

DRÄNERING AV FUKT I BETONG GENOM ELEKTROKEMISK METODIK (ELEKTROOSMOS)



Folke Björk, Byggnadsteknik, KTH
Bo Olofsson, Mark och vatten, KTH
Bror Sederholm; Swerea KIMAB
Jan Trägårdh, RISE, CBI Betonginstitutet
2018-08-10

FÖRORD

Vi som arbetat med projektet tackar SBUF för ekonomiskt stöd.

Vi tackar också referensgruppen för deras insats i projektet.

Claes Dalman PEAB, tillika projektansvarig mot SBUF

Martin Engman, SKANSKA

Staffan Hintze, NCC

Anders Kumlin, Fuktcentrum och även byggskadeexpert

Roland Jonsson, Fastighetsförvaltare; HSB (Numera WSP)

Arbetet har resulterat i följande rapporter:

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: Studie av elektroosmosinstallation på Röda korsets sjukhus, våren 2018 Refereras till som Mätrapporten

Vi tackar även ARID Teknik AB för att ha givit oss tillgång till sina referensobjekt, HG Dry Protect AB för tillfällena till samtal om tekniken, och Akademiska hus för att ha finansierat fuktmätningar i Röda Korsets Sjukhus.

SAMMANFATTNING

Syftet med detta projekt är att studera funktionen av elektroosmos som åtgärd mot fuktproblem i byggnader i Sverige samt att utifrån detta ge rekommendationer kring om och i så fall när det är lämpligt/olämpligt att använda metodiken under de varierande fuktighetsförhållanden som vanligtvis råder i Sverige.

I projektet har vi gjort en litteraturstudie, en modellering av fysikaliska processer, studiebesök i byggnader med installationer för elektroosmos och mätningar av fukt i en källarvägg där en installation för elektroosmos blivit gjord.

Vi ser metoden elektroosmos som en möjlighet för att hantera fuktproblem i grunder. Det behövs dock en del av utveckling både kring tekniken för metoden och kring vad som ska kunna förväntas av den.

Det behövs bättre möjligheter att kunna förutsäga att metoden kommer att fungera i ett visst fall. Att inte kunna förutsäga detta bör vara ett bekymmer för dem som marknadsför metoden.

Elektroosmos kräver höga fuktnivåer för att fungera. Torkning ned till under kritiska fuktnivåer kräver komplettering med andra torkmetoder. Det krävs en tydlighet kring hur detta ska lösas.

Det behövs en bättre förståelse kring hur elektroderna ska placeras för bästa funktion.

Fuktvandring i jorden kan ha stor betydelse för processen i praktiken. Det är idé att undersöka om detta kan användas för att utveckla metoden.

Det behövs klara regler kring hur elinstallationen ska utformas på ett säkert sätt.

Eftersom jontransporten i betongen är av ganska liten omfattning så tror vi inte att elektroosmos kommer att påverka, eller skada, betongens egenskaper på lång sikt.

INNEHÅLL

A. BAKGRUND OCH SYFTE	4
B. OM ELEKTROSMOS	4
C. FUKT I KÄLLARE OCH GRUNDER	6
C.1 FUKT SOM KOMMER IN GENOM KÄLLARVÄGGARNA	7
C.2 KONDENS I KÄLLARE	8
D. RESULTAT FRÅN PROJEKTET	10
D.1 SAMMANFATTNING AV LITTERATURSTUDIEN (SWEREA 1)	10
D.2 SAMMANFATTNING AV MODELLERINGSSTUDIEN AV MEKANISMEN FÖR FUKTTRANSPORTEN (SWEREA 2)	10
D.3 NOTERINGAR FRÅN RAPPORTEN OM BETONG OCH FUKTTRANSPORT, CBI 1	11
D.4 NOTERINGAR FRÅN STUDIEBESÖKEN	12
D.5 MÄTNING AV RF I BYGGNAD DÄR ELEKTROSMOSINSTALLATION GJORDES	12
E. DISKUSSION	13
F. SLUTSATSER	17
G. FRAMTIDA ARBETE	17
REFERENSER	18

A. BAKGRUND OCH SYFTE

Fuktproblem i grunder och källare är något som förekommer under byggnaders förvaltningsfas. Att åtgärda detta är däremot något som byggtreprenörer och installatörer arbetar med. Eftersom en väl fungerande grund är något som förväntas finnas i byggnader som överlämnas till en kund så är det också viktigt att ha pålitliga metoder för att åtgärda brister av detta slag i nya byggnader.

