

Vattenabsorption i betong under inverkan av temperatur

Tina Wikström

ISRN: LUTVDG/TVBM--12/5084--SE (1-66)

ISSN: 0348-7911 TVBM

Lunds Tekniska Högskola
Byggnadsmaterial
Box 118
221 00 LUND
www.byggnadsmaterial.lth.se

Tel: 046-2227415
Fax: 046-2224427

Sammanfattning

Titel Vattenabsorption i betong under inverkan av temperatur

Författare Tina Wikström

Handledare Katja Fridh, Avdelningen för Byggnadsmaterial, Institutionen för Bygg- och miljöteknologi, Lunds tekniska högskola, Lund. Manouchehr Hasanzadeh, Vattenfall Research and Development AB, Älvkarleby.

Problemställning Vid en experimentell undersökning, om mekanismen bakom avskalningar på ytan av betongdammar, upptäcktes höga fuktkvoter hos provkropparna ovanför vattenlinjen. Detta fenomen kunde man inte med säkerhet anvisa till rätt mekanism. Många studier har visat att under frysprovning ökar vattenupptagningen, frågan var om det gick att särskilja om det var själva temperaturändringen, minusgraderna eller isen som var den huvudsakliga orsaken till den ökande vattenupptagningen.

Syfte Syftet med examensarbetet är främst att undersöka temperaturgradienter och temperaturväxlingars inverkan av betongens vattenabsorption. Samt om den om den absorberande fukten anrikas på ett speciellt ställe där en viss temperatur råder.

Metod Examensarbetet har utförts delvis experimentellt och delvis genom litteraturstudie.

Slutsatser

- Frostskador gör stor skillnad i vattenabsorptionsförmåga
- Det finns en möjlighet att temperaturväxlingar skapar större vattenabsorption än när betongen har en och samma temperatur.
- Temperaturgradient tycks öka vattenabsorptionen så att vattenmättnadsgraden i den varma delen av betong blir hög.
- Luft har en klart positiv inverkan på frostbeständigheten.
- Lågt vct är ett bra sätt att skydda mot frostsprängning vid milda frosttemperaturer.

Nyckelord Betong, vattenmättnadsgrad, vattenabsorption, temperaturgradient, temperatur växlingar, vct, lufthalt

Summary

Title Concrete's water absorption capacity under different temperature conditions

Author Tina Wikström

Mentor Katja Fridh, Division of Building Materials, Department of Building and Environmental Technology, Lund University, Lund. Manouchehr Hassanzadeh, Vattenfall Research and Development AB, Älvkarleby.

Questions In an experimental study on the mechanism of scaling on the surface of concrete dams, high moisture ratios were detected above the waterline in the specimens. This phenomenon could not be pinpointed to a correct mechanism. Many studies have shown that during freeze-testing the absorption of water increases. The question is whether it is possible to distinguish the actual temperature change, sub-zero temperatures, or ice as the main cause of the increasing water absorption.

Purpose The aim of the project is mainly to investigate the impact of shifting temperature and gradients in temperature on concrete water absorption. It is also of important to examine if the absorbed moisture tends to concentrate at any temperature range.

Method The work has been partly experimentally and partly through literature study.

Conclusions

- All cases involving freezing temperatures shows that the icing makes a difference.
- There is a possibility that changes in temperature creates greater water absorption than concrete with one and the same temperature.
- Temperature gradient appear to increase the water saturation.
- The air has a significantly positive effect on frost resistance.
- Low w/c ratio is a good way to protect from frost when temperatures are mild.

Keywords Concrete, water saturation, water absorption, temperature gradient, temperature changes, w/c ratio, air content

Förord

Detta examensarbete omfattar 30 högskolepoäng och utgör den avslutande delen av utbildningen på civilingenjörsprogrammet Väg- och Vattenbyggnad. Examensarbetet är utfört under vårterminen 2010 vid Avdelningen för Byggnadsmaterial på Lunds tekniska högskola på uppdrag av Vattenfall Research and Development AB.

Handledare för examensarbetet har varit Katja Fridh och Manouchehr Hasanzadeh. Till de två vill jag rikta ett extra stort tack, Katja som visade vägen och gav uppmuntran och stöd, Manouchehr för snabba svar via mail och telefon. Utöver mina handledare har jag varit omringad av människor som gjort helheten möjlig. Utan Bosse hade det aldrig blivit någon betong värd att undersöka. Med Stefans hjälp tog experimentet praktisk form. Maria har stor del i de fina graferna och beräkningarna producerade i Matlab och Märten måste jag tacka för all teknisk support med LaTeX. Bengt för plåtarna som jämnade ut temperaturen. Ingemar för städad verkstad som tillät mig att hitta mina guldkorn.

Innehåll

1	Inledning	7
1.1	Bakgrund	7
1.2	Syfte	7
1.3	Mål	8
1.4	Avgränsningar	8
1.5	Metod	8
2	Teori	9
2.1	Betong	9
2.1.1	Härdning	9
2.1.2	Ballast	10
2.1.3	Tillsatsmedel och tillsatsmaterial	11
2.1.4	Fukt i material	11
2.2	Fukttransport	12
2.2.1	Diffusion	12
2.2.2	Adsorption	13
2.2.3	Kapillärkondensation	13
2.2.4	Kapillärsugning	13
2.2.5	Absorption under lång tid	14
2.3	Fukttransport vid frysning	15
2.3.1	Frysbar vattenmängd	15
2.3.2	Kritisk avståndsfaktor	15
2.3.3	Frostskador	16
2.3.4	Iskristalltillväxt	16
2.3.5	Hydrauliskt tryck	16
2.3.6	Pumpningseffekt vid frysning	17
2.3.7	Islinstillväxt	18
2.3.8	Hur fukttransport kan bero av temperatur	18
3	Utförande	19
3.1	Material	19
3.1.1	Provkroppar	19
3.1.2	Betong	19
3.1.3	Termoelement	22
3.1.4	Provrören	22
3.1.5	Korgarna	23
3.2	Utrustning	23
3.3	Uppställning	23
3.3.1	Fall 1 - Referensfallet	23
3.3.2	Fall 2 - Temperaturväxling PLUS	24
3.3.3	Fall 3 - Temperaturväxling MINUS	25
3.3.4	Fall 4 - Temperaturgradient H_2O	25
3.3.5	Fall 5 - Temperaturgradient O_2	26
4	Förprovning för kalibrering	28
4.1	Fall 4 - temperaturgradient H_2O	28
4.2	Fall 5 - Temperaturgradient O_2	30

5	Experiment	32
5.1	Kontinuerlig vägning	32
5.2	Avslutande mätningar	33
5.2.1	Radiell fuktprofil	34
5.2.2	Rak fuktprofil	34
5.2.3	Kapillär mätnadsgrad	34
6	Resultat	36
6.1	Temperaturförhållanden	36
6.2	Porositet	38
6.3	Absorptionskurvor	40
6.3.1	Absorptionskurvor i de olika temperaturfallen	40
6.3.2	Absorptionskurvor för varje betongrecept	45
6.4	Vattenmätnadsgrad	49
6.5	Kapillärmätnadsgrad	51
6.6	Ultraljud	51
7	Analys	53
7.1	Felkällor	53
7.2	Absorptionskurvor	53
7.2.1	vct 0,45 med luftporbildande tillsatsmedel	54
7.2.2	vct 0,45 utan luftporbildande tillsatsmedel	55
7.2.3	vct 0,6 med luftporbildande tillsatsmedel	55
7.2.4	vct 0,6 utan luftporbildande tillsatsmedel	56
7.2.5	Jämförelse av alla recept	56
7.3	Jämförelse vct 0,6 med och utan luftporbildande tillsatsmedel	57
7.3.1	Jämförelse vct 0,45 med och utan luftporbildande tillsatsmedel	57
7.4	Vattenmätnadsgrader	57
7.4.1	Temperaturväxling PLUS och MINUS	57
7.4.2	Jämförelse Temperaturgradient H_2O med Referensfallet	58
7.5	Jämförelser Temperaturgradient O_2 med Referensfallet	58
7.6	Kapillärmätnadsgrad	59
8	Diskussion	60
9	Slutsats	62
10	Fortsatta studier	63
A	Bilaga - Bilder över experimentens utformning	66

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Betong är ett beständigt material som ges en nästan obegränsad livslängd. Detta kan vara sant om betingelserna för betong är goda och betongen tillverkas, anbringas och efterbehandlas på rätt sätt. Men vissa betongkonstruktioner som t.ex. kraftdammar utsätts för hårt klimat med stora temperaturvariationer och olika angrepp som t.ex. frostangrepp, armeringskorrosion, kloridinträngning och erosion (Åke Engström, 1991). Totalt sett är frostangrepp en av de allra största orsakerna till bristande beständighet. Det är dessutom svårbehandlat eftersom vi vare sig kan hålla bort fukt eller frost. Utgången kan endast påverkas genom gott val av material (Fagerlund, 2006a). Hur bra materialet kan bestå mot dessa påfrestningar beror huvudsakligen av materialets transportegenskaper. Vilket i sin tur beror på materialets porfördelning (Jacobsen, 2005). Vid tiden för byggandet av världens kraftdammar var man dock inte medveten om vilka transportegenskaper eller brist av dem som krävdes eftersom man inte var medveten om beständighetsproblemen. Därför kunde man inte göra rätt materialval, men det finns även fall av slarv och försummelse som orsakat förkortad livslängd av våra betongkonstruktioner (Åke Engström, 1991). Idag står världen inför ett behov av att reparera sina betonganläggningar. Men för att kunna reparera på rätt sätt måste man förstå problemen och vad som har orsakat skadan.

I ett tidigare examensarbete av Person och Rosenqvist (2009) utreddes orsakerna till avskalningen av betong vid vattenlinjen hos vattenkraftverk. Detta gjordes genom att efterlikna temperaturförhållanden för en kraftdamm i betongkuber. De tog hänsyn till klimatets temperaturvariationer över tiden som skapar stora temperaturvariationer inom konstruktionen exempelvis på vintern när temperaturen i luften kan vara ned mot $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ samtidigt som vattnet fortfarande bara är $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Men nya svar ledde till nya frågor. Under experimentets gång fann man höga fuktkvoter ovan vattenlinjen utan några synliga ytskador. Höga fuktkvoter är skadligt för betong eftersom när vattnet fryser utvidgas det och kan spränga betongen och skapa mikrosprickor. Upptäckten av de höga fuktkvoterna väckte frågan om temperaturgradienten i sig själv kan ha skapat en potential för vattentransport.

Gällande frysmekanismer, deras orsak och verkan, är de ganska väl utredda och undersöka men när det gäller fukttransportens mekanismer och beräkningsmetoder förutsätter dem att det inte finns några temperaturgradienter i konstruktionerna. Detta måste förutsättas eftersom vatten kan föra sig under temperaturgradienter också när det inte finns någon skillnad i fuktnivå uttryckt i förångningstryck eller sug. Varför eller hur sådan fuktrörelse förekommer är inte helt utrett, och transportkoefficienter för denna typ av transport i betong är icke-existerande (Fagerlund, 2006d).

1.2 Syfte

Syftet med examensarbetet är främst att undersöka hur temperaturgradienter och temperaturväxlingars inverkar på betongens vattenabsorption. För att kunna göra detta är det viktigt att förstå vilken inverkan betongens vattencementtal, lufthalt och porstruktur har på vattenabsorptionen. Det skall också visa om fukten ansamlas vid något särskilt temperaturintervall.

1.3 Mål

För att kunna uppfylla syftet genomförs två olika resultatgivande moment. Det första är att ta fram absorptionskurvor för olika betongrecept i olika temperaturmiljöer. Det andra är att ta fram vattenmättnadsgrader på olika delar av proverna för att kunna skapa en fuktprofil.

1.4 Avgränsningar

Experimenten utförs på små provkroppar för att simulera en inre volym av en större konstruktion. Eftersom små provkroppar används används även liten ballast 0-8 mm för fyra olika betongrecept. Detta är mikrobetong med vattencementtal 0,45 och 0,6 med och utan luftporbildande medel.

Experimenten så att de fem olika miljöerna var så lika som möjligt förutom de skillnader som medvetet skapades. Temperaturintervallet över provkropparna kontrollerades från $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ till $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ förutom referensproverna som stod i $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

1.5 Metod

Examensarbetet har genomförts till största del experimentellt men även genom en litteraturstudie. Experimentellt undersöktes hur mycket vatten olika betongrecept absorberar när de utsätts för temperaturväxlingar eller temperaturgradient. Även fuktprofiler togs fram experimentellt. Teorin bakom betongens vattenabsorptionsförmåga under olika förhållanden sammanfattades genom litteraturstudie.

2 Teori

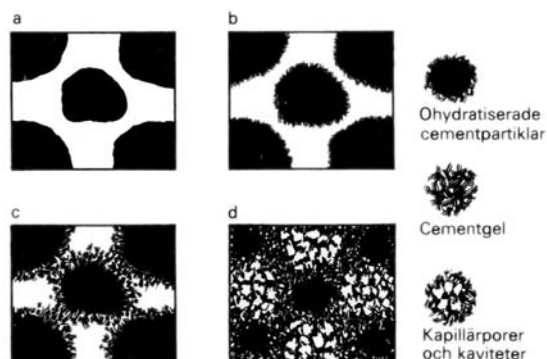
I detta kapitel kommer teori att presenteras som kan förklara vad som förväntas hända i det experimentella fallen. Först görs en presentation av själva materialet, betong, hur detta material är uppbyggt och framförallt hur dess porstruktur påverkar fukttransportegenskaperna. Kapitlet innehåller också hur fukttransport kan ske i betong när temperaturen är över och under fryspunkten för att slutligen försöka sammanfatta liknande undersökningar.

2.1 Betong

Betong består av cement, vatten och ballast och eventuellt tillsatsmedel och tillsatsmaterial. Ballast, sten, grus och sand är det bärande materialet, och som vatten bör man alltid använda så rent vatten att man skulle kunna dricka det. Cement plus vatten kallas för cementpasta och utgör betongens bindemedel som håller ihop ballastkornen. Tillsatsmedel och tillsatsmaterial tillsätts till betongen för att påverka dess egenskaper (Burström, 2007).

2.1.1 Härdning

Många av den härdnade betongens egenskaper är relaterad till mängden, strukturen och fördelningen av porer. För att förstå porstrukturen hjälper det om man förstår hur de uppstår (Verbeck, 1956). Betongens härdning är när cementen binder ihop vatten och sten så att betongen blir till ett fast material. Vid blandningen består betongens pasta av mycket små cementkorn omgivet av fritt vatten. En kemisk reaktion på kornens yta startar direkt vid denna kontakt mellan korn och vatten. Vid denna reaktion eller hydratation byggs vattenmolekyler in i cementen och skapar en gelliknande finporös sammangyttrad massa av utomordentligt små gelpartiklar och gelporer. Dessa porer är många, i fullt hydratiserad betong där allt cement har reagerat och bildat gel består gelen till 25% av gelporer (Verbeck, 1956). Härdningen eller hydratationen är en process som sker snabbt i början men avtar med tiden eftersom vattnets väg genom gelen fram till det oreagerade cementet blir längre och längre.



Figur 1: Cementgelens reaktion (Fagerlund, 1982b)

Cementgelen upptar en större volym än volymen hos cementkornet och fyller på så vis ut mellanrummen mellan cementkornen. Det utrymme som inte fylls kallas kapillärporer. Dessa är betydligt grövre än gelporerna. Kapillärporernas andel växer med ökande vct och hydratationsgrad (Fagerlund, 1982b). Vct står för vattencementtal och är proportionen mellan vatten och cement.

$$vct = \frac{W}{C} \quad (1)$$

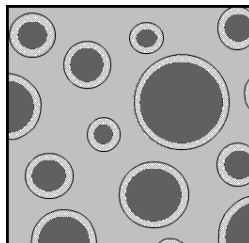
W är mängden blandningsvatten [kg], [kg/m^3] eller [l/m^3].

C är mängden cement [kg] eller [kg/m^3]

Permeabiliteten minskar markant med ökad hydratationsgrad när de flesta genomgående kapillärporer blockeras av gel. För vct 0,45 beräknas blockeringen ske efter sju dygn och för vct 0,6 sex månader. Detta innebär att betong med vct 0,6 är snabbare på att absorbera vatten eftersom vatten kan tränga igenom de större kapillärporerna utan att hindras av partier av tätare gel (Fagerlund, 1982b). Utöver tidigare kända porer som alltid finns i betong kan det även uppstå porer som bildas på grund av ofullständig komprimering, eller när det uppstår en vattenseparation under ballastkorn (vattenseparationsfickor), och vid frostbeständig betong införs dessutom konstgjorda luftporer i betong. Dessa porer är mycket grövre än både kapillär och gelporer (Fagerlund, 1982b).

2.1.2 Ballast

Det är inte bara härdningen som avgör porstrukturen i betongen utan även ballasten kan inverka på porositeten som skapas. Dels om ballasten är porös i sig själv såsom skiffer, kalksten etc. men ballasten har även en inverkan av hur mycket porer som bildas i cementpastan (Fagerlund, 1992). Betong har i jämförelse med ren cementpasta en större andel porer som till sin storlek är större än kapillär- och gelporer. Detta beror på att i en zon närmast kornen skiljer sig mikrostrukturen med fler och större porer. Även om det bara är en förändring i cementens mikrostruktur påverkar det betongens egenskaper i sin helhet. Det är fullt möjligt att dessa zoner är den största anledningen till de skillnader som finns mellan bruk och betong. Det är därför naturligt att bruk innehåller en högre halt luft än betong eftersom bruk består av en pratikelfördelning med en finare andel partiklar som totalt ger en större yta av ballast där dessa porösa zoner bildas. Därför kräver också bruk en högre halt luft, ca 5 % jämfört med 4 % för betong, för att uppnå fullgott frostskydd (Winslow m.fl., 1994).



Figur 2: Porösa zoner kring ballastkorn

2.1.3 Tillsatsmedel och tillsatsmaterial

Med olika typer tillsatsmedel eller tillsatsmaterial kan man modifiera den färska och den hårdnade betongens egenskaper. Oftast krävs ytterst små doser för att få önskad effekt. Flyttillsatsmedel är de absolut vanligaste. Med hjälp av dessa kan den färska betongen få hög arbetbarhet utan att tappa hållfasthet eller riskera separation och onödig krympning.

Det finns andra tillsatsmedel som verkar vattenreducerande, som skapar luftporer och de som påskyndar eller fördröjer betongens hållfasthet-tillväx. Tillsatsmaterial skiljer sig från tillsatsmedel i och med att de modifierar pastans struktur som kan förbättra betongens sammanhållning och stabilitet, men även flygaska och slaggtillkommer mer och mer. (Burström, 2007).

