



CHALMERS

Tillämpad framtagning av sorptionsisotermer för cementlösa bindemedel

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Samhällsbyggnadsteknik

ERIK OLAUSSON

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGANDSTEKNIK

AVDELNINGEN FÖR BYGGNADSTEKNOLOGI

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2021

www.chalmers.se

EXAMENSARBETE ACEX20

Tillämpad framtagning av sorptionsisotermer
för cementiösa bindemedel

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Samhällsbyggnadsteknik*

ERIK OLAUSSON



CHALMERS

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för Byggnadsteknologi Byggnadsmaterial
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2021

Tillämpad framtagning av sorptionsisotermer för cementlösa bindemedel

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Samhällsbyggnadsteknik

Erik Olausson

© ERIK OLAUSSON 2021

Examensarbete ACEX20

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Chalmers tekniska högskola 2021

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för byggnadsteknologi

Chalmers tekniska högskola

412 96 Göteborg

Telefon: 031-772 10 00

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Göteborg 2021

Tillämpad framtagning av sorptionsisotermer för cementlösa bindemedel
Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Samhällsbyggnadsteknik

Erik Olausson

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för byggnadsteknologi
Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

I takt med en ökad användning av betong med "gröna" bindemedel, som delvis ersätter vanlig cement för att minska klimatpåverkan, har det tyvärr visat sig att allt fler byggprojekt haft svårt att uppnå en önskad uttorkningstid. Samtidigt lanseras det ständigt nya produkter på marknaden av betongtillverkarna och materialkunskaperna har börjat släpa efter som en konsekvens av detta. Uppdaterade sorptionsisotermer, som är vital mätdata för ett materials fuktegenskaper, saknas i stor del på dessa nya byggnadsmaterial. Samtidigt är det tidsödande, alternativt dyrt, att producera nya sorptionsisotermer och det saknas en vedertagen metod.

Med bakgrund av den allmänt bristande kunskapen kring dessa byggnadsmaterial samt en bristande konsensus i forskarvärlden genomförs ett större forskningsprojekt, "Water in "Green" Cementitious Materials", på Chalmers Tekniska Högskola under ledning av Professor Lupin Tang. Detta examensarbete utgör en förstudie med syftet att undersöka praktiskt tillämpliga metoder för att utvärdera materialens fuktegenskaper och uppdatera praktiska kunskaper inför huvudprojektet. Den klassiska metoden med klimatboxar anpassades och desorptionsisotermer togs fram på ett begränsat antal hårdnade och krossade cementpaster med olika mineraltillägg och vattencementtal. Karbonatisering av provkropparna försökte undvikas i största mån under hela laborationsförloppet och en indikation av hydratationsgrader togs fram. Resultaten jämfördes först relativt mot varandra med vanlig OPC som bas och sedan mot tidigare resultat tagna ifrån en litteraturstudie. Skrymdensitet och indikation av karbonatisering av provkropparna togs fram på ett urval av blandningarna.

Tidsbristen för laborationsdelen av projektet medförde att desorptionsisotermerna inte blev kompletta med önskat antal mätpunkter men metoden visade sig ändå vara ett tillämpligt och ekonomiskt alternativ tillsammans med bra rutiner och riktlinjer. Ett intressant resultat visar hur klimatet för respektive klimatbox påverkar proverna under själva provtiden. Experimenten gav en indikation på att ett torrare klimat medförde en ökad mängd kemiskt bundet vatten mellan 105–350 °C.

Ren cementpasta är inget representativt material som betong men om ballastkompositionen och övriga blandningsförhållanden hålls konstanta med endast skillnad av bindemedel kan en relativ jämförelse och analys göras. Då vanlig OPC är ett jämförelsevis välstuderat material kan nya cementmaterial jämföras relativt mot detta. Betongtillverkare eller andra aktörer kan därför själva lätt och relativt snabbt undersöka hur ett nytt materials fuktegenskaper ställer sig med avseende på dess sorptionsisoterm. Det komplicerade laborationsförfarandet visar dock att en vedertagen metod behövs inom industrin då små skillnader i metoden kan ge stora skillnader i resultatet, vilket leder till att sorptionsisotermer som framtagna utan redovisat förfarande inte är jämförbara.

Nyckelord: Sorptionsisoterm, Sorptionskurva, Cementpasta, Klimatförbättrad betong, Gröna bindemedel, Flygaska, Slagg, Klimatbox, Desickator, DVS (Dynamic Vapour Sorption), Betonguttorkning, Fuktegenskaper, Karbonatisering

Applicable methods for producing sorption isotherms for cementitious materials
Degree Project in the Engineering Programme
Civil and Environmental Engineering

Erik Olausson

Department of Architecture and Civil Engineering
Division of Building Technology
Building material
Chalmers University of Technology

ABSTRACT

As the use of concrete with “green” binders, as a partial replacement for regular cement, are becoming more prevalent it has, unfortunately, also become apparent that a larger number of construction projects are having difficulties with reaching an appropriate drying time with these building materials. Meanwhile, new products are constantly being launched into the market and the material knowledge is lagging as a result. Updated sorption isotherms, which are vital data for a material's moisture property, are missing on these building materials while it's simultaneously time consuming, alternatively expensive, to produce new sorption isotherms. An established method for this kind of material is needed.

With the intention of mitigating these issues and due to the lack of consensus in the scientific community a larger research project, “Water in “Green” Cementitious Materials”, is taking place at Chalmers University of Technology under the supervision of Professor Lupin Tang. This bachelor thesis constitutes a preliminary study with the aim of examining practical and applicable test methods for evaluating the water state and behaviour of these “green” binders and refresh the practical knowledge as a preparation for the main project. The classical method of using climate boxes with saturated salt solutions was custom made for the conditions and desorption isotherms were produced on a limited amount of hardened crushed cement pastes with different mixes of “green” binders and w/b. Carbonation was avoided to the greatest extent as possible throughout the laboratory procedure and an indication of the degree of hydration were also produced for the different mixes. With Ordinary Portland Cement (OPC) as a foundation the results were primarily compared and analysed relative to each other and then secondary to previous results taken from a literature study. Specific density and indication of the degree of carbonation were produced on a few selected mixes.

The time constraint of the experimental part of this project lead to incomplete desorption isotherms with a fewer number of data points than desired, but the custom made method with climate boxes was still shown to be an applicable and economical alternative together with a few improvements and a written routine with guide lines for the laboratory plans. An interesting result showed how the different climates, that the samples are subjected to, affects them during the test period. The experiments showed an indication that a dryer climate increased the amount of chemically bound water between 105-350 °C.

Pure hardened cement paste is not a representative material as concrete but if the aggregate composition and other mixing condition are kept constant with only a different type of binder, a relative comparison and analysis can be made. Because regular OPC is a rather well studied

material, new “green” binders can be compared towards it. Consequently, concrete manufactures and other actors on the market can themselves rather quickly examine how a new cementitious material compares regarding its moisture properties derived from its sorption isotherm. This study also shows the need for an established method since small differences in the methods can make big differences in the results, thus making different sorption isotherms made without clear procedure non comparable.

Key words: Sorption isotherm, Sorption curve, Cement paste, Climate improved concrete, SCM (Supplementary Cementitious Material), Green binders, Fly Ash, Slag, Climate box, Desiccator, DVS (Dynamic Vapour Sorption), Concrete drying, Moisture properties, Carbonation

Innehåll

1. Inledning.....	12
1.1 Bakgrund.....	12
1.2 Syfte	12
1.3 Avgränsningar.....	13
1.4 Frågeställningar	13
1.5 Tidigare forskning.....	14
2. Grundläggande fuktteori	16
2.1 Ånghalt.....	16
2.2 Fukthalt & fuktkvot.....	16
2.3 Diffusion	16
2.4 Porstorlek.....	17
2.5 Kapillärkondensation & kelvinekvationen	17
2.6 Fuktjämvikt.....	19
2.7 Hygroskopiskt fukt.....	20
2.8 Grundläggande matematisk modell	21
2.9 Betongkemi	22
2.10 Hydratation.....	23
2.11 Karbonatisering.....	24
2.12 Vattencementtal.....	25
3. Metod.....	27
3.1 Arbetsgång	27
3.2 Blandningsförfarande och gjutning.....	28
3.3 Krossning och siktning	31
3.4 Våtlagring	32
3.5 Saltlösningar	33
3.6 Koldioxidabsorbent	35
3.7 Vakuumsugning.....	36
3.8 Klimatboxar	37
3.9 Klimatisering.....	38
3.10 Fuktkvotsbestämning.....	39
3.11 Indikation av kemiskt bundet vatten.....	41
3.12 Indikation av kalciumhydroxidhalt och karbonatiseringsgrad.....	42
3.13 Skrymdensitet, fuktkvot vid kapillärmättnad & total vattentillgänglig porositet	43
3.14 Känslighetsanalys.....	43
3.15 Förbättringsförslag på provningsmetod och laborationsförfarande.....	44

4.	Resultat & analys	46
4.1	Desorptionsisotermer.....	46
4.2	Indikation av kemiskt bundet vatten.....	53
4.3	Indikation av kemiskt bundet vatten, kalciumhydroxid och karbonatiseringsgrad	54
4.4	Skrymdensitet.....	56
4.5	Fuktkvot vid vattenmättnad och total vattentillgänglig porositet	57
4.6	Sammanställning av resultat.....	58
5.	Slutsats.....	59
	Referenslista.....	60
	Bilagor.....	62

Förord

Detta examensarbete utgör 15 högskolepoäng på högskoleingenjörsutbildningen Samhällsbyggnadsteknik vid Chalmers Tekniska Högskola och genomfördes på avdelningen för byggnadsteknologi ihop med forskargruppen för byggnadsmaterial.

Jag vill framför allt tacka mina stöttande klasskamrater som har följt med mig sedan tekniskt basår här på Chalmers Tekniska Högskola. Deras stöd och vänskap har varit ovärderligt och gjort min utbildningstid till ett fint minne att ha med in i framtiden. Jag vill ge ett stort tack till min examinator, professor Lupin Tang, samt min handledare, lektor Ingemar Segerholm, som tog med mig på detta spännande projekt, vilket har cementerat mitt intresse för byggnadsfysik och kemi. Det ska bli ett sant nöje att följa upp deras framtida forskning.

Denna långa resa under de speciella omständigheter som rådande pandemi har medfört sätter nu punkt på ett bitterljuvt kapitel.

Göteborg, januari 2021

Erik Olausson

Förkortningar

α - Hydratationsgrad

C-S-H - Kalciumsilikathydrat, cementgel

DVS - Dynamic Vapour Sorption, gravimetrisk sorptionsvåg

FA - Flygaska

LL - Limestone filler, kalkstensmjöl/kalkstensfiller

OPC - Ordinary Portland Cement

RF - Relativ fuktighet

SCM:s - Supplementary Cementitious Materials, mineraltillägningar

SL - Ground-granulated blast-furnace slag (GGBS), granulerad masugnsslagg

VBT - Vattenbindemedeltal

VCT - Vattencementtal

W/B - Water to binder ration, samma som VCT

1. Inledning

1.1 Bakgrund

Betongtorkning är ofta en flaskhals för produktionen inom byggindustrin och är en faktor som i högsta grad påverkar den slutliga byggtiden om fuktsäkert byggande med avseende på ytskiktsbeläggning ska uppnås. I takt med en ökad användning av klimatförbättrad betong har det tyvärr visat sig att allt fler byggprojekt haft svårt att i förväg uppskatta och uppnå en önskad torkningstid. Sorptionsisotermer som är vital mätdata för datorbaserade modeller för torkning och omfördelningsberäkningar saknas i stor del på dessa relativt nya byggnadsmaterial. Det är även tidsödande, alternativt dyrt, att ta fram nya sorptionsisotermer. Samtidigt lanserar betongtillverkare hela tiden nya produkter med olika typer och andelar av mineraltillägg med konsekvensen att befintlig data i beräkningsmodellerna snabbt blir förlegade.

Detta projekt utgör en del av det större forskningsprojektet "Water in "Green" Cementitious Materials" på Chalmers Tekniska Högskola som genomförs under ledning av professor Lupin Tang. Målet för huvudprojektet är att hantera det generella problemet med bristfällig kunskap om vattnets beteende i "gröna bindemedel". Ett delprojekt är att undersöka praktiskt tillämpliga metoder för att utvärdera fuktegenskaper samt att fastställa lämpliga modeller för vattnets tillstånd och beteende i cementlösa bindemedel. Praktiska kunskaper kring det nödvändiga laborationsarbetet behöver därför uppdateras och gås igenom på nytt inför det större forskningsprojektet.

1.2 Syfte

För att mildra konsekvenserna av ovanstående problemställning, bibehålla industrins intresset av klimatförbättrade alternativ till ren cement och samtidigt säkerställa ett fuktsäkert byggande behövs uppdaterade och relevanta sorptionsisotermer.

Sorptionsisotermer tar lång tid att framställa med traditionell metod och snabbare inmätning kan numera göras med s.k. sorptionsvågar, dessa maskiner är dock dyra och kan endast hantera ett prov åt gången. En förstudie om praktiskt tillvägagångsätt med anpassad och påskyndad traditionell mätmetod med klimatboxar som ett tillämpligt alternativ ska därför undersökas i detta projekt och laborationsförfarandet gås igenom grundligt. Erhållna praktiska kunskaper ska sedan föras vidare ifrån denna förstudie till huvudprojektet.

Laborationsprocessen utgör tidsmässigt den större delen av denna förstudie och producerad mätdata, d.v.s. sorptionsisotermerna på utvalda blandningar av cementlösa bindemedel ska analyseras relativt mot varandra. Mätmetoderna i detta projekt ska anpassas och utvärderas med avseende på tillämplighet, tidsåtgång och kvalitet. Hur mätmetodens förfarande, härdningsklimat och karbonatisering inverkar på uppmätta resultat undersöks. Rutiner för att undvika karbonatisering ska utvärderas och förslag på vidareutveckling av mätmetoden ska stå som bas för det fortsatta forskningsprojektet på Chalmers Tekniska Högskola.

1.3 Avgränsningar

Endast sorptionsisotermer i uttorkningsriktning, s.k. desorptionsisotermer, tas fram på grund av begränsade tidsramar och resurser i denna förstudie. Projektet begränsas till en mätmetod och för slutlig utvärdering av mätmetoden krävs jämförelse med sorptionsisotermer på samma typ av provmaterial framtagna med andra mätmetoder för en fullständig validering.

Tidsramen sätts till stor del av själva mätmetoden som kommer att för detta projekt ges 2 månader samt förgående gjutning och hydratation. Minst 4 olika och jämnt fördelade mätpunkter för sorptionsisotermen eftersträvas och endast en isoterm på 20 °C mäts in.

Ingen betong behandlas i det här projektet och endast krossad cementpasta utan ballast mäts in. För att underlätta den relativa analysen av datan producerad i det här projektet ska cementpastan OPC med olika vattencementtal stå som bas för jämförelse med de klimatförbättrade alternativen. Totalt 11 olika typer av cementpasta med olika blandningsproportioner och vattencementtal ska testas. Endast en provserie innehåller flygaska då detta är en produkt som antas successivt fasas ut i takt med att kolkraftverken i världen fasas ut. Provkropparna kommer att vara unga vid inmätning, med en ålder under 4 mån och indikation av andel kemiskt bundet vatten tas fram för en relativ jämförelse.

1.4 Frågeställningar

1. Är metoden tillämplig och hur kan den anpassas för att mäta in cementlösa material?
2. Vad är tidsåtgången för att uppnå fuktjämvikt med små och krossade provkroppar och kan proceduren påskyndas ytterligare?
3. Hur kan karbonatisering undvikas under samtliga laborationssteg?
4. Hur påverkar mätmetoden och klimatboxarna provkropparnas hydratation och dess desorptionsisotermer?
5. Hur kan metoden som används i denna förstudie förbättras och vad ska beaktas?
6. Hur ställer sig producerade desorptionsisotermer och övrigt resultat gentemot tidigare studier?

1.5 Tidigare forskning

1. Forskning kring påverkan av "gröna bindemedel" i betong har gjorts i viss utsträckning men relevanta sorptionsisotermer har börjat släpa efter sedan Göran Hedenblads inmätningar under 90-talet (Hedenblad, 1996). Rent allmänt är det svårt att hitta sorptionsisotermer på dessa material, möjligtvis på grund av att det är så tidskrävande att framställa.
2. Sorptionsisotermer på cementpasta med flygaska och olika andelar sandballast mättes in 1989 med hjälp av klimatboxar med 2,5 mm sågade skivor (Xu 1989). Proverna utsattes för olika grader av koldioxidhalt och fuktjämvikt uppnåddes efter ca 2 månader. Prover som var mer karbonatiserade påvisade ett lägre fuktinnehåll på grund av förtätning utan ökning av dess specifik yta.
3. Desorptionsisotermer på högpresterande betong togs fram 1997 utan att vänta på fuktjämvikt för att kunna ta fram fuktegenskaper på mycket ung betong (Mjörnell 1997). Krossad cementpasta användes som koldioxidabsorbent i klimatboxarna och RF bestämdes på varje prov med en RF-sensor med ett icke-hygroskopiskt filter istället för att vänta på jämvikt med saltet.
4. Sorptionsisotermer med scanningskurvor på betong med vct 0,55 och 0,65 mättes in 2007 med DVS-metod (Åhs, 2007). Scanningskurvorna visade att desorptionsisotermer verkar påverkas av materialets fukthistoria (Åhs, 2007).
5. 2019 mättes sorptionsisotermer med scanningskurvor in på små prover med DVS-metod på krossad Bascement "utan synliga ballastkorn" i SBUF:s projekt för PPB-beräkningsmodul (Stelmarczyk, Rapp, Hedlund, Carlström 2019). Resultaten har dock varit kontroversiella inom forskarvärlden (Nilsson, 2020) och det verkar fortfarande inte råda någon konsensus kring den gröna betongens materialegenskaper, framförallt med avseende på dess täthet.
6. 2018 mättes sorptionsisotermer in på cementblandningar med sandballast av OPC, silikastoft och slagg i olika vattencementtal och åldrar (Olsson, Nilsson, Åhs, Baroghel-Bouny, 2018). Sorptionsisotermerna togs på provkropparna som var skivade diskar av dimensionerna 50x15 mm. Resultaten påvisar att cementblandningar med slagg får en mer markant ändring i form av tätare porstruktur och flackare kurva för högre RF i takt med ökad ålder, i detta fall ifrån 8 mån till 4 år.
7. I en ny SBUF-slutrapport (Linderoth 2019) sammanfattas och påvisas en del intressanta resultat att jämföra med. Flygaskaersättning verkar minska mängden kemiskt bundet vatten och minska bindemedlets reaktivitet i tidig ålder samt att mängden fysikaliskt bundet vatten ökar i jämförelse med ren OPC. Effekten verkar vara mer framträdande för cementblandningar med högt innehåll av flygaska.
8. Under 80 % RF och nedåt verkar hydratation vara succesivt avtagande (Powers, 1947), detta bekräftas även av flertalet efterföljande studier.

2. Grundläggande fuktteori

2.1 Ånghalt

Den maximala mängden vattenånga som kan finnas i en volymkropp luft är temperaturberoende och benämns som mättnadsånghalten, $v_s(T)$ [$\frac{kg}{m^3}$] (Burström, 2006). En högre temperatur medför att luften kan innehålla mer vattenånga. Förhållandet mellan den aktuella ånghalten, ϑ , och mättnadsånghalten $v_s(T)$ definieras som den relativa fuktigheten, RF [%]:

$$RF = \frac{\vartheta}{v_s(T)} \quad [1]$$

Om fukt tillförs och mättnadsånghalten överskrider kondenseras den överflödiga vattenångan, på samma sätt kan alltså fukt fällas ut om temperaturen sänks. Den relativa fuktigheten kan därför inte överskrida 100 %.

2.2 Fukthalt & fuktkvot

Fukthalten, w , i ett material definieras som:

$$w = \frac{w_{ev}}{V} \quad [2]$$

där

w_{ev} = det förångningsbara vattnets vikt [kg], vatten som avgår vid upphettning till 105 °C
 V = materialets volym [m^3]

Fuktkvoten, u [%], i ett material definieras som:

$$u = \frac{w_{ev}}{m_{dry}} = \frac{W}{\rho_{dry}} \quad [3]$$

där

m_{dry} = massans torrsvikt [kg], vikt efter upphettning till 105 °C

ρ_{dry} = materialets torra skrymdensitet [$\frac{kg}{m^3}$], baserat på vikt efter upphettning till 105 °C

Det är värt att nämna att för vissa material avgår även kemiskt bundet vatten innan 105 °C, till exempel för gips (Burström, 2006). Det finns misstankar om att betong kan påvisa samma beteende (Feldman, Ramachandran, 1971)

2.3 Diffusion

Fukt strävar efter att hamna i jämvikt och diffusion beskriver hur fukt rör sig från ett område med hög ånghalt till ett område med lägre ånghalt utan inverkan av termiska eller mekaniska luft rörelser. Detta sker genom att luftmolekyler byter plats med vattenmolekyler (Burström,

2006). Fuktflödestätheten, g [$\frac{kg}{m^2s}$], i ett lager av stillastående luft med ånghaltsskillnaden som den drivande potentialen beskrivs av Fick's lag:

$$g = D \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{d} \quad [4]$$

där

D = transportkoefficienten för vattenånga i luft [$\frac{m^2}{s}$]

d = tjockleken av lagret av stillastående luft [m]

Termen $\frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{d}$ kan sättas som ånghaltsgradienten, $\frac{dv}{dx}$, och beskriver hur ånghalten förändras sig ifrån materialets fria yta och ned i djupet. Vi får då det mer generella uttrycket:

$$g = -D \frac{dv}{dx} \quad [5]$$

När diffusion sker genom ett poröst materials porer definieras transportkoefficienten som δ_v [$\frac{m^2}{s}$] och beskriver materialets täthet. Transportkoefficienten är icke konstant och ökar kraftigt med höga RF då s.k. kapillärporer bildar en sammanhängande och blockerande vattenfas, som minskar diffusionen men samtidigt ökar fukttransporten i vätskefas (Burström, 2006).

