

Temperaturens inverkan på relativ fuktighet i betong

- Materialkarakterisering av betong med vulkanisk puzzolan

Hugo Andersson & Andrea Nilsson
Byggnadsmaterial | LTH | Lunds universitet



Temperaturens inverkan på relativ fuktighet i betong

- Materialkaraktärisering av betong med vulkanisk puzzolan

Hugo Andersson & Andrea Nilsson



LUND
UNIVERSITY

Master Thesis, Report 5148, Division of Building Materials, Faculty of Engineering, Lund University, Lund, 2026

Examensarbete, Rapport 5148, Avdelningen Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund, 2026

Temperaturens inverkan på relativ fuktighet i betong
- Materialkaraktisering av betong med vulkanisk puzzolan

The Influence of Temperature on Relative Humidity in Concrete
- Material Characterization of Concrete Containing Volcanic Pozzolan

Hugo Andersson & Andrea Nilsson

Report 5148
ISRN LUTVDG/TVBM-26/5148-SE

Antal sidor/Number of pages: 67
Illustrationer/Illustrations: 51

Sökord

Betong, cement, relativ fuktighet, RF, RF-prob, RF-sensor, ingjuten, temperatur, temperaturpåverkan, temperaturvariationer, vulkanisk puzzolan, VPI, hållfasthet, kalorimetri, självuttorkning

Keywords

Concrete, cement, relative humidity, RH, RH-probe, RH-sensor, temperature, temperature influence, temperature variations, volcanic pozzolan, VPI, compressive strength, calorimetry, self-desiccation

© Copyright: Division of Building Materials, Faculty of Engineering, Lund University, Lund 2026
Avdelningen Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2026.

Byggnadsmaterial
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 Lund

www.byggnadsmaterial.lth.se

Division of Building Materials
Faculty of Engineering
Lund University
P.O. Box 118
SE-221 00 Lund
Sweden

www.byggnadsmaterial.lth.se/english

Förord

Detta examensarbete avslutar vår utbildning på civilingenjörsprogrammet inom väg- och vattenbyggnad vid Lunds Tekniska Högskola. Arbetet har skrivits vid avdelningen för byggnadsmaterial på LTH med Magnus Åhs som handledare och Peter Johansson som examinator.

Vi vill rikta ett stort tack till vår handledare Magnus Åhs för god handledning och kloka synpunkter under arbetets gång. Vidare vill vi tacka Stefan Backe för stöd i det laborativa arbetet samt Lars Wadsö för hjälp med utformning och tolkning av kalorimetrimätningar.

Vi vill även tacka Rickard Hahto på Electrotech Kalix AB, som bistått med trådlösa RF-prober, samt Robert Larsson på Heidelberg Materials Cement Sweden AB, som bidragit med material och värdefulla synpunkter. Slutligen vill vi tacka Peter Johansson för granskning av arbetet och konstruktiv återkoppling.

Arbetet har delvis tagit hjälp av AI i form av ChatGPT från OpenAI till programmering i MATLAB och LaTeX, översättning samt meningsuppbyggnad.

Hugo Andersson
Andrea Nilsson

Maj 2026

Sammanfattning

Betong är ett av byggsektorns mest använda material, men cementproduktionen står för stora koldioxidutsläpp. Ett sätt att minska klimatpåverkan är att reducera andelen cementklinker genom att använda alternativa bindemedel. Vulkanisk puzzolan från Island, VPI är ett tillsatsmaterial från Heidelberg Materials Cement Sweden som kan användas tillsammans med cement som bindemedel i betong. Tillsatsmaterialet ingår i produkten Bascement Plus Slite från Heidelberg Materials där cirka 20 % av cementet ersatts med VPI. Då VPI är ett relativt nytt tillsatsmaterial finns det behov av ökad kunskap om hur materialet påverkar betongens fuktegenskaper, hållfasthetsutveckling och hydrationsförlopp. Relativ fuktighet, RF, är särskilt viktig eftersom den används vid bedömning av betongens uttorkning, vilket i sin tur kan påverka planering och utförande av efterföljande byggmoment.

Syftet med examensarbetet var att undersöka hur temperaturförändringar påverkar relativ fuktighet i betong med olika andelar VPI samt att jämföra ingjutna RF-prober från Electrotech Kalix AB (ET) med traditionell borrhålsmätning med Vaisala HMP40S (V). Arbetet omfattade även undersökning av självuttorkning, hållfasthetsutveckling och hydrationsförlopp genom kalorimetri. För RF-mätningar och hållfasthetsprovning undersöktes två betongrecept med samma vatten-bindemedeltal, vbt. I det ena receptet bestod bindemedlet av 100 % Bascement Plus Slite, innehållande 20 % VPI, och i det andra receptet ersattes en del av bascementet med ytterligare VPI, vilket gav en total andel VPI på 33,3 %. Efter initial uttorkning utsattes betongprovkropparna för gradvisa temperaturförändringar mellan +20 °C och +10 °C respektive mellan +20 °C och +30 °C. Dessutom genomfördes ett försök med momentan temperaturförändring mellan +20 °C och +10 °C. Självuttorkning och hydrationsförlopp utvärderades separat på cementbruksprover med flera olika VPI-andelar.

Resultatet visade att RF i betongen påverkas av temperaturförändring, där RF stiger när temperaturen höjs och vice versa. Både ET- och V-proberna visade samma övergripande respons, men det fanns skillnader mellan mätmetoderna. V-proberna mätte genomgående cirka 4 %-enheter högre RF än ET-proberna genom hela mätperioden. Skillnaden är betydande och kan påverka bedömningen av betongens uttorkningstid. V-probernas omedelbara respons på temperaturförändringar var också motsatt det förväntade, där RF steg tillfälligt när temperaturen sänktes och vice versa. Detta kan sannolikt kopplas till borrhålets luftvolym och snabbare temperaturutjämning i mätsystemet. ET-proben uppvisade inte responsen, utan följde betongens temperaturförändringar.

Betongen med högre andel VPI uppvisade generellt högre RF under uttorkningsförloppet, vilket kan tyda på en tätare porstruktur eller långsammare fukttransport. Skillnaderna mellan materialen var dock i vissa fall små och bör därför tolkas med försiktighet i relation till mätosäkerheten. Hållfasthetsprovningen visade att båda recepten uppnådde höga tryckhållfastheter, men att betongen med lägre VPI-andel hade högre hållfasthet vid samtliga provningstillfällen. Kalorimetrimätningarna visade att ökad andel VPI gav lägre maximal värmeeffekt, vilket tyder på att reaktionsförloppet påverkas när andelen bascement minskar och VPI-andelen ökar.

Abstract

Concrete is one of the most widely used materials in the construction sector, but cement production is associated with a significant climate impact. One way to reduce this impact is to decrease the proportion of cement clinker by using alternative binders. Volcanic pozzolan from Iceland, VPI, is a supplementary material supplied by Heidelberg Materials Cement Sweden that can be used together with cement as a binder in concrete. The supplementary material is included in the product Bascement Plus Slite from Heidelberg Materials, in which approximately 20 % of the cement has been replaced with VPI. Since VPI is a relatively new material, there is a need for increased knowledge of how it affects the moisture behavior, strength development and hydration process of concrete. Relative humidity, RH, is particularly important as it is used to assess concrete drying, which in turn can affect the planning and execution of subsequent construction activities.

The aim of this thesis was to investigate how temperature changes affect measured relative humidity in concrete with different proportions of VPI, and to compare embedded wireless RH-probes from Electrotech Kalix AB (ET) with traditional borehole measurements using Vaisala HMP40S (V) probes. The study also included self-desiccation, strength development and hydration process evaluated by calorimetry. For the RH measurements and strength testing, two concrete mixes with the same water-to-binder ratio were studied. One mix consisted of 100 % Bascement Plus Slite, while in the other mix part of the cement was replaced with additional VPI, resulting in a total VPI content of 33.3 %. After initial drying, the concrete specimens were exposed to gradual temperature changes between +20 °C and +10 °C, and between +20 °C and +30 °C. In addition, one test with an instantaneous temperature change between +20 °C and +10 °C was performed. Self-desiccation and hydration behavior were studied separately on cement mortar samples with several different VPI contents.

The results showed that RH in the concrete was affected by temperature changes, RH increased when the temperature increased and vice versa. Both the ET- and V-probes showed the same overall response, but differences were observed between the methods. The V-probes consistently measured approximately 4 percentage points higher RH than the ET-probes throughout the measurement period. The difference is significant and may affect the assessment of concrete drying time. The immediate response of the V-probes to temperature changes also deviated from the expected trend, as RH temporarily increased when the temperature was lowered and vice versa. This is likely related to the air volume in the borehole and faster temperature equalization in the measurement system. The ET probes did not show this response but instead followed the temperature changes in the concrete.

The concrete with higher VPI content generally showed higher RH during the drying process, which may indicate a denser pore structure or slower moisture transport. However, the differences between the materials were in some cases small and should therefore be interpreted with caution in relation to the measurement uncertainty. The strength testing showed that both mixes achieved high compressive strength, but the concrete with the lower VPI content had higher strength at all testing ages. The calorimetry measurements showed that an increased VPI content resulted in a lower maximum heat flow, indicating that the reaction process is affected when the proportion of cement decreased and the VPI content increases.

Innehållsförteckning

1	Introduktion	1
1.1	Syfte och frågeställning.....	2
2	Teori	3
2.1	Cement.....	3
2.1.1	Tillverkning av portlandcement.....	3
2.1.2	Puzzolana bindemedel	4
2.2	Kalkbaserade bindemedels kemi	5
2.3	Fukt i luft.....	6
2.4	Fukttransport i luft	6
2.5	Fukt i betong	6
2.6	Fukttransport i betong.....	9
2.7	Hållfasthet	10
2.8	Kalorimetri	11
2.9	Kalibrering av RF-sensorer	11
2.10	Tidigare studier	12
3	RF-prober	15
4	Material	17
4.1	Bascement Plus Slite.....	17
4.2	Betongrecept	17
4.3	Bruksprovsrecept.....	18
5	Metod	19
5.1	Den färska betongens egenskaper.....	19
5.2	RF-mätningar.....	19
5.2.1	Förberedelse av provkroppar	19
5.2.2	Gjutning av betong.....	20
5.2.3	Installation av Vaisalaprober	22
5.2.4	Temperaturförlopp.....	24
5.3	Hållfasthet.....	24
5.3.1	Tryckprovning.....	25
5.4	Kalorimetri	26
5.5	Självtuttorkning.....	27
5.6	Kalibrering.....	28
5.6.1	Electrotech	28
5.6.2	Vaisala HMP40S	29
5.6.3	TESTO 175	31
6	Resultat och diskussion	33
6.1	Färska betongens egenskaper.....	33
6.2	RF-mätningar.....	33
6.2.1	Initial uttorkning.....	34
6.2.2	Omgivande klimat.....	36

6.2.3	Temperaturförlopp mellan +20 °C och +10 °C	40
6.2.4	Temperaturförlopp mellan +20 °C och +30 °C	42
6.2.5	Temperaturförlopp mellan +20 °C och +10 °C med momentan temperatur- förändring	44
6.3	Hållfasthet	46
6.4	Kalorimetri	47
6.5	Självtvorkning	52
7	Slutsats	55
8	Förslag till vidare studier	57
	Referenser	59
	Bilaga 1	61
	Bilaga 2	67

1 Introduktion

Betong är ett byggmaterial som består av cement, ballast, vatten, tillsatsmaterial och eventuella tillsatsmedel. Cementet och eventuella tillsatsmaterial härdar i kontakt med vatten och fungerar som bindemedel i betongen. Produktionen av cement startar i kalkbrott, där kalksten bryts, krossas och hettas upp till höga temperaturer för att driva ut koldioxid som finns bundet i materialet. Processen kräver stora mängder energi och bidrar till utsläpp av koldioxid, dels genom att driva ut bunden koldioxid, dels genom energi till förbränning [1].

Egenskaperna i betong styrs i första hand av förhållandet mellan vatten och cement som beskrivs av vattencementtalet, vct, där ett lägre värde innebär en större mängd cement och vice versa [2]. Ett lägre vct ger i regel högre hållfasthet och snabbare härdningsförlopp i betongen vilket är attraktivt inom produktionen. Idag finns ett större intresse och fokus på klimatet, där branschen skiftar över mot att använda betong med högre vct, som direkt innebär att en mindre mängd cement används och som i sin tur leder till ett lägre klimatavtryck.

I betong kan material som innehåller kiseldioxid tillsättas för att påverka egenskaperna i betongen och samtidigt minska andelen cement [2]. Materialen kallas för puzzolaner och är ofta restprodukter från andra industrier, som masugnsslagg och flygaska. Puzzolaner fungerar också som en typ av bindemedel i betong. Genom att byta ut en del av cementet mot puzzolana material kan mängden cement minska samtidigt som puzzolaner ger betongen andra egenskaper, exempelvis en tätare porstruktur.

Heidelberg Materials Cement Sweden har nyligen utvecklat en typ av cement med högre andel bindemedel med lägre klimatpåverkan. Cementet består av portlandklinker, kalkstensfiller och vulkanisk aska från Island som puzzolan, så kallad VPI (Volcanic Pozzolan Iceland) [3]. Vulkanaskan finns i stor mängd, vilket innebär att produktionen av detta cement kan fortlöpa utan avbrott under lång tid.

Då cementtypen är ny är det intressant att undersöka dess egenskaper. Genom att studera temperaturens inverkan på relativ fuktighet, självuttorkning, mätmetoder, hållfasthet och hydrationsförlopp kan en mer heltäckande bild av materialets egenskaper erhållas. Dessa områden är centrala för att förstå hur betongen fungerar i praktisk byggproduktion och för att bedöma dess potential för framtida användning.

Nyligen har en ny typ av prob som mäter relativ fuktighet tagits fram. Proben gjuts in direkt i betongen, är batteridriven och mäter både den relativa fuktigheten och temperaturen simultant under en längre period. Då sensorn är ny är det intressant att mäta den relativa fuktigheten med den nya tekniken och jämföra med traditionell borrhålmätning parallellt.

1.1 Syfte och frågeställning

Syftet med examensarbetet är att undersöka hur temperaturvariationer påverkar uttorkningsförloppet och den relativa fuktigheten i betong tillverkad med olika andelar vulkanisk puzzolan. Arbetet syftar även till att utvärdera skillnader mellan ingjutna RF-prober och traditionell borrhålsmätning samt att studera hur cementets sammansättning påverkar självuttorkning, hållfasthetsutveckling och hydratationsförlopp.

Frågor som skall besvaras är:

- Hur påverkas uttorkningsförloppet och den relativa fuktigheten i betong med olika andel VPI vid temperaturvariationer?
- Hur skiljer sig resultat mellan ingjutna RF-prober och traditionell borrhålsmätning?
- Hur påverkas självuttorkningen av olika andelar VPI i bindemedlet?
- Hur påverkas hållfasthetsutvecklingen i betong av olika andelar VPI?
- Hur påverkas hydratationsförloppet och värmeutvecklingen av olika andelar VPI i cementbruk?

2 Teori

2.1 Cement

Cement delas in i olika huvudgrupper baserat på andel tillsatsmaterial. Ren portlandcement betecknas CEM I och består av mellan 90–95 vikt-% portlandklinker. Resterande del utgörs av 1 % kromatreducerande tillsats, till exempel järnsulfat, samt 5 % mineraliska tillsatser som kalkstensfiller eller puzzolaner [4].

Modifierad portlandcement betecknas CEM II där andelen portlandklinker inte får understiga 65 vikt-% [4]. Utöver portlandcement innehåller den en andel latent hydrauliska bindemedel, puzzolaner eller en kombination av båda [4]. Latenta hydrauliska bindemedel kräver en aktivator för att kunna reagera på samma sätt som ett hydrauliskt bindemedel, som hydroxyljoner (OH^-) vilka frigörs när portlandcement reagerar med vatten. Exempelvis är masugnsslagg ett latent hydrauliskt bindemedel [5]. CEM II kan även innehålla en hög andel kalkstensfiller [4]. Kalkstensfiller är ett inert, icke-reagerande material och används för att förbättra arbetbarheten [2].

Blandcement betecknas CEM III och innehåller utöver portlandklinker en stor del latent hydrauliskt bindemedel, ofta masugnsslagg. Andelen portlandklinker är mellan 20 och 65 vikt-% [4].

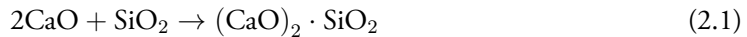
2.1.1 Tillverkning av portlandcement

Tillverkningen av portlandcement börjar med utvinning av kalksten och lera som sker i kalkbrott. I Sverige är Slite på Gotland och Våmb i Skövde exempel på kalkbrott som idag används för cementproduktionen [1]. Kalkstenen bryts och transporteras därefter till en stenkross där stenen krossas till mindre delar, största stenstorlek är cirka 80 mm. Därefter mals kalkstenen till råmjöl och den kemiska sammansättningen utvärderas [6].

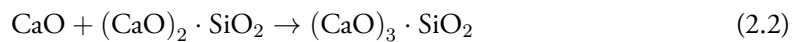
De kemiska komponenterna i råmaterialet kan variera från platsen det bryts. Utöver huvudkomponenten kalciumkarbonat (CaCO_3) som används till cementproduktionen kan råmaterialet innehålla ämnen som påverkar, och i vissa fall begränsar användningen av den slutliga produkten. Exempelvis kan höga halter svavel, natrium, kalium och magnesium begränsa användningen av cementet. Efter prover kan ytterligare komponenter som sand, bauxit, lera och skiffer tillsättas i malningen för att påverka egenskaperna. Lera och skiffer innehåller silika (SiO_2), aluminat och järn som är viktiga delar i portlandcement [6].

Cementklinkern tillverkas vid höga temperaturer i en process som kräver mycket energi. Kalksten innehåller cirka 35 vikt-% koldioxid. I det första steget värms och torkas det malda råmjölet upp till 850 °C i en lutande och roterande ugn och majoriteten av koldioxiden drivs ut ur kalkstenen. Därefter passerar råmaterialet kalcinatorn där ytterligare upphettning till 1000 °C sker och all koldioxid drivs ur kalkstenen. Sedan påbörjas den så kallade sintringsprocessen och materialet formas till kulor som transporteras ned genom den lutande ugnen där temperaturen ökar succesivt till cirka 1450 °C [6].

Under den stegvisa upphettningen bildas alit (C_3S) respektive belit (C_2S) i olika skeden av processen, där det är temperatur och tid som avgör hur mycket som bildas. Under den svalare delen av processen, cirka 800–900 °C bildas belit genom reaktion mellan kalciumoxid och kiseldioxid enligt reaktionsformel (2.1) [7].



När temperaturen i ugnen fortsätter stiga, i intervallet 900–1300 °C, sker reaktioner mellan aluminiumoxid och järnoxid med fri kalciumoxid. All järnoxid i råmaterialet bildar tetrakalciumaluminoferrit (C_4AF), den aluminiumoxid som inte binds i C_4AF bildar istället trikalciumaluminat (C_3A) [7]. När temperaturen överstiger 1300 °C i den varmare delen av roterugnen reagerar belit med ytterligare en kalciumoxid (CaO) och bildar alit, (C_3S), enligt reaktionsformel (2.2). Ju längre tid och högre temperatur råmaterialet bränns till, desto mer belit omvandlas till alit [6], [7].



Kulorna som formas kallas för cementklinker. Efter ugnen kyls klinkern snabbt ner till en temperatur under 1200 °C så att ingen reaktion eller omvandling som påverkar egenskaperna fortsätter ske [4]. Snabb nedkylning är viktig för att förhindra att alit (C_3S) delar sig och återgår till belit (C_2S) och fri kalciumoxid (CaO) som är avgörande för kvalitén på klinkern, se reaktionsformel (2.3) [7]. Portlandcement består av malen klinker och cirka 5% gips. Andra tillsatser beroende på cementtyp förekommer, som kalksten och puzzolaner [6].



2.1.2 Puzzolana bindemedel

Puzzolana material förekommer naturligt och som restprodukter från olika industrier och består i huvudsak av silika (SiO_2), ibland tillsammans med aluminium. Till skillnad från hydrauliska och latent hydrauliska bindemedel uppvisar materialet inte cementlikande egenskaper i kontakt med vatten, utan kräver tillgång av kalciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) för att det vid hydrataion skall utveckla egenskaper som liknar cement. Vid hydrataion av cementklinker bildas kalciumhydroxid som puzzolanerna kräver för att bilda CSH-gel [6], [8].

Silika förekommer både kristallint, i form av kvarts, och fritt i amorf form. För att reaktion skall ske behöver silikan förekomma i amorf form. Det vanligaste puzzolana materialet från industrin är flygaska, vilket kommer från aska vid förbränning i kolkraftverk. Det finns olika typer av puzzolaner där vulkanaska är vanligast [8]. Faktorer som påverkar reaktionsförmågan är bland annat glashalt, specifik yta och andel reaktiva oxider. En hög glashalt innebär hög reaktivitet. Material av samma typ kan förekomma i olika former med olika strukturer, exempelvis är kristallin kiseldioxid inte reaktiv medan amorf (glasig) kiseldioxid är starkt reaktiv. Att materialet är glasigt och därmed amorft innebär att det hettats upp och kylts ned snabbt [6].

VPI (Volcanic Pozzolan Iceland) är en naturlig puzzolan som kan användas som tillsatsmaterial i CEM II. Materialet utgörs av bergarten hyaloklastit som bildas vid subglaciära vulkanutbrott och bryts i täkter på Island [9]. Den snabba avkylningen när materialet bildas resulterar i en huvudsakligen amorf struktur, som är viktig för reaktiviteten i materialet.

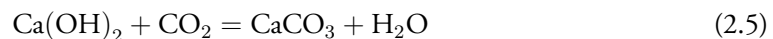
Den specifika ytan har stor betydelse för reaktiviteten. En större specifik yta innebär större reaktionsförmåga. Bland puzzolana material har silikastoft minst partiklar och störst specifik yta vilket också innebär hög reaktionsförmåga. Partiklarna i flygaska är större och reaktionsförmågan lägre. Exempelvis har flygaska specifik yta 250 – 600 m^2/kg enligt Blaine-metoden, medan silikastoft har cirka 20000 m^2/kg [6], [8].

2.2 Kalkbaserade bindemedels kemi

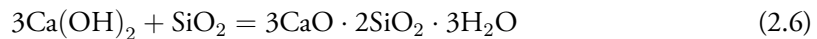
Bränd kalk (CaO) framställs genom kalcinering av kalksten (CaCO_3), även kallat kalciumkarbonat, och innebär att kalkstenen bränns vid hög temperatur till dess att koldioxid som finns bundet frigörs. Då bränd kalk blandas med vatten erhålls släckt kalk enligt reaktionsformel (2.4) [4].



Släckt kalk har tidigare använts som bindemedel i murbruk, då den släckta kalken långsamt absorberar tidigare frigjord koldioxid (CO_2) och återgår till kalciumkarbonat (CaCO_3). Detta sker enligt reaktionsformel (2.5) [4].



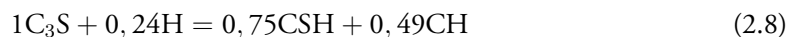
Den släckta kalken kan reagera med kiseldioxid (SiO_2) och bilda kalciumsilikathydrat, (CSH) enligt reaktionsformel (2.6). Kalciumsilikathydratet fungerar som bindemedel och bidrar till tidig hållfasthetsutveckling i betongen [2], [4].



Kiseldioxid förekommer både kristallint i form av kvarts och fritt. Kristallin kiseldioxid kan inte reagera med kalciumhydroxid och bilda CSH-gel. Puzzolaner, som exempelvis flygaska, masugnsslagg eller vulkanisk aska, innehåller fri kiseldioxid i amorf form, och är då reaktiv med kalciumhydroxid [4]. Portlandcement innehåller två typer av kalciumsilikater, alit (C_3S) och belit (C_2S) som nämnt ovan. Vid reaktion med vatten bildar komponenterna olika mängd CSH-gel i förhållande till del alit respektive belit [4]. Alit reagerar med vatten enligt reaktionsformel (2.7) och (2.8).



