt.
- 3 En kombination av 1 och 2. Betongens yta är i kontakt mot ett vattenmättad medium, t.ex. jord. Betongen suger kapillärt till ett visst avstånd i betongen och övergår sedan till transport i ångfas till insidan av väggen där avdunstning sker. Detta är möjligt i en betong som har ett RF mellan 60 och 85 %.



Endast i fall 2 finns förutsättningar för att betongens porlösningar skall kunna ha en inverkan på fukttransporten fullt ut.

Föreliggande rapport skall ses som ett komplement till Swerea KIMABs rapporter "Litteraturstudie: Dränering av fukt i betong genom elektrokemisk metodik", 13893-1 och "Dränering av betong med elektroosmos – Modelleringsstudie", 2017-141. Slutsatsen från Swerea KIMAB rapporter var bland annat att betongens porlösningskemi har en försumbar påverkan på nettoflödet av vatten till eller från betongen, det vill säga det elektroosmotiska flödet är väldigt litet i betongen.

## 2 Förutsättningar

### 2.1 Porlösningskemi

De vanligaste katjonerna i betongens porlösningar är  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  och de vanligaste anjonerna  $\text{OH}^-$  och  $\text{SO}_4^{2-}$ . I avsevärt mycket mindre utsträckning förekommer även  $\text{Al}^{3+}$  och olika silikatkomplex (t.ex.  $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ ). Järnjoner förekommer i ännu mindre utsträckning. I betongens kontaktyta mot vatten eller i kontakt med grundvatten i jord kommer betongens yttersta skikt att lakas ur på  $\text{Na}^+$  och  $\text{K}^+$  joner och pH kommer att sänkas till 12,5 från 13,5 i opåverkad betong. För en betong med vct 0,4, som sakta lakats ur under fuktmettade förhållanden under 50 år, har betongen ett sänkt pH och urlakade  $\text{Na}^{2+}$  och  $\text{K}^+$  joner till ett djup av ca 50 mm. Vid ytan är då betongens pH 12,5 och på större djup 13,5. Efter 20 år är samma betongs påverkade skikt ca 30 mm. Det medför att efter hand som fukt transporteras i kapillärporsystemet kommer den dominerande katjonen i betongens porlösningar att vara  $\text{Ca}^{2+}$  jonen (se även Fig. 1).

Under välluftade förhållanden kommer pH i betongen att sänkas i det yttersta skiktet på grund av karbonatisering av cementpastan. pH sänks till ca 9,5 efter hand som kalciumsilikathydrater (C-S-H) och portlandit omvandlas till kalciumkarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ). I detta fall pressas porlösningen undan och porerna fylls ut med nybildade kristaller. Betongen får därmed en högre resistans eftersom den i stort sett är torr i det karbonatiserade skiktet. Vid 80 % RF kommer betongen att karbonatiseras till ett djup av ca 4 mm efter 50 år och vid RF 50 % till 30 mm djup efter samma tid.

Porpressning av bruksprover	CEM I <sup>2</sup> vct 0,5	CEM I <sup>2</sup> vct 0,5	CEM I3, vct 0,5	CEM I, moderat- hög alkali1, vct 0,5
Porlösning mmol/l	1 timmes hydratation	20 timmars hydratation	3 månader	2 år
Na	10	20	323	181
K	20	30	639	358
Ca	30	5	2	3,5
Si	0,04	0,04		
Al		0,005		
OH	350	550	713	523
SO4	20	3	27	33

**Tabell 1.** Porlösningens kemiska sammansättning i betong lagrad i fuktkammare ovan vatten i 100 % RF. RF i betongen 85-100 %. Vct = 0,4 och 0,5. <sup>2</sup>Taylor, H.F.W, Cement Chemistry, 1997, <sup>1</sup>Diamond and Constantiner, <sup>3</sup>Page and Vennesland.

Element (mmol/l)	CEM I (lågalkalisk, 0,5 Na <sub>2</sub> O <sub>ekv.</sub> ) vct=0,4	CEM I (högalkalisk, 1,1 Na <sub>2</sub> O <sub>ekv.</sub> ) vct=0,4
Na	42	122
K	445	752
Ca	1	2
OH	482	860

**Tabell 2.** Porlösningkemi i låg- och högalkalisk betong lagrad i vatten i 5 månader. Vct = 0,4. RF i betong 100 %. Efter Johannesson (2000).

Efter 1-5 månader nås maximumkoncentrationer för olika joner i porlösningen. Ca<sup>2+</sup> kan nå koncentrationer kring 20 mmol/l, Na<sup>+</sup> 5-250 mmol/l, K<sup>+</sup> 75-700 mmol/l, ca 0,05 mmol/l H<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub><sup>2-</sup> och ca 0,1 mmol/l Al<sup>3+</sup>. Variationen i koncentrationer beror på cementtypen, där den viktigaste parametern är om det är ett lågalkaliskt- eller högalkaliskt cement vilket anges av cementets Na<sub>2</sub>O<sub>ekv.</sub>

## 2.2 Fuktransport i betong

Fuktransporter i betong sker i kapillärporsystemet som har porradier kring 0,008-10 mikrometer ( $8,0 \times 10^{-9} - 1 \times 10^{-5}$  m). Kapillärporsystemets medianradie är ca 0,02-0,03 mikrometer ( $2-3 \times 10^{-8}$  m) beroende på vct. När RF i betongen överstiger ca 85 % befinner sig fukten i porerna i huvudsak i vätskefas och kapillär vätsketransport är dominerande. Den drivande kraften är skillnader i vattenhalt i betongen. Vid lägre RF i betongen (< ca 85 %) sker fuktransporten i både ångfas och vätskefas (kombination). Vid RF mindre än ca 60 % sker fuktransporten huvudsakligen i ångfas och den drivande kraften är skillnader i ångtryck på olika sidor om betongen. Det innebär att för att en effektiv transport av joner skall kunna ske i betongens porlösning så bör betongen fukttillstånd vara högt, > 85 % RF. Redan vid ca 75-80 % RF så sjunker den

kapillära vätsketransporten (diffusiviteten) drastiskt. Man kan dra slutsatsen att ju högre RF är desto effektivare transporteras fukt och joner vid konstant ånghalts- eller ångtrycksdifferens över materialet.

Betongens diffusivitet med avseende på fukttransport för olika RF i betongen (75, 80, 85 %) och vid några olika vct ges av tabell 3. Porradiens inverkan på fuktpermeabiliteten i betong ges i tabell 4. Diffusionskoefficienter för olika joner i en betongporlösning ges i tabell 5.

vct	Diffusivitet (m <sup>2</sup> /s)		
	RF 75 %	RF 80 %	RF 85%
0,4	15 x 10 <sup>-12</sup>	20 x 10 <sup>-12</sup>	25 x 10 <sup>-12</sup>
0,6	30 x 10 <sup>-12</sup>	40 x 10 <sup>-12</sup>	50 x 10 <sup>-12</sup>
0,8	60 x 10 <sup>-12</sup>	120 x 10 <sup>-12</sup>	250 x 10 <sup>-12</sup>

**Tabell 3.** Diffusionskoefficienter för fukttransport vid några olika vct och RF i bruk. Efter Nilsson (1977).

Porradi (m)	Permeabilitetskoeff (m/s)	Typ av transport
< 10 <sup>-7</sup>	< 10 <sup>-10</sup>	Molekylär diffusion
10 <sup>-7</sup> – 10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-10</sup> – 10 <sup>-9</sup>	Molekylärt flöde
> 10 <sup>-5</sup>	> 10 <sup>-9</sup>	Visköst flöde

