



LUND UNIVERSITY

Fuktegenskaper hos betonger med slagginblandning

Nilsson, Lars-Olof; Johansson, Peter; Linderöth, Oskar

2024

Document Version:
Förlagets slutgiltiga version

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):
Nilsson, L.-O., Johansson, P., & Linderöth, O. (2024). *Fuktegenskaper hos betonger med slagginblandning*. (TVBM; Nr 3192). Avd Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola.

Total number of authors:
3

General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

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

Take down policy

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

LUND UNIVERSITY

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

Fuktegenskaper hos betonger med slagginblandning

Lars-Olof Nilsson, Peter Johansson, Oskar Linderöth
Avd. Byggnadsmaterial | LTH | Lunds universitet
TVBM-3192



LUND
UNIVERSITY

ISRN LUTVDG/TVBM—24/3192—SE(1-44)
ISSN 0348-7911 TVBM
© Lars-Olof Nilsson 2024
Lunds university
Div of Building Materials
Box 118
221 00 Lund

www.byggnadsmaterial.lth.se

Förord

På uppdrag av Swerock AB, genom Oskar Linderöth, har Avd. Byggnadsmaterial vid LTH mätt fuktegenskaper hos ett antal betonger. Peter Johansson har varit projektledare; Lars-Olof Nilsson har utvärderat mätningarna och skrivit rapporten.

Stefan Backe, vid Avd. Byggnadsmaterial, LTH, har utfört mycket av laboratoriearbetet, med hjälp av David Wahlbom, borrar ut betongcylindrar, sågat betongskivor, utövat tillsyn till alla klimatboxar, mätt RF i provkroppar och gjort alla vägningar.

Stefan Andersson och Oskar Linderöth göt betongerna på Swerocks laboratorium i Ystad. Oskar Linderöth har planerat projektet och kontinuerligt granskat delresultaten.

Projektdelen har finansierats av Swerock.

Lars-Olof Nilsson, 18 november 2024, Lund

Sammanfattning

Fuktegenskaper hos fem betonger med olika grad av inblandning av slagg har bestämts. Desorptionsisotermerna har mätts på tunna skivor i klimatboxar. Fuktttransportkoefficienter har bestämts med koppmetoden på välhårdade prover och med burkmetoden på prover som hårdats i 3, 6 respektive 12 månader.

Desorptionsisotermerna uppvisar en horisontell ”plata” i området 85-95 % RF, särskilt vid slagginblandning, till viss del dock beroende på absorptionsskanning. Detta innebär att fuktkapaciteten är mycket låg i detta område. Detta medför att det riskerar att bli stora systematiska fel i RF-mätningar, särskilt om RF-givaren har en stor fuktkapacitet. Stora skillnader har också erhållits vid mätning av RF med olika givare på betongerna med slagginblandning och låga vbt.

Fuktttransportkoefficienterna bestämda med koppmetoden i två olika RF-intervall har gjort det möjligt att kvantifiera fuktberoendet. Resultaten visar ett tydligt fuktberoende för fyra av fem testade betonger, vilket inte helt överensstämmer med en del tidigare mätningar som visade fuktberoende fuktttransportkoefficienter bara för material med rent Portlandcement.

Burkmetoden har gjort det möjligt, för första gången, att bestämma fuktttransportkoefficientens åldersberoende. Från tre till tolv månaders ålder minskade fuktttransportkoefficienten som mest med en faktor 2.

Nyckelord

Fuktttransportkoefficient, desorptionsisoterm, koppmetoden, burkmetoden, slagg

Innehåll

1	Introduktion.....	1
2	Material och provkroppar.....	2
2.1	Betong i plåtburkar för burkmetoden.....	3
2.2	Skivor till sorptions- och koppförsök.....	3
3	Bestämning av desorptionsisotermer.....	5
3.1	Viktändringar.....	5
3.2	Utvärdering.....	6
3.3	Desorptionsisotermer som kg/kg bindemedel.....	9
3.4	Jämförelser med tidigare desorptionsisotermer.....	10
3.5	Slutsatser.....	12
4	Fukttransportegenskaper med koppmätningar.....	13
4.1	Utvärdering av koppförsök.....	14
4.2	Fukttransportkoefficienter i intervallet 85-94 % RF.....	16
5	Fukttransportegenskaper med Burkmetoden.....	17
5.1	Viktändringar.....	17
5.2	RF efter självuttorkning.....	19
5.3	Torkklimat.....	20
5.4	Betongmått.....	20
5.5	Fuktkapaciteter.....	20
5.6	Inverkan av karbonatisering.....	21
5.7	Fukttransportkoefficienter vid olika härdningstid.....	22
5.8	Jämförelse mellan burkmetoden och koppmetoden. RF-beroendet.....	25
5.9	Jämförelse med tidigare mätningar.....	27
5.10	Fukttransportkoefficienter för beräkningar – förslag 1.....	28
5.11	Fukttransportkoefficienter för beräkningar – förslag 2.....	31
6	Slutsatser.....	37
7	Referenser.....	38
BILAGA 1	(3 sidor).....	39

1 Introduktion

Fuktegenskaper hos nya betongtyper är föremål för en hel del undersökningar. För inte särskilt länge sedan fanns det bara bindemedel till betong i form av ”ordinärt Portlandcement”, OPC, och cementbaserade material med detta bindemedel hade undersökts på djupet sedan länge. Idag har vi en stor ”flora” av bindemedelskombinationer och egenskaperna hos dessa har varit mer eller mindre okända.

När det gäller fuktegenskaper, främst sorptionskurvor och fukttransportkoefficienter, är behovet stort, men metoderna för att kvantifiera dem är tidsödande. Burkmetoden, har öppnat nya möjligheter genom att själva mätningen bara tar ett par veckor, till skillnad mot traditionella metoder, som koppmetoden, kräver år i provningstid. Denna korta mättid med burkmetoden har öppnat möjligheten att också bestämma hur fukttransportegenskaper utvecklas med tiden, vilket tidigare inte varit möjligt.

I projektet har egenskaperna hos fem betonger med olika vbt och olika grad av inblandning av slagg undersökts. Desorptionsisotermerna har bestämts på tunna skivor i klimatboxar. Fukttransportegenskaperna har mätts med burkmetoden efter 3, 6 och 12 månaders härdningstid, men också med koppmetoden på välhärdade, tunna skivor.

2 Material och provkroppar

Undersökningarna har gjorts på betonger med olika inblandning av slagg. Cementet var ett OPC, CEM I 52.5 R (Velox) och slaggen var Merit. Merit är en mald, granulerad masugnsslagg med $\text{CaO/SiO}_2=1.0^1$. Ballasten till betongerna kom från Swerocks täkt i Blentarp.

Betongerna blandades i Swerocks fabrikslabb i Ystad i en 50 liters laboratorieblandare och göts i plåtburkar och plaströr.

Sammansättningarna av de fem betongerna ges i Tabell 2.1.

Beteckningen för betongen har följande betydelse:

V30M 0,35	vct 0,35 Velox 30 % Slagg
V30M 0,4	vct 0,40 Velox 30 % Slagg
V50M 0,40	vct 0,40 Velox 50 % Slagg
V 0,40	vct 0,40 Velox
V30M 0,55	vct 0,55 Velox 30 % Slagg

TABELL 2.1. Sammansättningar hos betongerna.

Material	V30M 0,35	V30M 0,4	V50M 0,40	V 0,40	V30M 0,55	
Vatten	175.0	182.0	182.0	182.0	185.0	kg/m ³
Velox	350.0	322.0	230.0	460.0	237.0	kg/m ³
Merit	150.0	138.0	230.0		101.0	kg/m ³
Tillsats-	5.0	3.5	3.2	3.5	2.0	kg/m ³
medel	2.0	1.4	1.4	1.4	1.0	kg/m ³
Lufthalt						kg/m ³
Ballast 0-2	737	747	744	750	796	kg/m ³
Ballast 4-8	85	86	86	87	90	kg/m ³
Ballast 8-16	877	888	886	893	908	kg/m ³
Våtvikt	2381	2368	2363	2377	2321	kg/m ³
Alfa	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8	
Kemiskt bundet	52.5	56.4	40.3	80.5	47.4	kg/m ³
Torrsvikt (kg/m ³):	2259	2242	2221	2275	2183	kg/m ³
Bindemedelshalt kg/kg "torrsvikt", inkl w _e (11%RF)						
	0.221	0.205	0.207	0.202	0.155	
Bindemedelshalt	500	460	460	460	338	kg/m ³

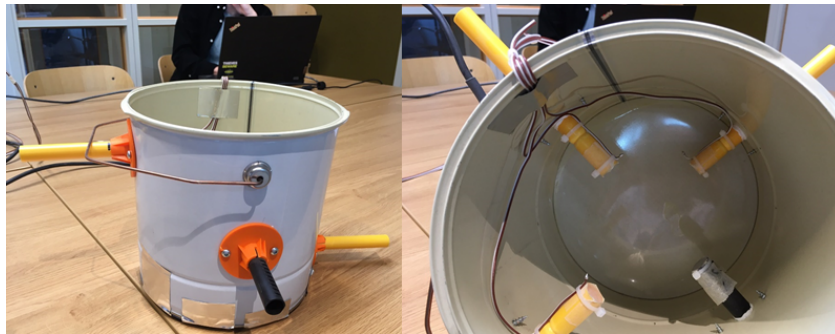
Mängden "kemiskt bundet vatten" har beräknats med en hydratationsgrad hos cementet på 0.7. Detta inkluderar då fukt bundet vid 11 % RF. Denna ingår i "torrsvikten". Antagandena som ligger bakom beskrivs i kapitel 4 nedan.