Som i andelar motsvarar



Belit reagerar enligt reaktionsformel (2.9) och (2.10),



Som i andelar motsvarar



Som framgår i reaktionsformlerna (2.7) - (2.10) produceras olika andelar CSH-gel och kalciumhydroxid vid hydrataion i förhållande till andelen alit (C_3S) respektive belit (C_2S) i portlandcement. Belit bildar förhållandevis mer CSH gel och bidrar därmed även till högre hållfasthetsutveckling i betongen. Kalciumhydroxiden som bildas utöver CSH-gel i reaktionerna, bildar CSH-gel vid reak-

tion med kiseldioxid, se reaktionsformel (2.6). Genom att tillsätta ämnen som innehåller kiseldioxid, exempelvis puzzolaner, till portlandcementet kan all kalciumhydroxid som utvecklas omvandlas till kalciumsilikathydrat och därmed öka betongens hållfasthet [4].

2.3 Fukt i luft

I luft finns det alltid vattenånga i varierande mängd. Denna mängd kan uttryckas genom ånghalten, v [g/m³], vilken anger massan vattenånga, $m_{\text{H}_2\text{O}}$ [g], per volymenhet luft, V_{luft} [m³], enligt ekvation (2.11).

$$v = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{luft}}} \quad (2.11)$$

Luftens mättnadsånghalt, v_s [g/m³], är beroende av temperaturen. Om ånghalten överskrider mättnadsånghalten, kommer överskott av vattenånga kondensera till vätska tills ånghalten i luften sjunker till mättnadsånghalten. Detta kan ske genom exempelvis temperatursänkning, där den lägsta temperatur innan kondensation definieras som daggpunkten, θ_s [2]. Mättnadsånghalten vid en specifik temperatur kan beräknas enligt ekvation (2.12).

$$v_s = 10^{-3} \cdot e^{a - \frac{b}{273,2+T}} \quad (2.12)$$

Där a är en konstant beroende av temperaturen ($a = 20,11$ när $T > 0$ °C och $a = 23,08$ när $T < 0$ °C), b är en konstant beroende av temperaturen ($b = 5\,061$ när $T > 0$ °C och $b = 5\,872$ när $T < 0$ °C) och T är temperaturen uttryckt i °C [10].

Förhållandet mellan aktuell ånghalt och mättnadsånghalten benämns relativ fuktighet, RF.

2.4 Fukttransport i luft

Fukttransporten i luft styrs av konvektion och diffusion. Konvektion innebär att vattenångan följer luftströmmen. Diffusion avser en slumpmässig, molekylär rörelse för vattenmolekylerna i gasform. Detta gör att molekylerna krockar med andra vattenmolekyler och genom detta rör sig till områden med lägre koncentration av vattenmolekyler [2].

2.5 Fukt i betong

Betong är ett poröst material med porer av varierande storlek vilket gör att det normalt sett alltid innehåller en viss mängd fukt. Vid tillverkning av betong tillförs stora mängder vatten till cementet varav en del binds kemiskt i reaktionsprodukterna och utgör så kallat icke-förångningsbart vatten. Det kemiskt bundna vattnet utgör en del av cementpastans fasta struktur och bidrar till materialets hållfasthet, men deltar inte i fukttransport eller fuktutbyte med omgivningen [11], [2].

Betong är ett hygroskopiskt material, vilket innebär att det kan uppta och avge fukt direkt från luften. Denna typ av fukt ingår i det fysikaliskt bundna, förångningsbara vattnet i materialet [2]. Det fysikaliskt bundna vattnet kan delas upp i adsorberat vatten, vilket syftar på vatten bundet på inre porytor, samt fukt som binds genom kapillärkondensation i porerna [11]. Adsorptionen är starkt kopplad till materialets porstruktur, då porstorleken och porstorleksfördelningen avgör den specifika ytan [2]. Mindre porradie vid konstant porvolym ger större total porarea, vilket möjliggör en ökad mängd adsorberat vatten [12]. Vid hydratationen täcks inte alla tomrum upp av reaktionsprodukter, utan det kvarstår en del utrymme vilket ger upphov till kapillärporer. Dessa porer är betydligt större,

men färre än gelporerna och bidrar till kapillärkondensationen [2].

Vid adsorption binds vattenmolekylerna till porernas inre ytor genom svaga intermolekylära krafter, främst Van der Waals-bindningar [13]. Materialytan har ett energiöverskott som minskar när ämnen binds till ytan. Detta gör att attraktionskraften till materialytan är större än vad den är mot andra vattenmolekyler [12]. Parametrar som påverkar porstrukturen är exempelvis hydratationsgrad, vct, cementhalt och cementtyp [14].

I det initiala skedet av fuktupptagning binds vattenmolekyler direkt till materialets inre ytor och bildar ett enskilt molekylskikt. Denna process benämns monomolekylär adsorption [13]. När fler vattenmolekyler tillförs kan ytterligare molekyler bindas till redan adsorberade molekyler, vilket innebär att flera molekylskikt successivt byggs upp. Denna process benämns polymolekylär adsorption [12]. Under detta skede dominerar adsorptionen den fysikaliska fuktfixeringen [13].

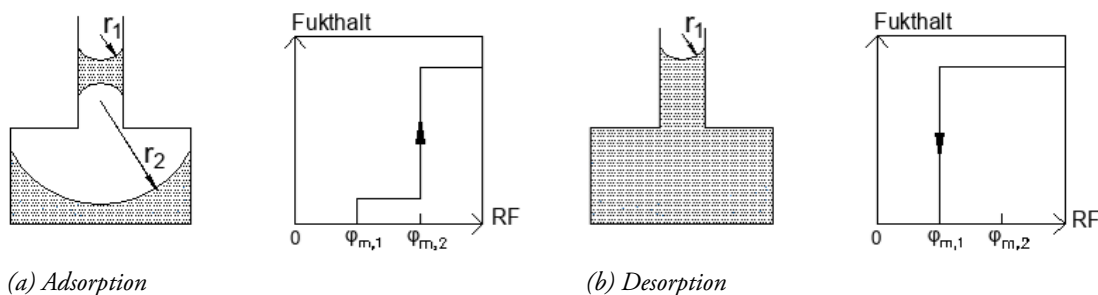
Vid jämvikt med omgivande relativ fuktighet råder ett dynamiskt tillstånd där lika många vattenmolekyler adsorberas till materialytan som lämnar den. Den totala mängden adsorberat vatten bestäms då av klimatförhållandena [12].

Kapillärkondensation är då vatten kondenserar vid relativa fuktigheter under 100%. När den relativa fuktigheten ökar och flera molekylskikt har bildats på porernas ytor, kan en sammanhängande vätskefas uppstå i porerna [11]. Vid RF omkring 45 % bildas starkt krökta vattenmenisker, vilket ger upphov till ett kapillärt undertryck. Mättnadsånghalten blir då lägre än över en plan vattenyta, vilket innebär att kondensation sker vid en luftfuktighet under 100 % [2], [12]. I detta stadium blir kapillärkondensationen den dominerande mekanismen för fysikalisk fuktbindning [13].

De mekanismer som styr adsorption och kapillärkondensation i betong återspeglas i materialets sorptionsisoterm. När ett material exponeras för en viss relativ fuktighet kommer det att sträva mot ett jämviktstillstånd, där materialets RF är i balans med omgivningens RF. Sambandet mellan fukthalten i materialet och den relativa fuktighet i omgivningen vid detta tillstånd beskrivs med sorptionsisotermen [2].

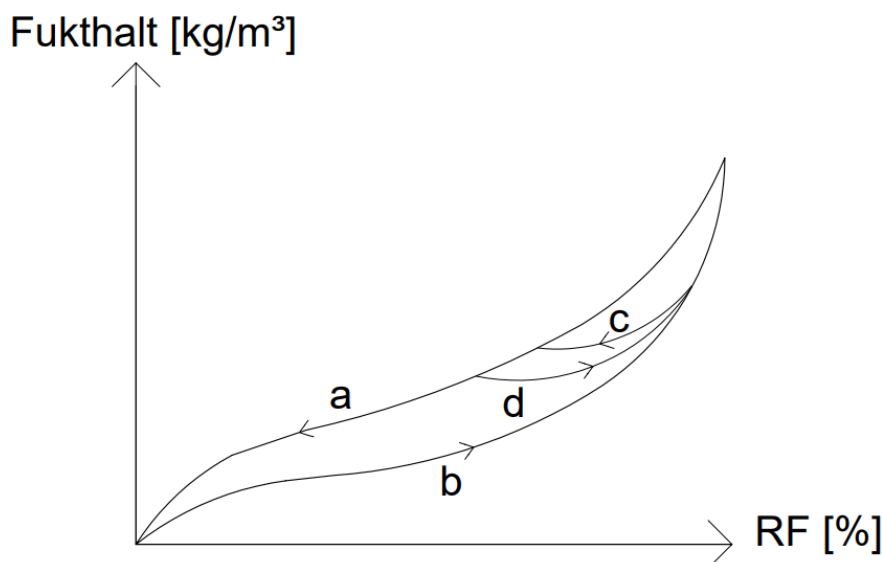
Sorptionsisotermen har två delar, absorptionskurvan som beskriver uppfuktning och desorptionskurvan som beskriver uttorkning. Uppdelningen beror på att materialets fuktillstånd påverkas av fukthistoriken, det vill säga om jämvikt nås från ett tidigare fuktigare eller torrare tillstånd. Absorptionskurvan ligger alltid under desorptionskurvan, vilket innebär att materialet binder mindre fukt om jämvikten nås genom uppfuktning jämfört med uttorkning [10].

Hysteresis sker där kapillärkondensation förekommer och kan illustreras med ”bläckflaskmodellen” genom att studera en por med två karakteristiska radier där $r_1 < r_2$, se vänstra figuren i figur 2.1a respektive 2.1b. Vid uppfuktning vattenfylls först de mindre porerna (r_1), eftersom dessa når sitt mättnadstillstånd, φ_m , vid lägre RF. De större porerna (r_2) fylls först när RF höjs ytterligare, se högra figuren i figur 2.1a. Vid uttorkning sker däremot ingen tömning förrän RF understiger mättnadsnivån för r_1 , vilket innebär att hela porsystemet kan tömmas under ett snävt intervall, se höger figur i figur 2.1b. Skillnaden mellan uppfuktning och uttorkning innebär att sambandet mellan fukthalt och relativ fuktighet blir olika beroende på processens riktning [12].



Figur 2.1: Hysteresis förklarat med "bläckflaskmodellen".

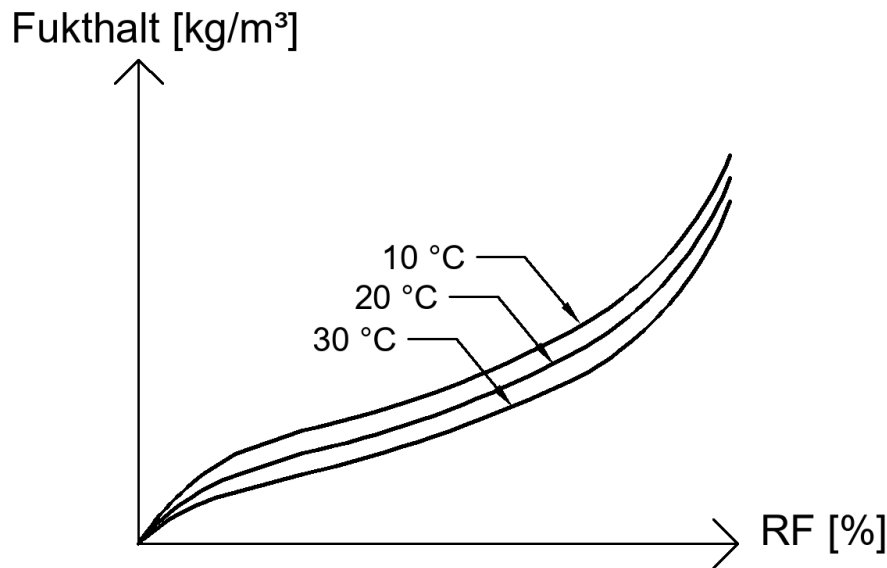
Figur 2.2 visar sorptionsisotermer där kurva a visar desorptionskurvan när materialet torkar från 100 till 0 % RF, och b visar adsorptionskurvan när materialet uppfuktas från 0 till 100 % RF. Om uttorkningen eller uppfuktningen avbryts innan den fullföljts och därefter vänder riktning, kommer processen inte följa sorptionsisotermen, utan istället en skanningsisoterm. Dessa förändringar i fuktillstånd är beroende av materialets fukthistorik, vilket är en följd av hysteresis. Skanningsisotermerna ligger alltid inom området mellan adsorptions- och desorptionskurvan, vilket illustreras av kurva c och d i figur 2.2.



Figur 2.2: Sorptionsisotermer för ett idealiserat förlopp vid desorption (kurva a) och absorption (kurva b). Kurva c respektive d visar skanningsisotermer.

Från 0 % RF är sorptionsisotermen inledningsvis brant, vilket innebär att absorption och desorption sker snabbt. Detta beror på att fuktbindningen främst sker genom monomolekylär adsorption och att attraktionskrafterna mellan vattenmolekylerna och materialytan är starka. Därefter avtar kurvans lutning när bindningen övergår till polymolekylär adsorption och bindningarna försvagas. Vid högre fuktnivåer ökar lutningen åter som följd av kapillärkondensation [13].

Jämviktsfukthalten är temperaturberoende, vilket innebär att en sorptionsisoterm gäller för en specifik temperatur. Som figur 2.3 visar varierar fukthalten vid en given RF med temperaturen, där lägre temperaturer ger större fuktbindning och vice versa. En temperaturförändring kan därför rubba den rådande fuktjämvikten, eftersom förhållandet mellan bunden fukt och fukt i porluften förändras. Därefter sker fukttransport tills ett nytt jämviktsstillstånd uppnås [10], [12].



Figur 2.3: Sorptionsisotermier vid tre olika temperaturer.

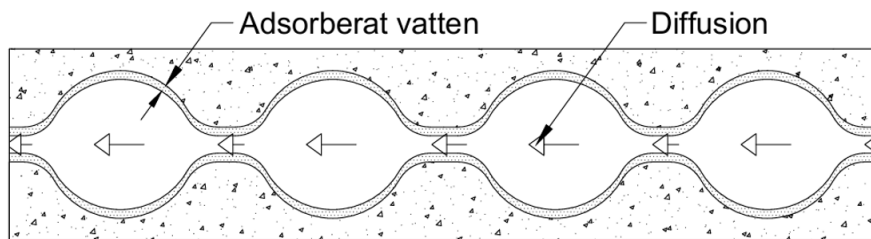
Sorptionskurvans lutning representerar materialets fuktkapacitet, vilket motsvarar fukttinnehållets förändring vid förändring av RF. Betong har en betydande fuktkapacitet, samtidigt som materialet uppvisar en långsam anpassning till förändringar i omgivande klimat, vilket innebär att förändringar i fukthalt sker gradvis [10].

2.6 Fukttransport i betong

När betongen inte befinner sig i fuktjämvikt uppstår skillnader i relativ fuktighet, ånghalt eller porvattentryck, vilket ger upphov till fukttransport. Transporten sker genom materialets porsystem och kan ske i både ångfas och vätskefas. Den totala fukttransporten utgörs av summan av ångdiffusion, transport av adsorberat vatten samt kapillärvätsketransport.

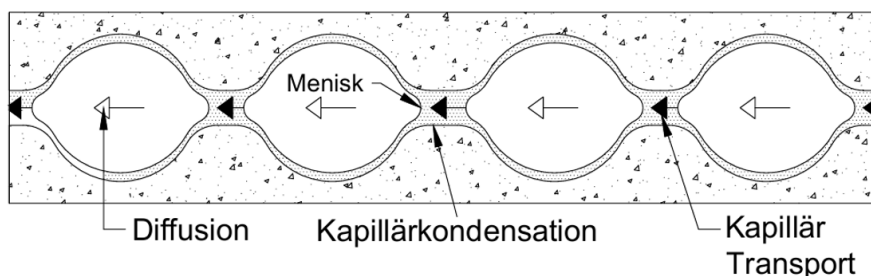
Fukttransporten styrs utöver den totala porositeten av porernas storlek, fördelning och inbördes sammanhängande struktur. Sammanhängande kapillärporer möjliggör effektiv transport, medan en mindre sammanhängande porstruktur begränsar transporten även om den totala porvolymen är stor. Gelporerna, som utgör störst del av den specifika ytan och därmed adsorptionen, bidrar i liten utsträckning till transport av fri vätska [8].

Vid låg relativ fuktighet där en stor andel av porerna är luftfyllda dominerar transport i ångfas. Vattenångmolekylerna diffunderar då genom de luftfyllda delarna av porsystemet, från områden med högre ånghalt till områden med lägre ånghalt, se figur 2.4 [10], [12].



Figur 2.4: Porsystem med adsorberade skikt vattenmolekyler och fukttransport genom diffusion.

När den relativa fuktigheten i betong ökar, förändras de dominerande transportmekanismerna, där vätsketransport successivt får ökad betydelse i förhållande till ångdiffusion. Genom kapillärkondensation bildas vattenmenisker i porerna, vilket skapar förutsättningar för vätsketransport, se figur 2.5 [10]. Denna transport drivs av skillnader i kapillärt undertryck och kan vara betydligt större än ångdiffusion. Vätsketransporten ökar i takt med att andelen vattenfyllda porer blir större [12].



Figur 2.5: Porsystem med kapillärkondensation och samtidig vätsketransport och diffusion.

Vid cirka 85 % RF bildas en sammanhängande vätskefas genom stora delar av kapillärporsystemet. Under dessa förhållanden ökar materialets fukttransportförmåga avsevärt [12]. Vid RF nära 100 % dominerar vätsketransport i de större porerna, medan ångdiffusionens bidrag är begränsat [10].

Tillsatsmaterial som puzzolaner påverkar transportegenskaperna genom att förändra betongens porstruktur. De minskar andelen större kapillärporer och ger en tätare struktur med finare porer, vilket gör transportvägarna smalare och mindre sammanhängande. Därmed minskar materialets fukttransportförmåga [10]. Samtidigt ökar den relativa betydelsen av luftporer för ångtransport, då dessa utgör gasfyllda volymer där diffusion kan ske med mindre motstånd. Detta blir särskilt tydligt vid lägre fuktillstånd, där kapillärporerna inte längre är vattenfyllda och ångtransporten därför dominerar [10].

2.7 Hållfasthet

Hållfasthetsutvecklingen i betong sker då bindemedel och vatten reagerar och bildar cementgel (CSH). Utvecklingen sker gradvis och är temperaturberoende. Det är viktigt att känna till hållfasthetsutvecklingen i betong för att undvika problem kopplat till bland annat frysning, formrivning och deformationer [15].

Betongens hållfasthet bestäms vanligen genom tryckprovning, eftersom materialet uppvisar betydligt högre tryckhållfasthet än draghållfasthet [2]. Tryckhållfastheten anges normalt vid 28 dygns ålder, vilket utgör en standardiserad referenspunkt. Hållfastheten utvecklas dock kontinuerligt från tidig ålder, där en betydande del av hållfastheten uppnås redan 24 timmar efter gjutning. Betongens sammansättning och härdningsförhållanden kan påverka hastigheten för reaktionen som påverkar

hållfastheten vid given tidpunkt. För att beskriva hållfasthetsutvecklingen över tid utförs tryckprovning vid flera tidpunkter [15], [2].

2.8 Kalorimetri

Med isoterm kalorimetri kan den specifika värmeeffekten [mW/g] mätas som en funktion av tiden [16], [17]. Metoden är användbar för att utvärdera hydrationshastighet och värmeutveckling i cementbruk. I en isoterm dubbelkalorimeter mäts värmeeffekten i prover parallellt med ett inert referensprov för att utjämna bakgrundssignaler och temperaturstörningar [18].

I kalorimetern finns fack där behållare med cementbruk placeras. Cementets hydrataion är en starkt exoterm reaktion som ger upphov till en betydande värmeutveckling. Behållarna är i kontakt med en värmesänka som leder bort värmen och håller temperaturen i instrumentet konstant, det vill säga isoterma förhållanden. Mellan behållare och värmesänka sitter värmesensorer placerade som registrerar värmeflödet [18].

För att omvandla värmeeffekt till standardenheter krävs en kalibreringskoefficient, ε . Värmeflödet i referensprovet ger upphov till en baslinje, U_0 [V], som jämförs med värmeflödet som uppstår i proven, U . Koefficienten omvandlar spänning [V] i värmeflödessensorn till värmeeffekt, P [W] där koefficientens enhet är watt per volt [W/V][16], se ekvation (2.13).

$$P = \varepsilon(U - U_0) \quad (2.13)$$

Värmeeffekten kan även uttryckas per gram cement eller bindemedel, se ekvation (2.14).

$$P = \frac{\varepsilon(U - U_0)}{m} \quad (2.14)$$

Genom att integrera värmeeffekten i 2.14 med avseende på tid erhålls värmemängd uttryckt i joule per gram cement/bindemedel, se ekvation (2.15) [18].

$$Q(t) = \int_0^t \frac{\varepsilon(U(t) - U_0)}{m} dt \quad (2.15)$$

Resultat från mätning med isoterm kalorimetri kan plottas till en figur med värmeeffekten, P [mW/g] på y-axeln och tiden på x-axeln. Från en sådan kurva är det möjligt att dela upp hydrationsprocessen i olika skeden, exempelvis i accelererande och avtagande faser. Detta kan vara intressant vid jämförelse mellan olika cementtyper då reaktionsförloppet kan variera beroende på cementets komposition [16].

2.9 Kalibrering av RF-sensorer

Sensorer behöver kalibreras för att säkerställa precision i mätningar. Kalibreringen kan genomföras på flera olika sätt och metoder som beskrivs i rapporten "Methods of Measuring Moisture in Building Materials and Structures" [19]. Specifika metoder behandlas inte ytterligare här.

Den generella metoden för kalibrering är att placera instrument i en miljö med känd relativ fuktighet och temperatur varpå avvikelser i mätresultat utvärderas. För att säkerställa precision i instrumenten bör kalibrering ske före och efter mätningar [20]. Sensorer följer en kalibreringskurva där mätdata tagits i specifika punkter på kurvan. Enligt Åhs (2024) [14], undersöks vanligen fyra olika parametrar

vid kalibrering: linjäritet, drift, hysteresis och repeterbarhet.

Linjäritet innebär att sensorer testas i ett brett spann av RF och undersöker avvikelser i uppmätt RF mellan fasta punkter på kalibreringskurvan.

Drift syftar på hur mätresultat förändras för individuella sensorer och undersöks genom att kalibrera om sensorer efter längre perioder för att undersöka skillnader i mätresultat över tid.

Hysteresis syftar på om sensorns mätvärde vid en given RF påverkas av om jämvikt nås från ett tidigare torrare eller fuktigare klimat.

Repeterbarhet syftar till sensorns förmåga att erhålla samma mätresultat vid upprepade mätningar.

Det finns problematik med sensorer som gjuts in direkt i betong. För att uppnå hög precision i mätningen ska kalibrering ske i det RF-intervall som mätning utförs i. Vid gjuttilfället är betongen vattenmättad och kommer ge upphov till 100 % RF. Det finns även en risk att vatten kondenserar direkt på sensorn. Eftersom sensorn gjuts in direkt i betongen är det praktiskt omständligt att utvärdera drift i mätningar. Sensorn är inte avsedd att plockas ur betongen och kalibreras på nytt efter avslutad mätning. Vidare behöver sensorn klara den temperaturutveckling som sker tidigt efter gjutning [14].

2.10 Tidigare studier

Att mäta relativ fuktighet med ingjutna sensorer är en relativt ny metod och kunskapen inom området är begränsad. I en studie av Gao et al. [21] undersöktes den relativa fuktigheten i betongprover i två fall. Ett med konstant temperatur och varierande relativ fuktighet i omgivningen, ett med konstant RF och varierande temperatur. Betongen tillverkades med portlandcement med vct 0,55. Mätningar utfördes med ingjutna RF-prober och med RF-prober som placerats i borrhål i provkroppen.