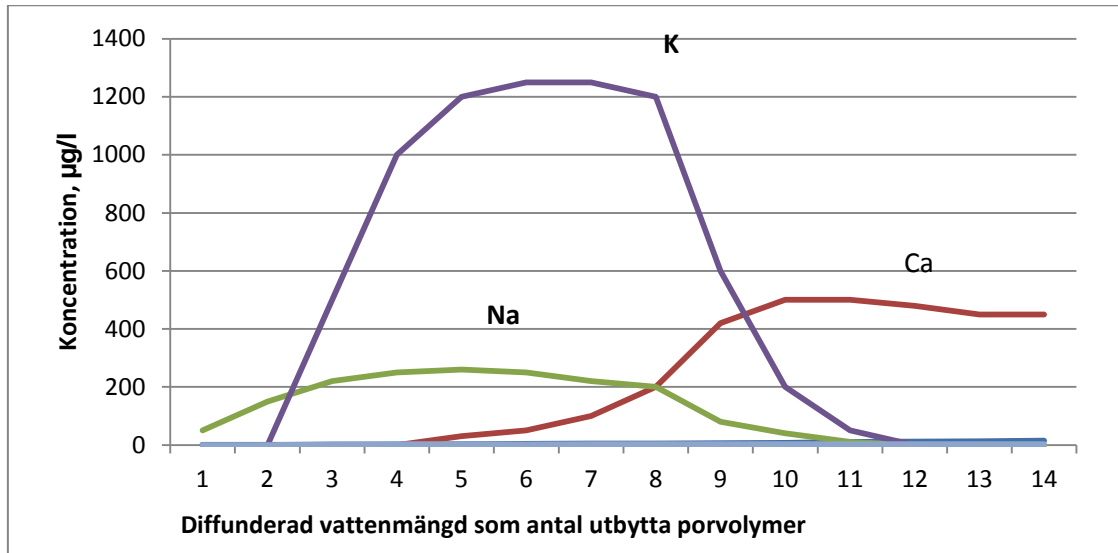
**Tabell 4.** Permeabilitetskoefficienter (m/s) för fukt i olika porradier. Efter Moskvina (1980) och Ekström (2000).

Eftersom kapillärposystemets radie varierar mellan 8,0 x 10<sup>-9</sup> – 1 x 10<sup>-5</sup> m beroende på vct, med en mediandiameter på ca 2-3 x 10<sup>-8</sup> m, överensstämmer det med att transporten av joner under stillastående förhållanden sker genom molekylär diffusion och molekylärt flöde.

Jon	Diffusionskoeff. i vatten (D, m <sup>2</sup> /s). 20 °C <sup>3</sup>
Na <sup>+</sup>	1,33 x 10 <sup>-9</sup>
K <sup>+</sup>	1,96 x 10 <sup>-9</sup>
Ca <sup>2+</sup>	0,79-1 x 10 <sup>-9</sup>
OH <sup>-</sup>	5,30 x 10 <sup>-9</sup>
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0,7-1,96 x 10 <sup>-9</sup>
Cl <sup>-</sup>	2,03 x 10 <sup>-9</sup>
CO <sub>2</sub>	2,0 x 10 <sup>-9</sup>
H <sup>+</sup>	9,30 x 10 <sup>-9</sup>
HCO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	1,20 x 10 <sup>-9</sup>

**Tabell 5.** Diffusionskoefficienterna i vatten för några vanliga joner. Efter Johannesson (2000) och Ekström (2000).

Figur 1 nedan från Ekström (2000) visar porlösningens utveckling under diffusionsutbyte med den fasta fasen i porernas kapillärväggar. Exemplet illustrerar vad som är fallet, i exempelvis en källarvägg, där diffusionstransport genom väggen pågått under många år. Kalciumjoner i en koncentration av ca 500 µg/l kommer att dominera porlösningen.



Figur 1. Kapillärporlösningens koncentration av Na, K och Ca-joner i ett flöde av  $6 \times 10^{-12}$  m/s orsakat av ett pålagt vattentryck på 2 MPa. På X-axeln är passerad vattenvolym uttryckt som antalet växlingar av uppmätt volym kapillärporer. Efter Ekström (2000).

### 2.3 Naturlig fukttransport

Om en källavägg tas som exempel för att illustrera den mängd fukt som kan transporteras genom väggen enligt formeln:

$$q = D \times C_1 - C_2 / h$$

där  $D$  = diffusiviteten ( $m^2/s$ ),  $h$  = vägg tjockleken (m) och  $C_1 - C_2$  = skillnaden i ånghalt vid rådande temperatur och RF över väggen.

Om väggen är 100 mm tjock och utetemperaturen + 4 °C, RF 90 % och innetemperaturen + 18 °C, RF 50 %.  $D$  antas till  $5 \times 10^{-11}$  enligt tabell 4 (vct = 0,6).

Ur tabell 1, sidan 399 i Betonghandboken (andra upplagan, 1982) fås mätnadsånghalten för ytter- och innetemperaturerna till  $6,37 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$  respektive  $15 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ . Ånghalterna vi RF i exemplet blir då  $0,90 \times 6,37 \times 10^{-3} = 5,7 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$  utomhus och  $0,50 \times 15 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3 = 7,5 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$  inomhus. Under ett dygn blir således ångtransporten:

$$q = 5 \times 10^{-11} \times (7,5 - 5,7) \times 10^{-3} / 0,1 \times 3600 \times 24 = 0,013 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^3 = 7,8 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^3 = 0,78 \text{ mg/m}^3$$

Ovanstående exempel avser vintertid. Samma räkneexempel för sommartid ger ånghalterna om 25 °C, 75 % RF ute och 18 °C, 80 % RF inne:

Ute:  $0,75 \times 23 \times 10^{-3} = 17,25 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$  och inne:  $0,80 \times 15 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3 = 12 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ .

$q = 5 \times 10^{-11} \times -5,25 \times 10^{-3} / 0,1 \times 3600 \times 24 = -2,3 \times 10^{-7} \text{ kg/m}^3 = -0,23 \text{ mg/m}^3$ .

Fukttransporten går således mot källarens insida under sommaren och ut ur källaren under vintertid. Det är fukttransporten under sommarhalvåret som skall motverkas av en elektroosmotisk installation. Det innebär att effekten av den elektroosmotiska fukttransportern måste vara större än den naturliga fukttransporten in i källaren under sommarhalvåret.

### 3 Synpunkter på laborieförsök utförda av US Army Corps Engineers

Exempel på uppmätta transporthastigheter av fukt i en betongs kapillärporsystem orsakad av ett elektriskt fält ges av experiment i en rapport av US Army Corps of Engineers (2002). Här anges en masstransporthastighet för fukt till  $2,15 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{s}$  för en 100 mm tjock betongskiva med volymen  $0,036 \text{ m}^3$  och vct 0,63 (tabell 10) som står i kontakt med vatten. Transporten av fukt genom betongen motsvarade ca  $0,6 \text{ kg/m}^3$  betong per dygn vilket skall jämföras med  $2,3 \times 10^{-7} \text{ kg/m}^3$  betong per dygn för fuktrörelsen i andra riktningen under sommarhalvåret (naturlig fuktvandring). Laborieförsöken visade alltså att fukttransporten under elektrosmos var betydligt effektivare än de naturliga årsväxlingarna under vattenmättade förhållanden. Motsvarande flödes hastighet i försöket var  $5,96 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ . Grundläggande kritik kan emellertid riktas mot förutsättningarna i laborieförsöken som inte överensstämmer med verkliga förhållanden där kloriddopning inte förekommer. Förutsättningar i US Army Corps of Engineers laborieförsök representerade därför inte verkliga förhållanden i en huskropp eftersom klorider tillfördes för att öka den elektriska ledningsförmågan i elektrolyten. Kloridjonen har en låg kapacitet att transportera vattenmolekyler i anodens riktning, det vill säga ett lågt effektivt "hydration number" (se tabell 6 nedan). I laborieförsökningen från US Army Corps kan kloridinblandningen till och med medföra en premierad fuktrörelse i katodens riktning som inte sker under verkliga förhållanden i en källarvägg eftersom den icke-vattenbärande kloridjonen konkurrerar med den vattenbärande hydroxidjonen i betongen vilket i sin tur medför ökad transport i katodens riktning.

