LUND UNIVERSITY

Kloridinträngning i samband med tösaltning av betongkonstruktioner : numerisk simulering med hjälp av finita elementmetoden

Johannesson, Björn

1997

Link to publication

Citation for published version (APA):
Johannesson, B. (1997). *Kloridinträngning i samband med tösaltning av betongkonstruktioner : numerisk simulering med hjälp av finita elementmetoden*. (Rapport TVBM (Intern 7000-rapport); Vol. 7111). Avd Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola.

Total number of authors:
1

General rights
Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.
• Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
• You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
• You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: https://creativecommons.org/licenses/

Take down policy
If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00

LUND UNIVERSITY
LUND INSTITUTE OF TECHNOLOGY
Division of Building Materials

KLORIDINTRÄNGNING I SAMBAND MED TÖSALTNING AV BETONGKONSTRUKTIONER

Numerisk simulering med hjälp av finita elementmetoden

Björn Johannesson

TVBM-7111

Lund 1997

Kloridinträngning i Samband med Tösaltning av Betongkonstruktioner: Numerisk Simulering med Hjälp av Finita Element Metoden.

förhandskopia: 96 08 30
reviderad: 96 09 24

Björn Johannesson
Byggnadsmaterial, Lund Tekniska Högskola
Telefon: 046-2224052
E-Post: Bjorn.Johannesson@byggtek.lth.se

1 Inledning

I denna skrift diskuteras olika masstransport fenomen i samband med tösaltning av betong. Genom att simulera rimliga yttre klimat variationer, vad avser relativ fuktighet, regn samt kloridkoncentrationer på ytan av betong konstruktionen, är det möjligt att skapa en uppfattning om vilka transport fenomen som är väsentliga. Modellen är baserad på en rad olika antaganden, men presentationen av resultaten i kapitel 5 inleds med traditionella gradient beroende transport fenomen dessa resultat jämförs sedan med en modell där antagandena successivt förfinas.

För att kunna utvärdera effekten av uppfuktning, till exempel på grund av kappilärsugning, samt uttorkning av porvatten i betongen och dess påverkan på kloridtransporten måste två ekvationer lösas. Ekvationen som beskriver kloridtransporten kommer därvid vara kopplad till ekvationen som beskriver vattentransporten. Huvudtanken med simuleringen är vidare att försöka ta hänsyn till alla väsentliga fysikaliska fenomen som kan tänkas agera under förhållanden som bestäms av randvillkoren, det vill säga av de yttre klimat variationerna. De mest betydande processer som modelleras är diffusion av klorider i porvattnet, konvektion av klorider (med konvektion avses här att kloriderna tvingas med i rörelseriktningen av porvattnet), reversibel och/eller irreversibel bindning av klorider till porväggarna, fukttransport med hänsyn tagen till kapillärtransport samt slutligen koncentrations ökning/sänkning av kloridkoncentrationen i porvattnet på grund av uttorkning/uppfuktning. Det skall också noteras att kloridernas närvaro i porvattnet ej antags påverka fukttransport egenskaperna, det vill säga kopplingen av ekvationerna avser endast koppling från fukttransport ekvationen till kloridtransport ekvationen.

Vidare är specifiseringen av randvillkoren samt dess variation med tiden mycket väsentliga för lösnings beteendet av ekvationssystemet. Som exempel kan nämnas att klorider i porvattnet vid ytan av betongen konstruktion har ett mycket stort motstånd att diffundera ut i omgivande luft detta måste naturligtvis beskrivas med hjälp av korrekt specificerade randvillkor. Ett annat problem associerat med randvillkor kan vara att på ett rimligt sätt föreskriva mycket höga koncentrationer av saltlösningar som kan uppträder på ytan på betongen efter det att tösaltning har förekommit med en efterföljande förångning av vatten

från tösaltnings lösningen. I denna skrift har randvillkoren för kloridtransport ekvationen samt för vattentransport ekvationen valts på ett sätt som efterliknar en intermetent intervall av tösaltning i en mycket fuktig miljö med en efterföljande längre period med ett klimat med lägre relativ luftfuktighet utan några tösalter närvarande vid konstruktionens yta. Det är naturligtvis möjligt att föreskriva godtyckliga variationer av klimatet vid ytan i avsikt att simulera olika fall av kloridangrepp på betong, i detta arbete studeras dock endast ett enda sådant fall.

2 Kort om transienta problem och Finita Element Metoden

Analytiska lösningar existerar ej till kopplade olinjära transienta problem vilket innebär att man är förpassad till numeriska analyser. Detta behöver dock inte innebära att man mister kontrollen över rimligheten av den erhållna numeriska lösningen. Vid olinjära problem kan jämvikts iterationer inom tidsstegen utföras med hjälp av, till exempel, Newton-Raphson metoder, dessa tekniker gör att rätt lösning kan spåras i de flesta situationer. De ekvationer som har behandlas här har dock lösts utan jämvikts iterationer trots att problemet är olinjärt, kontrollen av lösningarnas rimlighet har istället utförts genom att successivt halvera tidsstegen tills lösningen konvergerar. På detta sätt har ett lämpligt tidssteg kunnat väljas.

Vattentransport ekvationen har lösts med ett tvåstegs tidsschema vilket innebär att de två senast kända koncentrationsfälten används för att räkna fram det kommande sökta koncentrationsfältet. Metoden tillhör Newmark-familjen och tids-viktningen är utförd enligt Liniger's metod. Den använda metoden är implicit och okonditionerat stabil vilket innebär att inga restriktioner vad avser tidssteget storlek finns, till skillnad från explicita metoder där ett tidssteg som understiger ett visst kritiskt tissteg måste väljas. Jämvikts iterationer inom tidsstegen har ej utförts, däremot har tidsstegets storleks inverkan på lösningen studerats och valts till ett värde som bidrar till minimal "drift" av lösningen. Approximationen av tillståndsvariablen är vidare utförd med hjälp av endimensionella linjära element och viktsfunktionen är vald enligt Galerkin's metod. En så kallad Boltzmann transformation av tillståndsvariablen har även utförts för att göra olinjärheten mindre dominant, uppmätt data som krävs för att kunna utnyttja denna transformation finns för en rad olika betongkvaliteter [].

Lösandet av kloridtransport ekvationen innefattar en extra komplikation jämfört med lösandet av vattentransport ekvationen, denna komplikation beror på att den konvektiva delen av transportprocessen bidrar till numeriska problem såsom "artificiell diffusion" och oscillation. De numeriska problemet kan dock elimineras genom att välja viktsfunktionen enligt Petrov-Galerkin's metod som är baserad på att viktsfunktionen matchar den analytiska lösningen mellan nodpunkterna (för ett linjärt fall av diffusion-konvektions ekvationen). Petrov-Galerkin's metod har använts i beräkningarna för att beskriva viktsfunktionen, tillståndsvariabeln är dock approximerad med normala endimensionella linjära element. Det använda tidsstegs schemat är en implicit enstegs metod som endast använder det senast kända koncentrationsfältet för att räkna ut det kommande. Schemat är okonditionerat stabilt och konstruerat på ett sätt som medför att felet minimeras i hela det betraktade området, denna tidsstegs metod kallas Liniger's enstegs metod. Bindning av klorider från porlösningen till porväggarna har vidare lösts numeriskt genom att "lumpa" käll/sänk termerna vid noderna. Det kan också nämnas att det betraktade problemet genererar osymmetriska matriser på grund av konvektions delen av flödet, detta medför dock marginella numeriska problem jämfört med den "artificiell diffusion" och oscillationen som i vissa fall kan observeras även om Petrov-Galerkin's metod används.