Syftet med detta projekt är att studera funktionen av elektroosmos som åtgärd mot fuktproblem i byggnader i Sverige samt att utifrån detta ge rekommendationer kring om och i så fall när det är lämpligt/olämpligt att använda metodiken under de varierande fuktighetsförhållanden som vanligtvis råder i Sverige.

Projektet är planerat i två delar. Det ekonomiska stödet från SBUF samt föreliggande rapport gäller den första delen som innefattar litteraturstudien, modelleringen av fysikaliska processer, studiebesök och mätningar av fukt i en källarvägg där en installation för elektroosmos blivit gjord.

B. OM ELEKTROOSMOS

Grundläggande teori för hur metoden elektroosmos fungerar finns ytterligare beskriven i rapport SWEREA 1. Detta avsnitt är hämtat från den rapporten.

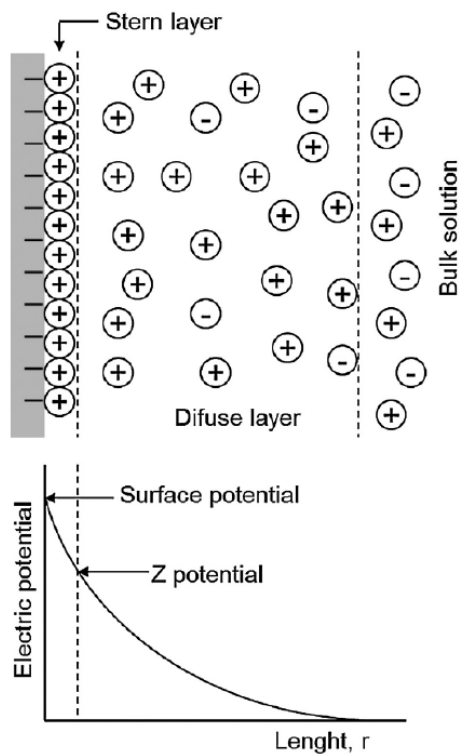
Elektroosmos är ett fenomen som är känt sedan 1809 då F.F. Reuss såg att vatten drogs mot den negativa elektroden när fuktig jord utsattes för ett elektriskt fält [1]. Detta fenomen har sedan använts till en rad olika praktiska tillämpningar inom till exempel jordbruksindustrin för att stabilisera fuktiga 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.

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

Dränering med elektroosmos bygger på att man med hjälp av en pulserande likspänning 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 (utanför Stern-skiktet) och yttre delen av det mobila skiktet kallas zeta-potentialen [9] Den mäts från den horisontella axeln i Figur 1.



Figur 1
Uppbyggnad av det elektriska dubbelskiktet vid kapillärväggen med överskott av katjoner i det diffusiva skiktet [10]. Zeta-potentialen räknas utanför Sternskiktet.

När en likspänning läggs på 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 skiktet så att effekten av vattentransporten ska bli märkbar.

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 rör sig mot katoden. I ett sådant fall är elektroosmos inte beroende på det elektriska dubbelskiktet. Då blir en avgörande parameter för hur väl vattentransporten fungerar och hur många vattenmolekyler som koordinerar till de olika jonerna. Betongens bindemedel består till stor del består av kalciumsilikathydrater (C-S-H) men eftersom kalciumföreningar är svårslösliga består porlösningen inte av så mycket kalciumjoner (Ca^{2+}). Antal vattenmolekyler bundna till Ca^{2+} är inte en helt trivial fråga vilket har undersökts i litteraturen där det anges att antalet vattenmolekyler är fler än sex stycken men att ett temperaturberoende finns [11] [12].

Andra vanliga joner i betongens porlösning är natrium-, kalium- och hydroxidjoner. I konstruktioner som utsätts för kloridhaltiga miljöer så kan också betongporlösningen innehålla kloridjoner (marina miljöer och parkeringshus). För både Na^+ och Cl^- finns flera litteraturkällor som tyder på att antalet vattenmolekyler är sex stycken [13]. Det finns även teorier om att K^+ och Cl^- inte är hydratiserade över huvud taget [6]. Även andra katjoner såsom kisel-, aluminium-, och järnjoner förekommer i små mängder i betongen vilka kan marginellt bidra till vattentransporten. 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 pulserade likspänningen 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 pulserad likspänning 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.