Luftporbildande tillsatsmedel används framförallt för att göra betongen frostbeständig. Medlet finns i många olika varianter varav de flesta är flytande och en ytters liten dos krävs, 0,05% av cement vikten, för att få önskad mängd luft. Luftporbildande medel skapar inte bara extra luftporer i betongen utan även god arbetbarhet och minskad vattenseparation. Med luftporbildande tillsatsmedel är det viktigt att det inte bara skapas luft i betongen utan porerna skall vara lagom stora och många samt jämt fördelade i betongen. I betong utan tillsatsmedel är luftvolymen mellan 1-2 %. För att den skall vara frostbeständig bör den vara $4,5 \pm 1,5$ °C. Luftporbildande medel samlas i gränssnittet mellan luft och vatten. Den orsakar en förlust i vattnets ytspänning. Denna samling skapar en "film" av luftporbildande medel som håller kvar luften i avskilda bubblor som formas under blandning. Ju längre den färska betongen blandas desto fler luftporer bildas det. Ökad mängd luftporer som skapas hänger också ihop med ökad mängd av mycket fina eller medelstora sandkorn, minskad cementhalt eller vct och naturligtvis vid ökad mängd luftporbildande medel (Klieger, 1970).

2.1.4 Fukt i material

Fukt lagras naturligt i betong (liksom alla porösa material) men hur mycket vatten som kan absorberas och lagras avgörs bl.a. av porerna i betongen. Gelporer innehåller en betydande mängd vatten redan vid låg relativ fuktighet. Kapillärporerna som är större har naturligt lägre andel bundet vatten genom adsorption men har stor betydelse för betongens permeabilitet och därmed fukttransportförmåga (Verbeck, 1956). Eftersom fukten lagras i porerna är det bra att känna till porositeten, andelen porvolym mot materialets totala volym.

$$P = \frac{V_p}{V} = \frac{m_{sat} - m_{105}}{m_{sat} - m_{satw}} \quad (2)$$

V = Porositet [%]

V_p = total porvolym i materialet [m^3]

V = materialets totalvolym [m^3]

m_{105} = materialets torrsvikt [kg]

m_{sat} = vattenmättat materials vikt i luft [kg]

m_{satw} = vattenmättat materials vikt i vatten [kg]

Fukt i material kan i siffror beskrivas på flera sätt. Fuktkvot beskriver hur mycket vatten materialet innehåller i förhållande till sin egen torrsvikt.

$$u = \frac{\text{forångningsbartvatten}[kg]}{\text{material}[kg]} \quad (3)$$

I en sorptionsisoterm motsvarar varje fuktkvot en relativ fuktighet.

Ett mer användbart sätt att beskriva materialets fuktinnehåll framför allt när det gäller frostbeständighet är vattenmättnadsgraden. Den talar inte bara om hur mycket vatten som finns i materialet utan hur stor del av alla porer som är fyllda med vatten (Burström, 2007).

$$S = \frac{V_w}{V_p} = \frac{m_{wet} - m_{105}}{m_{sat} - m_{105}} \quad (4)$$

V_w = aktuell volym vatten i materialet [m^3]

V_p = total porvolym i materialet [m^3]

m_{wet} = materials vikt med aktuell fukt [kg]

m_{105} = materialets torrsvikt [kg]

m_{sat} = vattenmättat materials vikt i luft [kg]

2.2 Fukttransport

Transport av fukt i betong sker genom en kombination av flera olika transportmekanismer, i huvudsak genom transport i ång- och vätskefas. Olika transportmekanismer sker vid olika relativ fuktighet (RF). Relativ fuktighet (ϕ) är förhållandet mellan den aktuella mängden ånga och finns i luften och den totala mängden vatten som luften kan innehålla.

$$\phi = \frac{v}{v_s} \quad (5)$$

ϕ Relativ fuktighet

v aktuell ånghalt [kg/m^3]

v_s mättnadsånghalt [kg/m^3]

Vid låga RF sker transporten genom diffusion och vid högre sker den största transporten genom kapillärkondensation och förångning i meniskerna samt vätsketransport. Ju högre RF i materialet desto större blir fukttransporten vid en och samma ångaldifferens över materialet (Fagerlund, 1982a).

2.2.1 Diffusion

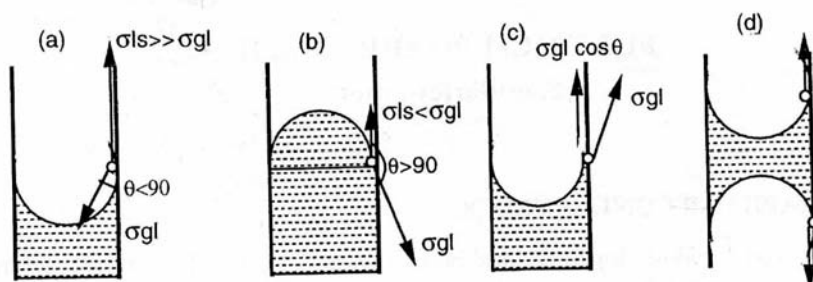
Om mängden vattenånga är olika i skilda delar av ett rum eller i ett material, sker en utjämning genom transport av ånga från områden med högre koncentration till områden med lägre. Denna strävan hos vattenånga och andra gaser att reducera koncentrationsskillnader kallas diffusion. Diffusiviteten för fuktutjämning i stillastående luft är alltid större än diffusiviteten i ett poröst material som t.ex. betong. Detta eftersom transporten av vattenångmolekylerna hindras genom trånga porpassager. Från ytan till den omgivande luften kan fukten komma endast genom diffusion när porerna torkar ut. Hur betongen uttorkar och därmed hur lång tid det tar beror i stor grad av den omgivande relativa fuktigheten (Fagerlund, 1982a).

2.2.2 Adsorption

Adsorption ska inte att förväxlas med absorption. Absorption gäller alla typer av bindningsmekanismer då ett ämne absorberas. Adsorption sker när ett poröst material som t.ex. betong tar upp vatten vid låga RF (mindre än 45 %). I luften binds fukt endast genom adsorption, vilket betyder att vattenmolekyler diffunderar in i materialet och lägger sig på materialets yta. Den mängd vatten som kan adsorberas beror på den specifika arean. Den specifika arean är den totala ytan hos alla porer i materialet och ger ett mått på porsystemets finhet. Vid hög specifik area har materialet hög fuktbindningsförmåga och starkt fuktberoende egenskaper (Fagerlund, 2006b).

2.2.3 Kapillärkondensation

Kapillärkondensation sker vid $RF \geq 45\%$ när starkt krökta vattenmenisker bildas i porerna. Vattenmeniskerna bildas eftersom betong är ett hydrofilt material varvid adhesionskraften är mångdubbelt större än kohesionskraften (vattnets ytspänning) vilket ger en drivkraft för spridning av menisken.



Figur 3: Kapillärrör med vattenpelare. a) Hydrofil rörvägg. b)hydrofob rörvägg. c) Drivkraft för spridning av menisken (Fagerlund, 2008)

Fukt fixeras genom kapillärkondensation eftersom mätnadsänghalten över en krökt vattenmenisk är lägre än över en plan yta se figur 3. Kondensation sker därför vid lägre RF än vad som skulle ske vid den plana ytan (Nilsson, 1980).

2.2.4 Kapillärsugning

Kapillärsugning in i ett material i direktkontakt med fritt vatten tränger in som en front.

$$t = m \cdot z^2 \quad (6)$$

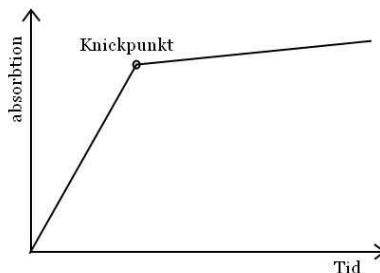
m är motståndstalet [s/m^2]

t är tiden [s]

z är inträngningsdjupet [m]

Motståndstalet m är oberoende om sugning sker vertikalt eller horisontellt. Storleken på m är enbart beroende av materialets porstruktur (inte porositet) (Fagerlund, 1982a). En kurva som beskriver ett uttorkat materials vattenupptagning i vätskefas gentemot tid kan beskriva den stigande vattenfronten

vid kapillärsugning. Knickpunkten representerar det fall när fronten har nått provets överyta. Efter detta sker absorptionen sakta och beror på att instängda luftporer löser sig i porvattnet och långsamt diffunderar bort varvid den ersätts med vatten (Fagerlund, 2004).



Figur 4: Knickpunkt

För att bedöma hur mycket fukt ett material har tagit upp jämfört med hur mycket kapillärporerna rymmer kan man bestämma kapillär mättnadsgrad. Detta är en noggrannare beskrivning än bestämning av fuktkvot, särskilt för små provbitar och stor stenstorlek.

$$KMG = \frac{u}{u_{wet}} = \frac{m_{20} - m_{105}}{m_{wet} - m_{105}} \quad (7)$$

m_{20} är aktuell vikt av provet

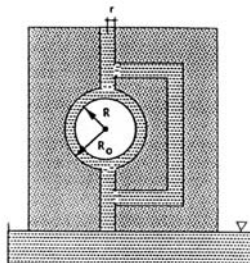
m_{105} är provets vikt när det torkat i 105 °C

m_{wet} är provets vikt när det är kapillärmättat

2.2.5 Absorption under lång tid

Vid kapillärsugning kommer luftbubblor att bli inestängda. Detta sker i ett material som kombinerar grova porer med mycket tunnare. Eftersom det kapillära undertrycket är högre i porer med mindre radie kommer denna att fyllas före den större och därmed stänga in luften. En sådan por med luftinneslutning, kallas också för en icke genomströmningsbar por (Fagerlund, 2006d).

Material som har nått sin kapillärmättadsgrad kan fortsätta att absorbera vatten. Detta kan förklaras med att den inestängda luften löses upp i vatt-



Figur 5: Icke genomströmningsbar por (Fagerlund, 2008)

net och diffunderar ut. Lösligheten av luft i vatten är direkt proportionellt mot lufttrycket. Detta är i sin tur omvänt proportionellt mot radien hos den instängda luftbubblan. Därför skapas en högre koncentration av upplöst luft runt små bubblor än kring stora. Den lösta luften diffunderar från små porer till större porer och så småningom till materialytan. Detta förklarar varför lufttillsatt betong tar upp mer vatten än icke lufttillsatt betong (Fagerlund, 2006b).

2.3 Fuktransport vid frysning

När vatten fryser blir det inte bara till ett fast material, is, utan ökar även i volym med 9%. På grund av den volymutvidgning som sker kan isbildningen i en vattenfylld por spränga poren och därmed skada materialet. Ett sprött byggnadsmaterial kan aldrig klara frysning om det är helt vattenmättat (Fagerlund, 2006a).

Hur motståndskraftigt ett material är mot frostsprängning beror på flera saker. Extra luftporer i betong är det vanligaste sättet att skydda betongen från frostsador men även lagringen har en inverkan. Om betongen kontinuerligt lagras i vatten i 28 dygn efter gjutning får den en betydligt lägre frostbeständighet än en kort fukthårdning följt av uttorkning. Orsaken till detta är troligen att grövre vattenfyllda fickor i betongen, eller vattenfyllda porer och sprickor i ballastkornen töms vid torkningen för att sedan inte kunna fyllas igen eftersom de är ”förseglade” av en tät, hårdnad cementpasta (Fagerlund, 1992).

2.3.1 Frysbar vattenmängd

Det är skillnad på totalmängden vatten i betongen och frysbart vatten. Adsorberat och kapillärkondenserat vatten är så här bundet att det inte är frysbart vid normala frystemperaturer. Ju högre undertryck, ju mindre Kelvin-radie och lägre mätnads-RF desto lägre fryspunktnedsättning. Detta betyder att ju lägre temperaturen är desto mer vatten fryser, stora porer redan vid 0 °C och små vid lägre temperaturer. Den frysbara vattenmängden minskar med sänkt vattencementtal eftersom den innehåller en högre andel mycket små porer i cementpastan (Fagerlund, 2006c).

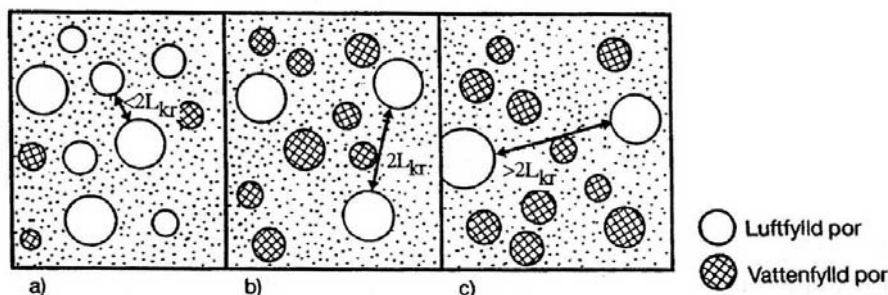
I ett material som fryser ned kan vattnet förbli ofrusat till temperaturer under den normala fryspunkten p.g.a. frånvaro av kristallisationskärnor i porvattnet. När isbildning initieras sprider den sig snabbt igenom allt underkyllt vatten (Burström, 2007).

Om betongen utsätts för en viss torkning och sedan återfuktas ökar den frysbara vattenmängden kraftigt. Orsaken är troligen att torkningen medför att ett mikrospricksystem uppstår genom vilket en isfront kan tränga in även i små isolerade porer varvid isbildning i dessa initieras (Fagerlund, 2006c).

2.3.2 Kritisk avståndsfaktor

De två mest utredda skademekanismerna inom frost är hydrauliskt tryck och islinstillväxt. Båda två utgår i fråga om när vatten fryser till is sker en 9 % utvidgning och vattnet kommer att tränga ut ur den frusna poren. De olika teorierna anser att det finns ett maximalt tillåtet avstånd från isporen till en luftfylld por dit vatten kan tränga ut utan att materialet skadas. Detta avstånd

kallas kritisk avståndsfaktor. När betongen absorberar mer vatten kommer avståndet att förlängas mellan luftfyllda porer eftersom fler porer fylls med vatten (Fagerlund, 2004).



Figur 6: Kritisk avståndsfaktor: a) Avståndet mindre än kritisk avståndsfaktor. b) Avstånd lika med kritisk avståndsfaktor. c) Avstånd större än kritisk avståndsfaktor, risk för skada (Fagerlund, 2008)

Oftast översätter man denna kritiska avståndsfaktor till en kritisk vattenmättnadsgrad. Om den kritiska vattenmättnadsgraden överskrids riskerar materialet att utsättas för frostsprängning. Rent teoretiskt är den kritiska vattenmättnadsgraden 0,917 för att klara vattnets expansion av 9 % men det har visats sig att ett material kräver betydlig högre mängd luftfyllda porer för att klara frysning (Burström, 2007). Varje betong har sin kritiska vattenmättnadsgrad (Fridh, 2005).

2.3.3 Frostsador

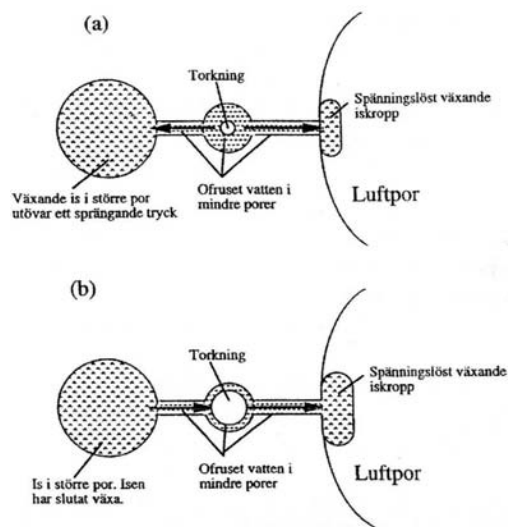
Frostsador kan delas in i två olika typer; inre- och ytsador. Båda typerna sker när materialet har för höga fuktnivåer när det fryser. Inre skador yttrar sig som förlust i E-modul, förlust i hållfasthet, kraftig inre sprickbildning, ökad permeabilitet. Ytsador är framförallt av estetisk karaktär men kan medföra andra problem som minskad livslängd eftersom täcksiktet minskar och risken för armeringskorrosion ökar (Fagerlund, 2006a).

2.3.4 Iskristalltillväxt

Ren iskristalltillväxt kan orsaka fukttransport. I betong finnas det iskroppar i större porer samtidigt som det finns ofruset vatten i fina porer. Ofruset vatten vid minustemperatur har högre energinnehåll än is vid samma temperatur. Följaktligen kommer ofruset vatten att vandra till iskropparna som växer. Dessa iskroppar kan vara i delvis luftfyllda porer och helt isfyllda porer. Om de isfyllda porernas iskroppar växer kommer ett tryck att utövas mot porväggen som orsakar expansion och i värsta fall frostsprängning. Vatten som vandrar till luftfyllda porer kan dock frysa utan spänningar (Fagerlund, 2006d).

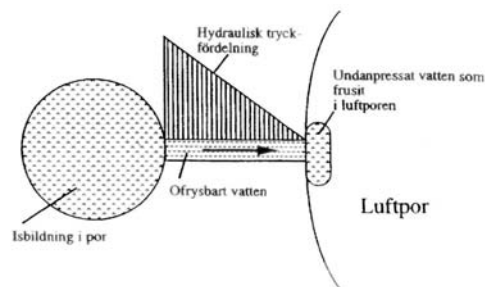
2.3.5 Hydrauliskt tryck

En förklaring till varför vattenmättnadsgraden måste vara mindre än det teoretiska är att det finns en annan kraft än själva kristallisationsstrycket vid isbildningen. Detta är bakgrunden till teorin om det hydrauliska trycket (Burström,



Figur 7: Iskristalltillväxt (Fagerlund, 2008)

2007). När vatten pressas undan från vattenfyllda porer till luftfyllda porer finns det ett motstånd mot vattentransporten som orsakar ett hydrauliskt tryck i vätskan och porväggarna (Fagerlund, 2006a). Detta tryck brukar kallas hydrauliskt tryck som är större ju längre vattnet måste transporteras. Om det trycket är större än betongens draghållfasthet leder det till frostsprängning. Hydrauliska trycket är beroende av materialets permeabilitet, hur fort temperaturen sjunker, och effektiv vattenmättnadsgrad (Fridh, 2005).



Figur 8: Hydrauliskt tryck (Fagerlund, 2008)

2.3.6 Pumpningseffekt vid frysning

I betong som fryser och tinar i kontakt med vatten skapas en pumpningseffekt vilket ger större absorption jämfört med isoterma förhållanden. Den ökade absorptionen har föreslagits bero på ett sug i porsystemet när isen smälter och får mindre volym och hur betydande det var att ytan var förseglad med is. Tomma utrymmen tros orsaka transport under frysning eftersom deras låga ånghalt skapar en potential från vattenytan. Diffusion från ytan till större porer med låg eller ingen vatteninnehåll var därför presenterad som en mekanism för den

observerade absorptionen. Flödes hastigheten mot sfäriska utrymmen beror på avståndet, ju mindre avstånd ju högre hastighet (Jacobsen, 2005). Den stora mängden vatten som absorberas kan även härledas till den inre nedbrytningen som skett vid frysning (Jacobsen, 1995). För varje förstörande fryscykel utmattas provets hållfasthet och förstörelsen stegras (Fagerlund, 2004). Mikrosprickor skapar nya och större transportvägar till utrymmen som tidigare varit ogenomträngliga och materialet kan lätt ta upp mer fukt (Fridh, 2005). Jacobsen (1995) trodde på att absorption vid temperaturcyklning utan att frysa materialet var ganska låg jämfört med pumpning på grund av frysning men större än vid jämn temperatur.