3 De styrande ekvationerna samt förklarande text

I formuleringen av det aktuella problemet finns tre olika tillståndsvariabler dessa är $\tilde{c}_{cl}$ [mol/liter] som betecknar koncentrationen av klorider i porvattnet, c_{bcl} [mol/liter] betecknar koncentrationen av bundna klorider i (hela) materialet, c_w är koncentrationen av vatten i (hela) materialet [liter/liter]. Eftersom tre tillståndsvariabler är definierade krävs tre ekvationer för att lösa ekvations systemet dessa ekvation är nedskrivna nedan (3.1-3.3). Kloridtransporten beskrivs med hjälp av diffusion-konvektions ekvationen (3.1) där även inverkan av reversibel bindning av klorider är inkluderad.

$$\frac{\partial \tilde{c}_{cl}}{\partial t} + D_{cl}(c_w)\frac{\partial^2 \tilde{c}_{cl}}{\partial x^2} + U_w \frac{\partial \tilde{c}_{cl}}{\partial x} = \frac{\partial c_{bcl}}{\partial t}; \qquad (+\ randvillkor) \tag{3.1}$$

Där $D_{cl}(c_w)$ är diffusions parametern som antags bero på koncentrationen av vatten i betongen. U_w är *medelhastigheten* av vattenfasen vilken är associerad med flödet av vatten i porsystemet, U_w bestäms med hjälp av ekvation (3.3). Den reversibla reaktionen antags beskrivas enligt (3.2)

$$\frac{\partial c_{bcl}}{\partial t} = \lambda \tilde{c}_{cl} - \mu c_{bcl} \tag{3.2}$$

där λ är hastighetskonstanten för bindning av klorider från porlösningen till porväggen och μ är hastighetskonstanten för frigörelse av bundna klorider till porlösningen. Ekvation (3.2) beskriver med andra ord en snabb transport av klorider från porlösningen till porväggen när många "fria " platser finns tillgängliga denna hastighet trappas sedan successivt ned när allt fler fria platser ockuperas, vidare om koncentrationen i porlösningen vid någon tidpunkt blir låg tillåts bundna klorider frigöras till porlösningen dock med en relativt mindre omfattning än vid bindningen.

Masstransporten antags beskrivas med en olinjär Fick's lag typ av ekvation (3.3).

$$\frac{\partial c_w}{\partial t} + D_w(c_w)\frac{\partial^2 c_w}{\partial x^2} = 0; \qquad (+\ randvillkor) \tag{3.3}$$

där $D_w(c_w)$ är diffusions parametern som antags bero på koncentrationen av vatten i betongen.

Ovanstående ekvationssystem, det vill säga ekvationerna (3.1-3.3) gör det möjligt att simulera följande viktiga fysikaliska fenomen gällande vid masstransport i samband med tösaltade betongkonstruktioner, där det skall observeras att de olika fysikaliska processerna agerar samtidigt samt att de är kopplade.

(a) Diffusionen av klorider i vattnetfasen är av gradient typ vilket innebär att höga koncentrationer av klorider i porlösningen diffunderar mot låga koncentrationer med en styrka bestämd av D_{cl}. Det är viktigt att observera att koncentrationen av fria klorider $\tilde{c}_{cl}$ är definierad som mol klorider per volymandel vatten i betongen vilket, till exempel, innebär att koncentrationen av fria klorider i porlösningen kommer att spädas ut när volymandel vatten i betongen ökar.

(b) Styrkan av diffusionen i vattenfasen beror på vattenmängden i porsystemet vilket motiveras av att kloriderna får svårare att ta sig fram när vattenmängden är låg. Diffusions parametern $D_{cl}(c_w)$ antags vara kvadratiskt beroende på vattenmängden c_w, detta innebär till exempel att D_{cl} reduceras med en fjärdedel när vattenmängden

c_w halveras. Diffusions parametern beroende av vattenmängden kallas *"labyrint faktor"* efter som diffusions framkomligheten minskas kraftigt då vattenmeniskerna i porsystemet ej är helt sammanhängande

(c) Kloridbindnings hastigheten antags bero på koncentrationen av klorider i porlösningen $\tilde{c}_{cl}$ samt mängden mol (koncentrationen) klorider som sitter bundna vid porväggarna c_{bcl}. Antagandet gör att reaktionen är reversibel om λ (hastighetskonstanten för bindning) och μ (hastighetskonstanten för frigörelse av bundna klorider) är skilda från noll. Om μ sätts till noll är bindnings fenomenet irreversibel, det vill säga ingen frigörelse av bundna klorider kan förekomma. Sättet att beskriva bindningen har ingenting med den så kallade *"bindnings isotermen"* att göra. bindnings isotermen förutsätter att det alltid existerar ett känt samband mellan koncentrationen av fria klorider och bundna klorider, antagandet är orimligt speciellt när koncentrationen av fria klorider både ökar och minskar precis innanför ytan i betongen när tösaltnings problemet beaktas.

(d) Vattentransporten antags ej bero på närvaron av klorider i lösningen (till exempel *osmotiska* effekter). Vattentransporten beskrivs med ett gradient beroende av koncentrationen tillsammans med ett beroende på koncentrationen c_w självt. Antagandet gör det möjligt att simulera rimliga ökningar av vatten inträngning på grund av regn det vill säga kapillärsugning. Vattentransporten beror även på koncentrationen c_w när den relativa fuktigheten varierar i omgivande miljö. Ett kraftigt språng av diffusions parametern $D_w(c_w)$ inträffar när kappilärsugning simuleras, D_w antags öka med en faktor 20 när den relativa fuktigheten ökar från 99% till 100% (vattenfas, d.v.s. regn).

(e) När "fukthistorien" för det studerade fallet är känt, det vill säga när ekvation (3.3) är löst, kan kloridtransporten tillåtas bero på *medelhastigheten av blandningen* (vattnet) i porsystemet, detta fenomen kallas konvektion. Det är mycket troligt att fenomenet gör sig gällande eftersom de fria kloriderna i porlösningen tvingas med i rörelse riktningen av vattnet i betongens porsystem. Effekten av konvektion av klorider är naturligtvis mest dominant när kappilärsugning vid ytan inträffar på grund av regn, då både flödet av vatten och koncentrationen av vatten i porsystemet är höga vilket medför en hög medelhastigheten av blandningen.

(f) Uttorkning och uppfuktning av porsystemet påverkar kloridkoncentrationen i porvattenlösningen, $\tilde{c}_{cl}$. Detta är givet av (3.1) eftersom fria klorider endast kan förekomma i porvattnet det vill säga koncentrationen av fria klorider är definierad som mängden klorider i porvattnet. Fenomenet innebär till exempel att en kraftig uttorkning vid ytan bidrar till att koncentrationen av fria klorider i porlösningen också stiger kraftigt vidare kommer bindnings hastigheten öka efter som denna är antagen att bero på koncentrationen av klorider, $\tilde{c}_{cl}$, ytterligare effekter blir att diffusionen accelereras på grund av höga gradienter av koncentrationen $\tilde{c}_{cl}$ uppkommmer vid ytan. Med andra ord, samtliga fysikaliska fenomen påverkar varandra på ett eller annat sätt, systemet är kraftigt kopplat.

(g) Randvillkoren och dess variationer med tiden måste väljas med största omsorg eftersom dessa påverkar lösningsbeteendet till mycket stor grad. Det är till exempel antaget att fria klorider i porlösningen ej har möjlighet att diffundera ut till omgivande luft vilket bland annat innebär att klorider som väl har diffunderat in i

betongens porsystem har mycket svårt att ta sig ut till omgivningen. Däremot tillåts klorider vandra ut till ytan när ytan är belagd med en vattenfilm (vid till exempel regn). Vad det gäller konvektions flödet av klorider genom ytranden är situationen annorlundå, här antags uttorkning av porvatten bidra till att klorider följer med till ytan av betongen och sedermera deponeras där och gör sig synlig som utfällningar. Dessa ytfällningar antags sköljas bort vid efterföljande regn. Utförda dator simuleringar har visat att mycket små ändringar av förutsättningarna av randvillkoren påverkar lösningen signifikant, därför bör studier ägnas åt att noggrant beskriva olika klimat variationer vid konstruktionsytor där till exempel tösaltning förekommer. Slutligen kan nämnas att beräkningen av kloridinträngningen är konstruerad på ett sådant sätt att godtyckliga variationer av randvillkoren med tiden kan väljas både för fukttransporten och kloridtransporten.

(h) Förloppet antags vara isotermt vilket bland annat innebär att hänsyn till accelererad bindningshastighet vid låga temperaturer och isbildning av porvatten ej kan simuleras. Effekterna är förmodligen mycket betydande för kloridtransporten. Komplexiteten av att införa energi ekvationen är också mycket stor.