C. FUKT I KÄLLARE OCH GRUNDER

Att helt skydda en grund mot inträngning av fukt är mycket svårt. Detta begränsar möjligheterna att använda källarutrymmen. Som en bakgrund till fuktproblem i källare rekommenderar vi två rapporter av Stig Geving m.fl. från NTNU och SINTEF i Norge [13, 14]. Nästa stycke som behandlar orsaker till fukt i källare är huvudsakligen en kort sammanfattning av dessa rapporter.

Att källare är fuktiga beror antingen på att fukt tränger in genom källarväggarna eller på att kondensation sker i källaren. En kommentar som kan göras utifrån dessa rapporter är att det är svårt att åtgärda fuktproblem i källare. Den andra av rapporterna beskriver tester av olika metoder och det visar sig att det inte alls är självklart att åtgärderna ger det önskade resultatet.

C.1 Fukt som kommer in genom källarväggarna

Viktiga orsaker till fukt i jorden omkring en byggnad är:

- Grundvatten
- Vatten i marken som beror på nederbördsinfiltration
- Vatten nära huset som kommer från tekniska anordningar såsom stuprör eller annan takavvattning

Figur 2 är ett fotografi taget i ett dike och illustrerar fukt i jord. De kan illustrera hur fukt kan komma in i en källare. Längst ner i diket finns grundvatten, och det finns ett övertryck av vatten i jordens porer. Högre upp i diket är jorden mörk. Här sker kapillärsugning och kapillär stigning. Ännu högre upp är marken ljus, där sker inte kapillär stigning, däremot kan fukttransport genom diffusion ske här.

Om grunden i en byggnad går ned till vattnets djup så kan vatten tränga in. Dessutom sker kapillärsugning om betongens porer är betydligt finare än porerna i jorden. Om grunden når till den mörka jorden så sker kapillärsugning. I båda fallen kan fukt även transporteras i grunden genom diffusion. När grunden endast går ner i den bleka jorden kan fukttransport endast ske genom diffusion.

Grundvattennivån varierar under året, det gör att det kan finnas vatten i kontakt med källaren under vissa perioder även om den i allmänhet är väldränerad.



Figur 2
Ett dike med vatten i botten.

Det finns några mekanismer för fukt att komma in i källaren:

- Läckage genom sprickor i grundmuren.
- Läckage på grund av att grundmuren inte är vattentätad.
- Fukttransport genom kapillärporer i betongen i grunden.

Enligt CBI kan fukttransport genom porer i en betongvägg som står mot jord (t.ex. källare) ske genom tre mekanismer:

1: Diffusion i ångfas sker huvudsakligen i porerna 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 CaCO_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 vattenmättat 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. Om det finns ett ”porvattenövertryck” så kan både läckage och kapillärsugning ske. Om marken är fuktig men utan fritt vatten så kan kapillärsugning upp i betongen ändå ske i de fall då betongen jämfört med jorden har ett större porundertryck.

Om vatten kommer in genom sprickor i grunden så behöver marken utanför huset dräneras. Sådana uppenbara fuktkällor som regnvatten eller annat dagvatten måste ledas bort så att det inte finns närmast huset. Om byggnadens dränering inte fungerar tillräckligt bra så finns även här möjligheter till förbättring. Det kan handla om att rensa eller byta ut dräneringsrör, och möjligen även att gräva djupare dränering och kanske en pumpgrop.

En annan åtgärd är att förbättra fuktskyddet utanpå byggnadens grundmur. Denna består ofta av någon typ av asfaltbetrykning som har en begränsad livslängd. I detta sammanhang rekommenderas ibland även luftspaltbildande skivor utanpå en grundmur.

Det är i många fall inte möjligt att dränera bort allt vatten runt en byggnad. Då måste grunden göras vattentät, vilket kräver gjutning av grund med betong av vattentät kvalitet utan sprickor med täta fogar. Detta är i praktiken mycket svårt att utföra, vilket medför att ett applicerat tätskikt är att föredra. Det är i vattentäta grunder vanligt att även förbereda för injektering med tätningsmassor i grunden i framtiden ifall sprickor ändå uppkommer. På samma sätt som fukt kan tränga in genom väggar så kan den naturligtvis även tränga in genom golv.