¹ Som jämförelse kan nämnas att den slagg som Olsson et al (2018) använde hade $\text{CaO/SiO}_2=1.17$, dvs betydligt mer CaO.

2.1 Betong i plåtburkar för burkmetoden

Betongerna göts 2022-09-08 i plåtburkar med en diameter av ca 24 cm och en höjd av ca 17 cm. Den exakta diametern och tjockleken hos betongen i varje burk mättes upp. Burkarna försågs med tätslutande plåtlock och vägdes regelbundet. Burkarna isolerades på ovansidan med en cellplastskiva under den första veckan efter gjutning för att undvika kondens på lockets insida.

En del burkar försågs med rör genom plåten på olika höjder för senare mätning av RF, se figur 2.1.



Figur 2.1 Plåtburk bestyckad med ett antal plaströr för mätning av RF på olika djup.

2.2 Skivor till sorptions- och koppförsök

Ur en del av plåtburkarna med betong borrades betongcylindrar med en diameter av 64 mm som sågades upp i 10 mm tjocka skivor ur de centrala delarna av betongcylindrarna; de översta och understa 10 mm användes inte.

Betongskivorna för sorptionsförsöken sågades ut 2023-06-10, dvs efter att ha varit härdade i plåtburkar med lock under ca 8 månader vid ca +20°C. Direkt efter sågning placerades de blöta skivorna i klimatboxar med olika RF, se nedan.

Betongskivorna för koppförsöken sågades ut 2023-11-23, dvs efter att ha varit härdade i plåtburkar med lock under ca 14 månader vid ca +20°C. Skivorna placerades efter mätning av tjocklek och diameter i en klimatbox med 94 % RF.

Respektive skivas placering i höjddled i de utborrade cylindrarna noterades. Tjockleken hos skivorna mättes i tre punkter.



Fig. 2.2.1 Utbörning av betongcylindrar, ur betong gjuten i plåtburkar.

3 Bestämning av desorptionsisotermer

En del av de utsågade skivorna placerades, efter åtta månaders härdning, i klimatboxar med mättade saltlösningar som skapade RF = 11, 33, 54, 75, 85 respektive 95 %. Efter ytterligare ca två månader vägdes skivorna en första gång. Skivorna vägdes sedan regelbundet för att avgöra när de kommit i jämvikt med respektive klimat. Det visade sig behövas ytterligare ca 300 dygn för att nå detta. Därefter torkades skivorna genom att ändra klimatet i boxarna till 11 % RF. Jämvikt inväntades, vilket tog ca 100 dygn.

Betongerna har alltså härdat en lång tid då slutvägningarna sker. Förändringen av sorptionskurvan är dock marginell efter att betongen har initialt härdat i åtta månader. Det är främst i toppen av isotermen som en viss ändring sker, Linderoth et al (2020).

3.1 Viktändringar

Ett exempel på viktbestämning visas i nedanstående diagram.

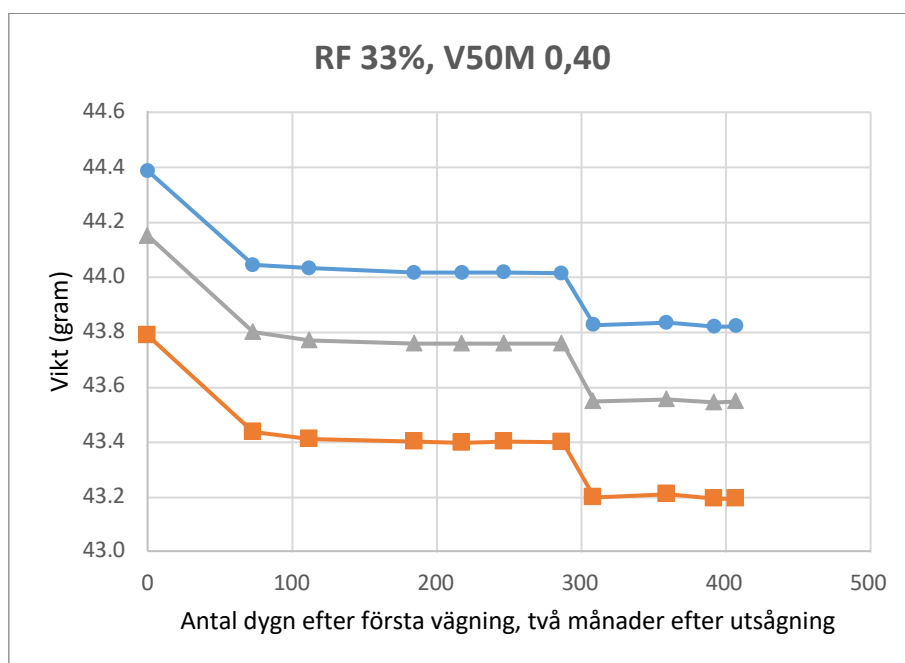


Fig. 3.1 Vikt hos tre betongskivor av betong V50M 0,40 i klimatbox med 33 % RF under ca 300 dygn och därefter i klimatbox med 11 % RF under ca 100 dygn

En del skivor fick en viss ökning av vikten med tiden, mest accentuerat vid 95 % RF, se figuren nedan. En möjlig förklaring till detta är att skivorna har fått en kraftig självuttorkning till långt under 95 % RF. Uppfuktningen under utborrning av cylindrar och utsågning av tunna skivor har inte gett någon större uppfuktning. När skivorna sedan placerats under lång tid i 95 % RF har de långsamt uppfuktats, dvs de har följt en skanningkurva.

En liknande tendens till viktökning finns hos skivor även vid lägre RF för vissa av betongerna. Detta talar emot att det bara skulle vara en effekt av självuttorkning.

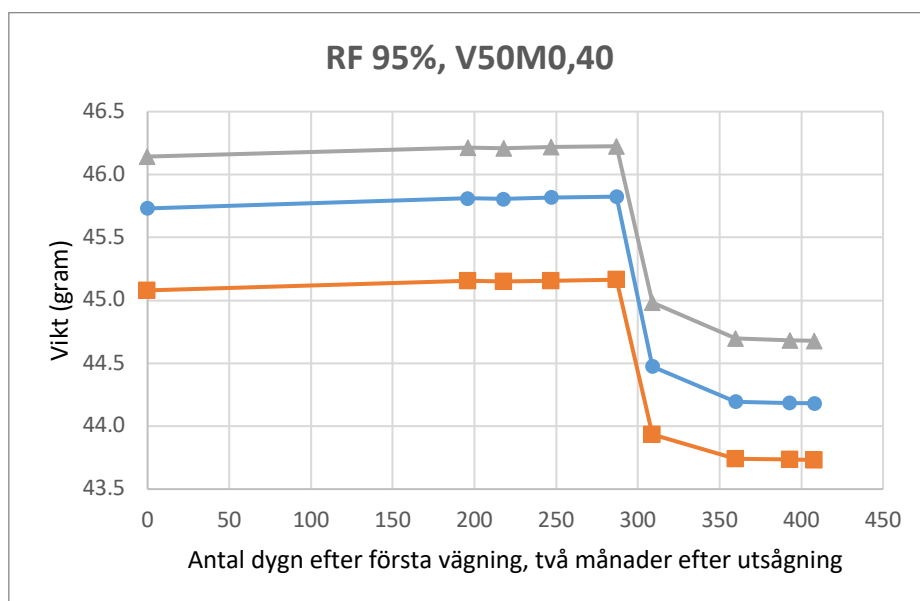


Fig. 3.2 Vikt hos tre betongskivor av betong V50M 0,40 i klimatbox med 95 % RF under ca 300 dygn och därefter i klimatbox med 11 % RF under ca 100 dygn

I projektet har vikter vid jämvikt med 11 % RF valts som "torrvikt", dvs all det vatten som finns kvar efter torkning i 11 % RF betraktas som "kemiskt bundet". Detta gör det något besvärligt att jämföra sorptionskurvor med tidigare bestämda sorptionskurvor, men en omräkning görs för detta. För utvärderingen av burkmätningarna spelar det ingen roll eftersom det är fuktkapaciteten mellan två RF som behövs där och inte absolutvärdena.