## 4 Diskussion

I ett elektroosmotiskt flöde bärs vattenmolekylerna antingen i katodens eller anodens riktning av joner som har förmågan att attrahera vattenmolekyler. Olika jonslags förmåga att bära vattenmolekyler behandlas i Swerea KIMABs rapporter och av Abbas (2017). I tabell 6 nedan ges en sammanställning. I en elektroosmotisk installation, exempelvis för att driva ut fukt från en källarvägg, placeras anoden i betongen och katoden en bra bit utanför betongväggen. Tanken är att kunna driva ut fukten från betongen genom att påverka fuktflödet i betongen med hjälp av de vattenbärande joner som finns i kapillärporsystemet.

Betongens porlösningsskemi fungerar dåligt som en elektrolyt för att driva ut fukt (vattenmolekyler) under ett elektroosmotiskt flöde där anoden placeras i betongen. Det ges av det faktum att en hög koncentration av den vattenbärande anjonen hydroxid förekommer i betongens porlösningar. Det medför att flödet av fukt teoretiskt sker i anodens riktning istället ut ur betongen, i katodens riktning. Den dominerande vattenbärande katjonen är kalciumjonen och i viss utsträckning natriumjonen. De förekommer emellertid i avsevärt lägre koncentrationer än hydroxidjonen. Kalium är den katjon som kan förekomma i höga koncentrationer innan betongen urlakas av ett fuktflöde, men den har ingen vattenbärande förmåga.

Jon	Kapacitet att attrahera vattenmolekyler (effective hydration number)	Jon i betongporlösning, högalkaliskt cement (mmol/l)
Ca <sup>2+</sup>	10	2-20
Mg <sup>2+</sup>	14	< 0,1
Na <sup>+</sup>	4	125-250
K <sup>+</sup>	0	750
OH <sup>-</sup>	5-6	600-800
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	10	2
Cl <sup>-</sup>	0	

**Tabell 6.** Kapacitet att attrahera vattenmolekyler (effective hydration number). Efter Abbas (2017).

Det finns emellertid förutsättningar att vattenmättad jord, som står i kontakt med en betongvägg, kan fungera som en effektiv elektrolyt det vill säga om vattenbärande katjoner förekommer i hög koncentration. Det elektriska fält som skapas kan då åstadkomma ett elektroosmotiskt flöde i katodens riktning och möjligen torka ut jordskiktet närmast betongen och därmed betongytan. Det skulle kunna få som följd att betongen inte tar upp fukt och att RF i betongen kan sjunka under 85 %. För att det skall kunna ske effektivare än idag placeras anoden med fördel utanför betongen, eftersom betongen inte bidrar med ett flöde i katodens riktning utan kanske till och med i anodens riktning.

## 5 Slutsatser

Följande slutsatser kan dras med avseende på betongens potential som medium för elektroosmotiskt flöde:

- Betongens förutsättningar som medium för elektroosmotiskt flöde av vattenbärande katjoner är mycket begränsat. Den dominerande vattenbärande anjonen  $\text{OH}^-$  förekommer i betydligt högre koncentrationer.
- Koncentrationen av vattenbärande katjoner i kapillära vätskan är lågt, vilket medför att betongen fungerar dåligt som elektrolyt för ett elektroosmotiskt flöde där fukt skall drivas ut ur betongen.
- Placering av anoden i betongen kan motverka fuktvandring ut ur betongen och möjligen medföra fuktvandring i motsatt riktning på grund av den höga koncentrationen av vattenbärande hydroxidjoner och den förhållandevis låga koncentrationen av vattenbärande katjoner.
- Det är troligt att en placering av anoden utanför betongen är effektivare eftersom en högre koncentration av vattenbärande katjoner i jord också medför en effektivare fuktvandring i katodens riktning. Jord har ett lägre pH än betong och därmed en lägre koncentration av vattenbärande hydroxidjoner.
- Karbonatisering av betongen kommer med tiden att ytterligare försvåra vattenbärande jontransport i betongen och öka resistansen i kretsen.
- Tillsats av klorider till betongporlösningen kan möjligen medföra att fukttransporten i betongen blir mer effektiv. Samtidigt som den elektriska ledningsförmågan och jonvandringen ökar så minskar den vattenbärande jonvandringen mot anoden.
- En förutsättning för att elektroosmos skall fungera i betong är att kapillärporsystemet till största delen är vattenmättat, d.v.s. RF väl över 85 % och bäst över 90 %. Konsekvensen av detta är att man inte kan sänka fuktnivån under denna med hjälp av enbart elektroosmos i betong.

## 6 Referenser och Litteratur

Abbas, Z. (2017). *Interaction of Chloride with Cementous Materials*, Department of Chemistry and Molecular Biology, Göteborg Universitet. Presentation hos CBI 2017-03-02.

Betonghandboken, Material, andra upplagan 1982, AB Svensk Byggtjänst.

Constantiner, D., Diamond, S. (1997). *Pore solution analysis: are there pressure effects?* in: K. Scrivener, J. Young (Eds.), *Mechanisms of Chemical Degradation of Cement-based Systems*, E & FN Spon, London 1997, pp. 22–29.

Ekström (2000). *Leaching of concrete, Experiments and modelling*, Lund institute of Technology, Report TVBM-7153.

Geving, S., Blom, P., Kvalvik, M., Martinsen, E. (2011). SINTEF Byggforsk, Prosjektrapport 84 2011, *Utbedring av fuktskadade, kjelleryttervegger, Delrapport 2 – Felt-, laboratorie- og beregningsmessige, undersøkelser av tre metoder*

Högberg, C-J. *Litteraturstudie: Dränering av fukt i betong genom elektrokemisk metodik*, Swerea KIMAB, rapport 13893-1.

Johannesson (2000). *Transport and sorption phenomena in concrete and other porous media*, Doctoral Thesis, Report TVBM-1019, Lund University, Division of Building Materials.

McInerney, M., Morefield, S., Cooper, S., Malone, P., Weiss, C., Brady, M., Taylor, J., and Vincent F. (2002). TR-02-21, *Electro-Osmotic Pulse (EOP) Technology for Control of Water Seepage in Concrete Structures*, August 2002, Construction Engineering Research Laboratory

Nilsson, L-O. (1977). *Fuktproblem vid betonggolv*, Lunds tekniska Högskola, avd. för byggmateriallära, Rapport TVBM-3002, Lund 1977.

Orange S. Marshall, Jr. (2009). *Demonstration of Electro-Osmotic Pulse Technology in Earth-Covered Magazines at Fort A.P. Hill*, VA, 2009, ERDC/CERL TR-09-23.

Page, C., Vennesland, O. (1983). *Pore solution composition and chloride binding capacity of silica-fume cement pastes*, Mater. Constr. 16 (91) (1983) 19–25.

Taylor, H.F.W (1997). *Cement Chemistry*.

Zavalis, T., Högberg, C-J. *Dränering av betong med elektroosmos -Modelleringsstudie*, Swerea KIMAB, rapport 2017-141





RISE Research Institutes of Sweden AB  
Box 5608, 114 86 STOCKHOLM  
Telefon: 010-516 50 00  
E-post: [info@ri.se](mailto:info@ri.se), Internet: [www.ri.se](http://www.ri.se)

RISE CBI Betonginstitutet  
Rapportnummer  
7P00151

# **Minnesanteckningar av studiebesök på fem elektroosmosanläggningar 2017**

Som en del av projektet besökte vi några byggnader med installation av anläggningar av elektroosmos med avsikten att minska fuktinträngning i byggnadernas grunder. De flesta byggnaderna är bostäder, där vi försökt att anonymisera dem så att de inte ska gå att känna igen.

