

PROJEKTNR. 14112

Hållfasthetsutveckling och uttorkning av betong

Test av mätmetodik med sensorer i flera nivåer

Luping Tang, Liming Huang, Ingemar Löfgren, Nilla Olsson
Chalmers, Thomas Concrete Group, NCC

2024-04-30



Förord

Detta projekt har genomförts av NCC Sverige AB i samarbete med Chalmers, och Thomas Concrete Group under tiden från maj 2022 till april 2024. Det finansierades av Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, SBUF (SBUF projekt 14112) och de medverkande organisationerna. Projektledare var Nilla Olsson, NCC Sverige AB. Huvudförfattare till rapporten var Luping Tang, Chalmers.

Projektets arbetsgrupp har bestått av följande personer:

Luping Tang, Chalmers
Liming Huang, Chalmers
Ingemar Löfgren, Thomas Concrete Group
Nilla Olsson, NCC

Referensgruppen har sammanträtt vid tre tillfällen; 2022-05-25, 2023-02-15 och 2024-04-23. Den har bestått av följande personer:

Anders Anderberg, Weber
Peter Brander, Boverket
Jörgen Grantén, FuktCom Lund AB
Sture Lindmark, FuktCom Lund AB
Anders Selander, Cementsa AB
Håkan Stenström, Skanska Sverige AB
Samt i projektets slutskede: Oskar Linderöth, Swerock, PEAB AB

Projektgruppen vill tacka SBUF, Chalmers, Thomas Concrete Group samt NCC Sverige AB för projektets finansiering. Vi vill också tacka alla deltagare i referensgruppen för värdefulla inspel och stöd under projektets gång.

Göteborg/Malmö, maj 2024

Luping Tang, Liming Huang, Ingemar Löfgren, Nilla Olsson

Sammanfattning

Krav på minskade CO₂-utsläpp driver idag utvecklingen av betong och bindemedel. Denna utveckling är nödvändig och ger byggbranschen möjligheter att minska klimatbelastningen. Det större utbudet av bindemedel ger dock nya förutsättningar i byggproduktion och två områden med tydliga utmaningar är uppskattning av hållfasthetsutveckling direkt efter gjutning och fuktnivå under uttorkningstiden.

I detta projekt har en metodik med sensorer i flera nivåer testats för övervakning av hållfasthetsutveckling och uttorkning i betongkonstruktioner. Metodiken är baserad på konduktivitetmätningar. En prototyp med givarenhet och kontrollenhet för konduktivitetmätningar har utvecklats och den har sedan testats i laboratorieförsök och fältförsök. Resultaten från försöken har kompletterats med konventionella metoder för bestämning av betongens tillstyvnande, hållfasthetstillväxt och uttorkning.

I laboratorieförsöken har sju typer av betong med olika bindemedelssammansättning använts. Resultaten visar att färsk betongs tillstyvnadstid kan uppskattas med en kvadratkorrelationskoefficient 0,96 till standardmetoden för penetrationsmotstånd. Betongens tryckhållfasthetsutveckling kan uppskattas med en kvadratkorrelationskoefficient 0,992 till den enligt standard uppmätta tryckhållfastheten. Betongens kvarstående fukt under uttorkning kan uppskattas med en kvadratkorrelationskoefficient 0,999 till den klassiska vikt förlustmätningen.

Resultaten visar att den metodiken fungerar väl för att bedöma hållfasthetstillväxt och uttorkning hos betongen. Det kvarstår vissa frågetecken för jämförelse mot relativ fuktighet, vilket för att metodiken behöver vidare utveckling för att kunna fungera som verifierande slutmätning. Dock fungerar metodiken väl för att följa uttorkningsförloppet under byggproduktion. Särskilt värdefullt är möjligheten att se nederbördens effekt på fuktnivån under den första tiden efter gjutning, vilket inte kan följas med dagens mätmetoder.

I projektet testades metodiken på betong, men det är troligen även möjligt att använda den på andra cementbaserade material, till exempel avjämningsmassa. Metodikens förmåga att identifiera ändringar i materialet gör även att den skulle kunna användas för beständighetsövervakning. Vidare arbete behövs för att utveckla och testa möjligheterna för dessa applikationer.

Sammanfattningsvis illustrerar projektet att metodiken med konduktivitetmätningar i betong har en stor potential att stötta entreprenören vid betongproduktion. Mätningarna är relativt enkla att göra, men behöver bearbetas för att utgöra beslutsunderlag i byggproduktion. För att få ut bra beslutsunderlag behövs kompletterande information om betongen och bearbetning av mätresultaten. Med dessa komplement är potentialen i denna metodik stor!

Sammantaget är det nödvändigt att utveckla mer robusta och bättre mätmetoder för att kunna följa och lättare uppskatta tidig hållfasthetsutveckling och fuktnivå i betongen.

Innehållsförteckning

1	Inledning.....	65
1.1	Bakgrund.....	65
1.2	Syfte.....	76
1.3	Avgränsningar.....	76
2	Metod.....	76
2.1	Prototyp mätutrustning.....	76
2.2	Laboratorieförsök.....	87
2.3	Fältförsök.....	1140
3	Resultat från laboratorieförsök.....	1244
3.1	Konduktivitetskurvor.....	1244
3.2	Temperaturkurvor.....	1342
3.3	Ultraljudshastighetskurvor.....	1443
3.4	Betongens tillstyvnadstid.....	1443
3.5	Betongens hållfasthetsutveckling.....	1645
3.6	Betongens uttorkning.....	2049
4	Resultat från fältförsöket.....	2726
4.1	Konduktivitets- och temperaturkurvor.....	2726
4.2	Tryckhållfasthet och fukthalt.....	3029
4.3	Uttorkningstillstånd.....	3234
4.4	Mätresultaten från WIISTE SH1-WAN.....	3433
5	Slutsats.....	3534
	Referenser.....	3634

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Krav på minskade CO₂-utsläpp driver idag starkt utvecklingen av betong och bindemedel. Denna utveckling är nödvändig och ger byggbranschen möjligheter att minska klimatbelastningen. Det större utbudet av bindemedel ger dock vissa svårigheter i byggproduktion och två områden med tydliga utmaningar är uppskattning av hållfasthetsutveckling direkt efter gjutning och fuktnivå under uttorkningstiden.

Sverige har dessutom ofta hög klimatpåverkan från just bjälklagsbetong. Detta beror på att det i Sverige används väldigt höga hållfasthetsklasser i bjälklag för att klara uttorkningskraven. Ofta har bjälklagsbetong högre hållfasthet och cementhalt än betong till broar, vilket mildt uttryckt är orimligt när klimatpåverkan från byggandet behöver minska. En del av problematiken är osäkerheten i dagens mätmetoder. Därför kan säkrare mätmetoder möjliggöra effektivare byggproduktion och samtidigt ge minskad cementanvändning och klimatpåverkan. Vi ser ett tydligt behov av utveckling av nya metoder för fuktmätning i betong.

För att säkerställa en fuktsäker konstruktion mäts fuktnivån i betong innan avjämningsmassa och golv läggs. Fuktnivån i betong bestäms idag genom mätning av relativ fuktighet (RF). Nackdelen är att vi har stor mätosäkerhet då flera parameter påverkar mätresultatet (t.ex. temperatur, hydratationsprocess, porstruktur och kemisk sammansättning i porlösningen) [1-3]. En annan nackdel är att det inte heller går att följa uttorkningsförloppet under en längre tid då fuktsensorerna påverkas av kondensation och betongens alkalitet [4, 5]. Larsson [5] lyfte nyligen svårigheterna med att mäta RF i betong med ingjutna sensorer men också fördelarna med att kunna följa utvecklingen av fuktnivån över längre tider. Det konstateras att RF-mätning i betong är svårt p.g.a. att betongen lätt påverkas givarna samtidigt som mätresultatet lätt påverkas av mätförfarandet. Felaktiga mätresultat kan lätt leda till ökad osäkerhet och förvirring. Det har även lyfts frågetecken kring om det verkligen är den relativa fuktigheten eller fukthalten i kombination med fukttransportförmågan i materialet som är avgörande för risken för skada, t.ex. i projektet SBUF 13560 konstateras att kunskapen om hur jontransport sker i cementbaserade system vid olika fuktillstånd är bristfällig. Sammantaget behöver vi se över möjligheterna att använda andra mätmetoder eller att komplettera RF-mätningar med andra mer robusta mätmetoder.

Utvecklingen mot minskad klimatpåverkan ger större variation av sammansättning hos betong. Dessa variationer avspeglas i hållfasthetsutvecklingen, framför allt den tidiga hållfasthetsutvecklingen, och strukturutveckling (porositet) vilket är svårt för dagens metoder att återge korrekt. Sammantaget är det nödvändigt att utveckla mer robusta och bättre mätmetoder för att kunna följa och lättare uppskatta tidig hållfasthetsutveckling och fuktnivå i betongen.

1.2 Syfte

Syftet med detta projekt är att testa en metodik med sensorer i flera nivåer för övervakning av hållfasthetsutveckling och uttorkning i betongkonstruktioner. De specifika målen är att:

Mål 1: Undersöka förhållandet mellan hållfasthet och temperatur/konduktivitet. Utföra provningar i byggproduktion för verifiering och jämförelse av den nya mätmetodiken med vanlig mätmetod för hållfasthet.

Mål 2: Undersöka förhållandet mellan fukthalt och temperatur/konduktivitet. Utföra provningar i byggproduktion för verifiering och jämförelse av den nya mätmetodiken med vanlig mätmetod för uttorkning.

1.3 Avgränsningar

Detta projekt fokuserades på utveckling av en ny mätmetod baserad på betongens elektriska konduktivitet för övervakning av hållfasthetsutveckling hos yngre betong och fuktillstånd i betong under uttorkning. Betongens ålder var begränsad till ca 200 dygn i både labb- och fältförsöken. Dessutom har inverkan av andra ledande föremål såsom armeringsjärn eller metallgjutform på mätning av elektrisk konduktivitet inte tagits till hänsyn.

I projektarbetet har "förångningsbar fukt" definierats som fuktmängden mellan ett naturligt mättnadstillstånd under ca 95 % RF och ett uttorkat tillstånd med en betongskiva under 40 °C i 7 dygn motsvarande en fukthalt under ca 10 % RF.

2 Metod

2.1 Prototyp mätutrustning

Mätutrustningen (se figur 1) är självbyggd och inkluderar tre delar:

- 1) Styrenhet baserad på ATMega328 mikrokontroller
- 2) Datainsamlingsenhet bestående av datalogger CR1000X och multiplexier AM16/32 (produkter av Campbell Scientific)
- 3) Givarenhet bestående av 4 × 10 stycken rostfria stålskruvar (M2×12) för Wenners resistivitetsmätning och 8 stycken termistor (NTC 10 kΩ@25 °C, termisk koefficient -3,75 %/K, tolerans 1 %) för temperaturmätning

Genom styrenheten kan man ställa in en strömstyrka mellan 1 μA och 200 μA för båda positiv och negativ pulspolarisering (0,2 sekunder) med en tidsintervall mellan 1 minut och 24 timmar. I vårt praktiska försök använde vi 200 μA och 5 minuter för betong yngre än 3 dygn, och sedan minskade strömstyrka och tidsintervall förlängdes enligt betongens motståndstillstånd.

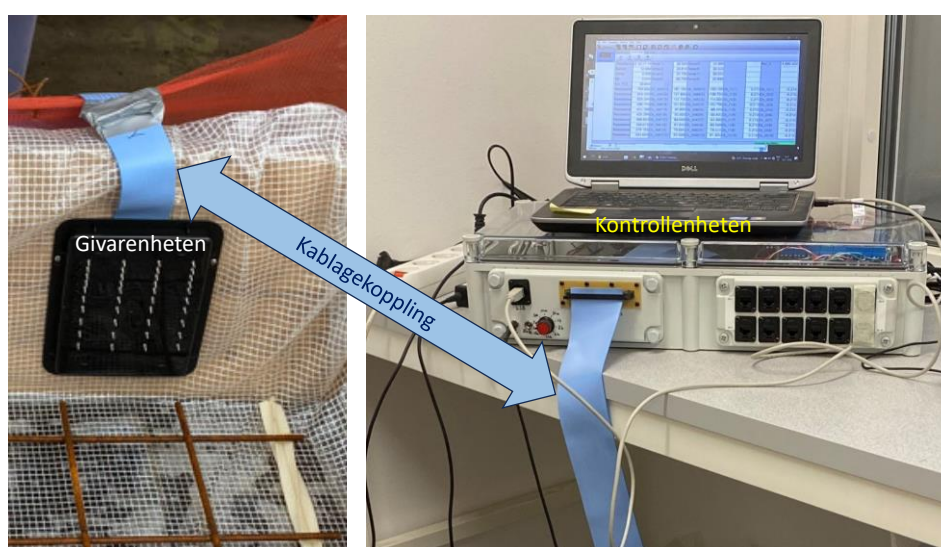
Datainsamlingsenheten tillåter förvaring av mätdata för 10 kanel-polariseringsströmstyrka och -responsspänning samt 8 kanel-temperatur.

Givarenheten har ett avstånd av 40 mm mellan varje 4-punktsenhet på djupen 10, 20, 30, 40, 50, 65, 80, 100, 120 och 140 mm från betongsgjutytan. 8 termistorer har placerats på djupen 10, 20, 30, 40, 50, 65, 80 och 100 mm.

En 50-tråds kabel har använts för koppling mellan styrenheten och givarenheten.