3.2 Utvärdering

Utvärderingen av desorptionsisotermerna har gjorts på följande vis. Skillnaden i vikt hos respektive skiva vid sista vägningen i respektive klimat och vid sista vägningen i 11 % RF är mängden "fukt" i skivan, m_w (gram). Då denna divideras med "torrvikten" vid 11 % RF erhålls fuktkvoten i gram/gram torrvikt. I "torrvikten" ingår inte bara bindemedlet och ballasten utan också det kemiskt bundna vattnet. Detta har grovt uppskattas genom att

- uppskatta cementets hydratationsgrad, 0.6 för vbt 0.3, 0.7 för vbt 0.4 och 0.8 för vbt 0.55,
- utgå från att det kemiskt bundna vattnet i slaggreaktionen bara är en del av det kemiskt bundna vattnet hos cementet, dvs att inget extra vatten binds kemiskt av slaggreaktionen
- uppskatta maximalt möjlig mängd kemiskt bundet vatten till 0.25 kg/kg cement, med ledning av data från Linderöth (2020).

Alla tre uppskattningarna kan diskuteras! Litteraturen är något otydlig på dessa punkter men den fortsatta utvärderingen har gjorts med dessa antaganden.

För att få fram användbara desorptionsisotermerna, uttryckta i kg vatten per kg bindemedel, behövs mängden bindemedel per kg torrvikt. Beräkningen av dessa finns redovisade i Tabell 2.1. Resultatet redovisas i Tabell 3.1.

Tabell 3.1. Jämviktsfuktkvoter (kg/kg torrsvikt) i sex klimat för de undersökta betongerna. (Värden markerade med gult är ”avvikande”; de flesta genom att de är lägre än vid närmast lägre RF).

Material	11	33	54	75	85	95
V30M 0,35	0	0.38	1.67	2.65	3.03	3.19
	0	0.43	1.57	2.52	2.84	2.68
	0	0.43	1.70	2.79	3.12	3.00
MV	0	0.41	1.65	2.66	3.00	2.96
V30M 0,55	0	0.23	0.86	2.94	3.75	3.26
	0	0.23	0.90	2.84	3.58	3.63
	0	0.26	0.88	2.67	3.47	4.18
MV	0	0.24	0.88	2.81	3.60	3.69
V50M 0,40	0	0.47	1.91	3.18	3.60	3.71
	0	0.48	1.81	3.14	3.45	3.46
	0	0.44	1.89	3.13	3.51	3.28
MV	0	0.47	1.87	3.15	3.52	3.48
V30M 0,4	0	0.36	1.49	3.14	3.12	3.02
	0	0.33	1.51	2.69	3.19	3.23
	0	0.32	1.46	3.06	3.02	3.04
MV	0	0.34	1.49	2.96	3.11	3.10
V 0,40	0	0.14	1.03	2.23	2.89	3.44
	0	0.16	0.87	2.14	2.79	3.08
	0	0.17	0.91	2.38	3.11	3.07
MV	0	0.16	0.94	2.25	2.93	3.19

Värdena åskådliggörs i diagrammen på nästa sida.

Spridningen är stor, särskilt vid 95 % RF. Det bör observeras att varje punkt i diagrammen härrör från en betongskiva, dvs kurvorna kommer från en av tre skivor i respektive klimat, dvs punkterna på respektive kurva har inget egentligt samband mer än numreringen av skivorna.

I fortsättningen används medelvärdet för de tre punkterna i respektive klimat.

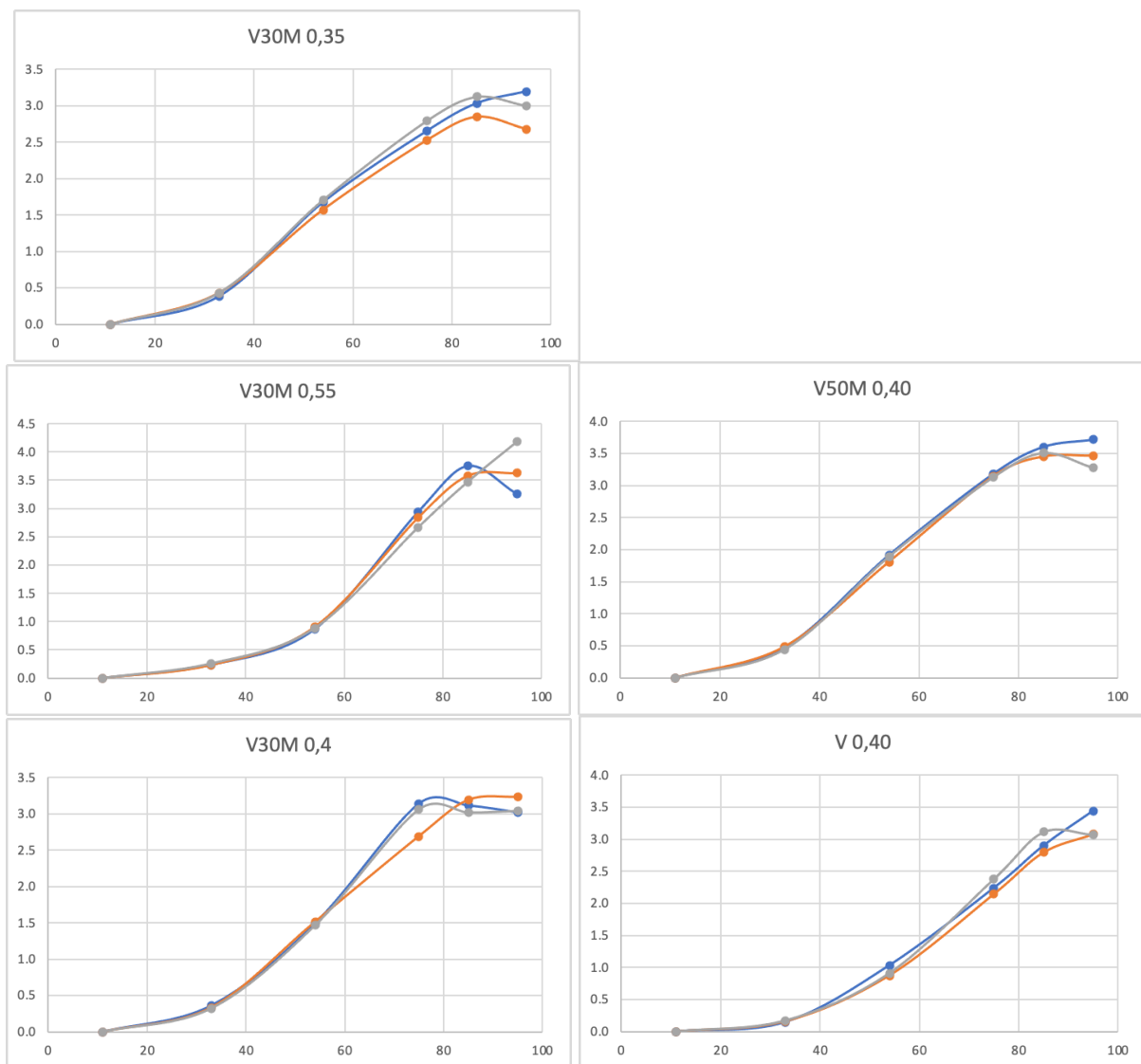


Fig. 3.3 Desorptionsisotermerna för 3 x 6 skivor av de fem betongerna, uttryckta som fuktkvot i procent av torrvikten vid 11 % RF

3.3 Desorptionsisotermer som kg/kg bindemedel

De enskilda värdena i figur 3.3 bör betraktas som oberoende där de 18 punkterna för respektive betong utgör observationer av desorptionsisotermen. Genom att använda medelvärdet av de tre skivorna vid respektive RF, och räkna om till kg/kg bindemedel, erhålls desorptionskurvorna i figur 3.4 och 3.5.