## **1. Lidingö museum**

Anteckningar Studiebesök Elektroosmosinstallation Lidingömuséet 8/3 – 16

### **1.1. Bakgrund och resultat**

- Huset har en stengrund med murbruk emellan stenarna. Inre vägg bestod av murat tegel med puts utanpå. Ca en meter av källaren ligger under marknivån.
- Använde torrbollar tidigare pga fuktproblemen i källaren. Fuktproblemen drabbade fotogruppen och hantverksgruppen.
- Fotogruppen och hantverksgruppen nöjda efter installationen. Inneklimatet upplevs bättre och fotopapper ”krullar” sig inte längre.

### **1.2. Noteringar kring installationen**

- Elektroosmossystemet var installerat sommaren 2014.
- Insticksanoder installerades ca 10 cm ovanför golvnivån med ca 70 cm mellanrum. Putsen avlägsnades före installation av elektroderna och väggen putsades därefter om igen.
- Det bedömdes att grafitmassa använts som fyllning kring anoderna.
- Endast kabel från anoderna samt nätkabel var indraget i likriktarskåpet. Likriktaren pulsade strömmen vilket kunde ses på en display.
- Likriktarskåpet var plomberat med tejp och nyckelhålet var täckt, så vi kunde inte undersöka vad som fanns därinne.
- $V_{DC}$  mättes med multimeter mellan plus- och minuspol. Spänningen var inte stabil, värdet ökade tills multimetern visade ”overload” och gick sedan till noll igen. Multimeters begränsning var 30 V.
- $V_{AC}$  över plus- och minuspol mättes till 13 - 15 V.
- $V_{AC}$  över pluspol och jord mättes till 0,14 V.

- $V_{AC}$  över minuspol och jord mättes till 13 - 15 V
- Likström mättes över plus- och minuspol till 6 A.
- Spänningen mellan pluspol och metallobjekt mättes till 0,20 – 0,25 V.
- Spänningen mellan grafitmassan och metallföremål mättes till 0,20 – 0,25 V.

Fuktmätning i väggarna gjordes med Gann-mätare

- RH mättes till ca 70 % i nedre delen av yttervägg
- RH mättes till ca 30 % i övre delen av yttervägg
- RH mättes till ca 70 % vid anod
- RH mättes till ca 80 % mitt emellan två anoder

### 1.3. Kommentar

Brukarna var nöjda efter installationen. Inga alarmerande fuktnivåer kunde noteras i områden med installation. Det gick inte att se var katoden var kopplad, men det troliga är att den är kopplad till skyddsjorden i byggnadens elsystem.



Figur 1.1 Lidingömuséet med elektroosmotiskt dränering i källarväggarna.



Figur 1.2 Närbild av yttre källarvägg. Cirka en meter av källarväggen ligger under marknivå.



Figur 1.3 Anoder av insticksmodell installerade ca 10 cm ovanför golvnivå med cirka 70 cm.



Figur 1.4 Närbild på anod. Det bedöms att grafitmassa använts som fyllning runt anoderna.



Figur 1.5 Innervägg med installerade elektroder.



Figur 1.6 Motsatt sida av innervägg med elektroder. Spår efter arbete kunde ses på väggen.



Figur 1.7 Plomberat likriktarskåp. Värdet på displayen varierade vilket tydde på pulsad ström.



Figur 1.8 Endast kabel till anoder var anslutet till likriktarskåpet.



## 2. BRF Viggbygården

Besöket gjordes 29 juni 2017

### 2.1. BAKGRUND

Det åtgärdade området var en källarvägg som vette mot Södervägen. Grundplattan ligger uppskattningsvis 40 cm under marknivån. Enligt uppgift hade det ursprungligen funnits cementbundna träullsplattor som en invändig isolering nedstuckna emellan golv och vägg. Fukt hade sugits upp källarväggen och dålig lukt hade uppkommit.

För att åtgärda detta hade skivorna tagits bort och spalten mellan golv och vägg fyllts med cement.

Dessutom hade en utrustning för fukthantering med elektroosmos monterats.

### 2.2. NOTERINGAR KRING INSTALLATIONEN

Det gick inte att se var som elektroderna var installerade. Vi mätte spänning och ström från installationens elektronikbox. Det kommer spänningspulser ur elektronikboxen på cirka 20 V DC som kan mätas mellan röd och svart anslutningspunkt på elektronikboxen.

Det finns ingen spänningsskillnad mellan röd anslutningspunkt och radiatorrör.

Spänningsskillnaden mellan svart anslutning och radiatorrör är samma som mellan svart och röd anslutningspunkt. Det bör betyda att röd anslutningspunkt är kopplad till radiatorrören på något sätt, dvs att radiatorrören används som katod.

Mätning av spänning i jorden utanför väggen gjordes med kopparsulfatelektrod.

Elektroderna i väggen går inte att se. Förrådet verkar inte alls fuktigt idag.

### 2.3. KOMMENTARER

Fastighetsskötarna är nöjda med hur installationen fungerar. När man tittar på bilderna så är det svårt att se att en igjutning gjorts på golvet. Det skulle vara intressant att se hur motsvarande utrymme som inte åtgärdats kan se ut. Sannolikt har radiatorrören använts som katod.



Figur 2.1

Den aktuella installationen finns bakom denna betongvägg som är försedd med träpanel.



Figur 2.2

Installationens elektronikbox



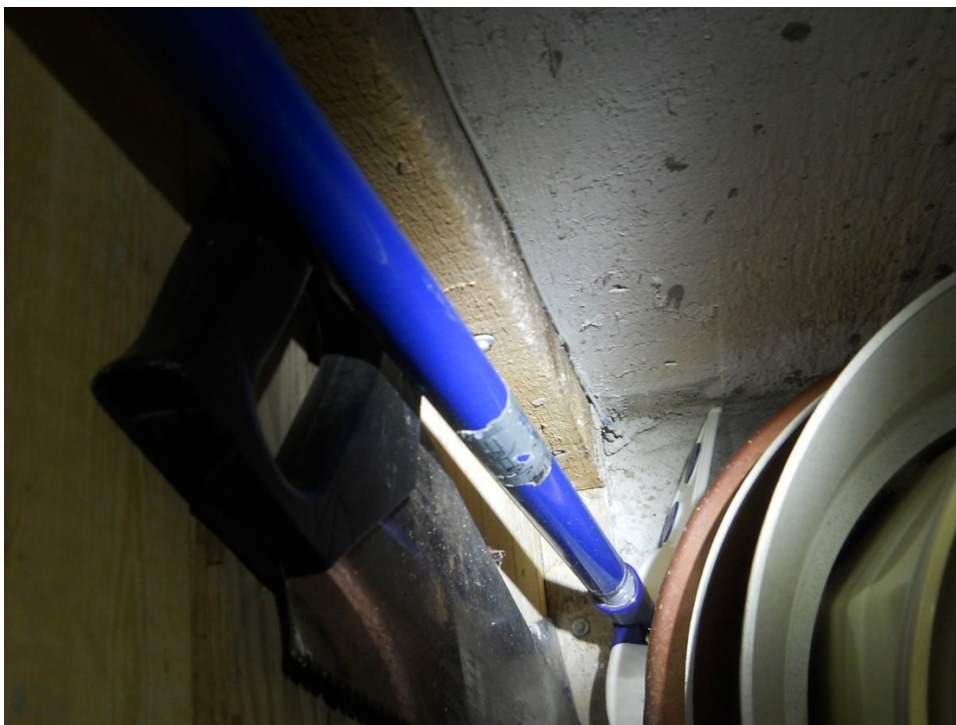
Figur 2.3  
Kabel från elektronikboxen går uppe i takvinkeln till vänster.



Figur 2.4  
Bilden visar anslutning mellan golv och vägg i förrådsutrymmet.



Figur 2.5  
Bilden visar anslutning mellan tak och vägg i förrådsutrymmet.



Figur 2.6  
Bilden visar en plats där kabeln ansluter till golvet i förrådsutrymmet.