2.3.7 Islinstillväxt

Islinstillväxt i betong sker på samma sätt som när det bildas tjäle i marken. Tjälbildningsmekanismen kan inte uppträda i täta material av hög kvalitet och med någorlunda hög hållfasthet utan endast ske i en porös betong där stora fuktflöden tillåts. När det uppstår en temperaturprofil med frystemperaturen över ett material samtidigt som vattenytan inte ligger allt för djupt kommer vatten att transporteras upp till frys zonen genom exakt samma mekanism som beskrevs för iskristalltillväxt 2.3.4 eftersom det flytande vattnet är varmare än isen. Så länge frys zonen ligger stilla växer isen och en stor s.k. ”islins” bildas på den kalla sidan av exempelvis dammen eller väggen. Detta kan orsaka en allvarlig uppluckring av betong (Fagerlund, 2006a).

2.3.8 Hur fukttransport kan bero av temperatur

Helmuth (1960) fann indikationer på att fuktfördelningen förändrades i cementpastan som ett resultat av temperaturförändringen. Om betongprovkroppar i vatten utsattes för en kylning från rumstemperatur till fryspunkten upptäckte han att om temperatursänkningen skedde långsamt fortsatte gelen att vara nästan vattenmättad vid varje temperatur genom diffusion. Om temperatursänkningen skedde snabbare kunde tomrum skapas i kapillärporerna, dessa fylldes igen om provet lämnades att stå i vatten. Ytterligare vattenabsorption bör ske på grund av den volymminskning som vattnet genomgår på grund av att det kyls (ned till 4 °C). Absorptionen som sker vid nedkylning är proportionell mot betongens specifika area. Uppvärmning av vattenmättad cement orsakar fuktdiffusion från gelporer till kapillärporer. Det kan konstateras att efter avsvälning uppstår adsorption, men efter uppvärmning uppstår desorption. Diffusion sker lättare efter första cykeln.

3 Utförande

Detta kapitel beskriver uppställningen för vart och ett av de fem olika miljöerna eller fallen som skapades för att testa provkropparna. Kapitlet tar upp vilka förutsättningar i form av temperaturer och möjlighet till fuktupptagning som gällde för varje fall. Detaljer om material och utrustning som användes under experimentet beskrivs sammanställs med ord och bild.

3.1 Material

3.1.1 Provkroppar

Provkropparna består av vara cylindrar med diametern 55 mm och höjden 100 mm. De gjuts i cylindriska formar med en höjd av ca 300 mm. Dessa härdar över natten innan de avformas och läggs i vatten för att härda i 28 dygn eller mer innan provning. Efter härdningen sågas max två provkroppar ut ur varje cylinder.



Figur 9: Provkropp med bitumentejp, 100 mm hög och 55 mm i diameter

3.1.2 Betong

Testerna kräver 15 provkroppar av vardera betongrecept varav fem gjuts med termoelement. Fyra olika recept används, vct 0,45 med och utan luftporbildande tillsatsmedel och vct 0,6 med och utan luftporbildare. Alla med ballaststorlek 0-8 mm. Vid gjutning med luftporbildande tillsatsmedel späddes tillsatsmedlet ut med vatten för att lättare kunna mäta upp rätt mängd och blanda ut det jämt i bruket.

Tabell 1: Betong vct 0,45 med luft

	$\rho [kg/m^3]$	Volym [dm^3]	Massa [kg]	Blandning 20 l [kg] (korr. för fuktkvot i grus)
Cement	3100	181,63	433,57	11,6
Vatten	1000	253,37	260,14	4,77
0-8 (Grus)	2650	510	1444,25	27,31
Luft	0	55	0	0
Utbl.l.p.b	1000	3,4	3,4	0,008
Σ		1000	2138,19	43,694

Tabell 2: Uppmätta egenskaper vct 0,45 med luft

Fuktkvot i grus [%]	1,00
Lufthalt [%]	4,3
Densitet kg/m^3	2244

Tabell 3: Betong vct 0,45 utan luft

	$\rho [kg/m^3]$	Volym [dm^3]	Massa [kg]	Blandning 20 l [kg] (korr. för fuktkvot i grus)
Cement	3100	185,80	575,99	11,52
Vatten	1000	259,20	259,20	5,04
0-8 (Grus)	2650	515	1364,75	27,43
Luft	0	40	0	0
Σ		1000	2199,94	44,00

Tabell 4: Uppmätta egenskaper vct 0,45 utan luft

Fuktkvot i grus [%]	0,51
Lufthalt [%]	3,8
Densitet kg/m^3	2424

Tabell 5: Betong vct 0,6 med luft

	$\rho[kg/m^3]$	Volym [dm^3]	Massa [kg]	Blandning 20 l [kg] (korr. för fuktkvot i grus)
Cement	3100	139,86	433,57	8,67
Vatten	1000	260,14	260,14	4,84
0-8 (Grus)	2650	545	1444,25	29,201
Luft	0	55	0	0
Utbl.l.p.b	1005	0,238	0,238	0,0093
Σ		1000	2138,19	42,72

Tabell 6: Uppmätta egenskaper vct 0,6 med luft

Fuktkvot i grus [%]	1,03
Lufthalt [%]	4,4
Densitet kg/m^3	2196,6

Tabell 7: Betong vct 0,6 utan luft

	$\rho[kg/m^3]$	Volym [dm^3]	Massa [kg]	Blandning 20 l [kg] (korr. för fuktkvot i grus)
Cement	3100	139,86	433,57	8,67
Vatten	1000	260,14	260,14	4,84
0-8 (Grus)	2650	560	1484	29,201
Luft	0	40	0	0
Σ		1000	2177,71	42,71

Tabell 8: Uppmätta egenskaper vct 0,6 utan luft

Fuktkvot i grus [%]	1,08
Lufthalt [%]	2,7

3.1.3 Termoelement

Termoelement används i varje temperaturmiljö för att ge information om temperaturen för omgivande luft samt provkroppens temperaturer. För varje temperaturmiljö kommer det finnas en provkropp med ingjutna termoelement och termoelement på ytan. Dessa provkroppar kommer inte att genomgå viktmätningar. Vid testfallen där provkropparnas temperatur kommer att understiga fryspunkten gjuts termoelement in i provkropp med bruk av vct 0,45 med luft för att det skall vara så liten risk som möjligt att provet fryser sönder. Vid provning med temperaturer över fryspunkten används bruk av vct 0,6 med luft.

Tabell 9: Antalet provkroppar i varje testfall

vct	Luft %	antal provkroppar
0,45	5-6	3
0,45	≤ 4	3
0,6	5-6	3
0,6	≤ 4	3
Summa		13

3.1.4 Provrören

I fyra av fem provningar var provkropparna placerade i ett styvt gummirör med godstjocklek 7 mm och ca 60-70 mm i diameter. Det styva gummiröret fästs mot en koppfot med en slangklämma. Toppen försluts med en plastpåse fäst med gummiband. Denna konstruktion kallas från och med nu *provrör*.



Figur 10: Provrör med provkropp och korg

3.1.5 Korgarna

För att det skall vara möjligt att plocka upp provkropparna ur provrören förses varje provkropp med en enkel korg gjord av rostfri ståltråd av 0,5 mm. Varje korg förses med en namnlapp med ett id-nummer för att kunna särskilja provkropparna.

Namnplapparna på korgarna är till för att man alltid skall veta vilken provkropp som är vilken och varje provkropp förses med en unik kod. Koden beskriver vilket fall provkroppen tillhör, vilket betongrecept den är gjord av samt ett nummer från ett till tre som skiljer den från de två andra som är lika på alla andra sätt. Provkroppen placeras in i korgen, sänks ned i provröret och täcks med kranvatten eller placeras i utborrade hål av cellplast.

3.2 Utrustning

Klimatskåp: Två olika klimatskåp användes. För växling mellan +5 °C och +20 °C användes klimatkammaren WK340/40 från Weiss Technik som klarar temperaturer mellan -45 °C till +180 °C. För växling mellan -5 °C och 10 °C användes ARC 1000 från Arctest.

Frysar: Två frysar av Frys City Produkt användes för att kunna hålla en lufttemperatur på ca -25 °C.

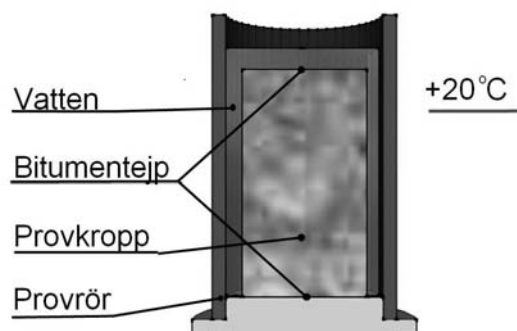
Logger: Utnyttjades för att dokumentera och spara information om temperaturen från alla termoelement.

Vågar: Tre olika vågar användes. För hela provkroppar samt vägningen av Fall 1, 4 och 5:s (se nästa avsnitt 3.3) bilade delar användes Satorius LE10003S, max 1000g med en noggrannhet av 0,001 g, i ett klimatrum, +20 °C och 50 % RF. Våg från A&D FX-300, max 310g med en noggrannhet av 0,001 g användes efter spräckning av fall 2-3 samt alla vägningar av bitar av provkropparna i luft efter torkning och vattenmättnings. Den tredje vågen användes vid vägning av prover i vatten, det var en PG503-S Mettler Toledo, max 510 g med en noggrannhet av 0,001 g.

3.3 Uppställning

3.3.1 Fall 1 - Referensfallet

Provkropparna förses med bitumentejp i ändarna för att till största del få radiell absorption. Alla provkroppar förses med en lappad korg och placeras i provrören. Provröret fylls med vatten tills vattennivån ligger en liten bit över provkroppens topp. En provkropp förses med två termoelement i mitten av provkroppen på olika höjd. Proven placeras i laboratoriet där provets och omgivande luft temperatur loggas.

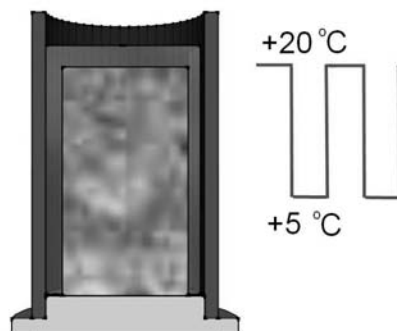


Figur 11: Uppställning Fall 1 - Referensfall

Detta fall är till för att kunna följa den vattenabsorption som sker utan temperatur som potential och kunna jämföra den med de fall där temperaturen växlar.

3.3.2 Fall 2 - Temperaturväxling PLUS

Som i Fall 1 förses provkropparna med bitumentejp och korg med namnlapp och placeras i ett provrör som fylls med vatten. Provkroppen med termoelement förses med två stycken på två olika djup, ca 15 mm respektive 25 mm. Provkropparna placeras i ett klimatskåp där omgivande temperatur växlar mellan $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ till $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ med 12 timmars intervaller, för bild se 12



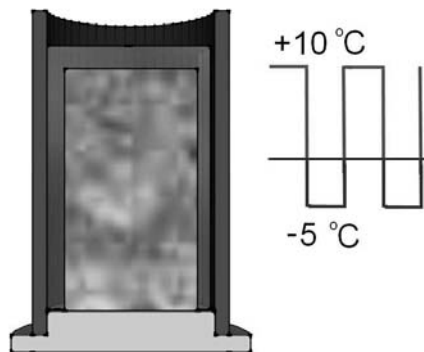
Figur 12: Uppställning Fall 2 - Temperaturväxling PLUS

För dessa prov sker viktningarna när temperaturväxlingscykeln är 20 grader i så stor utsträckning som möjligt för att störa proven så lite som möjligt.

Tanken med detta fall är att undersöka om det sker någon ökning av vattenabsorptionen på grund av att betongen utsätts för temperaturväxlingar utan frysning. Jacobsen Jacobsen (1995) trodde på en liten pumpningseffekt även vid cykling ovan fryspunkten, även om inte så stor som vid frysning. Därav förväntas en ökning av absorberat vatten jämfört med referensfallet.

3.3.3 Fall 3 - Temperaturväxling MINUS

Detta ser precis ut som Fall 2 men växlingarna kommer att ske mellan -5°C och $+10^{\circ}\text{C}$ i 12 timmarsintervall. För bild se figur 13.



Figur 13: Uppställning Fall 3 - Temperaturväxling MINUS

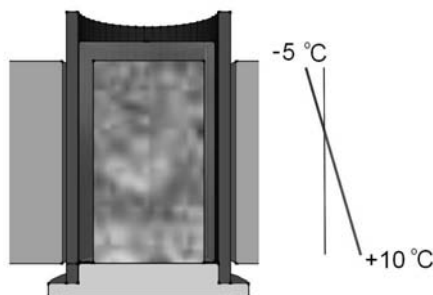
Proverna vägs när de har tinat och ligger i $+10^{\circ}\text{C}$ intervallet. Detta för att störa provet så lite som möjligt och för att när temperaturen faller skapas fort en ishinna som är svår att avlägsna och gör vägningen otillförlitlig.

Anledningen till att undersöka temperaturväxlingar där betongen fryser är för att undersöka om det finns någon skillnad i absorption av vatten när temperaturväxlingarna sker under vattnets fryspunkt jämfört med växling över fryspunkten. Beroende på resultaten kan man utröna om temperaturväxlingarna är orsak till vattenabsorptionen eller själva frysningen, eller lite av båda. Enligt teorin om pumpningseffekten, avsnitt 2.3.6, borde provkropparna som utsätts för temperaturväxlingar under fryspunkten absorbera mer vatten än Fall 1, Referensfallet, och Fall 2, Temperaturväxling PLUS. När betong utsätts för frysning kan mikrosprickor skapas och absorbera mer vatten enligt Fagerlund, Fridh och Jacobsen, avsnitt 2.3.6.

3.3.4 Fall 4 - Temperaturgradient H_2O

Uppställningen för Fall 4 ser i stora drag lika ut som för tidigare beskrivna fall gällande bitumentejp, korg och provrör. En liten skillnad är att termoelementen är placerade på tre olika höjder i en provkropp och inte på olika djup. Samtidigt registreras yttemperaturen på provkroppen för att kunna styra till -5°C och $+10^{\circ}\text{C}$ på betongens yta. Den stora skillnaden mot fall 1 till 3 är att en temperaturgradient skapas över provkroppen. Provröret förses med isolering på utsidan av cellplast. Även utrymmet mellan provkropp och provrörsvägg fylls ut med dränerande isolering i form av en avklippt sportstrumpa (stl. 27-30, 80 % bomull och 20 % nylon). Strumpan träs på provkroppen och täcker undersida och mantelyta innan den träs in i korgen. Den inre isoleringen är till för att förhindra vattnets konvektionsrörelser. Provrören placeras i en balja tätt omsluten av 145 mm cellplast. Ovansidan av provröret är i kontakt med luften i frysen som kyler provkroppen ned till -5°C . Provrörets fotända är nedsänkt i ett vattenbad som får provkroppens nedre kant att hålla $+10^{\circ}\text{C}$. Det varma vattenbadet skapas i botten på baljan som isoleras med cellplast runt om och förses

med en värmeslinga i botten. Över värmeslingan läggs en aluminiumplåt, för att värmen skall fördela sig jämt, och ett plastgaller på korta ben där provrören kan stå. Vatten fylls på i baljan över provrörens fötter, upp till cellplastens nedre kant för att överföra värmeslingornas värme till provkropparnas underkant.



Figur 14: Uppställning Fall 4 - Temperaturgradient H_2O

För fler bilder se Bilaga A figur 36-37a.

Vid vägningarna kommer försöket att avbrytas. För att göra det möjligt att väga provkropparna måste frysen stängas av och provkropparna tillåtas tina innan det är möjligt att plocka upp dem och trä av korg och strumpa. Detta kommer troligtvis skapa en större absorption än om det aldrig låtits tina. Vägningarna kommer därför ske mer sällan än för övriga försök så att provningen inte liknar ett frysa/tina försök mer än ett temperaturgradient försök.

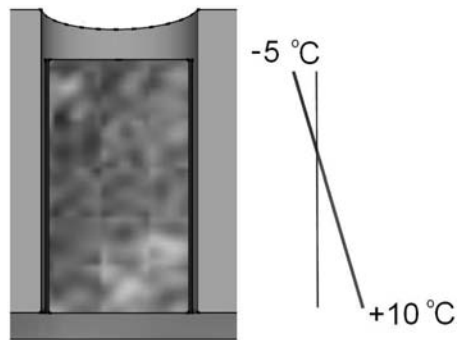
Detta försök är till för att utröna om en temperaturgradient kan påverka vattenabsorptionen att bli högre än när provet står i rumstemperatur och om och hur den skiljer sig från de prover som utsätts för temperaturväxlingar. I detta fall bör det vara möjligt för en isinstillväxt att skapas enligt avsnitt 2.3.7, åtminstone i provkropparna med vct 0,6. Alla provkroppar utsätts för frysning och liksom i Fall 3, Temperaturväxling MINUS, kommer vattnet att frysa och spricka så att det blir lättare för vattnet att tränga in, se avsnitt 2.3.6. Dock bör absorptionen inte bli så stor som för Fall 3 eftersom det bara är en mindre del av provkroppen som riskerar frostsprängning.

3.3.5 Fall 5 - Temperaturgradient O_2

Fall 5 liknar Fall 4 i och med att de utsätts för en temperaturgradient, tre termoelement är placerade på olika höjd i provkroppen och provkropparna är omslutna av cellplast. Skillnaden är att i detta fall är provkropparna fuktisolerade längs mantelarean med bitumentejp och har bara kontakt med vatten i den varma änden. Den kalla sidan mot frysen har möjlighet att torka ut. Detta gör provrör överflödiga, det isolerade vattenbadet används som fuktälla. Korgar med identitetsnummer kommer fortfarande att användas eftersom de är praktiska hjälpmedel när man skall plocka upp provkropparna ur den 145 mm tjocka cellplasten. Övre ytan på provkroppen skall kylas av frysen ned till -5 °C och undre ytan mot vattenbadet skall vara $+10\text{ °C}$.

För fler bilder se Bilaga A figur 36 och 37b.

För detta fall är det svårt att avgöra hur viktförändringen kommer att ske eftersom det även finns möjlighet till uttorkning och absorption samtidigt. Men



Figur 15: Uppställning Fall 5 - Temperaturgradient O_2

i provkropparna av vct 0,6 borde det vara möjligt för en islinstillväxt enligt avsnitt 2.3.7.