Mätrustinngen har kalibrerats med kaliumkloridlösningarna med koncentration 0,0001, 0,001, 0,002, 0,01 och 0,05 mol/L samt temperatur mellan 2 och 68 °C.

Detalj mätmetodik har beskrivits i artikel [6].



Figur 1: Prototyp mätrustinng för konduktivitet.

2.2 Laboratorieförsök

2.2.1 Betongtyp

Sju typer av betong har provats under labbmiljön. Betongsammansättningarna listas i tabell 1. Betongtyper C145 och C255 blandades i Chalmers labb medan andra typer blandades hos C-lab, TCG.

Tabell 2: Betongsammansättning

	C045	C145	C245	C255	C338	C345	C355
Cement (SH Slite, Cementsa)	430	286	280	247	242	210	180
Flygaska (Cementsa)		154					
Slagg (Bremen, Holcim)			150,8	133	172,9	150	128,6
Kalkstenpulver Limus 15 (Nordkalk)					79	68,6	58,8
Grus 0/4, Eurosand	779		774,2		836,4	773,7	701
Grus 0/6, Skanska	278,2		276,5		179,2	276,3	375,5
Grus 0/8, Naturgrus		1657		1705			
Sten 4/8, Vikan, Skanska	702,9		698,5		716,9	698,1	711,5
Glenium 51/18, BASF	3,311	2,288	3,012		4,017	2,126	0,958
Vatten	193,5	198	193,8	209	186,7	192,9	202

2.2.2 Konduktivitetmätning

Efter blandning gjuts ca 8 liter betong i ett plastkärl med en monterad givarenhet till den markerade nivån. Kärlets vikt registrerades före respektive efter gjutning (för att veta hur mycket färsk betong i kärlet). Kärlet med färsk betong förslutes med lock och tejp för att undvika vattenavdunstning. Givarenheten kopplades till mätutrustningen och mätningen startades med 200 μ A polariseringspuls och 5 min tidsintervall tills 3 dygn. Sedan transporterades betongkärlet till Chalmers och förvarades i labbet vid lufttemperatur ca 22 °C och naturlig RF. Konduktivitetmätningen fortsatte med 200 μ A polariseringspuls och 1 timme tidsintervall tills 7 dygn. Kärlets förslutningsmaterial togs bort och vikten registrerades (för att veta hur mycket vatten har försvunnit efter gjutning). Betongsytan rengjordes och vikten registrerades igen (för att notera betongvikten före torkning). Gränssytan mellan betong och plastkärl/-givarenhet förslutes med silikontätningssmassan. Vikten registrerades igen (för att veta hur mycket tätningsmassan har använts i gränssytan). Efteråt betongen i kärlet med öppnad topp torkades i labbrummet. Betongens konduktivitet och vikt mätes veckovis tills torkning i ca 6 månader. En viss mängd tätningsmassan torkades också i samma labbrummet och dess vikt parallellt mätes. Den uttorkade fuktmängden ur betong bestämdes från betongens viktminskning efter subtraktion av tätningsmassans viktminskning.

2.2.3 Andra mätningar

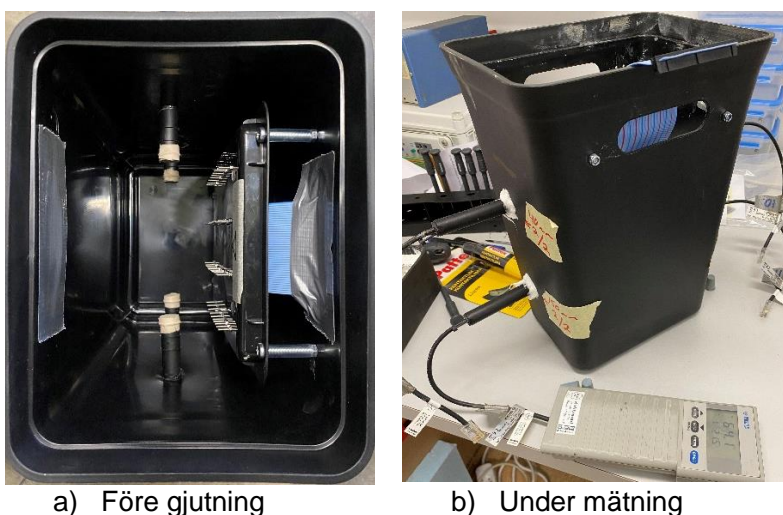
Parallell till konduktivitetmätning har betongens färska och hårdnade egenskaper mätts upp med olika metoder, inklusive

- 1) Ultraljudpulshastighet som en indikation av färsk betongs härdningsprocess, mätt med IP-8 Ultraljudmätsystemet (Ultratest GmbH) under frekvens 25 kHz och tidsintervall mellan 2 och 5 minuter på bruksdelen av betongblandning (genom en 4 mm sikt).
- 2) Penetrationsmotstånd som ett mått av betongens tillstyvnadstid, uppmätt av en konventionell standard (ASTM C 403/C 403 M – 05) på bruksdelen av betongblandning (genom en 4 mm sikt).

- 3) Tryckhållfasthet hos betong efter 0,5, 1, 3, 7, 14 och 28 dygn. Betongkuber 150 mm har använts på C-lab medan 100 mm har använts på Chalmers labb. Resultaten från 100 mm kuber har konverterats till 150 mm med en dimensionsfaktor 0,93.

2.2.4 Konventionell RF-mätning

Konventionell RF-mätning med Vaisalas RF-givare HMP-44 och mätare HMI-11 har uppförts på betongkärnen C045, C145, C338, C345 och C355. Före betonggjutning har 4 stycken plaströr monterats på två sidor av varje kärn (se figur 2) med djup 40 mm respektive 150 mm från betongens toppyta. Rörets inner ände förslutes av fuktpermeabel tejp och yttre ände tätades med gummipropp. Gränssytorna mellan rör och kärn tätades med silikontätningssmassan. Vid RF-mätning efter tillräcklig uttorkningstid satt RF-givare in i röret och tätades givarens kabel med en speciell gummipropp. RF-värde mättes efter 3-4 dygn. RF-givarna var kalibrerade mot kända RF med mättade saltlösningar.



Figur 2: Kärn monterad med plaströr för RF-mätning.

2.2.5 Mätning av fukthalt i betong

Efter uttorkning i över 6 månader togs en betongskiva med tjocklek ca 15-20 mm ut ur varje betongkärn från en nivå ca 20 mm till undersidan med en vattenkyld diamantsåg. Betongskivan rengjordes med en borsta och ytan torkades med en fuktig wettexduk omedelbart efter sågning. Sedan registrerades betongskivans vikt som m_{natur} , där "natur" betyder "ett naturligt mättnadstillstånd". Betongskivan vakuummätades med vatten i 5 dygn och dess vikt registrerades som m_{SSD} (SSD – saturated surface dry). Betongskivans volym bestämdes genom vägning i luft respektive i vatten. Efteråt torkades betongskivan ut i en vakuumugn vid 40 °C i 7 dygn och dess vikt registrerades som $m_{40^{\circ}\text{C}}$. Betongskivan torkades vidare ut vid 105 °C i 7 dygn och dess vikt registrerades som $m_{105^{\circ}\text{C}}$. Fukthalt i betong beräknades enligt följande olika ekvationer.

Ekv. 1 - fukthalt under "natur": $w_{\text{natur}} = (m_{\text{natur}} - m_{40^{\circ}\text{C}})/V$

Ekv. 2 – fukthalt under SSD: $w_{\text{SSD}} = (m_{\text{SSD}} - m_{40^{\circ}\text{C}})/V$

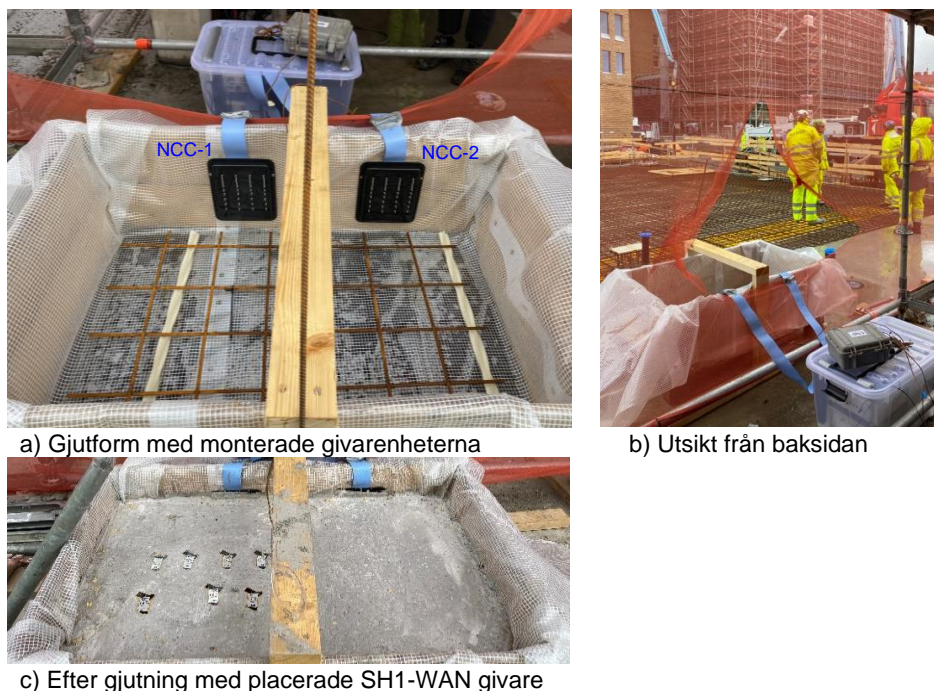
Ekv. 3 – totalfukthalt under SSD: $w_{\text{tot_SSD}} = (m_{\text{SSD}} - m_{105^{\circ}\text{C}})/V$

där V är betongskivans volym.

Betongens olika densitet γ kan enkelt beräknas enligt olika vikt och unik volym.

2.3 Fältförsök

Fältprovnings utfördes på NCC:s arbetsplats Habitat 7, Masthuggskajen, Göteborg. Bredvid arbetsplatsen för platsgjutning av betonggolvet byggdes en gjutform för gjutning av betongklump med storlek $L1200 \times B800 \times H250$ mm. Armeringar laggs ca 20 mm över botten. Två konduktivitetsgivarenheter monterades på en sida (se figur 3) med de första (överresta) mätpunkterna ca 240 mm över botten (10 mm under toppytan efter gjutning till 250 mm tjocklek). En typ av klimatförbättrad betong, Thomagrön C32/40 S4, har levererats av Thomas Betong AB för platsgjutning. Denna typ av betong blandades med Byggcement 175 kg/m^3 + slagg 175 kg/m^3 (nivå 4 med 50 % slagg), v_{bt} 0,47. Kuber togs på arbetsplatsen för senare hållfasthetsbestämning. Efter gjutning placerades 8 stycken WIISTE SH1-WAN [7] givare i betongen på djup 25, 50, 100 och 150 mm (två givare per djup). Chalmers konduktivitetmätutrustning var placerad på platsen för direktdatainsamling.

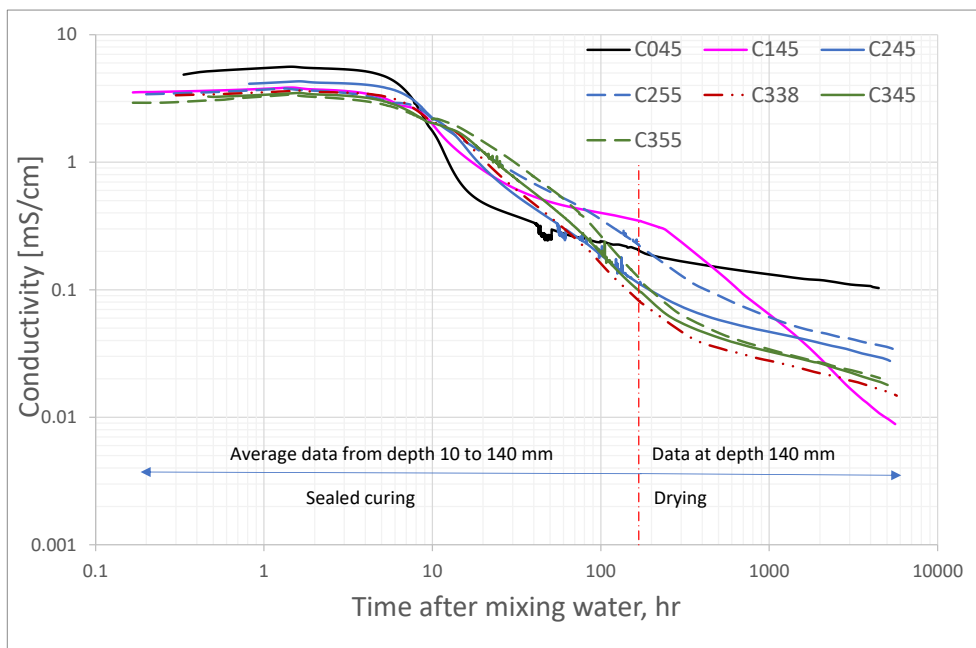


Figur 3: Platsgjutningsform på NCC:s arbetsplats Habitat 7 i Göteborg.