(i) Spänningar och töjningar som ger upphov till sprickbildning är ej beaktad i modellen

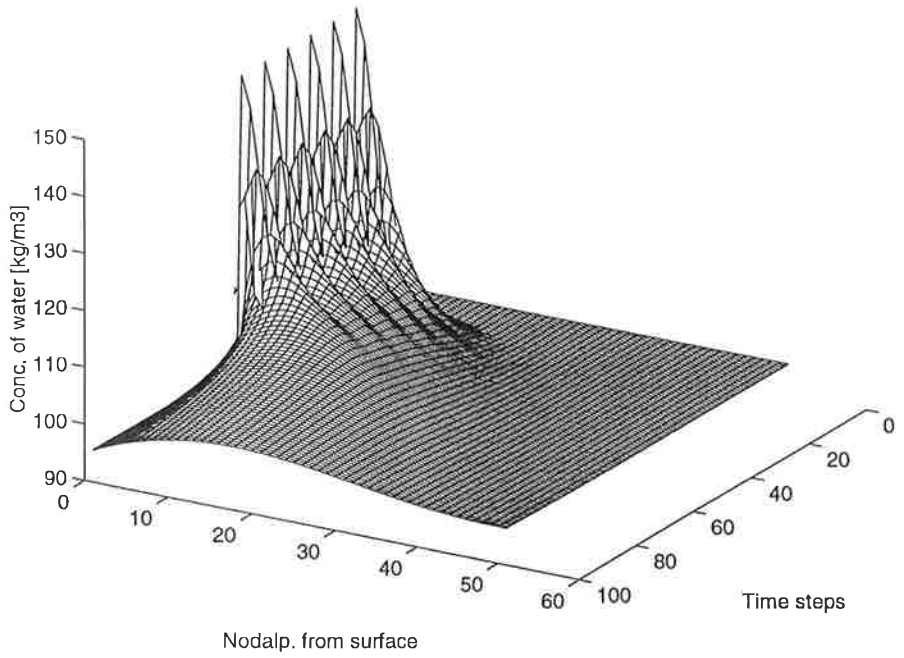
Datorprogrammet för beräkningen av ekvationerna (3.1-3.3) är implementerad med hänsyn tagen till möjligheten att införa ytterligare antaganden om fysikaliska processer. De i huvudsak väsentligaste processerna torde dock vara medtagna i modellen.

4 Beräknings exempel: yttre klimat variationer och dess fuktpåverkan av betongen

Ett fall som försöker efterlikna en period med återkommande tösaltning med en längre efterföljande period med ett "torrt" yttre klimat utan tösaltning på ytan kommer här att redovisas. Klimatfallet är följande, tösaltning inträffar samtidig med mycket fuktigt klimat, det vill säga, tösaltningen medför att en salthaltig film bildas på ytan vilken kan kappilärsugas in i materialet. Sex stycken tösaltningar förekommer med ett intervall av drygt en vecka, ytan antags vara salthaltig i tre dygn (0.25 [mol/liter] dygn 1 och 3, samt 1.00 [mol/liter] dygn 2) i samband med en tösaltning, emellan tösaltningarna är luftfuktigheten satt till 75% relativ fuktighet. Koncentrationen av klorider vid randen är ej antagen till noll emellan tösaltnings tillfällena dock är diffusions flödet ut genom randen satt till noll vilket naturligtvis också är ett föreskrivet randvillkor. Efter de sex tösaltnings tillfällena som inträffar under en total period av 50 dygn inträder en period av 50 dygn utan tösaltning och en 75% relativ luft fuktighet.

Fukthistorien på ytan och inuti materialet visas i figur 4.1, där klimatet beskrivet ovan har använts. Betongkvaliten som fukttransportdatan gäller för är en normal betong med vatten cement tal 0.5 [].

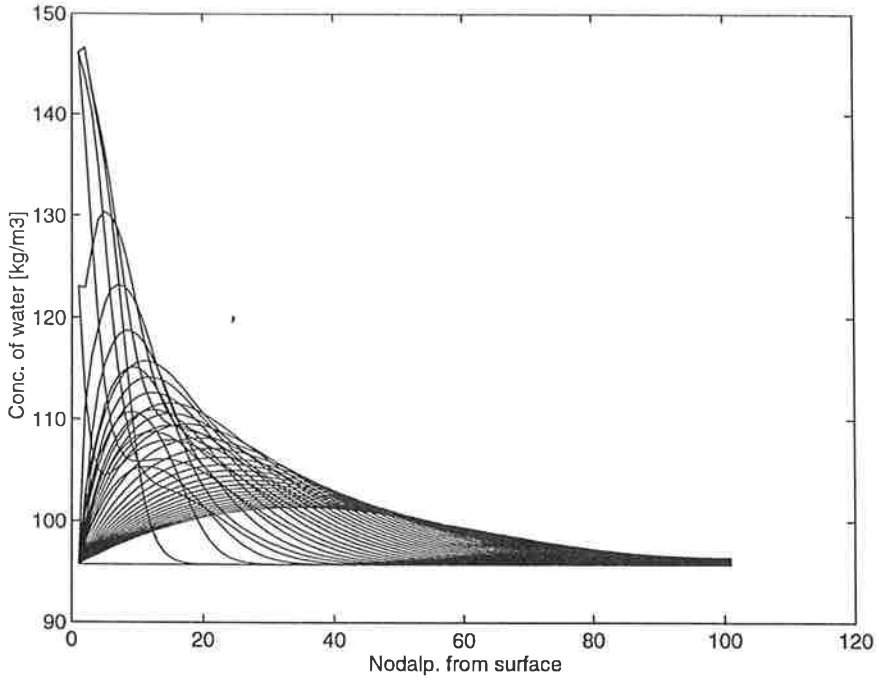
Figur 4.1 illustrerar vidare att fuktupptagningen genom kappilärsugning är ett ytfenomen eftersom fukten endas påverkas till ett djup av 20 mm från ytan av betongen.



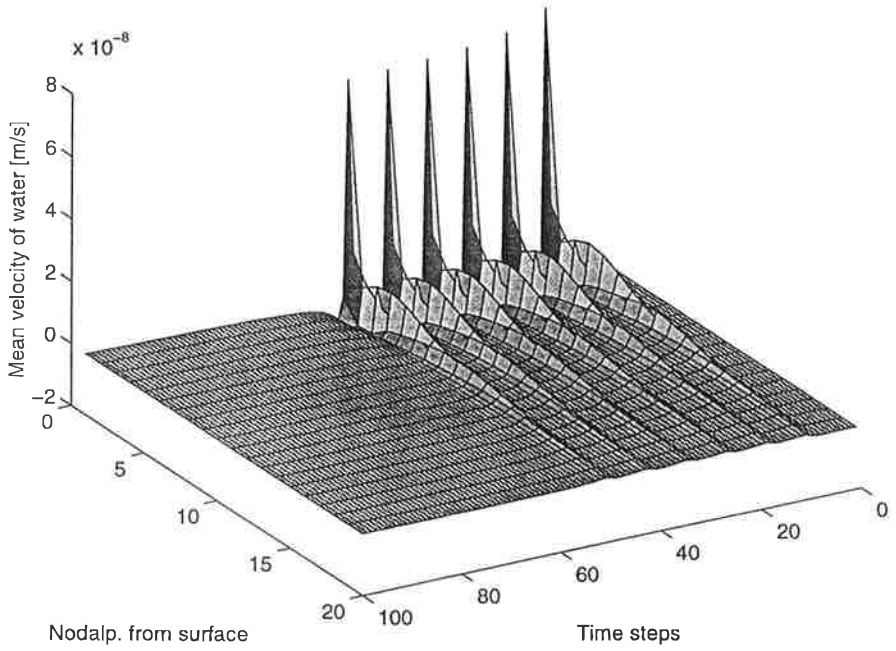
Figur 4.1 "Fukthistorien" vid ytan och inuti materialet vid olika tider. Resultatet är representativt för en normal betong med vatten cement tal 0.5. De sex tösaltningstillfällena, då fuktbelastningen antags vara hög, gör sig synlig som "spikar" i fukthalten vid ytan, det vill säga där nodpunkter från ytan är lika med ett (nodp. from surface = 1). Nodpunktintervallet är 1 [mm] och redovisat tidsteginterval (time steps) är 1 dygn. Resultatet visar att kapillärsugningen av vattnet är ett ytfenomen som endast påverkas till ett djup av ungefär 20 [mm]. beräkningen utfördes med 200 tidssteg och 101 nodpunkter.