4 Förprovning för kallibrering

Detta kapitel är till för att beskriva hur frysar, värmeslingor och utrustning ändrades för att få fram önskade temperaturgradienter för Fall 4 och 5. Frysarna skulle kyla så att provkroppens ena yta kylades ned till -5°C och värmeslingorna värma så att andra ändytan av den cylindriska provkroppen höll $+10^{\circ}\text{C}$. Uppställningen är utrustad med termoelement som för de båda fallen mäter frysens, vattnets, och provkroppens temperatur i över och underkant. I en grupp av 13 provkroppar i Fall 4 utrustas två provkroppar med termoelement, oftast en placerad i ytterkant och en placerad mitt i gruppen av provkroppar. Detta gjordes även För Fall 5, först med bara en provkropp utrustad med termoelement och senare två. Termoelementen på provkropparna fästs med bitumentejp på överkanten mot luften och underkanten mot vattnet. Resultatet i form av temperaturer dokumenteras samtidigt som förändringar som genomförs noteras.

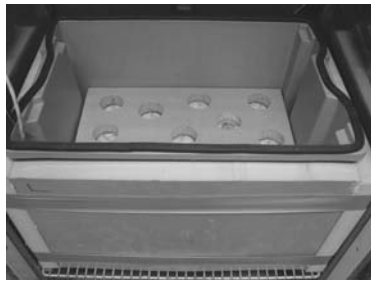
4.1 Fall 4 - temperaturgradient H_2O

I början var skillnaden mellan provkropparna $+3^{\circ}\text{C}$ mellan provkropparna i mitten och i ytterkant. En teori var att frysens fläkt kom lättare åt proverna i mitten av baljan eftersom baljans kanter skyddade prover i kanten mot större luftströrelser. Ett lock ($150 \times 250\text{mm}$) i form av cellplast av ca 30 mm som lades i mitten över provrören för att skydda de inre provkropparna. Det gick så bra att provkropparna endast skilde sig med drygt en grad. Sedan sänktes frysens temperatur och vattnets temperatur höjdes och temperaturskillnaden mellan provkropparna ökade.

Tabell 10: Starttemperaturer Fall 4, 2010-03-08

Termoelement		Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]
Vatten (inställd temperatur)		16,9 (15,0)
Undre	inre	5,9
	yttre	8,0
Övre	inre	-3,3
	yttre	-1,5
Frys		-18,1

Trots att frysen höll en temperatur på -18°C noterades lite för höga temperaturer på provkropparnas kalla sida. För att göra det enklare för frysen att kyla minskades andelen cellplast som låg runt baljan. Isoleringen kapades så att den fortfarande omringade botten och kanterna av baljan men endast till en höjd av provrören och inte hela baljans höjd.



(a) Före



(b) Efter

Figur 16: Minskning av cellplast.

Tabell 11: Mindre omgivande cellplast Fall 4, 2010-03-09

Termoelement	Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]	Temperaturskillnad [$^{\circ}\text{C}$] från föregående mätning
Vatten (inställd temperatur)	16,8 (15,0)	-1,4
Undre		
inre	5,2	+1,6
yttre	6,5	+0,9
Övre		
inre	-5,8	-1,9
yttre	-3,0	-2,8
Frys	-18,9	-8,6

Förändringen gav resultat. Temperaturen för provkropparna sjönk, men skillnaden mellan två olika provkroppar var fortfarande högre än önskvärt och temperaturgradienten lägre än vad man hoppats på. I ett försök att förbättra temperaturgradienten fylldes utrymmet mellan provkropp och provrörsvägg med en dränerande isolering för att försvåra vattenkonvektion samtidigt som absorption längs manteln var möjlig och ovansidan var öppen mot frysen.

Tabell 12: Med socka som isolering, Fall 4, 2010-03-10

Termoelement	Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]	Temperaturskillnad [$^{\circ}\text{C}$] från föregående mätning
Vatten (inställd temperatur)	15,5 (15,0)	+1,3
Undre		
inre	7,5	+2,3
yttre	8,9	-1,1
Övre		
inre	-5,2	-2,2
yttre	-4,3	-0,7
Frys	-26,7	-0,9

Situationen blev bättre på att så vis att temperaturgradienten blev större men skillnaden mellan olika provkroppar kvarstod. En teori var att värmeslingan låg med oregelbundna mellanrum och vattnet var inte en tillräcklig god värmeledare för att utjämna denna oregelbundenhet. Därför lades en aluminiumplåt, med 35 gånger bättre värmeledningsförmåga, på värmeslingorna under plastgallret. Cellplastlocket togs bort för att se aluminiumplåtens verkan.

Tabell 13: Med aluminiumplåt som värmeledare, Fall 4, 2010-03-11

Termoelement		Temperatur [°C]	Temperaturskillnad [°C] från föregående mätning
Vatten (inställd temperatur)		16,8 (15,0)	+0,1
Undre	mitten	9,8	+0,5
	yttre	7,8	-1,1
Övre	mitten	-7,4	-2,2
	yttre	-5,0	-0,7
Frys		-27,6	±0

Temperaturdifferensen blev utan lock och med aluminiumplåt lite högre så fallet med lock provades igen.

Tabell 14: Med aluminiumplåt och lock av cellplast, Fall 4, 2010-03-10

Termoelement		Temperatur [°C]	Temperaturskillnad [°C] från föregående mätning
Vatten (inställd temperatur)		16,9 (15,0)	+0,1
Undre	mitten	10,3	+0,5
	yttre	7,9	+0,1
Övre	mitten	-2,7	+2,3
	yttre	-4,7	+0,3
Frys		-26,4	+1,2

Med lock av cellplast blir differensen lite mindre men det blir svårare att få tillräckligt låga temperaturer på provkropparnas yta. Därför beslutas det att inte använda cellplastlocket, eftersom dess goda verkningar i att minska skillnaden mellan prover inte är tillräckligt stor för att överväga dess icke önskvärda konsekvenser i form av höga temperaturer.

4.2 Fall 5 - Temperaturgradient O_2

I startläget för Fall 5 är cellplasten runt om baljan bara så hög att den täcker vattenbadet och isoleringen kring provkropparna, inte upp längs hela baljans kanter. Vattenbadet är även i detta fall utformat med värmeslingor och plastgaller.

Tabell 15: Starttemperaturer mitten Fall 5, 2010-03-09

Termoelement		Temperatur [°C]
Vatten (inställd temperatur)		12,0 (15,0)
Undre	mitten	11,4
Övre	mitten	-4,6
Frys		-24,9

Provkroppen förflyttades till ytterkant för att mäta temperaturen där också. Frysen visade sig dock vara lite instabil och varierade mellan -25 och -20 °C.

Tabell 16: Starttemperaturer ytterkant Fall 5, 2010-03-10

Termoelement	Temperatur [°C]	Temperaturskillnad [°C] från föregående mätning
Vatten (inställd temperatur)	12,0 (15,0)	±0
Undre ytter	10,8	-0,6
Övre ytter	-0,4	+4,2
Frys	-24	+0,9

Alldeles för höga temperaturer noterades på ytan av provkroppen i ytterkant. För att minska temperaturskillnader mellan provkroppar läggs det in en aluminiumplåt ovanför värmeslingorna i vattenbadet.

Tabell 17: Med aluminiumplåt Fall 5, 2010-03-11

Termoelement	Temperatur [°C]	Temperaturskillnad [°C] från föregående mätning
Vatten (inställd temperatur)	14,0 (15,0)	+2,0
Undre mitten	15,0	
Undre yttre	7,9	+2,9
Övre mitten	-2,7	
Övre yttre	-4,7	-4,3
Frys	-26,4	-2,4

Med aluminiumplåt kom temperaturerna närmare riktvärdena och skillnaden mellan ytterkant och mitten minskade till endast en grad. Värmeslingans temperaturinställning sänktes för att få kallare prover.

Tabell 18: Med sänkt vattentemperatur, Fall 5, 2010-03-12

Termoelement	Temperatur [°C]	Temperaturskillnad [°C] från föregående mätning
Vatten (inställd temperatur)	9,5 (11,5)	+4,5
Undre mitten	10,9	+4,1
Undre yttre	10,0	-2,9
Övre mitten	-7,6	-4,9
Övre yttre	-7,2	-2,5
Frys	-28,3	-1,9

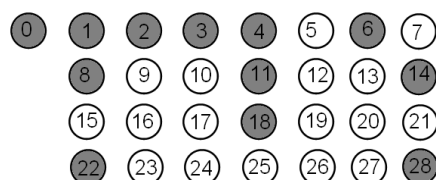
Målen är uppnådda och uppställningen är redo för att köras med de gjutna proverna.

5 Experiment

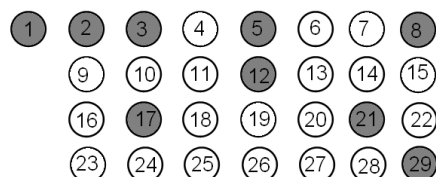
Detta kapitel beskriver vad och hur experimenten utfördes. Först skildras vilka vägningar och mätningar som genomfördes för att ta reda på hur stor absorptionen av vatten var under olika temperaturförhållanden. Sedan vilka avslutande mätningar som krävdes för att få fram en fuktprofil för varje provkropp.

5.1 Kontinuerlig vägning

Under 28 dagars tid vägs provkropparna för att kunna avgöra hur deras vattenabsorption ökar med tiden. Vägningarna kommer att ske i enlighet med ett framtaget schema, ett för Fall 4, se figur 18 och ett för övriga fall se figur 17. Varje ring representerar en dag, på varje dag som är mörklagd skall vägning ske, dagen 0 är när proverna placeras i klimatet för respektive fall.



Figur 17: 28 dagars schema för vägning i Fall 1, 2, 3 och 5



Figur 18: 28 dagars schema för vägning i Fall 4

Testfallen startas upp med någon alternativt några dagars fördröjning för att få jämn arbetsbelastning med de kontinuerliga vägningarna. Resultaten noteras på en blankett skapad för att göra viktmätningen så säker och effektiv som möjligt. Resultaten förs sedan in på datorn i ett kalkylark. När provkropparna skall vägas kommer de att plockas ur frysen, i Fall 1-3 med provrör, i Fall 4 och 5 med invändig isolering och korg respektive bara korg. Provkropparna transporteras till vägen som befinner sig i ett klimatrums. Vägen kalibreras minst en gång per dag före första vägningen. En referensvikt på 200,000 gram vägs före och efter ett fall med provkroppar. Proven torkas av med wettexduk tills provkroppen är matt och ställs sedan på vägen en efter en. I de fall när provkropparna är varma (framför allt fall 1 och 2) tenderar provkropparna att självtorka under vägning, avläsningen sker så fort som möjligt och så lika som möjligt varje gång. Efter de fyra veckorna schemalagd vägning vägs provkropparna en gång i veckan fram till avslutning.

5.2 Avslutande mätningar

Vid avslutande vägningar och mätningar genomgår alla provkroppar en viss procedur för att ta fram fuktprofiler av alla provkroppar och undersöka om det har uppstått mikrosprickor med hjälp av ultraljud. Avslutande mätningar består av:

1. Provkroppen vägs en sista gång
2. Bitumentejpen avlägsnas
3. Ultraljud utförs
4. Provkropparna spräcks eller krossas i mindre bitar
5. Varje provbit vägs direkt efter delning
6. Provbitarna torkas i $+105\text{ }^{\circ}\text{C}$ i minst 2 dygn
7. Provbitarna torra vikt vägs
8. Provbitarna vakuummätts i exikator
9. De vakuummättade provbitarna vägs i vatten
10. De vakuummättade provbitarna vägs i luft

Innan ultraljudsmätningen kan ske penslas betongprovkroppens ändor med vatten för att god kontakt skall uppstå mellan ultraljudsutrustningen och provkroppen. Tre efter varann tätt följda mätningar med ultraljudsutrustningen genomförs och dokumenteras. Sedan placeras provkroppen snabbt i en fryspåse av plast som försluts med hjälp av gummiband runt provkroppen. Namnlappen från respektive korg sparas och fästs innanför gummibandet för att förväxling inte ska ske. Innesluten i plastpåsen återförs provkroppen till frysen i väntan på spräckning respektive krossning.

Efter delningen vägs varje provbit så fort som möjligt med tillhörande skål innan de placeras i en ugn med temperaturen $+105\text{ }^{\circ}\text{C}$. Anledningen till valet att torka proverna till $+105\text{ }^{\circ}\text{C}$ direkt istället för att torka provet i $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ före vakuummätningen är för att den befintliga fukthalten i provet är viktigast. Vakuummätningen efter torkning i $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ försvåras och kommer att skilja sig från en enkel torkning. Nackdelarna med torkning i $+105\text{ }^{\circ}\text{C}$ riskerar man att skapa mikrosprickor på grund av hög temperatur.

Innan provbitarna vägs efter torkning placeras de först i en exikator med torkningsgel i en timme för att svalna. Detta för att varma provkroppar lätt attraherar fukt. Vägningen av de torra provkropparna sker varje dygn och när skillnaden till föregående dygn anses liten placeras provkropparna i exikatorn. Denna gång sugas all luft ut ur exikatorn och vakuum bevaras med hjälp av pump i tre till fyra timmar för att med säkerhet utrymma alla betongens håligheter. Därefter vattenmätts provbitarna.

Efter minst en natt under vatten vägs provkropparna först under vatten och sedan i luft efter att skålen tömts försiktigt på vatten för att spara partiklar som fallit från provet och provbiten baddats lätt med en wettexduk för alla Fall utom Fall 5 där ingen skål användes.

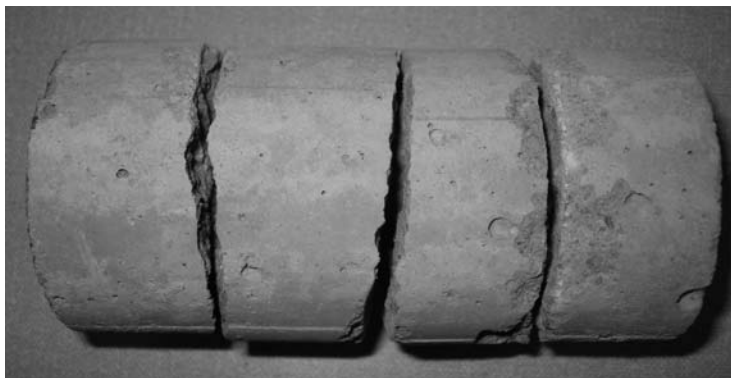
Efter alla vägningar förs all data in från vägningarna i kalkylark, även vikten av bara skålarna i vatten och luft.

5.2.1 Radiell fuktprofil

För Fall 2 och Fall 3 som utsatts för temperaturväxlingar tas fuktprofil fram för skillnaden i mantel och kärna. För att kunna göra detta spräcks provkroppen i en press och mantelbitar och kärnbitar plockas ut. För att få rena kärnbitar knackades bitarna efter spräckningen sönder med kil och hammare. Varje utvald bit penslas så att löst material försvinner innan de placeras i märkt behållare. Detta för att minska materialförlusten när provbitarna skall genomgå vidare provningar. Bitar i Fall 2 placerades i små aluminiumdeglar och i Fall 3 användes keramikdeglar för kärnbitar och petriskålar för mantelbitar. Alla skålar märktes med provkroppens namn samt ett "K" eller "M" för att skilja kärnbitar från mantelbitar. Provbitarna från Fall 2 torkade endast i ett dygn i tron att det var nog, men det kan hända att vissa tjockare bitar hade något tiondels gram kvar till absoluta torrvikten.

5.2.2 Rak fuktprofil

Fall 4 och 5 som utsattes för en temperaturgradient tas en fuktprofil fram genom att mäta vattenmättnadsgraden i fyra delar längsmed provkroppen. Detta utförs även för Fall 1, Referensfallet. Efter att bitumentejpen avlägsnas, vilket är nödvändigt för att kunna genomföra ultraljudsmätningarna, markeras provkropparnas delar om de varit vänd nedåt mot vattenbadet eller uppåt mot frysen med "N" respektive "U". Detta för att vid delningen inte skall uppstå tvivel om vad som är upp och ned på provkroppen. Delningen sker genom att provkropparna bilas sönder i fyra delar på längden.



Figur 19: Spräckt provkropp

Dessa placerades i petriskålar märkta med provkroppens namn samt ett nummer mellan ett och fyra som avslöjade var i provkroppen provet kom ifrån. Nummer ett stod för överst vilket i fall 4 och 5 var den kallaste delen, och fyra för längst ned vilket också var den varmaste delen.

5.2.3 Kapillär mättnadsgrad

För Fall 5 som har fått en chans att torka ut är det av intresse att undersöka i vilken mån proverna har torkat. Därför placeras provbitarna så att de kan suga kapillärt innan de torkas. Ständig kontakt mot vatten garanteras genom

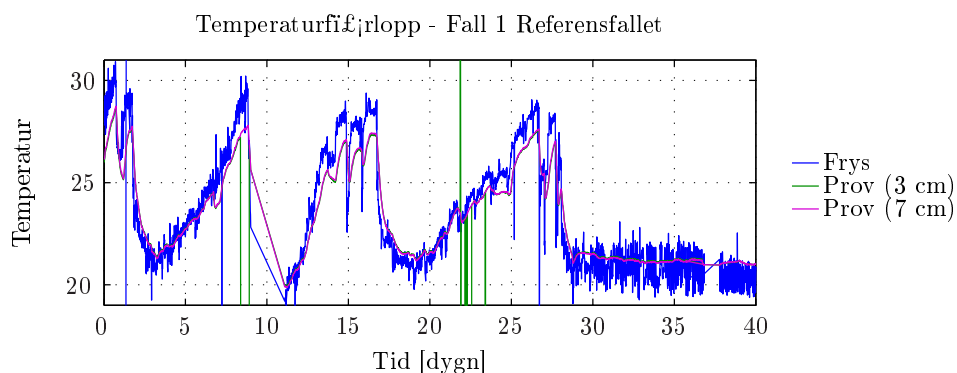
att provbitarna placeras på wettexdukar som i sin tur är placerade på plastgaller i en grund balja fylld med vatten upp till plastgallrets kant. Proverna vägs med 24 timmars mellanrum och när skillnaden mellan vägningarna är mindre än en 1 hundradels gram noteras det som vikten när provet är kapillärmättat. Efter detta torkas proven i $+105^{\circ}\text{C}$ som i de andra fallen.

6 Resultat

Resultaten från experimenten visas i form av absorptionskurvor där viktökningen presenteras relativt startvikten mot roten ur tiden. Vattenmättnadsgrader presenteras för varje del av provkropparna som skildes åt i tabeller för varje fall. Porositetsberäkningar av varje provkropp kunde utföras och presenteras i en figur där varje receipts porositet vid varje fall beskrivs. Slutligen visas även resultatet av ultraljudsmätningen i en figur.