## 3. Villa i Saltsjöbaden,

Besiktningen gjordes 2017 10 12

### 3.1. Bakgrund

Saltsjöbaden, villa från 1962, elektrosmosystem installerat 2015. 1-1,5 m av källaren befinner sig under mark. Fastighetsägaren upplever det mycket bättre sedan elektrosmosystemet installerats.

### 3.2. Noteringar kring installationen

Anodkabeln är dragen längs väggarna. Instickslektroderna sitter cirka 10 cm över golvet och på avstånd av cirka 70 cm och är inbäddade av en mörk gummiartad kontaktmassa. Kabeln till dem är inputsad i väggen.

En katod i form av spett är nerdrivet i marken finns ca 4 m från husväggen. Katodkabeln har ingen mantel. Den äldre typen av likriktare används.

Mätningar:

Likspänning mellan anod och katod: Voltmetern visar 20 V sedan overload

Växelspänning mellan anod och katod: 15 V sedan overload

Likspänning mellan katod och kopparrör: overload

Resultat av fuktmätningar gannmätare:

Plats	RH [%]
Innervägg mot "omålat utrymme"	60-75
Innervägg i "omålat utrymme"	75-85
Yttervägg "omålat utrymme"	75-80
Ytterväggar	35-40
Vid anod	50-75

Saltsjöbaden: Potentialgradient från huset mot katod:

Avstånd [m]	Potential [V]
1	0,46
2	0,73
3	0,78
4	0,78
5	0,59

I det ”omålade utrymmet” fanns kalkutfällningar som troligen uppkommit genom kapillär uppstigning och avdunstning.

### 3.3. Kommentar

Det fanns tydliga tecken på kapillär fuktuppsugning i källaren. Fastighetsägaren var nöjd med anläggningens funktion.



Figur 3.1  
Kalkutfällning i vägg



Figur 3.2

Saltsjöbaden: Kabel med skarv; fastighetsägarens bild



Figur 3.3

Saltsjöbaden: Montage av elektroder; fastighetsägarens bild.



Figur 3.4

Saltsjöbaden: Montage av elektroder; fastighetsägarens bild



Figur 3.5

Saltsjöbaden: Montage av elektroder; fastighetsägarens bild



Figur 3.6

Saltsjöbaden: Elektrod med kontaktmassa; fastighetsägarens bild



## 4. Hammarbyhöjden, BRF

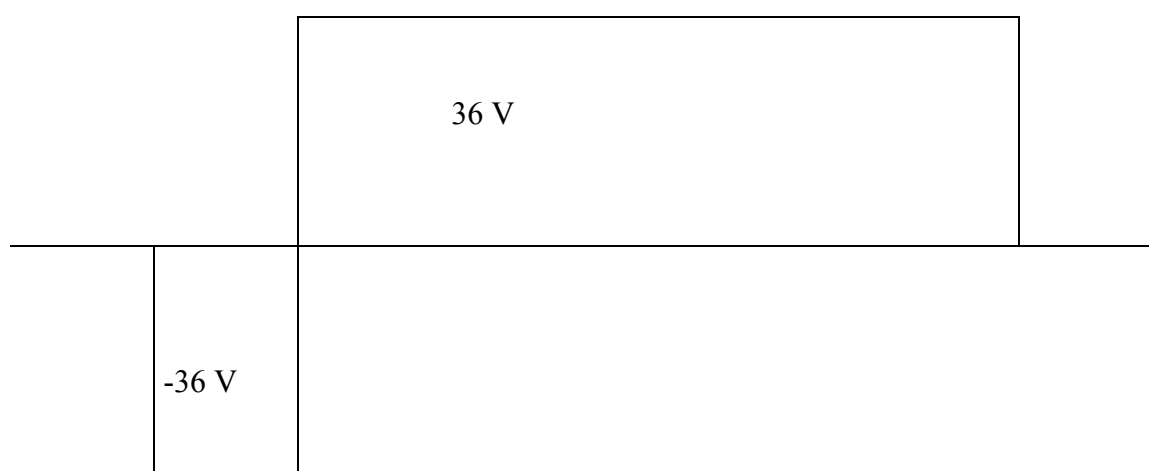
Besiktningen gjordes 2017 10 12

### 4.1. Bakgrund

Installation gjordes 2015. Anoder var installerade på utsidan av huset. Den nya typen av likriktare används. Katoden var kopplad till byggnadens åskledare (kolla om det stämmer).

### 4.2. Noteringar kring installationen

Likspänning mellan anod och katod: Kort intervall med -36 V följt av långt intervall med 36 V.



Likspänning mellan katod och vattenledning: 4,2 V. Diagram med tid på horisontell axel.

Likspänning mellan anod och vattenledning: -32/+32 V

Potential i marken mellan fastigheten och åskledare på grannhuset: 1,1 V.

Resultat av fuktmätning med Gann-mätare:

Plats	RH [%]
Städskrub	30-75
Yttervägg framsida	55-75
yttervägg baksida	25-75

### 4.3. Kommentar

Installationen var annorlunda i och med att anoden satt på väggens utsida. Bostadsrättsföreningens representant var nöjd med funktionen.



Figur 4.1  
Hammarbyhöjden. Den nya typen av likriktare.



Figur 4.2  
Hammarbyhöjden: Potentialmätning, 1 V spänning i marken.



Figur 4.3  
Hammarbyhöjden: Elektrosmossystem i högra huset, åskledare vid stuprännan på det vänstra.

## 5. Bagarmossen, Småhus

Besiktningen gjordes 2017 10 12

### 5.1. Bakgrund

Detta är fastigheten som TV-programmet "Äntligen Hemma" gjorde reportage i.

Se: <https://www.youtube.com/watch?v=KFOev88ny0w>

Den aktuella källaren fick ny dränering för cirka 10 år sedan (dvs omkring 2007), och åtgärdades också ytskikten. Den främsta orsaken till att installationen gjordes var att det behövdes ett demonstrationsobjekt till TV-serien "Äntligen hemma".

### 5.2. Noteringar

Enligt fastighetsägaren finns katodspett ca en meter utanför huset. Fast enligt vad som visades i "Äntligen hemma" så ligger katodspettet drygt 10 meter utanför huset, högre upp i backen. Installationen hade ursprungligen likriktare av den gamla typen, som lät ganska mycket, och därför byttes ut mot den nya typen.

Pendlar mellan -36/+36 VDC.

Katod-Jord: 0,2 V

Anod-Jord: -36/+36 V

Fukt yttervägg: 50-65 %

Fukt skadad innervägg: 45-65 %

Kunde ej genom mätning finna någon potentialgradient i markan utanför. Dock var detta problematiskt pga att altanen och altan, lager med singel och markduk begränsade åtkomligheten.

Fuktnivåerna var i allmänhet ganska låga på alla väggar, både med och utan Elektroosmosinstallation.

De högsta avläsningarna med Gannmätaren var i storleksordningen 80 i maskinskala vilket motsvarar 60%RF.

Det fanns vid besökstillfället en hel del saltutfällningar och putssläpp i källarväggarna på de platser där det inte hade gjorts någon installation. Väggen där installation hade gjorts var i god kondition.

Fanns elektriska pulser ute?

Vi kunde inte hitta elektriska pulser ute i marken utanför huset.

### 5.3. Kommentarer

Det fanns inga alarmerande fuktnivåer i källarväggen. Det gick inte att säga var katodspettet fanns och vi kunde inte se några spänningspulser i marken utanför. Grunden var tidigare traditionellt dränerad.

Underkant av väggar utan installation hade putsläpp troligen orsakade av fuktuppsugning.