2.4 Porstorlek

Fukttransport sker huvudsakligen via kapillärporerna som definieras som sammanhängande porer med en storlek på ca 0,1–100 μm (Burström, 2006). För cementiösa bindemedel utgör kapillärporerna resterna av uttorkat blandningsvatten.

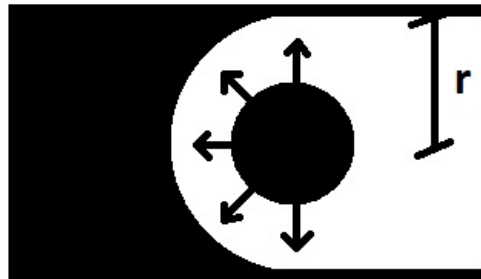
Genom att torka och därefter ta bort eventuella luftblåsor ur ett material med hjälp av vakuum och därefter fylla det öppna porsystemet med vatten, s.k. vakuummättning, kan porvolymen i ett material tas fram (Burström, 2006). Viktökningen från det torra tillståndet tillsammans med vattnets densitet motsvarar då porvolymen. Hur stor andel av porvolymen som finns i ett viss porstorleksintervall (frekvensen) alt. hur stor volymandel av porerna som är under en viss porstorlek (summaporositet) kännetecknas som porstorlekdistributionen (Burström, 2006). Porstorlekdistributionen förklarar därför hur olika materials fuktegenskaper skiljer sig från varandra.

Ju mindre por- eller partikelstorlek ett material har desto mer s.k. specifik yta har det om porositeten förblir konstant. Den specifika ytan beskriver materialets totala omslutningsarea runt om partiklarna och i porsystemet per massaenhet. En tätare porstruktur ökar den specifika ytan vilket kan binda upp mer fukt som följd.

2.5 Kapillärkondensation & kelvinekvationen

Kondens i fina kapillärporer kan uppstå via något som kallas för kapillärkondensation (Burström, 2006). Kapillärkondensationen kan förklaras med ett samband mellan porradie och relativ fuktighet som beskrivs av den s.k. Kelvinekvationen.

Kelvinekvationen visar hur förändringen i ångtryck påverkas av en krökt vattenyta, se figur 2.1, och kopplar på så vis samman den relativa fuktigheten och porens radie (Burström, 2006). Porradien beskriver teoretiskt att vid ett visst förhållandet, som beskrivs i högerled i ekvation 6, så har allt vatten i porer med en större radie kondenserats, alt. är porstorlekar lika med eller under denna cylinderradie fyllda med vatten.



Figur 2.1: Principiell illustration av en vattenmolekyls attraktionskrafter mot en konkav vattenyta i ett cylinderformat rör med radien r . En mindre cylinderradie medför en mer krökt vattenyta som kan kondensera vattenånga under 100 % RF.

Kelvinekvationen:

$$r_k = - \frac{2\gamma M_w}{RT \rho_w \ln \frac{v}{v_s(T)}} \quad [6]$$

där

r_k är kelvinradien (vattenytan krökningsradie) [m].

γ är ytspänningen [J/m^2].

M_w är vattnets molvikt [kg/mol].

R är gaskonstanten [$\text{J}/\text{mol}\cdot\text{K}$].

T är temperaturen [K].

ρ_w är vattnets densitet.

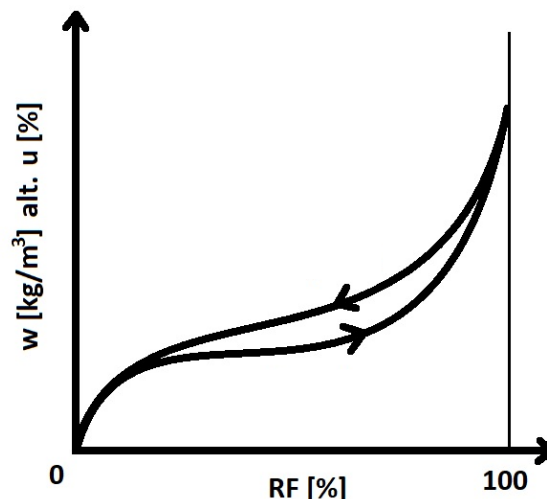
Om den RF, $\frac{v}{v_s(T)}$, löses ut ur ekvation 6, framträder det att det krävs en krökningsradie, r_k , för att vatten ska kunna kondensera. En befintlig material- eller vattenyta behövs alltså för att en vattendroppe ska kunna kondenseras fram (Burström, 2006).

I ett poröst cementmaterial blir vattenytan i porerna konkav då vattenmolekylerna i porerna adsorberas till porväggar. En konkav porradie definieras som negativ och det absoluta ångtrycket är då mindre än mättnadsångtrycket. När porstorleken och krökningsradien ökar och blir mycket stort sänks det absoluta ångtrycket ned mot mättnadsångtrycket. Förhållandet mellan det absoluta ångtrycket och mättnadsångtrycket är detsamma som den relativa fuktigheten. Detta förhållande kan användas för att beskriva kapillärkondensationen i porer då mättnadsångtrycket blir beroende av radien på vattenytans krökning.

2.6 Fuktjämvikt

Ett material som tar åt sig fukt från luft benämns som hygroskopiskt och hur mycket vatten som ett hygroskopiskt material kan ta upp och fixera från luften begränsas av det s.k. hygroskopiska området, ca 0 till 98 % RF (Hagentoft, 2012).

Hygroskopiska material som befinner sig i samma utrymme strävar att gå mot fuktjämvikt med omgivande luft och beroende på materialens fukttinnehåll och luftens relativa fuktighet innebär detta uppfuktning (absorption) eller uttorkning (desorption) (Burström, 2006). Det medför att om luftens RF minskar så avger materialet fukt tills jämvikt uppnås och om luftens RF ökar så upptar materialet fukt tills jämvikt uppnås. När fuktutbytet upphör så är fuktjämvikt uppnått och den relativa fuktigheten är samma i materialet som i det medium och källa som utbytet har skett med, i detta fall luften. Detta samband för olika material beskrivs med en jämviktsfuktkurva, även kallad sorptionsisoterm eller sorptionskurva, se figur 2.2.



Figur 2.2: Principiell skiss av en sorptionsisoterm. Visar jämviktsfukthalten, w_e [$\frac{kg}{m^3}$] alternativt jämviktsfuktkvoten, u_e [$\frac{kg}{kg}$, %], som en funktion av RF vid en bestämd temperatur (isoterm). Observera att desorptionsisotermen ligger över adsorptionsisotermen.

Observera en skillnad mellan fukttinnehållet vid uttorkningen på desorptionskurvan och uppfuktningen på adsorptionskurvan. Denna företeelse, som gör det svårare för material att släppa från sig vatten än att ta upp, benämns som hysteres (Burström, 2006). Övergången och växlingen till och från desorption och absorption beskrivs med en s.k. scanningskurva.

Tangenten på kurvan vid en punkt kallas för fuktkapaciteten och är ett mått på materialets buffringsförmåga av fukt. Den beskriver hur stor mängd fukt som behöver tas upp eller avges i ett material för att ändra dess RF med 1 procentenhet. En stor lutning på kurvan vid ett RF-område betyder därför att små skillnader i RF ger stora skillnader med avseende på materialets fukttinnehåll. Tvärtom kan det ses som att mindre tillskott av fukt vid hög lutning av kurvan inte påverkar materialets RF nämnvärt.

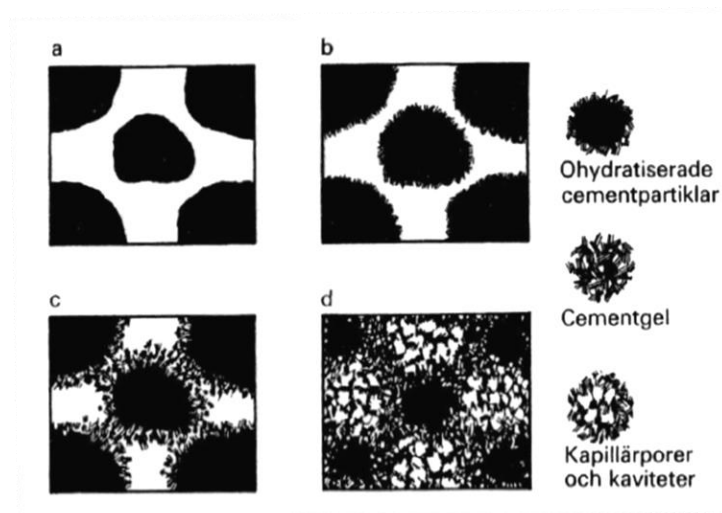
Från de låga RF-intervallen till de högre RF-intervallen adsorberas vattenmolekylerna i enskilda molekyllager upp till flera molekyllager inom det hygroskopiska området (Burström, 2006). De mindre porerna kommer därför att fyllas upp före de större. Visuellt blir det tydligt att kurvan snabbt blir brantare i högre RF-intervall i takt med att materialets kapaciteten för vattenadsorption ökar med de större porerna.

2.7 Hygroskopisk fukt

Hur mycket hygroskopisk fukt som binds in i ett material beror på tre saker (Burström, 2006):

1. Molekylstruktur
2. Materialets temperaturberoende
3. Porstruktur

Molekylstrukturen kan förändras av vatten om materialet är organiskt, vilket beror på att vattenmolekyler tränger in och ändrar molekylstrukturens volym (Burström, 2006). En högre temperatur i materialet sänker jämviktsfuktkurva och temperaturens påverkan skiljer sig även här främst mellan organiska och oorganiska material inom normala temperaturspann (Tveit, 1996). Porstrukturen är dock det som gör att olika material skiljer sig väsentligt och den stora andelen mikroskopiska porstorlekar i cementlösa material förklarar därför dess hygroskopiska egenskaper. Då Kelvinekvationen kopplar samma porradie och RF-nivå kan därför porstorleksfördelningen som summaporositet kopplas till kurvan tillsammans med tjockleken av det adsorberade vattnet. Samma form på sorptionsisotemer för material med liknande kemisk uppsättning indikerar därför på en liknande porstorleksdistribution och porstruktur. En hög sorptionsisoterm vid RF-nivåns mittenspann är därmed analogt med en hög specifik yta och en finare porositet. Kapillärporerna ger plats för mycket vatten, vilket syns på hur sorptionsisotermen ökar kraftigt vid höga RF-nivåer.



Figur 2.3: Hydratation av en cementpartikel och dess strukturutveckling med en ökande specifik yta som följd (Fagerlund 1994).

En större specifik yta, t.ex. för finmalt cementpulver eller fina cementsättningsprodukter ökar även dess reaktivitet med vattnet. I takt med att cementpastan hydratiserar och binder upp vattenmolekyler kemiskt, bildas en finporös cementgel som växer utåt från

cementkornen vilket gör cementpastan tätare och ökar dess specifika yta, se figur 2.3 ovan. Vattenmolekyler i dessa fina porer är hårt bundna och dessa s.k. gelporer är redan vattenmättade runt 40–50 % RF (Burström, 2006). En högre hydratationsgrad innebär därför att gelporer har ersatt volymandel av kapillärporer, detta syns på sorptionsisotermen som blir lägre vid höga RF där kapillärporer dominerar och stiger vid låga RF där gelporerna dominerar fuktbindningen.

Ett salt blir hygroskopiskt vid givet RF och temperatur, detta RF varierar mellan olika salter, se tabell 1. I ett slutet luftutrymme kan därför olika mättade saltlösningar hamna i jämvikt och upprätthålla konstanta och exakta RF-nivåer i luften (Greenspan, 1977).

Tabell 1: Relativ fuktighet för ett urval av mättade saltlösningar vid 20 °C och dess osäkerhet (Greenspan 1977)

Salt	Beteckning	RF %
Litiumklorid	LiCl	11,31 ± 0,31
Magnesiumklorid	MgCl ₂	33,07 ± 0,18
Magnesiumnitrat	Mg(NO ₃) ₂	54,38 ± 0,23
Natriumklorid	NaCl	75,47 ± 0,14
Kaliumklorid	KCl	85,11 ± 0,29
Kaliumsulfat	K ₂ SO ₂	97,59 ± 0,53

2.8 Grundläggande matematisk modell

Vid fuktberäkningar är tillstånd sällan stationära och materialets och luftens fuktillstånd ändras med tiden i takt med att materialet torkas ut eller fuktas upp och när omgivningens klimat förändras. Fukthalten i varje litet delement av materialet förändras med varje litet tidssteg med ett fuktflöde in och ur sammankopplade element. Fuktberäkningar behöver därför lösas med numerisk metod med olika randvillkor, val av geometrisk upplösning och tidssteg (Nilsson, 2018). Den rent matematiska basen för modellen är massbalansekvationen (Hagentoft, 2012) som är en partiell differentialekvation:

$$\frac{\partial W_e}{\partial RF} \frac{1}{v_s(T)} \frac{\partial v}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left(-\delta_v \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad [8]$$

Härledning:

En-dimensionell massbalansekvation som beskriver fukthaltsförändringen:

$$\frac{\partial W_e}{\partial t} = - \frac{\partial g}{\partial x} \quad [9]$$

med

$$g = -\delta_v \frac{\partial v}{\partial x} \quad [10]$$

där

g = fuktflödestäthet från diffusion [$\frac{kg}{m^2s}$]

δ_v = transportkoefficienten [$\frac{m^2}{s}$], beskriver materialets täthet, icke konstant
 $\frac{\partial v}{\partial x}$ = ånghaltsgradienten

Kedjeregeln i vänsterled på ekvation 9 ger:

$$\frac{\partial W_e}{\partial t} = \frac{\partial W_e}{\partial RF} \frac{\partial RF}{\partial v} \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial W_e}{\partial RF} \frac{1}{v_s(T)} \frac{\partial v}{\partial t} \quad [11]$$

Insättning av fuktflödestäthets nya uttryck i högerled på ekvation 9 ger slutligen massbalansekvationen:

$$\frac{\partial W_e}{\partial RF} \frac{1}{v_s(T)} \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(-\delta_v \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad [8]$$

Den partiella differentialen, $\frac{\partial W_e}{\partial RF}$, benämns som materialets fuktkapacitet och beräknas ur sorptionsisotermens derivata och kan alltså ses som sorptionsisotermens lutning vid ett viss RF.

I cementbaserade material är det värt att notera hydratationen som, särskilt i ett yngre stadiet, snabbt förändrar materialets sorptionsisoterm då en del av det förångningsbara vattnet binds in kemiskt och ändrar porstrukturen. En matematisk term med hänsynstagande till hydratationsgrad och dess utveckling bör därför läggas till i massbalansekvationen. Transportkoefficienten, δ_v , förändras i cementbaserade material på grund av en ökad täthet över tid i takt med hydratationen. RF-nivån påverkar också transportkoefficienten, vars värde ökar vid höga RF (Burström, 2006).

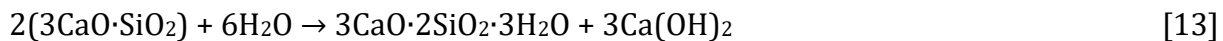
Det är värt att nämna att beräkningsverktyg som t.ex. WUFI än så länge inte kan hantera hysteres eller scanningskurvor för sorptionsisotermerna utan använder istället en "medelkurva" i sin beräkningsmodell när delementen avger och tar upp fukt i fuktflödesriktningen (Wallénten, 2018). Beräkningsverktyget kan inte heller ta hänsyn till den kemiska bindningen av vatten.

2.9 Betongkemi

Hydrauliskt cement är ett material som hårdnar (hydratiseras) efter att det blandats med vatten (Burström, 2006), även under vatten. Standardcement utan särskilda mineraltillägg kallas för "Ordinarie Portland Cement", kort sagt OPC. Den utgör grunden för alla cementblandningar och "gröna bindemedel" med mineraltillägg som är restprodukter från andra industrier, syftar på att minska andelen OPC då dess tillverkningsprocess avger stora mängder koldioxid (Burström, 2006). Kalksten tillsammans med lera utgör råvarorna och efter tillverkningsprocessen bildas olika s.k. klinkermaterial, vars kemiska beteckningar inom betongkemisternas värld förkortas:

- Kalciumoxid (CaO) = C
- Kiseldioxid (SiO₂) = S
- Aluminium(III)oxid (Al₂O₃) = A
- Järn(III)oxid (Fe₂O₃) = F

För ung cementpasta står olika föreningar av kalciumoxid och kiseldioxid för den huvudsakliga reaktionen (Burström, 2006):



Vilket på förkortat betongspråk blir:



Slutlig reaktionsprodukt, även kallad cementgel består då av kalciumsilikathydrat (C-S-H) och kalciumhydroxid (CH). Beroende på vilken förening av klinkermaterial som ingår i den reaktionen blir andelen CH i slutprodukten olika (Burström, 2006).

Flygaska är ett mycket finkornigt material som består av mycket små "glasbubblor" av aluminiumsilikatglas och är en restprodukt från kolkraftverk. Flygaska klassificeras beroende på innehållet av kalciumoxid men består i huvudsak av klinkermaterialen SiO_2 , Al_2O_3 och Fe_2O_3 (Lindvall 2011). Beroende på andelen ingående kalciumoxid kan flygaska hydratisera, mer eller mindre, av sig självt tillsammans med vatten, då kalciumoxiden omvandlas till kalciumhydroxid. Tillgången på kalciumhydroxid är därför nödvändig för att flygaska ska kunna bilda C-S-H.

Granulerad masugnsslagg är en restprodukt från ståltillverkning och består av samma grundläggande klinkermaterial som cement och flygaska men med annan sammansättning och med en annan fysisk struktur och kornstorlek (Fagerlund 2010). Slagg, precis som flygaska, konsumerar kalciumhydroxid och är därför beroende på tillgången av detta för att hydratisera.

Kalkstensfiller, som består av finmald kalksten, är ett icke-reaktivt material och bidrar därför inte till cementpastans strukturutveckling. Dess fysiska struktur och kornstorlek påverkar däremot cementpastans porstruktur. Stora andelar kalkstensfiller kan även påverka hållfastheten och beständighet negativt (Fagerlund 2010). Kalkstensfiller används för att förbättra betongens stabilitet och flytbarhet under gjutning och som ett ekonomiskt och miljömässigt tillsatsmedel.

Inblandning av dessa olika mineraltillägg påverkar därmed cementpastans fysiska uppbyggnad. Mineraltilläggen bidrar heller inte så mycket till den kemiska bindningen av fysikaliskt bundet vatten då de i stället använder kalciumhydroxiden som redan har bundit till sig vatten kemiskt.

2.10 Hydratation

Hydratationsgraden visar hur stor andel vatten som är kemiskt bundet i ett cementiöst bindemedel vid en given tidpunkt. Vid fullständig hydratation binder i genomsnitt 1 kg cement ungefär 0,25 kg vatten kemiskt (Powers, Brownyard, 1948). En uppskattning av hydratationsgraden kan, om totala mängden cement och mängden kemiskt bundet vatten är känt, göras enligt Powers & Brownyards formel:

$$\alpha \approx \frac{W_n}{0.25C} \quad [15]$$

där

α är hydratationsgrad.

W_n är kemiskt bundet vatten [kg, kg/m³].

C är mängden inblandad cement [kg, kg/m³].

C fås ut av vct:n (se kapitel 2.12) och W_n kan mätas in med termogravimetrisk analys där C-S-H och Aft antas avgå mellan 105–350 °C och CH antas avgå mellan 350–500 °C (Li et al. 2018) (Song et al. 2018).

Reaktionshastigheten är snabb i början men avtar successivt i takt med att skalet (gelstrukturen) runt cementkärnorna blir tätare, även kallad för skaleffekten. Ett allt tätare skal bildas och kapslar in klinkermaterialen som får sämre kontakt med det fysikaliskt bundna vattnet. Även temperaturen som hydratationen sker under har betydelse för den slutliga mängden kemiskt bundet vatten, H/S faktorn i C-S-H minskar t.ex. med ökad temperatur (Gallucci, Zhang, Scrivener 2013). Med en aggressiv härdning i tidigt skede med höga temperaturer leder detta fenomen till att C-S-H gelen initialt binder mer vatten snabbare men i det långa loppet binds mer vatten om den initialt i stället får härda i lägre temperaturer. Det kan därför vara av intresse i produktion att hålla en nygjuten betongplatta kall, så länge tidig frysning undviks och sedan höja härdningstemperaturen (Stelmarczyk, Rapp, Hedlund, Carlström, 2019).

2.11 Karbonatisering

Betong kan absorbera koldioxid under hela dess livslängd och ca 11 % av tillverkningens koldioxidutsläpp kan därför räknas bort i betongens klimatpåverkan (Jacobsen, Jahren, 2002). Detta förklaras av en kemisk process som kallas för karbonatisering där koldioxiden i luften reagerar och binder med kalciumhydroxiden i cementpastan och bildar kalciumkarbonat, dvs. "återgår" till kalksten:



Karbonatiseringen börjar vid materialets yta och växer med tiden inåt och djupare in i porstrukturen där den sänker pH-värdet i det påverkade materialskiktet. En tätare porstruktur ger alltså ett ökat skydd mot karbonatisering (Burström 2006). Små och krossade provkroppar kräver inget stort inträngningsdjup för att vara fullt karbonatiserade och har även stor omslutningsarea som koldioxiden kan börjar reagera på.