6.1 Temperaturförhållanden

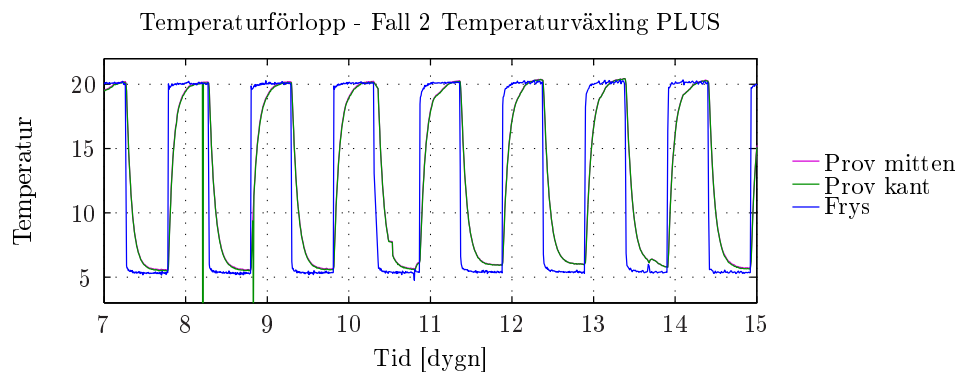
Vid varje fall loggades temperaturen i frys samt i provkropparna. Resultaten av dessa loggar presenteras i figurer där temperaturen visas mot tiden i dygn. För alla fall redovisas frysens temperaturförlopp samt mätningarna av termoelementen som gjutits in i en provkropp för vardera fall. I fallen med växlande temperaturer är termoelementen placerade på olika radiellt djup, i de övriga fallen på olika höjd räknat från den varma sidan. I fallen med temperaturgradient kontrollerades även yttemperaturen för provkroppen.



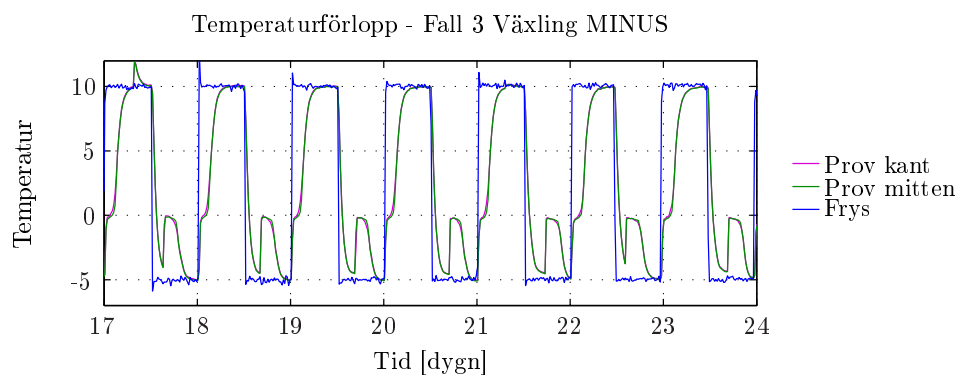
Figur 20 visar temperaturförhållandena för Fall 1, Referensfallet. Provkropparna skulle placeras i laboratoriet för att stå i en omgivning med rumstemperatur, ca 20 °C. De temperaturtoppar upp mot 30 °C som kan noteras beror på att luftkonditioneringen i rummet, med fyra aktiva frysar, gick sönder. Reparation utfördes på luftkonditioneringen vilket fick temperaturen att dala och slutligen stabiliseras.

Temperaturförhållandena i figur 21 under en veckas tid representerar förhållandena under hela provtiden av Fall 2, Temperaturväxling PLUS. Provkropparnas temperatur på olika radiellt djup är så pass lika att det är svårt att skilja dem åt. Proverna utsattes för ett cyklingsprogram mellan +5 °C och +20 °C med 12 intervaller. Proverna utsattes för 30 cykler och stod sedan i 20 °C ett dygn.

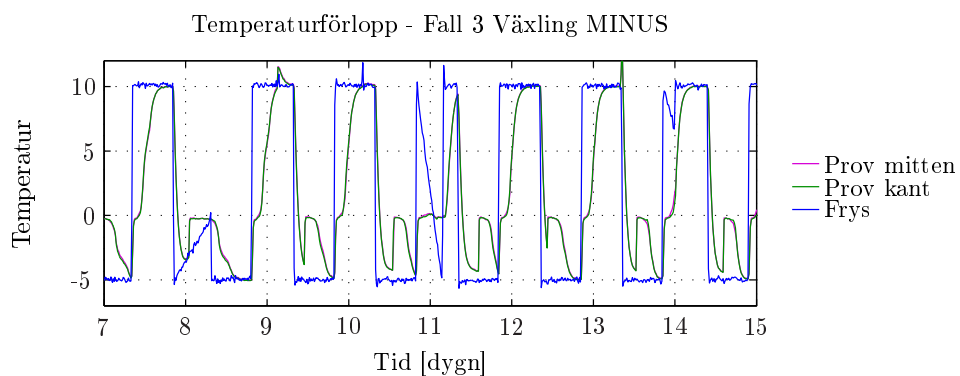
Figur 22 visar temperaturförhållandena för Fall 3, Temperaturväxling MINUS, under experimentet. I detta fall placerades proverna i en frys som programmerades att variera mellan -5 °C och +10 °C med 12 h intervaller. Det uppstod dock lite problem med programmeringen därav vissa hack i temperaturförloppet se figur 23 de första två veckorna.



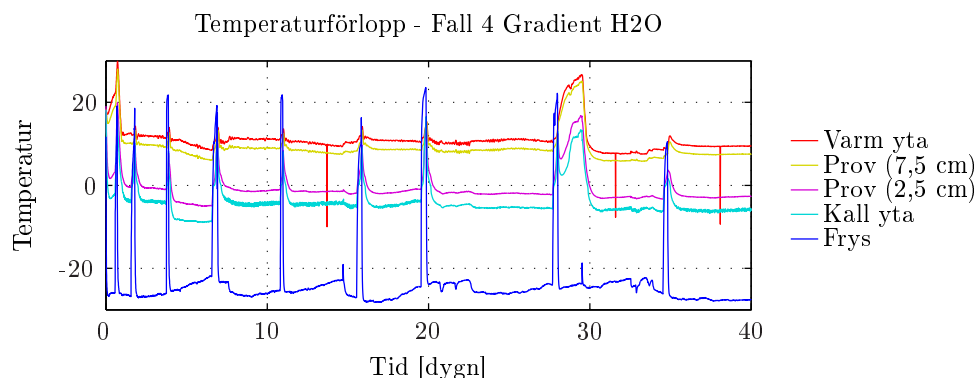
Figur 21: Temperaturförlopp Fall 2, Temperaturväxling PLUS



Figur 22: Temperaturförlopp Fall 3, Temperaturväxling MINUS

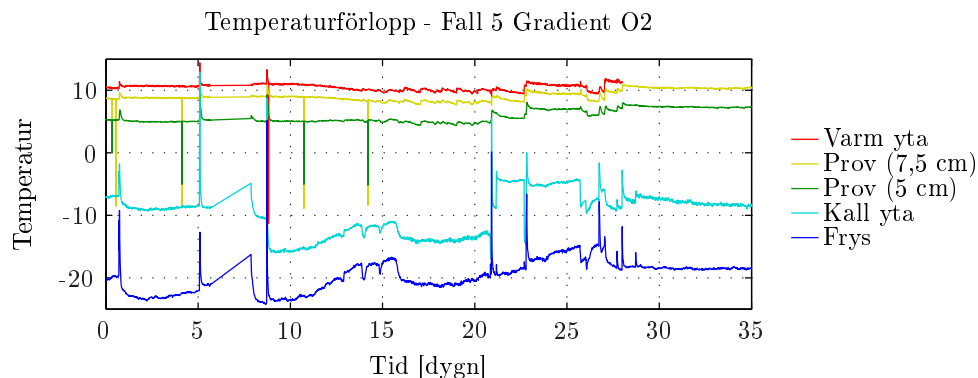


Figur 23: Temperaturförlopp Fall 3, Temperaturväxling MINUS



Figur 24: Temperaturförlopp Fall 4, Temperaturgradient H₂O

Figur 24 visar temperaturerna på ytan och vid olika nivåer i provet samt frysens temperatur under provningen. I Fall 4 skulle betongens ändtytor ha en varm och en kall sida, +10 °C respektive −5 °C. Frysens temperaturtoppar motsvarar tiderna för vägning då proverna har fått tina innan de kan förflyttas. Provkropparnas förhöjda temperaturer från dygn 28 (efter ett vägningstillfälle) till 29,5 beror på placering av termoelementet utifrån vilket värmeslingorna styr sin effekt. Termoelementet placerades i frysen istället för i vattnet.



Figur 25: Temperaturförlopp Fall 5, Temperaturgradient O₂

Figur 25 visar temperaturerna på ytan och på olika nivåer i provet vid Fall 5 samt frysens temperatur under provningen. I detta fall skulle betongens ändtytor ha en varm och en kall sida, 10 °C respektive −5 °C . Frysen har i detta fall inte kunnat hålla en stabil temperatur. Den sista veckan (inte representerad i grafen) gick frysen sönder och kunde bara kyla ned till −17 °C .

6.2 Porositet

Tabell 19 visar medelporositeten av 3 provkroppar med samma recept och fall. Porositeten beräknas för varje spräckt eller krossad provbit:

$$P = \frac{V_p}{V} = \frac{m_{sat} - m_{105}}{m_{sat} - m_{satw}} \quad (8)$$

V_p = total porvolym i materialet [m^3]
 V = materialets totalvolym [m^3]
 m_{105} = materialets torrsvikt [kg]
 m_{sat} = vattenmättat materials vikt i luft [kg]
 m_{satw} = vattenmättat materials vikt i vatten [kg]

Tabell 19: Porositet [%]

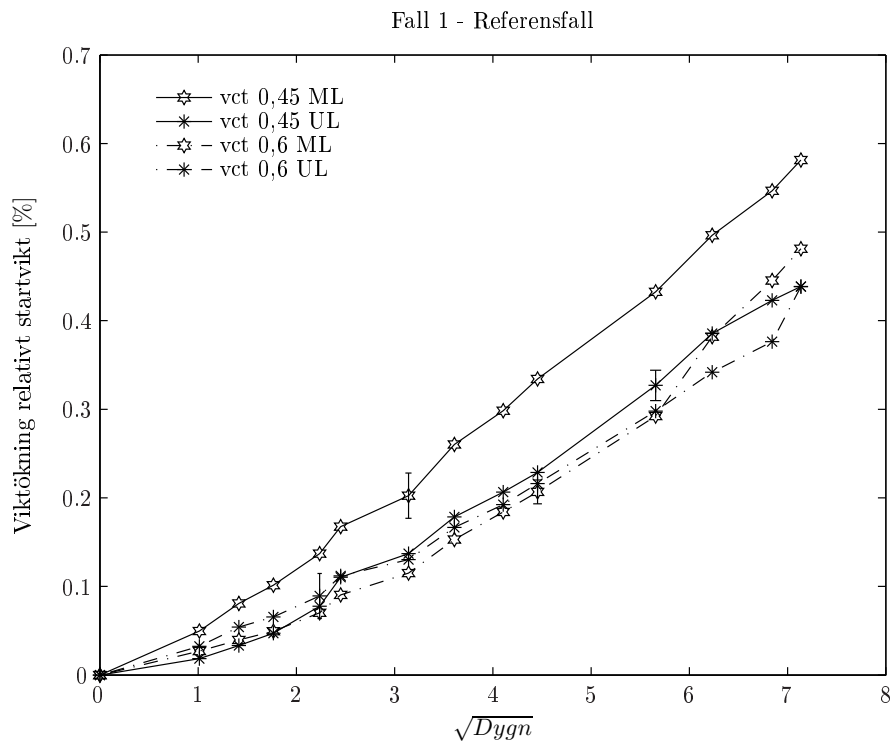
Fall	4ML	4UL	6ML	6UL
Fall 1	23	21	20	21
Fall 2	21,1	21	21	22
Fall 3	22	23	22	18
Fall 4	20,6	30	20	21
Fall 5	17	19	20	20

6.3 Absorptionskurvor

Resultaten kommer att presenteras i figurer som visar procentuell viktändring mot startvikten plottat mot roten ur tiden. Viktändringen antas bero på absorption eller desorption av vatten. De första fem figurerna (figur 26 till 30) beskriver absorptionen i varje fall där varje kurva motsvarar ett av fyra betongrecept. Varje kurva är ett medel av tre provkroppar av samma recept. De sista fyra figurerna (figur 1 till 7) samlar alla absorptionskurvor för ett recept som tydliggör skillnaden mellan de olika fallen. Betongrecepten är indelade efter vct och luftporbildande tillsatsmedel. förkortningarna ML och UL står för "med luftporbildande tillsatsmedel" respektive "utan luftporbildande tillsatsmedel".

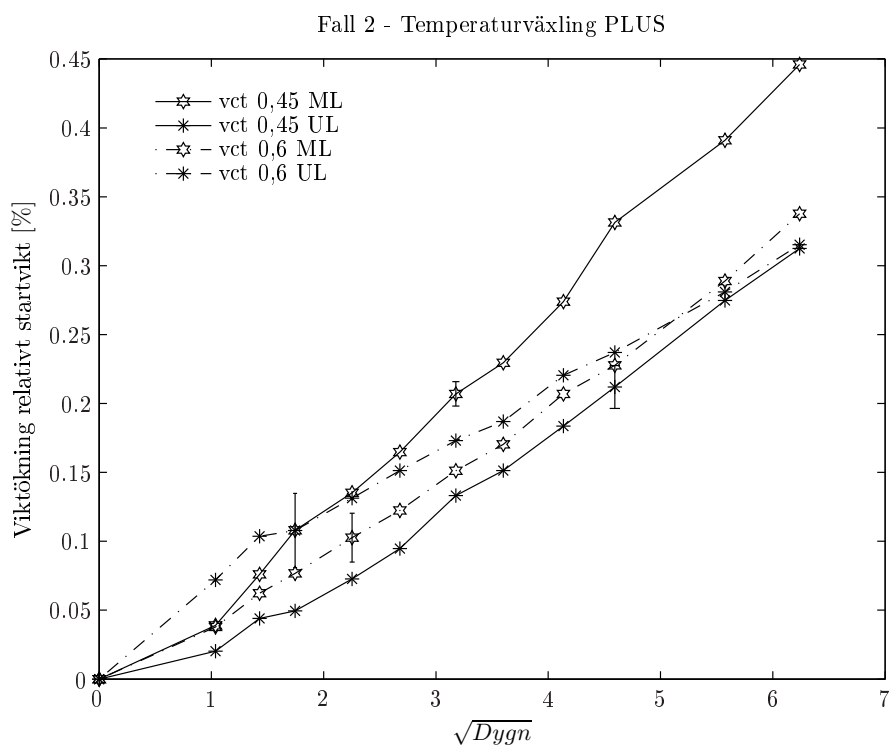
Beskrivning av de olika fallen finns under avsnitt 3.3.

6.3.1 Absorptionskurvor i de olika temperaturfallen



Figur 26: Vattenabsorption under lång tid, Referensfall

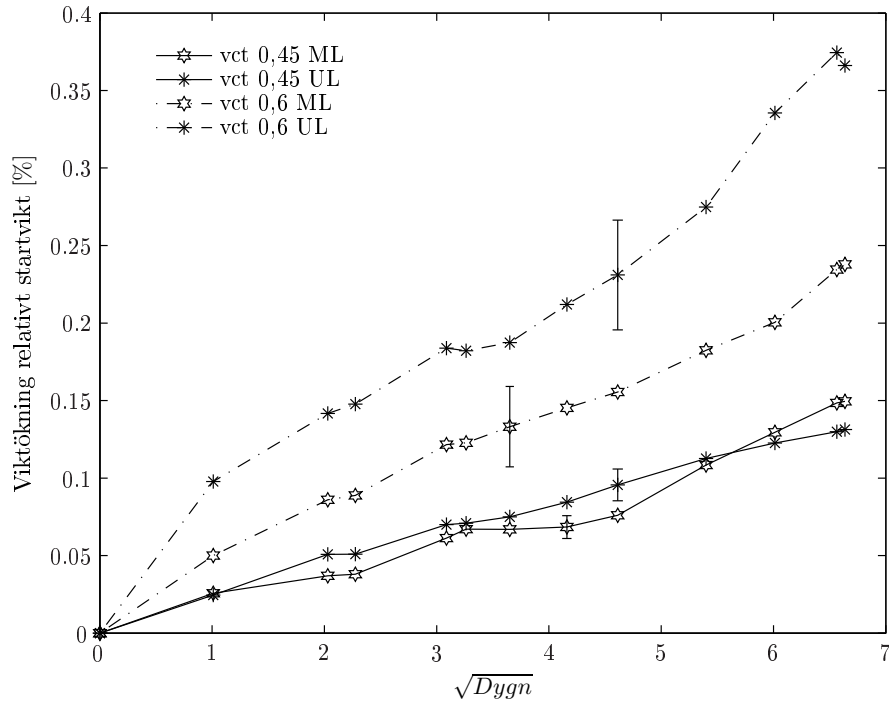
Resultatet i figur 26 visar absorptionskurvorna för Fall 1, Referensfallet. Proverna som absorberar mycket mer än övriga är de av vct 0,45 med luft. Betongproverna med vct 0,6 absorberar till en början lite mer än vct 0,45 utan luft.



Figur 27: Vattenabsorption under lång tid, Temperaturväxling PLUS

Liksom i Fall 1 visar resultatet i Fall 2, figur 27 att vct 0,45 med luft absorberar mer än provkroppar av andra recept samtidigt som vct 0,45 utan luft absorberar mindre än betong med vct 0,6.

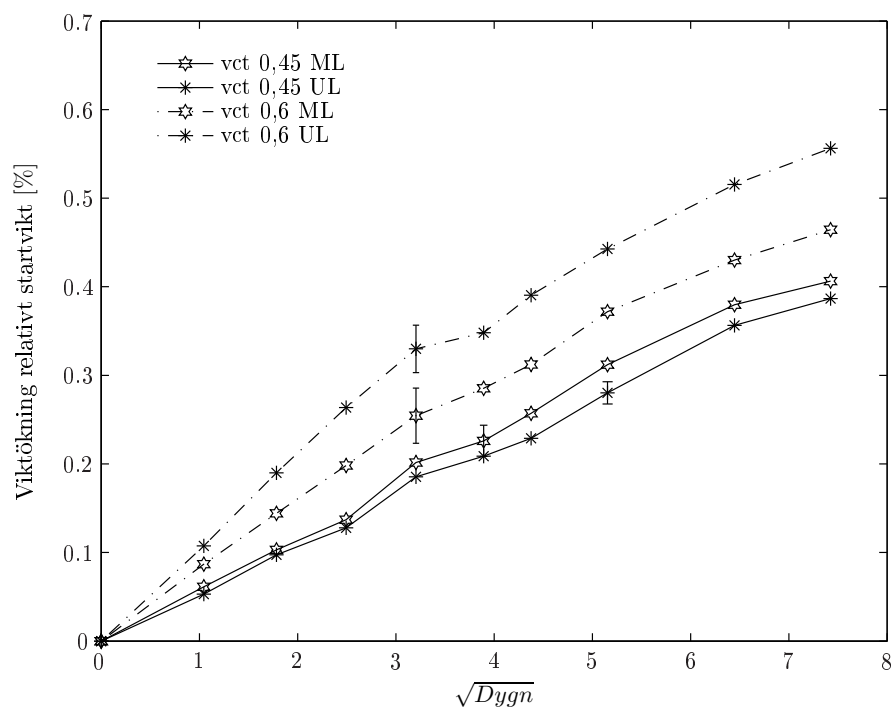
Fall 3 - Temperaturväxling MINUS



Figur 28: Vattenabsorption under lång tid, Temperaturväxling MINUS

Figur 28 visar att betong med vct 0,6 absorberar klart mer än vct 0,45 i Fall 3, Temperaturväxling MINUS. Det är stor skillnad mellan provkropparna med och utan luft av vct 0,6 men inte för betong med vct 0,45.