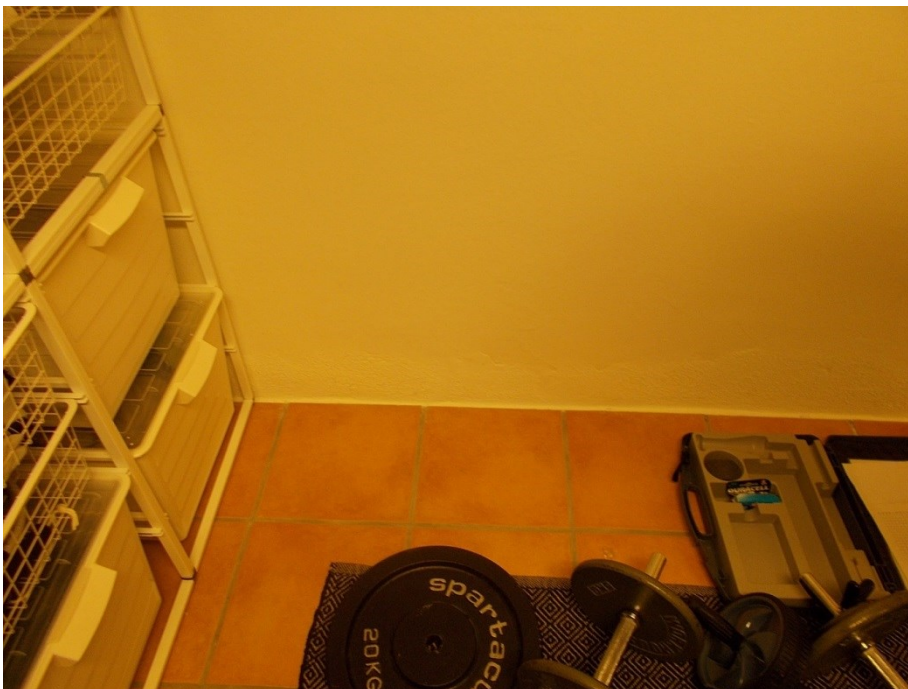


Figur 5.1

Bagarmossen: Mark utanför hus med installation



Figur 5.2  
Bagarmossen: Putssläpp i vägg där installation saknas



Figur 5.3  
Bagarmossen: Vägg med installation



Figur 5.4  
Bagarmossen: Putssläpp i vägg där installation saknas



Figur 5.5  
Bagarmossen: Putssläpp i källare där installation saknas



Figur 5.6  
Bagarmossen: Yttervägg med installation.



Figur 5.7  
Bagarmossen: Elbox

## **6. Sammanfattande kommentarer av noteringar från studiebesöken**

Vi hittade ingen dokumentation kring hur installationen blivit utförd för något av objekten.

Flera av våra kontaktpersoner var nöjda med funktionen hos installationen. Man upplevde att fuktigheten i rummen minskat.

Praktiken för installation av katoden var ganska svår att förstå. I flera objekt var förmodligen byggnadens skyddsjord utnyttjad till att vara katod.

Anoderna var vanligtvis punktvis inbörade i väggarna och sammankopplade med en kabel från elektronikboxen. De var vanligen inputsade i väggarna för att inte synas. När de var synliga så kunde man se att anoderna var inbäddade i kontaktmassa i borrhålen.



# Studie av elektroosmosinstallation på Röda korsets sjukhus, våren 2018

## *Röda korsets sjukhus*

### *Bakgrund*

Besök i denna byggnad gjordes eftersom fastighetsägaren inför en renovering planerar att göra en installation av elektroosmos. Besöket gjordes 31 oktober 2017.

Beskrivning av byggnaden ur Wikipedia:

Sjukhusbyggnaden på Norra Djurgården stod färdig 1927 till en kostnad av cirka 2 miljoner kronor. Tomten uppläts av staten. Arkitekt var Carl Westman. Sjukhuset har åtta våningar och byggdes efter amerikansk förebild.

Sjukhuset invigdes den 5 september 1927 av dess initiativtagare Prins Carl. Han var under närmare 40 år ordförande i Svenska Röda Korset. Huvudman för sjukhuset Stiftelsen Rödakorshemmet, som även bedriver utbildning av sjuksköterskor på Röda Korsets högskola. Sjukhusets huvudinriktning var rehabilitering, äldreomsorg, äldresjukvård och utbildning. Byggnaden såldes år 2010 av Stiftelsen Rödakorshemmet till det statliga fastighetsbolaget Akademiska Hus. Den nya ägaren byggde om huset, som fick namnet KTH-huset och numera inrymmer Tekniska högskolans ledning och förvaltning.

### *Noteringar*

Det aktuella utrymmet finns i källarvåningen vid den västra gaveln i byggnadskomplexets västra flygel. Utrymmets storlek är 13 x 4 meter och är uppdelat i tre rum. Utrymmets yta har alltså en area på 52 kvm. Väggarna i utrymmet är cirka 80 cm tjocka. De är troligen gjutna av betong. Vår fuktmätare, Jonas Lindell, som borrat i många betongväggar sade att detta var det han kallade "kristidsbetong" och att det verkade att finnas annat stenmaterial som utfyllnad längre in i väggen. Installationen för elektroosmos ska betjäna detta utrymme.

Trappnedgången till utrymmet har en storlek på 3x5 m, dvs 15 kvm. I väggen mot väster finns fönster på en höjd av cirka 1,6 meter över golvet. Rumshöjd i rummen är cirka 2,10 meter. Marknivån utanför väggarna ligger på cirka 1,5 meter. En dränering verkar att ha blivit gjord av den västra väggen och en luftspaltbildande skiva finns monterad där.

När vi kom in i rummet så kände vi en kraftig källardoft och rummet upplevdes som mycket fuktigt, på ett obehagligt sätt. Fuktnivåerna i mättes med Gann-mätare. Golvet hade i allmänhet fuktnivåer på upp till 80% RF. Väggarna generellt 55-60% RF, men längst ner mot golvet kunde det vara upp till 80% RF.

Ytterväggen nära trappan hade fuktnivåer med högsta värde 95-97% RF (153 på maskinskalen). Här förekommer också kristallbildning av ett salt (skägglignande struktur), som indikerar att kapillärtransport skett genom hela väggen. Generellt var det > 80% RF i detta område. De höga fuktnivåerna kunde här relateras till möjligt vattenläckage från en trappa och gångväg utanför huset. Det är möjligt att användning av tölsalt kan ha orsakat de tydliga saltutfällningarna.

Både på ytterväggar ovan marknivån och på fönstren, samt även i ett rör för kallvatten så fanns det kondensvatten.

Vattennivån mättes i en dräneringsbrunn alldeles utanför rummen, vid byggnadens sydvästra hörn. Det noterades att vattenytan var ungefär i nivå med rummens golv.

Det fanns ingen ventilation i rummen som verkligen var mycket fuktiga.



Figur 1. Röda korset: Vägg med kondens



Figur 2. Röda korset: Fönster med kondens



Figur 3. Röda korset: Vy över det innersta rummet.



Figur 4. Röda korset: Vy över det mellersta rummet



Figur 5. Röda korset: Vy över rummet närmast trappan.



Figur 6. Röda korset: Den fuktiga väggen nära trappan



Figur 7. Röda korset: kallvattenrör med kondens



Figur 8. Röda korset: Väggen med kondens nära trappan



Figur 9. Gångväg med möjligt läckage

### ***Beskrivning av mätinstallationen***

Vi beslöt att göra en installation av fuktmätare i utrymmet för att se hur fuktnivåerna i en vägg påverkas av elektroosmosinstallationen.