Det krävs fritt vatten för att denna kemiska process ska kunna påbörjas men om kapillärporerna är vattenfyllda blockeras denna inträngande process. Karbonatiseringen avstannar därför i mycket torrt klimat för att sedan succesivt öka upp till ca 60–70 % RF för att sedan avta igen vid högre RF-nivåer. Flygaska och andra mineraltillägg binder upp överbliven kalciumhydroxid, dock verkar hastigheten för processen öka för cementpasta med dessa mineraltillägg (Bohlin, Snibb, 2017).

Karbonatiseringen påverkar även fukttransportegenskaperna hos cementpastan genom att den förtätar porstrukturen utan att öka den specifika ytan när den binder in koldioxidmolekyler (Xu 1989) och (Bohlin, Snibb, 2017). Detta påverkar dess sorptionsisoterm med en sänkning av fuktinnehållet och den ökade tätheten minskar transportkoefficienten.

2.12 Vattencementtal

Materialegenskaperna hos cementlösa bindemedel påverkas till stor del av hur stor andel blandningsvatten som ingår tillsammans med klinkermaterialen. Blandningsförhållandet mellan dessa betecknas som vattencementtalet, allmänt sagt v_{ct} [-]:

$$v_{ct} = \frac{W}{C} \quad [18]$$

där

W = mängden blandningsvatten [kg]

C = mängden cement [kg]

För cement med mineraltillägg används vanligen en effektivitetsfaktor som tar hänsyn till att materialegenskaperna förändras och för att upprätthålla samma hållfasthet. Detta anpassade v_{ct} betecknas ofta som v_{bt} (vattenbindemedeltal) eller $v_{ct_{ekv}}$:

$$v_{bt} = \frac{W}{C + kD} \quad [19]$$

där

k = effektivitetsfaktor (0-1)

D = mängden mineraltillägg [kg]

Cement som ingår i blandningar under v_{ct} 0,39 är överflödigt och motiveras enbart ur uttorkningsperspektiv. Det beror på att cementgelen växer i volym i takt med hydratationen och når en gräns innan den fyller ut alla kapillärporer, som innehåller det nödvändiga vattnet (Fagerlund, 1994). Den överflödiga cementen kommer därför aldrig att reagera. Omvänt kan det ses som vid höga v_{ct} :n kommer en stor mängd blandningsvatten (det som är över sorptionsisotermen för aktuellt klimat) att avges via diffusion under cementens livslängd. v_{ct} -gränsen för fullt utnyttjande av cement med mineraltillägg, som nyttjar vattnet från kalciumhydroxiden, är mer svårbestämt.

Mer blandningsvatten i cementpastan gör att större hålrum lämnas i porutrymmet när överflödigt vatten avdunstar, vilket innebär en större andel av kapillärporer och högre sorptionsisoterm vid höga RF. Det innebär också att permeabiliteten i materialet ökar (Burström, 2006). Cementpasta med ett lägre v_{ct} har därför en flackare sorptionsisoterm. Hur mycket vatten som finns tillgängligt för klinkermaterialen påverkar även hydratationsgraden. Lågt v_{ct} gör att cementpastan initial hydratiseras snabbare men med tiden, efter några veckor, har cementpasta med högre v_{ct} gått om och nått en högre hydratationsgrad (Byfors, 1980).

3. Metod

Det finns olika metoder för att ta fram sorptionsisotermer på material, den vanligaste och klassiska metoden görs med s.k. klimatboxar medan den moderna metoden görs med en s.k. sorptionsvåg, även kallad för DVS-maskin (Dynamic Vapour Sorption). Den traditionella desickatormetoden med klimatboxar tar lång tid då fuktjämvikt uppnås med hjälp av saltlösningar medan användandet av DVS-metoden gör att en sorptionsisoterm kan framställas på knappt 2 veckor. Sådana gravimetriska maskiner är dock dyra och därmed inte särskilt tillämpliga för större delen av forskningen i Sverige utanför Fuktcentrum i Lund. En annan nackdel är att de endast kan hantera ett prov åt gången och ska fler prover mätas in med 2 veckor vardera kan den samlade tiden vara längre än för traditionell metod, där flera prover samtidigt kan ställas in i klimatboxarna.

För att påskynda processen och få provkropparna av cementpasta att snabbare hamna i fuktjämvikt med klimatboxarna testades metoden på finkrossade prover. Detta medförde dock att karbonatiseringen riskerar att bli mer påtaglig, varvid metoden anpassades för att hantera denna risk.

3.1 Arbetsgång

Upplägget för laborationerna utgick från SS-EN ISO 12571 för desickatormetoden och anpassades för den givna tidsramen och tillgängliga resurser. Huvudmomenten för laborationerna lades upp enligt följande arbetsgång:

1. Blandning & gjutning
2. Initial hydratation
3. Krossning & siktning
4. Våtlagring
5. Klimatisering & kontroll av fuktjämvikt
6. Framtagning av torrsvikt
7. Uppskattning av andel kemiskt bundet vatten
8. Uppskattning av kalciumhydroxidhalt och karbonatiseringsgrad
9. Framtagning av skrymdensitet, fuktkvot vid kapillärmättnad & total vattentillgänglig porositet

3.2 Blandningsförfarande och gjutning

Blandningsproportionerna och mineraltilläggen för cementpastorna, se tabell 2, var det samma som togs fram inför det större forskningsprojektet "Water in "Green" Cementitious Materials". Vct 0,35, 0,45 och 0,55 valdes för att vara representativt och hålla sig inom vanliga exponeringsklasser enligt SS 137003. För detta projekt krävdes ca 500 ml per prov men mer provvolym blandades då även prover för långtidsförvarning skulle gjutas i provrör för det efterföljande och parallella projektet.

Tabell 2: Bindemedel och beteckningar för cementpastorna. OPC = Ordinarie Portland Cement, FA = Flygaska, SL = Slagg, LL= kalkstensmjöl

#	Provkod	Bindemedel	vct
#1	P035	OPC	0,35
#2	P045	OPC	0,45
#3	P055	OPC	0,55
#4	P135	65% OPC + 35% FA	0,35
#5	P145	65% OPC + 35% FA	0,45
#6	P235	65% OPC + 35 % SL	0,35
#7	P245	65% OPC + 35% SL	0,45
#8	P255	65% OPC + 35% SL	0,55
#9	P335	49% OPC + 35% SL + 16% LL	0,35
#10	P345	49% OPC + 35% SL + 16% LL	0,45
#11	P355	49% OPC + 35% SL + 16% LL	0,55

- OPC:n var av typen "SH P Slite CEM I 52,5 R" och tillverkat av Cementa AB.
- Flygaskan var av typen "B5" och tillverkat av Eminent A/S i Danmark, levererat av Swecem AB.
- Slagget var av typen "Slagg Bremen" och tillverkat av Holcim AG Werk Hansa Bremen i Tyskland, levererat av Thomas Concrete Group AB.
- Kalkstensmjölet var finkrossad (15 µm) och tillverkat av Nordkalk AB.

Bindemedlen vägdes enligt blandningsproportionerna i tabell 3 med en noggrannhet på 0,1 g. De prover som innehöll mer än en typ av bindemedel torrblendades först i en mixer, se figur 3.1 nedan. Mixern startades på den lägsta inställningen, ca 75 varv per minut, och kördes i en minut. En gummiskrapa drogs på sidorna för att samla ihop bindemedlen och ca 100 små stålkulor med 16 mm diameter tillsattes för att hjälpa omrörningen då ingen ballast ingår.

Tabell 3: Blandningsproportioner för cementpastorna. OPC = Ordinarie Portland Cement, FA = Flygaska, SL = Slagg, LL = kalkstensmjöl, V = Avmineraliserat vatten

#	Bindemedel	vct	Gjutdatum	OPC [g]	FA [g]	SL [g]	LL [g]	V [g]
#1	OPC	0,35	2020-04-06	2000				700
#2	OPC	0,45	2020-04-05	2000				900
#3	OPC	0,55	2020-04-06	2000				1100
#4	65%OPC+35%FA	0,35	2020-04-06	1300	700			700
#5	65%OPC+35%FA	0,45	2020-04-06	1300	700			900
#6	65%OPC+35%SL	0,35	2020-03-30	1950		1050		1050
#7	65%OPC+35%SL	0,45	2020-03-31	1950		1050		1350
#8	65%OPC+35%SL	0,55	2020-04-01	1950		1050		1650
#9	49%OPC+35%SL+16%LL	0,35	2020-04-02	1470		1050	480	1050
#10	49%OPC+35%SL+16%LL	0,45	2020-04-03	1470		1050	480	1350
#11	49%OPC+35%SL+16%LL	0,55	2020-04-04	1470		1050	480	1650

Observera att ingen effektivitetsfaktor, alt. effektivitetsfaktor 1, användes för mineraltilläggen, som huvudsakligen delades upp och blandades efter angivna procenthalter. På så vis blir det lättare att i framtiden jämföra med andra bindemedel och hur de skiljer sig ifrån ren OPC. Vilken effekt en direkt ersättning av OPC ger med avseende på fuktegenskaperna kan därför göras. Blandningarna med mineraltillägg benämns därför inte med "vbt" utan som istället som "vct" för att hålla terminologin konsekvent.

Första andelen avmineraliserat vatten som krävdes för att uppnå vct 0,35 tillsattes och mixern startades och kördes i 1 min. Gummiskrapan drogs på sidorna och mixern kördes ytterligare 2 min i 2 omgångar med skrapning på sidorna emellan. I de fall där vct var högre än 0,35 tillsattes motsvarande andel vatten för att uppnå vct 0,45 och mixern kördes ytterligare i 2 min i 2 omgångar. Med samma procedur tillsattes sedan mer vatten för att uppnå vct 0,55.



Figur 3.1: Den vänstra bilden visar mixern.



Figur 3.2: Den högra bilden visar aggregat av partiklar efter sköljning av stål kulorna över en silgrupp.

Mellan varje prov rengjordes mixer, visp och stålkulor noggrant för att undvika korskontaminering. Vid sköljning av stålkulorna över en silgrupp, 12+1+0,5+0,25 mm, kunde partiklar observeras, se figur 3.2 ovan. Detta ansågs dock inte påverka provkropparna som efter härdning krossas ned till 0,25–1 mm i kornstorlek.



Figur 3.3: Gjutform samt borttagning av överflödigt luft.



Figur 3.4: Förvaring för initial hydratation.

Förslutningsbara plastpåsar med måtten ca 300x400 mm märktes upp och fylldes upp med respektive blandat prov samt vägdes för ungefär rätt mängd motsvarande ca 500 ml och ca 1300 g. Proven rullades sedan ut till en tjocklek av 5 mm med hjälp av 5 mm remsor och ett stålrör så att överflödigt luft pressades ut innan plastpåsen stängdes, se figur 3.3 ovan. Provet förvarades på plant underlag i 24 h i rumstemperatur för att stelna innan förvaring och härdning i tät och fuktig låda.

Den ursprungliga planen var att först förvara proverna i ett kylskåp i 5 °C i 3 dagar och sedan ca 60 dagar i 20 °C för att undvika den s.k. "skaleffekten", se kap. 2.10, och samtidigt påskynda hydratation (Shi et al. 2017). Ett trasigt kylskåp tvingade dock fram en annan lösning och härdningstemperaturen blev istället rumstemperatur på ca 20 °C. Proverna förvarades i en förslutningsbar och våt plastback där de även kunde vistas för långtidsförvaring, se figur 3.4 ovan. Proverna härdade ungefär i 12 dagar från gjutning till krossning.

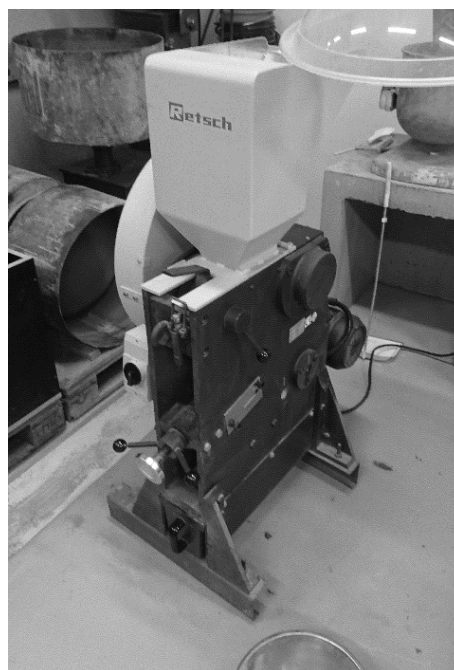
Det trasiga kylskåpet kan ha påverkat de slutliga hydratationsgraderna för de olika cementpastorna. Då hydratationsgraden är proportionerligt med andelen kemiskt bundet vatten och därmed utvecklingen porstrukturen, hade detta i slutändan kunnat medföra annorlunda form på sorptionskurvorna. Hydratationsgrad är dock svårt att uppskatta och samma härdningsmetod har använts för alla cementpaster. Sorptionskurvorna för respektive cementpasta borde därför vara jämförbara relativt mot varandra.

3.3 Krossning och siktning

För att uppnå fuktjämvikt med omgivande klimat snabbare, inom projektets tidsramar och samtidigt begränsa påverkan av karbonatisering gjorde en avvägning på storleken av provkropparna, Istället för att använda sig av större krossat material alt. sågade skivor valdes en kornstorlek på 0,25 mm till 1 mm. Hur kornstorleken påverkar mätresultaten jämfört med större provkroppar och med avseende på karbonatisering eller eventuellt "icke-Fickskt beteende" undersöktes ej vidare. Det viktiga i denna förstudie ansågs vara reproducerbarheten och att proven kunde jämföras relativt med varandra.



Figur 3.5: Grovkrossning av cementkaka.



Figur 3.6: Finkrossning i krossmaskin, observera dammuppfångaren.

Efter initial hydratation krossades proverna till önskad kornstorlek på 0,25 till 1 mm. Först krossades respektive prov i den förslutningsbara plastpåsen grovt med en hammare, se figur 3.5, för att sedan matas ned i en krossmaskin, i detta fall en "Retsch Jaw Crusher", se figur 3.6. Denna rengjordes grundligt innan med borstar och piprensare. Första krossningen ställdes in på 3–4 mm. När allt material var krossat och nedmatat till uppfångaren stängdes maskinen av och materialet fördes temporärt över till en skål och uppfångaren återmonterades. Efter en till krossning på 3–4 mm ställdes maskinen in på 0,5–1 mm och material i uppfångaren fördes över till en temporär skål och sedan bitvis till ett siktpaket på 1 mm och 0,25 mm se figur 3.7 nedan.



Figur 3.7: Siktpaket med krossat material.

Siktpaket skakades kraftigt och krossmaterial som fastnade på 1 mm siktlagret togs åt sidan och kördes igenom krossmaskinen igen. Krossmaterial mindre än 0,25 mm lade sig på botten och slängdes medan material mellan 0,25–1 mm lades i en plastlåda med lock. Växling mellan att sikta material från uppsamlaren och fortsätta krossningsarbetet gjordes tills ca 700 g material med kornstorleken 0,25–1 mm kunde vägas upp.

3.4 Våtlagring

Proverna sköljdes direkt efter siktningen med avmineraliserat vatten under omrörning med sked för att skölja bort de minsta dammpartiklarna som var mest utsatta för karbonatisering, se figur 3.8 nedan. Därefter fylldes avmineraliserat vatten på tills ca 5 mm täckte provytan, se figur 3.9 nedan.

Våtlagringen pågick i ca 7 veckor innan placering i klimatboxar med syftet att kapillärmätta porerna och även skyddar provkropparna från karbonatisering, då de krossade proverna har större specifik yta och inträngningsdjupet inte behöver vara stort för att hela partikeln blir påverkad.



Figur 3.8: Sköljning med avmineraliserat vatten.



Figur 3.9: Förvaringskärl för krossat material för hydratation.

Proverna fortsatte att röras om, sköljas av och röras om en gång i veckan till dess att våtlagringen var färdig för att fortsätta få bort de mest finkorniga partiklarna och ersätta gammalt vatten med eventuellt kolsyra. För att skydda de krossade proverna ytterligare och undvika avdunstning förvarades de i förslutna boxar med botten påfyllt med avmineraliserat vatten i rumstemperatur. Denna förvarning lämpade sig även för långtidsförvarning av överblivna prover för framtida forskningsprojekt.

Under våtlagringen kunde ytterligare hydrationsprodukter finnas i flertalet av proverna i form av flockade klumpar av finkornigt material. Dessa upptäcktes vid den andra sköljningen, ca en vecka efter krossning och första sköljning. Kornens yttre skal och små partiklar på dessa är reaktiva. Dessa små klumpar kunde dock lätt smulas ned igen och hänsyn samt bortsortering fick senare tas vid uttag av prov för klimatboxarna. En noggrann sköljning genom en större 0,25 mm sil med avmineraliserat vatten kan därför vara lämpligt innan våtlagringen för att undvika detta problem.

3.5 Saltlösningar

6 olika salter av laboratriekvalité, från 11,3 till 97,6 % RF, valdes ut för att ge mätdata för sorptionsisotermen på 6 olika punkter, se tabell 4 nedan.

Tabell 4: Relativ fuktighet för valda mättade saltlösningar vid 20 °C och dess osäkerhet (Greenspan 1977)

Salt	Beteckning	RF %
Litiumklorid	LiCl	11,31 ± 0,31
Magnesiumklorid	MgCl ₂	33,07 ± 0,18
Magnesiumnitrat	Mg(NO ₃) ₂	54,38 ± 0,23
Natriumklorid	NaCl	75,47 ± 0,14
Kaliumklorid	KCl	85,11 ± 0,29
Kaliumsulfat	K ₂ SO ₂	97,59 ± 0,53

Eventuella saltklumpar som formats i dess behållare bröts isär och salterna ströddes ut jämt i plastlock, 6 st per klimatbox. Små mängder med avmineraliserat vatten applicerades för att delvis lösa upp salterna och ge övermättade lösningar. Det antogs att de vakuumsugna proverna som hade en fuktkvot på över 50 % (se kapitel 3.8) skulle tillföra mycket vatten i klimatboxarna. Saltlösningarna placerades sedan i botten av boxarna enligt figur 3.10 nedan. Salternas närvaro tillsammans med eventuell hög luftfuktighet i klimatboxarna kan göra att miljön blir korrosiv eller skapa förutsättningar för mikrobiologisk tillväxt. Därför är det lämpligt att provbehållare samt allt material som används för att bygga upp strukturen i klimatboxarna görs av resistent och oorganiska material, exempelvis plast.



Figur 3.10: Den vänstra bilden visar saltet litiumklorid som fuktats något med avmineraliserat vatten då proverna senare har en fuktkvot på över 50 %. Den högra bilden visar klimatboxarna i väntan på krossad cementpasta och koldioxidabsorbent.

Saltlösningarna kan i absorption skikta sig i olika lager av koncentration. Om översta skiktet binder upp vattenmolekyler och späds ut kan dess densitet bli lägre och riskerar att bli ett stabilt flytande lager av icke mättad lösning. Att placera ut salterna i konform innan uppfuktning kan vara ett sätt att hantera detta möjliga problem. Är tillgången och användningen av salt samt rengöring av klimatboxen en ickefråga kan hela bottendelen fyllas upp med ett lager mättad saltlösning. Kontamineringsrisken av provkropparna måste dock beaktas då vissa salter kan svälla och "klättra uppåt".

Det är värt att nämna att luftcirkulationen i de förslutna klimatboxarna är begränsad med denna konstruktion med risken att olika lager med olika RF bildas. En lösning på detta problem och för att även snabba på jämviktsprocessen med hjälp av fuktkonvektion är att montera små 12 V axialfläktar i klimatboxarna för att få cirkulation av den instängda luften. Nackdelarna med denna lösning är att om luftcirkulationen blir för stor kan små partiklar från

de finkrossade proverna eller kalciumhydroxid lossna och kontaminera andra prover. Även värmeenergi kan alstras som i sin tur kan störa isotermer.

3.6 Koldioxidabsorbent

Då proverna består av krossat och finkornigt material är de extra utsatta för påverkan av karbonatisering under tiden fram till fuktjämvikt. Alltför omfattande karbonatisering påverkar och förändrar cementlösa material och kan därmed förvränga mätdata för sorptionsisotermerna. För att motverka detta problem placerades en koldioxidabsorbent i klimatboxen med förhoppningen att fånga upp huvuddelen av luftens koldioxid.



Figur 3.11: Den vänstra bilden visar kalciumhydroxid som koldioxidabsorbent. Den högra bilden visar klimatboxarna i väntan på krossad cementpasta och koldioxidabsorbent.

I initialt skede testades upplöst natriumhydroxid som absorbent men ett förtest i klimatlåda med saltlösning påvisade alltför avvikande och fluktuerande klimat enligt RF-givare. Då denna absorbent påverkade luftfuktigheten valdes det istället att placera ut tunna lager av kalciumhydroxid, se figur 3.11 ovan. Det tunna lagret av kalciumhydroxiden är reaktiv med koldioxen och förhoppningen var att det offrades istället för kalciumhydroxiden i cementpastan. Effekten av detta utvärderas dock inte med hjälp av duplicerade klimatboxar och prover utan koldioxidabsorbent

De kontinuerliga kontrollvägningarna som sker i det sista skedet för att fastställa fuktjämvikt på proverna medförde öppning och stängning av klimatboxarna och tillförsel av mer koldioxid vilket troligen ökade karbonatiseringen av provkropparna. För att undvika detta problem krävs tillräcklig med tid eller annat sätt för att säkert kunna anta fuktjämvikt för provkropparna och på så vis undvika för många kontrollvägningar.

3.7 Vakuumsugning

Vakuumsugning användes för att få ut överflödigt vatten ur de våtlagrade proverna innan placering i klimatbox samt för att även få ut eventuella luftbubblor ur porsystemet, se figur 3.12 nedan.



Figur 3.12: Vakuumpump med slang, tratt och uppsamlare.