Ett alternativ vid fuktinträngning genom grundmurar är den så kallade spaltmetoden [15]. Här byggs en luftspalt på väggens varma sida som förses med en värmekabel. Värmen från värmekabeln skapar ett luftflöde som tack vare sin temperatur även kan transportera bort en del fukt. Denna fukt transporteras sedan bort genom ventilation.

C.2 Kondens i källare

Kondensation är ett ämnes fasomvandling från gas till vätska under det att värme bortförs eller under det att gasen komprimeras. Kondens i luft med innehåll av vattenånga sker när luften kyls ned så att temperaturen blir lägre än dagpunkten vid den aktuella ånghalten. När kondensfukt bildas i en källare så beror det på att den fuktiga luften kommer i kontakt

med ytor som har lägre temperatur än daggpunkten vid den aktuella ånghalten. Vid kondensation frigörs värme, som lokalt och tillfälligt kan värma en yta. Vid kondensationen avfuktas dessutom luften.

Det finns ett par sätt att se på kondensationen. Antingen är luften i källaren för fuktig, eller så är ytorna i källaren för kalla. Vintertid sker kondensationen i första hand på de delar av en källarvägg som har kontakt med uteluft, som ofta är kallare än marken runt huset. Sommartid är det mer troligt att kondensationen sker på de delar av källarväggen som har kontakt med omgivande mark, som ju endast långsamt värms upp. Av samma skäl sker kondensation på golvet i källaren. Även kallvattenrör är typiska punkter för kondensation.

Det kan finnas flera orsaker till att fukt kommer in i källaren och orsakar kondens.

- Det kan vara fuktig luft utifrån som kommer in i källaren
- Det kan vara fukt som tillförs luften i källaren genom verksamheten i huset, från människor, från torkning av tvätt, matlagning etc.
- Det kan vara fukt som på olika sätt kommer in genom källarväggarna eller källargolvet genom transportmekanismer som nämnts i förra avsnittet.

Kondensproblem i källare kan åtgärdas enligt några olika strategier:

- 1: Minska tillförsel av fukt som kommer av verksamhet i källaren
- 2: Värm källaren och öka ventilationen, då blir de kalla ytorna varmare och fukten kan bäras bort av luftflödet.
- 3: Installera avfuktningstrustning
- 4: Minska fuktinträngning genom väggar och golv, t.ex. genom att leda bort dagvatten och förbättra dräneringen
- 5: Minska värmeflödet genom väggarna, och golvet, så att de håller en högre temperatur, genom värmeisolering av utsidan.

Vissa av dessa åtgärder är ganska komplicerade att genomföra.

D. RESULTAT FRÅN PROJEKTET

Resultaten av litteraturstudien, modelleringen av fysikaliska processer, studiebesök och mätningar av fukt i en källarvägg där en installation för elektroosmos blivit gjord presenteras här.

D.1 Sammanfattning av litteraturstudien (Swerea 1)

I litteraturstudien har erfarenheter och dokumentation kring elektroosmos som metod för att avfukta betong sammanställts. Den grundläggande teorin för elektroosmos i kapillära 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 att fukttransport genom elektroosmos kan ske 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 positiva effekter av elektroosmos med pulsad likström har hittats.
- Övervakning av utmatad ström och spänning samt fukt i betongen kontinuerligt är nödvändigt. Betongens fuktighet bör mätas under en relativt lång period.

D.2 Sammanfattning av modelleringsstudien av mekanismen för fukttransporten (Swerea 2)

I 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 (positiva joner) 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 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.

En notering är att hydroxidjonerna i betongen kan ha stor påverkan på vattentransporten. Denna modellering kan ge idéer för nya försök för att optimera processen vid elektroosmos.

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

- Mekanistisk modellering är ett användbart sätt att undersöka möjliga effekter av vätskesammansättning, material och geometrier vid tillämpning av elektroosmostekniken.
- Möjligheterna till 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 (høgt 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).
- En modellering med 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, t ex kloridjoner, kan göra det möjligt att öka effekten av elektroosmos i betong även vid høgt 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 som 1 V kan ge upphov till korrosion.