Figur 4.2 illustrerar samma sak som 4.1 men här har fuktprofiler vid olika tidpunkter ritats in i en två dimensionellt figur där tidsskalan representeras av de olika visade fuktprofilerna. Randvillkoren 147 [kg/m^3] och 122 [kg/m^3] i figur 4.2 (eller alternativt 4.1) simulerar kapillär sugning och mycket fuktigt klimat i samband med tösaltning. Figurerna 4.1 och 4.2 visar även att vatten tränger in snabbt vid kappilärsugningen jämfört med uttorkningen som inträffar mellan tösaltningsperioden och efter tösaltningsperioden.

Vid utvärderingen av kloridtransportens omfattning är inte endast fuktinnehållet i betongen vid olika materialpunkter och tillfällen (tider) av intresse. För att kunna beräkna omfattningen av konvektion av klorider måste även medel hastigheten av blandningen (det vill säga av vattnet) beräknas. Dessa beräkningar är illustrerade i figur 4.3.



Figur 4.2 "Fukthistorien" vid ytan och inuti materialet vid olika tider. Figuren visar samma resultat som figur 4.2 illustrerat på ett alternativt sätt. (Nodpumkts avståndet är dock 0.5 [mm] i denna figur.)



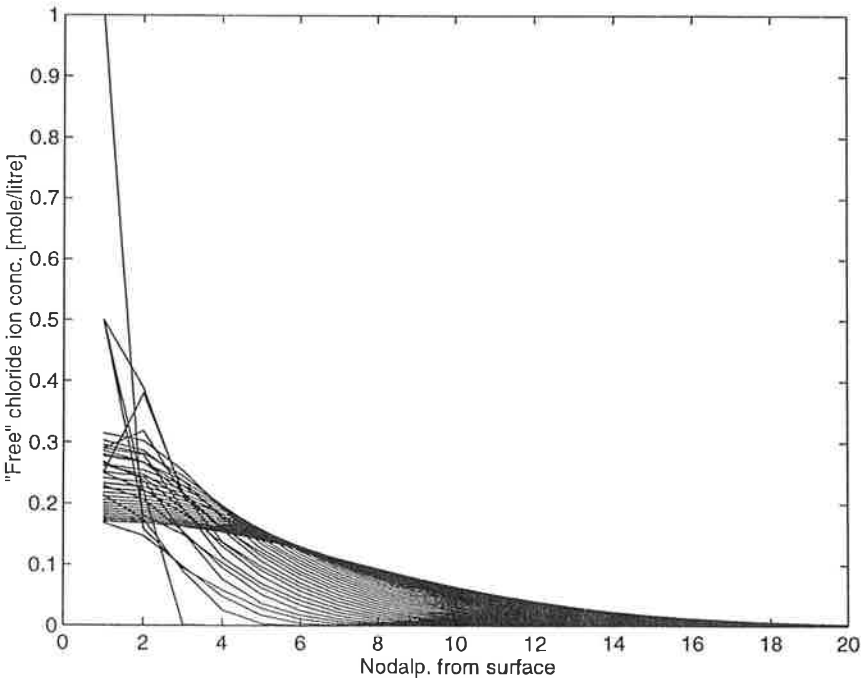
Figur 4.3 Medel hastigheten av blandningen. Medel hastigheten är associerad med flödet av vatten skillnaden ligger dock i att den aktuella massdensiteten vägs in i flödet. Figuren visar vidare att mycket höga medelhastigheter uppkommer i samband med kapillärsugning eftersom både flödet och massdensiteten (koncentrationen) är hög i dessa situationer. Av figuren kan också utläsas att konvektionen av klorider ut mot ytan kommer att vara betydligt mindre omfattande än konvektion av klorider in i materialet (om klorider finns närvarande i porlösningen) eftersom medelhastigheterna i dessa fall är låga.

Eftersom fukt och kapillärtransporten antags opåverkad av närvaron av klorider i porlösningen har endast detta fenomen redovisats i detta kapitel. Det är dock viktigt att notera att resultaten illustrerade i figur 4.1 (eller 4.2) och figur 4.3 kommer att användas för att kunna beskriva omfattningen av kloridtransporten i materialet.

5 Beräknings exempel: yttre klimat variationer och kloridtransport i betong

I detta kapitel kommer olika antaganden rörande kloridtransporten att testas för att möjliggöra en parameter studie av de olika fenomenens relativa betydelse. Randvillkoren för saltkonsentrations lösningen kommer, som tidigare nämnts, att antagas vara hög samtidigt som fukt miljön vid randen är hög (för att simulera tösaltning). Uttorkning kommer efterfölja tösaltningsperioderna då diffusions flödet ut genom randen antags vara noll, däremot kan klorider transporteras med hjälp av konvektion ut genom randen vid dessa typer av situationer.

Till att börja med kommer det enklas möjliga fallet att studeras nämligen att fukthistorien och dess flöden inte på verkar kloridtransporten överhuvud taget. Vidare kommer ingen bindning av klorider från porlösningen till porväggarna att beaktas det vill säga endast "fri" kloridtransport kommer att studeras. Randvillkoren för kloridtransport ekvationen kommer dock att vara samma som för tösaltningsfallet för att senare möjliggöra jämförelser med simuleringar med förfinade antaganden. Figur 5.1 visar inträngningen av fria klorider i porlösningen vid olika tids tillfällen.

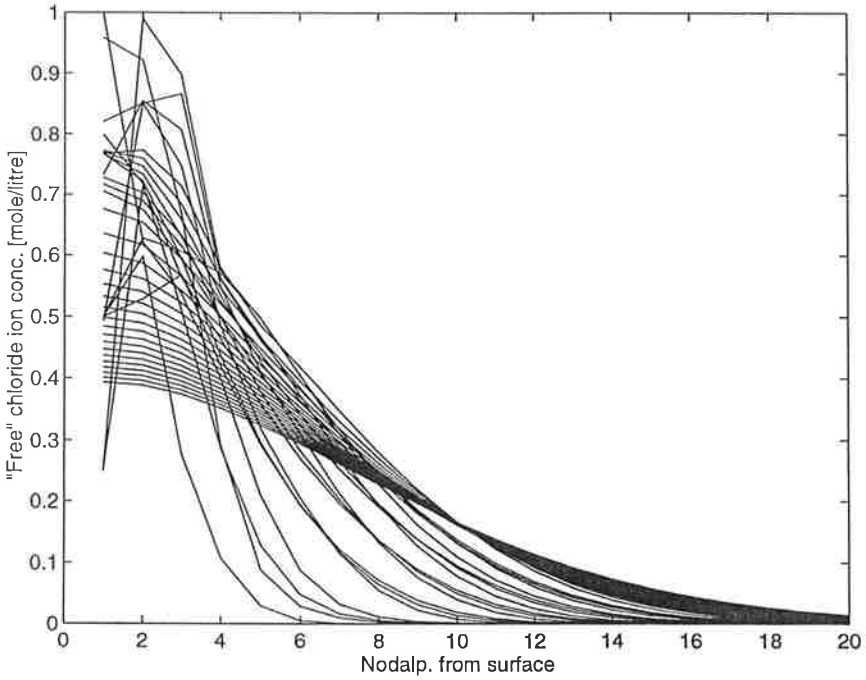


Figur 5.1. Kloridinträngning vid olika tidpunkter. Diffusion parametern D_{cl} antags här vara oberoende av koncentrationen av vatten och är lika med D_{cl} = 3.33e-12 [m^2/s]. Nodpunkt av ståndet är 1 [mm], kloriderna "känns av" på ett djup av ungefär 10 [mm]. Observera att koncentrationen av klorider är definierad som mol per liter porvatten i betongens porsystem.

