

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

Jan Trägårdh

Rapportnummer: 7P00151

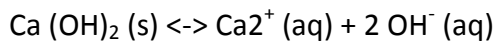
Stockholm 2018-06-16

Innehåll

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

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 Ca^{2+} joner. Lösningens jonkoncentration kommer därför till stor del efterhand som fukt i vätskefas transporteras genom betongen att bestå av Ca^{2+} och 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 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} och de vanligaste anjonerna OH^- och SO_4^{2-} . I avsevärt mycket mindre utsträckning förekommer även 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 Na^+ och 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 Na^{2+} och 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 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 (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 ² vct 0,5	CEM I ² vct 0,5	CEM I3, vct 0,5	CEM I, moderat- hög alkali ¹ , 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. ²Taylor, H.F.W, Cement Chemistry, 1997, ¹Diamond and Constantiner, ³Page and Vennesland.

Element (mmol/l)	CEM I (lågalkalisk, 0,5 Na ₂ O _{ekv.}) vct=0,4	CEM I (högalkalisk, 1,1 Na ₂ O _{ekv.}) 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. Ca²⁺ kan nå koncentrationer kring 20 mmol/l, Na⁺ 5-250 mmol/l, K⁺ 75-700 mmol/l, ca 0,05 mmol/l H₂SiO₄²⁻ och ca 0,1 mmol/l Al³⁺. Variationen i koncentrationer beror på cementtypen, där den viktigaste parametern är om det är ett lågalkaliskt- eller högalkaliskt cement vilket anges av cementets Na₂O_{ekv.}

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. Porrhadiens inverkan på fuktpermeabiliteten i betong ges i tabell 4. Diffusionskoefficienter för olika joner i en betongporlösning ges i tabell 5.

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

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

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

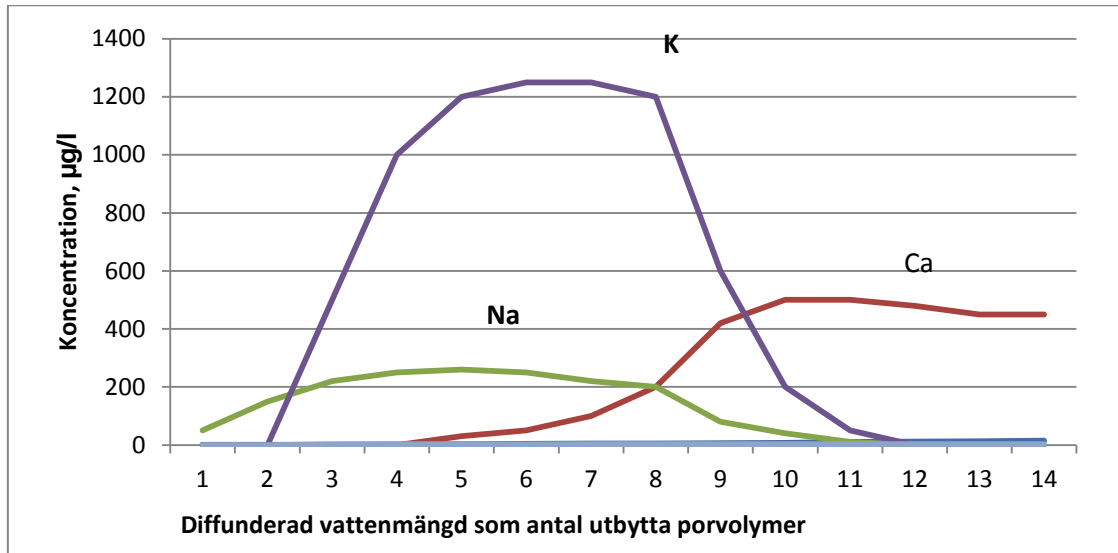
Tabell 4. Permeabilitetskoefficienter (m/s) för fukt i olika porradier. Efter Moskvina (1980) och Ekström (2000).

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

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

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 6×10^{-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 5×10^{-11} enligt tabell 4 (vct = 0,6).

Ur tabell 1, sidan 399 i Betonghandboken (andra upplagan, 1982) fås mätnadsånghalten för ytter- och innetemperaturerna till $6,37 \times 10^{-3}$ kg/m³ respektive 15×10^{-3} kg/m³. Ånghalterna vi RF i exemplet blir då $0,90 \times 6,37 \times 10^{-3} = 5,7 \times 10^{-3}$ kg/m³ utomhus och $0,50 \times 15 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3 = 7,5 \times 10^{-3}$ kg/m³ 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 laborieundersökningen 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 porlösningskemi 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 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	

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 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, Internet: www.ri.se

RISE CBI Betonginstitutet
Rapportnummer
7P00151