D.3 Noteringar från rapporten om betong och fukttransport, CBI 1

I rapporten CBI finns en beräkning av hur stora mängd fukt som kan passera en betongvägg genom diffusion av luftens fukt. Det är en helt obetydlig mängd. Tabell 1 visar kapacitet för att attrahera vattenmolekyler för några viktiga joner i betong, samt typiska halter av dessa som kan förväntas i högalkalisk cement.

Tabell 1. Joner i betong som har betydelse för elektroosmos samt dess förmåga att attrahera vattenmolekyler. Efter Abbas (2017, CBI)

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

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

- Betongens förutsättningar som medium för elektroosmotiskt flöde av vattenbärande katjoner är mycket begränsat.
- 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 försvåra vattenbärande jontransport ut från betongen och öka resistansen.
- Tillsats av klorider till betongporlösningen kan möjligen medföra att fukttransporten blir mer effektiv. Samtidigt som den elektriska ledningsförmågan och jonvandringen ökar så minskas den vattenbärande jonvandringen mot anoden.
- Förutsättningen för att elektroosmos skall fungera i betong är att betongens kapillärporsystem till största delen är vattenmättat, dvs RF väl över 85% och bäst över 90 %.

D.4 Noteringar från studiebesöken

Studiebesök gjordes i fem byggnader. Detta är sammanfattning av våra noteringar:

- 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 inborrade 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.

D.5 Mätning av RF i byggnad där Elektroosmosinstallation gjordes

I en byggnad gjordes mätning av RF i betong i väggarna före och efter installation av elektroosmosutrustning. Resultaten av mätningarna visade att RF-nivåerna i väggarna inte ändrades 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, är inte lämpligt eftersom denna enbart mäter fukten på betongytan.

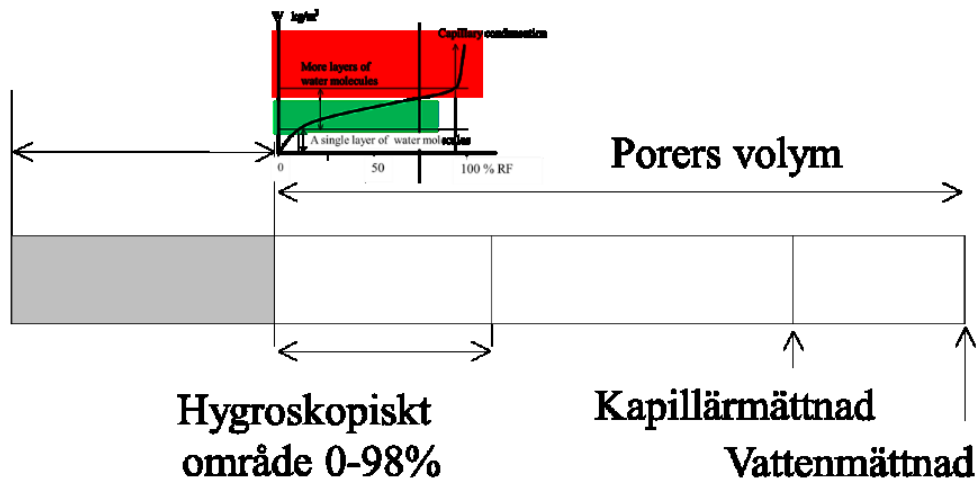
E. DISKUSSION

Det finns delade meningar om elektroosmosens fukt drivande förmåga i betonggrunder till byggnader. Vissa uttrycker stor skepsis och andra ett mycket stort förtroende. I de rapporter som vi läst finns både rapporter om installationer som lyckats väl och om sådana som inte alls fungerat. Det är inte rimligt att avfärda metoden bara utifrån att installationerna inte alltid fungerar som avsett. Det är däremot viktigt att kunna säga för ett visst objekt om installationen kommer att fungera eller inte. En notering från platsbesöken är att många av kunderna är nöjda med funktionen.