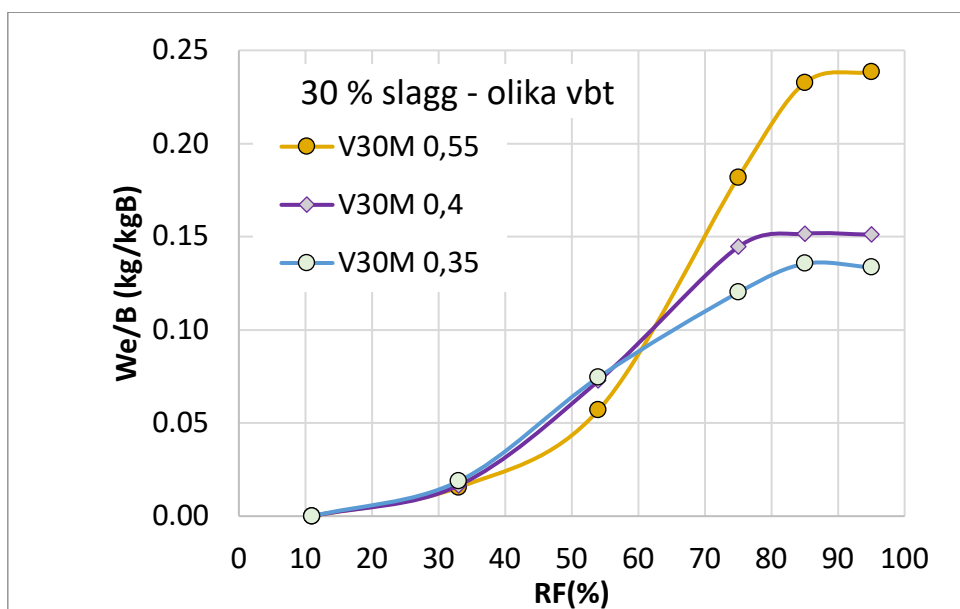


Fig. 3.4 Jämförelse av desorptionsisotermer för de tre betongerna med 30 % slagg, uttryckta som kg per kg bindemedel. Varje punkt är medelvärdet från tre skivor

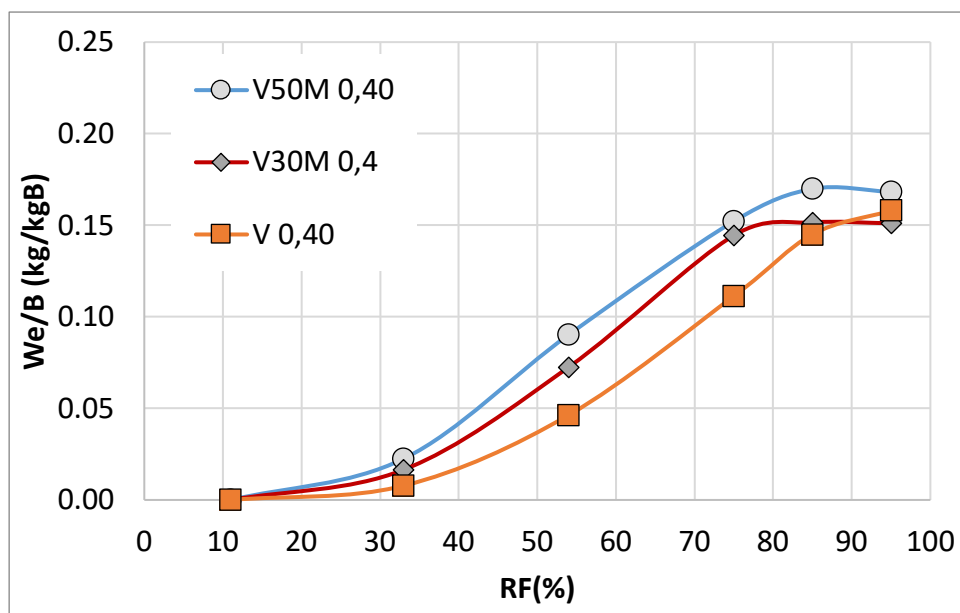


Fig. 3.5 Jämförelse av desorptionsisotermer för de tre betongerna med vct/vbt 0.40 och olika slagginblandning, uttryckta som kg per kg bindemedel. Varje punkt är medelvärdet från tre skivor

3.4 Jämförelser med tidigare desorptionsisotermer

Desorptionskurvorna för betongen med vct 0.4, utan slagg, jämförs med desorptionsisotermen enligt Nilsson (2021) och Olsson et al (2018) i figur 3.6.

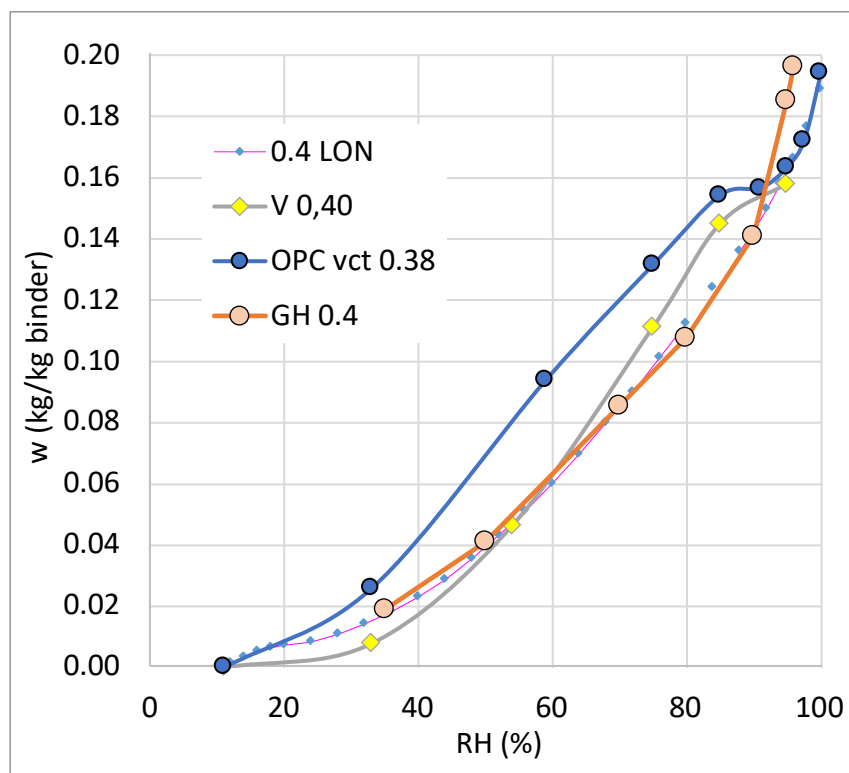


Fig. 3.6 Desorptionsisotermer för betongen med vct 0.40, utan slagg, jämförda med desorptionsisoterm enligt Nilsson (2021) (0.4 LON), Hedenblad (1996)(GH 0.4) och enligt Olsson et al (2018)(OPCvct0.38).

Överensstämmelsen är förvånansvärt god. De nya desorptionsisotermerna är något mera krökta i den övre delen och har betydligt mindre fuktkapacitet i den delen. Det är ännu mer accentuerat i data från Olsson et al (2018) som har en nästan horisontell platta i RF-intervall 85-90 % RF.

Desorptionsisotermerna för betonger med 30 % slagginblandning visas i figur 3.7. De har alla ett märkligt utseende i den övre delen med en nästan helt horisontell del högst upp. Men det är precis samma resultat som erhöles av Olsson et al (2018), se nedan. Det skulle innebära att dessa betonger inte har några kapillärporer alls i det området, men har större kapillärporer motsvarande området över 95 % RF.

Värdena för 85 och 95 % RF ser dock märkliga ut, där värdet för 95 % RF ibland t o m är lägre än vid 85 % RF. Åtminstone 95%-punkten måste ifrågasättas.

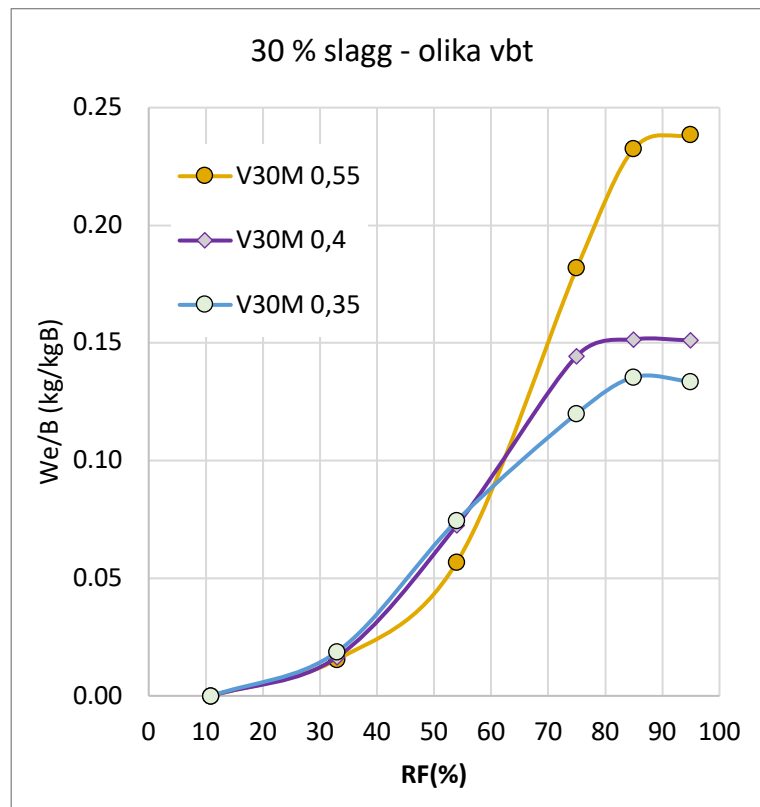


Fig. 3.7 Desorptionsisotermer för betongerna med 30 % slagg och olika vbt.