Resultaten i studien var att den ingjutna RF-proben visade konstant 100 % relativ fuktighet, som författarna förklarar kan bero på att fritt vatten kommit i kontakt med RF-sensorn. Mätningar med RF-prober i borrhål visade en relativ fuktighet som varierade med förändrat klimat i båda fall. RF i borrhålet var hela tiden högre än i omgivningen. Vid sänkning och höjning av RF och temperatur i omgivningen visade givaren en förändring av RF som följde omgivningens klimat med en viss fördröjning. Exempelvis mättes inte den lägsta relativa fuktigheten i hållrummet när RF i omgivningen nådde lägsta värdet, utan strax efter när RF i omgivningen börjat öka igen. Samma fenomen inträffade då RF i hållrummet var som högst, där den högsta RF mättes strax efter att RF i omgivningen börjat minska [21].

Ikumi et al. [22] undersökte en RF-prob som gjuts in i betongen och loggar temperatur och relativ fuktighet. Mätningarna med RF-proben jämfördes med mätningar med inborrade RF-prober (Vaisala SHM40) i provkroppar som exponeras mot varierande torrt och fuktigt klimat. RF-proberna placerades på olika djup i provkropparna. RF-prober närmre ytan, vid 2,5 cm, minskade i relativ fuktighet snabbare i det torra klimatet jämfört med mätarna på 4 cm djup. Mätningarna visade även en spridning i uppmätt RF sinsemellan, som enligt författarna kan förklaras av att RF-sensorerna inte placerats vid exakt djup, alternativt lokal skillnad i porstruktur runt RF-sensorer.

I jämförelsen mellan RF-proben och Vaisala SHM40 mättes skillnaden vid uttorkning till 3,4 % RF vid 4 cm djup och 6,7 % vid 2,5 cm djup. Författarna förklarar att skillnaden inte kan förklaras med brister i precision av RF-proben, utan återigen att avvikelser i RF-probernas position kan ha spelat stor roll. Ytterligare en felkälla som nämns är att själva RF-proben stör fuktflödet i provkroppen.

Enligt Ikumi et al kan RF-prober ge mätavvikelser upp till 10 % baserat på geometrisk utformning [22].

I en studie av Åhs [14] har den relativa fuktigheten vid temperaturvariationer för ingjutna RF-prober undersökts. I studien jämfördes två provkroppar med CEM II/A-LL 42,5R (Byggcement Skövde), med vct 0,4 respektive 0,6.

Kalibrering av RF-proberna visar hög precision även efter att de plockats ut ur provkropparna. Exempelvis uppvisar RF-proberna en mätavvikelse på 0,7 % RF vid 85 % RF innan gjutning och en mätavvikelse på 0,5 % RF efter 182 dagar då de plockats ut, jämfört med klimatet i omgivningen. Detta visar på att sensorerna kan mäta under längre perioder med fortsatt hög precision.

Resultat från temperaturmätning visade att RF-proberna hade hög precision med låg avvikelse i uppmätt RF sinsemellan. På grund av den höga värmekapaciteten i betong krävs det mycket energi till att värma upp provkropparna och de håller temperaturen länge när de värmts upp. I försöket skapade detta en förskjutning i temperaturen i betongen jämfört med omgivningens temperatur. Detta innebär att temperaturen i provkropparna inte hann ställas i jämvikt med omgivningens temperatur innan nästa cykel med temperaturstegring eller minskning påbörjas. Under försöket i cykler mellan +20 °C och +6 °C varierade temperaturen i provkropparna mellan cirka +18 °C och +8 °C. Temperaturcykling i de andra intervallen uppvisade liknande beteende i provkropparna [14].

3 RF-prober

RF-proben som används i arbetet är utvecklad av Electrotech Kalix AB, se figur 3.1, och kommer framöver att benämnas ET-prob (Electrotech). ET-proben består av ett hölje i plast som skyddar sensorns elektronik mot fritt vatten i betong vid gjutning. ET-proben kan mäta i intervallet 0 - 100 % RF och mellan -40 och +120 °C [14].

I ET-probens ena ände sitter en RF-sensor. RF-sensorn är placerad innanför ett fuktgenomsläppligt membran på båda sidor av sensorn. Fritt vatten kan inte tränga genom membranet. Utformningen medför att RF-sensorn kan mäta RF i hålrummet innanför membranet. Runt membranet sitter ett skydd i hårdplast för att förhindra att stenaggregat gör hål i membranet [14].

ET-proben innehåller en sändarenhet och ett litium-tionylkloridbatteri med en förväntad livslängd på 1,5 – 3 år. Mätdata från instrumentet överförs trådlöst till en mottagarenhet varifrån den sedan laddas upp och görs tillgänglig för digital avläsning.



Figur 3.1: RF-prob tillverkad av Electrotech Kalix AB.

4 Material

4.1 Bascement Plus Slite

I arbetets laborativa del har cementet "Bascement Plus Slite" använts. Produkten är ett portlandkompositcement av typ CEM II/B-M (P-LL) 42,5R som tillverkas av Heidelberg Materials Cement Sweden AB i Slite, Gotland. 42,5R innebär att betong med cementet har en normhållfasthet som överstiger 42,5 MPa vid 28 dygns mognadsålder för ett bruksprov med vct 0,5 [23]. Bokstaven R (rapid) beskriver att cementet har tidig hållfasthetsutveckling och en hållfasthet som överstiger 20 MPa efter två dygn enligt krav [24].

Bascement Plus Slite innehåller 70 % klinker, 20 % puzzolan och 10 % kalkstensfiller. En kemisk analys av cementet har utförts av Heidelberg Materials Cement Sweden AB. Resultatet av analysen redovisas i tabell 4.1. Det puzzolana materialet är vulkanaska från täkter på Island, VPI.

Tabell 4.1: Resultat från kemisk analys av Bascement Plus Slite som används i den laborativa delen av projektet, där komponenter anges i vikt-%.

Komponent	Andel [%]
CaO	53,2
SiO ₂	22,1
Al ₂ O ₃	5,71
Fe ₂ O ₃	3,83
MgO	4,32
Na ₂ O	0,46
K ₂ O	0,86
SO ₃	3,8
Na ₂ O-ekv	1,0

4.2 Betongrecept

Two olika betongrecept gjordes med samma vatten-bindemedeltal, vbt, med olika komposition bindemedel. I den ena betongen användes enbart Bascement Plus Slite och benämns "B". I den andra betongen ersattes 20 % av bascementets massa mot VPI och benämns "B+VPI". Andelen Bascement Plus Slite och VPI beräknas enligt ekvation (4.1) och (4.2).

$$m_{\text{Bascement}} = \frac{m_{\text{Bindemedel}}}{1 + \frac{\text{VPI} [\%]}{100}} \quad (4.1)$$

$$m_{\text{VPI-tot}} = m_{\text{Bindemedel}} - m_{\text{Bascement}} \quad (4.2)$$

Ballast från Dalby används med fraktioner 8–11, 4–8 samt 0–2 mm stenstorlek, i förhållande 20, 25 respektive 55 vikt-% av total mängd ballast. Recept för respektive betong redovisas i tabell 4.2

Tabell 4.2: Recept för de två betongerna, där delmaterial anges i kg/m^3 .

Material	B [kg/m^3]	B+VPI [kg/m^3]
Vatten	190	190
Bascement Plus Slite	380	317
Tillsatt VPI	0	63
Ballast Dalby 8–11 mm	352	352
Ballast Dalby 4–8 mm	440	440
Ballast Dalby 0–2 mm	968	967
Sikament EVO 26	2,88	1,92

4.3 Bruksprovsrecept

För utvärdering av självvuttorkning samt hydratationsförloppet genom kalorimetri, användes bruksprov av samma recept vilket redovisas i tabell 4.3.

Tabell 4.3: Recept till bruksprover med olika andel VPI, där vikt anges i gram.

Andel ersatt VPI [%]	Andel VPI [%]	Bascement+ [g]	VPI [g]	Vatten [g]	Normsand [g]
0	20,0	450,0	0,0	225	1350
5	23,8	428,6	21,4	225	1350
10	27,3	409,1	40,9	225	1350
15	30,4	391,3	58,7	225	1350
20	33,3	375,0	75,0	225	1350
25	36,0	360,0	90,0	225	1350

Ersatt VPI innebär procentandelen Bascement Plus Slite som ersatts mot VPI. Andel VPI innebär total andel VPI i bindemedlet med hänsyn till att bascementet innehåller 20 % VPI från start, se ekvation (4.3) och (4.4). Normsand är en standardblandning med bestämd kornstorleksfördelning för jämförbara resultat [25].

$$m_{\text{VPI-tot}} = (m_{\text{Bindemedel}} - m_{\text{Bascement}}) + m_{\text{Bascement}} \cdot 0,2 \quad (4.3)$$

$$\text{Andel VPI} = \frac{m_{\text{VPI-tot}}}{m_{\text{Bindemedel}}} \quad (4.4)$$

5 Metod

5.1 Den färska betongens egenskaper

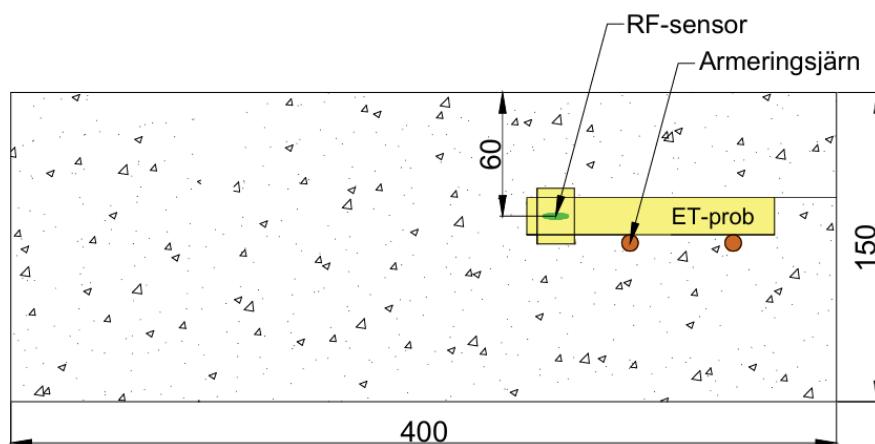
Den färska betongens konsistens kontrollerades genom att utvärdera sättmättet enligt SS-EN 12350-2:2019 [26]. Densiteten utvärderades enligt standard SS-EN 12350-6:2019 [27], där ett vibrationsbord användes för att kompaktera betongen. Därefter användes den kompakterade betongen för att utvärdera lufthalten enligt SS-EN 12350-7:2019 [28], där tryckmätare användes.

5.2 RF-mätningar

I den laborativa delen av arbetet har provkroppar av betong gjutits. För utvärdering av temperaturens inverkan på den relativa fuktigheten användes två former med storleken 400 mm bredd x 400 mm längd x 150 mm höjd.

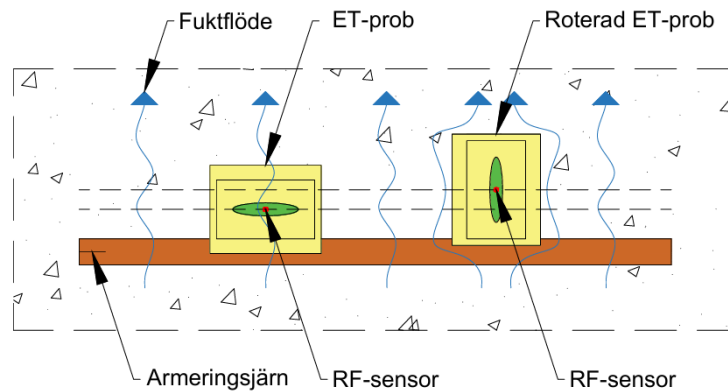
5.2.1 Förberedelse av provkroppar

Två armeringsjärn installerades i formarnas ena sida där fyra ET-prober sedan monterades. Armeringsjärnen installerades så att RF-sensorn i ET-proberna hamnade på $0,4 \cdot$ plattans tjocklek vilket motsvarar 60 mm från ovankant enligt rådet för byggkompetens, RBK, mätstandard för enkelsidig uttorkning [29], se figur 5.1. Den enkelsidiga uttorkningen säkerställdes genom att täcka insidan av formen med plastfilm. De yttersta ET-proberna placerades 100 mm från respektive kant medan de två resterande proberna placerades jämnt mellan dessa.

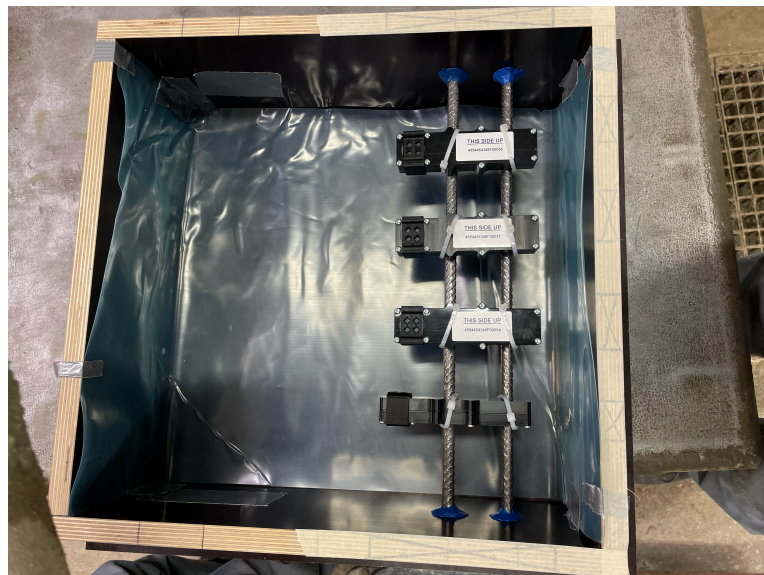


Figur 5.1: Schematisk 2D-modell av placeringen av ET-prober. Mått anges i millimeter.

Tre ET-prober monterades enligt tillverkarens instruktioner så att mätning sker i riktning med den endimensionella fukttransporten. Genom att använda flera ET-prober för samma mätpunkt kunde slumpmässiga mätfel reduceras, vilket resulterar i högre precision och mer tillförlitlig mätdata. En ET-prob roterades och monterades vinkelrätt mot fuktflödet, se figur 5.2. Detta ger en ökad förståelse för hur installationsparametrar kan påverka mätdata. En form med plastfilm och installerade ET-prober visas i figur 5.3 där den nedersta ET-proben är roterad.



Figur 5.2: Två ET-prober placerade på armeringsjärn i betongen. Den vänstra proben är monterad enligt tillverkarens instruktioner och mäter RF i samma riktning som fuktflödet. Den högra är roterad och mäter RF vinkelrätt mot fuktflödet.



Figur 5.3: Form med installerade ET-prober och plastfilm. Från ovan i figur mäter ET-prober 1 - 3 i fuktflödets riktning, ET-prob 4 är roterad och mäter vinkelrätt mot fuktflödet.

Före installation av RF-proberna samt efter ingjutning verifierades att RF-proberna gav signal. Mätresultat loggades med 30-minutersintervall.

5.2.2 Gjutning av betong

En uppsättning med 35 l av respektive betongrecept enligt kapitel 4.2 blandades. Recepten göts i följd av varandra, där hela processen för ett recept slutfördes innan nästa påbörjades. Samtliga moment utfördes enligt samma metodik för att säkerställa jämförbara försöksförutsättningar.

Inledningsvis bestämdes fukthalten av 0 – 2 mm ballast med hjälp av en fuktvåg av varumärket Adam Equipment. Justeringar av vattenmängden gjordes för att uppnå avsett vbt. Därefter vägdes samtliga ingående material med en våg av varumärket Mettler Toledo ID1-plus i enlighet med respektive

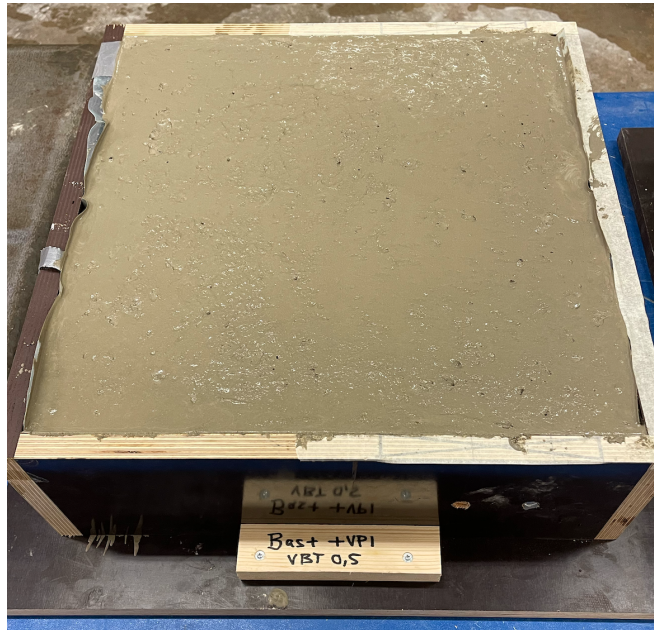
betongrecept. Flyttillsats vägdes upp med 0,1 g upplösning med en våg av varumärket av Mettler PJ1220 DeltaRange.

Vid tillverkningen av betong användes betongblandare av varumärket Zyklus ZK 50 HE, se figur 5.4. Ballasten blandades först separat för att säkerställa en homogen blandning av ballastfraktionerna. Därefter tillsattes cement och blandades för att få en homogen blandning av ballastfraktioner och cement. I receptet med tillsatt VPI tillsattes det tillsammans med cementet. Vatten och flyttillsats tillsattes därefter under fortsatt blandning i tre minuter. Konsistensen justerades vid behov genom tillsats av ytterligare flyttillsats. Recepten i avsnitt 4.2 visar total mängd flyttillsats som använts.



Figur 5.4: Betongblandare av varumärket Zyklus ZK 50 HE som använts i arbetet.

Formarna fylldes till hälften med betong och vibrerades sedan kort för att frigöra instängd luft i betongen. Därefter fylldes formarna helt, vibrerades återigen och överflödigt betong skrapades av. Betongen har därefter jämn yta, se figur 5.5.



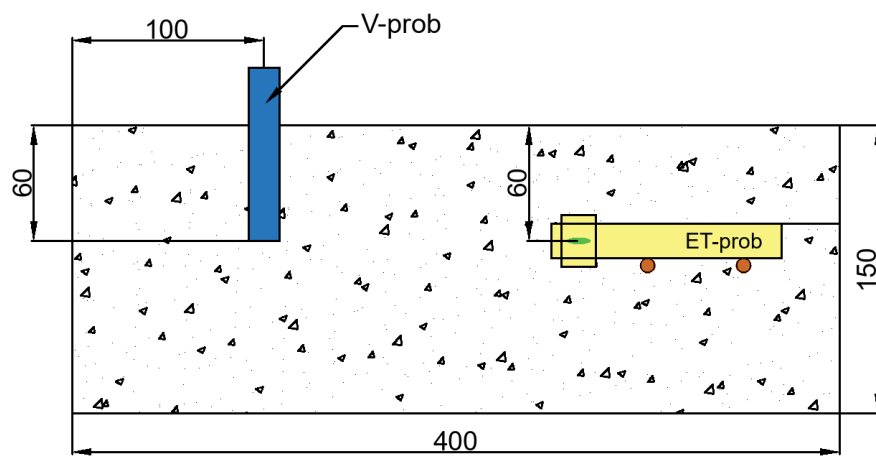
Figur 5.5: Form med storleken 400 mm längd x 400 mm bredd x 150 mm höjd som fyllits helt med betong.

Betongen täcktes med plastfolie första dygnet för att undvika snabb uttorkning. Provkropparna placerades i klimatskåp med +20 °C samt 60 % RF för härdning tills dess att den inre relativa fuktigheten i betongen var cirka 95 % då installation av Vaisala-prober påbörjades.

5.2.3 Installation av Vaisalaprober

Parallellt med mätningen av relativ fuktighet med ET-prober utförs mätningar med RF-prober av fabrikatet Vaisala HMP40S, och kommer framöver benämnas V-prob. Installation av V-prober sker enligt instruktionerna "Rutin för borrhål av mätthål" och mätning sker enligt "Rutin för RF-mätning i borrhål Vaisala HMP40S" enligt RBK [30], [31].

I figur 5.6 visas placeringen av V-prob i provkropparna. Mät djupet är samma som för ET-prob, 60 mm. Montering av V-prober gjordes 3 dagar efter att mätrören installerats. Figur 5.7 visar en monterad V-prob med tätningsmassa mellan mätrör och betong samt mätrör och kabel.

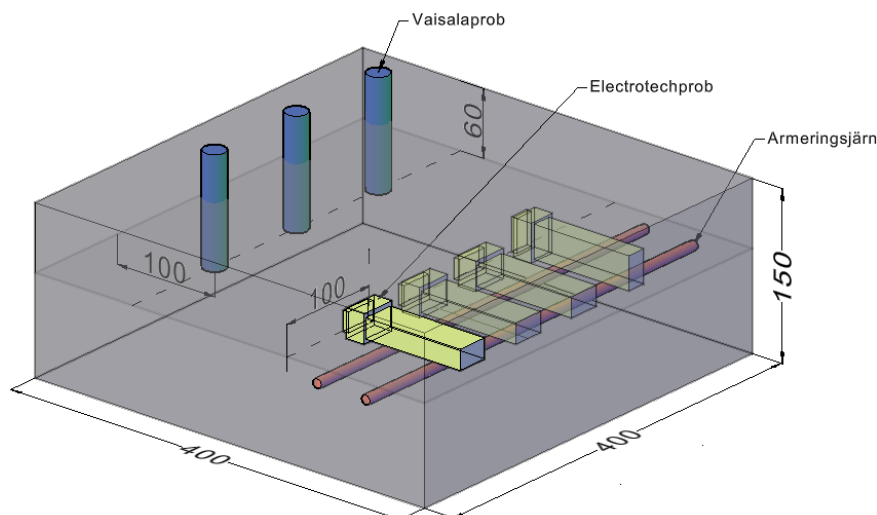


Figur 5.6: V-probers placering i provkropparna. Mått anges i millimeter.



Figur 5.7: Plaströr monterat i provkroppen med V-prob installerad i röret och tätningssmassa i anslutningar.

I figur 5.8 visas en slutlig schematisk 3d-modell över en färdig provkropp med monterade ET- och V-prober.



Figur 5.8: Slutlig schematisk 3D-modell av provkroppen där placering av ET- och V-prober samt armeringsjärn sammanställts. Mått anges i millimeter.

5.2.4 Temperaturförlopp

Temperaturförloppen påbörjas när RF i provkroppen nått 95 %, vilket motsvarade 49 dygn i +20 °C och 60 % RF. RF hölls konstant 60 % genom hela mätperioden. Under hela mätperioden mättes temperatur och RF i klimatskåpet av en ET- och V-prob.