3 Resultat från laboratorieförsök

3.1 Konduktivitetskurvor

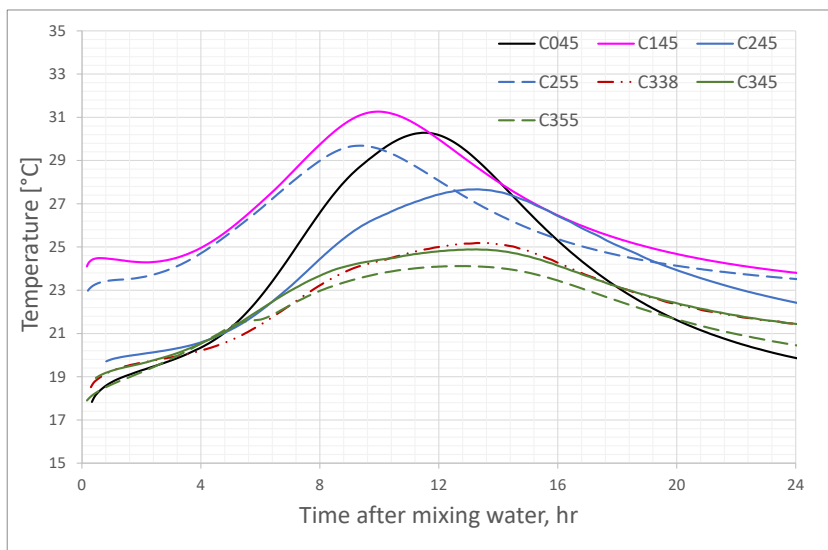
Figur 4 visar konduktivitetskurvor i betongkärl för labbprovnigen. Det framgår att under de första timmarna ökade konduktivitet lite p.g.a. ökad koncentration i jonlösningen. Sedan minskade konduktivitet tydligt p.g.a. hydratiseringsprocessen. Alla typer av betong med cementsättningsmaterial visade långsammare minskning än referensbetongen (C045) under de första 3-7 dygn (ca 70-170 timmar) men efteråt blev deras konduktivitet lägre än referensbetongen. Det tog över två veckor (ca 400 timmar) för betongen med flygaska (C145) att minska dess konduktivitet till en nivå lägre än referensbetongen och efter 4 månader (ca 125 dygn eller 3000 timmar) flygaskabetongens konduktivitet blev minst bland alla typer av betong, innebärande en mycket långsam och varaktig sekundär hydratisering. Det innebär att en konduktivitetskurva återspelar både fysikalisk och kemikalisk förändring i materialet. Ur dessa konduktivitetskurvor kan några intressanta egenskaper hos betong dras, t ex. tillstyvnadstid och tryckhållfasthet som ska presenteras i kommande avsnitt.



Figur 4: Konduktivitetskurvor i betongkärn för labbprovnigen.

3.2 Temperaturkurvor

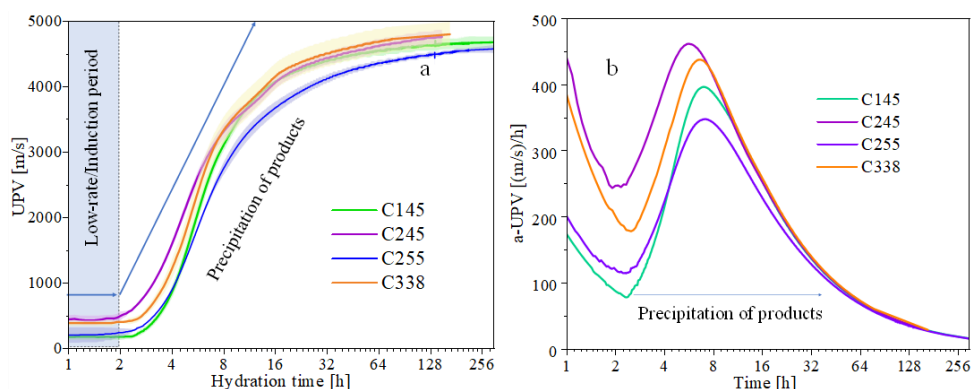
Figur 5 visar temperaturkurvor (medelvärden från 8 djup mellan 10 mm och 100 mm) i betongkärn för labbprovnigen under de första 24 timmarna. Observera att betongtyper C145 och C255 har gjutit på Chalmers, där visade en högre initialtemperatur än de andra som har gjutit på C-lab. Det framgår att alla typer av betong med cementersättningsmaterial visade en relativt lägre temperaturökning än referensbetongen (C045) p.g.a. mindre mängde C_3S och C_3A som befinner sig endast i referenscement (SH Slite). På grund av olika initialtemperaturer är det svårt att tolka tidpunkt för den högsta temperaturen i temperaturkurvan.



Figur 5: Temperaturkurvor i betongkärl för labbprovnigen.

3.3 Ultraljudshastighetskurvor

Figur 5 visar kurvorna av ultraljudshastighet (UPV) genom bruksdelen av betongblandning för labbprovnigen under de första 5-10 dygn. Jämförande med konduktivitetskurvorna i figur 4 kan man se att UPV har bara en kraftig ökning mellan 4 och 10 timmar som återspeglar endast fysikalisk förändring från vätske- till fastbaserad matris i materialet.



Figur 6: Några exempel av ultraljudshastighetskurvor från labbprovnigen.

3.4 Betongens tillstyvnadstid

Den konventionella metoden (ASTM C 403/C 403 M – 05) för bestämning av betongens tillstyvnadstid är mycket krånglig och arbetskrävande. En alternativ metod är att mäta ultraljudspulshastighet, t.ex. med IP-8 Ultraljudmätsystemet som har utvecklats av ett tyskt företag Ultratest GmbH. Dessa två metoder kan inte direkt mäta på betongmassan utan på bruksdelen av betongblandning. Därför måste de stora stenpartiklarna siktas bort genom en 4 mm sikt före mätning. En annan alternativmetod är att mäta betongens elektriska egenskaper, t.ex. konduktivitet som har utvecklats nyligen på Chalmers. Ur

konduktivitet i betong och i porlösning kan porbildningsfaktor F beräknas enligt nedanstående ekvation.

Ekv. 4 - porbildningsfaktor: $F = \sigma_{ps} / \sigma_c$

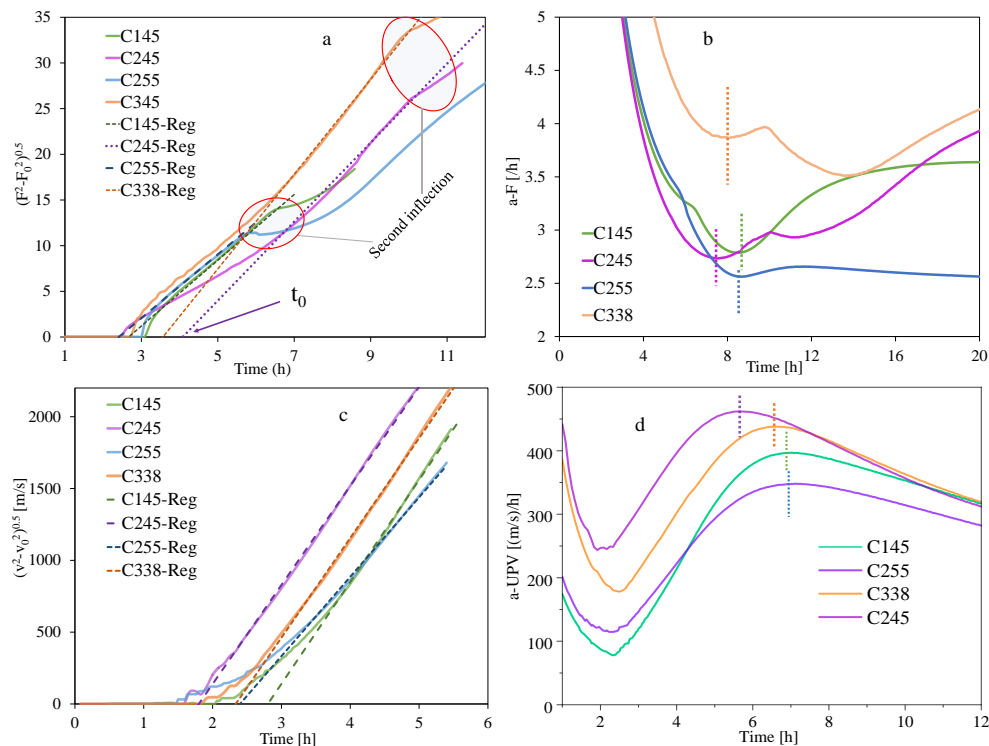
där σ_{ps} och σ_c betecknar konduktivitet i porlösning respektive i betong. Värdena σ_{ps} beräknades baserad på de värden som har mätts i pastan från ett tidigare projekt [8]. Enligt perkolations teorin kan flöjande linjära relationer mellan ultraljudspulshastighet och tid respektive porbildningsfaktor och tid erhållas.

Ekv. 5: $\sqrt{v^2 - v_0^2} = C(t - t_0)$

Ekv. 6: $\sqrt{F^2 - F_0^2} = k(t - t_0)$

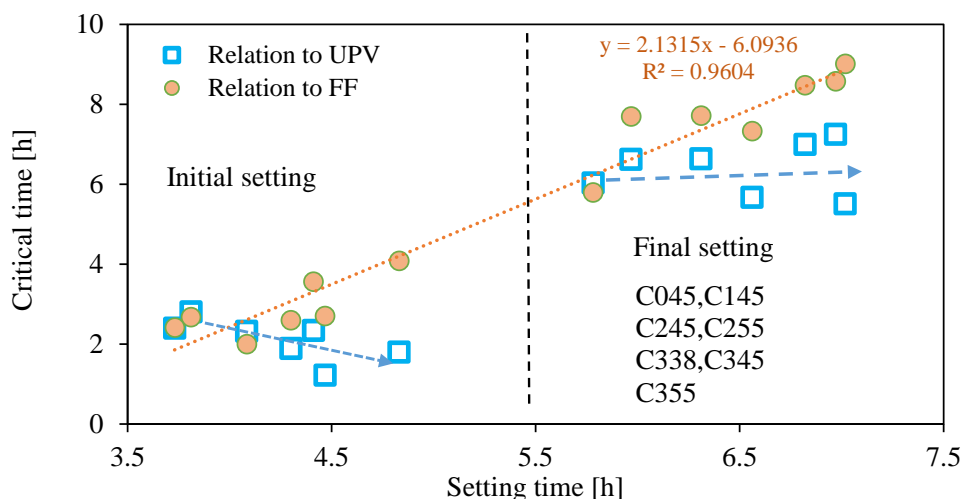
där v är ultraljudspulshastighet, F är porbildningsfaktor, t är tiden efter blandning med vatten, C och k är proportioneringskoefficienten, v_0 är ultraljudspulshastigheten före perkolation, F_0 är den initiala porbildningsfaktorn, medan t_0 är tiden för perkolation eller genomströmning av fastnätverk i betongen. Värdet t_0 kan bestämmas ur kurvor $(v^2 - v_0^2)^{0.5}$ mot t respektive $(F^2 - F_0^2)^{0.5}$ mot t (se figur 7a,c). Denna tid kan möjligt ha koppling till initialtillstyvnadstiden.

Å andra sidan från kurvor v/t mot t respektive F/t mot t kan några låg- eller höjdpunkter upptäckas (se figur 7b,d). Dessa inflexionspunkter kan möjligt ha koppling till tillstyvnadstiden.



Figur 7: Kurvor som kan möjligt visa tillstyvnadstid.

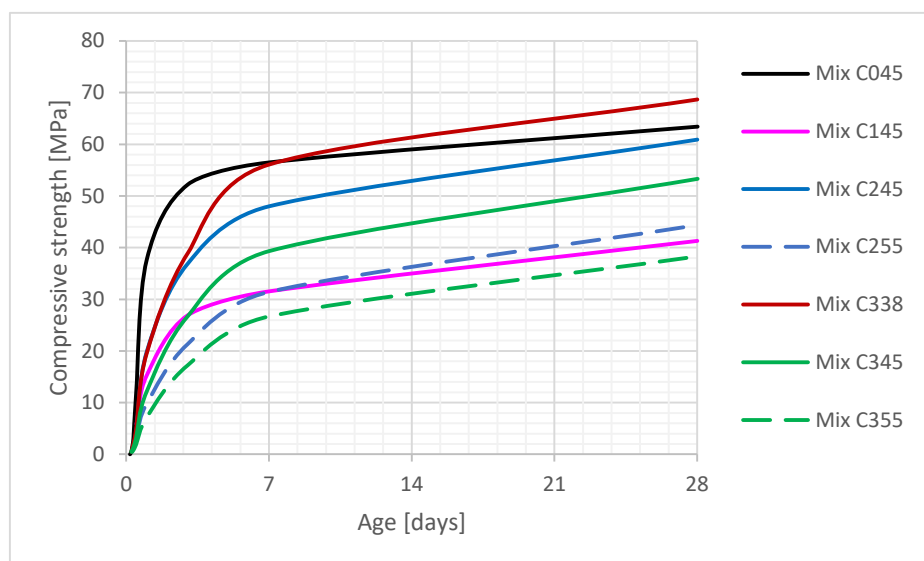
Figur 8 visar relationer mellan perkolations-/böjningstidpunkterna (kritiska tider) och tillstyvnadstiderna. Det framgår att de kritiska tiderna från konduktivitetkurvan (porbildningsfaktorn F) visade bättre korrelation till tillstyvnadstiden.



Figur 8: Relationer mellan kritiska tider och tillstyvnadstid.