Formen hos desorptionsisotermerna för betongerna med 30 % slagginblandning påminner om formen hos desorptionsisotermerna bestämda av Olsson et al (2018) i klimatboxar, vid åtta månaders ålder, se figurerna nedan. En stor slagginblandning (70%) vid vbt 0.53 och 40–70 % inblandning för vbt 0.38 gav också en lägre fuktkapacitet i området 80 -95 % RF.

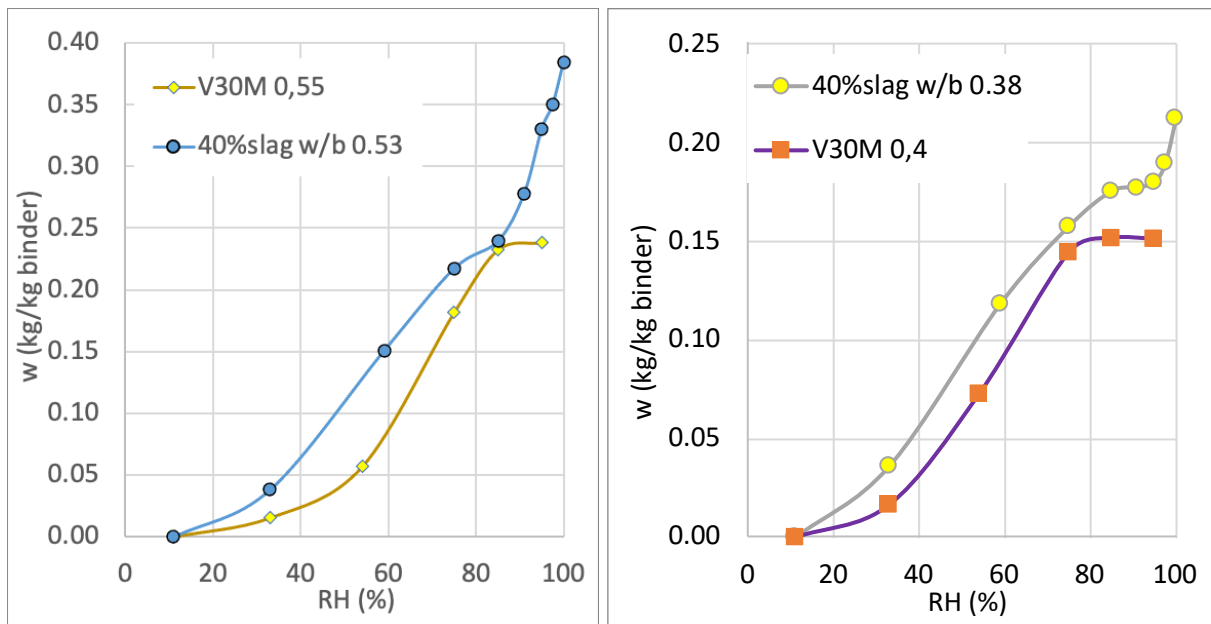


Fig. 3.9. Jämförelser med desorptionsisotermerna av Olsson et al (2018) för betonger/bruk med 30 resp. 40% slagginblandning och vbt 0.53-0.55 (till vänster) respektive vbt 0.38-0.40 (till höger)

Det är något förvånande att isotermerna enligt Olsson et al (2018) ligger högre hela vägen under 70-80% RF. Men det är en viss skillnad mellan slaggen som Olsson et al (2018) använde och slaggen som använts i de aktuella betongerna. Om denna skillnad kan förklara varför sorptionskurvorna skiljer sig åt får framtida studier visa.

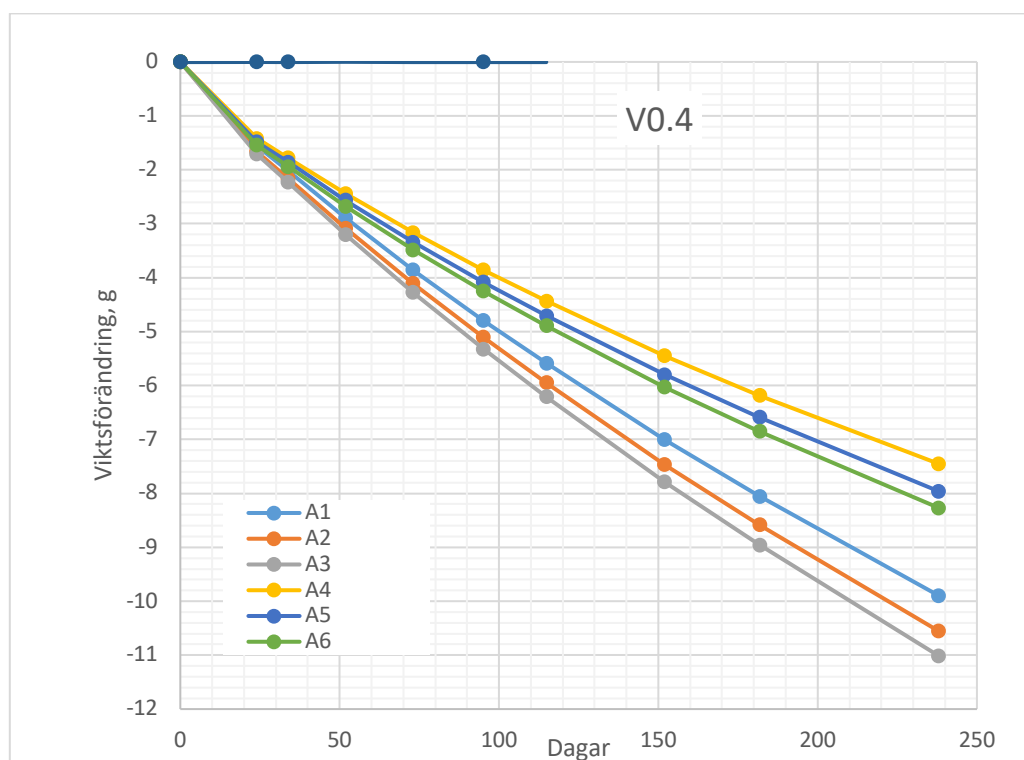
3.5 Slutsatser

Sorptionskurvorna för betong med slagginblandning har en tydlig ”platå” i området 80-95 % RF, vilket också är vad Olsson et al (2018) fann. Denna platå, med lokalt mycket liten fuktkapacitet, bör ha en viss inverkan vid mätning av RF där en RF-givare behöver en viss fuktmängd från betongen. Platån bör också inverka på uttorkningsförloppet genom att det behövs en väldigt liten mängd fukt som ska torka bort för att sänka RF ”förbi” platån. Desorptionsisotermerna ha en viss skillnad i området 33-59 % RF mellan de nu uppmätta och de som bestämdes av Olsson et al (2018), vars desorptionsisotermerna ligger högre i detta RF-område. Denna skillnad kan bero på skillnaden mellan de båda slaggen som använts.

4 Fukttransportegenskaper med koppmätningar

Tre skivor, av varje betong, med diametern 64 mm har monterats på koppar av glas innehållande en mättad saltlösning. Kopparna har placerats i en klimatbox med en mättad saltlösning som ger 33 % RF. Kopparna hade antingen 94 eller 85 % RF inuti kopparna.

Kopparna har vägts under ca 200-250 dygn för att kunna identifiera när stationärt fuktflöde ut ur kopparna har uppnåtts. Ett exempel på viktändringar med tiden ges i figur 4.1.



Figur 4.1.1 Ett exempel på uppmätta viktändringar hos tre+tre koppar med betongskivor.