Denna procedur testades först på OPC med vct 0,45 innan de verkliga proverna togs ut för att ge en indikation av dess tillämplighet och ungefär hur mycket fukt som tillförs till klimatboxarna av provkropparna. 2 separata försök gjordes och effekten av vakuumsugningen jämfördes genom att räkna ut fuktkvoten efter uttorkning. En lämplig mängd provmassa, ca 2 msk, placerades och plattades till i mitten på ett pappersfilter i tratten. Vakuummaskinen fick gå i ca 3 min tills det slutade droppa vatten ned i bägaren. Försök 1 förvarades 24 h i tätslutande plastpåse innan placering i ugn medan försök 2 gjordes direkt innan. Vakuumsugna prover fördelades på 7 vägda aluminiumformor per försök och våtvikten med form noterades, ca 10 g/st.

Efter torkning i 105 °C vägdes proverna igen på värmeisolerande plattor och med hjälp av vägd torrviikt räknades fuktkvoten ut. Det sist vägda provet i varje försök fick stå kvar på vågen och en viktökning av ca 0,003 g/min på grund av fuktabsorption från luften kunde observeras. Med fuktabsorptionen och transport- och mättiden från ugn till avläst våg blir det upp till 0,4 procentenheter i mätskillnad om uppskattad fuktabsorption dras från vägd torrviikt. Observationen av ett tydligt fuktutbyte med luften gjorde att resterande laborationssteg planerades därefter.

Fuktkvotens medelvärde från försök 1 räknades till 54 % och från försök 2 räknades den till 51 %. Denna fuktkvot är över förväntad fuktkvot på högsta planerad RF-nivå för sorptionsisotermerna, vilket är viktigt för att säkerställa desorption.

3.8 Klimatboxar

De krossade proverna placerades i miljöer där de kunde ställa in sig i fuktjämvikt med givna RF-värden. Miljön skapades genom att saltlösningar med motsvarande RF-värden placerades i botten av tätförslutna boxar tillsammans med proverna i ett lager och en koldioxidabsorbent i ett lager över för att motverka karbonatisering.

Boxarna bestod av en bottendel av hårdplast och ett transparent lock med gummitätning samt skruvar i varje hörn för att säkerställa en tät förslutning. Petriskålar med en måttbestämd diameter användes för att få plats med 11 prover per box på ett lager.



Figur 3.13: Färdiga klimatboxar. Undre lagret med mättad saltlösning, mittersta lagret med krossad cementpasta och översta lagret med koldioxidabsorbent (kalciumhydroxid) och RF-logger för ögonblicksbild.

2 perforerade plexiglasskivor per box tillverkades med tillhörande distanser för att bygga upp de olika nivåerna som krävdes, se figur 3.13 ovan. För att underlätta montering och demontering av de olika nivåerna så monterades enkla bärhandtag av små buntband på plexiglasskivorna. Samtliga delar monterades ihop och funktionen testades innan saltlösningar, krossade provkroppar och koldioxidabsorbent placerades i klimatboxarna.

3.9 Klimatisering

Vakuumsugna prover fördelades ut tunt och luftigt i märkta och vägda petriskålar, ca 2 msk/st och totalvikten vägdes. Provkroppsmassan skulle räcka till detta korttidsförsök och ett senare långtidsförsök i efterkommande projekt. Provkropparna vägde mellan 20–30 g/st, minst 10 g/st enligt SS-EN ISO 12571 och lades i klimatboxarna tillsammans med respektive saltlösningar, koldioxidabsorbent samt en RF-logger. Det lufttäta locket skruvades fast och klimatboxarna förvarades i ett klimatrum med slussdörr omslutet och byggt av kylrumspaneler. Klimatrummet höll en konstant temperatur på 20 °C +/- ca 0,5 °C och en relativ fuktighet som hölls på runt 50 %, styrt med ett separat ventilationsaggregat placerat i slussrummet. Tillgången till ett klimatrum är inte nödvändigtvis ett krav, en kylbox förstärkt med cellplast och innehållande dunkar med vatten (stor specifik värmekapacitet) i ett rum med temperaturreglering kan upprätthålla en tillräckligt stabil temperatur.

RF-givarna var hygroskopiskt kapacitativa och av märket "Testo 174H". De hade en RF-noggrannhet på +/- 3 % upp till 98 % RF och en temperaturnoggrannhet på +/- 0,5 °C och var fabrikskalibrerade. Driften över tid och påverkan av den korrosiva miljön var okänd och ingen kalibreringskurva gjordes. De placerades i klimatboxarna endast för att ge en snabb ögonblicksbild och RF-värden lästes enbart av okulärt och bokfördes ungefär en gång i veckan för jämförelse. De kunde dock logga över tid med medföljande graf men krävde USB-anslutning och därmed öppning av klimatboxen. Resonemanget var att om ett stabilt RF nära saltets RF övertid kunde påvisas skulle kontrollvägningarna påbörjas. Ett alternativt sätt för att kontrollera och följa upp fuktjämvikt hade kunnat vara att med kalibrerade givare genomföra RF-avläsning under vissa bestämda dagar. Ett hål genom topplocket med en gummipropp hade underlättat montering av en kalibrerad och driftkontrollerad RF-givaren. En sådan hade inte behövt vara utsatt för korrosiv miljö och drift på samma sätt som en kvarvarande givare samt att fuktjämvikten i klimatboxen kan följas upp noggrannare. Nackdelen är att de är dyrare och att en ögonblicksbild av läget blir svår.

Efter tre veckor öppnades klimatboxarna snabbt och proverna i petriskålarna rördes om lätt för att skynda på processen för det undre lagret av provmaterialet. I klimatbox #2 och #3 motsvarande magnesiumklorid och magnesiumnitrat påfylldes mer av dessa salter i förebyggande syfte med mer salt då ursprungligt salt nästan var helt upplöst och en övermättad lösning önskades. Mer salt än förväntat löses upp och fukt verkade ha tillförts till klimatboxen av de vakuumsugna proverna som hade en fuktkvot på strax över 50 %.

Enligt SS-EN ISO 12571 är konstant massa och därmed fuktjämvikt uppnådd om viktskillnaden som observeras är högst 0,1 % av totalvikten mellan 3 efterföljande vägningar med minst 24 h emellan. Efter 5 veckor hade avlästa RF-värden från fuktgivarna börjat stanna av och plana ut. För att säkerställa fuktjämvikt vägdes provkropparna härefter kontinuerligt, se bilaga 1. För detta projekt accepterades SS-EN ISO 12571 riktlinjer för konstant massa, observera dock i bilaga 1 att en viss desorption fortfarande sker efter att konstant massa har "konstaterats".

Tiden för att väga och anteckna vikt valdes att effektiviseras med hjälp av koppling av dator till våg med hjälp av ett datainsamlingsprogram. Med detta kopplades mätdata från vågen direkt in i ett Excel-blad med förhoppningen att skynda på mät- och anteckningstid och minimera exponeringstiden proverna befann sig utanför klimatbox fram tills avläst vikt. Med minskad exponeringstid utanför klimatboxarna minimerades fuktutbyte i luften och även

eventuell påverkan av karbonatisering. Vågen som användes hade en noggrannhet på 0,001 g och var av märket "Mettler Toledo PG503-S Deltarange".

Vägningförfarandet per klimatbox tog relativt kort tid, ca 2,5 min. Klimatboxen bars bort till datorinkopplad våg, locket skruvades loss och lagret med kalciumhydroxid lyftes av, prover lyftes ur och vägdes snabbt i ordningen provkropp #1 till #11 på en noggrannhet av 0,001 g. Sista provet, #11, från varje klimatbox fick stå kvar på vågen i 2 min efter vägning och en viktförändring över tid observerades och antecknades, se tabell 5 nedan. Denna viktförändring uppstod på grund av fuktupptagning och fuktavgivning mellan provkropparna och den fria luften utanför klimatboxarna (konstant 20 °C och 50 % RF).

Tabell 5: De största viktförändringar över tid finnes där skillnaden och drivkraftspotentialen från 50% RF.

Provrnr.	RF [%]	Vikt [g]	Vikt efter 2 min [g]	Viktförändring [g/min]
#11	11,3	23,114	23,119	0,0025
#11	33,1	23,815	23,817	0,0010
#11	54,4	28,912	28,913	0,0005
#11	75,5	25,402	25,399	-0,0015
#11	85,1	22,448	22,443	-0,0025
#11	97,6	27,218	27,208	-0,0050

För att sätta fuktutbytet med luften i ett perspektiv motsvarar 0,025 g en godtagen viktförändring för att fastställa konstant massa över 24 h på en provkropp som väger 25 g, vilket är problematiskt. De efterföljande vägningarna gjordes dock enligt samma procedur, provordning och under liknade tidsintervall som föregående vägning. Därför kunde viktförändringarna mellan 2 vägningar antas vara liknande och ta ut varandra då endast viktskillnaden mellan vägningarna jämfördes. Användning av medföljda lock till petriskålarna diskuterades att vägas och märkas tillsammans med skålarna och förvaras löst bredvid proverna i klimatboxarna, redo att läggas på snabbt vid avtagning av det lufttäta locket. Det beslutades dock att inte använda locken då det helt enkelt inte skulle få plats samt möjligtvis förhindra luftcirkulationen och vara mer i vägen än till nytta.

Inom tidsramen för projektet hann endast klimatboxar för RF 11,3 %, 54,4%, 75,5 % och 85,1 % ställa sig i jämvikt enligt SS-EN ISO 12571, se bilaga 1. Desorptionsisotermerna fick därför utgöras av dessa 4 mätpunkter. Resterande mätpunkter valdes att inte läggas till senare då hydratationsgraden på unga prover kan skilja sig mycket på kort tid.

3.10 Fuktkvotsbestämning

När fuktjämvikt för provkropparna i en klimatbox ansågs vara uppnådd förbereddes procedur för fuktkvotsbestämning genom att ta fram klimatiserad vikt och torrsvikt. Aluminiumbehållare för respektive provkropp och relativ fuktighet vägdes och märktes upp. På samma sätt som inför de tidigare kontrollvägningarna kopplades en våg till dator och allt ställdes i ordning nära till hands för att minimera tidsåtgången. Endast hälften av

provmassorna togs ut för fuktkvotsbestämning så att resterande provmassor kunde sparas för efterföljande långtidsförsök.

Locket på en klimatbox skruvades loss, lyftes av och lagret med kalciumhydroxid lades åt sidan. Med en ren och torr sked, som torkades av mellan varje provkropp för att undvika korskontaminering, fördes hälften av provmassan (ca 10 g) över till respektive aluminiumbehållare och vägdes sedan snabbt. Tidsåtgången för vägningsproceduren för en klimatbox tog ca 3,5 min fram tills att den sista provkroppen var vägdd, se figur 3.14 nedan för procedur och uppställning.

Petriskålarna med hälften av provmassan kvar lades tillbaka i klimatboxen som återmonterades och förvarades för långtidsförsök i fortsatt projekt. När vägningarna var klara och noterade kunde fuktutbyte med luften negligeras och endast eventuell karbonatisering som påverkade proverna. Vägda prover placerades på bricka och täcktes över med transportskydd och bars bort till en vakuumugn som var inställd på 105 °C. Ugnen hade begränsad plats och endast prover från en klimatbox kunde torkas åt gången och per dag. Vakuumugnen var av modellen "Thermo scientific vacutherm" kopplad till en vakuumpump av modellen "Pheiffer Duo 3", se figur 3.14 nedan. En vakuumugn valdes för att pumpa ut luft och därmed koldioxid under torktiden tills allt fritt vatten (som behövs för karbonatisering) var borta. Torktiden sattes till ca 24 timmar. Det är värt att tänka på att vakuum sänker förångningstemperaturen och det är oklart om kombinationen av vakuum och 105 °C gör att små andelar kemiskt bundet vatten avgår redan vid en lägre temperatur. Dock var det samma förutsättningar för alla provkroppar och mätresultaten bör därför vara jämförbara.



Figur 3.14: Uppställning för urplockning av provkroppar och vägning i aluminiumbehållare.

24 timmar torktid i 105 °C i vakuum ansågs vara mer än tillräckligt för provkroppar på ca 10 g/st. Pumpen stängdes av och luftventilen öppnades för att jämna ut tryckskillnaden. Proverna plockades ut snabbt, täcktes över med skyddande lock och bars bort till vågen som nollställdes med en värmeisolerande platta. Vägningen gjordes sedan i samma ordning som föregående procedur och vägda prover fördes sedan snabbt ned i 15 ml provrör som förslöts

direkt. Hela proceduren tog ca 4 min och en viktförändring liknande den för 11,3 % RF i tabell 5 observerades på det sist vägda provet (#11).



Figur 3.15: Ugn med vakuumpump.

Med våtvikten ur klimatboxarna tillsammans med torrvikten direkt från ugnen kunde fuktkvoten beräknas för respektive klimatbox och cementpasta, se bilaga 2. Med dessa värden kunde desorptionsisotermer plottas ut med fuktkvot som en funktion av relativ fuktighet, se figur 4.1–4.7 i kommande kapitel.

3.11 Indikation av kemiskt bundet vatten

Då torra prover ifrån 105 °C vakuumugn sparades och skyddades i provrör direkt efter torrsviktavvägningen fanns material att undersöka vidare för att ge en snabb indikation av andelen kemiskt bundet vatten, direkt kopplat till hydratationsgraden. Då C-S-H och AFt antas avgå mellan 105–350 °C, (Li et al. 2018) (Song et al. 2018), värmes provkropparna upp till 350 °C och en ny "torrvikt" togs fram.



Figur 3.16: Den vänstra bilden visar ugnen. Den högra bilden visar de keramiska krukorna med provkroppar.

Små keramiska krukor vägdes upp individuellt, ca 30 g/st och sorterades efter en spatial placering, som hölls vid vägningar och placering i ugn, då nummermarkeringar på krukorna riskerar att förångas vid 350 °C. Hälften av provkroppar ifrån provrören, ca 5 g hölls över i krukorna och vägdes. Hälften sparades i provrören för att eventuellt användas i det senare forskningsprojektet som referens. Krukorna innehållande provkropparna placerades i en ugn av märket "Nabertherm", se figur 3.16 ovan, och ett temperaturprogram programmerades in med en stegvis ökning ifrån 105–350 °C på ca 3 timmar (värmningshastighet 120 °C/h) samt med en stegvis minskning ifrån 350–105 °C på ca 4 timmar (kylningshastighet 80 °C/h). Temperaturen vid 105 °C behölls sedan fram tills vägningen. Vågen skyddades ifrån termisk påverkan med en tjockare värmeisolering och krukorna med provkropparna vägdes på nytt och viktförlusterna mellan 105–350 °C räknades ut som procentuell skillnad, se figur 4.8 och 4.9 i kommande kapitel.

3.12 Indikation av kalciumhydroxidhalt och karbonatiseringsgrad

Då indikation av kemiskt bundet vatten gav en del intressanta mätresultat, se figur 4.8 och 4.9 i kommande kapitel, var en mer genomgående gravimetrisk analys tillämpligt för att ge indikation på och undersöka innehållet av kalciumhydroxid och koldioxid och därmed karbonatiseringen.

Proverna var även mer eller mindre exponerade för karbonatisering i samband med hela laborationsförfarandet för mätmetoden med klimatboxar och synnerligt med tanke på de kontrollvägningar som krävdes ansågs en indikation av karbonatiseringsgrad vara intressant. Karbonatiseringsgraden kan sedan användas som ett mått för mätmetodens kvalitet. Även en indikation av mängden kalciumhydroxid togs fram. Viktförluster mellan olika temperaturintervall efter 350 °C studerades och laborationen genomfördes på samma sätt som vid indikation av kemiskt bundet vatten och med samma utrustning, med undantaget att ett begränsat urval av provkroppar undersöktes på grund av tidsbrist.

Indikation för innehåll av kalciumhydroxid fås av viktförluster mellan 350–500 °C medan 500–900 °C indikerar avgången koldioxid ifrån kalciumkarbonat och därmed "karbonatiseringsgraden" (Li et al. 2018) (Song et al. 2018). Ugnens temperatur programmerades in med en stegvis ökning ifrån 350–500 °C på ca 3 timmar (värmningshastighet 120 °C/h) samt med en stegvis minskning ifrån 500–900 °C på ca 4 timmar (kylningshastighet 80 °C/h). Temperaturen vid 105 °C behölls sedan fram tills vägningen. Viktförlusterna noterades och kvoter togs ut av torrvikten från 105 °C, se figurer 4.10 och 4.11 för resultat.

All avgiven koldioxid beror inte på den undersökta karbonatiseringen. Då blandningar med kalkstensmjöl visade total avgiven koldioxid, se figur 4.10 i kommande kapitel, togs sedan en teoretisk hänsyn till koldioxid som redan fanns kemiskt inbundet i materialet, se figur 4.11 i kommande kapitel för justerade värden. Blandningar med till exempel kalkstensmjöl, som består av kalciumkarbonat (CaCO_3), frigör stora mängder koldioxid vid förbränning. Ingående koldioxid i OPC:n och i kalkstensmjölet subtraherades därför ifrån uppmätt viktförlust mellan 500–900 °C. Ingående koldioxid sätts till 44 % av halten kalkstensmjöl, vilket baseras på molmassan där CaCO_3 är 100 g/mol och CO_2 är 44 g/mol. För cement sätts ingående koldioxid till 2,77 % av halten OPC, vilket härstammar från små mängder obränt kalk vid tillverkningen.

Dessa procentuella vikter baserades sedan på klinkermaterialens ursprungliga torrsvikt genom att kompensera för och subtraherat med andelen kemiskt bundet vatten (105–350 °C).

3.13 Skrymdensitet, fuktkvot vid kapillärmättnad & total vattentillgänglig porositet

Mätpunkter för 97,6 % RF hann inte komma i fuktjämvikt och det saknades data på hur desorptionsisotermerna såg ut i det högre området och hur de förändrades mellan 85–100 % RF. Desorptionsisotermerna kompletterades därför med mätpunkter på 100 % RF genom att ta fram skrymdensiteten för kapillärmättade provkroppar.

Gjutna cementpastor i 15 ml provrör som gjöts samtidigt och parallellt för det efterföljande projektet användes för laborationen. Proverna sågades ur provrören, kapillärmättades och torkades av med en fuktad fiberduk. De vägdes i luft och sedan nedsänkta i vatten med en tunn ståltråd hängandes från en speciell ställning. Efter detta togs torrsvikten fram efter torkning i 105 °C. Volymen gavs av skillnaden mellan vikt i luft och i vatten och den specifika våt- och torrdensiteten, se figur 4.11 för skrymdensitet. Fuktkvoten beräknades från de kapillärmättade proverna och även total vattentillgänglig porositet togs fram av mängden förångningsbart vatten dividerat med volymen, se figur 4.12 och 4.13 i kommande kapitel.

3.14 Känslighetsanalys

Med antagandet att viktförändringen över tid utanför klimatboxarna och ifrån ugnen är liknanden det som observerades vid fuktkvotsbestämning efter vakuumsugning och i tabell 5 gjordes en känslighetsanalys för mätdatan. Känslighetsanalysen gjordes genom att justera värdena direkt i Excel-beräkningarna och notera resulterande fuktkvotsskillnad. En standardosäkerhet för varje felkälla är svårt att uppskatta utifrån dessa varierande resultat. De sist vägda proverna (#9–11) var de mest exponerade, för 85 % RF hinner de förlora upp till ca 0,008 g ifrån klimatboxen och ifrån ugnen hinner de absorbera upp till 0,010 g. Om detta kompenseras för i fuktkvotsberäkningen medför detta att den egentliga fuktkvoten är ca 0,3 procentenheter högre för de sist vägda proverna. För proverna ifrån klimatboxarna under 50 % RF tar viktförändringar succesivt ut varandra och för provkroppar ifrån 11,3 % RF skiljer sig fuktkvoten inte mer än 0,02–0,05 procentenheter.

Vågens noggrannhet och användarens avläsning kan göra att vikten slår upp och ned ca 0,003 g. I värsta fall läses den verkliga vikten av högre och sedan lägre mellan våtsvikt och torrsvikt och ett sådant mätfel kan i slutändan resultera i upp till ca 0,09 procentenheters skillnad i fuktkvotsberäkningen, speciellt för torra och/eller lätta provkroppar. En större provkroppsmassa påverkas därför procentuellt mindre av denna företeelse. Provkroppsytan som är direkt exponerad för luften är ungefär densamma för en stor provkroppsmassa jämfört med en mindre provkroppsmassa placerad i petriskålarna. En viktförändring på grund av luftexponering kan därför antas vara relativt opåverkad av provkroppsmassans storlek.

Mätfel på grund av små avvikelser i salternas ekvivalenta RF och mindre temperaturfluktuationer som påverkar salternas RF är svåra att uppskatta men kan antas vara försumbara i jämförelse med de andra mätfelen, speciellt i detta fall där ett klimatrum

med en stabil temperatur kunde säkerställas. Mätfelen kan tänkas bli större vid de RF-intervall där fuktkapaciteten är större. De är även samma förutsättningar för respektive klimatbox. Annars kan en RF-justering för temperatur vara lämpligt när sorptionsisotermerna plottas ut.

Mätresultaten för indikation av kemiskt bundet vatten, kalciumhydroxidhalt och karbonatiseringsgrad ska tolkas med försiktighet då känsligheten för mätosäkerhet blev relativt hög. Mätfelen på grund av vågens noggrannhet kunde anses vara större i detta fall jämfört med vid fuktkvotsbestämningen då provkroppsmassa nu var hälften så stor och viktförändringen av luftexponeringen mellan ugn och vägning kan antas vara liknande den som vid torrviktsbestämningen. En känslighetsanalys genom Excel-beräkningar med hänsyn till dessa felkällor påvisade att den procentuella vikt förändringen 105–350 °C kunde skilja sig upp till 0,20 procentenheter med dessa felkällor. En annan möjlig felkälla kan vara hur provet påverkades i provröret och om fukt absorberades, dock var det samma förutsättningar för alla provkroppar och mätresultaten bör därför vara jämförbara. Risken för karbonatisering i ugnen ansågs vara minimal då det krävs fritt vatten för processen.