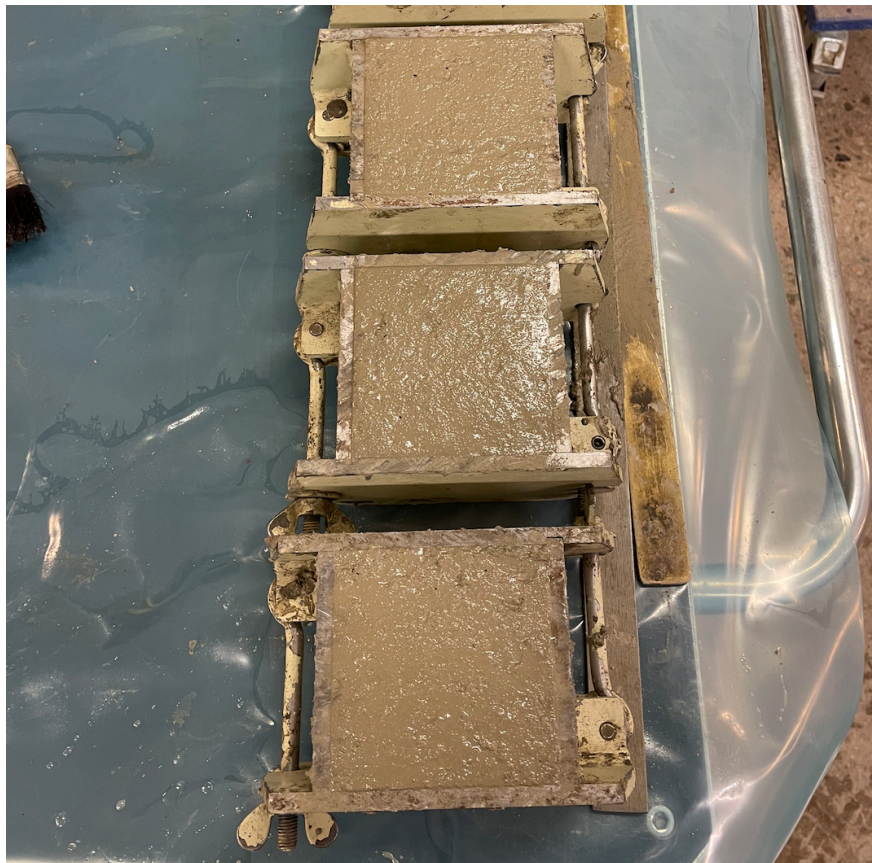
- Första temperaturförloppet benämns T10 och inleds med att temperaturen linjärt sänks från +20 °C till +10 °C under 24 timmar. Därefter hölls temperatur konstant under 5 dygn. Temperaturen höjdes sedan tillbaka till +20 °C under 24 timmar och hölls därefter konstant under 6 dygn.
- Andra temperaturförloppet benämns T30 och inleds med att temperaturen höjs från +20 °C till +30 °C under 24 timmar och hölls konstant under 6 dygn. Därefter sänktes temperaturen till +20 °C under 24 timmar och hölls sedan konstant under 5 dygn.
- Tredje temperaturförloppet benämns T10M och inleds med att temperaturen sänks momentant från +20 °C till +10 °C. Temperaturen hölls konstant i åtta dygn och höjdes därefter momentant tillbaka till +20 °C.

Inför, under och efter varje temperaturförändring samt kontinuerligt under hela mätperioden avläses V-proberna manuellt. Avläsningarna gjordes med kortare intervall direkt efter temperaturförändring (1–2 gånger i timmen) och mer sällan i takt med att proverna nått temperaturjämvikt med omgivande klimat.

5.3 Hållfasthet

Betong till provkroppar för utvärdering av hållfasthet tillverkas enligt avsnitt 5.2.2, med skillnaden på formarnas storlek och förvaring. Totalt användes 34 formar för gjutning av 30 kuber med sidan

100 mm och fyra kuber med sidan 150 mm, där hälften användes för respektive recept enligt avsnitt 4.2. Figur 5.9 visar formar fyllda med betong till hållfasthetsmätningar.



Figur 5.9: Formar för kuber med sidan 100 mm som fyllts helt med betong.

Det första dygnet efter gjutning härdades kuberna under en plastfilm och därefter avformades kuberna. Kuberna förvarades sedan i en låda med lock tillsammans med en bringare vatten för att säkerställa en relativ fuktighet nära 100 %. Lådan placerades i ett klimatrum med en konstant +20 °C och 60 % RF.

5.3.1 Tryckprovning

Hållfasthetsutvecklingen för betongen utvärderades efter 1, 3, 7, 14 respektive 28 dygn. Vid varje tillfälle tryckprovades tre kuber med sidan 100 mm av vardera recept. Kuberna med sidan 150 mm tryckprovades efter 28 dygn.

Hållfastheten utvärderas enligt standard för tryckhållfasthet hos provkroppar, SS-EN 12390-3:2019 [32]. En automatisk tryckpress av varumärket Formtest Digimaxx C-24 användes för tryckprovningarna, se figur 5.10a. En kub redo för tryckprovning visas i 5.10b. Tryckprovningen utfördes med konstant belastningshastighet 0,6 MPa/s.

Efter försöket undersöktes brottsmönstret på den tryckta kuben där ett jämnt och slumpmässigt brottsmönster eftersträvades. Eventuella otillfredsställande brott noterades och resultat från dessa provkroppar inkluderades inte i analysen.



(a) Tryckpress Formtest Digimaxx C-24.



(b) Betongkub som placerats i tryckpressen.

Figur 5.10: Utrustning som använts till tryckprovning och bedömning av hållfasthet.

5.4 Kalorimetri

För utvärdering av hydratationsförloppet genom kalorimetri användes cementbruksprover. Proverna blandades med olika andel tillsatt VPI mellan 0 och 25 vikt-% av bascementets massa. Då bascementet innehåller 20 vikt-% VPI från start omvandlas detta till en total andel VPI mellan 20 och 36 vikt-% av bindemedlets massa, se avsnitt 4.3.

Blandning av cementbruk utfördes enligt SS-EN 196-1 [23] med viss modifikation. Blandaren som använts är av varumärket KitchenAid Artisan, se figur 5.11a, och utfördes enligt följande steg.

- 450 gram bindemedel vägdes upp med ± 2 gram noggrannhet. 225 gram vatten vägdes upp i en fuktad bunke med ± 1 gram noggrannhet. En påse normsand med vikt 1350 gram öppnades.
- Vatten och bindemedel hälldes i blandaren. Blandaren kördes därefter på låg hastighet, steg 1, i 30 sekunder.
- Hela påsen normsand hälldes därefter i under 30 sekunder med blandaren på låg hastighet, steg 1.
- Hastigheten ökades därefter till hög hastighet, steg 3, under 30 sekunder.
- Därefter stoppades blandaren i 90 sekunder. Under de första 15 sekunderna skrapades cementbruk från kanter och botten av kärlet in till mitten.
- Blandaren kördes därefter på hög hastighet, steg 3, i 60 sekunder och cementbruket var därefter klart för användning, se figur 5.11b.



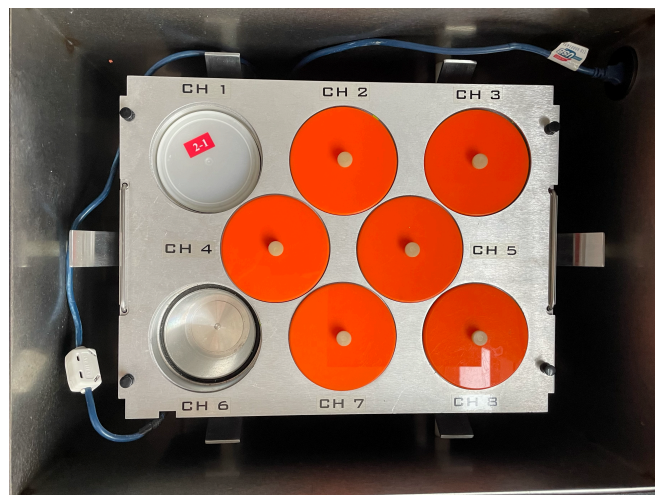
(a) KitchenAid Artisan som används för att tillreda cementbruksprover.



(b) Färdigblandat cementbruksprov.

Figur 5.11: Utrustning samt färdigblandat cementbruk för kalorimetrimätningar.

Provburkar penslades med formolja och överflödiga oljan torkades ur. Burken ställdes på en våg och nollställdes för att sedan fyllas med cementsbruk till cirka tre fjärdedelar. Vikten antecknades och ett lock sattes på burken. Burken med bruk placerades i kalorimetern. Figur 5.12 visar kalorimetern med åtta kanaler där ett cementbruksprov är placerat i CH1, CH6 är tom. Resterande kanaler har lock på.



Figur 5.12: Kalorimeter med åtta kanaler, CH1 innehåller ett prov, CH6 visar en tom plats för prov utan lock.

5.5 Självtvorkning

För utvärdering av självutvorkning användes RF-prober av fabrikatet TESTO 175, vilken vidare i arbetet kommer benämnas T-prob.

För utvärdering av självuttorkningen av betongen användes samma cementbruk som för kalorimetri-mätningar, se avsnitt 5.4. Plastkoppar penslades med formolja och fylldes sedan med 200 gram cementbruk (± 5 g). Koppen placerades i en tät glasburk med T-prob monterad i locket, se figur 5.13. Den förseglade burken vägdes och placerades därefter i klimatrum för vidare manuell avläsning.



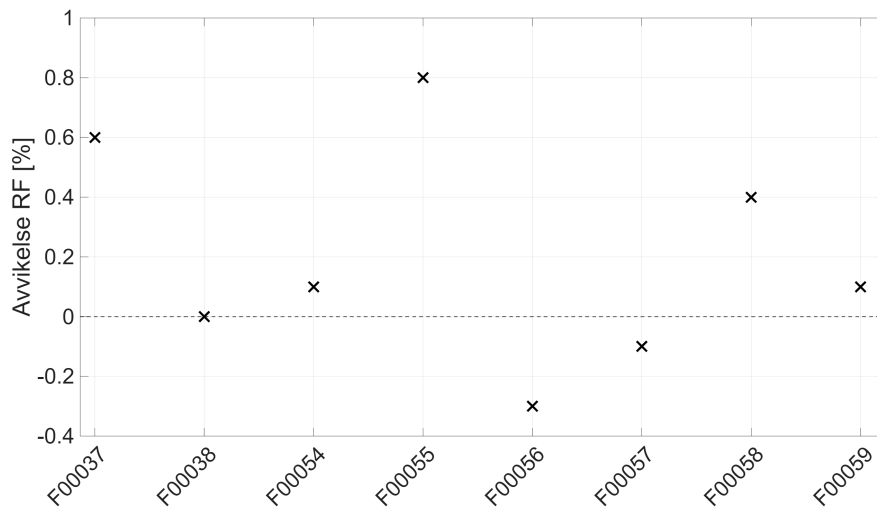
Figur 5.13: Förseglad burk med cementbruksprov och monterad T-prob.

5.6 Kalibrering

Kalibrering har utförts på olika sätt och omfattning för RF-proberna som använts i arbetet. Metoden och resultatet för respektive RF-prob presenteras nedan. I den senare resultatdelen används alltid kalibrerad mätdata.

5.6.1 Electrotech

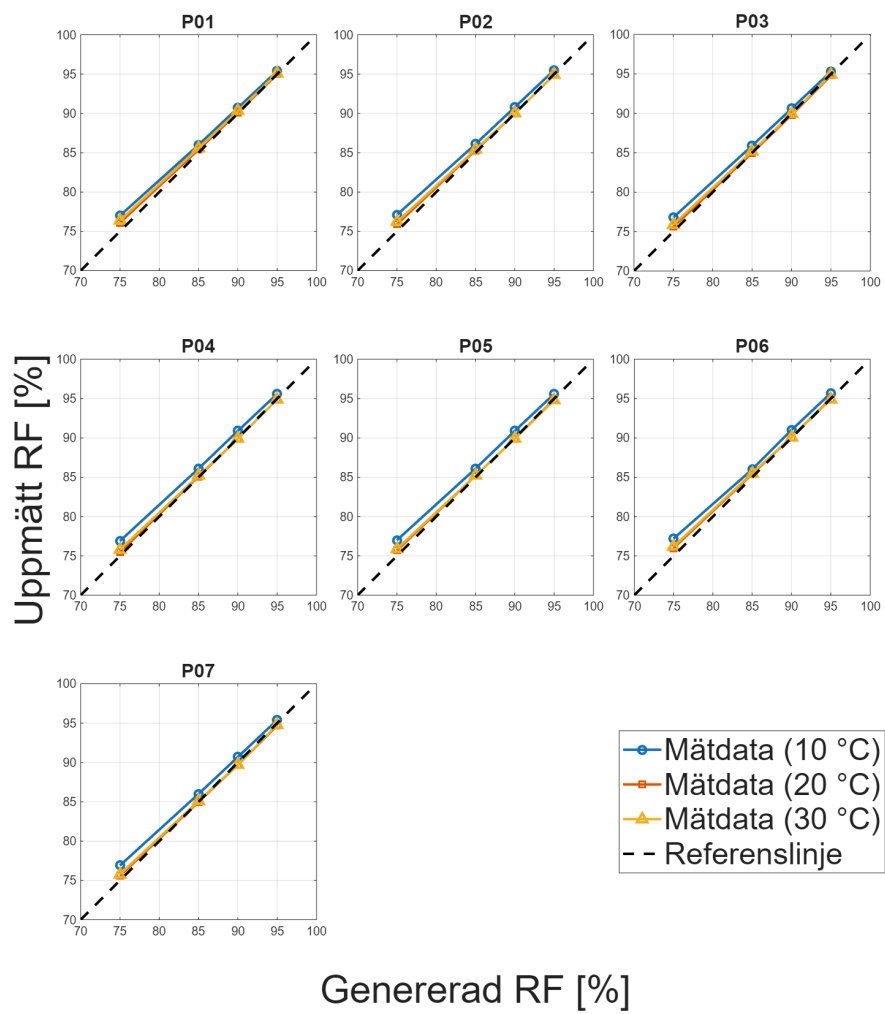
Kalibrering för ET-proberna har utförts i samband med tillverkning av Electrotech Kalix AB. Proberna kalibrerades vid 85,1 % RF och temperaturen $+21,8$ °C. Mätavvikelserna för respektive prob vid aktuell temperatur och RF redovisas i figur 5.14. Datum för kalibrering är okänt.



Figur 5.14: Mätavvikelse vid 85,1 % RF och +21,8 °C för ET-prober.

5.6.2 Vaisala HMP40S

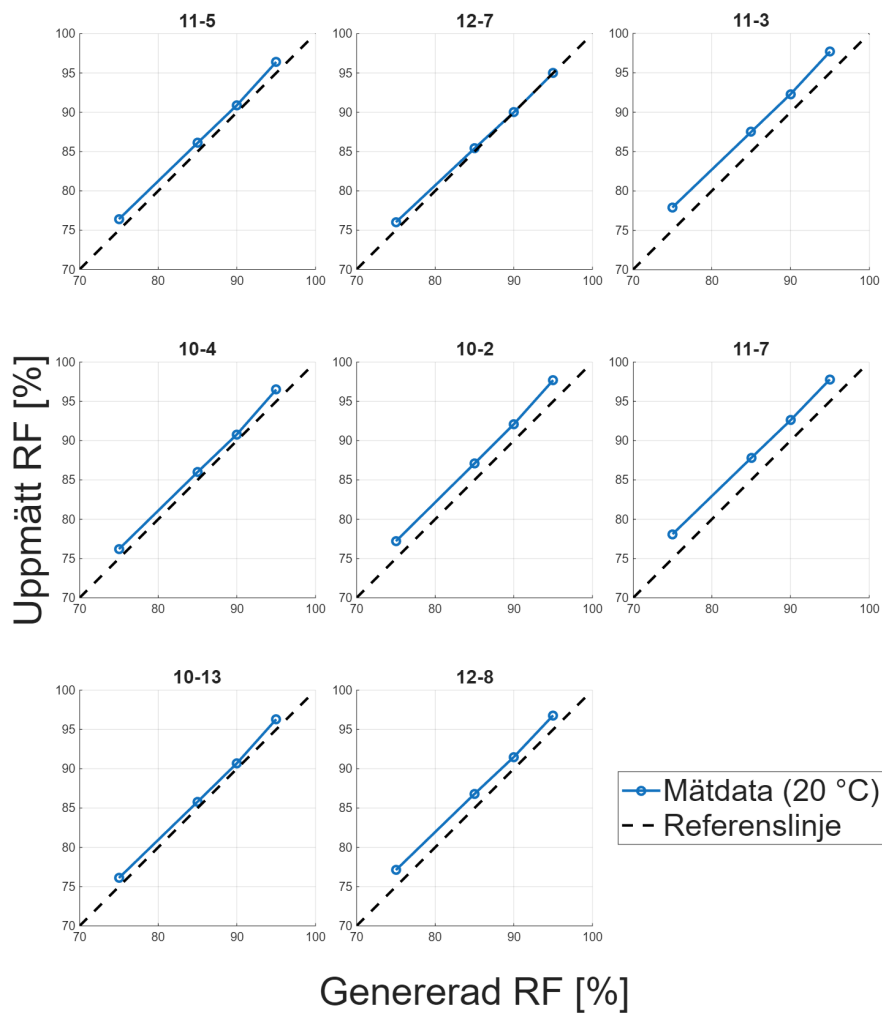
V-prober som används i arbetet är kalibrerade vid +10 °C, +20 °C respektive +30 °C och 75, 85, 90 respektive 95 % RF. Datum för kalibreringen var 2026-02-10 och resultatet redovisas i figur 5.15. Röda linjer visar +30 °C, magenta +20 °C och blå +10 °C. V-proberna visar generellt något högre RF än referensvärdet vid samtliga temperaturer och relativa fuktigheter. Den blå linjen, som motsvarar +10 °C, visar högst genom hela intervallet för alla V-prober, vilket tyder på större mätavvikelse.



Figur 5.15: Kalibreringsdata för V-prober.

5.6.3 TESTO 175

Kalibrering av T-prober, har gjorts vid 75, 85, 90 respektive 95 % RF vid +20 °C. Resultatet redovisas i figur 5.16. Datum för kalibrering var 2026-01-26.



Figur 5.16: Kalibreringsdata för T-prober. Heldragen, blå linje visar uppmätt relativ fuktighet och svart, streckad linje visar referensvärden.

6 Resultat och diskussion

6.1 Färska betongens egenskaper

Den färska betongens materialegenskaper, som lufthalt, sättmått och densitet utvärderades. Resultat av den färska betongens egenskaper som används till RF-mätningar redovisas i tabell 6.1.

Tabell 6.1: Färska betongens egenskaper för RF-mätningar.

Parameter	B	B+VPI
Sättmått [mm]	195,0	60,0
Lufthalt [%]	2,0	2,9
Densitet [kg/m ³]	2375,6	2325,5

Den färska betongens egenskaper som används till utvärdering av hållfasthet redovisas i tabell 6.2.

Tabell 6.2: Färska betongens egenskaper som används till utvärdering av hållfasthet.

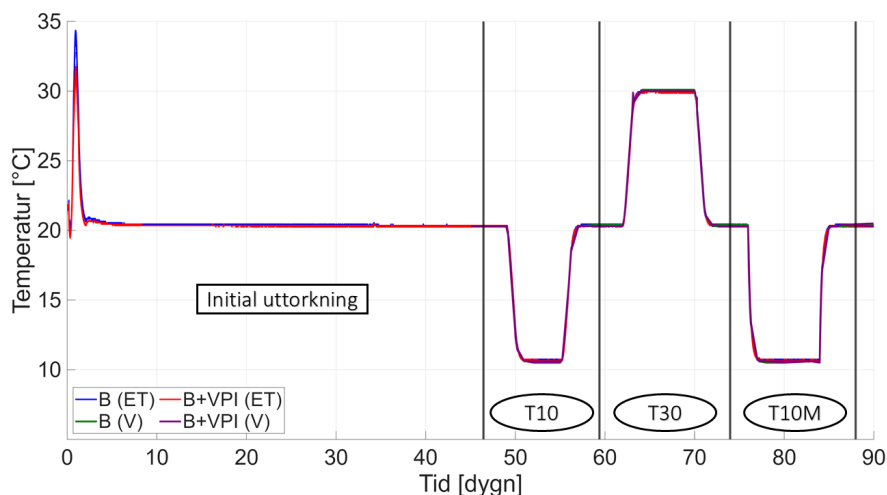
Parameter	B	B+VPI
Sättmått [mm]	95,0	52,0
Lufthalt [%]	2,1	2,5
Densitet [kg/m ³]	2365,1	2349,3

6.2 RF-mätningar

För att studera temperaturens inverkan på RF i betong undersöktes tre olika temperaturförlopp. Temperaturen i betongen från gjutning fram tills det sista temperaturförloppet avslutas redovisas översiktligt i figur 6.1.

De blå linjerna visar mätvärden från tre ET-prober i provkropp B medan de gröna linjerna visar motsvarande värden från tre V-prober i samma provkropp. De röda linjerna visar mätvärden från tre ET-prober i provkropp B+VPI, medan de lila linjerna visar värden från motsvarande V-prober.

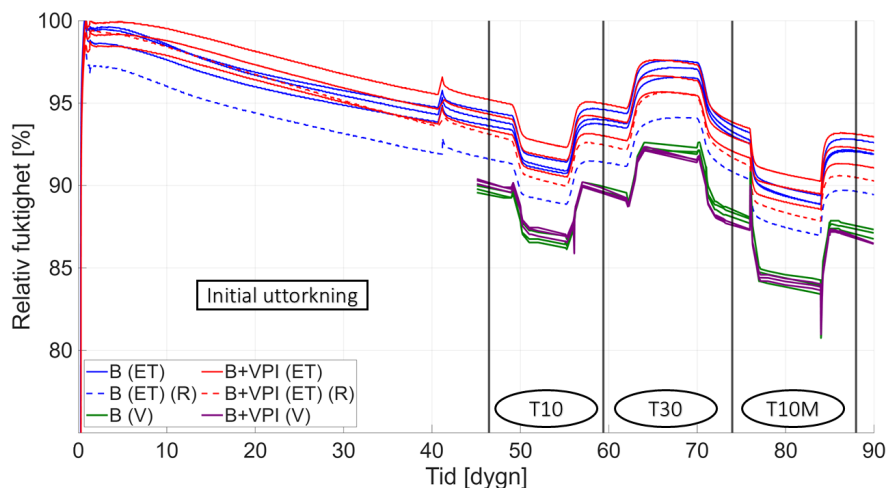
I figuren visas även de tre temperaturförloppen. T10 är temperaturförändring +20 - 10 - 20 °C, T30 är temperaturförändring +20 - 30 - 20 °C och T10M visar temperaturförändring +20 - 10 - 20 °C med momentan temperaturförändring.



Figur 6.1: Temperatur i provkropparna från gjutning till slutet av mätningen.

Figur 6.2 visar kalibreringskorrigerad mätdata för den relativa fuktigheten under motsvarande tidsintervall som i figur 6.1. Färgkodningen är densamma som i figur 6.1, där blå och gröna linjer representerar mätningar i provkropp B, medan röda och lila linjer representerar mätningar i provkropp B+VPI. Heldragna linjer visar prober monterade efter anvisningar och streckade linjer visar roterade ET-prober, vilka benämns på samma sätt som i föregående figur men med tillägget (R). I figur 6.2 presenteras mätdata för V-proberna som en kontinuerlig mätserie, medan individuella mätpunkter återfinns i bilaga 1.

Även i denna figur visas temperaturförloppen vilka provkropparna utsätts för.

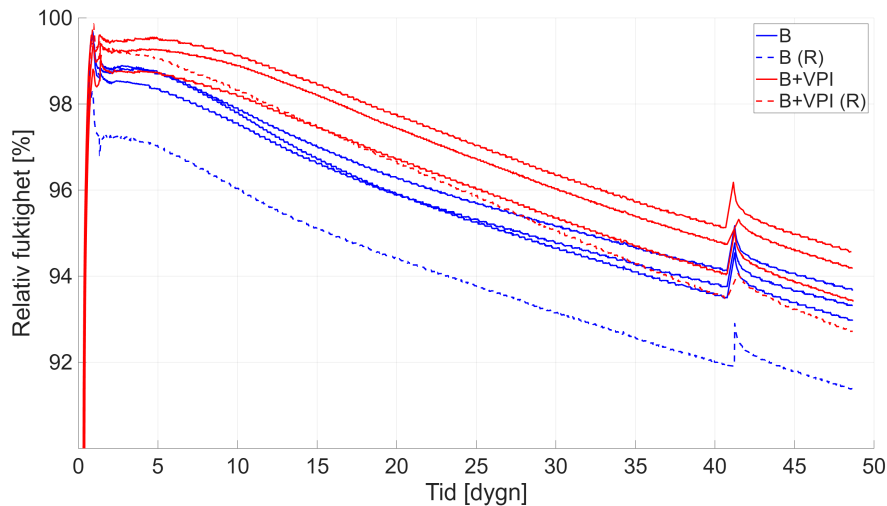


Figur 6.2: Relativ fuktighet i provkropparna från gjutning till slutet av mätningen.