Vägningarna kan avslutas när de tre sista punkterna ligger på en perfekt rät linje. Lutningen hos denna linje är då ett mått på fuktflödet ut ur koppen, uttryckt i gram per dygn. Detta flöde omräknas till SI-enheter och fukttransportkoefficienten δ , för ånghalten som fukttransportpotential, utvärderas ur följande ekvation

$$\delta = \frac{J \cdot \Delta x}{v_m \cdot \Delta RF}$$

där J är fuktflödet ($\text{kg/m}^2\text{s}$), Δx är tjockleken hos skivan, v_m är mätnadsånghalten vid den aktuella temperaturen och ΔRF är skillnaden mellan RF inuti koppen och utanför. För relativt täta material som betong kan fuktmotståndet hos luftskiktet normalt försummas.

4.1 Utvärdering av koppförsök

Exempel på utvärderingen av viktändringarna från sex koppar med betongskivor visas i Tabell 4.1.

TABELL 4.1 Exempel på viktändringshastigheter hos sex koppar med skivor av betong V0.4

Dygn	dM/dt (g/dygn)					
0.0	A1	A2	A3	A4	A5	A6
24.0	-0.065	-0.069	-0.071	-0.059	-0.062	-0.064
33.8	-0.047	-0.051	-0.053	-0.037	-0.039	-0.041
51.8	-0.048	-0.051	-0.054	-0.037	-0.039	-0.041
73.0	-0.046	-0.049	-0.051	-0.034	-0.037	-0.038
95.1	-0.0425	-0.0453	-0.0474	-0.0314	-0.0337	-0.0349
114.9	-0.0400	-0.0426	-0.0447	-0.0290	-0.0312	-0.0323
152.0	-0.0382	-0.0407	-0.0426	-0.0274	-0.0295	-0.0306
181.8	-0.0351	-0.0375	-0.0392	-0.0247	-0.0266	-0.0275
238.0	-0.0328	-0.0351	-0.0366	-0.0226	-0.0244	-0.0252
	V 0.4 1	V 0.4 2	V 0.4 3	V 0.4 4	V 0.4 5	V 0.4 6
RF(%)	94	94	94	85	85	85

Som framgår av den sista raden av de färgmarkerade i tabellen är det ännu inte riktigt stationärt flöde efter 238 dygn. Detta ger ett visst systematiskt fel hos fukttransportkoefficienten från koppmätningarna; den blir något för stor.

Flödena på sista raden används för utvärderingen av fukttransportkoefficienten.

Samtliga utvärderade fukttransportkoefficienter från koppmätningarna med skivor från de fem betongerna redovisas i Tabell 4.2.

För betongerna med vbt 0.4 gav slagginblandningen en halvering av fukttransportkoefficienterna, men 50 % slagginblandning gav inte större effekt än 30 % inblandning. Med samma slagginblandning (30%) finns det en tydlig effekt av vbt, med mer än en fördubbling från vbt 0.35 till vbt 0.55.

Värdena för betongerna i det högre RF-intervallet är något större än för det lägre RF-intervallet, dvs för samtliga betonger finns det ett visst fuktberoende. Detta fuktberoende fanns inte då Olsson et al (2018) gjorde koppmätningar på mycket välhårdade bruk med liknande vbt och slagginblandning.

RF-beroendet diskuteras nedan, i avsnitt 5.7.

TABELL 4.2 Utvärdering av fukttransportkoefficienter ur koppmätningarna på tre skivor i de två RF-intervallen för de fem betongerna.

		Tjocklek på prov, mm							Flöde		V30M 0.4		
RF i kopp	RF i box	T1	T2	T3	MV	Diam.	Area(m2)		g/dygn		Delta (m2/s)	MV	STDAV
94	33	10.35	10.10	10.20	10.22	64.5	0.003267	-0.0135	C1		4.63E-08		
94	33	10.30	10.19	10.35	10.28	64.4	0.003260	-0.0144	C2		4.99E-08	4.98E-08	3.51E-09
94	33	10.33	10.26	10.29	10.29	64.5	0.003269	-0.0154	C3		5.33E-08		
85	33	10.33	10.14	10.22	10.23	64.6	0.003279	-0.0114	C4		4.58E-08		
85	33	10.23	10.36	10.08	10.22	64.4	0.003261	-0.0112	C5		4.52E-08	4.58E-08	5.84E-10
85	33	10.43	10.49	10.32	10.41	64.7	0.003285	-0.0114	C6		4.63E-08		
		Tjocklek på prov, mm							Flöde		V30M 0.35		
		T1	T2	T3		Diam.			g/dygn		Delta (m2/s)	MV	STDAV
94	33	10.57	10.35	10.43	10.45	64.64	0.003282	-0.0093	B1		3.25E-08		
94	33	10.6	10.33	10.31	10.41	64.67	0.003285	-0.0109	B2		3.78E-08	3.57E-08	2.86E-09
94	33	10.35	10.37	10.4	10.37	64.66	0.003284	-0.0107	B3		3.70E-08		
85	33	10.52	10.5	10.47	10.5	64.88	0.003306	-0.0075	B4		3.08E-08		
85	33	10.38	10.38	10.4	10.39	64.8	0.003298	-0.0080	B5		3.23E-08	3.13E-08	9.03E-10
85	33	10.44	10.45	10.46	10.45	64.6	0.003278	-0.0075	B6		3.07E-08		
RF(%)		Tjocklek på prov, mm							Flöde		V0.4		
inuti	utanför	T1	T2	T3	MV	Diam.	Area (m2)		(g/dygn)	kopp	Delta (m2/s)	MV	STDAV
94	33	10.31	10.24	10.33	10.29	64.55	0.003273	-0.0328	A1		1.13E-07		
94	33	10.31	10.35	10.43	10.36	64.47	0.003264	-0.0351	A2		1.22E-07	1.20E-07	6.50E-09
94	33	10.28	10.19	10.17	10.21	64.4	0.003257	-0.0366	A3		1.26E-07		
85	33	10.67	10.57	10.75	10.66	64.63	0.003281	-0.0226	A4		9.43E-08		
85	33	10.45	10.39	10.52	10.45	64.64	0.003282	-0.0244	A5		9.99E-08	9.91E-08	4.45E-09
85	33	10.4	10.48	10.39	10.42	64.65	0.003283	-0.0252	A6		1.03E-07		
		Tjocklek på prov, mm							Flöde		V50M 0.4		
		T1	T2	T3		Diam.			g/dygn		Delta (m2/s)	MV	STDAV
94	33	10.53	10.54	10.54	10.54	64.63	0.003281	-0.0149	E1		5.25E-08		
94	33	10.49	10.46	10.67	10.54	64.63	0.003281	-0.0150	E2		5.28E-08	5.13E-08	2.28E-09
94	33	10.49	10.45	10.46	10.47	64.52	0.003269	-0.0139	E3		4.87E-08		
85	33	10.39	10.57	10.63	10.53	64.47	0.003264	-0.0122	E4		5.05E-08		
85	33	10.59	10.64	10.58	10.6	64.66	0.003284	-0.0120	E5		4.99E-08	5.017E-08	3.26E-10
85	33	10.85	10.69	10.53	10.69	64.61	0.003279	-0.0119	E6		5.00E-08		
		Tjocklek på prov, mm							Flöde		V30M 0.55		
		T1	T2	T3		Diam.			g/dygn		Delta (m2/s)	MV	STDAV
94	33	10.43	10.51	10.43	10.46	64.67	0.003285	-0.0280	D1		9.76E-08		
94	33	10.25	10.3	10.16	10.24	64.59	0.003277	-0.0249	D2		8.55E-08	9.10E-08	6.12E-09
94	33	10.27	10.21	10.12	10.20	64.6	0.003278	-0.0264	D3		9.01E-08		
85	33	10.14	10.23	10.13	10.17	64.44	0.003261	-0.0210	D4		8.43E-08		
85	33	10.11	10.28	10.27	10.22	64.61	0.003279	-0.0220	D5		8.83E-08	8.51E-08	2.81E-09
85	33	10.23	10.2	10.25	10.23	64.49	0.003266	-0.0206	D6		8.28E-08		

4.2 Fukttransportkoefficienter i intervallet 85-94 % RF

I teorin kan värdena i de båda RF-intervallen 33-85 respektive 33-94 utnyttjas för att uppskatta fukttransportkoefficienten i RF-intervallet 85-94 % RF, med en metod enligt Saeidpour & Wadsö (2016). Om täljaren och nämnaren i deras ekvation (7) divideras med mätnadsånghalten får man

$$\delta_{12} = \frac{\delta_{02}(RF_2 - RF_0) - \delta_{01}(RF_1 - RF_0)}{RF_2 - RF_1} \quad (4.4.1)$$

där δ_{12} är fukttransportkoefficienten i RF-intervallet (RF_1, RF_2) .