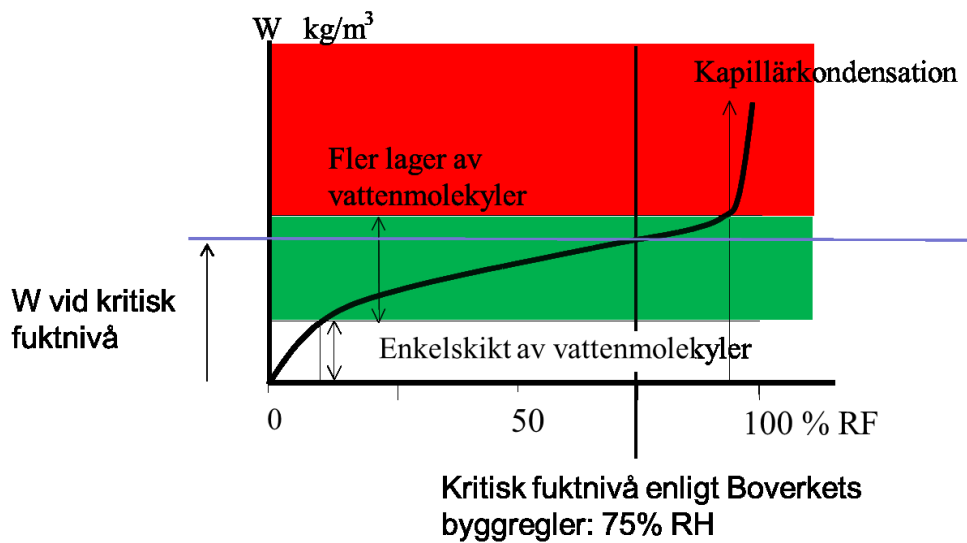
Det finns förutsättningar som måste vara uppfyllda för att den elektroosmotiska processen ska fungera. Det krävs en sluten elektrisk krets. Resistansen mellan elektroderna får inte vara för hög så att ingen ström utmatning kan ske. Det måste finnas fukt i materialets kapillärer. Figur 3 visar hur det hygroskopiska området motsvarar en del av det vatten som ett material kan ta upp. Ökad uppsugning av kapillärfukt leder till kapillärmättnad och sedan kan ytterligare vatten tryckas in i materialet så att det blir vattenmättat. Det hygroskopiska området med indikation kring vilka RF som korresponderar till enkelskikt av vattenmolekyler respektive kapillärkondensation ges i figur 4. Figur 4 visar hur kapillärkondensation sker vid de högsta värdena på relativ fuktighet. Kapillärkondensation inträffar när betong har RF i storleksordningen 98%, eller kanske definitivt över 90% (16). Så om RF i betongen är lägre så finns knappast förutsättningar för elektroosmos. Kapillärerna i betongen måste vara mer eller mindre vattenfyllda för att elektroosmos ska fungera.

Det bör betyda att när fuktnivån i en konstruktion når lägre värden än 90 % så verkar även andra torkmekanismer. Slutsatsen är att elektroosmos kräver höga fuktnivåer för att fungera, och att torkning ned till under kritiska fuktnivåer kräver komplettering med andra torkmetoder.

Volym av kompakt material



Figur 3
Hygroskopiskt område, kapillärmättnad och vattenmättnad i ett material



Figur 4
En typisk sorptionskurva

Det måste finnas lösta joner i vattnet i kapillärerna för att vattentransport ska ske. En kommentar till modelleringen av de fysikaliska processerna för fukttransporten (SWEREA 2) är att den balans av joner med olika koordinationstal som medverkar för att vattentransporten ska ske är ganska känslig. Det är också slående att hydroxidjoner i betongporerna kan leda till att vatten transporteras i motsatt riktning jämfört med vad som önskas. Det gör att det kan vara motiverat att överväga placering av anoden på väggens utsida snarare än på dess insida.

Transporten vid elektroosmos gäller kapillär transport i materialets porer. Om konstruktionen har sprickor där vatten flödar fram så kan den elektroosmotiska processen inte hindra detta. Konstruktionen måste alltså vara tätad mot hydraulisk vattentransport.

Vilka andra alternativ finns det för att åtgärda fuktproblem i grunder? Att skydda grunder mot fukt är svårt eftersom grunden är mycket svår att komma åt. Det är inte att begära att marken runt ett hus alltid ska vara torr. Det gäller att istället göra det bästa av situationen och att inte ställa orimliga krav på vad en källare ska kunna användas till.

I rapporten från SINTEF [14] beskrivs hur åtgärd av en grund med utvändigt värmeisolerande och dränerande skiva inte gav förväntat resultat. I samma rapport beskrivs hur en installation med elektroosmos inte heller gav önskat resultat. En annan rapport från Norge [17] beskriver hur installationen resulterat i en acceptabelt låg fuktnivå. Detta är också slutsatsen i en rapport från Chalmers Industriteknik [18].