Om proverna faktiskt befann sig i fuktjämvikt är svårt att avgöra utan efterföljande långtids undersökning. Små mängder fukt kan tänkas avgå över längre tid även efter SS-EN ISO 12571 riktlinjer för konstant massa. Om fuktjämvikt inte var uppnått följer frågan om hur nära de olika proverna var och då blir dess transportkoefficient en faktor som påverkar hur jämförbara proverna är med varandra. Effekten av detta är dock svårt att göra en bedömning på men kan vara en mycket stor felkälla.

Vakuumugnens inverkan är svårt att bedöma. Här missades det är göra en jämförelse på torr vikt från 105 °C med eller utan vakuum., effekten av detta är därför tyvärr okänd.

På grund av dessa felkällor gjordes en till inmätning för indikation av kemiskt bundet vatten (samt även halt av kalciumhydroxid och karbonatiseringsgrad), direkt efter torkning i 105 °C för att se om resultaten var reproducerbara, se föregående kapitel 3.13. Mätningen bekräftade samma observerade trender som tidigare indikativa inmätning på andel kemiskt bundet vatten och fuktkvoten av proverna från provrören från den tidigare mätningen var ca 1 procentenhet i medeltal.

3.15 Förbättringsförslag på provningsmetod och laborationsförfarande

1. Om plats finns i klimatboxarna för att förvara lock till respektive petriskål kan provkropparna snabbt skyddas från luftexponering.
2. Eldfasta petriskålar hade kunnat föras över direkt till torkugn utan mellansteget att föra prover till aluminiumbehållare. Mättiden och exponeringen vid vägningsförfarandet kan minskas kraftigt om hälften av provmassan inte behöver tas ut med sked innan vägning.
3. Ett mindre antal olika prover i samma klimatbox minskar tiden för vägningsförfarandet.

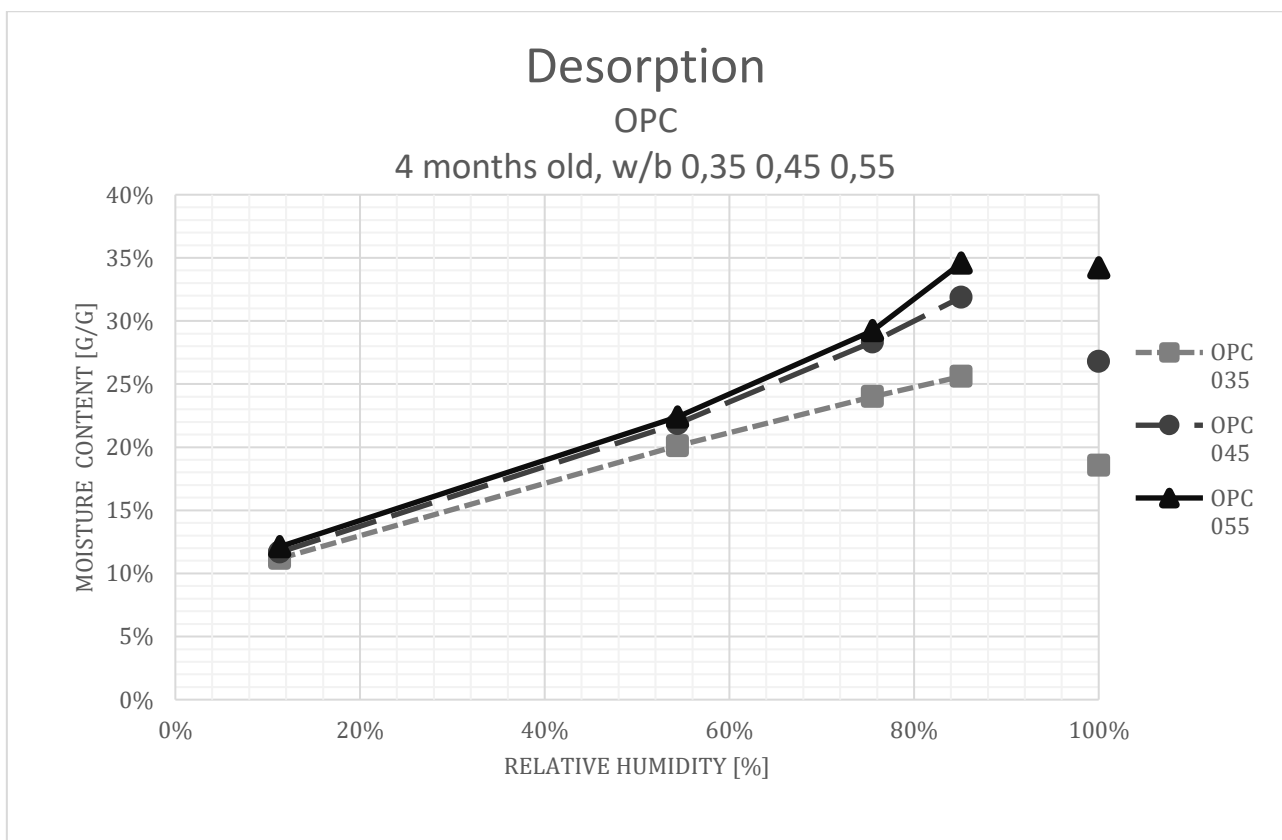
4. Ett udda antal provkroppar av lämplig storlek (minst 15 g) av samma provmaterial kan ge ett medelvärde samt en övre och en undre gräns för fuktkvotsbestämningen, en enklare statistisk bedömning kan då göras. Prover som väger mer gör att eventuella mätfel blir procentuellt mindre, t.ex. vågens noggrannhet.
5. Petriskålar med större diameter kan ta en större provkropp av krossat material och spridas ut över ytan lika tunt som en mindre provkropp, med avseende på tiden för fuktjämvikt.
6. Klimatanläggningen hade kunnat justerats inför inmätning av klimatboxar inom klimatanläggningens möjliga RF-intervall och därmed minska drivkraft för fuktutbytet under vägningsförfarandet.
7. Rutin för ersättning av klimatrum med separerat ventilationssystem med till exempel en kylbox med vattendunkar bör läggas upp för att göra metoden mer tillämplig. I detta fall kan dock RF-justering för temperatur bli viktigt.
8. Om provkropparna inte är av finkrossat material kan en sidomonterad PC-fläkt på lågt varvtal vara tillämpligt om kontaminering av koldioxidabsorbent kan undvikas.
9. Om mer tid för fuktjämvikt ges kan antalet kontrollvägningar minska och därmed minimera risken för karbonatisering.
10. Effekten av kalciumhydroxid som koldioxidabsorbent är svår att uppskatta men att täcka en större yta i klimatboxen med kalciumhydroxid är ingen nackdel.
11. Ett hål i topplocket på klimatboxen med en diameter anpassat för kalibrerad RF-givare och gummipropp kan ge en mer exakt uppföljning av klimatet utöver invändiga RF-loggar för ögonblicksbild. Konstanta mätningar över tid med kalibrerade givare kan ge en indikation på fuktjämvikt och när kontrollvägningarna ska påbörjas. Hålet i topplocket hade även kunnat användas för att kontrollera lufttätheten av klimatboxen.
12. Kaliumnitrat med 94,6 % RF istället för kaliumsulfat med 97,6 % RF som tangerar mot det hygroskopiska området. Provkroppar i klimatboxar med kaliumsulfat hann inte hamna i fuktjämvikt. En hypotes är det beror på en blockerande och sammanhängande vattenfas med inneslutna luftbubblor i provernas öppna porsystem, vilket kan hindra diffusionen utan att öka fukttransporten i vätskefas. En något lägre RF hade även gjort RF-bestämning med givare mer tillämpligt då det endast kan mäta inom det hygroskopiska området.
13. Täcka hela botten med mättad saltlösning så att fuktillskott från provkroppar inte blir ett problem.
14. Skölja krossat provmaterial ifrån dammpartiklar ordentligt genom en sil innan våtlagring.

4. Resultat & analys

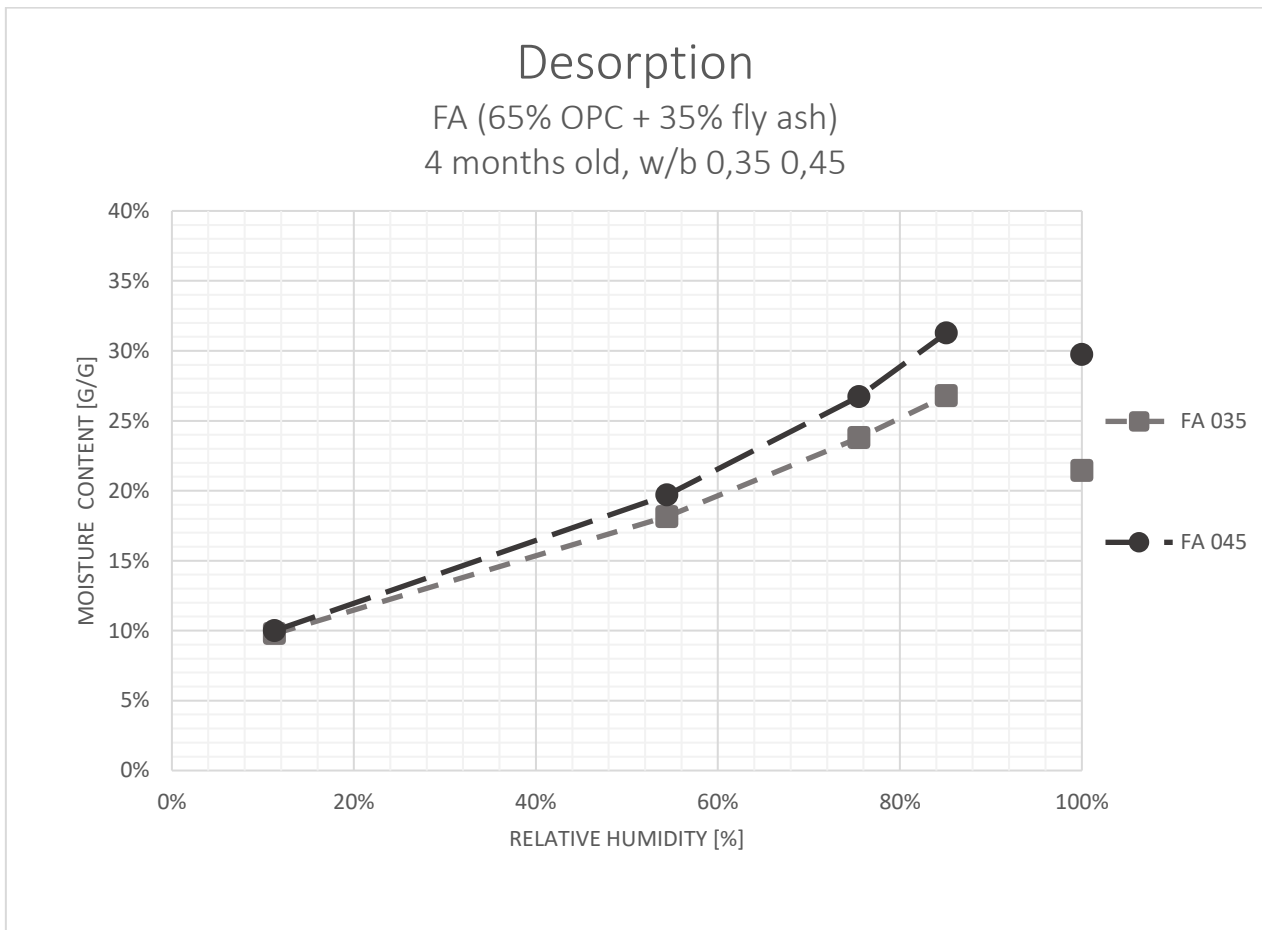
4.1 Desorptionsisotermer

Mätpunkter för 97,6 % RF (samt 33 % RF) hann inte komma i fuktjämvikt och det saknades därför data på hur sorptionsisotermerna såg ut i det högre området. Kompletterande mätning för 100 % RF på kapillärmättade prover gjordes enligt föregående kapitel 3.14. Observera att fuktkvoterna för 100 % RF var mycket lägre än förväntad baserat på mätdata för 85 % RF. Detta kan misstänkas bero på att proverna fortfarande befann sig i desorption och att fuktjämvikt inte var uppnått trots ISO-standard för konstant massa. Vakuumpugnens inverkan samt att de krossade proverna var våtlagrade och kan därmed ha en annan hydratationsgrad än de provrörsgjutna är även möjliga förklaringar. Mätdata lades därför enbart in som punkter i desorptionsisotermerna, se figurer 4.1–4.7 nedan, och ger endast en fingervisning om hur olika cementpaster relativt "går om" varandra i de högre RF-området ifrån 85 % RF. Om proverna inte befann sig i desorption kan även proverna varit olika nära fuktjämvikt beroende på deras enskilda transportkoefficient samt vilken klimatbox de togs ur.

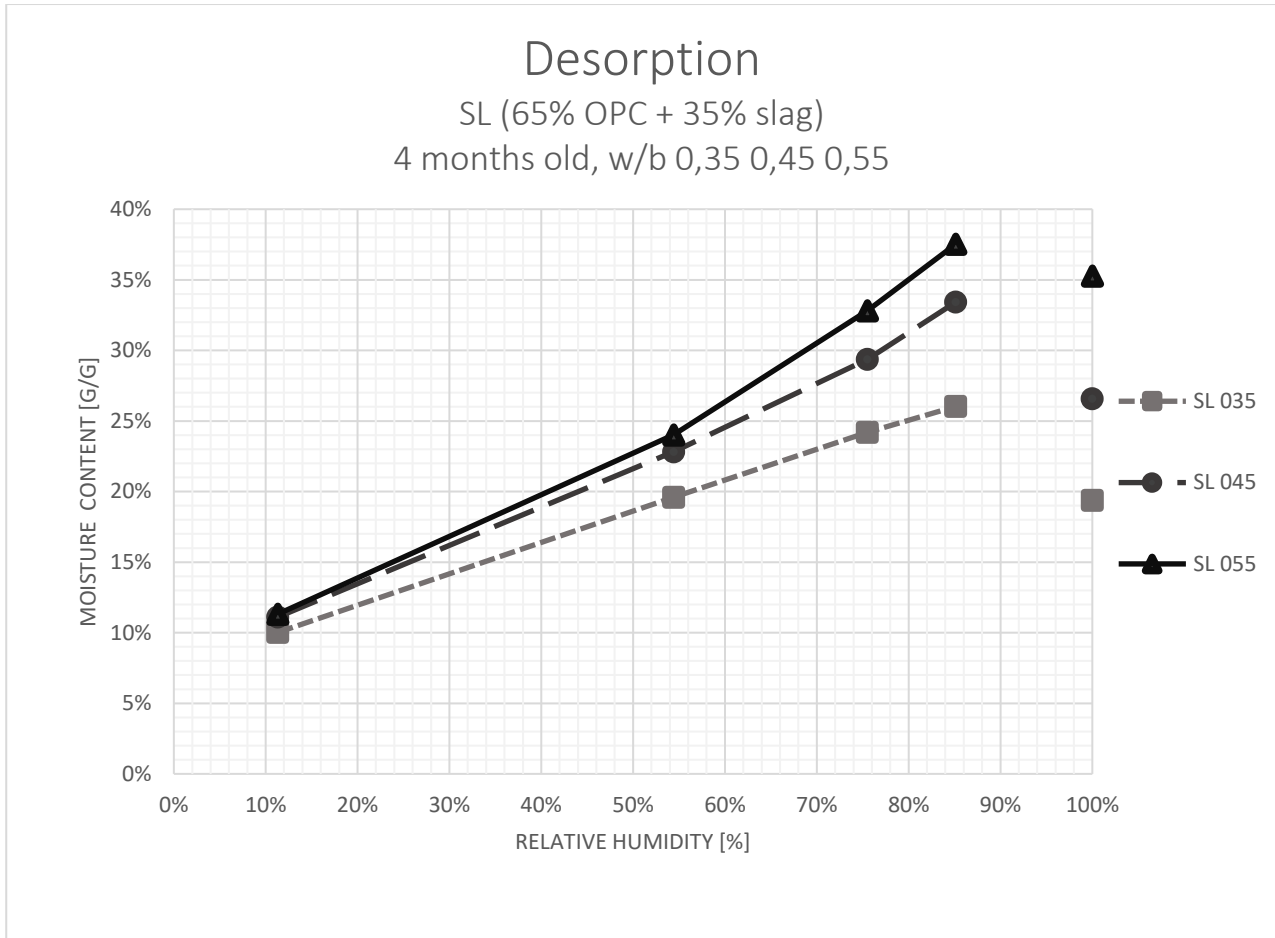
Det är även värt att notera att hydratationsgraden påverkar desorptionsisotermer och desorptionsisotermer togs på enbart en ålder, ca 4 mån, som i sin tur motsvarar olika hydratationsgrader för olika cementblandningar med dess olika reaktivitet, vct och härdningsklimat. Indikation av andel kemiskt vatten, som kopplas till de svårbestämda hydratationsgraderna, presenteras i efterföljande kapitel 4.2.



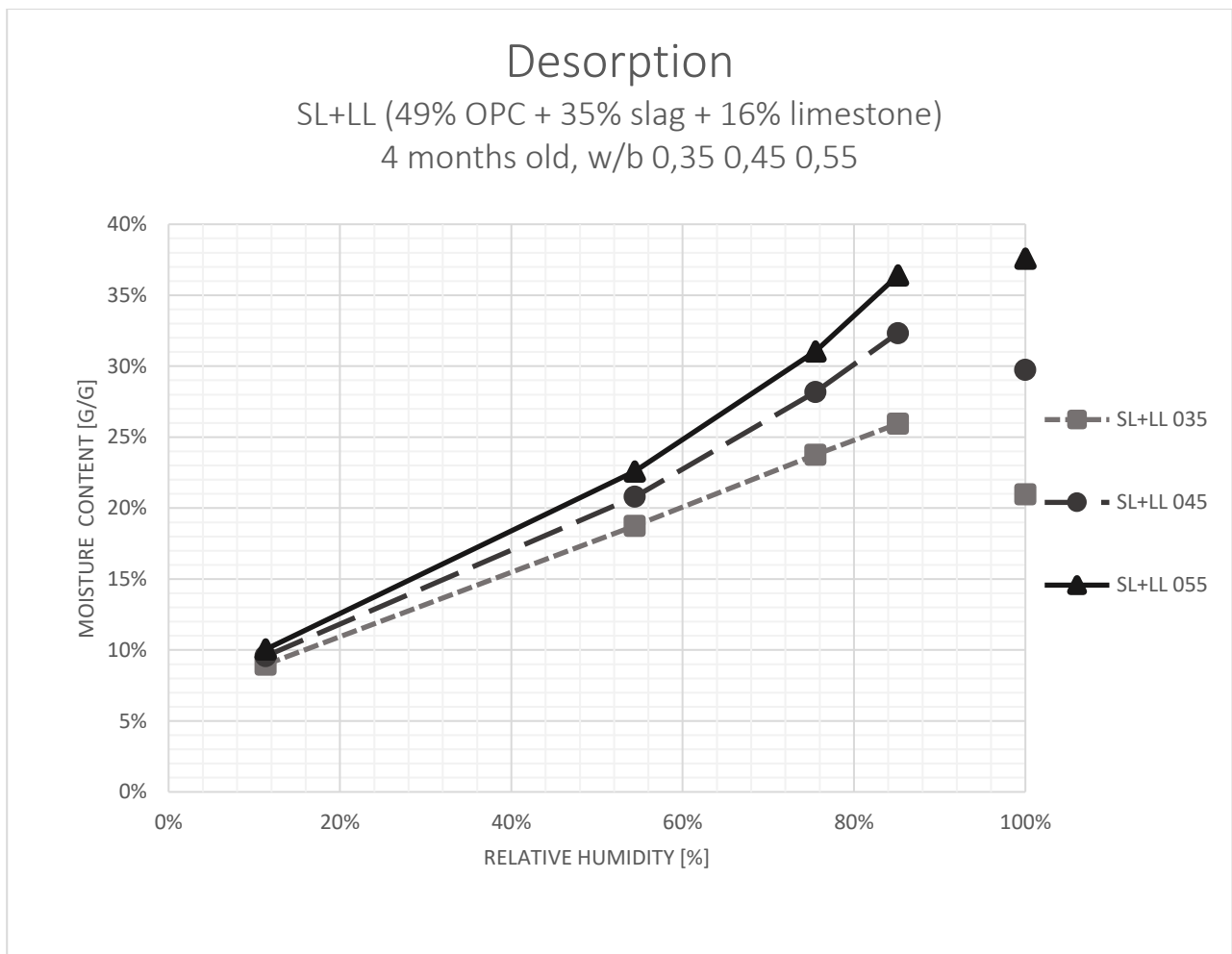
Figur 4.1: Desorptionsisoterm på OPC (utan ballast) med vct 0,35, 0,45 och 0,55. Observera att fuktkvot vid 100 % RF är framtagen på andra provkroppar härdade under andra förhållanden, se kapitel 3.14.



Figur 4.2: Desorptionsisoterm på FA (65% OPC+35% flygaska utan ballast) med vct 0,35 och 0,45. Observera att fuktkvot vid 100 % RF är framtagen på andra provkroppar härdade under andra förhållanden, se kapitel 3.14.