Resultatet i figur 5.1 kommer nu jämföras med ett fall där diffusionen fortfarande är oberoende av koncentrationen av vatten i porsystemet. Den enda skillnaden är nu att beräkningen redovisad i figur 4.3 rörande medel hastigheten (~ flödet) hos vattnet i betongen

beaktas det vill säga effekten av konvektionen av klorider studeras. Endast "fria" klorider studeras, precis som i fallet illustrerat i figur 5.1.

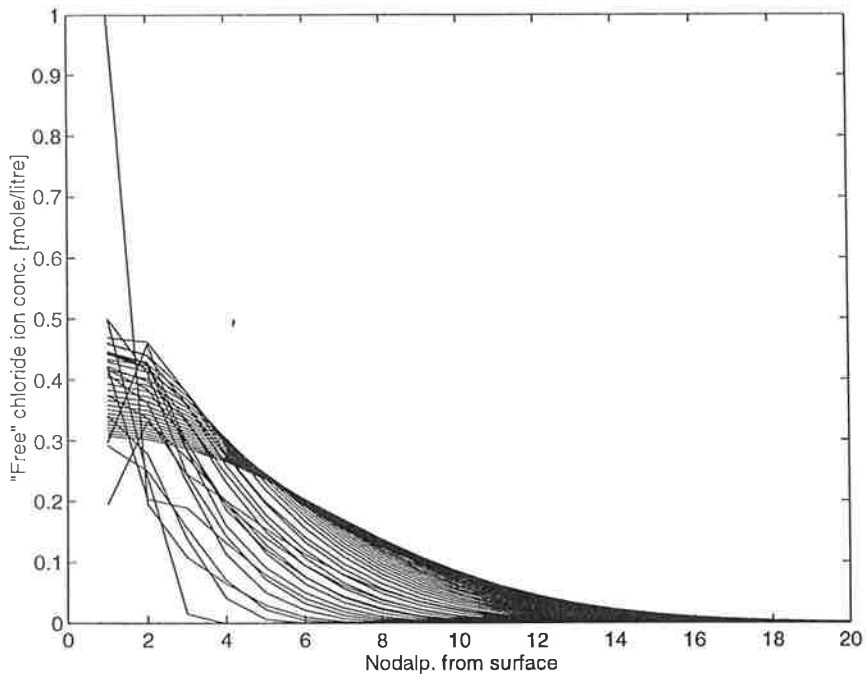
Av figur 5.2 framgår nu tydligt att konvektionen bidrar till att de "fria" klorid koncentrationerna ökar och tränger in djupare från ytan jämfört med fallet i figur 5.1, där endast diffusion transport beaktades. Det skall noteras att inträngningen av klorider värkar på samma inträngningsdjup av vatten som kapillär sugningen bidrar med, jämför figur 4.1 och 4.3. Det kan också observeras att effekten av konvektion av klorider ut genom randen är mycket liten vilket kan förklaras med att medelhastigheten hos vatten som torkas ut är låg.



Figur 5.2. Kloridinträngning vid olika tidpunkter. Diffusion parametern D_{cl} antags här vara oberoende av koncentrationen av vatten och är lika med D_{cl} = 3.33e-12 [m^2/s]. Konvektions effekten inducerad av porvattnets rörelser beaktas med hjälp av resultat från fukttransport ekvationen, jämför figur 4.3. Nodpunkt av ståndet är 1 [mm], kloriderna "känns av" på ett djup av ungefär 15 [mm]. Observera att koncentrationen av klorider är definierad som mol per liter porvatten i betongens porsystem.

I nästa exempel, figur 5.3, kommer effekten av diffusions parameterns $D_{cl}(c_w)$ beroende på vattenkoncentrationen, "labyrint effekten", samt uttorkning/uppfuktningens påverkan på den "fria" kloridkoncentrationen i porlösningen. Bindningen och konvektionen beaktas ej vilket gör att resultaten kan jämföras med de resultat redovisade i figur 5.1.

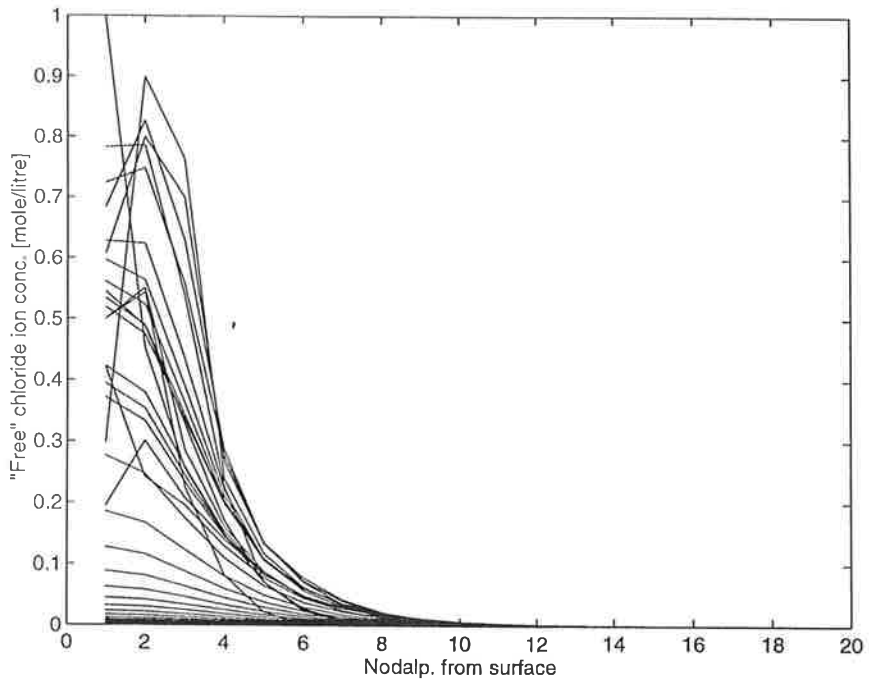
Denna beräkning, figur 5.3, visar att "labyrint effekten", samt uttorkning/uppfuktnings effekten påverkar kloridkoncentrationerna främst vid ytan där vattenkoncentrationen i materialet varierar mycket. Den något högre koncentrationen vid ytan, jämfört med exemplet i figur 5.1, beror på att koncentrationen i porlösningen ökar på grund av att uttorkningens effekten är "starkare" än diffusions transporten bort från området.



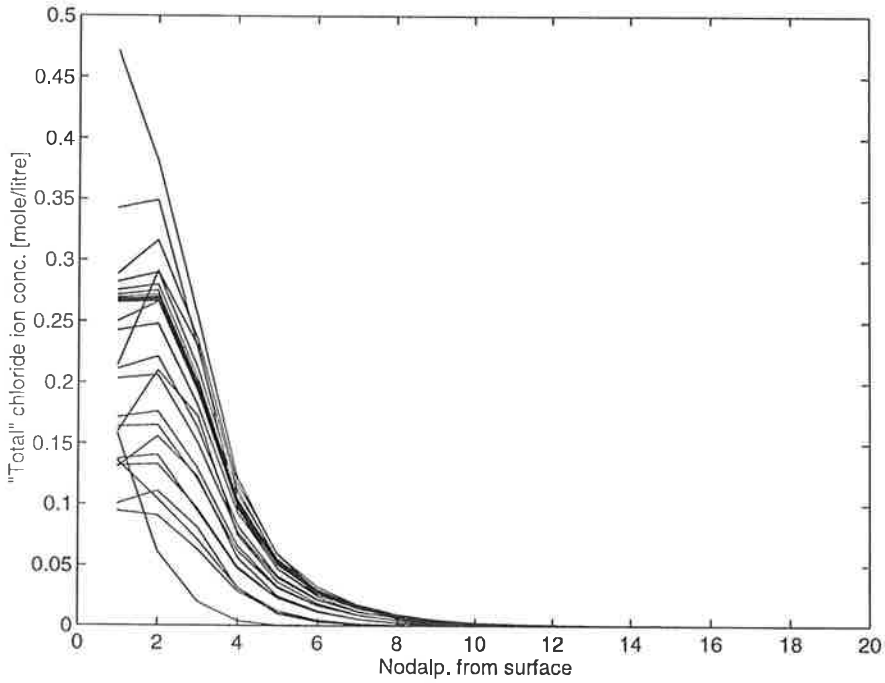
Figur 5.3. Kloridinträngning vid olika tidpunkter. Diffusion parametern $D_{cl}(c_w)$ antags här vara kvadratiskt beroende av koncentrationen av vatten och är lika med $D_{cl}(c_w) = 5.0\ e\text{-}12 * (c_w/150)^2$ $[m^2/s]$. Värdena på c_w vid olika materialpunkter och tidstillfällen hämtas från vattentransport ekvationen, jämför figur 4.1 (eller 4.2). Nodpunkt avståndet är 1 [mm], kloriderna "känns av" på ett djup av ungefär 10 [mm]. Observera att koncentrationen av klorider är definierad som mol per liter porvatten i betongens porsystem.