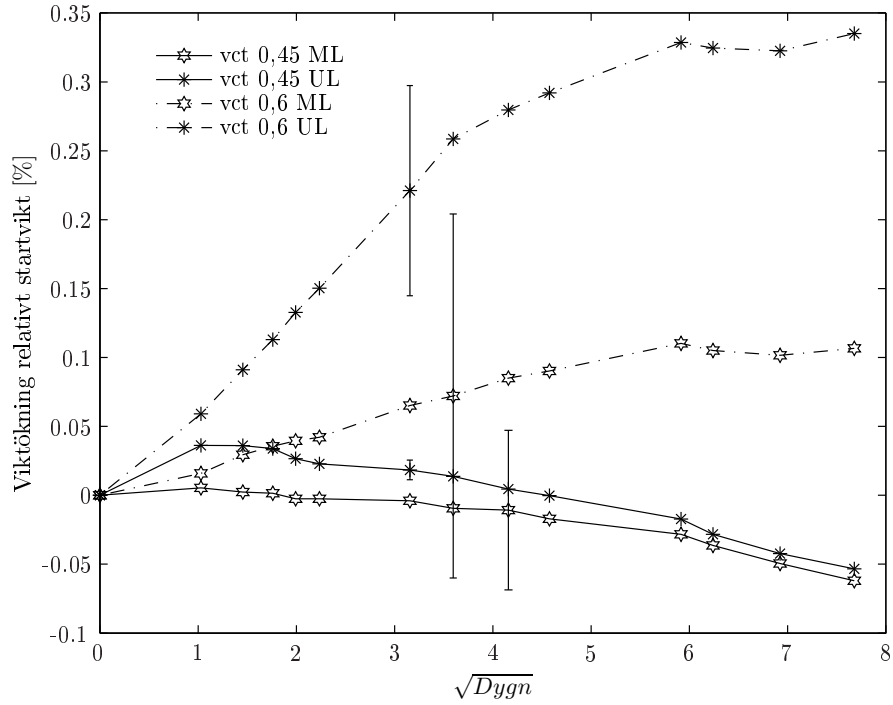
Fall 4 - Temperaturgradient H_2O



Figur 29: Vattenabsorption under lång tid, Temperaturgradient H_2O

Resultatet visar att liksom i Fall 3 absorberar provkropparna med vct 0,6 betydligt mer än de med vct 0,45. Även här finns det en markant skillnad mellan provkroppar med och utan luft för de med vct 0,6 samtidigt som skillnaden är härfin för de med vct 0,45.

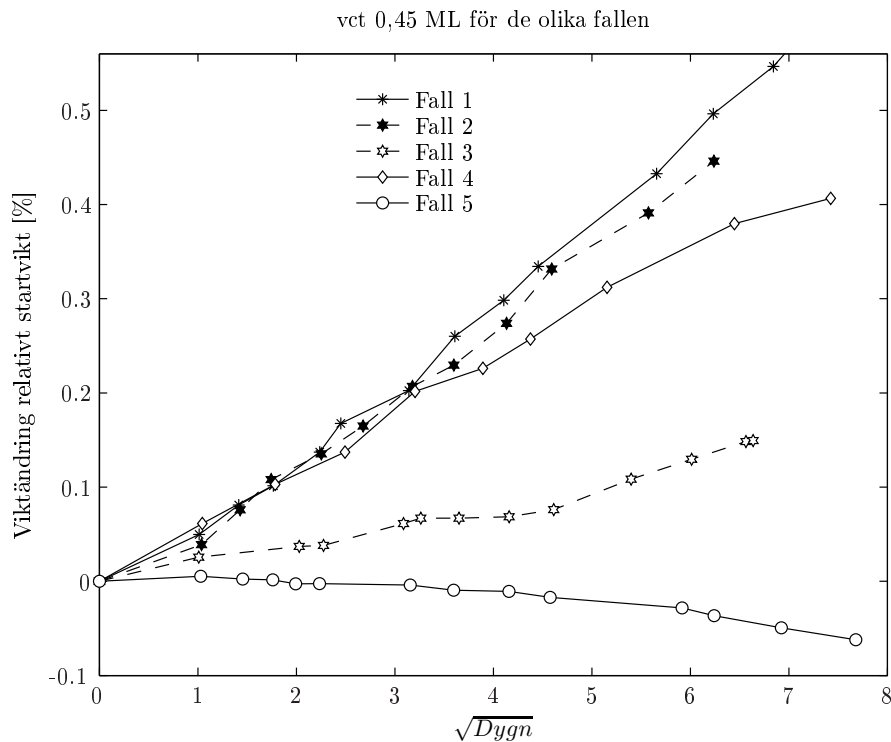
Fall 5 - Temperaturgradient O_2



Figur 30: Vattenabsorption under lång tid, Temperaturgradient O_2

Figur 30 visar att provkroppar med vct 0,45 torkar ut i Fall 5, Temperaturgradient O_2 . Betong med vct 0,6 däremot absorberar mer än de torkar och igen, liksom i Fall 3 och 4, kan stor skillnad ses mellan betong med och utan luft.

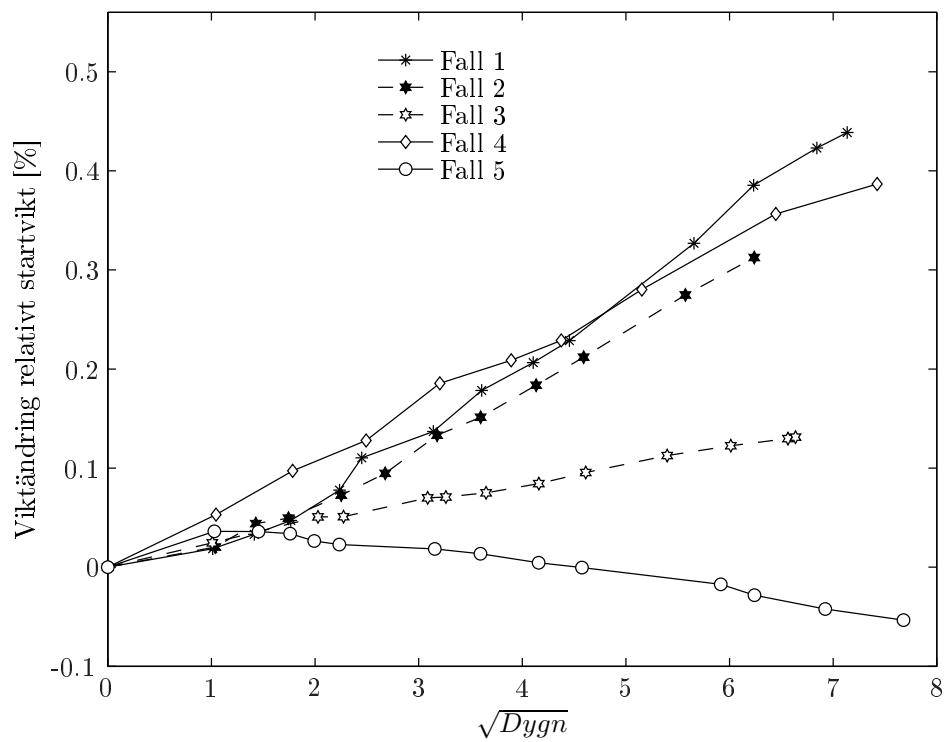
6.3.2 Absorptionskurvor för varje betongrecept



Figur 31: Vattenabsorption, vct 0,45 med luft

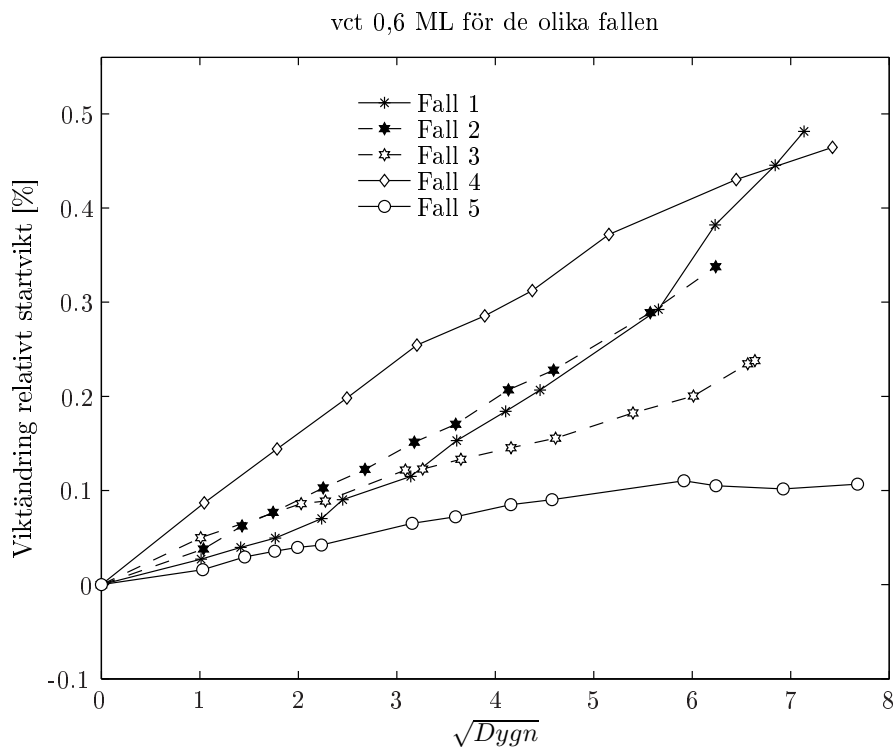
Figur 31 visar hur vct 0,45 med luftporbildande medel absorberar i de fem olika fallen. Den största absorptionen sker i Referensfallet men är ganska lika för temperaturväxling i plusgrader samt temperaturgradient H_2O . När vattnet är fruset under halva tiden i Temperturväxling MINUS absorberar proverna betydligt mindre. I Temperaturgradient O_2 när proverna har möjlighet att absorbera vatten i den varma änden och torka i den kalla torkar betongen mer än den absorberar.

vct 0,45 UL för de olika fallen



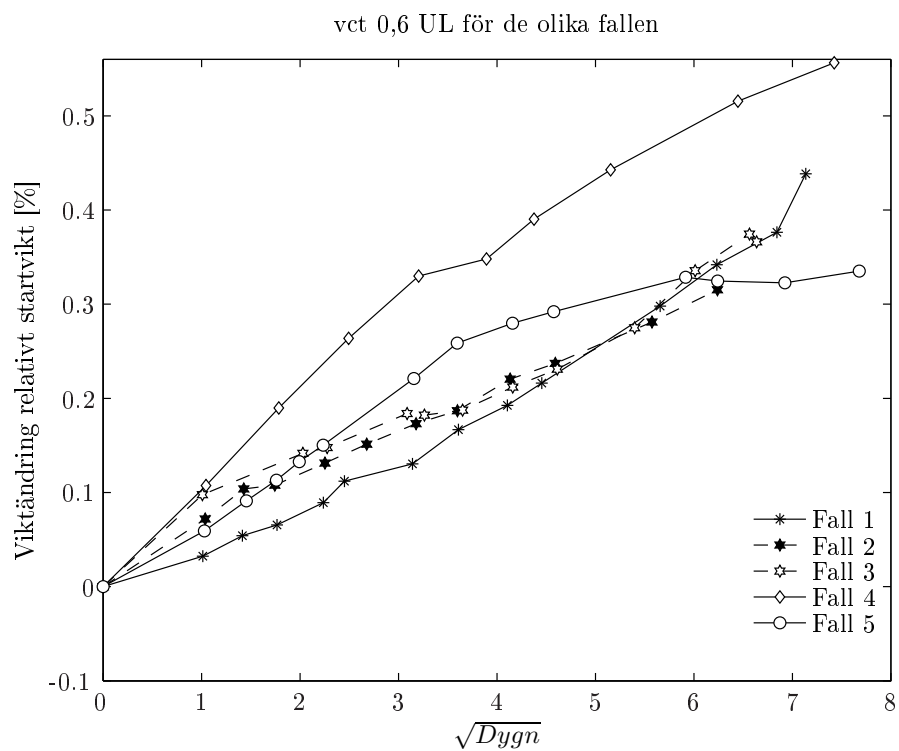
Figur 32: Vattenabsorption, vct 0,45 utan luft

Liksom för vct 0,45 med luft absorberar även vct 0,45 utan luft ungefär lika mycket i Fall 1, 2 och 4 enligt figur 32. I fallet med Temperaturväxling MINUS är absorptionen betydligt mindre och i Temperaturgradient O_2 sker uttorkningen snabbare än absorptionen för vct 0,45 utan luft.



Figur 33: Vattenabsorption, vct 0,6 med luft

För betong av vct 0,6 med luftporbildande medel är det i Fall 4, Temperaturgradient O_2 som proverna absorberar mest vatten till en början. Figur 33 visar att vid Referensfallet absorberar vct 0,6 med luft måttligt till en början, mindre än vid Temperaturväxling PLUS, men eskalerar senare till att absorbera mest av alla. Vid Fall 5 hittas efter en tid en jämvikt där absorptionen sker lika snabbt som uttorkningen.



Figur 34: Vattenabsorption, vct 0,6 utan luft

För vct 0,6 utan luft är det enligt figur 34 de fall som utsätter betongen för temperaturgradient som får proverna att absorbera mest. I även detta fall hittar provkroppen en jämvikt i Fall 5.

6.4 Vattenmättnadsgrad

I resultaten är de beskrivna med förkortningar; vct 0,45 med luftporbildande tillsatsmedel [4ML], vct 0,45 utan luft [4UL], vct 0,6 med luft [6ML] och vct 0,6 utan luft [6UL]. Dessa förkortningar används främst i tabellerna som redovisar vattenmättnadsgrad i olika delar av provkropparna. Resultaten som är givna är medel av uppmätta vattenmättnadsgrader från tre provkroppar med samma betongrecept på fyra olika delar i provkroppen (om inget annat anges). Avstånden är givna från den övre sidan av provkroppen till den undre, då oftast från den kalla till den varma sidan.

$$S = \frac{V_w}{V_p} = \frac{m_{wet} - m_{105}}{m_{sat} - m_{105}} \quad (9)$$

V_w = aktuell volym vatten i materialet [m^3]

V_p = total porvolym i materialet [m^3]

m_{wet} = materials vikt med aktuell fukt [kg]

m_{105} = materialets torrsvikt [kg]

m_{sat} = vattenmättat materials vikt i luft [kg]

Tabell 20: Medel vattenmättnadsgrad, Referensfallet

Del	4ML	4UL	6ML	6UL
Överst (0-2,5 cm)	0,91	0,98	0,97	0,92
Näst överst (2,5-5 cm)	0,88	0,95	0,87	0,91
Näst underst (5-7,5 cm)	0,91	0,96	0,89	0,96
Underst (7,5-10 cm)	0,90	0,97	0,88	0,93

Tabell 20 visar vattenmättnadsgraden för Fall 1, Referensfallet.

Tabell 21: Medel vattenmättnadsgrad, Temperaturväxling PLUS

Del	4ML	4UL	6ML	6UL
Kärna	0,78	0,82	0,78	0,77
Mantel	0,86	0,91	0,83	0,83
Differans	0,08	0,08	0,05	0,06

Tabell 22: Medel vattenmättnadsgrad, Temperaturväxling MINUS

Del	4ML	4UL	6ML	6UL
Kärna	0,75	0,78	0,80	0,81
Mantel	0,89	0,88	0,88	0,88
Differans	0,13	0,10	0,08	0,07

I tabellen ovan för Fall 2, Temperaturväxling PLUS visar resultatet att kärnans vattenmättnadsgrad alltid är lägre än mantelns och att skillnaden mellan mantel och kärna är större för betongproverna med vct 0,45 jämfört med vct 0,6. Den visar för betong med vct 0,45 men inte för betong med vct 0,6.

Tabellerna 21 22 ovan för Temperaturväxling PLUS och MINUS går det att avläsa medel av uppmätta vattenmättnadsgrader ifrån tre provkroppar med samma betongrecept. Vattenmättnadsgraden har kontrollerats separat för mantel och kärna. Det går att avläsa att kärnans vattenmättnadsgrad alltid är lägre än mantelns och att det finns en skillnad mellan provkropparna med och utan luft för vct 0,45 i Fall 2 samt alla betongrecept i Fall 3.

Tabell 23: Medel vattenmättnadsgrad, Temperaturgradient H_2O

Del	4ML	4UL	6ML	6UL
Överst (0-2,5 cm)	0,85	0,94	0,91	0,97
Näst överst (2,5-5 cm)	0,88	0,97	0,88	0,93
Näst underst (5-7,5 cm)	0,90	0,98	0,96	0,96
Underst (7,5-10 cm)	0,92	0,99	0,90	0,96

Tabell 24: Medel vattenmättnadsgrad, Temperaturgradient O_2

Del	4ML	4UL	6ML	6UL
Överst (0-2,5 cm)	0,79	0,82	0,73	0,83
Näst överst (2,5-5 cm)	0,88	0,96	0,87	0,93
Näst underst (5-7,5 cm)	0,94	0,99	0,90	0,95
Underst (7,5-10 cm)	0,93	1,00	0,94	1,00

För Fall 1, 4 och 5 visar tabellerna 20, 23, 24 att vattenmättnadsgraden är nästan alltid högre för prover utan luftporbildande jämfört med de med, för samma vct. I Temperaturgradient H_2O är understa delen av provkroppen som varit i kontakt med vatten nästan vattenmättad för prover med luft och helt vattenmättad för prover utan luft. Resultatet i tabell 24 visar även tydligt att proverna till viss del har torkat ut i den översta delen mot luften.