3.5 Betongens hållfasthetsutveckling

Figur 9 visar tryckhållfasthetsutveckling hos betong som har blandats för labbprovnigen. Mognadsgraden eller mognadsåldern är ett konventionellt sätt att uppskatta betongens hållfasthetsutveckling. Mognadsåldern M kan beräknas enligt ekvation 7 (TT-faktorn) eller ekvation 8 (Arrheniusfunktionen).



Figur 9: Tryckhållfasthetsutveckling hos olika typer av betong.

Ekv. 7 – enligt TT-faktorn: $M_{TT} = \sum (T - T_0) / 30 \cdot \Delta t$

Ekv. 8 – enligt Arrheniusfunktionen: $M_{Arr} = \sum \exp\{K_0 \cdot [1/293 - 1/(273 + T)]\} \cdot \Delta t$

där T är genomsnittstemperatur (°C) i betong under tidsintervall Δt , T_0 är referenstemperatur (antagande -10 °C) och K_0 är aktiveringstemperatur (antagande 5000 K).

Kurvorna av ultraljudshastighet och konduktivitet särskilt i form av porbildningsfaktor kan också återspela hållfasthetsutveckling. Relationen mellan ultraljudshastighet v och tryckhållfasthet f_c kan uttrycks enligt ekvation 9.

Ekv. 9: $f_c = A \cdot \exp(B \cdot v)$

där A och B är empiriska konstanter.

Baserad på de fysikaliska och mekaniska principerna hos porösa material kan en relation mellan porbildningsfaktor F och tryckhållfasthet f_c deriveras ut och uttryckas enligt ekvation 10 [6].

Ekv. 10: $f_c = K_2 \cdot F^{3/4} \cdot [1 - (F/a)^{-1/2}]$

där K_2 är en konstant som beskriver mekaniska egenskaper hos fastmaterial enligt Griffithteorin och a är en s.k. "ojämn konstant" som kopplar relationen mellan F och porositet. För betongmaterial är den effektiva cementhalten som är en avgörande parameter till hållfasthet. Därför kan ekvation 10 vidare uttryckas som

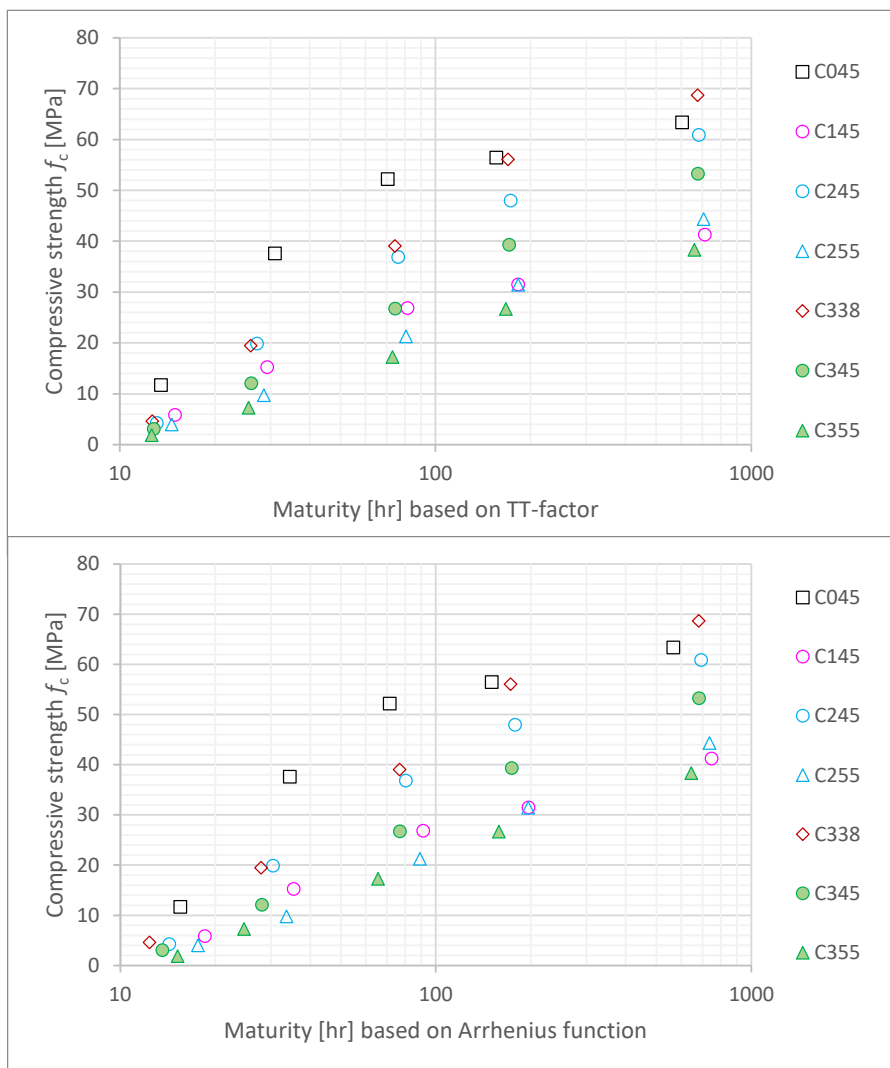
Ekv. 11: $f_c = k_2 \cdot C_{eff} \cdot F^{3/4} \cdot [1 - (F/a)^{-1/2}]$

där C_{eff} är den effektiva cementhalten i betongen.

Ekv. 12: $C_{eff} = C + k_{FA} \cdot FA + k_{SL} \cdot SL + k_{LL} \cdot LL$

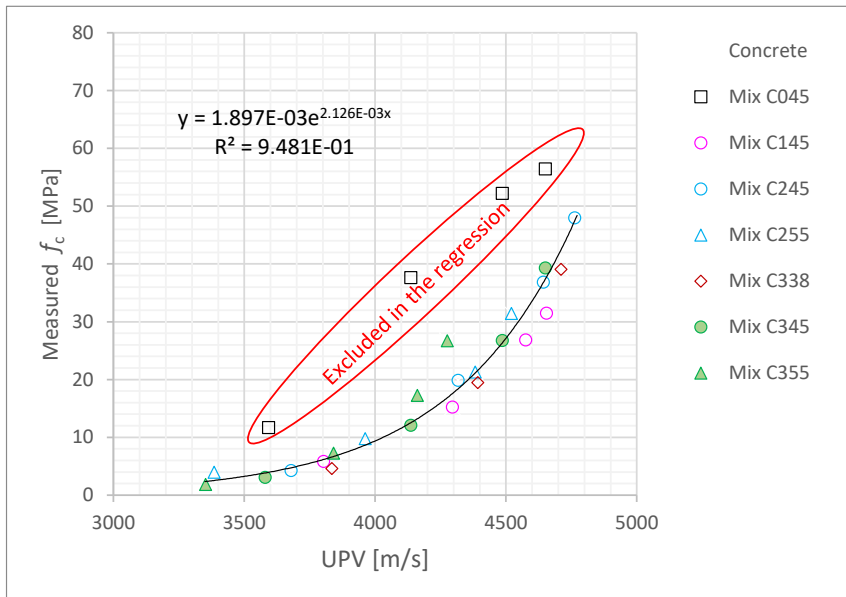
där C , FA , SL och LL betecknar cement-, flygaska-, slagg- respektive kalkstenpulvershalt i kg/m³ medan k_{FA} , k_{SL} och k_{LL} är effektivkoefficient till respektive tilläggningsmaterial. I detta försök antogs $k_{LL} = 0$ som inertfiller. k_{FA} och k_{SL} bestämdes enligt tryckhållfasthetsförhållandet vid ett dygn hos betong C145 respektive C245 till C045, dvs $k_{FA} = 0,515$ och $k_{SL} = 0,706$.

Figur 10 visar relationerna mellan tryckhållfasthet och mognadsålder enligt TT-faktor (ekvation 7) respektive Arrheniusfunktionen (ekvation 8). Det verkar som om att både metoderna beräknar liknande resultat för det begränsade temperaturspannet som var i försöken. Relationerna är beroende på bindemedel och det finns ingen relation som är generellt gällande till olika bindemedel. Det beror på att utvecklingen av tryckhållfasthet sker olika fört för olika cement och bindemedel. Referensbetong C045 med 100 % CEM I 52,5 R (SH) visade fortast utveckling medan C355 med 49 % CEM I 52,5 R (SH) visade långsammast utveckling.



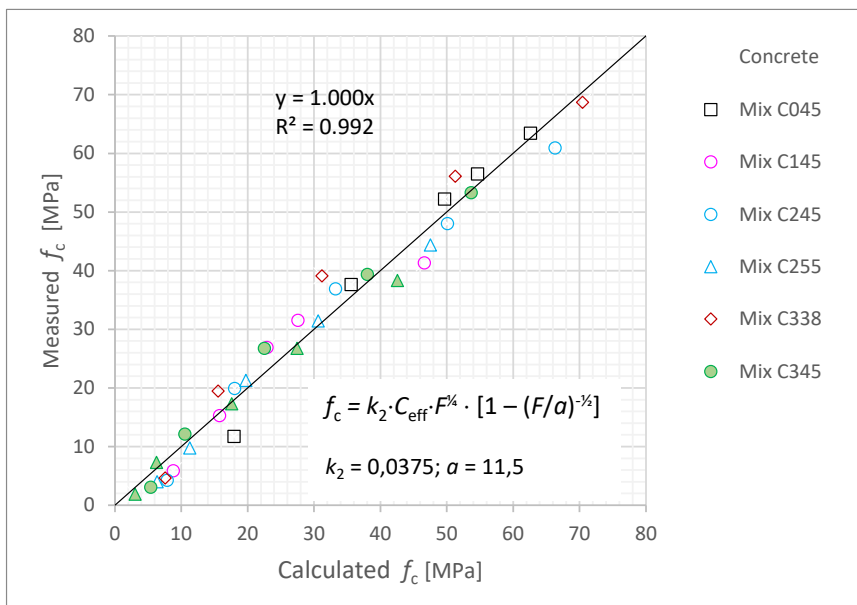
Figur 10: Relationerna mellan tryckhållfasthet och mognadsålder.

Figur 11 visar relationen mellan tryckhållfasthet och ultraljudspulshastighet enligt ekvation 9. Det framgår en relativt bra relation med korrelationskoefficient $R^2 = 0,948$ för betonger med mineraliska tillsatsmaterial men inte för referensbetong C045 som visade en helt annan relation p.g.a cementets fortast hållfasthetsutveckling bland andra bindemedel.



Figur 11: Relationen mellan tryckhållfasthet och ultraljudpulshastighet.

Figur 12 visar relationen mellan tryckhållfasthet och porbildningsfaktor enligt ekvation 11. Det framgår en mycket bra relation med korrelationskoefficient $R^2 = 0,992$.

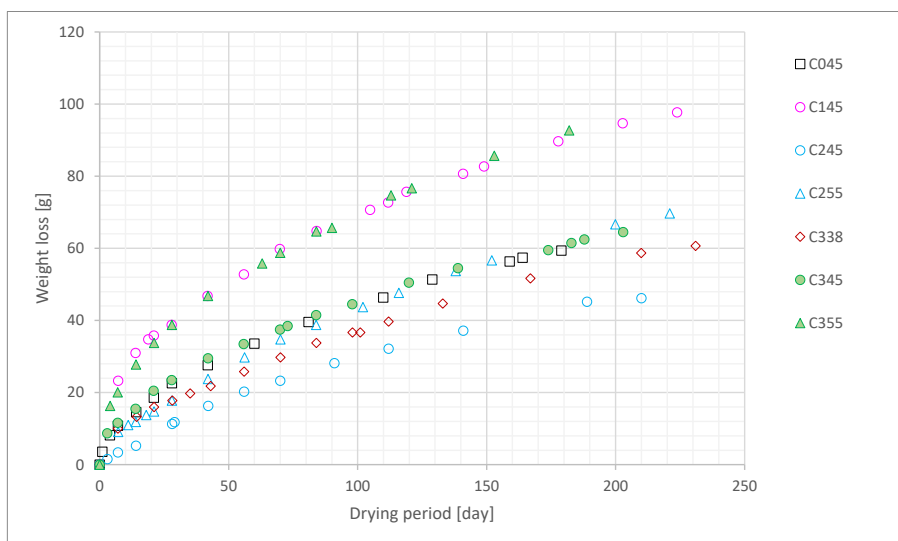


Figur 12: Relationer mellan tryckhållfasthet och porbildningsfaktor F .

3.6 Betongens uttorkning

3.6.1 Uttorkad och kvarstående fukt i betong

Figur 13 visar vikt förlust av betongkärn motsvarande uttorkad fukt under uttorkningsperioden. Betong C145 (35 % flygaska, v_{bt} 0,45) och C355 (35 % slagg + 16 % kalkstenpulver, v_{bt} 0,55) visade högst fuktförlust medan C245 (35 % slagg, v_{bt} 0,45) visade den lägsta fuktförlust.