6.2.1 Initial uttorkning

Det finns ett tydligt samband mellan RF och andel VPI där provkropp B+VPI visar högre RF än provkropp B under hela initiala uttorkningsförloppet, se figur 6.3. Den förstnämnda torkar till cirka 94 % RF, medan provkropp B torkar till cirka 93 % RF efter 49 dygn. Vid cirka dag 40 uppstår en topp i RF till följd av ett tekniskt fel där sensorerna stängdes av och startades om. Detta beror på att

hysteresiskompensationen i RF-sensorn nollställdes vid omstarten och efter en tid återgick till sitt ursprungliga värde. Denna topp kan därmed bortses från i mätningen.



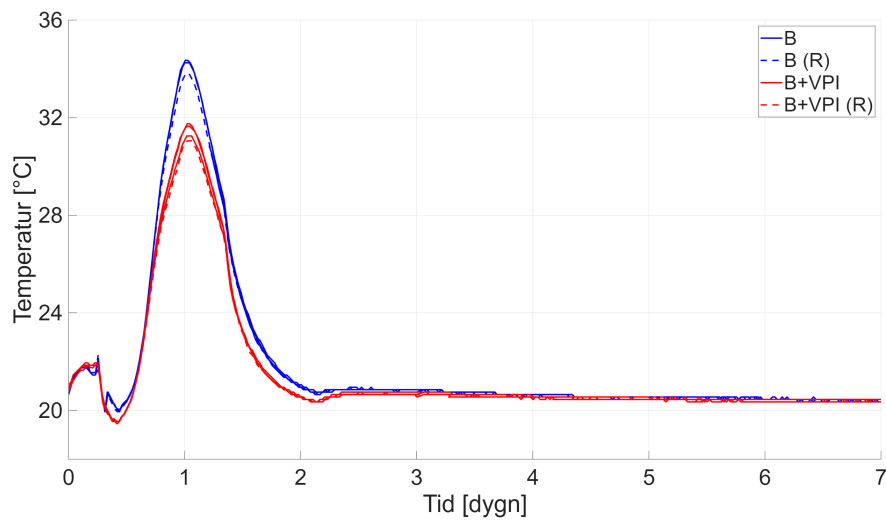
Figur 6.3: RF i provkropparna under uttorkning fram till att samtliga prover nått 95 %.

En möjlig förklaring till att provkropp B+VPI torkar långsammare är att fukttransportkoefficienten är lägre. VPI ger sannolikt upphov till en tätare porstruktur och mindre porradier i betong. Den kapillära vätsketransporten och ångdiffussionen i materialet försvåras av ett tätare, mindre sammanhängande porsystem. Högre andel VPI i provkropp B+VPI kan medföra ett tätare porsystem än i provkropp B som försvårar fukttransporten och därmed uttorkning i provkroppen.

I figur 6.3 är RF initialt nära 100 % eftersom betongen är nästintill vattenmättad. Den efterföljande sänkningen av RF kan bero både på fukttransport mot ytan följt av avdunstning och på att vatten binds kemiskt genom cementets hydrataion. Eftersom provkroppar med lägre andel VPI innehåller en högre andel cementklinker kan mer vatten bindas kemiskt, vilket kan bidra till en snabbare initial sänkning av RF. När porerna inte längre är vattenmättade sker fukttransporten i större utsträckning genom ångdiffusion, driven av skillnader i RF mellan betongen och omgivande klimat.

De roterade ET-proberna, märkta (R) i figur 6.3, visar generellt lägre relativ fuktighet jämfört med övriga ET-prober. En möjlig förklaring till detta är att RF-sensorns position i den roterade ET-proben är närmare betongens yta, där uttorkningen sker snabbare. En annan förklaring är öppningen till RF-sensorn i förhållande till fukttransport i materialet. Vid rotation sker fukttransport i materialet parallellt med öppningen till RF-sensorn som kan begränsa fukt i materialet från att tränga in till RF-sensorn, se figur 5.2 i avsnitt 5.2.1.

Den maximala temperaturen som utvecklas vid hydrataion under de sju första dyggen är större i provkropp B än i B+VPI, se figur 6.4. Den förstnämnda når cirka +34 °C efter 1 dygn och provkropp B+VPI når cirka +32 °C vid samma tidpunkt. Därefter sjunker temperaturen successivt i takt med att reaktionerna avtar och värme avges till omgivningen. En förklaring till skillnaden i maxtemperatur är andel cementklinker. Då vbt hålls konstant medför en högre andel VPI en lägre andel cementklinker, som bidrar mest till värmeutvecklingen.

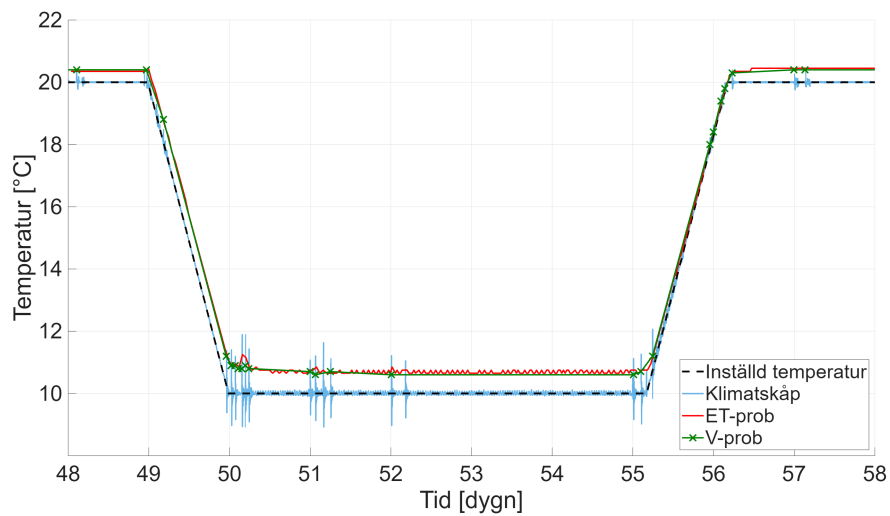


Figur 6.4: Temperaturen i provkropparna under de första sju dygnen av uttorkningen.

I båda provkropparna registrerar den roterade ET-proben lägre maximal temperatur än övriga ET-prober i samma provkropp. En möjlig förklaring är mätsensorns position, mätsensorn är närmre betongens yta där värmeförlusten till omgivningen är större. Resultatet stämmer överens med RF i de roterade ET-proberna. Både RF och temperaturen är lägre i de roterade ET-proberna, vilket styrker teorin att mätsensorns position ligger grund till skillnaden i RF och temperatur mellan ET-proberna.

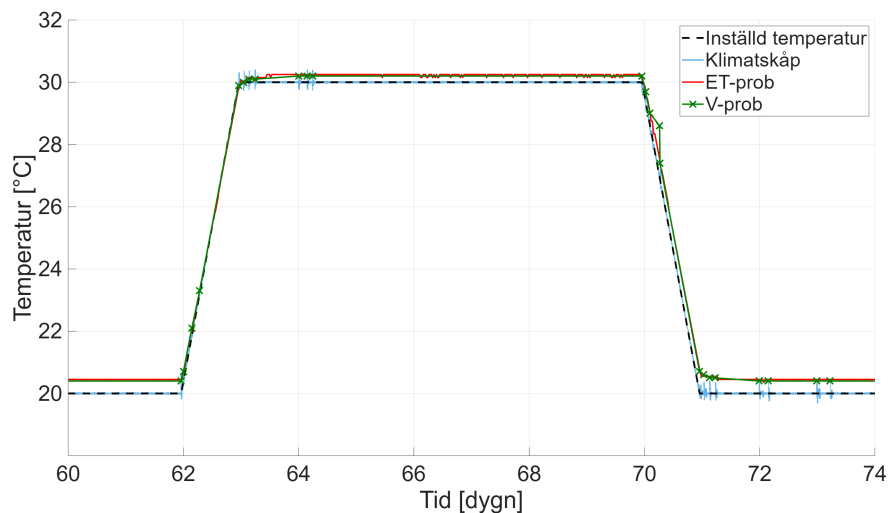
6.2.2 Omgivande klimat

Temperaturen i omgivningen mäts högre av ET och V-proberna än klimatskåpet, där mätskillnaden uppvisar ett tydligt temperaturberoende. Vid lägre temperatur är mätskillnaden mellan båda RF-proberna och klimatskåpet högre och minskar med ökad temperatur. I figur 6.5 syns temperaturen under T10. Skillnaden mellan båda RF-proberna och klimatskåpet är inledningsvis cirka 0,4 °C, som sedan ökar till 0,6 °C efter temperatursänkning. När temperaturen höjs till +20 °C igen återgår skillnaden till 0,4 °C.

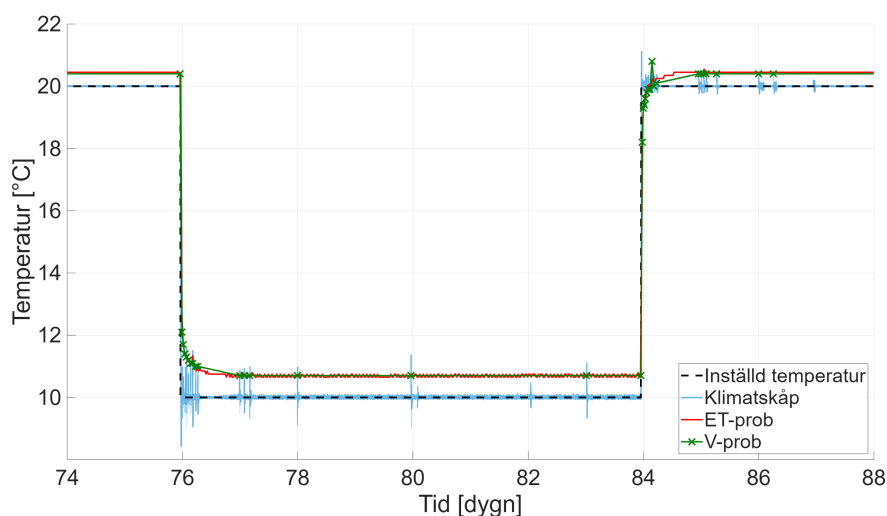


Figur 6.5: Inställd och uppmätt temperatur i klimatskåpet under T10.

Under T30 och T10M, se figur 6.6 och figur 6.7 syns samma temperaturberoende. Vid +20 °C är mätskillnaden cirka 0,4 °C och när temperaturen höjs till +30 °C i T30 minskar mätskillnaden ytterligare till cirka 0,2 °C. En möjlig förklaring till temperaturberoendet är att klimatskåpet inte lyckas upprätthålla den inställda temperaturen genom de olika temperaturförloppen. Både ET- och V-proben mäter i princip samma temperatur genom temperaturförloppen, med samma skillnad mot klimatskåpet vilket styrker teorin. Intressant är att skillnaden mellan uppmätt och inställd temperatur är större vid +20 °C än vid +30 °C. Klimatskåpet är placerat i inomhusklimat, cirka +20 °C. Det borde därav vara enklare att upprätthålla den temperaturen i skåpet då skillnaden mot luftens temperatur utanför skåpet är mindre. Skillnaderna kan dock betraktas små och förväntas inte påverka RF i provkropparna.



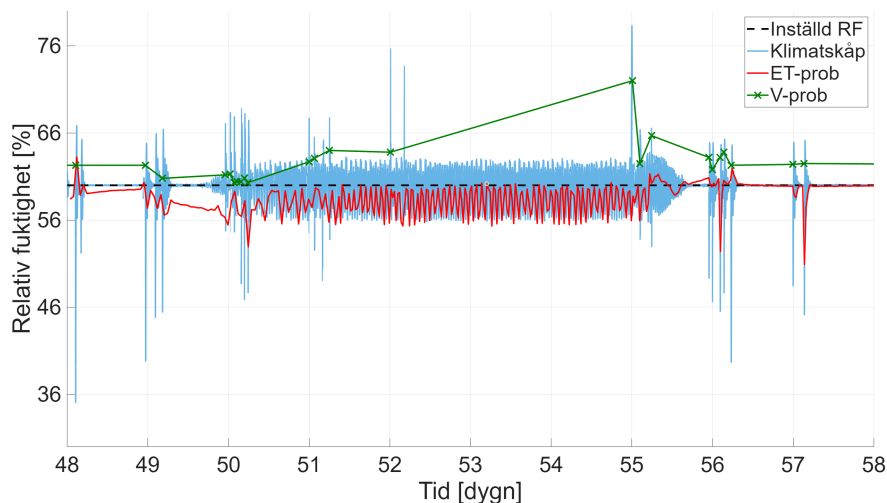
Figur 6.6: Inställd och uppmätt temperatur i klimatskåpet under T30.



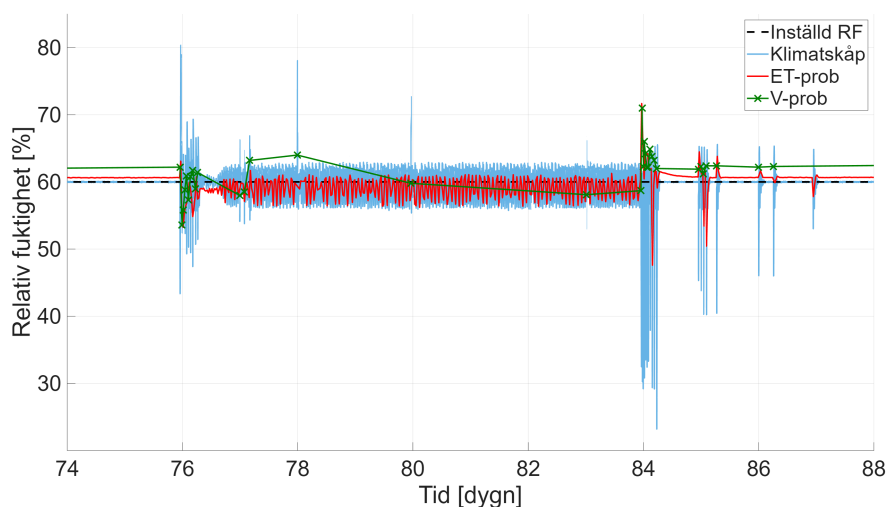
Figur 6.7: Inställd och uppmätt temperatur i klimatskåpet under T10M.

Under samtliga temperaturförlöpp uppstår plötsliga fluktuationer i klimatskåpets temperatur i samband med att dörren öppnas för manuell avläsning av V-proben. Fluktuationerna syns i form av blåa vertikala linjer. Storleken av fluktuationerna uppvisar också ett temperaturberoende. Vid låga temperaturer är fluktuationerna större och minskar vid högre temperaturer. Storleken på fluktuationen är som minst vid +30 °C, se figur 6.6.

RF påverkas i högre grad av att dörren till klimatskåpet öppnas. I figur 6.8 visas RF under T10, de högsta fluktuationerna är cirka 15 %-enheter när temperaturen är +10 °C. Det finns en tydlig koppling mellan fluktuationens storlek och temperatur. Vid låg temperatur är fluktuationen mindre och ökar med temperaturen. Då temperaturen ökar till +20 °C i figur 6.8 ökar även fluktuationerna och överstiger 20 %-enheter. Detta inträffar även i T10M, se figur 6.9.



Figur 6.8: Inställd och uppmätt relativ fuktighet i klimatskåpet under T10.

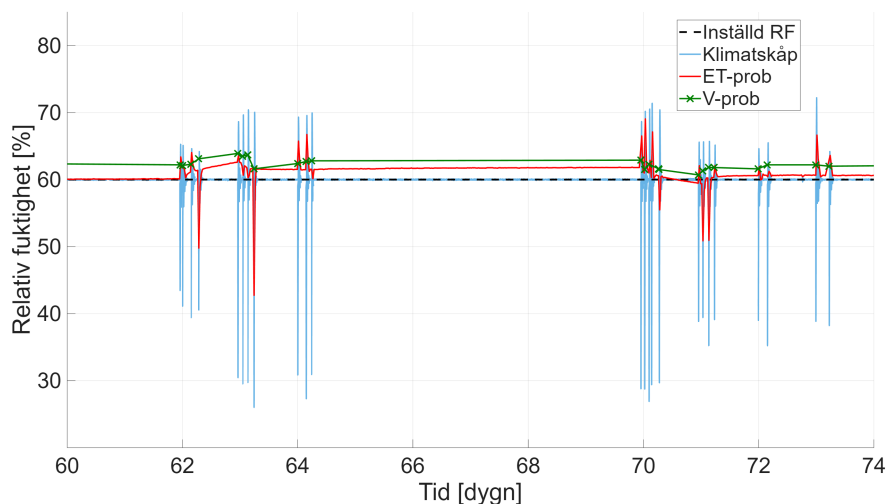


Figur 6.9: Inställd och uppmätt relativ fuktighet i klimatskåpet under T10M.

En förklaring är mätnadsånghalten i klimatskåpet vid olika temperaturer. När klimatskåpets dörr öppnas släpps luft med 60 % RF ut och torr luft in, som sänker ånghalten i skåpet. Vid höga temperaturer är mätnadsånghalten högre, vilket leder till en större sänkning av RF.

Exempelvis är klimatet utanför skåpet cirka +20 °C och 30 % RF. Mätnadsånghalten vid +20 °C är $17,3 \text{ g/m}^3$ vilket ger ånghalten $0,3 \cdot 17,3 = 5,2 \text{ g/m}^3$. Vid +30 °C är mätnadsånghalten $30,3 \text{ g/m}^3$ vilket ger ånghalten $0,6 \cdot 30,3 = 18,2 \text{ g/m}^3$.

I figur 6.10 visas RF under T30 där fluktuationerna uppgår till cirka 30 %-enheter när temperaturen är +30 °C.



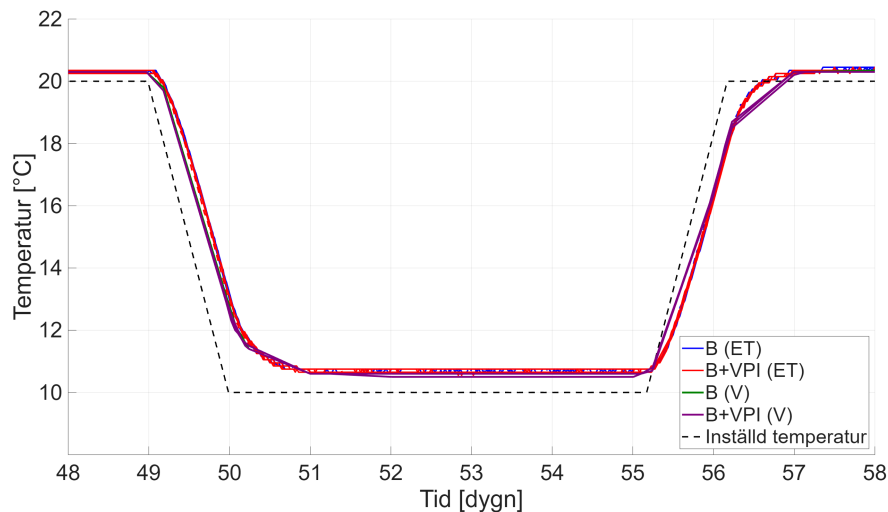
Figur 6.10: Inställd och uppmätt relativ fuktighet i klimatskåpet under T30.

Genom hela mätperioden var klimatet i skåpet stabilt, trots fluktuationer då klimatskåpet öppnades. ET- och V-proberna uppvisar inget samband varken mellan varandra eller klimatskåpet vad gällande RF. I T10 mäter V-proben konstant högre än ET-proben, se figur 6.8. I T10M sker det slumpmässigt, se figur 6.9. Fluktuationerna sker under korta perioder innan jämvikt återigen uppnås i klimatskåpet. Det går att anta att avvikelserna i omgivningens klimat inuti klimatskåpet inte påverkar tolkningen

av temperatur och RF under mätperioden.

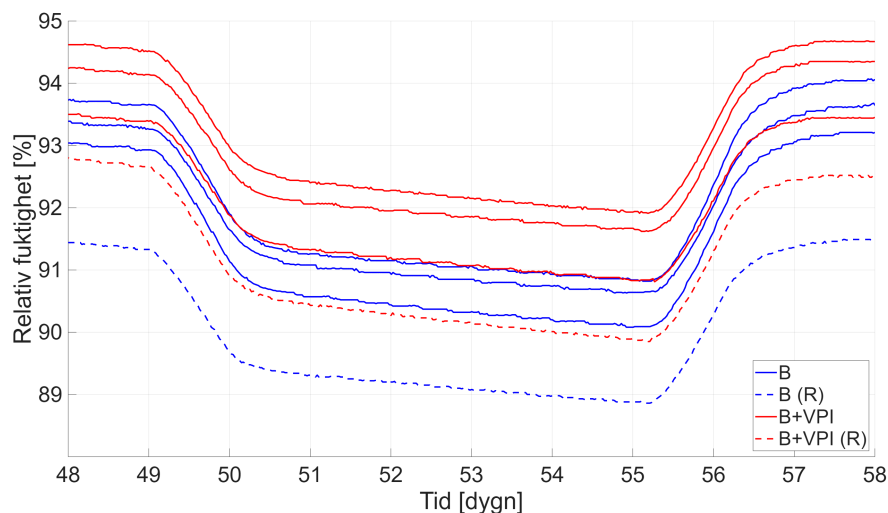
6.2.3 Temperaturförlopp mellan +20 °C och +10 °C

Responsten på temperaturförändringen i klimatskåpet sker med en fördröjning. I figur 6.11 visas temperaturen i ET- och V-proberna tillsammans med temperaturen i klimatskåpet under T10. Det tar cirka 1 dygn från att temperaturen i klimatskåpet stabiliserats till att temperaturen i ET- och V-proberna är stabil. Responsten sker i princip med samma fördröjning mellan dem.



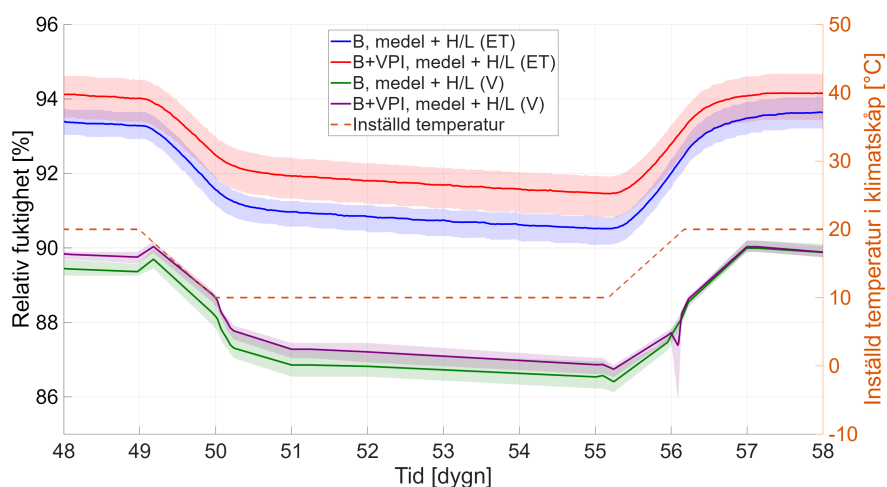
Figur 6.11: Inställd och uppmätt temperatur i betong under T10.

RF i ET-proberna följer temperaturförändringen. När temperaturen sänks sjunker RF och när temperaturen höjs ökar RF återigen, se figur 6.12.



Figur 6.12: RF i ET-proberna under T10.

I figur 6.13 visas medelvärde samt högsta (H) och lägsta (L) värde av RF för de tre ET- och V-proberna i respektive provkropp, den roterade ET-proben är inte med i resultatet. Temperaturen i klimatskåpet visas på den sekundära y-axeln.



Figur 6.13: Medelvärde samt högsta och lägsta RF i ET- och V-proberna gentemot inställd temperatur under T10.