6.5 Kapillärmättnadsgrad

Tabell 25: Medel kapillärmättnadsgrad, Temperaturgradient O_2

Del	4ML	4UL	6ML	6UL
Överst (0-2,5 cm)	0,88	0,81	0,83	0,88
Näst överst (2,5-5 cm)	0,95	0,95	0,95	0,96
Näst underst (5-7,5 cm)	0,98	0,98	0,97	0,99
Underst (7,5-10 cm)	0,99	0,99	1,00	1,01

Tabell 25 visar kapillärmättnadsgraden för olika delar av provkroppen. Ett värde motsvarar ett medel av 3 provkroppars respektive del. Kapillärmättnadsgraden talar om hur mycket av kapillärerna som har förblivit fyllda under experimentets gång.

$$KMG = \frac{u}{u_w e t} = \frac{m_{20} - m_{105}}{m_{wet} - m_{105}} \quad (10)$$

m_{20} är aktuell vikt av provet

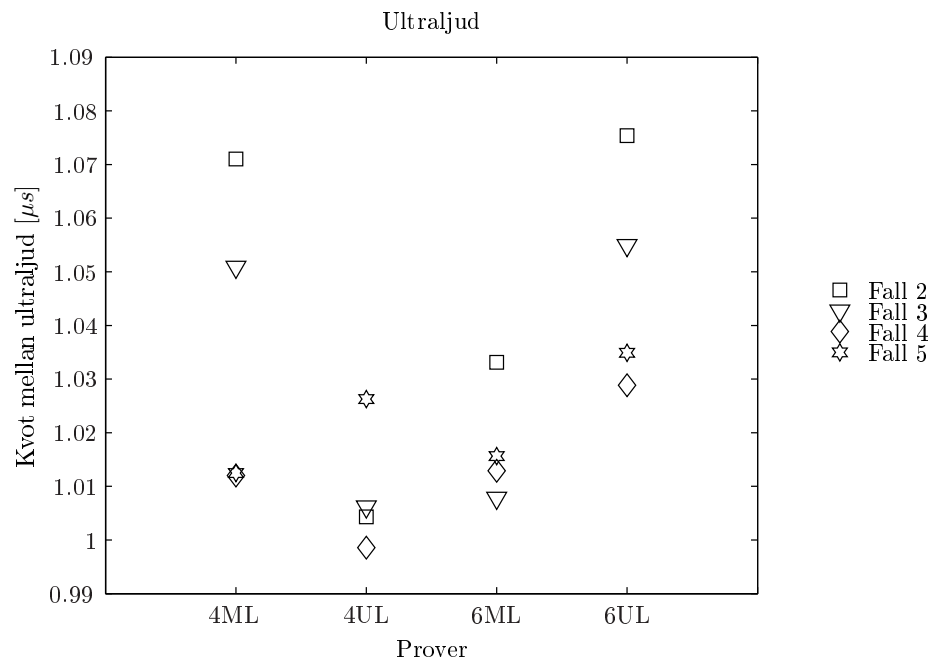
m_{105} är provets vikt när det torkat i 105 °C

m_{wet} är provets vikt när det kapillärmättat

6.6 Ultraljud

Under avslutningen av experimentet gjordes ultraljudsmätningar, tre stycken på vardera prov. Ett högt ultraljud kan tyda på att betongen har utsatts för sådana påfrestningar att mikrosprickor har uppstått, ett lågt värde tyder på ett tätt material. Figuren nedan kvoten mellan det aktuella fallets ultraljud mot Referensfallet. Den visar medel av alla mätningar för vardera recept i vardera fall. Nackdelen med att jämföra olika provkroppar från olika fall är att för att ultraljudsmätning inte är en exakt vetenskap men är bra att använda för att se förändringar. I och med att mätningar inte har gjorts på samma provkropp före och efter provning mäts inte en exakt förändring utan bara en rimlig skillnad.

Ultraljudet visar att vct 0,45 är ett tätare material än vct 0,6.



Figur 35: Ultraljudsmätning

7 Analys

I Analysen presenteras troliga fenomen som kan ha orsakat resultaten.

7.1 Felkällor

Lösningen för att fukt endast skulle tränga in radiellt eller från kortsidorna var att försluta valda sidor med bitumentejp som bestod av bitumen och ett lager aluminium. Detta visade sig snart vara en sämre lösning i de miljöer där bitumentejpen var i kontakt med vatten (Fall 1 till 4), eftersom aluminiumlagret vid dessa tillfällen bröts ned och blev sämre med tiden. Det visade sig att vid högre temperatur och lägre vct bröts det vattentäta aluminiumskiktet ned snabbare. Detta överensstämmer med det faktum att aluminium reagerar med kalciumhydroxid som är en reaktionsprodukt som avges när cement reagerar med vatten. Reaktionshastigheten ökar vid ökad mängd kalciumhydroxid så lägre vct har en högre koncentration. Kalciumhydroxid har en låg löslighet i vatten, men denna ökar med stigande temperatur. När aluminiumskiktet bröts ned gav detta möjlighet inte bara för betongprovet att suga från ändarna utan utan även att själva bitumentejpen kunde absorbera vatten.

Fall 4, Temperaturgradient H_2O är inte ett rent temperaturgradientfall eftersom det för att kunna vägas var tvunget att tinas emellanåt.

7.2 Absorptionskurvor

I detta avsnitt beskrivs förväntningar och resultat redovisade för varje betongrecept och hur mycket provkropparna absorberade i förhållande till de olika temperaturmiljöerna, se avsnitt 3.3.

Förväntningarna av hur mycket vart och ett av de olika betongrecepten kommer att absorbera i de olika fallen är lika oavsett recept; Fall 3, Temperaturväxling MINUS förväntas absorbera mest, sedan Fall 4, Fall 2, Fall 1 och Fall 5, Temperaturväxling O_2 , förväntas absorbera minst. Anledningen till denna rangordning är för det första att i Fall 5 har provkroppen en mindre area att absorbera ifrån samtidigt som den har möjlighet till uttorkning. De andra fyra fallens inbördes ordning bygger på att Fall 3 och Fall 4 involverar temperaturer under fryspunkten vilket alltid har en drivande effekt på absorptionen.

Vid cykling under fryspunkten riskerar proverna frostsador vilket gör det lättare och lättare efter varje fryscykel för vidare absorption, se (Fagerlund, 2004) och (Fridh, 2005). Däremot bör vct 0,45 utan luft absorbera mindre än vct 0,6 utan luft vid frysning av två orsaker. Den första är permeabiliteten, det andra är att vct 0,45 inte bör påverkas eller skadas i samma utsträckning av frostsador. Orsaken till den mindre förstörelsen borde vara det faktum att vct 0,45 har fler mindre porer, se avsnitt *Härdning*, och mindre porer betyder mindre frysbart vatten, se rubrik 2.3.1.

När proverna utsätts för en temperaturgradient kan den orsaka en islinnsbildning i provkropparna med vct 0,6 eftersom det är en porös betong. I Fall 4 är det heller inte långt från fryspunkten till fritt vatten. Dessa två saker är allt som krävs för att islinnsbildning skall ske, se avsnitt 2.3.7. I Fall 5 utsätts proverna också för en temperaturgradient men avståndet från fryspunkten till fritt vatten är betydligt längre vilket bör försvåra islinstillväxten.

Anledningen till att temperaturväxling i plusgrader tros ge större absorption än Referensfallet är det faktum att Helmuth (1960) såg en ökad absorption vid en temperatursänkning se avsnitt 2.3.8. Helmuth (1960) trodde att vid en temperaturväxling skulle absorptionsökningen som sker vid sänkning till låg temperatur jämnas ut med desorption när temperaturen stiger igen. En hypotes är dock att när temperaturen sjunker minskar vattenvolymen och skapar ett sug som får mer vatten att absorbera. Men när vattnet senare värms och volymen ökar trycks vattnet delvis ut ur provet delvis in i tomma porer. Hysteres uppstår.

Rangordningen mellan de tre som utsätts för temperaturer under noll utgår ifrån att i Fall 3 fryser hela kroppen vilket kan skapa frostsador utefter hela provkroppens längd och innebär fler mikrosprickor och fler möjligheter för vatten att tränga in. Vid en temperaturgradient [H_2O] fryser endast en liten del av provkroppen. Fall 4 har dock hela tiden tillgång på vatten vid Temperaturväxling MINUS kommer omgivande vatten att frysa till is under längre perioder.

Vid analys av slutresultaten är det tydligt att Fall 3, Temperaturväxling MINUS ligger väldigt lågt jämfört med de andra temperaturfallen. Detta säkerligen för att provkropparna har en kortare våttid. Betongytan förseglas med is när temperaturen understiger noll. Det betyder att provkropparna i Fall 3 bara har möjlighet att absorbera vatten under mindre än halva tiden jämfört med de andra fallen.

7.2.1 vct 0,45 med luftporbildande tillsatsmedel

Eftersom vct 0,45 med luft är en betong där permeabiliteten är låg och frostbeständigheten är hög bör skillnaden mellan de olika fallen inte vara så stor.

Resultaten visar att till en början sker det förväntade i Fall 1, 2 och 4 i och med att skillnaden mellan dem är liten, vct 0,45 med luft påverkas inte nämnvärt av om temperaturen växlas eller fryser. Men i ett senare skede uppstår en skillnad mellan Fall 1, 3 och 4, se figur 31. Detta kan ha påverkats av att porositeten av vct 0,45 med luft var störst i Fall 1 lite mindre i Fall 3 och minst (av de tre) i Fall 4, se tabell 19. Ju högre porositet desto mer vatten kan absorberas. Främst kan inverkan av bitumentejpen diskuteras. Bitumet bröts ned snabbare vid högre temperaturer och i de tre fallen ses en relation mellan stigande temperatur och stigande absorption.

Ett oväntat resultat var att vct 0,45 med luft skulle absorbera mer än vct 0,6 vid Fall 1 och 2. Den har visserligen en högre porositet jämfört än alla andra recept i Fall 1, men bör kunna räknas som ett tätare material än vct 0,6. Den ökade absorptionen kan delvis förklaras med att bitumentejpens aluminiumlager bröts ned snabbare för provkropparna med lågt vct än högt. Men det är inte hela förklaringen eftersom vct 0,45 absorberar mer än något annat recept redan från dag ett då bitumentejpen inte ännu hade brutits ned. Bitumentejpens nedbrytning ökade ju högre temperatur den förvarades i. Därför var det dubbel olyckligt att temperaturen inte var stabilt $+20\text{ }^\circ\text{C}$ för Referensfallet som planerat utan växlade några gånger upp till $+30\text{ }^\circ\text{C}$ se figur 20.

Resultaten för vct 0,45 med luft i Fall 5, Temperaturgradient O_2 , var uttorkning inte helt förväntat innan provningen men kan vara logiskt. Proverna placeras i miljön vattenmättade vilket betyder att diffusion av luft i vatten, se (Fagerlund, 2006b) och (Fagerlund, 2006d), kan ha varit en långsammare transport än diffusion av vattenmolekyler från kapillärporer. En skillnad i RF kan

ha skapat denna transportpotentialen. I frysen var lufttemperaturen närmare $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ samtidigt som betongens yta bara var ca $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Detta ger en skillnad i mätnadsånghalt från $0,55\text{ g/m}^3$ till $3,25\text{ g/m}^3$. Om den relativa fuktigheten i luften i frysen antas vara 100 % är betongytans RF endast 17 %.

7.2.2 vct 0,45 utan luftporbildande tillsatsmedel

Vct 0,45 utan luft är en betong där permeabiliteten är låg och frostbeständigheten är låg och därför bör Fall 3 och 4 med frystemperaturer visa betydligt högre absorption mot Fall 1 och 2 där temperaturen alltid är över fryspunkten.

Resultaten för vct 0,45 utan luft visar liten skillnad från vct 0,45 med luft. Kurvorna tyder på, som för vct 0,45 med luft, att provkropparna inte är nämnvärt påverkade av temperaturer ned mot $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, se avsnitt 2.3.1. Skadas inte materialet ökar inte heller absorptionen drastiskt se avsnitt 2.3.6. Det är intressant att se att Fall 4 som fryser ligger ovan både Fall 1 till en början och alltid över Fall 2 till skillnad från vct 0,45 med luft. Detta kan helt enkelt bero på att vct 0,45 utan luft har påverkats av frysningen även om det bara är lite. Generellt påverkas inte provkropparna av frystemperaturerna utan absorberar lika mycket oavsett temperatur så länge de har fri tillgång på vatten. De kurvorna som skiljer sig från de övriga är Fall 3 och 5 som absorberar mindre. Detta för att möjligheten till absorption är mindre. I Fall 3 har provkropparna mindre tid för absorption och i Fall 5 har provkropparna bara en liten yta i kontakt med fritt vatten samt att de kan torka.

7.2.3 vct 0,6 med luftporbildande tillsatsmedel

Vct 0,6 med luft är en betong där permeabiliteten är relativt hög men frostbeständigheten är god därför bör Fallen 1 till 4 ligga ganska nära varandra.

Resultatet för vct 0,6 med luft visar att trots att det finns inblandat luft för att öka frostbeständigheten finns det inte tillräckligt med luft för att skydda mot ett sådant fall när betongen utsätts för en temperaturgradient mellan $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ och $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ i vatten. Vid detta fall absorberar provkropparna mycket mer än vid Referensfallet, nästan under hela mätningen. Igen finns det tveksamheter rörande om det är provkropparna som har absorberat den mängd vatten som viktskillnaden visar för Referensfallet eller om det är bitumentejpen själv som har absorberat och stängt inne vatten mellan bitumen och betong.

Det är viktigt att notera att för vct 0,6 absorberer provkropparna som utsätts för temperaturväxlingar över fryspunkten mer än de som är i Referensfallet i början av provningarna. Detta vid temperaturväxlingar utan frysning när bitumentejpen kan anses som hel. Detta tyder på att temperaturväxling, oavsett frysning, är en drivande faktor gällande absorption. Helmuth (1960) sa att hans prover absorberade mer när de fick stå i vatten samtidigt som de kylde. Vid en temperaturväxling skapas samma absorption vid kylningen och absorptionsökning uppstår på grund av hysteres.

Igen ligger Fall 3 och 5 lågt av samma anledning som för vct 0,45, mindre yta och mindre tid för absorption. Om man räknar med hälften av tiden har förflutit för Fall 3 jämför med de andra skulle absorptionslinjen ligga mycket närmare Fall 4 ovanför Fall 5 för vct 0,6. Med samma resonemang för vct 0,45 skulle resultaten det bara komma närmare de andra och knappt det.

Men om man jämför vct 0,45 med vct 0,6 i Fall 5, se figur 30, är det uppenbart vilken skillnad vct innebär. Betong av vct 0,45 har torkat ut samtidigt som vct 0,6 har absorberat mer vatten. Anledningen till absorptionen är kanske det att vct 0,6 är ett mer permeabelt material. Härdningen har troligtvis inte gått så långt vilket betyder att det kan finnas genomgående kapillärporer, se (Fagerlund, 1982b). All uttorkning som sker kan kompenseras med kapillärsugning.

7.2.4 vct 0,6 utan luftporbildande tillsatsmedel

Eftersom vct 0,6 med luft är en betong där permeabiliteten är relativt hög och frostbeständigheten är låg bör fallen där vattnet fryser (Fall 3 och 4) ge större absorption jämfört med Fall 1 och 2.

Resultaten visar att vid Fall 4 när en temperaturgradient råder i vatten är det värsta fallet av de fem provade. Detta kanske för att i och med de provningsförhållanden där proverna fick tina inför varje vägning vilket skapade en kombination av islinstillväxt samt en pumpningseffekt. En islin skulle hela tiden växa och skapa en vattentransport så länge det finns tillgång på vatten, se avsnitt 2.3.7. Det faktum att materialet kan få frostsador samtidigt som det alltid finns tillgång på fritt vatten kan bli förödande när vatten lättare och lättare kan strömma in i och med mikrosprickorna.

Även här har fallet med temperaturväxling på plussidan en högre absorption än Referensfallet till en början. Vct 0,6 visar också för Fall 3 en tendens till att minskad våttid har betydelse första månaden, men sedan ligger den på samma nivå som resterande.

I Fall 5, Temperaturgradient O_2 kan kapillärsugning förklara absorption för vct 0,6 och och uttorkning av vct 0,45. Den kan dock inte säga varför vct 0,6 utan luft absorberar så mycket mer än betong av samma vct med tillsatt luft. Troligast har isbildningen skapat mikrosprickor i betongen utan tillsatt luft. Sprickorna skapar utrymme för mer vatten. Det finns en möjlighet att temperaturgradienten skapat en islin i vct 0,6 utan luft vilket skulle kunna förklara den ökade absorptionen. Men eftersom inga isbildningsmätningar gjordes kan detta inte bevisas.

7.2.5 Jämförelse av alla recept

Om absorptionskurvorna studeras i ordningen; 4ML, 4UL, 6ML och 6UL, kan man se att kurvorna för de olika fallen hela tiden närmar sig varandra. För en betong med lägre vct och utan luftporbildande medel spelar det nästan ingen roll i vilken temperaturmiljö den betongen placeras, den kommer alltid absorbera mycket fukt. Vct 0,45 däremot reagerar tydligt på tillgången till vatten men inte på temperaturgradienter eller temperaturväxlingar.

Man bör också notera att för Fall 1 till 3 ser det ut som om absorptionen efter ca 40 dygn inte visar några tecken på att stanna av. Fall 4 ser något annorlunda ut, en liten tendens till att provkropparna kan ha börjat mättas. I Fall 5 tycks en jämvikt ha uppstått för båda av vct 0,6 samtidigt som proverna med vct 0,45 fortfarande ser ut att kunna torka lite till.

7.3 Jämförelse vct 0,6 med och utan luftporbildande tillsatsmedel

Både i Fall 1 och 2 absorberar vct 0,6 utan luft mer än vct 0,6 med luft. Detta verkar till en början inte stämma förrän man tittar på den framberäknade porositeten i tabell 19. I precis de fallen har vct 0,6 utan luft en högre porositet än receptet utan luft. Det är inte med mycket men det kanske är den lilla skillnaden som krävs för att absorptionen ska vara lite större.

Vid jämförelse av Temperaturväxling MINUS och Temperaturgradient H_2O absorberar proverna totalt mest i den senare eftersom proverna har tillgång till vatten under hela provtiden. Men skillnaden mellan vct 0,6 med och utan luft är större i Fall 3 jämfört med Fall 4. Detta troligtvis för att i Fall 3 utsätts hela provkroppen för frostsprängning jämfört med Fall 4 där bara en mindre del av betongen utsätts för frostsprängning.

Om man tittar på porositeten för vct 0,6 är det bara i Fall 3 som det är någon större skillnad i deras porositet. Trots det absorberar vct 0,6 med luft betydligt mindre än vct 0,6 utan luft i alla fall med temperaturer under fryspunkten (Fall 3, 4 och 5). Detta visar skillnaden på hög porositet och bra porstorleksfördelning. Vid inblandning av luftporbildande medel skapas stora tomma luftporer jämt fördelade i betongen som gör avståndet till närmsta luftfylld por litet. Kanske aldrig över den kritiska avståndsfaktorn

7.3.1 Jämförelse vct 0,45 med och utan luftporbildande tillsatsmedel

För vct 0,45 kunde en skillnad mellan proverna med och utan luft märkas vid temperaturer över noll. Prover med luftporbildande tillsatsmedel kunde absorbera mycket mer vatten än de utan eftersom det fanns mer plats för vattnet att tränga in. När provkropparna utsattes för minustemperaturer blev skillnaden mindre och i vissa fall närmast obefintlig. Detta kan bero på att den totala porositeten enligt tabell 19 var högre för proverna utan luft jämfört med proverna med luft.