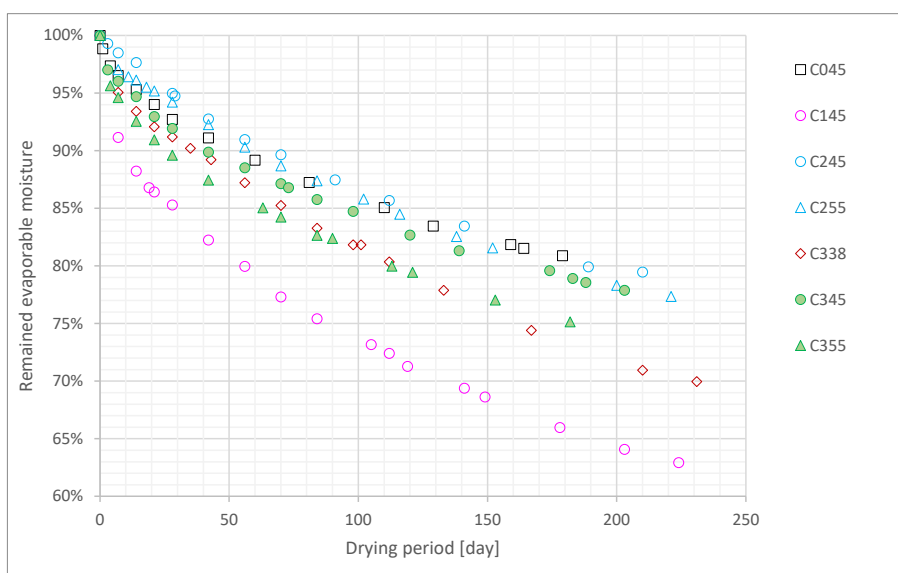
Figur 13: Viktförlust av betongkärn under uttorkningsperioden.

De olika fukthalter som bestämdes enligt ekvationer 1, 2 och 3 (se avsnitt 2.2.5) listas i tabell 2. Skillnaden mellan w_{SSD} och w_{natur} är från $10,7 \text{ kg/m}^3$ som lägst för C338 till $21,8 \text{ kg/m}^3$ som högst för C355, motsvarade 1,1 - 2,2 % av betongvolymen. Det innebär i stor utsträckning att de naturliga luftporerna har mättats av vatten under vakuuminsugning. Därför ska w_{natur} vara mer representativt för förångningsbart vatten i betong. För den höga fukthalten mellan $40 \text{ }^\circ\text{C}$ och $105 \text{ }^\circ\text{C}$ och den uttorkning som sker är en fråga hur den kan behandlas för att skilja mellan förångningsbart och bundet vatten under den verkliga användningsmiljön. Vidare undersökning behövs för att svara denna fråga.

Tabell 2: Olika fukthalter w och densitet γ i kg/m^3

	w_{natur}	w_{SSD}	w_{tot_SSD}	$\Delta w_{SSD-natur}$	$\Delta w_{40^\circ\text{C}-105^\circ\text{C}}$	γ_{natur}	$\gamma_{105^\circ\text{C}}$
Mix C045	44.6	60.3	134.9	15.7	74.6	2397	2278
Mix C145	39.5	50.8	149.3	11.3	98.4	2332	2194
Mix C245	33.4	52.4	142.8	19.0	90.4	2376	2252
Mix C255	46.5	67.1	155.0	20.6	88.0	2372	2238
Mix C338	29.6	40.3	117.6	10.7	77.4	2446	2339
Mix C345	42.9	57.4	140.9	14.5	83.5	2383	2257
Mix C355	54.9	76.7	160.2	21.8	83.5	2344	2206

I detta projekt har w_{natur} använts som en initialförångningsbar fukt (motsvarande fukthårdning under ca 95-97 % RF) före uttorkning och γ_{natur} har använts för omvandling av betongens initialvikt till volym så att beräkna procent av kvarstående förångningsbar fukt i betong, se figur 14. Det framgår att efter uttorkning i ca 6 månader visade fyra typer av betong (C045, C245, C255 och C345) liknande uttorkningstendens, d.v.s. 78-80 % kvarstående fukt. Betongerna C338 och C355 visade en liten lägre (ca 75 %) kvarstående fukt. Den förare kan förklaras av självuttorkning p.g.a. dess låga v_{bt} medan den senare kan vara p.g.a. dess höga porositet (se tabell 2, $w_{\text{tot_SSD}}$ som indikerar totalporositet). Betongen med 35 % flygaska (C145) visade lägst (ca 65 %) kvarstående fukt, möjligt p.g.a. dess relativt låga hydratiseringsgrad [8] och höga porositet. Dessa värden kommer att jämföras med konduktivitetmätvärdena i avsnitt 3.6.4.



Figur 14: Kvarstående förångningsbar fukt efter olika uttorkningstider.

3.6.2 Relativ konduktivitet under uttorkning

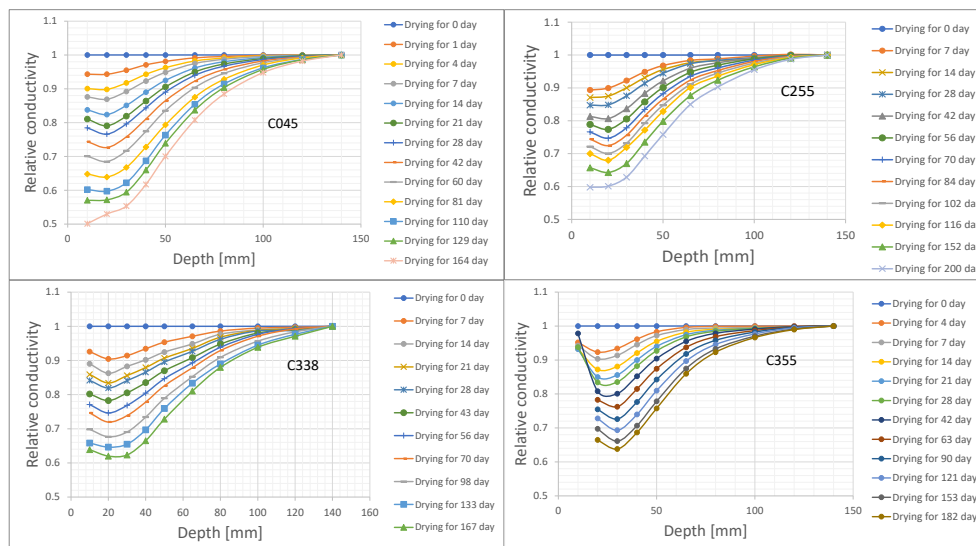
Eftersom konduktivitet är starkt beroende av både fukthalten och jonkoncentrationen i betong är det mer meningsfullt att beräkna den relativa konduktiviteten r_c på olika djup x i betong enligt ekv. 13:

$$\text{Ekv. 13: } r_c(x,t) = (\sigma_{x,t} / \sigma_{x,0}) / (\sigma_{140,t} / \sigma_{140,0})$$

där σ är konduktivitet, det första indexet indikerar mätdjupet i mm och det andra indexet indikerar uttorkningstid.

Figur 15 visar typiska kurvor av relativ konduktivitet efter olika uttorkningstider. Som förväntats minskade den relativa konduktiviteten med uttorkningstid. På djupen 0-30 mm finns det en tendens att minskningen bromsas upp på grund av jonen förflyttning som följde fukttransporten från inner- till ytterzon. Kurvan C355 42 dygn visade ett mycket högt värde på djupet 10 mm indikerande

mycket hög jonkoncentration. Efteråt kunde konduktiviteten inte mätas vilket innebär mycket låg konduktivitet som ligger utanför mätområdet.



Figur 15: Typiska r_c -kurvor efter olika uttorkningstider.

3.6.3 Relationer mellan relativ konduktivitet och kvarstående fukt

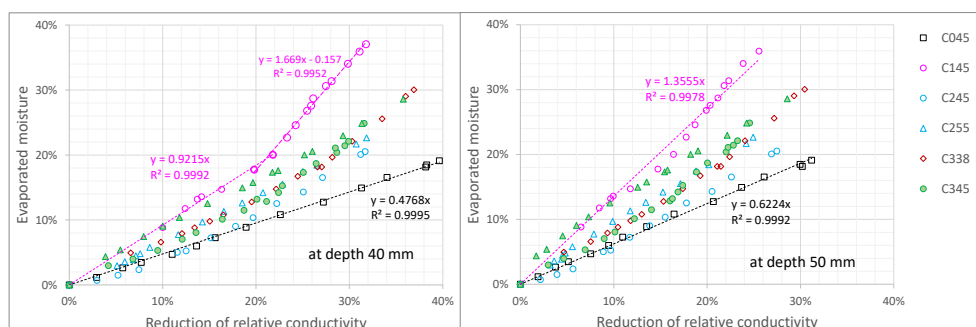
Eftersom r_c -värden på djupen 0-30 mm störs mycket av jonflyttningen försökte vi att använda r_c -värden på djupet mellan 40 och 50 mm för korrelationen med den avdunstade fukten (fuktförlust).

Ekv. 14 – Avdunstad fukt: $(w_0 - w_t)/w_0 = \alpha \cdot (1 - r_c)$

Ekv. 15 – Kvarstående fukt: $w_t/w_0 = 1 - \alpha \cdot (1 - r_c)$

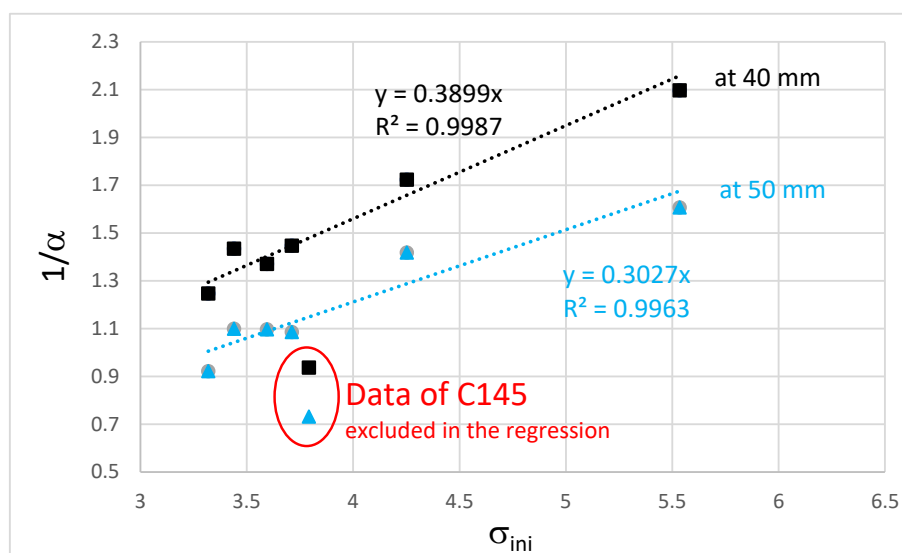
där w_0 och w_t är initialfukten respektive fukten efter uttorkningstiden t , och α är en konstant.

Figur 16 visar relationerna mellan avdunstad fukt och minskning av relativ konduktivitet på djupet 40 mm respektive 50 mm. Det framgår att några betonger (C045 och C255) uppvisade linjära relationer men andra betonger uppvisade bi-linjära relationer med en större lutning efter en viss uttorkningstid, särskilt för betong C145 med flygaska.



Figur 16: Relationer mellan avdunstad fukt och minskning av relativ konduktivitet.

Figur 17 visar relationerna mellan betongens initialkonduktivitet σ_{ini} (det genomsnittliga värden under 1-2 timmar efter blandning med vatten) och konstanten α (genomsnittregressionsslutningen i figur 16). Det verkar som om att data från betongen C145 (med 35 % flygaska) avviker märkligt från de andra. En möjlig förklaring för detta är att flygaska i senare hydratisering kommer att attrahera hydroxidjoner och kalciumjoner [9] som har lett till mer reduktion av konduktivitet i djupnivån ($\sigma_{140,t}$ i ekvation 13) där det fanns tillräckligt vatten för vidare hydratisering än den delvisuttorkade delen ($\sigma_{40,t}$ eller $\sigma_{50,t}$). Således bromsade minskning av relativ konduktivitet enligt ekvation 13 som ledd till en märkligt ökade lutning av C145 i figur 16 eller märkligt minskade värde $1/\alpha$ i figur 17.



Figur 17: Relationer mellan regressionskonstant α och initialkonduktivitet σ_{ini} .