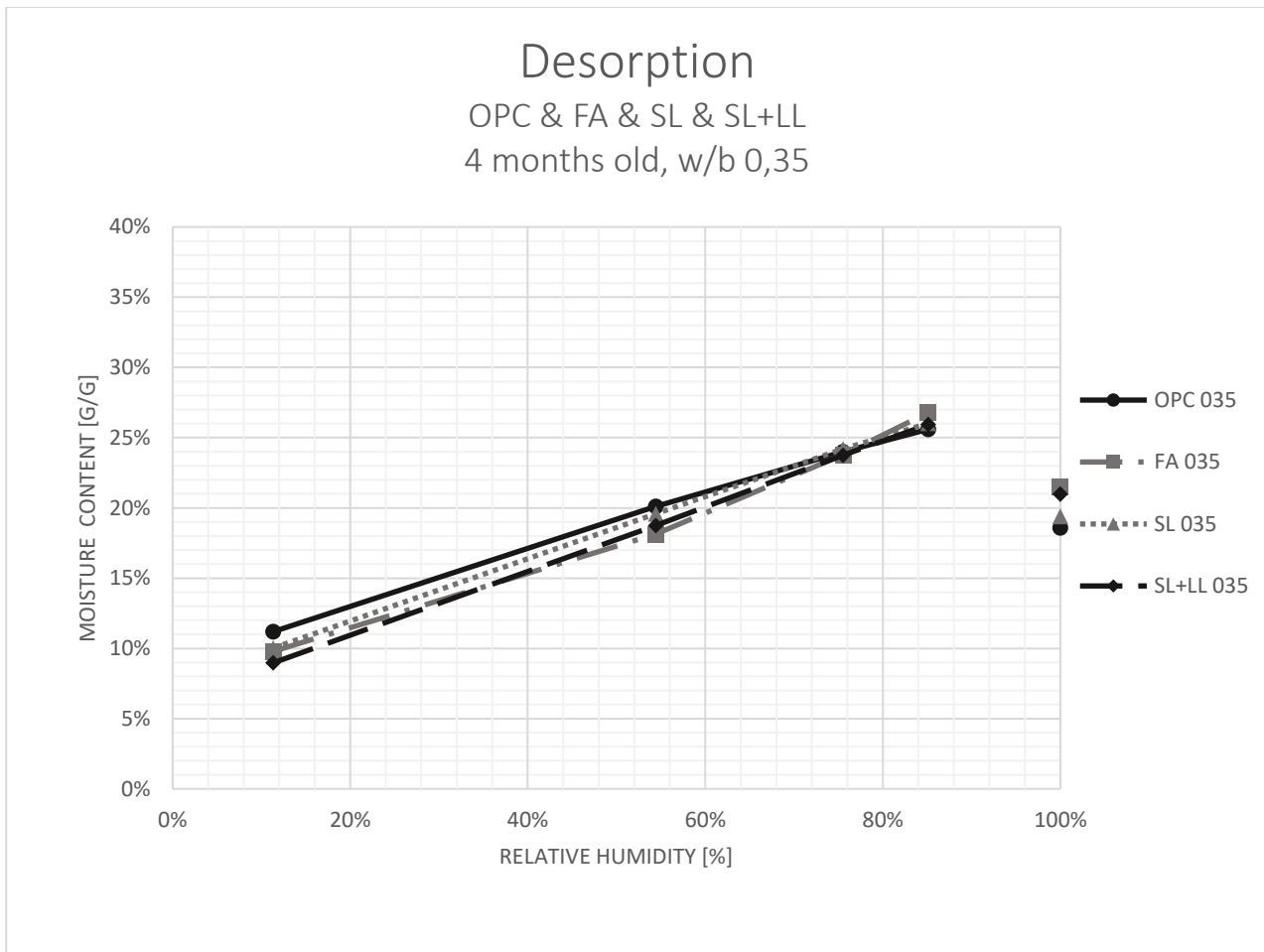
Figur 4.3: Desorptionsisoterm på SL (65% OPC+35% slagg utan ballast) med vct 0,35, 0,45 och 0,55. Observera att fuktkvot vid 100 % RF är framtagen på andra provkroppar härdade under andra förhållanden, se kapitel 3.14.



Figur 4.4: Desorptionsisoterm på SL+LL (49% OPC+35% slagg+16% kalkstensmjöl utan ballast) med vct 0,35, 0,45 och 0,55. Observera att fuktkvot vid 100 % RF är framtagen på andra provkroppar härdade under andra förhållanden, se kapitel 3.14.

Enligt figur 4.1, 4.2, 4.3 och 4.4 ovan verkar ett lägre vct medföra en mindre fuktkvot över hela det hygroskopiska området samt en flackare kurva för alla blandningar.

Ett högre vct ger en brantare kurva i det högre RF-intervall. Detta kan förklaras av att mer blandningsvatten i cementpastan gör att större hålrum lämnas i porutrymmet när överflödigt vattnet avdunstar, vilket innebär en större andel av kapillärporer. Detta medför att materialets kapacitet för vattenadsorption och antal molekyllager vatten ökar med de större kapillärporerna som dominerar i detta RF-intervall (Burström 2006). Det innebär också att permeabiliteten i materialet ökar (Burström 2006). Med samma resonemang omvänt förklaras att cementpasta med ett lägre vct får en lägre och flackare sorptionsisoterm med mindre fuktkapacitet då andelen kapillärporer blir mindre.

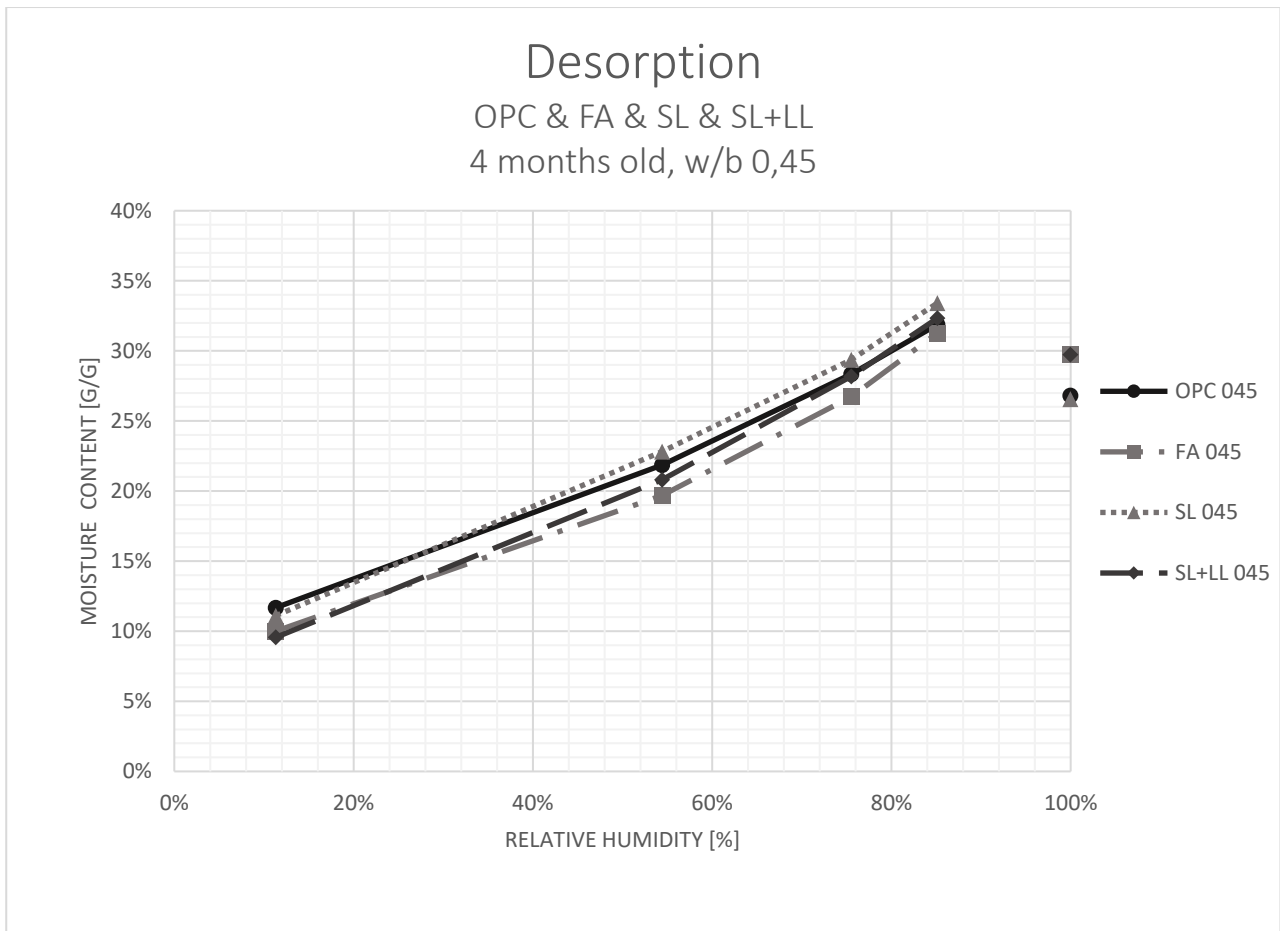


Figur 4.5: Desorptionsisoterm på OPC, FA, SL och SL+LL (alla utan ballast) med vct 0,35. Observera att fuktkvot vid 100 % RF är framtagen på andra provkroppar härdade under andra förhållanden, se kapitel 3.14.

I figur 4.5 ovan är det ganska liknande kurvor upp till 85 % RF för vct 0,35, oberoende av cementblandning och dess mineraltillägg. Som mest skiljer sig fuktkvoten ca 2 procentenheter mellan inblandning av 35 % flygaska och vanlig OPC vid mittenspannet runt 55 % RF, där OPC ligger högst. Cementpasta med flygaska och cementpasta med 35 % slagg och 16 % kalkstensmjöl börjar dock gå om efter 75 % RF och på slutlig mätpunkt 100% RF ställer sig i något högre fuktkvot än resterande blandningar.

Hög inblandning av flygaska eller slagg tillsammans med kalkstenmjöl verkar ge en lägre fuktkvot inom den större delen av det hygrokopiska området, upp till 75 % RF för att sedan ha en högre fuktkvot och högre fuktkapacitet än de övriga blandningarna.

Ett lågt vct som 0,35 verkar medföra en lägre andel kapillära porer då det är en låg fuktkvot över det högre RF-intervallet i jämförelse med vct 0,45 och 0,55, se figur 4.6 och 4.7 ovan.

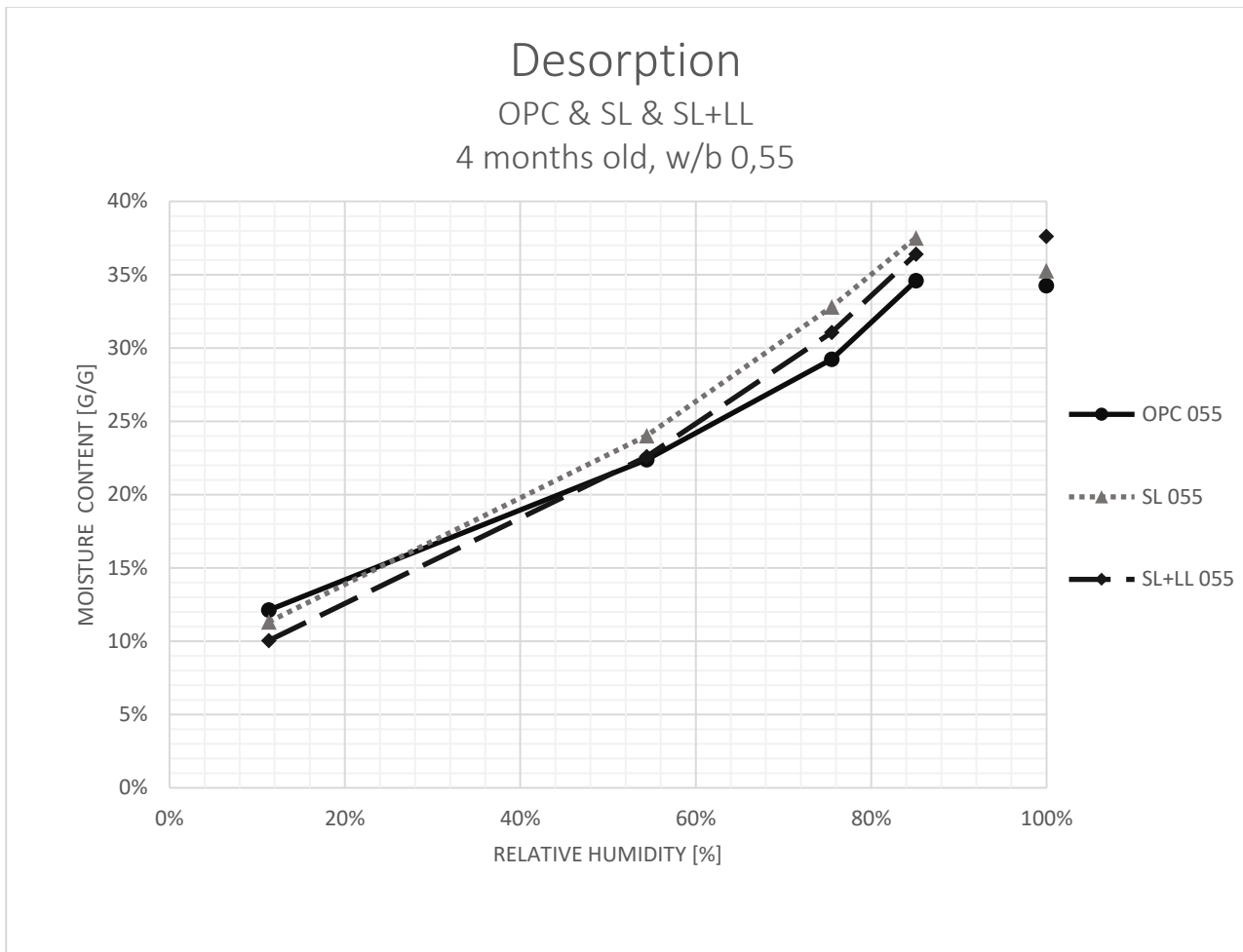


Figur 4.6: Desorptionsisoterm på OPC, FA, SL och SL+LL (alla utan ballast) med vct 0,45. Observera att fuktkvot vid 100 % RF är framtagen på andra provkroppar härdade under andra förhållanden, se kapitel 3.14.

Liknande trender mellan blandningarna för vct 0,35 gäller även för vct 0,45, dock är skillnaderna mer framträdande och allt är förskjutet uppåt med högre fuktkvoter. Som mest skiljer det sig vid fuktkvoten ca 3 procentenheter mellan inblandning av 35 % flygaska och inblandning av 35 % slagg vid mittenspannet runt 55 % RF, där cementpastan med slagg ligger högst med OPC nära under. På slutlig mätpunkt 100% RF grupperar sig inblandning av flygaska och inblandning av slagg och kalkstensmjöl högst och resterande blandningar grupperar sig på en lägre fuktkvot.

OPC och inblandning av 35 % slagg verkar ha en liknande fuktkapacitet. Inblandning av slagg verkar ge en högre fuktkvot över hela mittenspannet, vilket kan förklaras av finare porer med mer specifik yta och fuktadsorption som följd.

Hög inblandning av flygaska verkar ge en klart lägre fuktkvot inom den större delen av det hygroskopiska området, upp till 85 % RF för att sedan ha en högre fuktkvot och högre fuktkapacitet än de övriga blandningarna. Vid vct 0,35, se figur 4.5 på föregående sida, låg skärningspunkten för flygaskan på ett lägre RF.



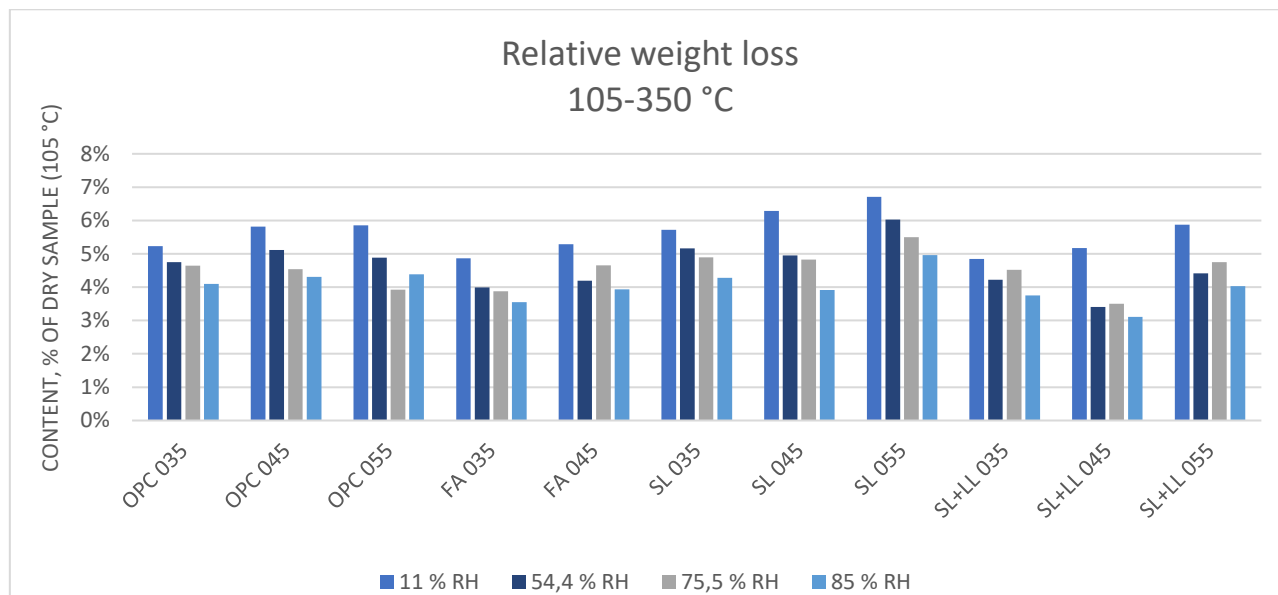
Figur 4.7: Desorptionsisoterm på OPC, SL och SL+LL (alla utan ballast) med vct 0,55. Observera att fuktkvot vid 100 % RF är framtagen på andra provkroppar härdade under andra förhållanden, se kapitel 3.14.

Ett högre vct på 0,55 pressar upp fuktkvoterna jämfört med blandningarna med vct 0,35 och 0,45. Observera att inblandning av flygaska inte är inmätt för detta vct. Som mest skiljer sig fuktkvoten nästan 4 procentenheter mellan inblandning av 35 % slagg och vanlig OPC runt 75 % RF, där cementpastan med slagg ligger mycket högre än den vanliga OPC:n. Cementpastan med slagg verkar dock plana ut efter detta och ställa sig ganska nära OPC:n vid 100 % RF, där cementpasta med inblandning av 35 % slagg och 16 % kalkstensmjöl har högst fuktkvot.

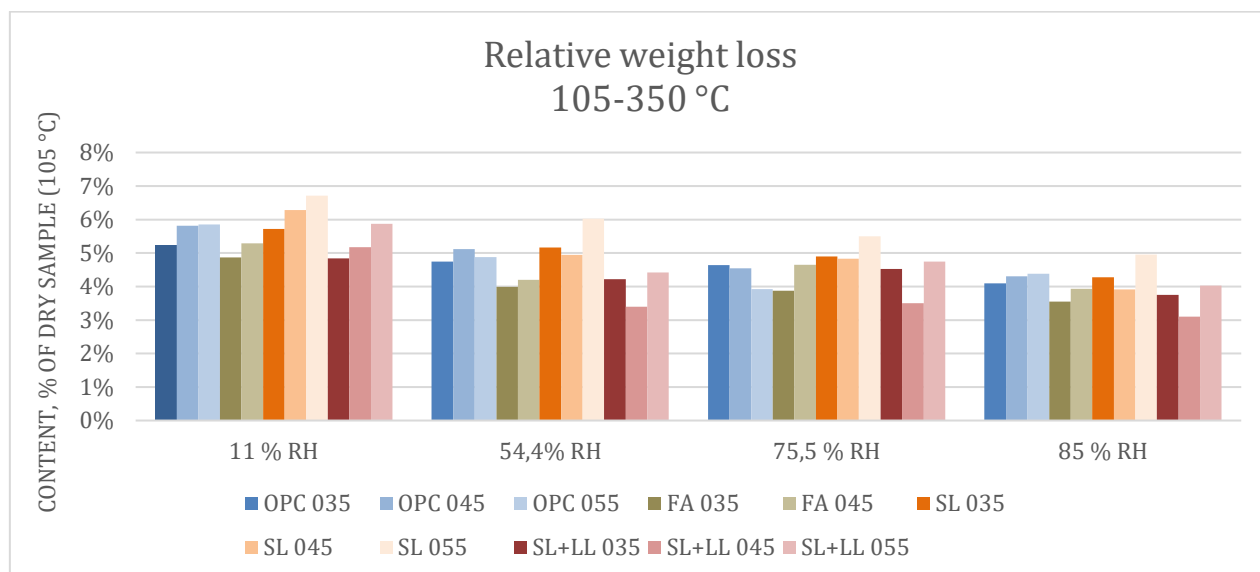
Inblandning av slagg verkar ge en högre fuktkvot över hela mittenspannet, vilket kan förklaras av finare porer med mer specifik yta och ökad fuktadsorption som följd.

4.2 Indikation av kemiskt bundet vatten

Endast en ålder på ca 4 mån undersöks i detta projekt. Det motsvarar i sin tur olika hydratationsgrader för olika cementblandningar med dess olika reaktiviteter, vct och härdningsklimat. Hydratationsgrad är svårt att uppskatta men indikation av andel kemiskt vatten, framtaget enligt kapitel 3.11, kan ses i figur 4.8 och 4.9 nedan.



Figur 4.8: Indikation av kemiskt bundet vatten (105–350 °C), grupperat efter klimatbox med respektive RF. FA = 65% OPC+35% Flygaska, SL = 65% OPC+35% Slagg, SL+LL = 49% OPC+35% Slagg+16% Kalkstensmjöl. VCT= 0,35, 0,45, 0,55.