7.4 Vattenmättnadsgrader

Det måste uppmärksammas att vattenmättnadsgraderna för Fall 2 och 3 när temperaturen har växlat är inte direkt jämförbara med Fall 1, 4 och 5 eftersom de genomgick olika delningsprocedurer. Vid spräckning av Fall 1, 4 och 5 delades provet upp i glasskålar och vägdes. Vid krossning av Fall 2 och 3 valdes lämpliga bitar ut eller hackades ut med mejsel och hammare. Därefter penslades proverna innan de vägdes. De krossade proverna delades naturligt in i fler bitar än när det spräcktes och fler bitar betyder större yta som lätt kan torka.

7.4.1 Temperaturväxling PLUS och MINUS

Vattenmättnadsgraden både i Fall 2 och 3, se tabell 21 respektive 22, finns det en markant skillnad mellan vct 0,45 med luft och vct 0,45 utan luft men inte mellan proverna med vct 0,6. För den senare är vattenmättnadsgraden mycket lika för proverna med och utan luft. Detta kan vara en konsekvens av att porositeten är lika för de båda vct 0,6. Porositeten redovisad i figur 19 stödjer dock endast detta i ena fallet.

I båda fallen kan man se en skillnad mellan mantelns och kärnans vattenmättnadsgrad, där mantelns alltid är den högre. Detta är naturligt eftersom vattnet måste tränga igenom manteln innan den kommer till kärnan. En mer beskrivande upptäckt är att skillnaden mellan kärna och mantel hos vct 0,45 är större än med vct 0,6. Detta bör bero på att vct 0,45 är ett tätare material där vatten har svårare att tränga in och därmed bör kärnan vara torrare hos prover av vct 0,45 än 0,6.

Om man jämför recept för recept mellan de två olika fallen, Temperaturväxling PLUS och MINUS, kan man se att vattenmättnadsgraden är lägre för vct 0,45 i Temperaturväxling MINUS. Där är frysningen av omgivande vatten till största del inneburit ett hinder för vattenabsorption. I Fallet för vct 0,6 är det tvärt om. Trots att tiden för absorption i Fall 3 har varit kortare än i Fall 2 är vattenmättnadsgraderna högre i Fall 3. Troligtvis har temperaturväxling MINUS orsakat mikrosprickor i vct 0,6. Vatten har lättare kunnat tränga in och skapat högre vattenmättnadsgrad. Om man ser till ultraljudet i figur 35 ser detta ut att kunna bekräftas för vct 0,6 utan luft. Ultraljudet är bra mycket högre i Fall 3 jämfört med Referensfallet. Men om man ska förlita sig till ultraljudet så verkar vct 0,45 med luft också blivit utsatt för minst lika stor sprickbildning vilket inte är troligt.

7.4.2 Jämförelse Temperaturgradient H_2O med Referensfallet

Vct 0,45 har ungefär samma vattenmättnadsgrad längs hela provkroppen som i Referensfallet. Det finns ett undantag och det är den översta biten som har mycket lägre vattenmättnadsgrad. Detta troligtvis för att den iskropp som har bildats på provkroppens kalla sida har verkat som ett hinder för vattenabsorption. Detta gäller även vct 0,6 med luft. För vct 0,6 utan luft däremot är vattenmättnadsgraden som störst i den översta frusna delen, jämfört med andra delar av provkroppen och jämfört med Referensfallet. Detta kan vara ett tecken på att isinställväxt har uppstått. Om man jämför tabell 20 och 23 kan det utläsas att vattenmättnadsgraderna bara i den översta delen är betydligt högre än i referensfallet, transporten av vatten går till islinen.

Det går att konstatera att varje del av provkroppen för vct 0,45 utan luft under temperaturgradient har absorberat mer vatten än i Referensfallet. Detta kan vara ett resultat av att vid en temperatursänkning absorberar betong automatiskt mer vatten på grund av att vattnets volymminskning ned till 4 °C se (Helmuth, 1960). Det kan också bero på temperaturgradienten. Den högre vattenmättnadsgraden kan även noteras för vct 0,6 i delar som inte fryser.

7.5 Jämförelser Temperaturgradient O_2 med Referensfallet

I provkropparnas fuktprofil i Fall 5 (jämfört med referensfallet) är den översta biten naturligtvis mycket lägre för alla prover än vid referensfallet. Den översta biten har fått en chans att torka ut. Övriga nivåer liknar eller har till och med högre vattenmättnadsgrader än i Referensfallet. Det är intressant att studera att för alla recept är vattenmättnadsgraden högre i de understa och näst understa lagerna trots att proverna i Temperaturgradient O_2 har en mindre yta att absorbera fukt ifrån. Om man tittar på den understa biten kan provkropparna

i Fall 1 suga från mantelytan och i Fall 5 endast från änden. Provkropparna är 55 mm i diameter och de delades i 25 mm tjocka bitar. Detta ger:

Tabell 26: Area för Mantel respektive Ända

Del	Mantel - Fall 1	Ända - Fall 5
Formel	$2r \cdot \pi \cdot h$	$r^2\pi$
	$2 \cdot 27,5\pi \cdot 25$	$27,5^2\pi$
Σ	$43,2 \text{ cm}^3$	$23,8 \text{ cm}^3$

Trots att provkropparna i Temperaturgradient O_2 bara har lite mer än hälften så stor area, se tabell 26, att absorbera fukt ifrån lyckas provkropparna på samma tid få en högre vattenmättnadsgrad än i Referensfallet. Om man tittar på biten näst underst kan samma sak konstateras trots att prover i Fall 1 kan absorbera från mantelytan och i Fall 5 måste all transport gå från ändan av provkroppen. Temperaturgradienten har en ökande inverkan på fukttransporten.

7.6 Kapillärmättnadsgrad

Genom att jämföra kapillärmättnadsgraden för Temperaturgradient O_2 ser man större skillnader i vattenmättnadsgrad och kapillärmättnadsgrad i proverna blandade med luftporbildande tillsatsmedel. Dessa prover har helt enkelt större andel porer som inte tillhör kapillärporerna, det vill säga luftporer skapade av tillsatsmedel. Detta förklarar hur vct 0,6 med och utan luftporbildandemedel kan ha lika porositet men reagera olika i fallen med temperaturer under fryspunkten.

8 Diskussion

I alla fall med temperaturer under fryspunkten kan man se fördelen med lågt vct. Men i det fall när proverna utsätts för en temperaturgradient under vatten är det tydligt vilken skillnad kvalitén på betongen gör. Betong i samma klimat reagerade på två helt olika sätt, uttorkning och absorption. Detta experiment säger att skillnaden beror på vct. Lågt vct tycks leda till att absorptionen inte går lika fort som avdunstningen och att det efter åtta veckor fortfarande torkar ut. Frågan är var gränsen går mellan en betongkvalité som absorberar och en som torkar. Helt klart ligger den någonstans mellan vct 0,45 och vct 0,6 men även luftporbildande medel har en stor inverkan. Om frostsgraden kan minimeras kan även absorptionen minimeras.

Om man skall diskutera var gränsen för vct går mellan en passande betong för vattenbyggnader i kallt klimat så är vct 0,45 med luft självklart bra lika som vct 0,6 utan luft är en sämre betong. Vct 0,6 är en betydligt bättre betong med luft och kanske skulle den ha kunnat klassificeras ännu bättre om den hade haft en högre lufthalt. Vct 0,45 med och utan luft visade i dessa experiment inte stor skillnad, men det går fortfarande inte att säga att de är likvärdiga. Förhållandena för dessa prover var temperaturer ned till endast $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, men för lägre temperaturer fryser vatten i fler och mindre porer vilket ökar risken för uppkomst av frostsador. Men för de klimatförhållanden som proven utsattes för, tyder resultaten på att det är lättare att vara säker på att ha en bra betong med lågt vct än hög lufthalt. Osäkerheten av vct vid blandningen av betong ligger i att ballasten har olika fuktkvoter. Mängden luftporbildande medel som krävs för att få rätt lufthalt varierar beroende på vct, hur länge betongen blandas och vilken kornstorleksfördelning man använder sig av. Dessutom vill man sällan ha för mycket luft eftersom det ger en betong med lägre densitet och lägre hållfasthet.

Det är mycket intressant att se vattenmättnadsprofilerna i Fall 4 och 5. Att de båda i den understa delen kan påvisa högre vattenmättnadsgrad än Referensfallet trots att de har mindre eller lika stor yta att absorbera ifrån. Detta tyder på att temperaturgradienten har en inverkan på betongens absorption. Svaret kan delvis ligga i att en islinn kan ha skapats i provkropparna, men det verkar inte troligt i fallen med lågt vct.

Det måste uppmärksammas att för vct 0,6 med luft och utan luft absorberar mer vid Temperaturväxling PLUS än vid Referensfallet, de första 25 dyggen. Varför betongen senare absorberar mer i Referensfallet kan bero på bitumentejpen. Men det faktum att en skillnad kan antydast är spännande och visar på att själva temperaturväxlingen förmår betongen att absorbera mer. Kanske kan denna ökning bero på hysteres, att absorptionen vid temperatursänkning är enklare än uttorkningen och fukt ackumuleras snabbare än när temperaturen är konstant. En hypotes rörande anledningen till denna ökning av absorption kan vara att när temperaturen sjunker skapas ett sug och mer vatten absorberas. Men när temperaturen stiger igen och vatten får en större volym trycks inte allt vatten ut samma väg det kom, vattnet kommer även att pressas in i materialet till luftfyllda porer.

Vct 0,6 visar i fallet med temperaturväxling MINUS en tendens till att minskad våttid har betydelse första månaden, men sedan ligger den på samma nivå som resterande. Frågan är vad som skulle hända under längre tids frysning.

Det är svårt att avgöra om islinstillväxt uppstod i Temperaturgradient H_2O

hos vct 0,6. Om det uppstod uppstod den troligast i betongen av vct 0,6 utan luftporbildande medel. Vad som tyder på detta, är att för de andra betongrecepten verkar isen utanpå provkroppen ha hindrat absorption i den översta delen av provkroppen. För vct 0,6 utan luft i översta delen av provet ligger vattenmättnadsgraden betydligt högre än Referensfallet. Detta gör den inte i de varmare delarna av provkroppen. Det som talar emot islinsbildning är att provkropparna i Fall 4 har med jämna mellanrum tinats då vatten har fått chans att tränga in i sprickor orsakade av frostsador utan att någon islins behövt växa i provkropparna.

9 Slutsats

- Undersökningarna visar att vid isbildning blir absorptionen i betongen större. När proverna utsattes för frystemperaturer absorberade de generellt mer än när temperaturerna varierade mellan 5-20 grader. Skillnaden i vattenupptag var betydande i prover med vct 0,6 utan luft där det är mycket troligt att isbildning har skett. Alla prover oavsett betongrecept absorberade mer vatten i de fall när provet frös samt hade tillgång till vatten. Så på så vis var en miljö med en temperaturgradient mellan -5°C till 10°C värre än en upprepad frysning och tining vid samma temperaturer.
- Luftporbildande tillsatsmedel har en klart positiv inverkan på frostbeständigheten. Prover med vct 0,6 utan luft absorberade klart mer än de med luftporbildande tillsatsmedel. Skillnaden i porositet mellan proverna av vct 0,6 var liten men ändå reagerade det olika när de utsattes för kyliga klimat. De provkropparna som var utan luftporbildande medel absorberade större mängd vatten än de med. Denna skillnad kan även ses för den betong med lägre vct även om den är mindre. Detta visar på att det krävs rätt sorts porositet, rätt porstorleksfördelning, inte bara porer för att skydda betong mot frost.
- Lågt vct är ett bra sätt att skydda mot frostsprängning vid milda frosttemperaturer. För vct 0,6 var skillnaden stor från det att proven stod i plusgrader mot att de utsattes för minusgrader. För vct 0,4 var denna skillnad inte lika tydlig. Betong av vct 0,4 tycks inte ha skadats utav de frystemperaturer de utsattes för -5°C , inte ens de utan luftporbildande tillsatsmedel.
- Det finns en möjlighet att temperaturväxlingar över noll skapar större vattenabsorption än med konstant temperatur. I mätningarna av vattenabsorption mot tid kan man se en större absorption i fallen där temperaturen pendlar mellan 5°C till 20°C jämfört med när de stod i rumstemperatur. Rumstemperaturen varierade visserligen men med längre och färre svängningar.
- Temperaturgradient över ett material påverkar vattenabsorptionen. I de fallen när provkropparna utsattes för en temperaturgradient mellan -5°C och 10°C kontrollerades vattenmättnadsgraden utmed kroppen i fyra olika delar. Det visade sig att vattenmättnadsgraden var nästan alltid högst i den delen som var varmast. Detta är inte så konstigt för de provkropparna som bara kunde absorbera vatten från den varma änden men att det även upptäcktes i de provkropparna som till ca 3/4 var i kontakt med vatten. Detta är inget problem om den varma sidan förblir varm. Men om den varma sidan någonsin skulle utsättas för frosttemperaturer finns det en stor risk för frostsador.

10 Fortsatta studier

Som komplettering till genomförda mätningar skulle det vara av vikt att kontrollera om det finns någon skillnad av absorption vid höga temperaturer närmare $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ kanske ända upp till $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. För i dessa experiment har en ökad absorption skett vid ökande temperaturer vilket kan hänvisas till nedbrytandet av bitumentejpen men för att vara på den säkra sidan skulle det ha varit givande att prova. Liksom det vore intressant att undersöka Temperaturgradient MINUS på två olika sätt. I det ena fallet utförs viktmätningar så som de har genomförts under detta experiment. I det andra fallet har man samma uppställning men denna gång utan att man väger provkropparna, vilket betyder att proverna inte får chans att tina. På så vis skulle man kunna se hur stor inverkan perioderna under tining och pumpningseffekten har på absorptionen.

För liknande undersökningar i framtiden bör vissa ändringar göras. Det första är att bitumentejpen bör bytas, exempelvis mot epoxylim. Epoxy är ett material som förhindrar inträngning, inte absorberar fukt själv och är beständigt i miljöer med betong och vatten under värme och kyla. Våttiderna bör även arrangeras så att de blir lika långa för alla uppställningar. Dessutom skulle undersökningarna behöva pågå under en längre tid än i denna studie bland annat eftersom resultaten visade på att provkropparna kunde ha absorberat mer om de fått mer tid på sig. Undersökningen skulle även ha med fördel ha gjorts med lägre temperaturer och längre perioder av plus- och minusgrader. Det kan även vara givande att samla bevis för eller emot isbildning med längdändringsmätning eller lågtemperaturkalorimetri för att kunna säkerställa orsaken till resultaten. Sedan kan det finnas mening i att kontrollera fler betongrecept. Kanske vct 0,5 och 0,55 med och utan luft för att ta reda på vad för kvalité på betong som är bra nog till vattenbyggnadsbetong.

Fortsatt forskning bör inkludera ett fall där man undersöker hur absorptionen påverkas av en temperaturgradient som ligger över fryspunkten. På samma sätt som temperaturväxling skedde ovanför fryspunkten i denna undersökning.

Referenser

- Burström, Per Gunnar. *Byggnadsmaterial - Uppbyggnad, tillverkning och egenskaper*. Studentlitteratur, Lund, 2007. ISBN 978-91-44-02738-8.
- Fagerlund, Göran. Fuktmekaniska egenskaper. I: *Betonghandboken* Sandahl och Fagerlund (1982). ISBN 91-7332-060-9.
- Fagerlund, Göran. Struktur. I: *Betonghandboken* Sandahl och Fagerlund (1982). ISBN 91-7332-060-9.
- Fagerlund, Göran. *Betongkonstruktioners Beständighet - En översikt*. Cementa AB, Uppsala, 1992. ISBN 91-87334-00-3.
- Fagerlund, Göran. A service life model for internal frost damage in concrete. Teknisk rapport, Avdelningen för byggnadsmaterial, LTH, Lund, 2004. TVBM-3119.
- Fagerlund, Göran. Frostbeständighet. I: *Kompendium i Byggnadsmaterialvetenskap* Fagerlund (2008).
- Fagerlund, Göran. Fukt och Porer Del I. Adsorption. I: Fagerlund (2008).
- Fagerlund, Göran. Fukt och Porer Del II. Kapillärphenomen. I: *Kompendium i Byggnadsmaterialvetenskap* Fagerlund (2008).
- Fagerlund, Göran. Fukt och Porer Del III. Transportfenomen - Huvudsakligen av fukt. I: *Kompendium i Byggnadsmaterialvetenskap* Fagerlund (2008).
- Fagerlund, Göran. *Kompendium i Byggnadsmaterialvetenskap*. Avdelningen för byggnadsmaterial, LTH, Lund, 2008.
- Fridh, Katja. *Internal frost damage in concrete-experimental studies of destruction mechanisms*. Doktorsavhandling, Lunds tekniska högskola, Lund, 2005.
- Helmuth, RA. Dimensional changes of hardened Portland cement pastes caused by temperature changes. I: *Highway Research Board*, band 40, ss 315–336, 1960.
- Jacobsen, Stefan. *Scaling and cracking in unsealed freeze/thaw testing of Portland cement and silica fume concretes*. Doktor ingeniöravhandling, NTH, Trondheim, Norge, 1995.
- Jacobsen, Stefan. Calculating liquid transport into high-performance concrete during wet freeze/thaw. *Cement and Concrete Research*, 35(2):213–219, 2005.
- Åke Engström. *Betong i vattenkraftanläggningar*. Utvecklingsstiftelse VAST, Uppsala, 1991.
- Klieger, Paul. Air-entraining admixtures. *Transportation Research*, 12:530–542, 1970.
- Nilsson, Lars-Olof. Hygroscopic moisture in concrete-drying, measurements & related material properties. Teknisk rapport, Avdelningen för byggnadsmaterial, LTH, Lund, 1980. TVBM-1003.

- Person, Mikael och Rosenqvist, Martin. Frostsprängning i betongdammar - inverkan av frostsprängning till uppkomna skador vid vattenlinjen hos betong i vattenkraftverk. Teknisk rapport, Avdelningen för byggnadsmaterial, LTH, 2009. TVBM-5074.
- Sandahl, Evert och Fagerlund, Göran. *Betonghandboken*. Svensk byggtjänst och Cementa AB, Stockholm, 1982. ISBN 91-7332-060-9.
- Verbeck, G.J. Hardened concrete-pore structure. *ASTM Special Technical Publication*, 169, 1956.
- Winslow, D.N., Cohen, M.D., Bentz, D.P., Snyder, K.A., och Garboczi, E.J. Percolation and pore structure in mortars and concrete. *Cement and concrete research*, 24(1):25–37, 1994.

A Bilaga - Bilder över experimentens utformning



(a) Frysens



(b) Varmt isolerat vattenbad

Figur 36: Uppställning i frys för Fall 4 och 5



(a) Fall 4



(b) Fall 5

Figur 37: Skillnad i uppställning i frys för Fall 4 och 5