Det är rimligt att anta

$$\text{Ekv. 16: } \alpha = \sigma_k / \sigma_{ini}$$

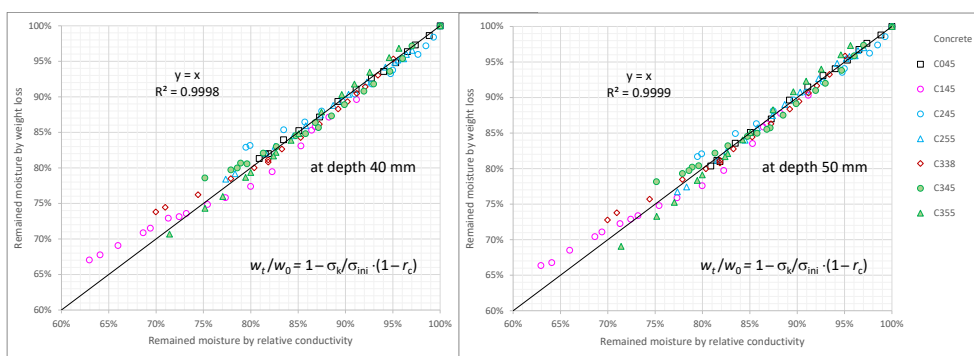
där σ_k är en karakteristik konduktivitet i porlösningen som möjligt kopplar till den effektiva jonkoncentrationen och porlösningens längd på djupet under uttorkning. Därför kan den kvarstående fukt beräknas enligt följande ekvationen:

$$\text{Ekv. 17 – Kvarstående fukt: } w_t / w_0 = 1 - \sigma_k / \sigma_{ini} \cdot (1 - r_c)$$

Figur 18 visar den kvarstående fukt som beräknas genom mätning av vikt förlust respektive relativ konduktivitet. Det framgår mycket bra korrelation med R^2 -värdet över 0,999, särskilt i det viktiga området 80-100 %. Resultaten från mätningdjupet 40 mm eller 50 mm visar lika bra korrelation fastän σ_k -värden för mätningdjupet 50 mm generellt är högre än 40 mm, se tabell 3 för olika konduktivitetvärden. Det är märkligt att betongen C145:s σ_k -värden är

högre än de andra betongtyperna och även högre än dess initialkonduktivitet. Eftersom både förångningsbart och oförångningsbart vatten kan bidra till konduktivitet är det möjligt att ett högre α värde eller σ_k/σ_{ini} -tal indikerar högre mängde oförångningsbart vatten. Det kan ses från tabell 3 att referensbetongen C045 visar det lägsta α värde (0,472 och 0,629 på djupet 40 mm respektive 50 mm) och flygaskabetongen C145 visar det högsta α värde (1,037 och 1,173 på djupet 40 mm respektive 50 mm). Betongen C245 visade en liten högre α värde än C045, möjligt p.g.a. senare hydratisering av slagg som ledd till finare porstruktur i den inre betong där mer tillgängligt vatten för vidare hydratisering i den delvis uttorkade betongen. Värdet α för C345 är högre än det för C245, möjligt innebärande mer effekt av slagg (högre slagg-cement-tal). Det verkar som om att högre vbt ledd till ett högre α -värde (C255 och C355 jämförande med C245 och C345). Det kan inte enkelt förklaras av "senare hydratisering" eftersom det finns ingen märklig ökning i lutning av kurvor för C255 och C355 (se figur 16). En möjlig förklaring för detta fenomen är att betongen med högre vbt fortare torkades fukt ut från de stora porerna men konduktivitet kunde inte minska så fort p.g.a. de kontinuerliga kapillärporerna med möjligt snabbare jonförflyttning från inner till ytterlig zon. Således bromsade minskning av relativ konduktivitet i den ytterliga zonen (se särskilt kurvan C355 i figur 16). Sammanfattningsvis kan man säga att ett högre α -värde kan orsakas av följande två faktorer: 1) senare hydratisering som leder till en lägre konduktivitet i den inner zon av betong och 2) mer kontinuerliga kapillärporer i hög vbt betong i samband med möjligt snabbare jonförflyttning som leder till mindre minskning av relativ konduktivitet i den ytterliga zonen. Betongen med ett lågt vbt d.v.s. C338 visade ett α -värde högre än C345 p.g.a. dess långsammare hydratisering. Vidare forskning behövs för att detaljanalysera och -kvantifiera dessa faktorer.

De utmärkte relationerna i figur 18 indikerar att konduktivitetmätning är en excellent samtidigt relativt enkel metod för utvärdering av fukttillstånd i betong jämförande med den konventionella RF-metod som behöver sorptionskurvor för omvandling av RF till fukthalt samt erfara personal för praktiskt utförande.



Figur 18: Kvarstående fukt från mätning av viktförlust respektive relativ konduktivitet.

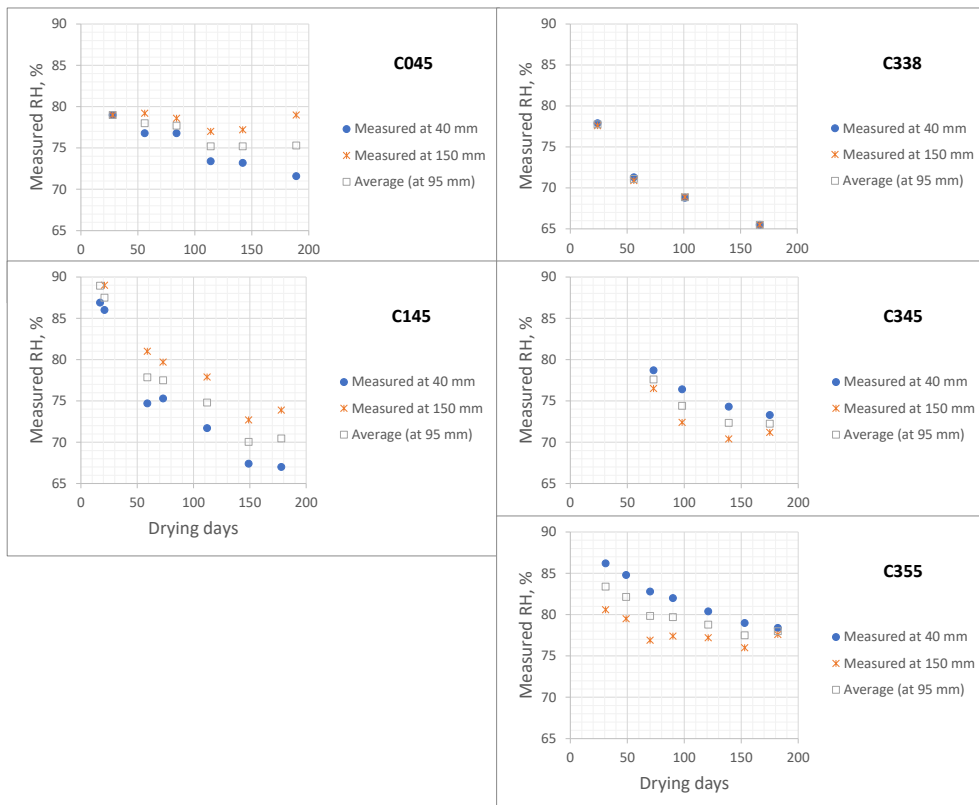
Tabell 3: Olika konduktivitetsvärden i mS/cm

Betong	σ_{ini}	σ_{k40}	σ_{k50}	$\alpha_{40} = \frac{\sigma_{k40}}{\sigma_{ini}}$	$\alpha_{50} = \frac{\sigma_{k50}}{\sigma_{ini}}$
C045	5.535	2.610	3.484	0.472	0.629
C145	3.792	3.932	4.449	1.037	1.173
C245	4.253	2.296	2.834	0.540	0.666
C255	3.713	2.517	3.466	0.678	0.934
C338	3.595	2.551	3.214	0.710	0.894
C345	3.440	2.332	3.059	0.678	0.889
C355	3.319	2.721	3.192	0.820	0.962

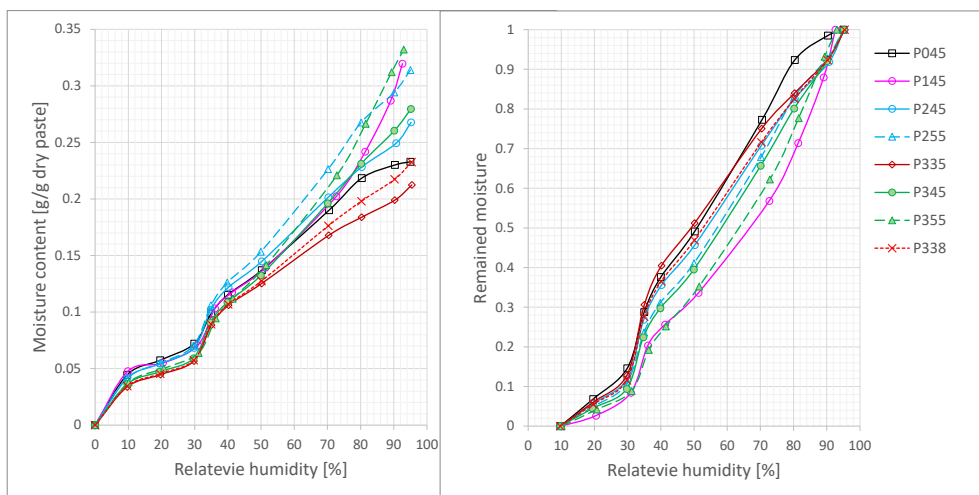
3.6.4 Jämförelse med vanlig RF-mätning

Figur 19 visar uppmätta RF från Vaisalamätning. Referensbetongen C045 visade en relativt konstant RF på djupet 150 mm och, som förväntat, minskande RF på djupet 40 mm. Betongen C145 visade kraftigast minskning av RF från 86-89 % till 67-74 % på både djupen 150 mm och 40 mm, möjligt p.g.a. dess relativt låga hydratiseringsgrad [8] och höga porositet bland andra betonger med vbt 0,45 (se w_{tot_SSD} i tabell 2). Betongen C338 visade nästan samma låga RF på djupen 150 mm och 40 mm från ca 78 % till ca 66 % under uttorkningsperioden upp till 167 dygn. Det är uppmärksamt att inner RF i betong C345 och C355 är lägre än yttre RF. En tänkbar orsak är möjlig segregation i dessa två betonger. Eftersom kalkpulver besitter kemikaliskt ingen hydratiseringsförmåga är det effektivt vatten-(cement+slagg)-talet för C345 och C355 högre än det för C245 respektive C255. Om det kommer segregation kan den orsaka ett relativt lågt vbt i den djupare delen av betong som i sin tur leder till ett lägre RF-värde.

Figur 20 visar de relevanta fuktkurvor hos cementpastaproverna som har uppmätts av DVS-tekniken (DVS - Dynamic Vapour Sorption) [10] där kurvan P338 var interpolerade med 70 % av P335 och 30 % av P345.

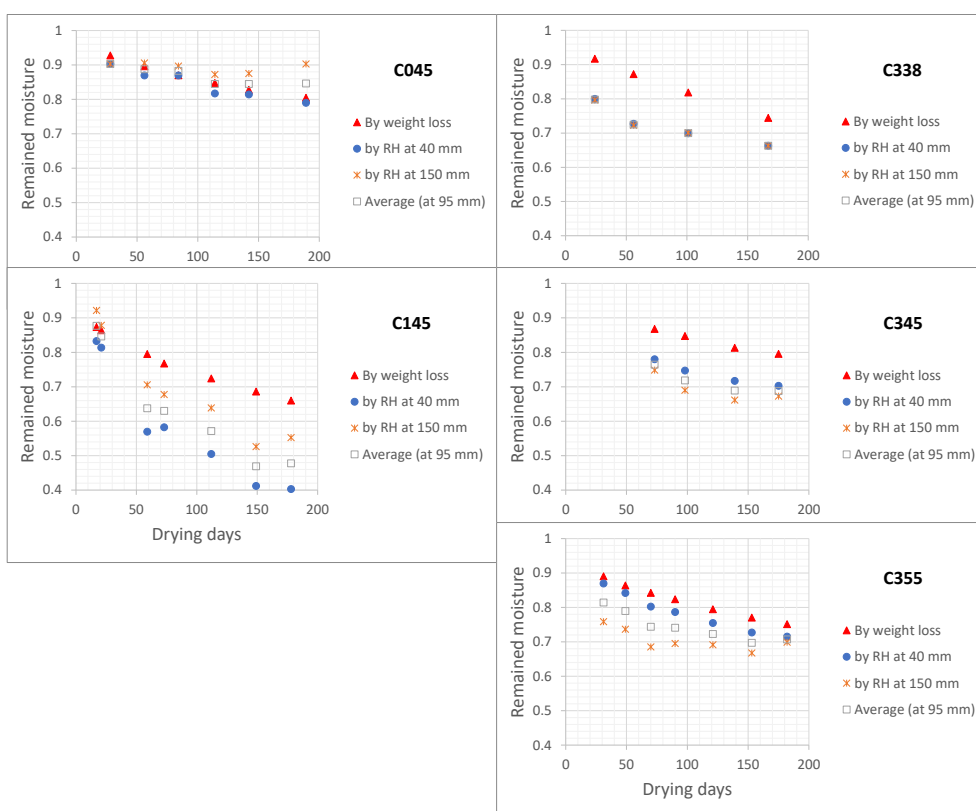


Figur 19: RF från Vaisalamätning.



Figur 20: Fuktcurvor från mätning av DVS-tekniken, där fukthalten vid 93-95 % antogs som mättnad och vid 10 % antogs som noll (vänster) när omvandlades till kvarstående fukt (höger).

Med hjälp av dessa sorptionskurvor kan RF-mätresultaten omvandlas till fuktmättnadsgrader som är liknade som kvarstående fukt. Figur 20 visar jämförelsen av kvarstående fukt mellan vikt förlust- och RF-mätning. Eftersom vikt mätning involverar mindre mätosäkerhet ska den kvarstående fukt som bestämdes av vikt förlustmätning vara mer representativ. Det innebär att RF-mätning i mesta fall underskattar den aktuella kvarstående fukten i betongen med mineraliska tillsatsmaterial, möjligen på grund av en otillräcklig tätning mellan Vaisalagivarens kabeln och plaströret som lett till ett lägre RF-mätvärde. För referensbetong C045 visar RF-mätning en liten högre kvarstående fukt jämförande med vikt förlustmätning. En möjlig orsak är mätosäker i DVS-kurvan P045 mellan RF 80-95 % där kurvan visade en betydlig lägre lutning jämförande med de andra kurvorna.



Figur 21: Jämförelse av kvarstående fukt mellan vikt förlust- och RF-mätning.