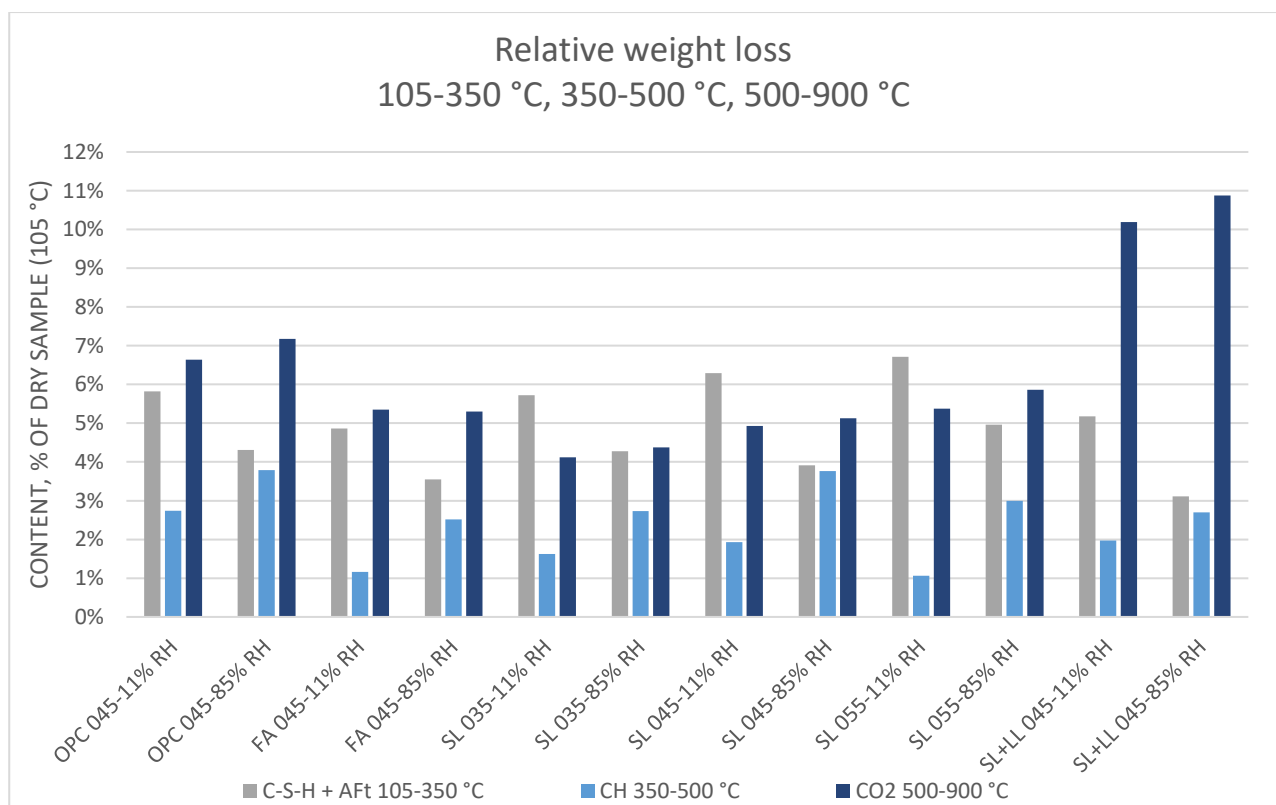
Figur 4.9: Indikation av kemiskt bundet vatten (105–350 °C) grupperat efter klimatbox med respektive RF. FA = 65% OPC+35% Flygaska, SL = 65% OPC+35% Slagg, SL+LL = 49% OPC+35% Slagg+16% Kalkstensmjöl. VCT= 0,35, 0,45, 0,55.

Indikation av kemiskt bundet vatten 105–350 °C, påvisar att ett högre vct ger en högre mängd hydratationsprodukter, huvudsakligen C-S-H + AFt, vilket är förväntat då en högre andel tillgängligt vatten borde vara positivt för hydratationen. Det som är mer intressant är att ett fuktigare härdningsklimat påvisar en lägre mängd hydratationsprodukter, se figur 4.8 och 4.9. Detta går emot tidigare studier där RF under 80 % medförde ett avstannade av hydratation (Powers, 1947). Det är värt att nämna att andelen hydratationsprodukter på ung cementpasta, som användes i denna studie, påverkas procentuellt mer av härdningsklimatet och tiden i klimatboxarna än välhydratiserade prover.

Blandningar med flygaska och slagg + kalkstensmjöl verkar ha lägst mängd kemiskt bundet vatten medan inblandning av slagg och ren OPC har högst mängd kemiskt bundet vatten.

4.3 Indikation av kemiskt bundet vatten, kalciumhydroxid och karbonatiseringsgrad

Resultaten från den kompletterande laborationen efter de intressanta resultaten sammanställs i figur 4.10 nedan. Med avseende på indikation av kemiskt bundet vatten bekräftas tidigare resultat i föregående kapitel 4.2.



Figur 4.10: Indikation av kemiskt bundet vatten (105–350 °C), mängden tillgänglig kalciumhydroxid (350–500 °C) och indikation av koldioxid (500–900 °C).

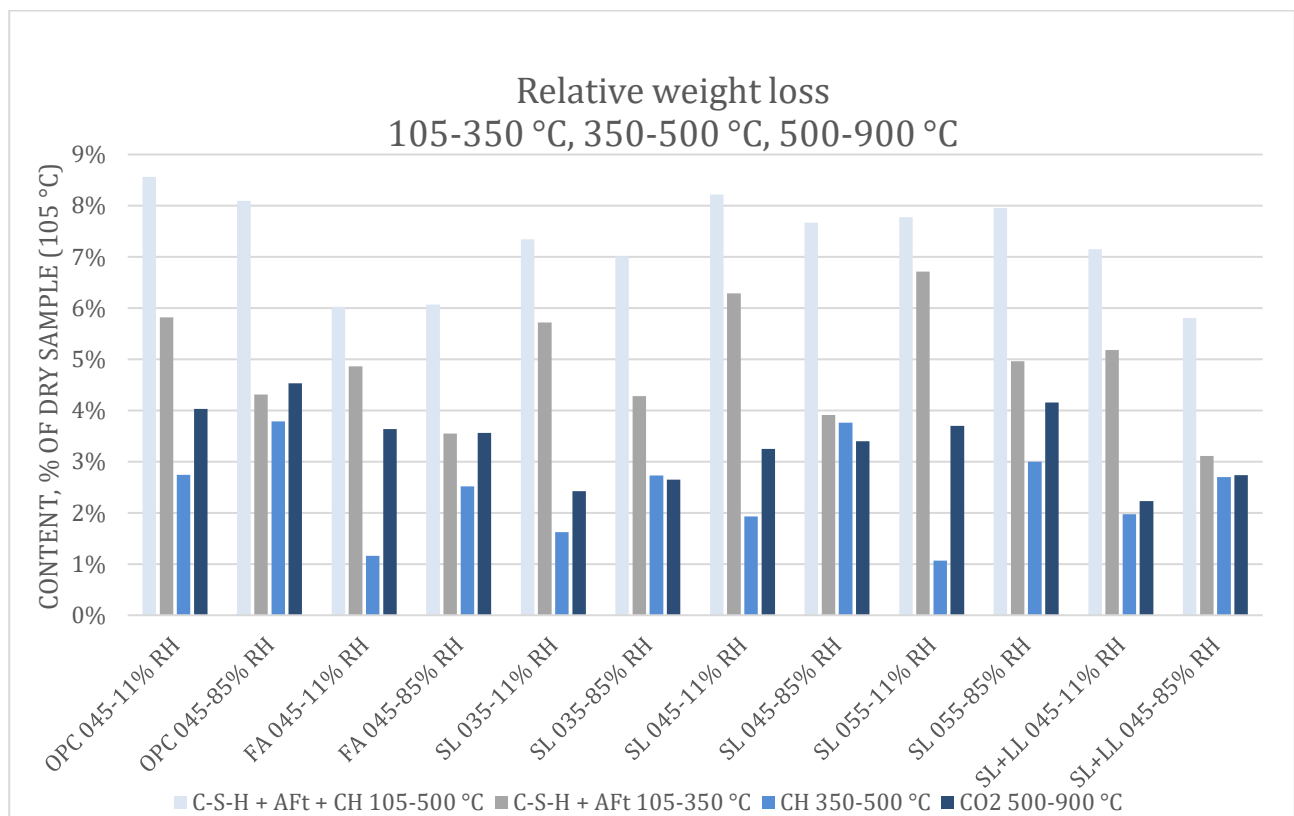
Trenden är att ett högre vct påvisar en högre andel kemiskt bundet vatten och ett fuktigare härdningsklimat påvisar en lägre andel kemiskt bundet vatten, se ljusgrå stapel i figur 4.10 ovan. Indikation av kalciumhydroxid påvisar motsatt trend med högre andel med fuktigare

härdningsklimat. Sammanslagning av indikation av kemiskt bundet vatten och kalciumhydroxid (105–500 °C), se ljusblå stapel i figur 4.11 nedan, påvisar mindre skillnader över härdningsklimaten 11 % RF och 85 % RF.

Blandningar med slagg + kalkstensmjöl påvisar högst viktavgång mellan 500–900 °C. Då upphettning mellan 500–900 °C visar indikerad viktförlust av CO₂ kommer kalkstenmjölet att avge stora mängder CO₂, se kapitel 3.12. Figur 4.11 nedan visar indikation av karbonatiseringsgrad där mätvärden är justerad för detta fenomen.

Cementpasta med flygaska samt cementpasta med slagg + kalkstensmjöl visar indikation av en lägre andel kemiskt bundet vatten. Den lägre andelen kemiskt bundet vatten för flygaska bekräftas av tidigare studie (Linderoth, 2018).

Alla blandningar med mineraltillägg påvisar lägre innehåll av kalciumhydroxid jämfört med OPC. Blandningar med flygaska och slagg + kalkstensmjöl påvisar lägst innehåll av kalciumhydroxid.



Figur 4.11: Som figur 4.10 med indikation av kemiskt bundet vatten och kalciumhydroxid sammanslaget (105–500 °C) och en indikation av karbonatiseringsgrad (500–900 °C) där hänsyn är taget till ingående koldioxid.

OPC påvisar högst indikation av karbonatisering, se blå stapel i figur 4.11. Inblandning av flygaska eller slagg verkar påvisa en lägre karbonatisering än OPC vilket kan förklaras av att mineraltilläggen binder upp kalciumhydroxiden som krävs för karbonatiseringen. Indikation av detta syns på innehållet av kalciumhydroxid, som har motsatt trend jämfört med indikation av karbonatisering. En tidigare studie visade dock att hastigheten för karbonatisering istället ökar med inblandning av mineraltillägg (Bohlin, Snibb, 2017).

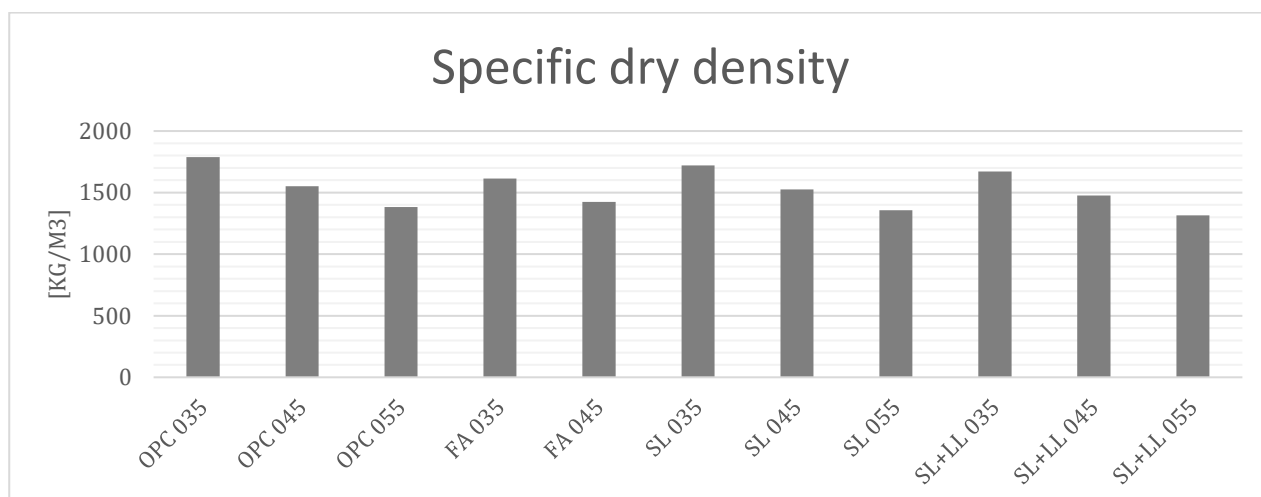
Karbonatiseringsgraden som uppstod under alla laborationsförfaranden för klimatboxarna uppgår till 2–4 %.

Cementpasta med slagg visar ett högre innehåll av kalciumhydroxid vid vct 0,45 jämfört med vct 0,35 och 0,55. Inblandning av slagg ger indikation på en högre andel kemiskt bundet vatten och lägre karbonatiseringsgrad än andra cementblandningar.

Ett högre vct och ett fuktigare klimat för cementpasta med slagg, upp till 85 % RF, påvisar en högre karbonatiseringsgrad vilket stöds av tidigare studier (Bohlin, Snibb, 2017).

4.4 Skrymdensitet

Skrymdensitet för de olika blandningar presenteras nedan i figur 4.12. Ett lägre vct ger en högre densitet. OPC och cementpasta med tillägg av slagg har högst densitet medan cementpasta med tillägg av flygaska påvisar lägst densitet.



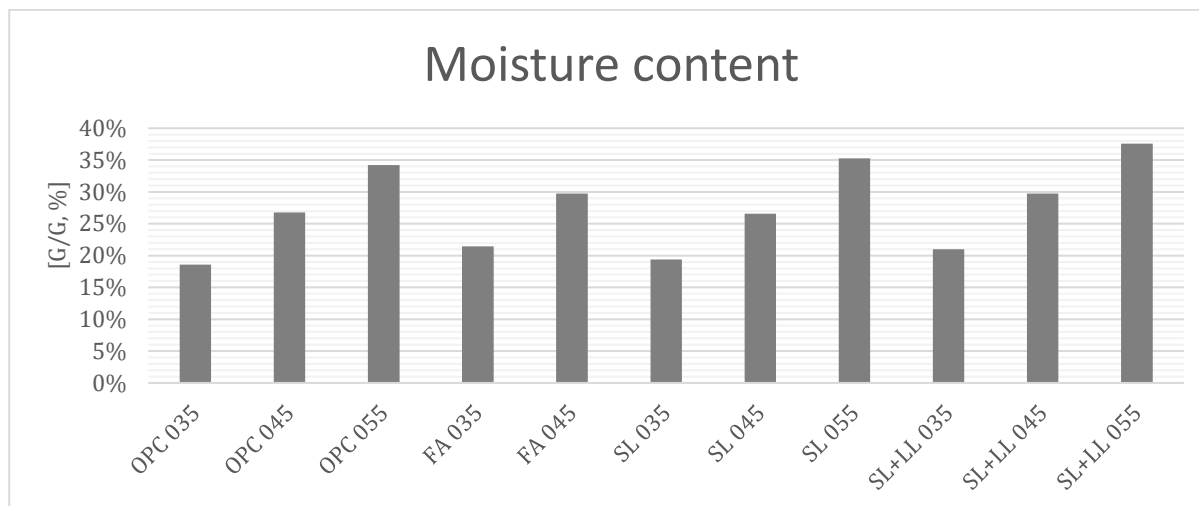
Figur 4.12: Skrymdensitet.

Densitet för cementpasta skiljer sig som mest mellan vanlig OPC och med tillägg av flygaska, skillnaden blir mer markant vid lägre vct där en högre andel av materialet består av bindemedel. För vct 0,35 har 100 % OPC en densitet på nästan 1800 kg/m³. Som jämförelse har cementpasta med 65 % OPC och 35 % flygaska en densitet på ca 1600 kg/m³.

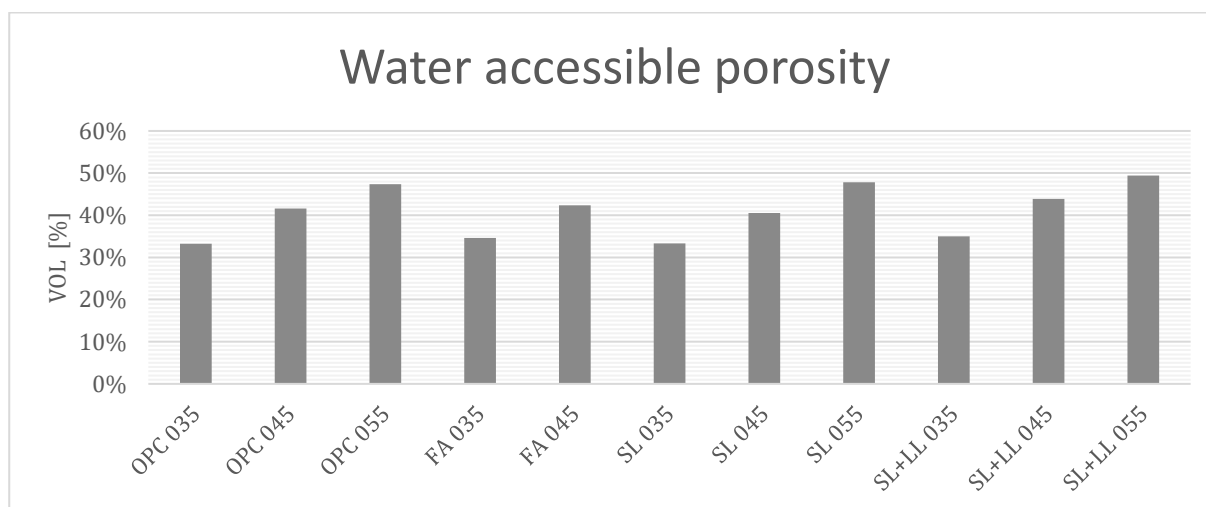
Densiteten har omvänd proportionalitet mot fuktkvot vid 100 % RF och total vattentillgänglig porositet, se figur 4.13 och 4.14 i nästa kapitel.

4.5 Fuktkvot vid vattenmättnad och total vattentillgänglig porositet

Figurerna visar sambandet mellan fuktkvot vid 100 % RF och total vattentillgänglig porositet, en högre fuktkvot vid 100 % RF kopplas direkt till högre total vattentillgänglig porositet, se figur 4.13 och 4.14 nedan.



Figur 4.13: Fuktkvot vid 100 % RF.



Figur 4.14: Total andel vattentillgänglig porositet.

Cementpasta med inblandning av flygaska eller slagg + kalkstensmjöl har högre fuktkvot vid 100 % RF för alla vct-tal. På samma vis är total vattentillgänglig porositet högst för blandningar med flygaska eller slagg + kalkstensmjöl. Cementpasta med inblandning av flygaska eller slagg + kalkstensmjöl är även väldigt lika varandra vid vct 0,35 och 0,45 med avseende på fuktkvot vid 100 % RF och total vattentillgänglig porositet.

OPC och cementpasta med inblandning av slagg är väldigt lika varandra över alla vct med avseende på fuktkvot vid 100 % RF och total vattentillgänglig porositet.

4.6 Sammanställning av resultat

1. Ett lågt vct verkar medföra en lägre andel kapillära porer och en högre densitet för alla blandningar, vilket kunde förväntas.
2. OPC och OPC med inblandning av slagg har en låg fuktkvot vid 100 % RF och en låg total vattentillgänglig porositet.
3. Inblandning av flygaska och inblandning av slagg + kalkstensmjöl har en hög fuktkvot vid 100 % RF och en hög total vattentillgänglig porositet. Dessa blandningar verkar medföra en högre andel kapillära porer med en hög fuktkapacitet inom högre RF-intervall. Samtidigt har de lägst fuktinnehåll över resterande RF-intervall vilket går emot tidigare studie (Linderoth, 2018) som visade mer fysikaliskt bundet vatten. Inblandning av flygaska gav även den lägsta densiteten av de olika blandningarna.
4. Inblandning av slagg verkar ge en högre fuktkvot över hela mittenspannet för RF och en lägre fuktkvot vid höga RF, vilket talar för en tät porstruktur vilket bekräftas av tidigare studie (Olsson, Nilsson, Åhs, Baroghel-Bouny, 2018).
5. Desorptionsisotermerna visar högre fuktkvot än andra desorptionsisotemer i tidigare studier på cementpasta. Dessa går dock ej att jämföra med varandra då det har varit inblandning av sandballast, som utgör vikt och volym men bidrar ej till fuktbindningen eller fukttransport annat än i gränsskiktet och medföljande sprickor. De andra desorptionsisotermerna har även gjorts på andra hydratationsgrader.
6. Ett högre vct påvisar en högre mängd kemiskt bundet vatten, vilket kunde förväntas. Ett torrare härdningsklimat påvisar dock en högre mängd kemiskt bundet vatten och en lägre andel kalciumhydroxid, vilket behöver undersökas vidare med reproducerade resultat. Sammanslagning av indikation av kemiskt bundet vatten och kalciumhydroxid (105–500 °C) påvisar mindre skillnader mellan 11 % RF och 85 % RF.
7. Ett högre vct (testat på cementpasta med slagg) påvisar en högre karbonatiseringsgrad och kan bero på en större andel kapillärporer. Ett fuktigare härdningsklimat (upp till 85% RF) påvisar en högre karbonatiseringsgrad, detta stöds av tidigare studier (Bohlin, Snibb, 2017).
8. Inblandning av flygaska eller slagg verkar påvisa en lägre karbonatiseringsgrad än OPC. Tidigare studier visade dock att hastigheten för karbonatisering istället ökar med inblandning av mineraltillägg (Bohlin, Snibb, 2017). Blandningarna med flygaska visar även indikation av lägre mängd kemiskt bundet vatten vilket bekräftas av tidigare studier (Linderoth, 2018).
9. Cementpasta med slagg gav indikation av högst mängd kemiskt bundet vatten.
10. Alla blandningar med mineraltillägg påvisar ett lägre innehåll av kalciumhydroxid jämfört med OPC.