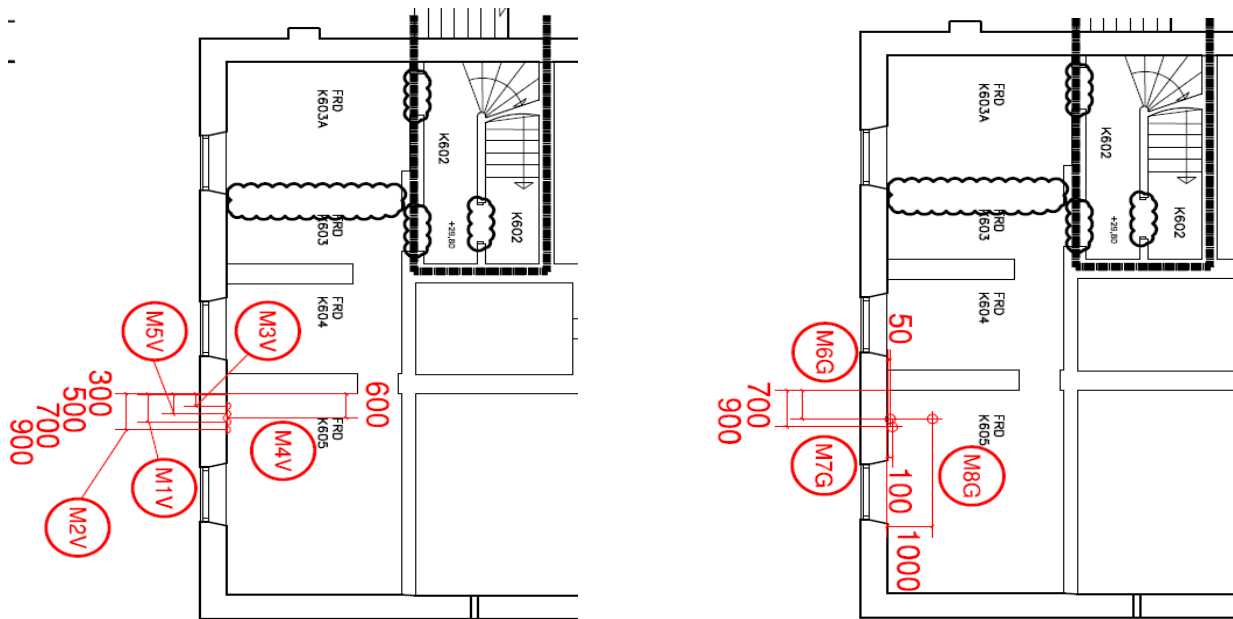
I vägg och golv i det innersta rummet monterades därför kombinerade fuktgivare och temperatur (Vaisala HMP 44). Tanken bakom installationen vara mäta fukten på olika djup och höjder i en vägg samt i golvet på olika avstånd från väggen.

I väggarna placerades en givare 160 cm över golv och på djupet 35 mm, som nollprov som inte förväntas påverkas av elektroosmosinstallationen.

Nästa mätare 30 cm upp från golv och med djupet 35 mm. Därefter en mätare på höjden 20 cm upp från golv och på djupet 105 mm i vägg. Därefter två mätare 6 cm upp från golv och på djupen 35 och 70 mm i väggen.

I golvet monterades givare på avstånden 5, 10 och 100 cm från ytterväggen och på djupet 35 mm. Eftersom själva golvplattan är ganska tunn (cirka 7 cm) så var denna installation ganska svår.

Installationen gjordes av en diplomerad fuktmätare; Jonas Lindell på företaget Methodia. De givare som vi använde hyrde vi från Methodia. De var alla kalibrerade. Mätningarna följde så långt som det gick RBKs metodbeskrivning. (RBK är Rådet för byggkompetens, [www.rbk.nu](http://www.rbk.nu))



Figur 10. Givarnas placering markerad i ritningen



Figur 11. Givarnas placering, på fotografi.

**Beskrivning av elektroosmosinstallationen**

Installationen av elektrososmosutrustningen gjordes både i väggarna och i golvet.

Anoder monterades i spår som frästes in i väggarna och likaledes o golven. Som katoder monterades enligt uppgift från DryProtect nio stycket kopparspelt under golvet. Denna installation gjordes under vecka 2 2018, och den kom i drift i början av februari 2018. En elektroniklåda finns monterad i det innersta rummet. Där finns en strömmätare som mäter hur stor likström som installationen förbrukar. När installationen var ny var strömförbrukningen 0,17 A, och i maj månad hade den gått upp till 0,24 A.



Figur 12. Här syns spåret i väggen och spåret i golvet där elektroderna sitter. Kablarna på bilden har inte med installationen att göra.

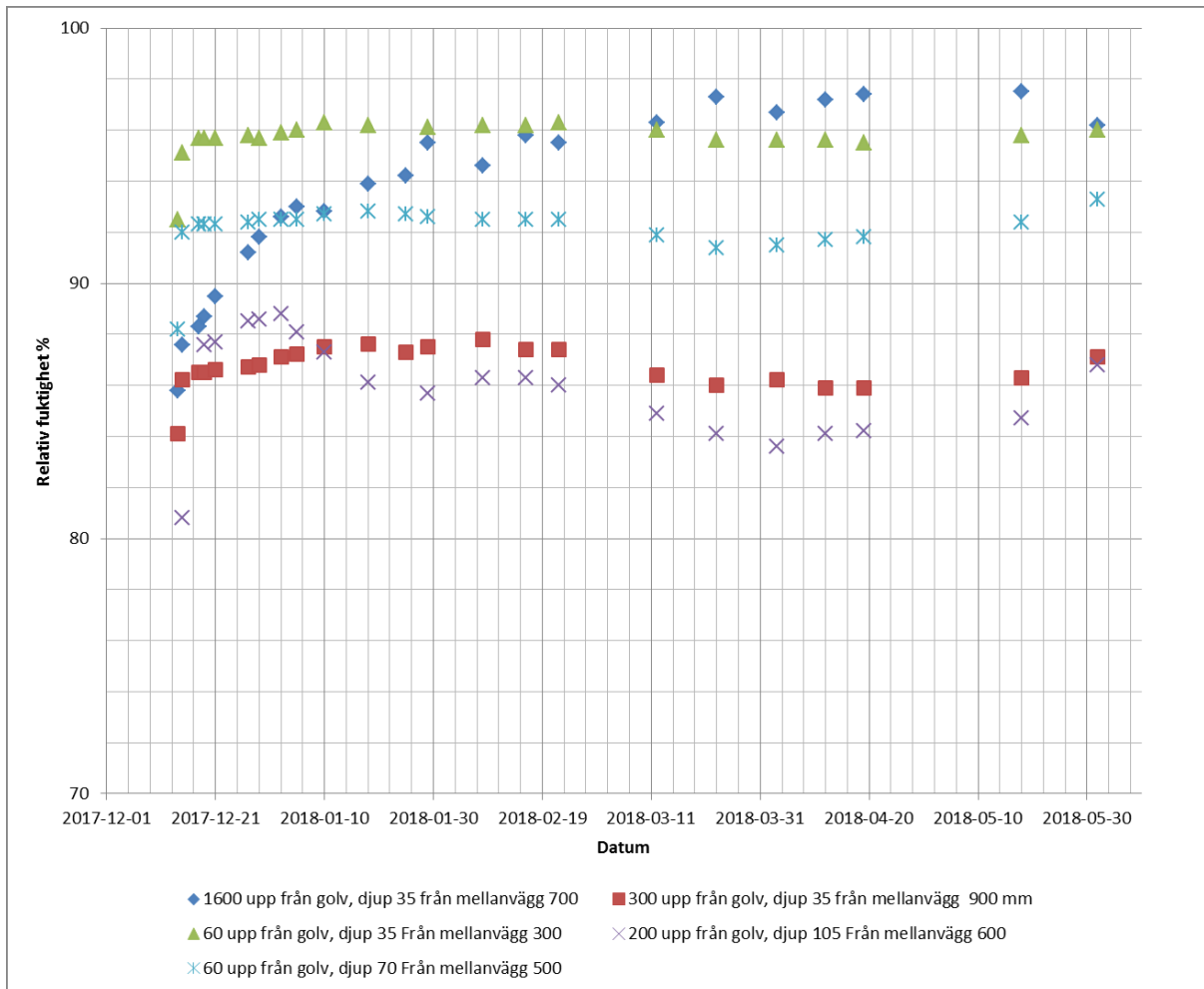


Figur 13. Här syns elektronikboxen och mer av spåren.