Beräknings exemplen illustrerade i figurerna 5.1-5.3 har endast genomförts för att jämföra olika effekter av olika agerande processer vid kloridtransport kopplad med fukttransport. Den kanske viktigaste styrande processen, nämligen bindningen, har därför med avsikt ignorerats för att dessa fenomen skall bli synliga. I de följande exemplen kommer dock alla styrande fenomen presenterade i kapitel 3, punkterna *(a)-(g)*, att beaktas och det visar sig att beskrivningen av hur bindningen av klorider i porlösningen till porväggarna agerar påverkar resultaten till mycket hög grad.

Första exemplet med alla processerna *(a)-(g)* inkluderade beskriver ett problem där bindningen antags vara irreversibel, det vill säga $\mu = 0$. Hastighetskonstanten för bindningen av klorider är antagen till $\lambda = 0.05$ [mol/(liter dygn)] vilket är ett mycket högt värde som kommer bidra till att "fria" koncentrationen av klorider i porlösningen, i det betraktade tidsperspektivet, kommer att reduceras kraftigt, jämför figur 5.4. Den "totala" kloridkoncentrationen vid olika tidpunkter är illustrerad i figur 5.5, det vill säga bundna plus fria koncentrationer som är definierad som mol klorider per liter material. Detta mått är det enda som med någorlunda stor precision kan mätas upp i fält. Som synes i figur 5.5 så är inträngningsdjupen av de "totala" koncentrationerna begränsade till ett mycket litet område vid ytan av betongen, ungefär 7 [mm].

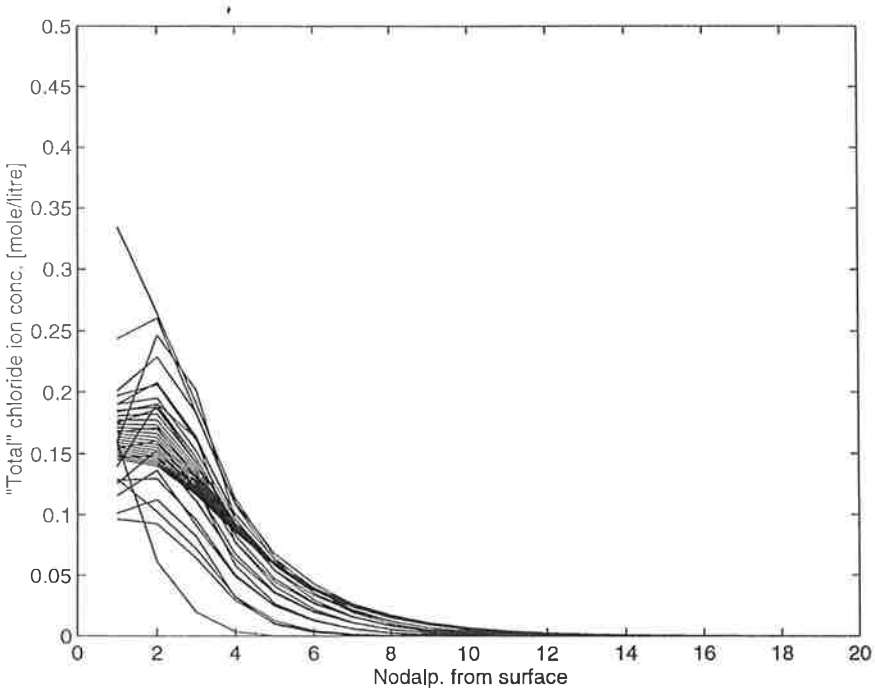


Figur 5.4. Kloridinträngning vid olika tidpunkter. Diffusion parametern $D_{cl}(c_w)$ antags här vara kvadratiskt beroende av koncentrationen av vatten och är lika med $D_{cl}(c_w) = 5.0\ e\text{-}12 * (c_w/150)^2$ $[m^2/s]$. Värdena på c_w vid olika materialpunkter och tidstillfällen hämtas från vattentransport ekvationen, jämför figur 4.1 (eller 4.2). Indata till konvektion beräkningen är illustrerad i figur 4.3. Nodpunkt avståndet är 1 [mm]. Hastighetskonstanten för bindningen av klorider är antagen till $\lambda = 0.05$ [mol/(liter dygn)]. kloriderna "känns av" på ett djup av ungefär 7 [mm]. Observera att koncentrationen av klorider är definierad som mol per liter porvatten i betongens porsystem.



Figur 5.5. Summan av fria och bundna klorider för fallet i figur 5.4. Observera att koncentrationen av klorider är definierad som mol per liter material, det vill säga de "fria" koncentrationerna i porlösningen i betongen har räknats om för att passa denna alternativa definition av kloridkoncentration.

Det sista exemplet med alla processerna *(a)-(g)* inkluderade beskriver ett problem där bindningen antags vara reversibel, det vill säga hastighetskonstanten för frigörelse av bundna klorider är antagen till $\mu = 0.01$ [mol/(liter dygn)] och hastighetskonstanten för bindningen av klorider är antagen till $\lambda = 0.03$ [mol/(liter dygn)]. Antagandet kommer bidra till att bindningen är snabb i början då antalet bundna klorider är få, bindnings processen kommer sedan sakta avta desto mer klorider som binds. Situationer när bundna klorider frigörs till porlösningen kan naturligtvis också förekomma under förutsättning att koncentrationen i porlösningen är låg samtidigt som antalet bundna klorider är stort.



Figur 5.6. Summan av fria och bundna klorider. Observera att koncentrationen av klorider är definierad som mol per liter material, det vill säga de "fria" koncentrationerna i porlösningen i betongen har räknats om för att passa denna alternativa definition av kloridkoncentration. Diffusion parametern $D_{cl}(c_w)$ antags här vara kvadratiskt beroende av koncentrationen av vatten och är lika med $D_{cl}(c_w) = 5.0\ e\text{-}12 * (c_w/150)^2$ [m²/s]. Värdena på c_w vid olika materialpunkter och tidstillfällen hämtas från vattentransport ekvationen, jämför figur 4.1 (eller 4.2). Indata till konvektion beräkningen är illustrerad i figur 4.3. Nodpunkt avståndet är 1 [mm]. Hastighetskonstanten för bindningen av klorider är antagen till $\lambda = 0.03$ [mol/(liter dygn)] och hastighetskonstanten för frigörelse av bundna klorider är antagen till $\mu = 0.01$ [mol/(liter dygn)]. Kloriderna "känns av" på ett djup av ungefär 7 [mm].

6 Slutsatser

Simuleringen visar väsentligen att bindningen är av positiv betydelse när det gäller tösaltade betong konstruktioner eftersom inträngningsdjupen av klorider dämpas kraftigt av inbindningen av klorider till porväggarna. Konvektionen och uttorkning/uppfuktnings effekten på grund av variationen i yttre fukttillstånd visade sig påverka inträngningen av fria klorider i porlösningen signifikant, i negativ riktning.

Upprättande av normer för omfattningen av kloridinträngning och dess skadeverkningar är i dags dato en svår uppgift i vilket fall om dessa normer skall baseras på fysikaliska fenomen. En viktig del av tösaltningsproblemet är att mäta upp klimatvariationen vid konstruktions ytor

vad avser fukt och saltkoncentrationer, på grund av att randvillkoren är en av de faktorer som påverkar lösnings beteendet till stor grad.

Bilaga 1: två jämförande fall

Ett fall där tösaltning inträffar en månad om året kommer här att jämföras med ett fall där en konstant kloridbelastning är applicerad vid ytan. De två olika yttre klimatfallen är illustrerade i figurerna B1.1 och B1.2.