Vid samtal med personer som marknadsför och installerar utrustningar för elektroosmos så påpekas ofta att utförandet av själva detaljerna är något som man lärt sig efter hand och att detta är en affärshemlighet eftersom det kostar en hel del i utvecklingsarbete att komma fram till de lösningar som man har. Det gör att man är ovillig att berätta allt för detaljerat om sin teknik eftersom man inte vill att den ska bli kopierad.

Slutsatsen är att det är ganska känsliga balanser av joner i materialen som skapar förutsättningarna för elektroosmos. Detta bör vara ett bekymmer för dem som marknadsför metoden. De jontransporter som sker är ganska små till sin omfattning, därför tror vi inte att de kommer att påverka, eller skada, betongen på lång sikt.

Det finns olika metoder för placering av anoderna. Utifrån de erfarenheter som finns av katodiskt korrosionsskydd så är det viktigt att se till så att strömmen fördelas jämnt över konstruktionen. Det är rimligt att tänka likadant om en elektroosmosinstallation.

Katodens placering kan variera mycket. I objekt som vi besökt, se Studiebesök, så har i något fall elsystemets skyddsjord använts som katod och i ett annat fall användes åskledaren. I andra fall, t.ex. i objektet för Mätrapporten, finns ett eller flera kopparspett monterade som katoder. Att använda skyddsjorden i elsystemet ser vi som bekymmersamt eftersom det lägger en konstant likström på en ledare som faktiskt i normalfallet ska vara strömlös. För övrigt så förutsätter systemet att strömmen rent rumsligt fördelas jämnt runt byggnaden, och detta borde ställa krav på hur elektroderna är placerade. Vår slutsats kring elektrodplacering är att förståelsen kring hur den ska göras kan bli bättre.

En notering i Mätrapporten är att det är mycket svårt att verifiera att det verkligen sker förändringar i fuktnivåerna efter en installation med elektroosmos. Processerna sker i stor utsträckning över det hygroskopiska området, så RF kan vara över 100% och metoden fungerar ändå. En fuktindikator kan mäta processen på en yta, men det är vad som händer inne i väggen som skulle behöva mätas. Mätning av kapillärmättnadsgrad i ett uthugget prov skulle kunna vara en möjlighet, men det är en förstörande provning. Det behövs alltså utveckling av en mätmetod för att verifiera att en installation av elektroosmos fungerar som avsett.

Ett par möjligheter är resistivitetsmätningar och mätning med högfrekvent radar. Resistivitetsmätningar 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.

Våra rapporter SWEREA2 och CBI säger att det råder stor osäkerhet beträffande om i vilken utsträckning som elektroosmos kan dra ut fukt ur betong. Det finns dock belägg för att metoden fungerar i fuktig jord. En tanke som vi har är att det kan vara mer effektivt att göra installationen i jorden nära grundmurens utsida istället för på dess insida. Det skulle kunna påverka fuktbelastningen från grundmuren. En annan notering från SWEREA2 är att katoden behöver god tillgång till syre för att fungera effektivt.

Våra studier kring metoden gör att vi kan säga att:

Det behövs bättre möjligheter att kunna förutsäga att metoden kommer att fungera i ett visst fall. Att inte kunna förutsäga detta bör vara ett bekymmer för dem som marknadsför metoden.

Det behövs också utveckling av mätmetoder för att verifiera att en installation av elektroosmos fungerar som avsett.

Elektroosmos kräver höga fuktnivåer för att fungera. Torkning ned till under kritiska fuktnivåer kräver komplettering med andra torkmetoder. Det krävs en tydlighet kring hur detta ska lösas.

Det behövs en bättre förståelse kring hur elektroderna ska placeras för bästa funktion.

Fuktvandring i jorden kan ha stor betydelse för processen i praktiken. Det är idé att undersöka om detta kan användas för att utveckla metoden.

Eftersom jontransporten i betongen är av ganska liten omfattning så tror vi inte att elektroosmos kommer att påverka, eller skada, betongens egenskaper på lång sikt.

Det behövs klara regler kring hur elinstallationen ska utformas på ett säkert sätt.