5. Slutsats

Uppmätning av endast krossad cementpasta och ingen komplett betongblandning med aggregatkomposition gör att resultaten kommer att skilja sig från produkter som faktiskt kommer att användas på marknaden. Validering i fält blir därför omöjlig men den relativa analysen av resultaten kan dock ge indikationer på hur färdig betong med dessa olika bindemedel skiljer sig relativt mot varandra med avseende på fuktbindningsegenskaper. Om ballastkompositionen och övriga blandningsförhållanden är densamma och bara typen av cementpasta skiljer sig kan det antas att sorptionskurvor på betong förhåller sig till varandra som sorptionskurvor på cementpaster. Det var tillämpligt med inmätning av en OPC för varje blandning med mineraltillägg då det underlättade den analytiska delen.

Känslighetsanalysen visade att provkropparna som mättes in möjligtvis var för små, vilket gjorde att eventuella felkällor och mätfel blev procentuellt större. Många av cementpastorna hade liknande resultat, ett sammanslaget mätfel som orsakar en tiondels procentskillnad kan vara avgörande om ett prov är över eller under ett annat med avseende på inmätt egenskap. Ett mindre antal olika cementpaster bör testas åt gången med tanke på exponeringstiden vid vägningarna och istället fler och eventuellt större mängd av samma prov. Effekten av kalciumhydroxid som koldioxidabsorbent behöver testas i ett separat experiment. Ett alternativt sätt för att säkerställa fuktjämvikt med annan metod än kontrollvägningar (som är invasiv med avseende på karbonatisering) hade varit mer tillämpligt. Ett förslag är användandet av kalibrerade givare för att ge en bra indikation av fuktjämvikt.

Det saknas en tydlig standard på hur sorptionskurvor ska tas fram på cementlösa bindemedel. Hur fås representativa provkroppar och vilken provkroppsform och vikt ska användas? Frågor som definitionen av konstant massa, mognadsålder på provkropparna samt vilka salter som ska användas och prioriteras behöver diskuteras. Ska absorptionsisotermerna tas fram samtidigt med dubbla klimatboxar? Det behövs klara riktlinjer för hur denna viktiga materialegenskap ska tas fram.

Med små justeringar av provningsmetoden och med tydliga riktlinjer för laborationsmomenten kan inmätning i klimatboxar åter igen bli en tillämplig metod för att mäta in och undersöka nya cementprodukter på marknaden. Metoden behöver dock jämföras med inmätningar från DVS-metoden (som dock har svårt att validera sig själv) samt äldre inmätningar i klimatboxar på representativa prover.

Inmätningar av sorptionsisotemer bör göras på flera isotemer, förslagsvis mellan +5 °C till +25 °C som är representativt för uttorkningsklimat på byggarbetsplatser, samt på prover som har en lägre ålder än 4 månader. Prover som har en låg ålder har dock en hydratationsgrad som procentuellt påverkas mer av härdningsklimatet i klimatboxarna än välhydratiserade prover. Det udda resultatet med indikation av högre andel kemiskt bundet vatten med minskat RF i härdningsklimatet behöver återskapas på fler inmätningar. Om resultaten kan återskapas behöver detta kontraintuitiva fenomen undersökas ytterligare då det saknar stöd i tidigare litteratur, som visar motsatt fenomen.

Referenslista

Bohlin K., Snibb R. (2016). Carbonation of concrete - Effect of mineral additions and influence on transport properties. Master's Thesis. Chalmers University of Technology

Burström, P. G. (2006). Byggnadsmaterial: uppbyggnad, tillverkning och egenskaper (2:a upp.). Studentlitteratur AB.

Byfors, J. (1980). Plain concrete at early ages. Cement- och betonginstitutionen, Stockholm.

Fagerlund, G. (1994). Betonghandbok Material, utgåva 2. Svensk byggtjänst, Stockholm.

Fagerlund, G. (2010). Mineraliska tillsatsmedel i cement. Bygg & teknik, 23-29.

Feldman, R. F, Ramachandran V. S. (1971) Differentiation of interlayer and adsorbed water in hydrated Portland cement by thermal analysis. Cement and Concrete Research, Ottawa.

Gallucci E., Zhang X., Scrivener K.L. (2013). Effect of temperature on the microstructure of calcium silicate hydrate (C-S-H). Cement and Concrete Research.

Glass, G.K., Hassanein, A.M. and Buenfeld N.R. (1997). Monitoring the passivation of steel in concrete induced by cathodic protection. Corrosion Science.

Greenspan L. (1977). Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. National Bureau of Standards, Washington, DC.

Hagentoft C.E. (2012). Introduction to Building Physics. Studentlitteratur AB.

Hedenblad, G., Nilsson, L-O. (1985). Kapillärmättnadsgrad - ett verktyg för noggrann bestämning av fukttinnehåll i betong. Rapport TVBM3022, Lund.

Hedenblad, G. (1996). Materialdata för fukttransportberäkningar. (BFR T-skrift; Vol. T19:1996). Byggeforskningsrådet (BFR).

Jacobsen, S., Jahren, P. (2002). Binding of CO₂ by carbonation of Norwegian OPC concrete. CANMET/ACI, International Conference on Sustainability and Concrete Technology, Lyon.

Li, X., Snellings, R., Antoni, M. et al. (2018). Reactivity tests for supplementary cementitious materials: RILEM TC 267-TRM phase 1. Mater Struct 51, 151.

Linderoth O. (2019). Uttorkningsegenskaper och strukturutveckling hos framtida betongsammansättningar med mineraliska tillsatsmaterial. Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, Lunds Tekniska Högskola.

Lindvall A. (2011). Beständighetsegenskaper hos anläggningsbetong med stenkolsflygaska. Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, Thomas Concrete Group AB.

Mjörnell K.N. (1997). Moisture Conditions in High Performance Concrete. Mathematical Modelling and Measurements. Doctoral Thesis, Chalmers University of Technology.

Nilsson L.O. (2018). Konsten att räkna på fukt, RäknaF. Hämtat ifrån:
<http://www.fuktcentrum.lth.se/verktyg-och-hjaelpmedel/raekna-paa-fukt/>

Nilsson L.O. (2020). Beräkningar för bascement döms ut. Hämtat ifrån:
<https://betong.se/2020/02/24/berakningar-for-bascement-doms-ut/>

Olsson, N., Nilsson, L. O., Åhs, M., & Baroghel-Bouny, V. (2018). Moisture transport and sorption in cement based materials containing slag or silica fume. *Cement and Concrete Research*, 106, 23-32.

Powers TC. (1947) A discussion of cement hydration in relation to the curing of concrete. In: *Proceedings*, vol. Highway Research Board, Washington, DC.

Powers, T.C., Brownyard, T.L. (1948). Studies of the physical properties of hardened portland cement paste. *Bulletin 22*. PCA Research Laboratories, Chicago.

Tveit, A. (1966). Measurements of Moisture Sorption and Moisture Permeability of Porous Materials. Norwegian Building Research Institute.

Wallénten P. (2018). RäknaF-Stöd för kombinerande värme- och fuktberäkningar i byggnadsdelar. Rapport TVBH-3063, Lund.

Xu A. (1989). Water desorption isotherms of cement mortar with fly ash. *Nordic Concrete Research*.

Åhs M. (2008). Sorption scanning curves for hardened cementitious materials. *Construction and building materials*, Lund.

Shi, Z., Geiker, M. R., De Weerd, K., Østnor, T. A., Lothenbach, B., Winnefeld, F., Skibsted, J. (2017). Role of calcium on chloride binding in hydrated Portland cement–metakaolin–limestone blends. *Cement and Concrete Research*, 95, 205–216.

Stelmarczyk M., Rapp T., Hedlund H., Carlström S. (2019). Inmätning av Bascement för uttorkningsberäkning i Produktionsplaneringen Betong. Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, Sveriges Byggindustrier AB.

Song, H., Jeong, Y., Bae, S., Jun, Y., Yoon, S., Eun Oh, J. (2018). A study of thermal decomposition of phases in cementitious systems using HT-XRD and TG. *Construction and Building Materials*, 169, 648–661.

Bilagor

Bilaga 1: Kontrollvägningar för fuktjämvikt enligt SS-EN ISO 12571. Grönmarkerad cell markerar godkänt viktförändring från föregående vägning för att säkerställa fuktjämvikt.

		2020-07-10 15:00	2020-07-13 09:00	2020-07-14 09:00	2020-07-16 09:00	2020-07-31 11:00	2020-08-03 09:00	3 days between	1 day between	2 days between	15 days between	3 days between
#	RH [%]	1# Total mass [g]	2# Total mass [g]	3# Total mass [g]	4# Total mass [g]	5# Total mass [g]	6# Total mass [g]	#1-2	#2-3	#3-4	#4-5	#5-6
#1	11.30	34,120	34,125	34,139	34,132	34,087	34,091	-0,015%	-0,041%	0,021%	0,132%	-0,012%
#1	33.10	31,743	31,671	31,619	31,529	31,118	31,083	0,227%	0,164%	0,285%	1,304%	0,112%
#1	54.40	33,039	32,968	32,943	32,909	32,759	32,739	0,215%	0,076%	0,103%	0,456%	0,061%
#1	75.50	32,778	32,764	32,764	32,761	32,739	32,739	0,043%	0,000%	0,009%	0,043%	0,024%
#1	85.10	35,844	35,817	35,802	35,800	35,794	35,794	0,075%	0,042%	0,006%	0,017%	0,000%
#1	97.60	35,794	35,618	35,503	35,377	35,064	34,998	0,492%	0,323%	0,355%	0,885%	0,188%
#2	11.30	30,017	30,011	30,023	30,018	29,981	29,984	0,020%	-0,040%	0,017%	0,123%	-0,010%
#2	33.10	31,788	31,681	31,611	31,486	31,019	30,977	0,337%	0,221%	0,395%	1,483%	0,135%
#2	54.40	29,673	29,586	29,555	29,522	29,358	29,341	0,293%	0,105%	0,112%	0,556%	0,058%
#2	75.50	32,608	32,580	32,568	32,556	32,508	32,495	0,086%	0,037%	0,037%	0,147%	0,040%
#2	85.10	33,424	33,391	33,363	33,358	33,343	33,340	0,099%	0,084%	0,015%	0,045%	0,009%
#2	97.60	35,929	35,723	35,604	35,442	34,748	34,665	0,573%	0,333%	0,455%	1,958%	0,239%
#3	11.30	24,572	24,572	24,585	24,582	24,555	24,561	0,000%	-0,053%	0,012%	0,110%	-0,024%
#3	33.10	29,338	29,240	29,174	29,055	28,636	28,600	0,334%	0,226%	0,408%	1,442%	0,126%
#3	54.40	31,017	30,924	30,887	30,846	30,665	30,644	0,300%	0,120%	0,133%	0,587%	0,068%
#3	75.50	28,753	28,734	28,716	28,700	28,656	28,641	0,066%	0,063%	0,056%	0,153%	0,052%
#3	85.10	30,893	30,854	30,788	30,759	30,715	30,699	0,126%	0,214%	0,094%	0,143%	0,052%
#3	97.60	30,208	29,993	29,863	29,693	29,318	29,239	0,712%	0,433%	0,569%	1,263%	0,269%
#4	11.30	29,043	29,047	29,058	29,057	29,031	29,034	-0,014%	-0,038%	0,003%	0,089%	-0,010%
#4	33.10	30,718	30,646	30,587	30,493	30,151	30,125	0,234%	0,193%	0,307%	1,122%	0,086%
#4	54.40	30,918	30,844	30,818	30,790	30,668	30,657	0,239%	0,084%	0,091%	0,396%	0,036%
#4	75.50	31,715	31,693	31,682	31,668	31,638	31,631	0,069%	0,035%	0,044%	0,095%	0,022%
#4	85.10	33,770	33,726	33,685	33,674	33,655	33,650	0,130%	0,122%	0,033%	0,056%	0,015%
#4	97.60	34,407	34,206	34,079	33,918	33,600	33,499	0,584%	0,371%	0,472%	0,938%	0,301%
#5	11.30	26,841	26,842	26,848	26,843	26,820	26,823	-0,004%	-0,022%	0,019%	0,086%	-0,011%
#5	33.10	29,620	29,516	29,448	29,322	28,918	28,876	0,351%	0,230%	0,428%	1,378%	0,145%
#5	54.40	31,546	31,450	31,416	31,375	31,206	31,186	0,304%	0,108%	0,131%	0,539%	0,064%
#5	75.50	31,708	31,681	31,667	31,658	31,620	31,610	0,085%	0,044%	0,028%	0,120%	0,032%
#5	85.10	29,491	29,444	29,381	29,359	29,329	29,321	0,159%	0,214%	0,075%	0,102%	0,027%
#5	97.60	33,570	33,334	33,203	33,028	32,288	32,137	0,703%	0,393%	0,527%	2,241%	0,468%
#6	11.30	26,734	26,735	26,736	26,730	26,708	26,710	-0,004%	-0,004%	0,022%	0,082%	-0,007%
#6	33.10	27,602	27,526	27,467	27,369	26,972	26,942	0,275%	0,214%	0,357%	1,451%	0,111%
#6	54.40	26,104	26,047	26,028	26,006	25,908	25,899	0,218%	0,073%	0,085%	0,377%	0,035%
#6	75.50	34,500	34,485	34,479	34,470	34,454	34,449	0,043%	0,017%	0,026%	0,046%	0,015%
#6	85.10	35,801	35,771	35,738	35,732	35,733	35,730	0,084%	0,092%	0,017%	-0,003%	0,008%
#6	97.60	36,847	36,583	36,447	36,257	35,682	35,602	0,716%	0,372%	0,521%	1,586%	0,224%
#7	11.30	21,851	21,852	21,86	21,861	21,839	21,842	-0,005%	-0,037%	-0,005%	0,101%	-0,014%
#7	33.10	24,344	24,266	24,202	24,090	23,718	23,688	0,320%	0,264%	0,463%	1,544%	0,126%
#7	54.40	24,100	24,031	24,012	23,981	23,869	23,854	0,286%	0,079%	0,129%	0,467%	0,063%
#7	75.50	26,877	26,857	26,842	26,832	26,806	26,801	0,074%	0,056%	0,037%	0,097%	0,019%
#7	85.10	29,299	29,259	29,223	29,214	29,204	29,195	0,137%	0,123%	0,031%	0,034%	0,031%
#7	97.60	31,076	30,983	30,939	30,900	30,868	30,810	0,299%	0,142%	0,126%	0,104%	0,188%
#8	11.30	23,184	23,181	23,19	23,184	23,165	23,169	0,013%	-0,039%	0,026%	0,082%	-0,017%
#8	33.10	25,005	24,915	24,856	24,744	24,322	24,295	0,360%	0,237%	0,451%	1,705%	0,111%
#8	54.40	22,420	22,360	22,332	22,303	22,184	22,172	0,268%	0,125%	0,130%	0,534%	0,054%
#8	75.50	26,690	26,670	26,658	26,648	26,622	26,612	0,075%	0,045%	0,038%	0,098%	0,038%
#8	85.10	26,033	25,983	25,939	25,926	25,911	25,901	0,192%	0,169%	0,050%	0,058%	0,039%
#8	97.60	29,539	29,370	29,267	29,118	28,651	28,534	0,572%	0,351%	0,509%	1,604%	0,408%
#9	11.30	24,502	24,504	24,508	24,508	24,493	24,493	-0,008%	-0,016%	0,000%	0,061%	0,000%
#9	33.10	26,047	25,976	25,924	25,830	25,474	25,447	0,273%	0,200%	0,363%	1,378%	0,106%
#9	54.40	28,238	28,178	28,156	28,128	28,017	28,004	0,212%	0,078%	0,099%	0,395%	0,046%
#9	75.50	27,175	27,159	27,149	27,141	27,124	27,117	0,059%	0,037%	0,029%	0,063%	0,026%
#9	85.10	27,219	27,187	27,163	27,162	27,156	27,152	0,118%	0,088%	0,004%	0,022%	0,015%
#9	97.60	28,840	28,659	28,552	28,403	28,144	28,079	0,628%	0,373%	0,522%	0,912%	0,231%
#10	11.30	22,345	22,343	22,35	22,349	22,334	22,340	0,009%	-0,031%	0,004%	0,067%	-0,027%
#10	33.10	25,262	25,182	25,122	25,007	24,627	24,607	0,317%	0,238%	0,458%	1,520%	0,081%
#10	54.40	24,682	24,611	24,588	24,561	24,442	24,431	0,288%	0,093%	0,110%	0,485%	0,045%
#10	75.50	27,980	27,960	27,952	27,944	27,922	27,914	0,071%	0,029%	0,029%	0,079%	0,029%
#10	85.10	25,449	25,403	25,35	25,336	25,314	25,302	0,181%	0,209%	0,055%	0,087%	0,047%
#10	97.60	29,413	29,224	29,109	28,947	28,351	28,261	0,643%	0,394%	0,557%	2,059%	0,317%
#11	11.30	23,119	23,114	23,126	23,125	23,107	23,108	0,022%	-0,052%	0,004%	0,078%	-0,004%
#11	33.10	23,888	23,815	23,75	23,637	23,267	23,246	0,306%	0,273%	0,476%	1,565%	0,090%
#11	54.40	29,010	28,912	28,88	28,839	28,667	28,651	0,338%	0,111%	0,142%	0,596%	0,056%
#11	75.50	25,419	25,402	25,388	25,381	25,361	25,352	0,067%	0,055%	0,028%	0,079%	0,035%
#11	85.10	22,498	22,448	22,39	22,370	22,345	22,331	0,222%	0,258%	0,089%	0,112%	0,063%
#11	97.60	27,408	27,218	27,091	26,943	26,551	26,468	0,693%	0,467%	0,546%	1,455%	0,313%

Bilaga 2: Klimatiserad vikt, vikt på aluminiumbehållare, torrsvikt och beräknad fuktkvot för respektive provkropp och RF.

Label	Serie	RH [%]	Aluminium tray [g]	Climatised weight [g]	Dry weight [g]	Moisture content [%]
1	OPC 035	11,3%	2,105	13,536	12,386	11,19%
2	OPC 045	11,3%	2,123	13,216	12,056	11,68%
3	OPC 055	11,3%	2,157	11,763	10,725	12,11%
4	FA 035	11,3%	2,171	12,698	11,760	9,78%
5	FA 045	11,3%	2,158	12,024	11,127	10,00%
6	SL 035	11,3%	2,124	12,316	11,388	10,02%
7	SL 045	11,3%	2,122	9,556	8,813	11,10%
8	SL 055	11,3%	2,111	10,434	9,588	11,31%
9	SL+LL 035	11,3%	2,163	11,425	10,663	8,96%
10	SL+LL 045	11,3%	2,115	9,749	9,083	9,56%
11	SL+LL 055	11,3%	2,144	9,477	8,808	10,04%
1	OPC 035	54,4%	2,101	15,149	12,964	20,11%
2	OPC 045	54,4%	2,153	13,26	11,268	21,85%
3	OPC 055	54,4%	2,154	14,544	12,28	22,36%
4	FA 035	54,4%	2,104	14,273	12,404	18,15%
5	FA 045	54,4%	2,141	16,466	14,11	19,68%
6	SL 035	54,4%	2,156	12,601	10,89	19,59%
7	SL 045	54,4%	2,136	11,898	10,085	22,81%
8	SL 055	54,4%	2,146	10,559	8,93	24,01%
9	SL+LL 035	54,4%	2,131	13,419	11,637	18,75%
10	SL+LL 045	54,4%	2,171	11,256	9,692	20,80%
11	SL+LL 055	54,4%	2,172	14,188	11,974	22,59%
1	OPC 035	75,5%	2,157	12,582	10,564	24,00%
2	OPC 045	75,5%	2,102	14,328	11,629	28,33%
3	OPC 055	75,5%	2,098	11,668	9,504	29,22%
4	FA 035	75,5%	2,113	15,683	13,076	23,78%
5	FA 045	75,5%	2,163	14,647	12,014	26,73%
6	SL 035	75,5%	2,174	17,517	14,528	24,19%
7	SL 045	75,5%	2,127	11,737	9,556	29,36%
8	SL 055	75,5%	2,135	12,886	10,23	32,81%
9	SL+LL 035	75,5%	2,120	10,742	9,087	23,75%
10	SL+LL 045	75,5%	2,122	12,83	10,476	28,18%
11	SL+LL 055	75,5%	2,125	10,959	8,866	31,05%
1	OPC 035	85,1%	2,129	15,044	12,412	25,60%
2	OPC 045	85,1%	2,136	13,795	10,977	31,87%
3	OPC 055	85,1%	2,159	14,049	10,994	34,58%
4	FA 035	85,1%	2,151	15,582	12,745	26,78%
5	FA 045	85,1%	2,131	13,399	10,715	31,27%
6	SL 035	85,1%	2,169	17,125	14,037	26,02%
7	SL 045	85,1%	2,135	12,778	10,113	33,40%
8	SL 055	85,1%	2,152	10,76	8,412	37,51%
9	SL+LL 035	85,1%	2,121	12,269	10,179	25,94%
10	SL+LL 045	85,1%	2,113	11,45	9,169	32,33%
11	SL+LL 055	85,1%	2,156	9,809	7,767	36,39%

**INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH
SAMHÄLLSBYGGANDSTEKNIK
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA**

Göteborg, Sverige 2021
www.chalmers.se



CHALMERS