Initialt reagerar V-proben motsatt det förväntade, när temperaturen sänks stiger RF i V-proben omedelbart och när den sedan höjs sjunker RF. Förändringen uppgår till cirka 0,2 %-enheter innan RF snabbt stabiliseras i V-proberna och visar sedan samma respons som ET-proberna. Skillnaden i respons kan förklaras med att betong och plast har olika värmekapacitet som påverkar RF-sensorerna. Plaströret V-proben monterats i har lägre värmekapacitet än betongen och är i direkt kontakt med luften i klimatskåpet. När temperaturen sänks kommer plaströret kylas ned snabbare än betongen. Luften i röret kyls då ned varpå mätnadsånghalten omedelbart sänks. Detta sker innan temperaturjämvikt nås i betongen, som sker med fördröjning, vilket leder till att RF omedelbart stiger. När temperaturen i klimatskåpet höjs sker det omvända.

V-proberna mäter cirka 4 %-enheter lägre RF än ET-proberna genom hela temperaturförloppet, se figur 6.13. Skillnaden kan betraktas som stor, då det exempelvis tog cirka 49 dygn för RF att minska 5 %-enheter under den initial uttorkningen. Det finns ingen tydlig orsak till skillnaden i RF mellan ET- och V-proberna. En möjlig förklaring är en skillnad i RF-sensorernas position som diskuterats av Ikumi et al. [22]. Ytterligare faktorer som kan påverka RF är RF-probens geometri som kan störa fukttransporten i betongen, detta har diskuterats av Ikumi et al. [22] och Åhs [14]. En annan teori är att uttorkningen sker snabbare lokalt där V-proberna installerats. Borrning av mät hålen genererar värme i betongen som kan påskynda initial uttorkning.

ET-proberna uppvisar större spridning i RF än V-proberna. Standardavvikelsen från medelvärdet i ET-proberna uppgår till 0,38 respektive 0,58 %-enheter i provkropp B och B+VPI. Samtidigt uppvisar V-proberna standardavvikelsen 0,28 respektive 0,19 %-enheter i provkropp B och B+VPI, vilket indikerar högre precision och mindre spridning i mätresultaten.

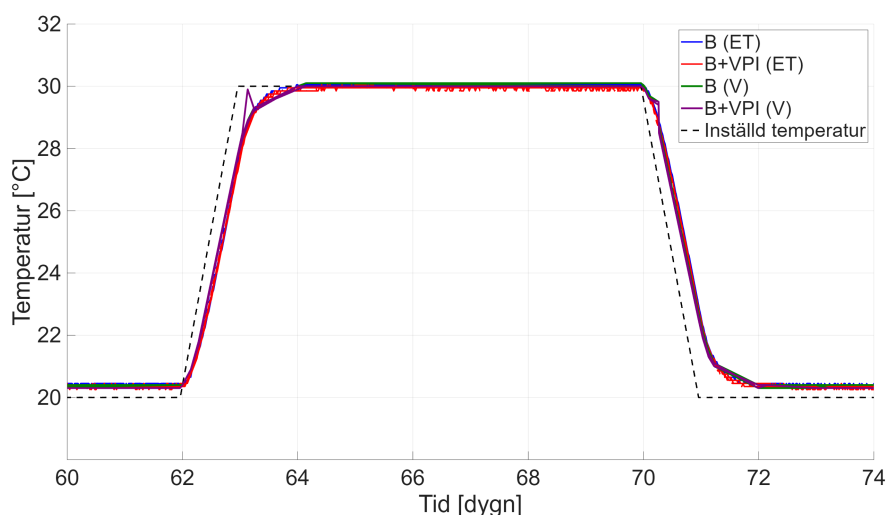
Storleken av RF-förändringen innan och efter att temperaturen ändrats presenteras i tabell 6.3. Värdena är tagna då ET- och V-proberna är i temperaturjämvikt innan och efter temperaturförändringen och redovisas som medelvärden. För samtliga RF-prober stiger RF mer då temperaturen höjs än vid sänkning. RF-förändringen är även genomgående större i V- än i ET-proberna. Skillnaden mellan ET- och V-proberna är dock små och inom mätosäkerheten varpå resultatet bör tolkas med försiktighet.

Tabell 6.3: Medelvärde av uppmätt RF före och efter temperaturförändringar i T10 samt skillnader däremellan.

Prov	Temperatursänkning			Temperaturhöjning		
	Innan RF [%]	Efter RF [%]	Skillnad Δ RF [%]	Innan RF [%]	Efter RF [%]	Skillnad Δ RF [%]
B (ET)	93,3	91,0	-2,3	90,5	93,5	+3,0
B (V)	89,4	86,9	-2,5	86,5	90,0	+3,5
B+VPI (ET)	94,0	91,9	-2,1	91,5	94,1	+2,6
B+VPI (V)	89,8	87,3	-2,5	86,9	90,0	+3,1

6.2.4 Temperaturförlopp mellan +20 °C och +30 °C

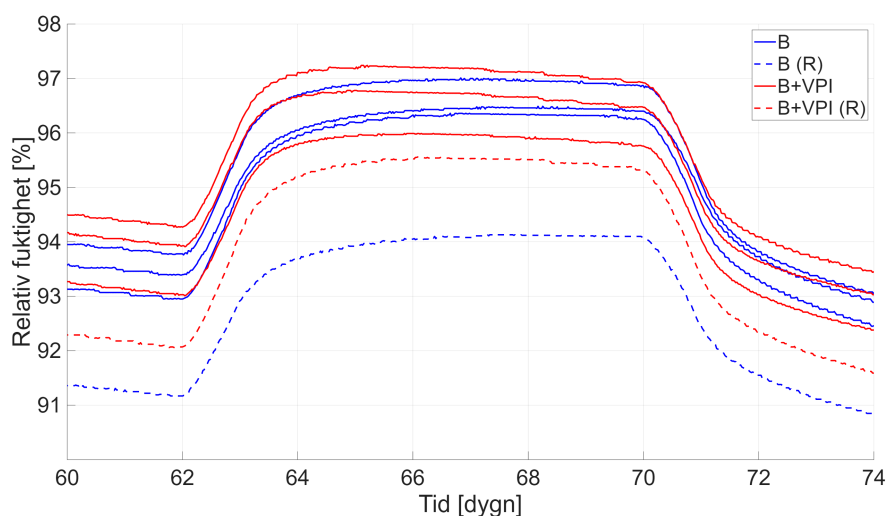
Temperaturen i betongen under T30 redovisas i figur 6.14. Både ET- och V-proberna mäter i stort sett samma temperatur genom hela temperaturförloppet, med liten inbördes spridning. Responsen på temperaturförändringen sker med en tidsfördröjning i förhållande till klimatskåpets temperatur på samma sätt som observerats i T10.



Figur 6.14: Inställd och uppmätt temperatur under T30.

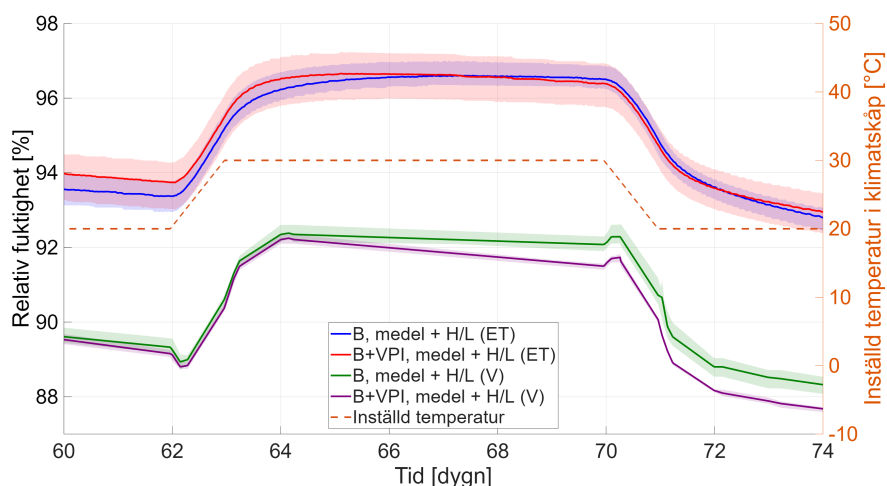
När klimatskåpet är +30 °C mäts även temperaturen i betongen till +30 °C. Detta skiljer sig från i T10 där temperaturen i provkropparna var högre än klimatskåpets inställning under hela förloppet. Detta observerades även vid kontroll av det omgivande klimatet, där skillnaden mellan inställd och uppmätt temperatur var större vid låga temperaturer.

RF i ET-proberna följer återigen temperaturförändringarna i klimatskåpet. När temperaturen höjs ökar RF och när den sänks sjunker RF, se figur 6.15. Responsen sker med en fördröjning på samma sätt som observerats i T10.



Figur 6.15: RF i ET-proberna under T30.

I figur 6.16 visas medelvärdet samt högsta (H) och lägsta (L) värdet för de tre ET- och V-proberna i respektive provkropp, den roterade ET-proben är inte med i resultatet.



Figur 6.16: Medelvärde samt högsta och lägsta RF i ET- och V-proberna gentemot inställd temperatur under T30.

Responsen på temperaturförändringar i T30 skiljer sig åt mellan ET- och V-proberna på samma sätt som observerats i T10. När temperaturen höjs sjunker RF i V-proberna omedelbart och när den sedan sänks stiger RF, vilket inte observeras i ET-proberna.

De absoluta RF-nivåerna skiljer sig åt mellan ET- och V-proberna. V-proberna mäter genomgående cirka 4 %-enheter lägre RF än ET-proberna, vilket även observerades i T10. Både skillnaden i RF-nivå och hur ET- och V-proberna reagerar på temperaturförändring uppvisar samma beteende i T30 och T10. Detta tyder på att skillnaden mellan mätmetoderna inte enbart beror på den aktuella temperaturen i respektive temperaturförlopp, utan sannolikt också på hur mätningen utförs.

Spridningen i RF är liten i båda RF-proberna, men är något större i ET- än V-proberna. För ET-proberna uppgår standardavvikelsen till 0,35 respektive 0,60 %-enheter i provkropp B respektive

B+VPI, medan motsvarande standardavvikelse för V-proberna är 0,22 respektive 0,09 %-enheter. ET-proberna uppvisar därmed en något större variation mellan enskilda mätpunkter, särskilt i provkropp B+VPI. Till skillnad från ET-proberna uppvisar V-proberna lägre standardavvikelse i provkropp B+VPI än i B, vilket även observeras i T10.

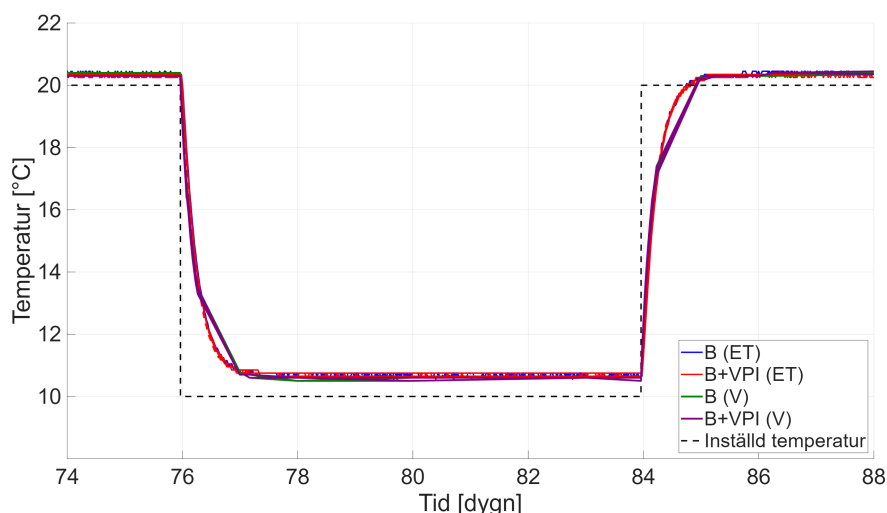
ET-proberna uppvisar i stort sett samma förändring i RF vid höjning som vid sänkning av temperaturen i klimatskåpet, se tabell 6.4. Vid temperaturhöjning ökar RF i ET-proberna med 2,8 %-enheter i båda provkropparna. Vid temperatursänkning minskar RF i ET-proberna med 2,8 – 2,9 %-enheter i provkropparna. Responsen kan därför beskrivas som relativt symmetrisk i detta temperaturförlopp. V-proberna visar något större RF-förändring vid temperatursänkning än vid höjning. Vid temperaturhöjning ökar RF med 3,0 %-enheter och vid sänkning minskar RF med 3,3 %-enheter för respektive provkropp. Skillnaden är liten, men visar att V-proberna inte ger en lika symmetrisk respons som ET-proberna under temperaturförloppet.

Tabell 6.4: Medelvärden av uppmätt RF före och efter temperaturförändringar i T30 samt skillnader däremellan.

Prov	Temperaturhöjning			Temperatursänkning		
	Innan RF [%]	Efter RF [%]	Skillnad Δ RF [%]	Innan RF [%]	Efter RF [%]	Skillnad Δ RF [%]
B (ET)	93,4	96,2	+2,8	96,5	93,6	-2,9
B (V)	89,3	92,3	+3,0	92,1	88,8	-3,3
B+VPI (ET)	93,7	96,5	+2,8	96,4	93,6	-2,8
B+VPI (V)	89,2	92,2	+3,0	91,5	88,2	-3,3

6.2.5 Temperaturförlopp mellan +20 °C och +10 °C med momentan temperaturförändring

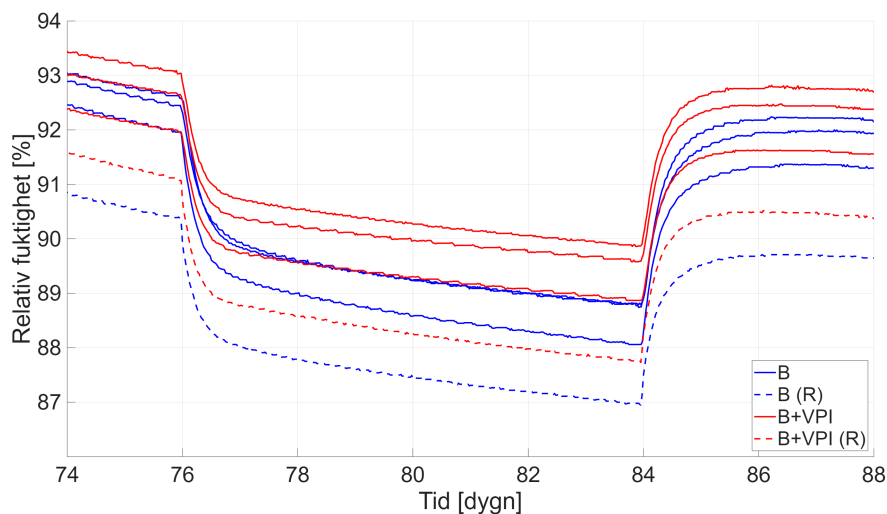
Temperaturen i betongen under T10M redovisas i figur 6.17. Responsen på temperaturförändringen i T10M sker med en fördröjning som i T10 och T30. Det tar återigen cirka 1 dygn från att temperaturen i klimatskåpet stabiliserats tills att temperaturen i ET- och V-proberna är stabil.



Figur 6.17: Inställd och uppmätt temperatur under T10M.

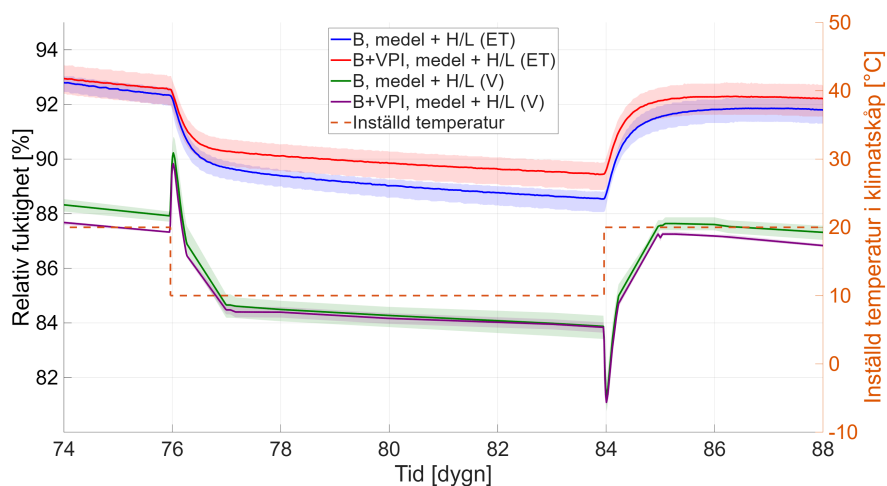
I figur 6.18 visas RF i ET-proberna under T10M. RF i ET-probera följer temperaturförändringarna,

när temperaturen sänks sjunker RF och när temperaturen höjs stiger RF. RF förändras snabbare än i T10, vilket var förväntat.



Figur 6.18: RF i ET-proberna under T10M.

I figur 6.19 visas medelvärdet samt högsta och lägsta RF i ET- och V-proberna i de två provkropparna. En stor skillnad mot T10 är den omedelbara responsen från V-proberna vid temperaturförändring, som är mycket större i T10M. När temperaturen sänks momentant ökar RF i V-proberna omedelbart cirka 2 %-enheter, innan RF sjunker och ställs i jämvikt. Då temperaturen höjs sker det omvända. Detta skiljer sig mot förändringen i V-proberna under T10 som var cirka 0,2 %-enheter.



Figur 6.19: Medelvärde samt högsta och lägsta RF i ET- och V-proberna gentemot inställd temperatur under T10M.

Skillnaden kan återigen bero på att V-proberna mäter i borrhål med plaströr och en liten luftvolym, medan ET-prober är ingjutna i betongen. Vid en momentan temperaturförändring sjunker temperaturen i plaströret och luften i plaströret mycket snabbare än omgivande betong. Detta ger en snabb förändring av mätnadsånghalt och RF i luften i plaströret, utan att en lika snabb fuktförändring sker i betongen. ET-prober påverkas däremot av betongens långsammare temperaturutjämning och visar därför inte samma respons.

Jämfört med T10, blir skillnaden mellan mätmetoderna tydligare i T10M. Vid långsam temperaturförändring hinner betongen, borrhålet och RF-proberna i större utsträckning nå temperaturjämvikt, vilket ger ett mer utjämnat RF-förlopp. När temperaturen ändras momentant uppstår däremot större tillfälliga skillnader mellan luften i borrhålet och den omgivande betongen.

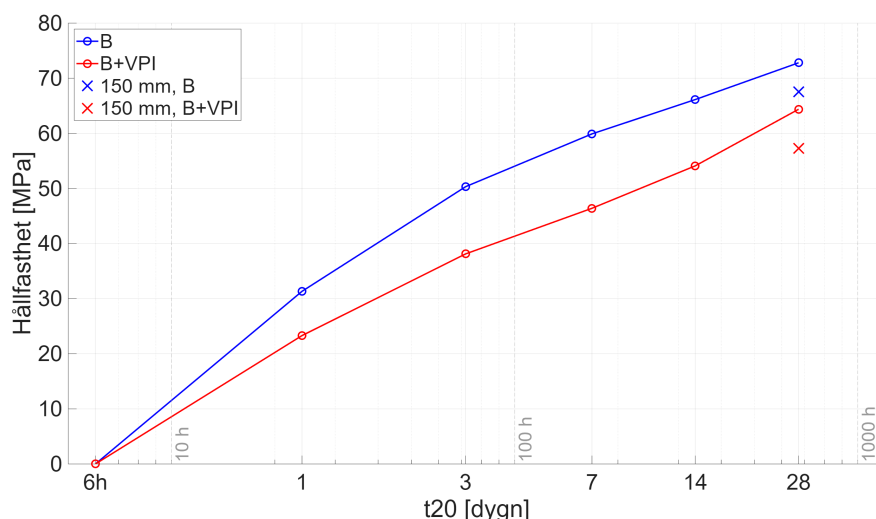
I tabell 6.5 visas RF-förändringar innan och efter temperaturförändringarna i T10M. V-proberna uppvisar återigen större skillnader i RF än ET-proberna, vilket även observerats i T10 och T30. Jämfört med T10 är alla RF-förändringar större i V-proberna i T10M. En möjlig förklaring är termisk tröghet i betongen, vid momentan temperaturändring omfördelas inte fukten lika snabbt som temperaturen.

Tabell 6.5: Medelvärde av RF före och efter temperaturförändringar för T10M samt skillnader däremellan.

Prov	Temperatursänkning			Temperaturhöjning		
	Innan RF [%]	Efter RF [%]	Skillnad Δ RF [%]	Innan RF [%]	Efter RF [%]	Skillnad Δ RF [%]
B (ET)	92,3	89,7	-2,6	88,6	91,5	+2,9
B (V)	87,9	84,7	-3,2	83,9	87,6	+3,7
B+VPI (ET)	92,5	90,3	-2,2	89,5	92,1	+2,6
B+VPI (V)	87,3	84,5	-2,8	83,8	87,3	+3,5

6.3 Hållfasthet

Resultatet av tryckprovning visas i figur 6.20. Linjerna visar medelvärdet av tre tryckprovade 100 mm kuber vid respektive tidpunkt markerad med cirkel, blå tillhör betongtyp B och röd B+VPI. X-markörer visar medelvärdet av två tryckprovade 150 mm kuber med samma färgkategorisering.



Figur 6.20: Tryckhållfasthet i betong med 20 % respektive 33,3 % VPI.

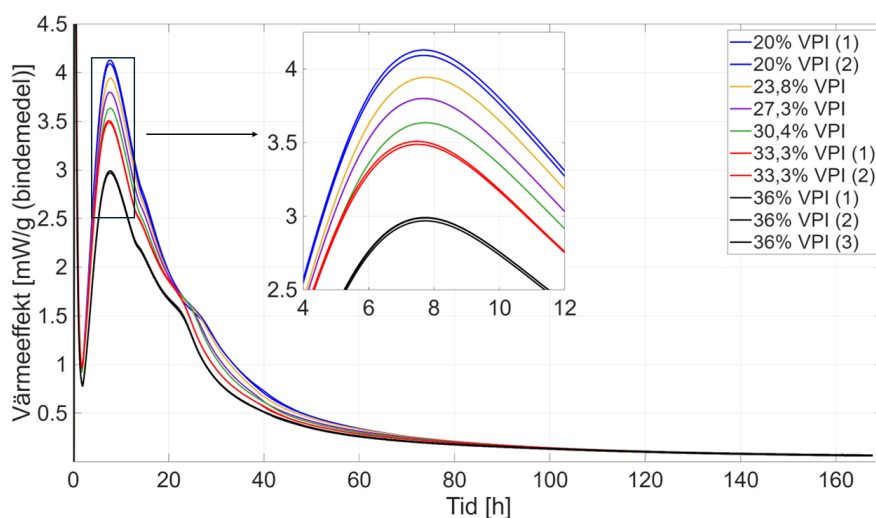
Tendenskurvan indikerar hög hållfasthet för båda betongrecepten. Vid 28 dygn uppgår tryckhållfastheten för 100 mm kuber till 72,8 MPa för betongtyp B och 64,4 MPa för betongtyp B+VPI. Motsvarande värden för 150 mm kuber är 67,55 respektive 57,25 MPa.

Betongtyp B visar genomgående högre tryckhållfasthet, vilket är förväntat då betongen innehåller en högre andel cementklinker. Fram till och med 7 dygn följer betongerna en liknande övergripande

hållfasthetsutveckling, men med en förskjutning som kan kopplas till skillnaden i cementklinker. Efter 7 dygn sker en snabbare hållfasthetsutveckling i betongtyp B+VPI, vilket framgår av den brantare lutningen på kurvan. En möjlig förklaring är att puzzolanreaktionen sker med en viss fördröjning, vilket innebär att en större del av hållfastheten i betongen utvecklas senare.