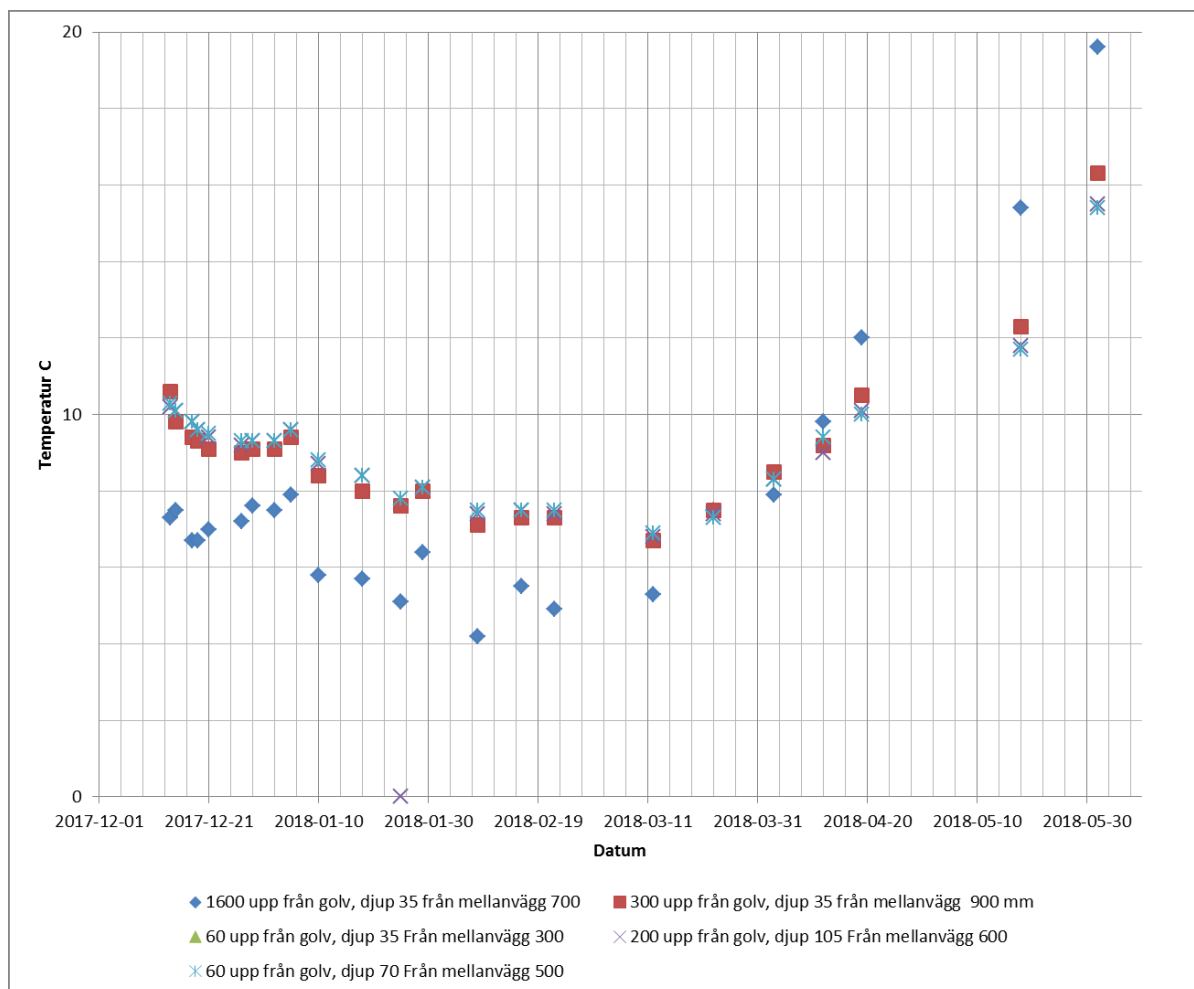


### Resultat av fuktmätningen

Fuktgivarna avlästes återkommande före och efter installationen av elektroosmosutrustningen. Resultat av RH vid fuktmätningen i väggarna visas i Figur 14 och temperaturerna i väggarna i Figur 15. I golvet ställde fuktgivarna ganska snart in sig på värdet 100% RF, och där höll det sig under hela mätperioden. Här finns en svårighet i och med att mätaren stänger av sig vid höga RF-värden, därför är dataserien i golvet inte komplett.



Figur 14. Resultat av fuktmätningen



Figur 15. Temperaturer vid fuktmätningen

Elektroosmosutrustningen kom i drift i slutet av januari.

I väggarna var RF-nivåerna mellan 84 och 98%. Det finns osäkerheter i mätningarna, men förändringarna under tiden är små, och det sker ingen tydlig minskning av RF-värdena med tiden.

I golven blev RF-nivån ganska snart 100%, och där förblev den under hela tiden som mätningen pågick.

Det fanns kondens på väggar eller fönster i utrymmet under hela mätperioden. Vid kallt väder var kondensen främst på de övre delarna av väggen, som gränsar mot uteluft. Under varmare perioder kom kondensen istället på väggarnas nedre delar som gränsar mot jorden.

En notering vid besök i rummet i maj månad var att det hade bildats kalkutfällningar på väggarna, framför allt i det innersta rummet, se figur Z. Detta är ett tecken på fukttransport genom väggen.

En annan notering är att i de hål som fanns borrarade i golvet märktes att det blivit ett mellanrum mellan golvplattan och underlaget. Underlaget i sin tur verkade att bestå av fuktig sand.



Figur Z  
Kalkutfällning på väggen

### ***Diskussion***

Resultaten av mätningarna säger att det hände i stort sett ingenting med RF-nivåerna i väggarna under mätningen. Frågan är då om det säger att installationen inte fungerade?

Elektroosmos har bara funktion inom det kapillära området, där RF i betong ligger på upp emot 90%. För att nå lägre RF-nivåer än dessa så måste man komplettera med andra transportmekanismer. Det betyder att rummet måste ventileras för att bli torrt. Rummet hade ingen ventilation under denna tid. Det fanns inga förutsättningar för att komma till lägre fuktnivåer än de som kapillärsugningen ger.

En notering är att det under våren fortfarande finns tecken på salttransport genom väggarna, vilket i sin tur är en konsekvens av fukttransport genom kapillärsugning.

Vilken typ av mätning skulle kunna visa att en installation av elektroosmos fungerar?

Möjligen skulle fuktmätning genom torkning av ett uthugget prov kunna ge svar på frågan hur fuktnivån förändrats. Detta är tyvärr en förstörande provning.

Att använda en fuktindikator, t.ex. en Gann-mätare skulle också kunna fungera, men när det handlar om så pass tjocka väggar som här så är det inte så säkert att en fuktindikator kan visa ändringar i fuktnivå djupt inne i väggen.

Ett par andra möjligheter för fuktmätning är resistivitetsmätningar och mätning med högfrekvent radar.

Resistivitetmätningar med elektroder klistrade på betongytan skulle kunna ge ett volymmått mer än ett punktmått. Detta kan ge ett relativt värde på förändringar. Kalibrering krävs för att få ett absolut mått. Metoden går dock inte att använda vid armerade betongväggar. Högfrekvent radar (>1000MHz) skulle teoretiskt kunna användas för relativa mätningar eftersom radarvågen dämpas vid ökad fukthalt. För att kunna nyttja metoden krävs dock en hel del signalprocessering.

### ***För övrigt***

Representanter för företag som gör installationerna påpekar att det är viktigt med detaljerna i installationen. När det gäller utformning av elektroder och hur de är monterade i väggarna, samt för övrigt hur de elektriska pulserna går så hänvisar man till företagshemligheter. Vi kan redogöra för vad vi ser men har inte tillgång till all information om installationerna.