Sammanfattningsvis ser vi metoden elektroosmos som en möjlighet för att hantera fuktproblem i grunder. Det behövs dock utveckling både kring tekniken för metoden och kring vad som ska kunna förväntas av den.

Metoden elektroosmos används även för att stabilisera lera i mark En introduktion till detta ges i ett examensarbete från KTH av Eriksson och Gemvik [19].

F. SLUTSATSER

Vi ser metoden elektroosmos som en möjlighet för att hantera fuktproblem i grunder. Det behövs dock utveckling både kring tekniken för metoden och kring vad som ska kunna förväntas av den.

Det behövs bättre möjligheter att kunna förutsäga att metoden kommer att fungera i ett visst fall. Att inte kunna förutsäga detta bör vara ett bekymmer för dem som marknadsför metoden.

Det behövs också utveckling av mätmetoder för att verifiera att en installation av elektroosmos fungerar som avsett.

Elektroosmos kräver höga fuktnivåer för att fungera. Torkning ned till under kritiska fuktnivåer kräver komplettering med andra torkmetoder. Det krävs en tydlighet kring hur detta ska lösas.

Det behövs en bättre förståelse kring hur elektroderna ska placeras för bästa funktion.

Fuktvandring i jorden kan ha stor betydelse för processen i praktiken. Det är idé att undersöka om detta kan användas för att utveckla metoden.

Det behövs klara regler kring hur elinstallationen ska utformas på ett säkert sätt.

Eftersom jontransporten i betongen är av ganska liten omfattning så tror vi inte att elektroosmos kommer att påverka, eller skada, betongens egenskaper på lång sikt.

G. FRAMTIDA ARBETE

Beträffande framtida studier menar vi att:

Det behövs bättre möjligheter att kunna förutsäga att metoden kommer att fungera i ett visst fall.

En mätmetod behöver utvecklas för att verifiera att en installation av elektroosmos fungerar som avsett.

Hypotesen att elektroosmos kan bidra till minskad fuktbelastning i jorden utanför grunden och därmed minska fuktproblemen behöver testas.

Det behövs en tydlighet kring hur metoden ska kombineras med andra metoder för att sänka fuktbelastningen i en källare eller en grund.

Det behövs en bättre förståelse kring hur elektroderna ska placeras för bästa funktion.

Det behövs klara regler kring hur elinstallationen ska utformas på ett säkert sätt.

Troligen skadar elektroosmos inte betong på lång sikt, men detta behöver verifieras.

REFERENSER

- [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 Ca²⁺ and Mg²⁺: 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] Stig Geving och Peter Blom, Utbedring av fuktskadede kjelleryttervegger, Delrapport 1 – Litteraturundersøkelse og generelle anbefalinger, SINTEF Byggforsk, Projektrapport 83 (2011).
- [14] Stig Geving, Peter Blom Marius Kvalvik och Espen Martinsen, Utbedring av fuktskadede kjelleryttervegger, Delrapport 2 – Felt-, laboratorie- og beregningsmessige undersøkelser av tre metode, SINTEF Byggforsk, Projektrapport 84 (2011).
- [15] Tord af Klintberg, *Air Gap Method: Air-Gaps in Building Construction to avoid Dampness and Mould*, Doktorsavhandling, Kungl Tekniska Högskolan, Avd för Byggnadsteknik, (2009). Tillgänglig på: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-102873>.

[16] Min Wu, Björn Johannesson, Mette Geiker, A study of the water vapor sorption isotherms of hardened cement pastes: possible pore structure changes at low relative humidity and the impact of temperature on isotherms, *Cement and Concrete Research*, Vol. 56, p 97-105 (2014).

[17] Norges Byggeforskningsinstitutt, Oppdragsrapport 10318 Dato:14.06.2006, Fuktmåling i kjellerlokale, Bygg 5461, Nygårdsgata 55, Fredrikstad

[18] Chalmers industriteknik, Stephan Mangold, "Dränering utan att gräva" Utvärdering av uttorkning av fukt i betongväggar med aktiv elektroosmos. Datum 04-04-2016.

[19] Fredrik Eriksson och Lina Gemvik, Electro-Osmotic Treatment of Soil: A laboratory investigation of three Swedish clays, Examensarbete i Jord- och Bergmekanik, KTH (2014). Tillgänglig på: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-152809>