Denna utvärdering har gjorts och resultatet ingår i figurerna 5.8.1 och 5.8.2.

5 Fukttransportegenskaper med Burkmetoden

5.1 Viktändringar

De 45 burkarna, nio av varje betong, härdade under lock i 3, 6 eller 12 månader, har vägts efter att locket tagits av under en period av 4-5 månader. Viktändringarna under dessa perioder har utvärderats som funktion av kvadratroten ur tiden, se exemplet i figur 5.1.

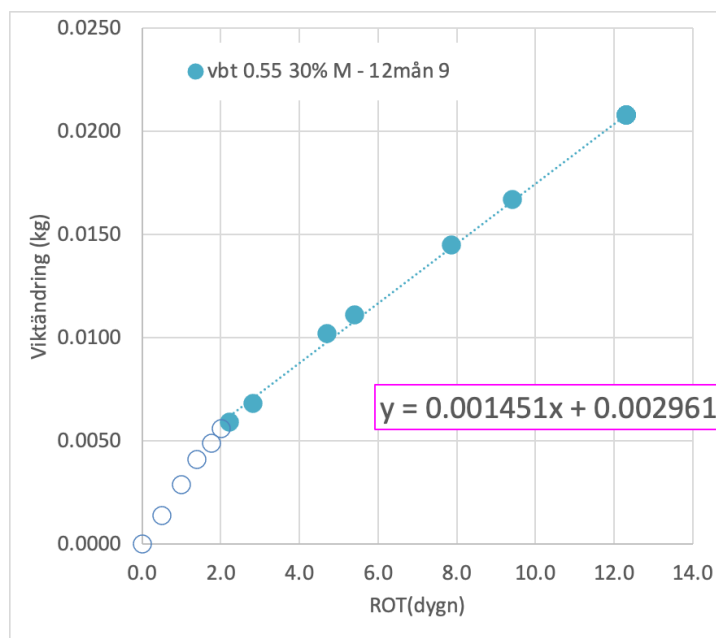


Fig. 5.1 Exempel på viktändring hos burk som funktion av kvadratroten ur tiden, med en viss avvikelse från en rät linje de första dygnet.

De första dygnet uppkommer viktändringen främst av att fukt torkar från det cementrika ytskiktet. Förloppet är då inte linjärt beroende av kvadratroten ur tiden utan bildar en krökt kurva. Efter några dagar, då fukt börjar avgå från större djup blir förloppet i huvudsak linjärt. Lutningen k hos denna linje används nedan för utvärdering av fukttransportkoefficienten.

Resultaten från de 45 burkarna är sammanställda i BILAGA 1 med viktändringarna i diagramform och i TABELL 5.1 som lutningen hos linjen i diagrammen i Bilaga 1.

Medelvärdena är i viss mån logiska, även om de inte är direkt proportionella mot fukttransportkoefficienten, med lägre värden för större härdningstid och störst värden för betongen utan slagg och betongen med högst vbt.

Spridningen är ibland stor. Uttryckt som variationskoefficient V (standardavvikelse i procent av medelvärdet) den ibland upp mot 20 %. Detta kan vara ett mått på osäkerheten hos det slutliga resultatet, fukttransportkoefficienten, eftersom övriga parametrar i utvärderingen är betydligt mindre osäkra.

TABELL 5.1 Utvärderade lutningar k från viktändringar hos 45 burkar

	k-värden [kg/ROT(dygn)]					
Betong	Brk	3 mån	Brk	6 mån	Brk	12 mån
vbt 0.35 30% M	1	0.000508	4	0.000489	7	0.000392
vbt 0.35 30% M	2	0.000465	5	0.000364	8	0.000398
vbt 0.35 30% M	3	0.000503	6	0.000407	9	0.000448
MV		0.000492		0.000420		0.000413
V(%)		5		15		7
vbt 0.40	1	0.001787	4	0.001268	7	0.001676
vbt 0.40	2	0.001728	5	0.001657	8	0.001623
vbt 0.40	3	0.001435	6	0.001773	9	0.001182
MV		0.001650		0.001566		0.001494
V(%)		11		17		18
vbt 0.40 30% M	1	0.000674	4	0.000507	7	0.000509
vbt 0.40 30% M	2	0.000644	5	0.000581	8	0.000537
vbt 0.40 30% M	3	0.000741	6	0.000600	9	0.000534
MV		0.000686		0.000563		0.000527
V(%)		7		9		3
vbt 0.40 50% M	1	0.000550	4	0.000517	7	0.000525
vbt 0.40 50% M	2	0.000574	5	0.000480	8	0.000411
vbt 0.40 50% M	3	0.000594	6	0.000425	9	0.000482
MV		0.000573		0.000474		0.000473
V(%)		4		10		12
vbt 0.55 30% M	1	0.001727	4	0.001682	7	0.001610
vbt 0.55 30% M	2	0.001794	5	0.001570	8	0.001593
vbt 0.55 30% M	3	0.001819	6	0.001617	9	0.001451
MV		0.001780		0.001623		0.001551
V(%)		3		3		6
(V=variationskoefficient)						

Medelvärdena i Tabell 5.1 omräknade till kg/m²ROT(s) för de aktuella betongstorlekarna, har nedan använts för utvärdering av fukttransportkoefficienten δ med nedanstående ekvation, Nilsson & Bergström (2020).

$$\delta_v = \frac{\pi k^2}{4 \cdot v_s(T) \cdot \frac{dw}{dRF} \cdot (RF_1 - RF_2)^2} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (5.1)$$

För detta behövs då

- RF_1 i respektive betong vid torkstart,
- RF_2 & T i torkklimatet,
- fuktkapaciteten dw/dRF (kg/m³ betong) hos respektive betong och härdningstid i RF -intervallet (RF_1 , RF_2)
- bindemedelshalten (kg/m³) hos respektive betong, eftersom fuktkapaciteten uttrycks som kg per kg bindemedel.

5.2 RF efter självuttorkning

RF har mätts i plåtburkarna på olika djup och med olika metoder, dels med Humiguard i borrhål, dels med Vaisala i ingjutna mätrör. Mätning gjordes efter tre, sex och 12 månaders förseglad härdning i plåtburkar. Före varje mätning borrades hålen upp något så att mätning gjordes några mm djupare in i ”ny” betong. Resultaten framgår av tabellen nedan.

TABELL 5.2. Uppmätta RF i burkarna, på några olika djup från ovankant. Gjutdatum 2022-09-08. Värden utan påslag för osäkerhet hos HG-sensor.

vbt			0.40	0.35	0.40	0.55	0.40
Merit (%)			50	30	30	30	0
3 månader		Djup (mm)					
2022-12-07	Humiguard	80	90.0	86.3	87.9	93.9	91.2
	Vaisala	80	86.9	83.8	87.2	95.0	90.5
2022-12-20	Humiguard	80	89.7	86.3	87.7	93.7	91.1
	Vaisala	80	84.6	81.3	86.2	93.3	90.6
6 månader							
2023-03-16	Humiguard	80	88.4	86.7	87.1	91.6	89.7
	Vaisala	80	78.7	78.2	83.6	93.6	88.7
12 månader							
2023-10-16	Humiguard	20		82.5	82.5		86.8
		90	87.0	84.5	84.8	89.9	89.0
		160	87.0	84.8	85.7	90.1	88.0
	Vaisala	90	84.0	78.4	84.9	89.8	88.1

Humiguardmätningen och Vaisalamätningen gav samma resultat, inom ca 1-2 % RF för betongen utan slagg och betongerna med vbt 0.40 och 0.55 med 30 % slagg. För betongerna med vbt 0.35 med 30 % slagg och betongen med vbt 0.40 med 50 % slagg var skillnaden större (3-10(!) % RF) vid några tillfällen. Dessa stora skillnader skapar en osäkerhet vid utvärderingen av burkmätningarna.

En möjlig förklaring till dessa svårigheter att mäta RF kan vara sorptionskurvornas horisontella del i området 85-95 % RF. Här är fuktkapaciteten i det närmaste noll (!) för vissa av betongerna. Vaisalagivarna har betydligt större fuktkapacitet än Humiguardgivarna och absorberar därför mer fukt från betongen i samband med mätningen. Detta kan förklara stora fel i RF på grund av de horisontella delarna av sorptionskurvorna.

Mätvärdena för RF i de förseglade burkarna i Tabell 5.2 är osäkra. Det går inte att avgöra vilka som är korrekta. Istället har det högsta och lägsta värdet valts för utvärderingen, som ett sätt att kvantifiera hur stor inverkan osäkerheten i RF-mätningarna har på den utvärderade fukttransportkoefficienten.