6.4 Kalorimetri

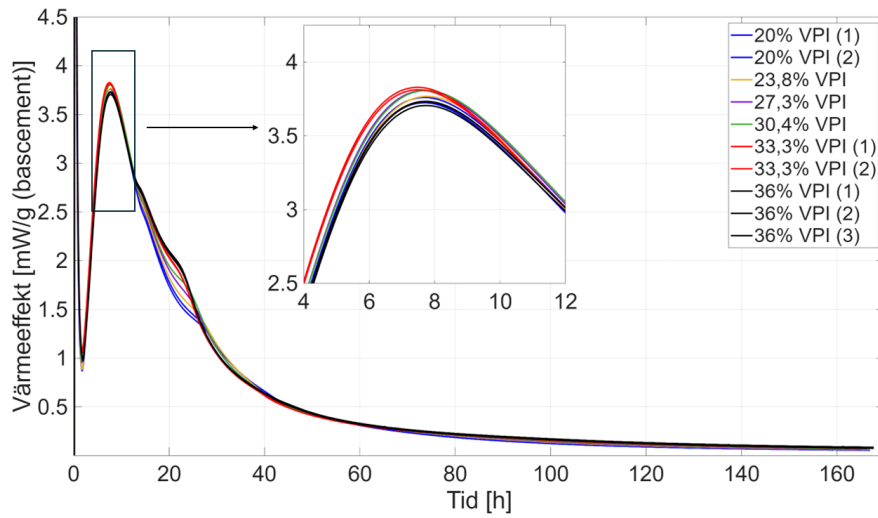
Hydratationsförloppet för de olika bruksproverna redovisas i figur 6.21 baserat på värmeeffekt per gram bindemedel. Resultaten visar att den tidiga huvudtoppen avtar med ökande andel VPI, vilket indikerar på en lägre initial reaktionshastighet. Proverna med 20 % VPI uppvisar den högsta maximala värmeeffekten medan högre andelar VPI ger en succesivt lägre huvudtopp. Provet med 36 % VPI avviker från den i övrigt tydliga trenden och bör därav tolkas med viss försiktighet.



Figur 6.21: Värmeeffekt per gram bindemedel i cementbruksprover med olika andel VPI.

Skillnaden i värmeeffekt kan främst förklaras av att andelen bascement minskar när andelen VPI ökar, eftersom den tidiga värmeutvecklingen i huvudsak kommer från hydratation av cementklinker. Detta kan tydligt kopplas till temperaturutvecklingen i provkropparna för RF-mätning, där den maximala temperaturen var högre i provkroppen med lägre andel VPI, se figur 6.4.

För att skilja på värmeeffekten av den minskande mängden bascement och från möjligt bidrag från VPI, redovisas värmeeffekten även per gram bascement, se figur 6.22.



Figur 6.22: Värmeeffekt per gram bascement för cementbruksprover med olika andel VPI.

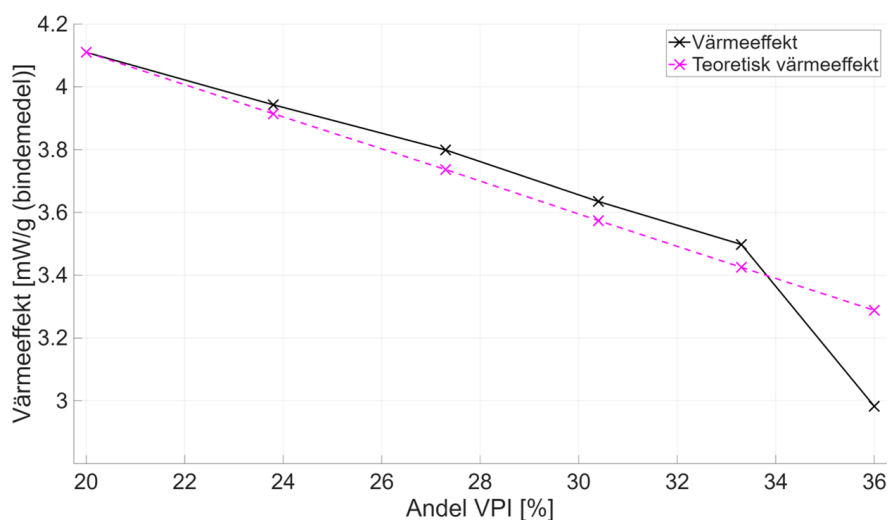
När resultaten normaliseras på detta sätt blir huvudtoppen betydligt mer lika varandra mellan bruksproverna. Detta innebär att VPI i stort sett inte bidrar till värmeffekten i huvudtoppen och att minskningen i figur 6.21 främst beror på andelen cementklinker.

För att tydligare bedöma om skillnaden i maximal värmeeffekt enbart beror på lägre andel bascement jämförs värmeffekten i figur 6.21 med en teoretisk värmeeffekt, se figur 6.23. Den teoretiska värmeffekten, $P_{\text{teoretisk}}$, beräknades med ekvation (6.1) och utgår från att provet med 20 % VPI motvarar 100 % värmeeffekt, $P_{\text{max},20}$. Då andelen bascement minskar procentuellt, minskar värmeffekten med samma procentsats.

$m_{\text{bc},x}$ är mängden bascement i respektive bruksprovsrecept, $m_{\text{bc},20}$ är mängden bascement i receptet med 20 % VPI, se tabell 4.3 i avsnitt 4.3.

$$P_{\text{teoretisk}} = P_{\text{max},20} \cdot \frac{m_{\text{bc},x}}{m_{\text{bc},20}} \quad (6.1)$$

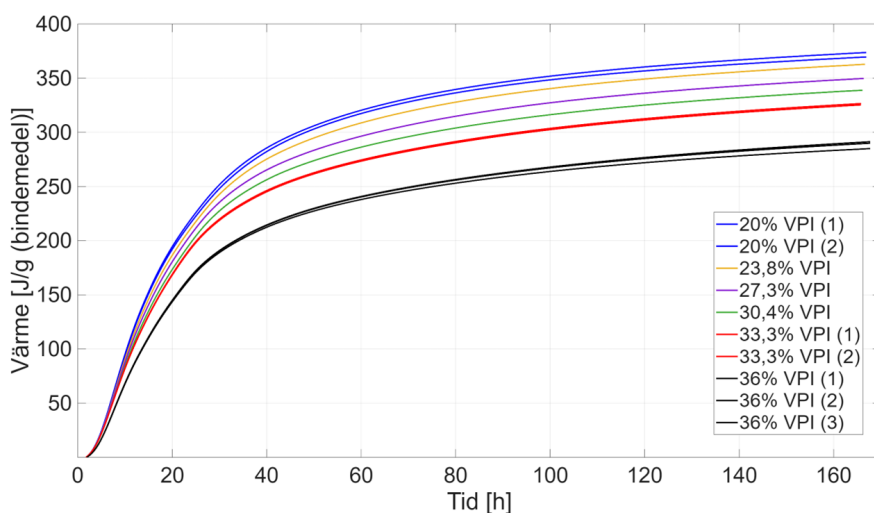
Linjen motsvarar därmed den värmeeffekt som hade förväntats om tillsatt VPI utöver 20 % inte reagerar och bidrar till värmeffekten.



Figur 6.23: Högsta uppmätta värmeeffekten och den teoretiska beräknade värmeeffekten.

Figur 6.23 visar att den maximala värmeeffekten minskar nästintill linjärt med ökande andel VPI, bortsett från bruksprovet med 36 % VPI. Detta styrker teorin att den tidiga huvudtoppen till stor del styrs av andelen bascement i provet. Fram till 27,3 % VPI minskar den teoretiska värmeeffekten snabbare än den verkliga, vilket innebär att skillnaden i värmeeffekt ökar. Skillnaden kan tolkas som ett direkt bidrag från tillsatt VPI. Värmeeffekten mellan den teoretiska och verkliga beror på att VPI reagerar i bruksproverna. Mellan 27,3 % och 33,3 % VPI avtar den uppmätta och den teoretiska värmeeffekten däremot i stort sett parallellt, vilket tyder på att ytterligare VPI inom intervallet inte ger någon tydlig ökning av värmeeffekten. Skillnaden i värmeeffekt är dock liten och resultatet bör därmed tolkas med viss försiktighet.

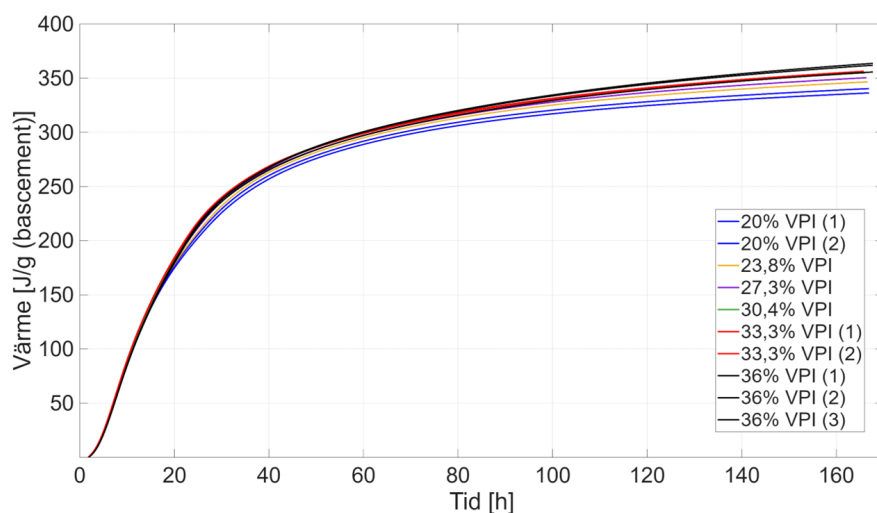
Värmemängden per gram bindemedel visar samma trend som värmeeffekten där en ökad andel VPI ger en lägre värmemängd, se figur 6.24. Skillnaderna mellan proverna är tydlig redan tidigt under hydratationen och kvarstår under hela förloppet.



Figur 6.24: Värme i bruksprover med vbt 0,5 och olika andel VPI.

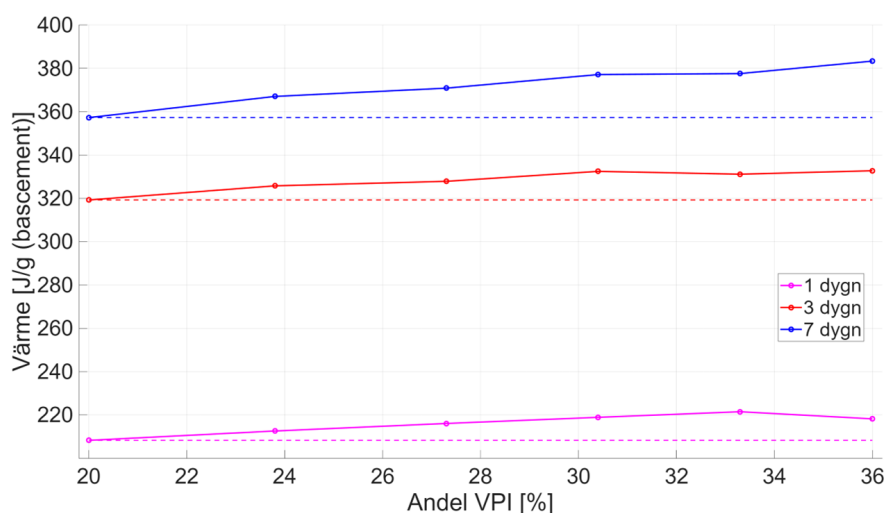
När värmemängden istället uttrycks per gram bascement förändras jämförelsen, se figur 6.25. Det

framgår då att prover med högre andel VPI generellt utvecklar en större värmemängd mot slutet av mätperioden. Eftersom andelen bascement normaliserats kan skillnaden inte enbart förklaras av varierande cementklinkerinnehåll. Resultatet tyder på att VPI bidrar till ytterligare reaktioner efter huvudtoppen, förmodligen i form av fördröjda puzzolanreaktioner som ger ett ökat värmetillskott. Detta stämmer överens med resultaten från hållfasthetsutvecklingen. Den ökande värmeutvecklingen sker i samband med att CSH bildas i de fördröjda puzzolanreaktionerna, som samtidigt bidrar till en ökad hållfasthet.



Figur 6.25: Värmemängd i bruksprover per gram bascement.

Samma trend framgår tydligare när värmemängden per gram bascement jämförs vid 1, 3 och 7 dygn, se figur 6.26. Vid samtliga tidpunkter ökar värmemängden med ökande andel VPI. Skillnaden är relativt begränsad efter 1 dygn, men blir större efter 3 dygn och framför allt efter 7 dygn. Detta visar att VPI:s bidrag blir större med tiden.

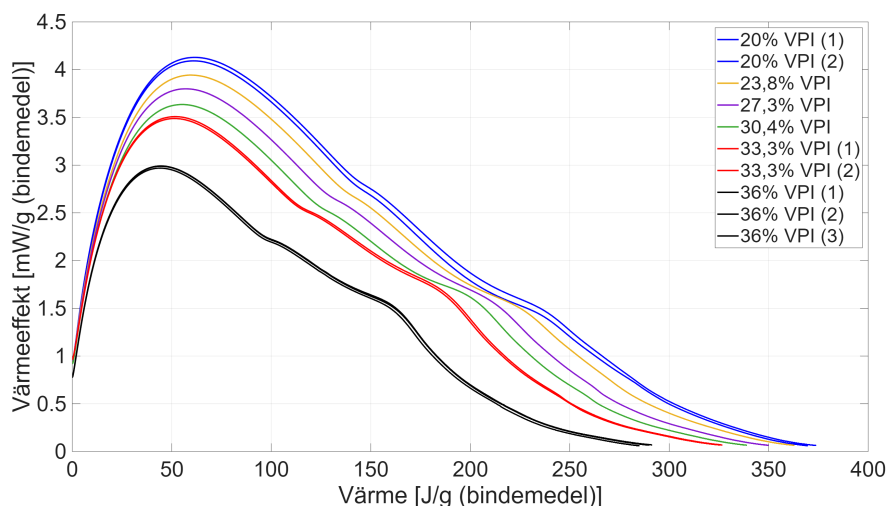


Figur 6.26: Värmemängd vid 1, 3 respektive 7 dygn med ökande andel VPI.

Värmemängdens ökning i förhållande till andel VPI mellan 1 och 7 dygn stämmer överens med att puzzolana reaktioner normalt sker långsammare än cementklinkerreaktionerna. Resultatet kan därför förklara varför betongen med högre andel VPI har lägre tidig hållfasthet. Utifrån hållfasthetsprov

ökar hållfastheten snabbare för prov med högre andel VPI efter 7 dygn. Det är därför möjligt att skillnaden i värmemängd fortsätter öka efter mätperiodens slut. Det kan dock inte fastställas utifrån kalorimetrimätningen, eftersom de avslutades efter 7 dygn.

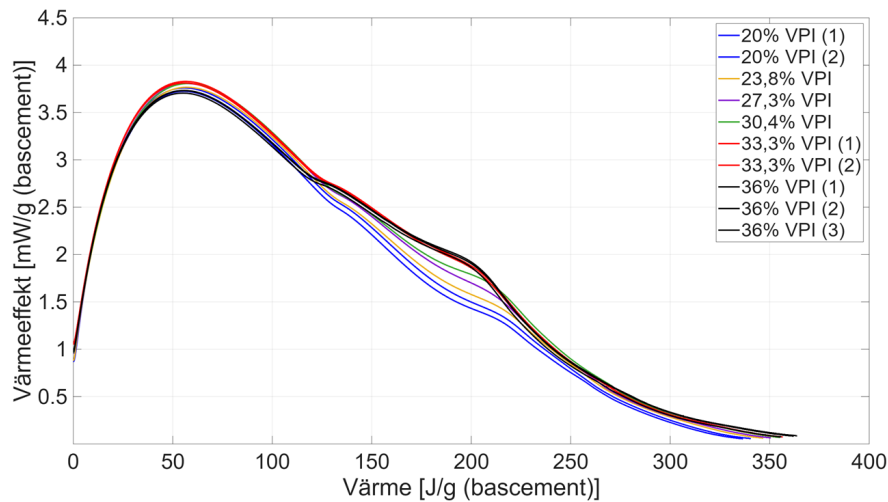
Värmeeffekten i figur 6.21 kan redovisas som funktion av värmemängden i figur 6.24 för att visa hur reaktionshastigheten förändras i förhållande till den värme som utvecklats. När resultaten uttrycks per gram bindemedel framgår samma resultat som i tidigare figurer där en ökad andel VPI medför en lägre värmeeffekt och en lägre total värmemängd, se figur 6.27.



Figur 6.27: Värmeeffekt som funktion av värmemängd för bruksprover med vbt 0,5 och olika andel VPI.

Efter huvudtoppen syns två ytterligare toppar mellan cirka 125 och 225 J/g bindemedel i form av att värmeeffekten ökar, som kan bero på puzzolanreaktionerna.

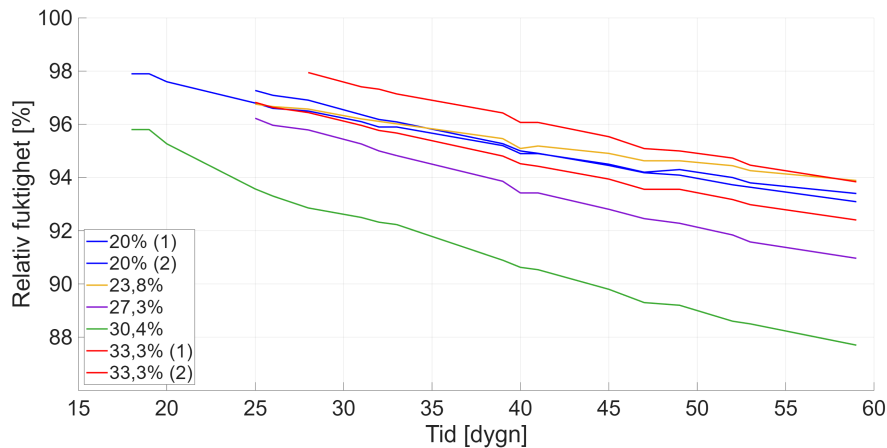
När samma samband uttrycks per gram bascement blir skillnaderna i huvudtoppen mindre tydliga, se figur 6.28. Det bekräftar att den tidiga reaktionen i första hand styrs av andelen bascement. Efter denna reaktion framträder däremot skillnader mellan proverna, där prover med högre andel VPI visar högre värmeeffekt mellan 125 och 225 J/g bascement.



Figur 6.28: Samband mellan värmeeffekt och värmemängd i bruksprover per gram bascement.

6.5 Självtorkning

Självtorkningen utvärderades under 59 dagar, där mätdata redovisas i bilaga 2. I figur 6.29 visas den relativa fuktigheten i glasburkar med bruksprov och hur den relativa fuktigheten förändras över tid. Sensorerna som användes vid mätningarna var kalibrerade vid 95 % relativ fuktighet. Detta innebär att mätvärden över denna nivå bör tolkas med viss försiktighet. För vissa prov registrerades värden över 95 % under den inledande delen av torkningsförloppet, medan andra mätserier först började ge resultat när den relativa fuktigheten hade sjunkit till omkring 95 %. Därför kan en jämförelse mellan proverna främst baseras på utvecklingen efter att mätvärdena hamnat inom sensorernas kalibrerade område.



Figur 6.29: Relativ fuktighet i burkar med bruksprov med olika andel VPI för självtorkning.

Utifrån figur 6.29 kan inget tydligt samband mellan andelen VPI och graden av självtorkning fastställas. De flesta mätserier ligger relativt samlat och uppvisar liknande utveckling över tid. Däremot avviker provet med 30,4 % VPI tydligt genom en betydligt snabbare torkning, vilket kan tyda på att andra faktorer än andelen VPI påverkat självtorkningen i detta prov.

En av de faktorer som kan ha påverkat grafernas utseende i figur 6.29 är läckage av fukt från burken i form av diffusion. Därför gjordes kontrollmätningar på vikt innan påbörjad självuttorkning samt efter där viktförlusten av proverna presenteras i 6.6. Utifrån tabellen kan man se att provet med 30,4 % VPI har störst viktförlust vilken även var provet som avviker från resterande i figur 6.29.

Tabell 6.6: Viktförlust i självuttorkningsprover.

Andel VPI [%]	Viktförlust [g]
20 (1)	-0,2
20 (2)	-0,2
23,8	-0,3
27,3	-0,3
30,4	-0,4
33,3 (1)	-0,1
33,3 (2)	-0,2

Alla prover vägde 200 gram (± 5 g) vilket innebär att varje bruksprov innehåller cirka 22,2 gram vatten. En viktförlust på 0,1 - 0,4 g motsvarar därmed 0,45 - 1,8 % av provets totala mängd vatten. Viktförlusten i proverna bör därav inte vara huvudsaklig anledning till att grafernas utseende skiljer sig åt.

7 Slutsats

Hur påverkas uttorkningsförloppet och den relativa fuktigheten i betong med olika andel VPI vid temperaturvariationer?

Betongen med högre andel VPI uppvisade generellt en långsammare uttorkning än betongen med lägre andel VPI. Detta tyder på att en högre andel VPI kan påverka fukttransporten, sannolikt genom en tätare porstruktur. Skillnaderna mellan materialen vid temperaturförändringarna var dock relativt små och bör därför tolkas med försiktighet.

Hur skiljer sig resultat mellan ingjutna RF-prober och traditionell borrhålsmätning?

Resultaten visar på stora skillnader mellan mätmetoderna. ET-proberna mäter cirka 4 %-enheter högre RF genom hela mätperioden oberoende av betongtyp och omgivningens temperatur. V-proberna reagerar initialt motsatt det förväntade vid temperaturförändringar, RF stiger när temperaturen sjunker och vice versa. RF-förändringen i V-proberna uppgår i vissa fall till 2 %-enheter i samband med temperaturförändring. ET-proberna uppvisade inte beteendet utan RF följde temperaturförändringarna genom hela mätperioden.

Hur påverkas självuttorkningen av olika andelar VPI i bindemedlet?

Inget samband mellan andelen VPI och självuttorkning kan fastslås.

Hur påverkas hållfasthetsutvecklingen i betong av olika andelar VPI?

Hållfasthetsprovningsvisade att betongtyp B utvecklade högre tryckhållfasthet än betongtyp B+VPI vid samtliga provningstillfällen. Detta kan kopplas till att betongtyp B innehåller en högre andel cementklinker.

Hur påverkas hydratationsförloppet och värmeutvecklingen av olika andelar VPI i cementbruk?

Kalorimetrimätningarna visade att en högre andel VPI gav lägre tidig värmeeffekt per gram bindemedel. Detta visar att hydratationsförloppet påverkas av bindemedlets sammansättning och att högre andel VPI ger långsammare tidiga reaktioner. Värmemängden per gram bascement ökar med andel VPI, vilket indikerar att VPI bidrar till senare reaktioner i cementbruket och som kan ha betydelse för senare hållfasthetsutveckling.

Sammanfattningsvis visar arbetet att både temperatur och mätmetod har stor betydelse vid RF-mätning i betong. En högre andel VPI kan ge långsammare uttorkning, lägre tidig värmeutveckling och en lägre hållfasthet inom de första 28 dygnen. Resultaten indikerar att reaktioner i betong med högre andel VPI kan pågå under längre tid på grund av fördröjda puzzolanreaktioner.

8 Förslag till vidare studier

- Undersöka hur RF påverkas vid momentan temperaturförändring mellan +20 °C och +30 °C grader och jämföra hur det skiljer sig mot temperaturförändringen mellan +20 °C och +30 °C som gjorts i detta arbete.
- Undersöka RF vid olika mätdjup för att undersöka hur det skiljer sig mellan mätmetoderna. Ta fram en fuktprofil för betong med respektive mätmetod och undersöka skillnaden mellan dessa.
- Undersöka skillnaden mellan ET- och V-proberna, vad beror skillnaden på? Vad finns det för inbörningseffekter och vilken RF-prob mäter rätt?
- Undersöka RF i betong med större variation i andel VPI, exempelvis 0, 20 och 40 % av bindemedlet, för att tydligare identifiera skillnader i materialegenskaper.
- Undersöka hur RF påverkas av temperaturvariationer efter att betongen uppnått jämvikt i syfte att isolera effekten från självuttökning.