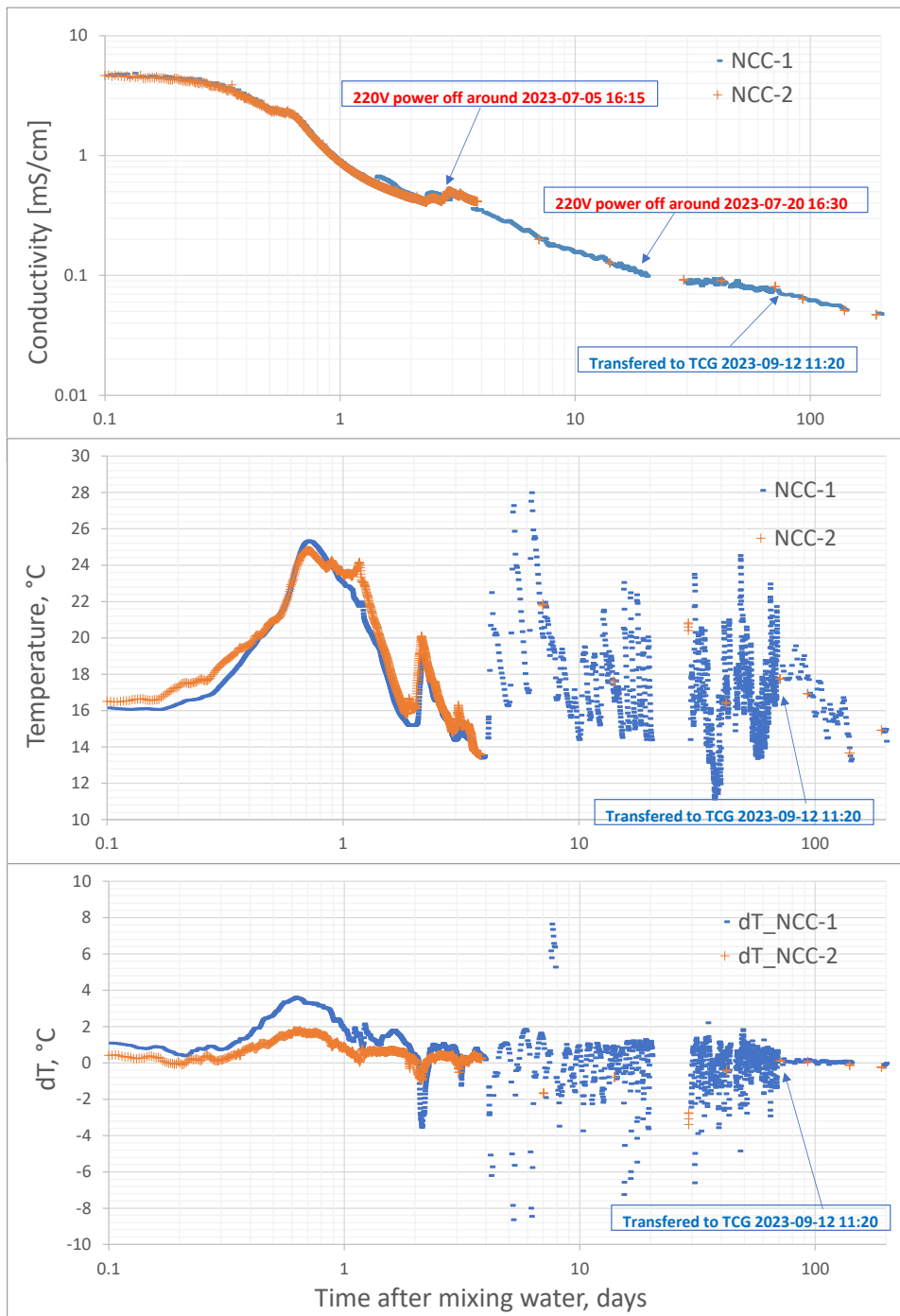
4 Resultat från fältförsöket

4.1 Konduktivitets- och temperaturkurvor

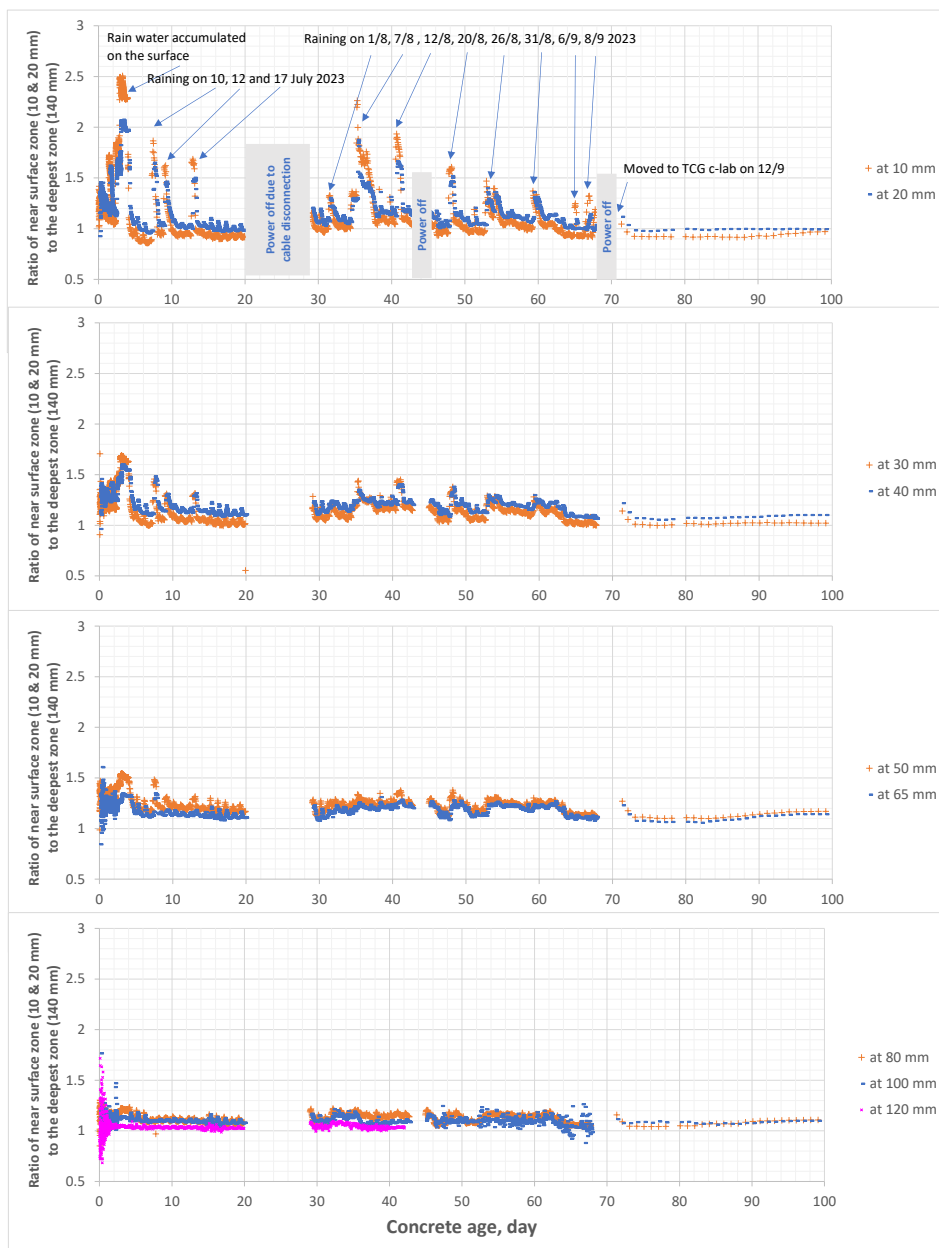
Figur 22 visar konduktivitets- och temperaturkurvorna i betongklumpen gjuten på NCC:s arbetsplats Habitat 7 i Göteborg. Konduktivitetskurvorna från två givare ser likande ut. Den genomsnittliga temperaturen mätt av givaren NCC-1 är lite lägre än den mätt av givaren NCC-2. En möjlig förklaring är att betongsidan med givaren NCC-1 var mot relativt kylig vind. Det kan också

förklara varför dT_{NCC-1} (temperaturskillnaden mellan djupet 100 mm och 10 mm) är högre än dT_{NCC-2} under det första dygnet. Efter det första elavbrottet slutades kontinuerlig mätning på givaren NCC-2 på grund av att en mätutrustning var ur funktion. Efteråt mättes givaren NCC-2 intermittent genom manuell koppling till den fungerande mätutrustningen.

På grund av frekvent regnväder under juli och augusti är det svårt att torka ut betongen som utsatt i den otäta utrummiljön. Figur 23 visar de relativa konduktivitetskurvorna från olika djup mot det djupaste (140 mm). Det kan helt förstås att regnväddret har en stor inverkning på konduktivitet i den nära ytzone (10-20 mm). Inverknningen minskade med djupet. När betongklumpen har flyttat till labbmiljön blev kurvorna relativt konstanta men det är uppmärksamt att konduktiviteten på djupen 40-120 mm är högre än den på det djupaste. En av förklaring är möjlig segregation som har lett till ett relativt högre vattenbindemedeltal mot gjutningsinriktningen men enligt fukthaltmättningsresultaten i tabell 4 (se nästa avsnitt) kan det nog inte stämma.



Figur 22: Konduktivitets- och temperaturkurvor från betongklumpen gjuten i Habitat.



Figur 23: Relativa konduktivetskurvor från ytzoner mot det djupaste zonen (140 mm).

4.2 Tryckhållfasthet och fukthalt

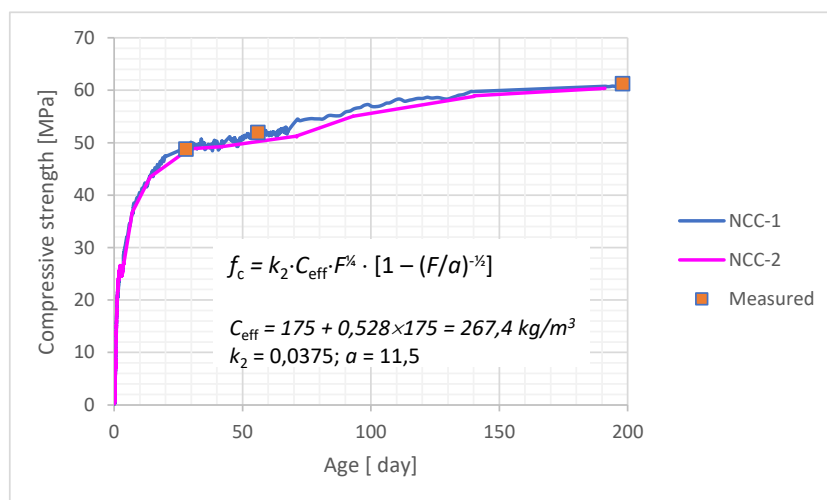
Efter uttorkning i fyra månader (från 2024-09-12 tills 2024-01-17) har fyra stycken cylinderprover med diameter ca 104 mm tagits ut för hållfasthetsprovning (2 st) hos TCG:s C-lab ($61,3 \pm 1,9$ MPa) och fukthaltbestämning (2 st) på Chalmers där cylinderproverna sågades till skivor med tjocklek ca 15-18 mm från exponeringsytan tills medeldjupet 140 mm med en vattenkyld diamantsåg. Fukthalten i varje skiva bestämdes enligt den metod som beskrevs i avsnitt 2.2.5. Mätresultaten som genomsnittsvärde från två

skivprover listas i tabell 4. En märklig högre fukthalt kan endast ses i djupet ≤ 30 mm.

I fältförsöket har 175 kg/m³ byggcement använts i betongen med lika mängde slagg. Tryckhållfasthet hos kuber 150 mm var $48,8 \pm 1,9$ MPa vid 28 dygn respektive $52,0 \pm 0,4$ MPa vid 56 dygn samt hos utborrade cylinder (provade med H/D = 1,0) var $61,3 \pm 1,9$ MPa vid 199 dygn. För att prediktera tryckhållfasthetsutveckling från konduktivetsvärdena enligt ekvation 11 adopterades värdena för pastan P345 (49 % CEM I + 35 % slagg + 16 % kalkstenpulver) i referensen [8] som konduktivitet i porlösning för att beräkna porbildningsfaktorn F . Andra parametrar i ekvation 11 är samman som har använts i laborieförsöket (se figur 12). De predikterade och uppmätta tryckhållfastheterna visas i figur 24. Det kan ses att de predikterade tryckhållfastheterna överensstämmer väl med de uppmätta.

Tabell 4: Fukthalter w och densitet γ i kg/m³ på olika djup

Djup, mm	w_{natur}	w_{SSD}	$w_{\text{tot_SSD}}$	$\Delta w_{\text{SSD-natur}}$	$\Delta w_{40^{\circ}\text{C-105}^{\circ}\text{C}}$	γ_{natur}	γ_{dry}
9	66.4	80.8	143.9	14.4	63.1	2370	2241
30	66.6	81.3	143.3	14.7	61.9	2395	2267
50	62.1	77.1	135.4	14.9	58.4	2421	2301
100	61.1	76.0	130.2	14.9	54.1	2420	2305
120	59.6	74.4	130.1	14.8	55.7	2420	2304
140	60.0	74.9	129.0	14.9	54.2	2413	2299

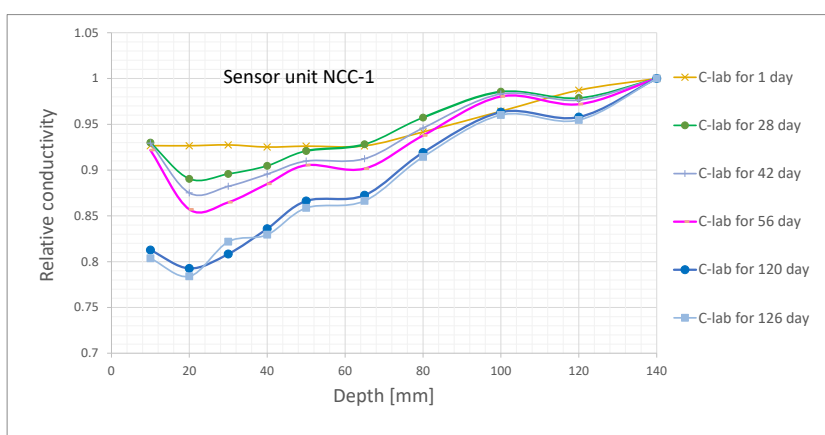


Figur 24: Predikterade (enligt uppmätta konduktivitet från givare NCC-1 och -2) och uppmätta tryckhållfastheter hos betongen i fältförsöket.