Material konstanterna och material parametrarna i ekvation 3.1-3.3 antas vara bestämda till:

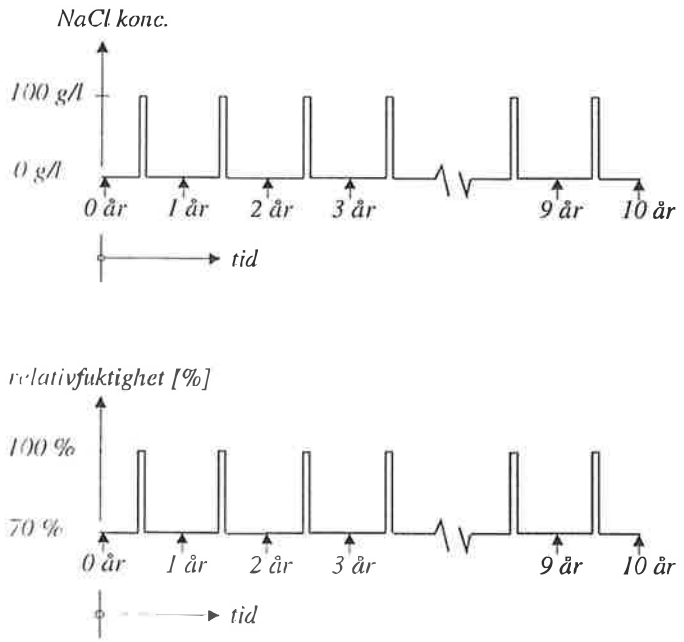
$D_{cl}(c_w) = 5.0\ e\text{-}12 * (c_w/150)^2$ [m^2/s].

$\lambda = 0.03$ [mol/(liter dygn)]

$\mu = 0.01$ [mol/(liter dygn)].

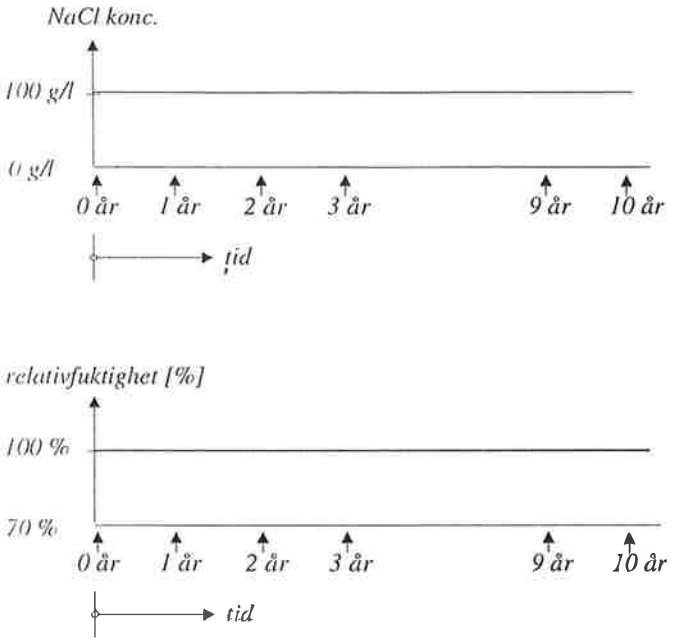
$D_w(c_w)$ = funktion av c_w enligt [], motsvarar en betong med v.c.t = 0.5, [m^2/s].

Randvillkoren för *fall 1* är illustrerade i figur B1.1. Tösaltningen antags ske en månad om året med en koncentration av 100 gram natriumklorid per liter vatten. Emellan tösaltningstillfällena antas klimatet vara torrt (RF = 70%) samt att inga klorider finns närvarande.



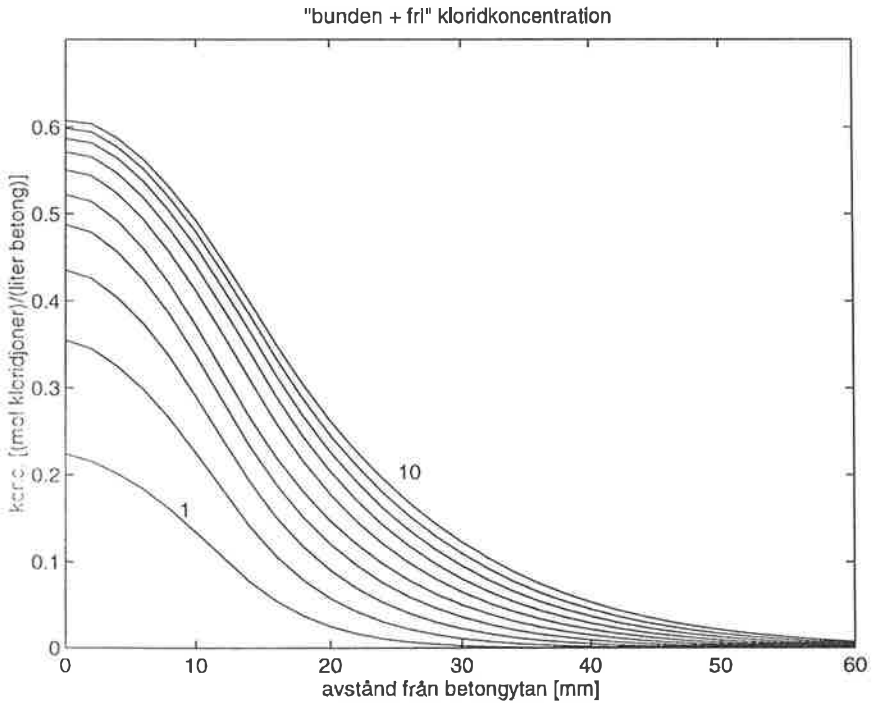
Figur B1.1 Fall 1. Variation av klimatet i betongens omgivning. RF = 100% motsvarar vattenhalten 145 [kg/m³] och RF = 70% motsvarar vattenhalten 96 [kg/m³]. Natriumkloridkoncentrationen 100 [g/l] motsvarar 1.7 [mol (NaCl)/l].

Det studerade fallet (*fall 1*) kommer att jämföras med *fall 2* där betongen är konstant vattenmättad samt att kloridbelastningen är konstant. Den konstanta kloridbelastningen är satt till samma höga nivå som i *fall 1*, för att kunna göra en relevant jämförelse fallen emellan, jämför figur B1.2.

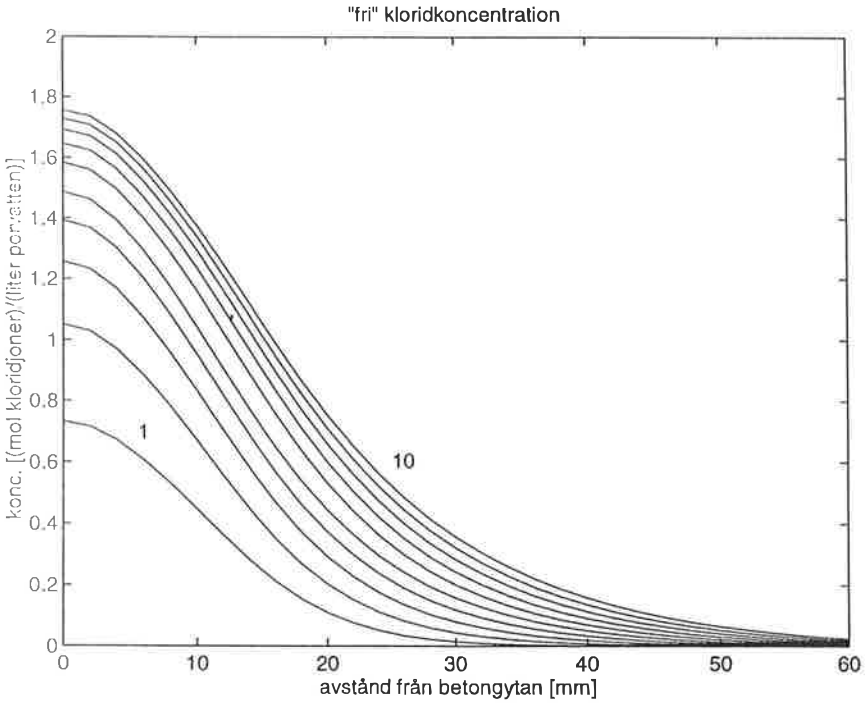


Figur B1.2. Fall 2. Konstant klimat i betongens omgivning.