Referenser

- [1] Sveriges geologiska undersökning. *Cement och betong*. 2023. URL: <https://www.sgu.se/mineralnaring/industrimineral/cement-och-betong/> (hämtad 2025-02-15).
- [2] Burström, P. G. och Nilvér, K. *Byggnadsmaterial*. 4. utg. Studentlitteratur, 2018.
- [3] Heidelberg Materials Cement Sweden. *Bascement Plus Slite*. URL: <https://www.cement.heidelbergmaterials.se/sv/bascement-plus-slite> (hämtad 2026-02-03).
- [4] Fagerlund, G. *Betongteknik*. Institutionen för bygg och miljöteknologi, 1999.
- [5] Mortensen, G. M., Tarras, H., Göransson, M., Taromi Sundström, O., Malaga, K., Helsing, E., Utgenannt, P. och Sundling, E. *Geotekniska egenskaper hos svenska leror*. Rapport 2023:02. Sveriges geologiska undersökning, 2023.
- [6] Johansson, S-E. *Betonghandbok Material. Del 2*. Svensk Byggtjänst, 2017.
- [7] Hewlett, P. C. och Liska, M. *Leas's Chemistry of Cement and Concrete*. Butterworth-Heinemann, 2019.
- [8] Neville, A. M. *Properties of Concrete*. Pearson Education Limited, 2011.
- [9] Heidelberg Materials Cement Sweden. *VPI - Vulkanisk Puzzolan Island*. URL: <https://www.cement.heidelbergmaterials.se/sv/vpi-vulkanisk-puzzolan-island> (hämtad 2026-05-10).
- [10] Nilsson, L-O. *Betonghandbok Material. Del 2*. Svensk Byggtjänst, 2021.
- [11] Ahlgren, L. *Fuktfixering i porösa byggnadsmaterial*. Rapport 1972:36. Institution för byggnadsteknik, LTH, Lunds Universitet, 1972.
- [12] Fagerlund, G. *Kompendium i Byggnadsmaterial FK del 1*. Kurskompendium. 2002.
- [13] Arfvidsson, J., Hardereup, L.-E. och Samuelson, I. *Fukthandbok: Praktik och teori*. 4. utg. Svensk Byggtjänst, 2017.
- [14] Åhs, M. *Evaluation of an Embedded Wireless Relative Humidity Probe for Monitoring Concrete Drying*. Tekn. rapport TVBM; No. 3191. Institution för byggnadsmaterial, LTH, Lunds Universitet, 2024.
- [15] Fagerlund, G. *Kompendium i Byggnadsmaterial FK del 3*. Kurskompendium. 2002.
- [16] Wadsö, L., Winnefield, F., Riding, K. och Sandberg, P. "Calorimetry". I: *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials*. CRC Press, 2016, s. 37–74.
- [17] Wadsö, L. "Operational issues in isothermal calorimetry". I: *Cement and Concrete Research* 40.7 (2010), s. 1129–1137. ISSN: 0008-8846. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.03.017>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884610000864>.
- [18] Wadsö, L. "Applications of an eight-channel isothermal conduction calorimeter for cement hydration studies". I: *Cement International* 5 (2005), s. 94–101.
- [19] Nilsson, L-O. *Methods of Measuring Moisture in Building Materials and Structures: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 248-MMB*. Cham: Springer Cham, 2018.
- [20] Schellenberg, R. *The Trouble With Humidity: The Hidden Challenge of RH Calibration*. Tekn. rapport. Richmond, Kanada: Veriteq Instruments Inc, 2002. URL: <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/lsh-Trouble-with-Humidity.pdf>.

- [21] Gao, F., Ji, Y., Xu, Z., Zhang, Z. och Zhou, Y. "Determinant factor for dynamic equilibrium of transformation between vapor in atmosphere and water in concrete". I: *Construction and Building Materials* 261 (2020), s. 120526. issn: 0950-0618. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120526>.
- [22] Ikumi, T., Cairó, I., Groenveld, J., Aguado, A. och Fuente, A. de la. "Embedded Wireless Sensor for In Situ Concrete Internal Relative Humidity Monitoring". I: *Sensors* 25.6 (2024), s. 1756. doi: 10.3390/s24061756.
- [23] Swedish Standards Institute. *Svensk standard SS-EN 196-1:2016*. Tekn. rapport SS-EN 196-1. Stockholm: Swedish Institute for Standards, 2016.
- [24] Swedish Standards Institute. *Svensk standard SS-EN 197-1:2011*. Tekn. rapport SS-EN 197-1:2011. Stockholm: Swedish Institute for Standards, 2011.
- [25] Normensand GmbH. *CEN Standard Sand EN 196-1*. 2026. URL: <https://www.normensand.de/en/home/> (hämtad 2026-05-26).
- [26] Swedish Standards Institute. *Svensk standard SS-EN 12350-2:2019*. Tekn. rapport SS-EN 12350-2. Stockholm: Swedish Institute for Standards, 2019.
- [27] Swedish Standards Institute. *Svensk standard SS-EN 12350-6:2019*. Tekn. rapport SS-EN 12350-6. Stockholm: Swedish Institute for Standards, 2019.
- [28] Swedish Standards Institute. *Svensk standard SS-EN 12350-7:2019*. Tekn. rapport SS-EN 12350-7. Stockholm: Swedish Institute for Standards, 2019.
- [29] Rådet för Byggkompetens. *Fuktmätning i betong och golvavjämning*. Version 7. Stockholm: RBK, 2023.
- [30] Rådet för Byggkompetens. *Rutin för borrhning av mätthål*. Version 7. Stockholm: RBK, 2023.
- [31] Rådet för Byggkompetens. *Rutin för RF-mätning i borrhål Vaisala HMP40S*. Version 7. Stockholm: RBK, 2023.
- [32] Swedish Standards Institute. *Svensk standard SS-EN 12390-3:2019*. Tekn. rapport SS-EN 12390-3. Stockholm: Swedish Institute for Standards, 2019.

Bilaga 1

Nedan redovisas manuellt avlästa värden för RF och temperatur för respektive prob och provkropp. I bilaga tabell 1 redovisas data från de tre V-proberna i provkropp B, det vill säga sensor 1, 2 och 3. I bilaga tabell 2 redovisas data från de tre V-proberna i provkropp B+VPI, det vill säga sensor 4, 5 och 6, samt från sensorn som var placerad i klimatskåpet och representerar omgivande klimat. I båda tabellerna anges tid som datum och klockslag för respektive avläsning. Samtliga mätningar är utförda år 2026.

Bilaga Tabell 1: Manuellt avlästa värden för RF och temperatur med V-prob för provkropp B.

Tid	1		2		3	
	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)
03-06 11:10	90,7	20,3	89,8	20,3	90,3	20,3
03-09 14:20	90,4	20,3	89,7	20,3	90,0	20,3
03-10 11:45	90,3	20,3	89,7	20,3	89,9	20,3
03-11 11:30	90,3	20,3	89,7	20,3	89,8	20,3
03-12 11:45	90,2	20,3	89,6	20,3	89,7	20,3
03-13 11:20	90,1	20,3	89,6	20,3	89,6	20,3
03-16 12:00	89,8	20,3	89,3	20,3	89,2	20,3
03-17 08:45	89,7	20,3	89,3	20,3	89,1	20,3
03-17 13:50	90,1	19,7	89,5	19,8	89,5	19,7
03-18 08:30	89,4	13,0	88,6	13,1	88,5	13,0
03-18 10:00	89,3	12,5	88,5	12,6	88,4	12,4
03-18 11:10	89,0	12,1	88,3	12,2	88,2	12,1
03-18 12:00	88,9	12,0	88,2	12,0	88,1	11,9
03-18 13:10	88,8	11,7	88,1	11,8	87,9	11,7
03-18 14:10	88,6	11,5	88,0	11,6	87,8	11,6
03-18 15:15	88,5	11,4	88,0	11,4	87,7	11,4
03-19 09:30	88,1	10,6	87,7	10,6	87,3	10,6
03-19 11:00	88,1	10,6	87,7	10,6	87,3	10,6
03-19 15:30	88,1	10,6	87,7	10,6	87,3	10,6
03-20 09:40	88,0	10,6	87,7	10,6	87,3	10,6
03-23 09:40	87,8	10,6	87,4	10,6	87,0	10,6
03-23 11:55	87,8	10,6	87,5	10,6	87,0	10,6
03-23 15:20	87,6	10,7	87,3	10,8	86,9	10,7
03-24 08:25	88,0	16,1	88,1	16,0	87,5	16,1
03-24 09:25	88,2	16,4	88,2	16,5	87,6	16,5
03-24 11:45	88,4	17,4	88,4	17,3	87,9	17,4
03-24 12:50	88,5	17,8	88,5	17,8	88,0	17,8
03-24 15:00	88,9	18,6	88,8	18,6	88,4	18,6
03-25 09:25	90,3	20,3	89,9	20,3	89,7	20,3
03-25 12:45	90,3	20,3	89,9	20,3	89,7	20,3
03-27 09:45	90,1	20,4	89,7	20,3	89,4	20,3
03-30 08:30	89,7	20,4	89,3	20,4	89,0	20,3
03-30 09:30	89,7	20,4	89,2	20,4	88,9	20,4

03-30 13:00	89,3	20,9	89,0	20,9	88,6	20,9
03-30 16:15	89,3	21,8	89,1	21,8	88,7	21,8
03-31 08:30	90,9	27,8	90,7	27,8	90,3	27,8
03-31 10:30	91,2	28,4	91,0	28,4	90,7	28,4
03-31 12:40	91,6	28,9	91,3	28,9	91,1	28,9
03-31 15:15	92,0	29,3	91,5	29,3	91,5	29,3
04-01 09:30	92,8	30,0	92,1	30,0	92,2	30,0
04-01 13:00	92,8	30,1	92,2	30,1	92,2	30,0
04-01 15:15	92,8	30,1	92,1	30,1	92,2	30,0
04-07 08:30	92,5	30,0	92,0	30,1	91,8	30,0
04-07 10:00	92,6	30,0	92,0	30,0	91,9	29,9
04-07 11:50	92,8	29,7	92,1	29,7	92,0	29,6
04-07 15:50	92,8	29,5	92,1	29,5	92,0	29,4
04-07 16:00	92,8	28,6	92,0	28,7	92,0	28,6
04-08 08:30	91,3	22,6	90,5	22,7	90,3	22,5
04-08 10:15	90,9	22,0	91,1	22,1	89,9	21,9
04-08 12:40	90,4	21,4	89,8	21,5	89,4	21,4
04-08 15:00	90,1	21,0	89,5	21,1	89,2	21,0
04-09 09:20	89,2	20,4	88,9	20,4	88,4	20,3
04-09 13:00	89,2	20,4	88,9	20,4	88,4	20,3
04-10 09:15	88,9	20,4	88,7	20,4	88,1	20,3
04-10 14:50	88,9	20,4	88,6	20,3	88,1	20,3
04-13 08:30	88,3	20,4	88,1	20,3	87,6	20,3
04-13 09:20	90,5	19,0	89,7	19,2	89,7	19,1
04-13 09:50	91,0	18,3	89,9	18,6	90,1	18,3
04-13 10:30	91,0	17,5	89,7	17,6	90,0	17,5
04-13 11:10	90,7	16,9	89,3	16,9	89,6	16,7
04-13 12:00	90,3	16,1	88,9	16,2	89,1	15,9
04-13 12:50	89,7	15,3	88,5	15,4	88,5	15,2
04-13 13:45	89,2	14,7	88,0	14,8	88,0	14,8
04-13 14:55	88,6	13,9	87,6	14,0	87,5	13,8
04-13 15:50	88,2	13,4	87,3	13,5	87,1	13,4
04-14 09:20	86,0	10,7	85,8	10,8	85,1	10,7
04-14 11:15	86,0	10,7	85,8	10,7	85,1	10,7
04-14 13:30	85,9	10,7	85,8	10,7	85,1	10,6
04-15 09:20	85,8	10,5	85,7	10,6	85,0	10,5
04-17 08:40	85,6	10,5	85,5	10,6	84,8	10,6
04-20 09:50	85,4	10,6	85,2	10,6	84,5	10,6
04-21 08:30	85,3	10,6	85,1	10,6	84,4	10,6
04-21 09:00	83,6	11,5	83,9	11,4	82,7	11,4
04-21 09:30	82,4	12,3	83,1	12,2	81,8	12,3
04-21 09:50	82,4	12,8	83,1	12,7	81,8	12,8
04-21 10:20	82,6	13,4	83,4	13,4	82,0	13,5
04-21 10:55	83,0	14,1	83,8	14,1	82,5	14,2
04-21 11:30	83,4	14,7	84,2	14,6	82,9	14,8
04-21 12:15	84,0	15,4	84,7	15,4	83,5	15,6
04-21 13:05	84,5	16,1	85,1	16,0	84,0	16,2
04-21 14:00	85,0	16,7	85,5	16,7	84,5	16,8

04-21 15:00	85,5	17,2	85,9	17,3	84,9	17,3
04-22 08:30	88,0	20,2	87,7	20,2	87,2	20,2
04-22 09:30	88,0	20,2	87,7	20,3	87,3	20,2
04-22 10:30	88,0	20,2	87,7	20,3	87,3	20,2
04-22 11:40	88,1	20,3	87,8	20,3	87,3	20,3
04-22 16:00	88,1	20,3	87,8	20,3	87,3	20,3
04-23 09:30	88,1	20,3	87,7	20,3	87,3	20,3
04-23 15:40	88,0	20,4	87,7	20,4	87,2	20,3
04-27 08:30	87,6	20,4	87,3	20,4	86,7	20,4

Bilaga Tabell 2: Manuellt avlästa värden för RF och temperatur med V-prob för provkropp B+VPI samt det omgivande klimatet.

Tid	4		5		6		Omgivande klimat	
	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)	RF (%)	T (°C)
03-06 11:10	90,8	20,3	91,1	20,3	91,1	20,3	61,8	20,4
03-09 14:20	90,5	20,3	90,8	20,3	90,9	20,3	62,2	20,4
03-10 11:45	90,4	20,3	90,6	20,3	90,8	20,3	62,3	20,4
03-11 11:30	90,2	20,3	90,5	20,3	90,7	20,3	62,0	20,4
03-12 11:45	90,1	20,3	90,4	20,3	90,5	20,3	62,4	20,4
03-13 11:20	90,0	20,3	90,3	20,3	90,4	20,3	61,5	20,4
03-16 12:00	89,6	20,3	89,8	20,3	90,0	20,3	62,3	20,4
03-17 08:45	89,5	20,3	89,8	20,3	89,9	20,3	62,3	20,4
03-17 13:50	89,8	19,7	90,1	19,7	90,2	19,7	60,8	18,8
03-18 08:30	89,2	13,0	89,5	13,0	89,6	12,9	61,2	11,2
03-18 10:00	89,1	12,5	89,4	12,5	89,5	12,3	61,3	10,9
03-18 11:10	88,9	12,1	89,1	12,2	89,2	12,0	60,3	10,9
03-18 12:00	88,8	11,9	89,0	12,0	89,1	11,9	60,4	10,8
03-18 13:10	88,6	11,7	88,9	11,7	89,0	11,7	60,4	10,8
03-18 14:10	88,5	11,5	88,7	11,6	88,9	11,5	60,8	10,9
03-18 15:15	88,4	11,4	88,7	11,5	88,8	11,4	60,3	10,8
03-19 09:30	88,0	10,6	88,3	10,6	88,4	10,6	62,7	10,7
03-19 11:00	88,0	10,6	88,3	10,6	88,4	10,6	63,1	10,6
03-19 15:30	88,0	10,6	88,3	10,6	88,4	10,6	64,0	10,7
03-20 09:40	87,9	10,5	88,2	10,6	88,4	10,6	63,8	10,6
03-23 09:40	87,6	10,5	87,9	10,6	88,0	10,6	72,0	10,6
03-23 11:55	87,6	10,6	87,9	10,6	88,0	10,6	62,5	10,7
03-23 15:20	87,5	10,7	87,8	10,8	87,8	10,7	65,7	11,2
03-24 08:25	87,9	16,0	88,1	16,0	88,3	16,1	63,2	18,0
03-24 09:25	87,9	16,3	88,2	16,4	88,3	16,5	61,8	18,4
03-24 11:45	86,2	17,4	88,4	17,3	88,5	17,4	63,2	19,4
03-24 12:50	88,3	17,7	88,5	17,8	88,7	17,9	63,8	19,8
03-24 15:00	88,6	18,5	88,8	18,6	89,0	18,7	62,3	20,3
03-25 09:25	89,8	20,2	90,1	20,3	90,1	20,3	62,4	20,4
03-25 12:45	89,8	20,3	90,1	20,3	90,1	20,3	62,5	20,4
03-27 09:45	89,5	20,3	89,8	20,3	89,8	20,3	62,4	20,4
03-30 08:30	89,0	20,3	89,2	20,3	89,3	20,3	62,2	20,4
03-30 09:30	88,9	20,4	89,2	20,4	89,3	20,4	62,1	20,7
03-30 13:00	88,7	20,9	88,9	20,9	88,9	20,9	62,3	22,1
03-30 16:15	88,7	21,7	88,9	21,7	89,0	21,8	63,1	23,3
03-31 08:30	90,2	27,7	90,4	27,8	90,4	27,8	63,9	29,9
03-31 10:30	90,5	28,3	90,8	28,4	90,8	28,5	63,5	30,0
03-31 12:40	90,9	28,8	91,2	28,9	91,2	29,9	63,7	30,1
03-31 15:15	91,3	29,3	91,5	29,2	91,5	29,3	61,6	30,1
04-01 09:30	92,0	30,0	92,2	30,0	92,2	29,9	62,4	30,2
04-01 13:00	92,0	30,0	92,2	30,0	92,3	30,0	62,7	30,2
04-01 15:15	92,0	30,0	92,2	30,0	92,2	30,0	62,8	30,2
04-07 08:30	91,3	30,0	91,4	30,0	91,6	30,0	62,9	30,2

04-07 10:00	91,4	29,9	91,5	29,9	91,7	29,9	61,5	29,7
04-07 11:50	91,5	29,6	91,6	29,6	91,8	29,6	62,3	29,0
04-07 15:50	91,5	29,4	91,7	29,5	91,8	29,5	61,6	28,6
04-07 16:00	91,4	28,6	91,6	28,6	91,7	28,5	61,5	27,4
04-08 08:30	89,9	22,6	90,0	22,6	90,2	22,5	60,7	20,7
04-08 10:15	89,5	22,0	89,6	22,0	89,8	21,9	61,3	20,6
04-08 12:40	89,1	21,4	89,2	21,4	89,4	21,3	61,8	20,5
04-08 15:00	88,8	21,0	88,9	21,1	89,1	21,0	61,8	20,5
04-09 09:20	88,1	20,4	88,2	20,3	88,4	20,4	61,6	20,4
04-09 13:00	88,0	20,4	88,2	20,4	88,3	20,4	62,2	20,4
04-10 09:15	87,8	20,3	88,0	20,3	88,1	20,3	62,2	20,4
04-10 14:50	87,7	20,3	87,9	20,3	88,1	20,3	62,0	20,4
04-13 08:30	87,3	20,3	87,4	20,3	87,6	20,3	62,2	20,4
04-13 09:20	89,5	19,0	89,8	19,1	89,8	18,9	53,6	12,1
04-13 09:50	89,8	18,4	90,1	18,4	90,1	18,2	55,8	11,7
04-13 10:30	89,6	17,6	89,9	17,6	90,0	17,3	58,8	11,4
04-13 11:10	89,3	16,8	89,5	16,4	89,6	16,5	60,9	11,3
04-13 12:00	88,8	16,1	89,0	16,2	89,0	15,9	57,3	11,2
04-13 12:50	88,4	15,3	88,6	15,4	88,6	15,1	60,8	11,1
04-13 13:45	87,9	14,7	88,1	14,7	88,2	14,4	61,7	11,1
04-13 14:55	87,4	13,9	87,6	14,0	87,7	13,7	59,0	11,0
04-13 15:50	87,1	13,4	87,2	13,5	87,3	13,3	61,4	11,0
04-14 09:20	85,4	10,7	85,5	10,7	85,7	10,7	58,0	10,7
04-14 11:15	85,4	10,7	85,5	10,7	85,7	10,7	58,5	10,7
04-14 13:30	85,3	10,7	85,5	10,7	85,6	10,6	63,2	10,7
04-15 09:20	85,3	10,6	85,5	10,6	85,6	10,6	64,0	10,7
04-17 08:40	85,1	10,5	85,3	10,6	85,4	10,6	59,8	10,7
04-20 09:50	84,9	10,6	85,1	10,6	85,2	10,6	58,1	10,7
04-21 08:30	84,8	10,5	85,0	10,6	85,1	10,6	58,7	10,7
04-21 09:00	83,0	11,5	83,1	11,5	83,2	11,6	71,0	18,2
04-21 09:30	82,2	12,2	82,2	12,2	82,4	12,4	62,3	19,3
04-21 09:50	82,3	12,6	82,2	12,7	82,5	12,9	66,0	19,4
04-21 10:20	82,4	13,3	82,4	13,3	82,7	13,6	64,2	19,6
04-21 10:55	82,8	13,9	82,8	14,0	83,1	14,3	62,2	19,8
04-21 11:30	83,2	14,5	83,2	14,6	83,5	14,9	62,2	19,9
04-21 12:15	83,7	15,2	83,8	15,3	84,0	15,6	64,9	19,9
04-21 13:05	84,1	15,9	84,2	15,9	84,5	16,3	63,8	20,8
04-21 14:00	84,6	16,6	84,7	16,6	85,0	16,8	63,2	20,0
04-21 15:00	85,0	17,1	85,2	17,2	85,4	17,4	62,0	20,1
04-22 08:30	87,2	20,1	87,4	20,2	87,5	20,2	61,9	20,4
04-22 09:30	87,2	20,2	87,3	20,2	87,4	20,2	62,3	20,4
04-22 10:30	87,2	20,2	87,4	20,3	87,5	20,3	61,2	20,4
04-22 11:40	87,2	20,2	87,4	20,3	87,5	20,3	62,4	20,4
04-22 16:00	87,2	20,3	87,4	20,3	87,5	20,3	62,4	20,4
04-23 09:30	87,2	20,3	87,3	20,3	87,4	20,3	62,2	20,4
04-23 15:40	87,1	20,4	87,3	20,4	87,4	20,4	62,3	20,4
04-27 08:30	86,5	20,5	86,6	20,3	86,8	20,3	62,6	20,4

Bilaga 2

Nedan redovisas manuellt avlästa värden för RF från respektive bruksprovsrecept med T-prob. Tid avser tiden från gjutning.

Bilaga Tabell 1: RF-värden över tid för respektive mätpunkt.

	1.1	1.2	2	3	4	5.1	5.2
Tid (d)	20 %	20 %	23,8 %	27,3 %	30,4 %	33,3 %	33,3 %
0	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9
18	99.9	97.9	99.9	99.5	98.6	99.9	99.9
19	99.9	97.9	99.9	99.5	98.6	99.9	99.9
20	99.9	97.6	99.9	99	98	99.9	99.9
25	98.9	96.8	99.6	97.9	96.1	99.7	99.9
26	98.7	96.6	99.5	97.6	95.8	99.5	99.9
28	98.5	96.5	99.4	97.4	95.3	99.3	99.6
31	97.9	96.1	99.0	96.8	94.9	98.8	99.0
32	97.7	95.9	98.9	96.5	94.7	98.6	98.9
33	97.6	95.9	98.8	96.3	94.6	98.5	98.7
39	96.7	95.2	98.2	95.2	93.1	97.6	97.9
40	96.4	94.9	97.8	94.7	92.8	97.3	97.5
41	96,3	94,9	97,9	94,7	92,7	97,2	97,5
45	95,8	94,5	97,6	94	91,9	96,7	96,9
47	95,5	94,2	97,3	9,6	91,4	96,3	96,4
49	95,4	94,3	97,3	93,4	91,3	96,3	96,3