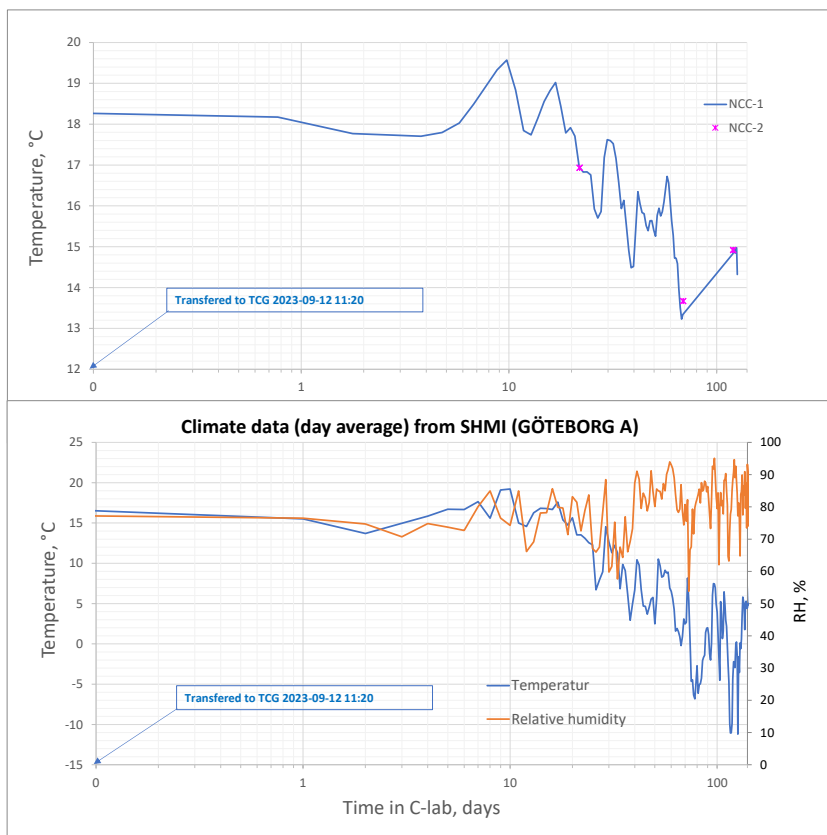
4.3 Uttorkningstillstånd

Figur 25 visar kurvorna för den relativa konduktiviteten i betongklumpen efter placering (2023-09-12) hos C-lab. Jämförande med kurvorna i laboratorieförsöket (se figur 15) kan man se att kurvorna i betongklumpen är lite våglig, möjligt på grund av temperatur- och fuktförändringar i miljön hos C-lab (se figur 26) som inte är så konstanta som i Chalmers labb. De varierade temperaturerna i samband med de varierade relativa fuktigheterna omkring betongklumpen kan möjligt ändra inriktning av fukttransport och leda till en fuktomfördelning i betongen.

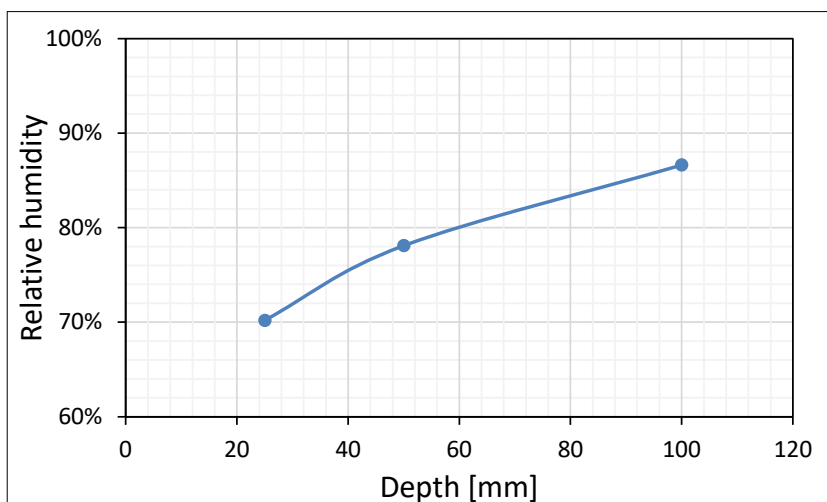
Figur 27 visar de relativa fuktigheter som uppmättes av Vaisalagivarna efter betongklumpen har uttorkats i 126 dygn hos C-lab.



Figur 25: Kurvor av relativ konduktivitet i betongklumpen efter placering hos C-lab.



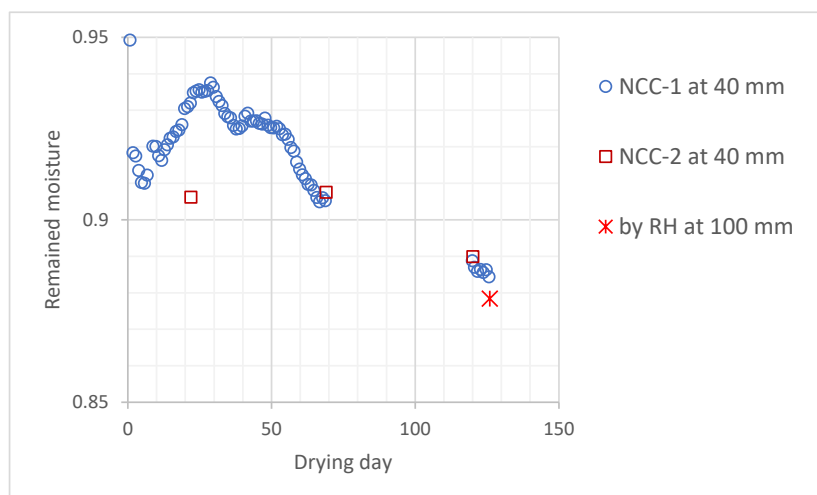
Figur 26: Temperaturkurvor hos C-lab.



Figur 27: RF-data uppmätt med Vaisalagivarna efter uttorkning i 126 dygn hos C-lab.

Liknande som i hållfasthetsuppskattning kan de relevanta värdena från betong C345 utnyttjas för beräkning av kvarstående fukt i betongklumpen från relativ konduktivitet (ekvation 17 med $\sigma_{k40}/\sigma_{ini} = 0,678$) samt från RF-mätning på djupet 100 mm (0,4 av tjockleken hos betongklumpen med ensidig uttorkning) och DVS-kurvan för pastan P345. De beräknade resultaten visas i figur 28. Det framgår att det är en bra överensstämmelse mellan relativ konduktivitet och

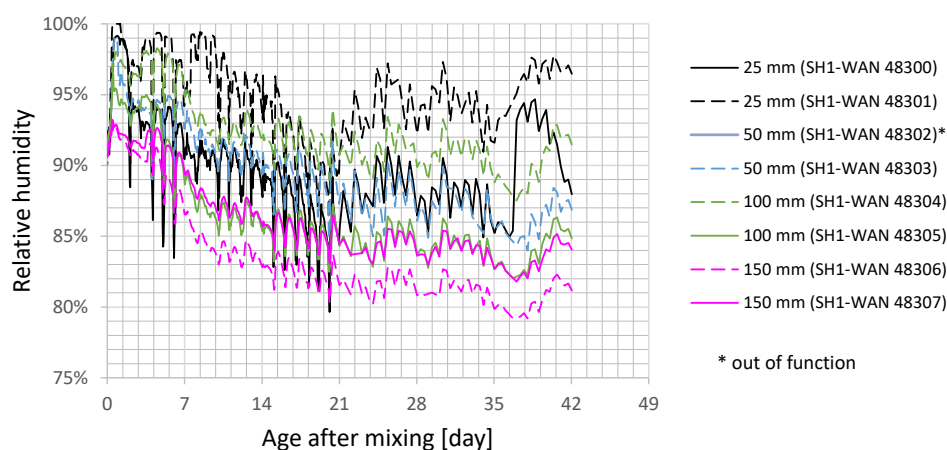
RF-mätning fastän den senare visade ett litet lägre värde möjligt p.g.a. tättningsproblemet likande i laboratorieförsöket eller möjlig temperaturökning under hållborring.



Figur 28: Uppskattade kvarstående fukt i betongklumpen.

4.4 Mätresultaten från WIISTE SH1-WAN

Figur 29 visar mätresultaten från givarna WIISTE SH1-WAN. Det framgår relativt stor avvikelse mellan två givarna på samma djup. Jämförande med konduktivitetmätresultaten i figur 23 kan man inte se någon tydlig koppling till regnvädren. Det är också tveksamt att RF på djupet 150 mm är lägst av dem på de andra mindre djupen.



Figur 29: Mätresultaten från givarna WIISTE SH1-WAN

5 Slutsats

Genom detta projekt har en prototypmätutrustning utvecklats för mätning av elektrisk konduktivitet i betong på olika djup. Dessa konduktivetsvärden återspeglar betongens porstrukturutveckling och vattenmängd. Därför kan konduktivetsvärden kopplas till betongens hållfasthetsutveckling, uttorkning och uppfuktning. Baserad på resultaten från både labb- och fältförsöken kan följande slutsatser sammanfattas.

- Färsk betongs tillstyvnadstid kan uppskattas genom ekvation 6 och lågpunkt i $F/t-t$ kurvan med en kvadratkorrelationskoefficient $R^2 = 0,96$ till standardmetoden för penetrationsmotstånd.
- Betongens tryckhållfasthetsutveckling kan uppskattas av ekvation 11 med en kvadratkorrelationskoefficient $R^2 = 0,992$ till den enligt standard uppmätta tryckhållfastheten.
- Betongens kvarstående fukt under uttorkning kan uppskattas av ekvation 17 med en kvadratkorrelationskoefficient $R^2 = 0,999$ till den klassiska vikt förlustmätningen.
- Den konventionella RF-mätningen med Vaisalagivare kan underskatta betongens kvarstående fukt p.g.a. tätningsproblemet. Men resultatet, mätt av en erfaren utförare, är närmare till dem mätta med konduktivetsmetoden.
- Genom att mäta konduktiviteten på olika djup kunde (se figur 23) uppfuktningen av betongensyttskikt (10 och 20 mm djup) vid nederbörd dokumenteras vilket vanligtvis inte övervakas.

Sammanfattningsvis illustrerar projektet att metodiken med konduktivetsmätningar i betong har en stor potential att stötta entreprenören vid betongproduktion. Mätningarna är relativt enkla att göra, men behöver bearbetas för att utgöra beslutsunderlag i byggproduktion. För att få ut bra beslutsunderlag behövs kompletterande information om betongen och bearbetning av mätresultaten för att dessa ska kunna översättas till relativ fuktighet. Med dessa komplement är potentialen i denna metodik stor, särskilt möjligheten att även övervaka tidig uppfuktning under byggskedet. Men för att genomföra detta behövs fortsatt forskning och utveckling.

Referenser

1. Xi, Y., Bazant Z.P., and Jennings, H.M., Advanced Cement-Based Materials, 1 (1994) 248-257.
2. Nilsson, L.-O., "Hygroscopic moisture in concrete - Drying, measurements & related material properties", Doctoral thesis, 1980, Div. Building Materials, LTH, Lund, Sweden.
3. Hedenblad, G., "Materials data for moisture transport calculations" (in Swedish), BFR T-skrift T19:1996, ISBN91-540-5766-3, Bygghälsöfundersådet, Stockholm, Sweden.
4. Wilson C. and Weiss J., "The Measurement of the Internal Relative Humidity of Concrete at Early Ages", Advances in Civil Engineering Materials 8, no. 1 (2019): 655–669. <https://doi.org/10.1520/ACEM20190109>
5. Larsson, R., "Test av trådlösa fuktsensorer" Uppkopplad byggplats White paper: Cementa och Peab Sverige – Smart Built Environment 2021.
6. Huang L., Tang L., Löfgren I. Olsson N., Ahmadi A., Esping O., Li Y. and Yang Z., "Non-destructive test system to monitor hydration and strength development of low CO₂ concrete", Construction and Building Materials, 408 (2023) 133774. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133774>.
7. <https://www.wiiste.com/uploads/zaCWUJaB/sh1wan-datasheet.pdf>.
8. Huang L., Tang L., Löfgren I. Olsson N. and Yang Z., "Real-time monitoring the electrical properties of pastes to map the hydration induced microstructure change in cement-based materials", Cement and Concrete Composites, 132 (2022) 104639. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104639>
9. Deschner F., "Reaction of siliceous fly ash in blended Portland cement pastes and its effect on the chemistry of hydrate phases and pore solution", Doctoral thesis, Faculty of Natural Sciences, The Friedrich Alexander University, 2014, Erlangen-Nuremberg, Germany.
10. Huang L., Tang L., Wadsö L., Löfgren I. Olsson N. and Yang Z., "Using water vapour and N₂ isotherms to unveil effects of SCMs on nanopores and evaluate hydration degree", Cement and Concrete Research, 164 (2022) 107042. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.107042>.