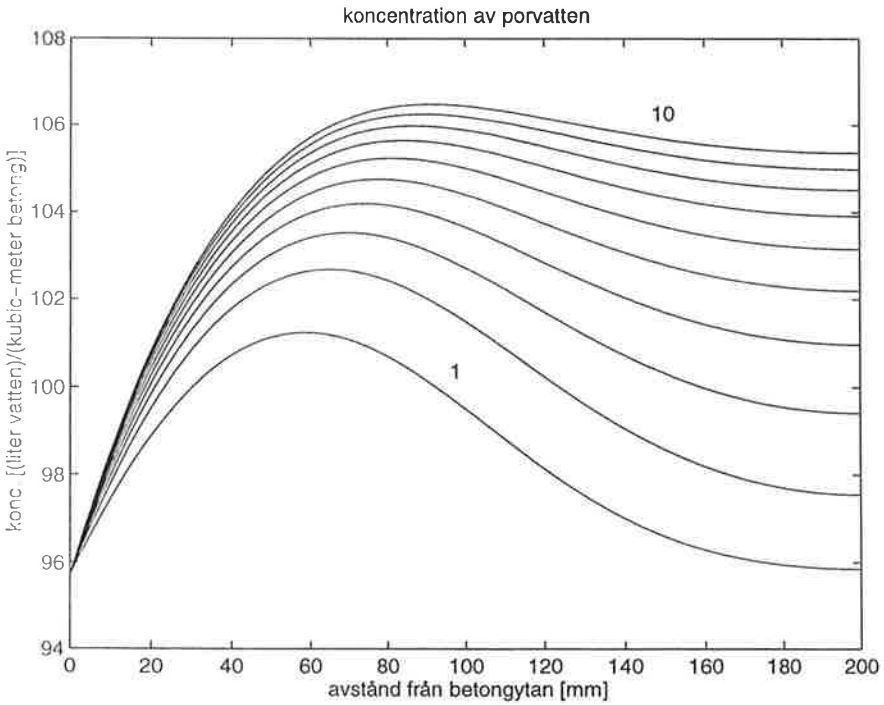
För *fall 1* erhölls, efter lösandet av ekvationerna 3.1-3.3, följande "kloridprofiler" vid tidpunkterna 1-10 år:



Figur B1.3. Fall 1, total kloridkoncentration vid tidpunkterna 1-10 år.

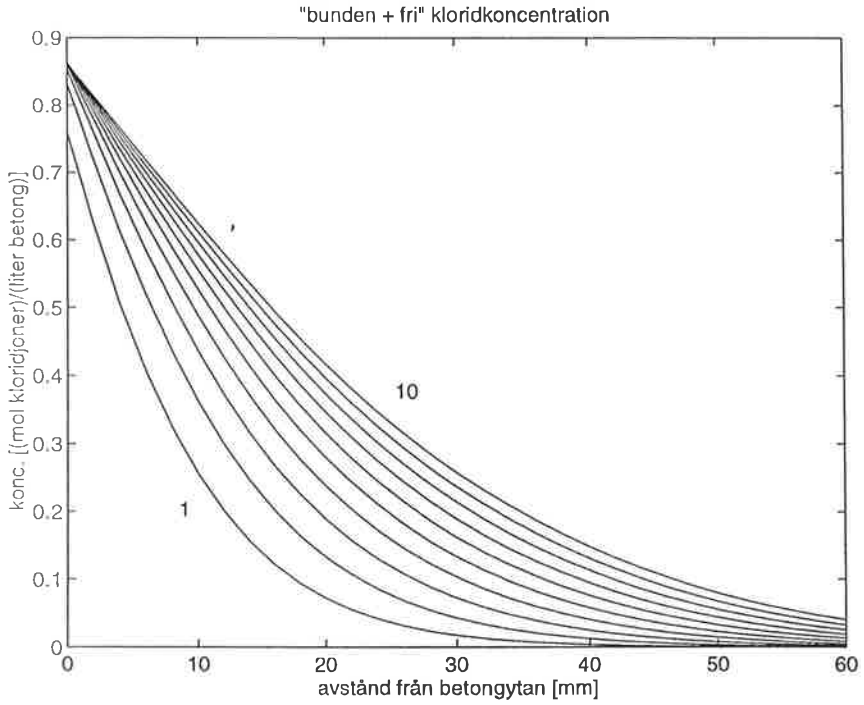


Figur B1.4. Fall 1,"fri" kloridkoncentration vid tidpunkterna 1-10 år.

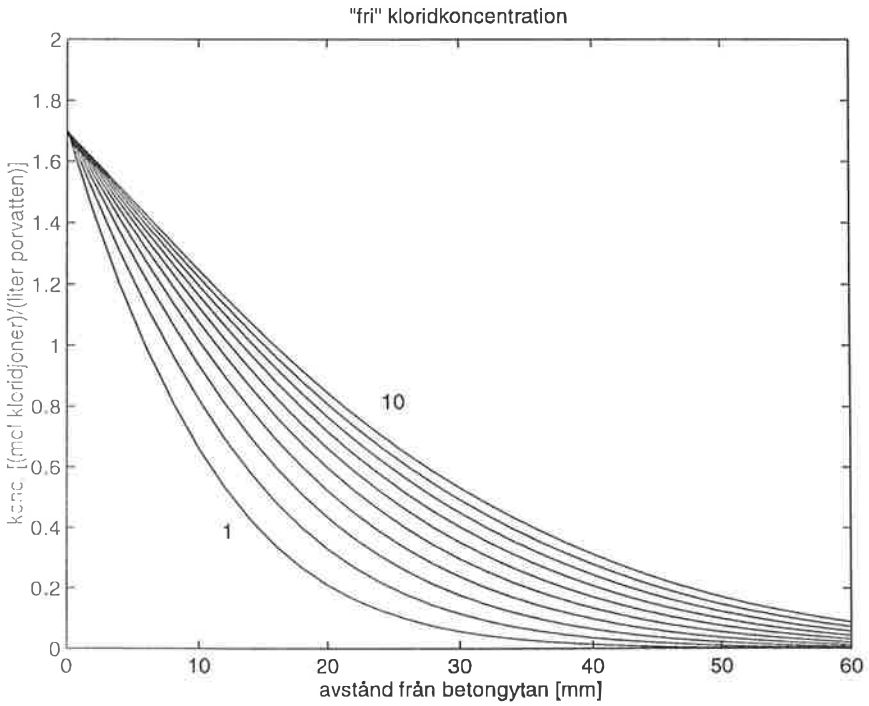


Figur B1.5. Fall 1, vatteninnehåll i betongen vid tidpunkterna 1-10 år.

För *fall 2* erhölls, efter lösandet av ekvationerna 3.1-3.3, följande "kloridprofiler".



Figur B1.6. Fall 2, total kloridkoncentration vid tidpunkterna 1-10 år.



Figur B1.7 Fall 2, total kloridkoncentration vid tidpunkterna 1-10 år.

Skillnaden på inträngning och bindning av klorider för de två olika fallen är inte påtagligt stor, jämför till exempel de totala kloridprofilerna för de två fallen, figur B1.3 och B1.6. Förklaringen till att tösaltningsfallet (*fall 1*), i det närmaste, har samma omfattning av inträngning som *fall 2* är att kapillärsugningen bidrar till konvektiva inflöden av klorider samt att uttorkningseffekten bidrar till att koncentrationen av klorider i porlösningen ökar vilket medför att också diffusionshastigheterna av klorider in i betongen ökar. Fenomenet att omfattningen av inträngningen för de två olika fallen är mycket lika inträffar trots att kloridbelastningen vid betongytan för *fall 1* endast är utsatt för klorider en tolftedel av exponeringstiden i jämförelse med *fall 2*.

Det bör dock noteras att ett annat val av variationer av randvillkor än de visade i figur B1.1 mycket väl kan bidra till en mycket större eller mycket mindre omfattning av kloridinträngning än det konstanta fallet (*fall 2*).