I den slutliga redovisningen har valts att använda RF-värdena från Humiguardmätningarna eftersom de är mer konsistenta.

5.3 Torkklimat

Temperatur och RF i klimatrummet där burkarna har torkat har loggats under hela torkperioden, se figur 5.3.

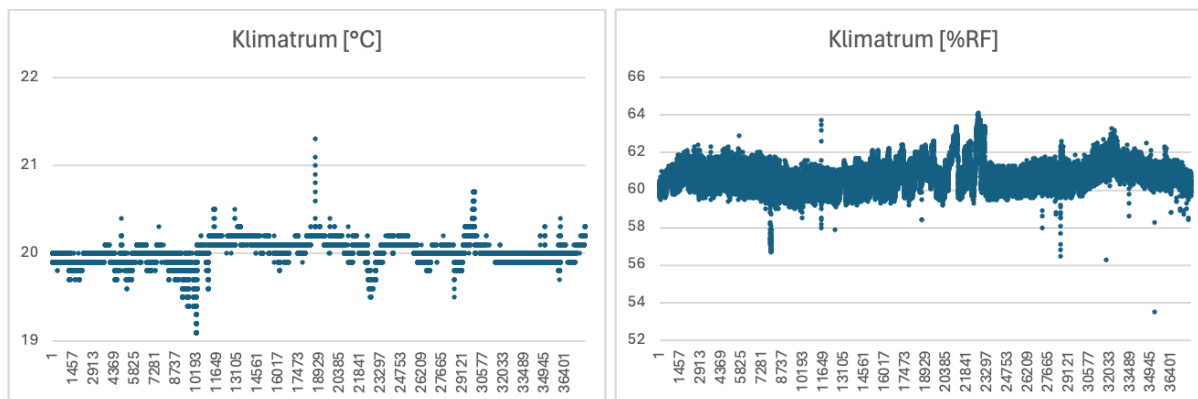


Fig. 5.3 Loggning av klimatet i klimatrummet.

Variationen var relativt liten, se Tabell 5.3.

TABELL 5.3 Klimatet i klimatrummet, medelvärden och standardavvikelse

	T[°C]	RF[%]
Mv	20.0	60.7
StdAv	0.1	0.7

5.4 Betongmått

Betongens torkyta är densamma för alla burkarna, med en diameter av 175 mm.

Betongtjockleken är något varierande men den ingår inte i utvärderingen.

5.5 Fuktkapaciteter

Fuktkapaciteten som behövs i utvärderingen, för respektive betong och härdningstid, är den som gäller mellan de båda relativa fuktigheterna RF_1 och RF_2 . RF_2 i klimatrummet har satts till 60.7 %. RF_1 för avläsning av den övre punkten på desorptionsisotermen har valts mellan den högsta och den lägsta i Tabell 5.1. Vid utvärderingen borde naturligtvis olika fuktkapaciteter valts. Skillnaden i fuktkapacitet bedöms dock som så liten att den spelar mindre roll. Skillnaden mellan högsta och lägsta RF_1 har betydligt större inverkan. Dessutom förändras fuktkapaciteten något med tiden. Desorptionsisotermen borde bli lite lägre i den övre delen med tiden, dvs fuktkapaciteten borde bli något mindre med ökad härdningstid. Detta har inte beaktats eftersom desorptionsisotermerna ändå är så osäkra i den övre delen.

Fuktkapaciteterna, som kg/kg bindemedel, har uppskattats grafiskt ur figurerna 3.5 och 3.6.

5.6 Inverkan av karbonatisering

Betongen i plåtburkarna exponeras för koldioxid i klimatrumsrummet, vilket påverkar viktändringarna. Fuktavgången blir därmed något underskattad. För att uppskatta denna inverkan har karbonatiseringsdjupen bestämts med fenolftalein i en burk av varje betong efter avslutade viktmätningar. Resultatet åskådliggörs i Figur 5.6.



Fig 5.6 Spräckta provkroppar besprutade med fenolftalein efter avslutade vägningar

Karbonatiseringsdjupet var inte mätbart i fyra av de fem betongerna. I betongen med vbt 0.55 var karbonatiseringsdjupet ca 3 mm. De utvärderade fukttransportkoefficienterna för denna betong blir därför något underskattade.

5.7 Fuktkoefficienter vid olika härdningstid

Alla värden har lagts in i TABELL 5.7.

Inverkan av RF i betongen vid torkstart är stor. Det är troligtvis så att de högre RF-värdena är mer sannolika. Dessa ger de fuktkoefficienter som anges som "RF-min" i Tabell 5.7. Medelvärdena av dessa åskådliggörs i nedanstående diagram.

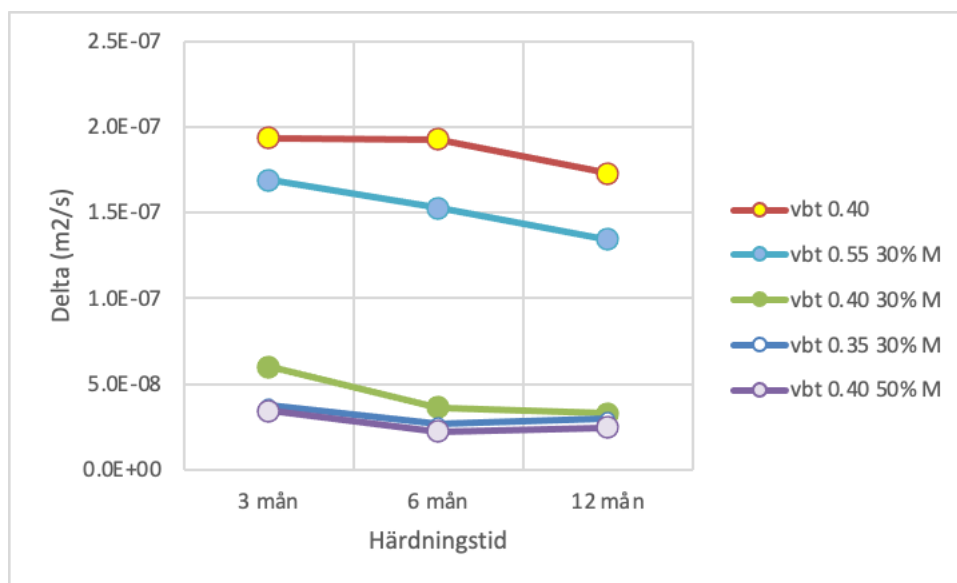


Fig. 5.7.1 Fuktkoefficienten δ (m^2/s) från burkmätningarna, med de högsta RF-värdena.

I figur 5.7.2 och 5.7.3 visas alla fuktkoefficienterna utvärderade ur respektive burk. Särskilt för betongen med vct 0.40 utan slaginblandning är spridningen stor.

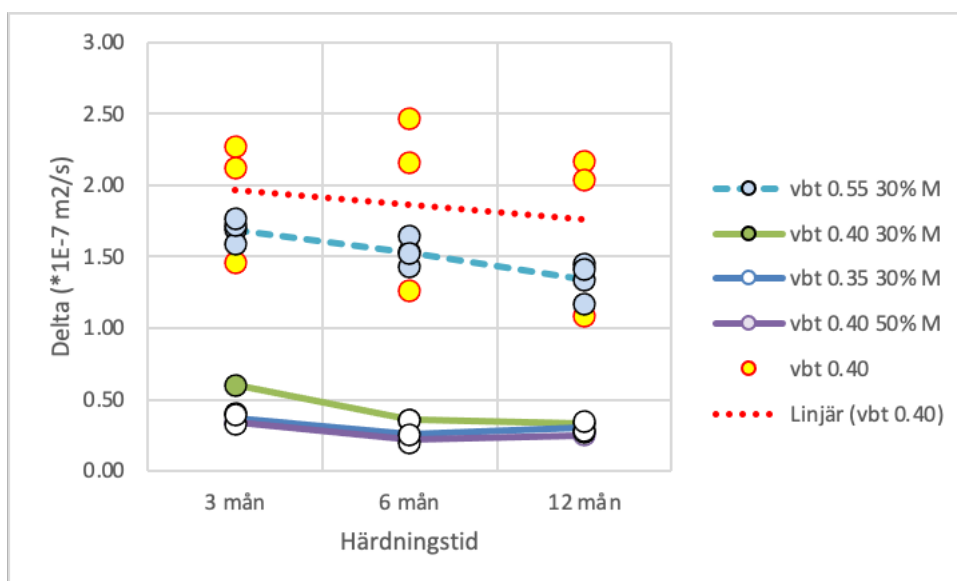


Fig. 5.7.2 Fuktkoefficienten δ (m^2/s) utvärderade ur tre burkar för varje betong och härdningstid.

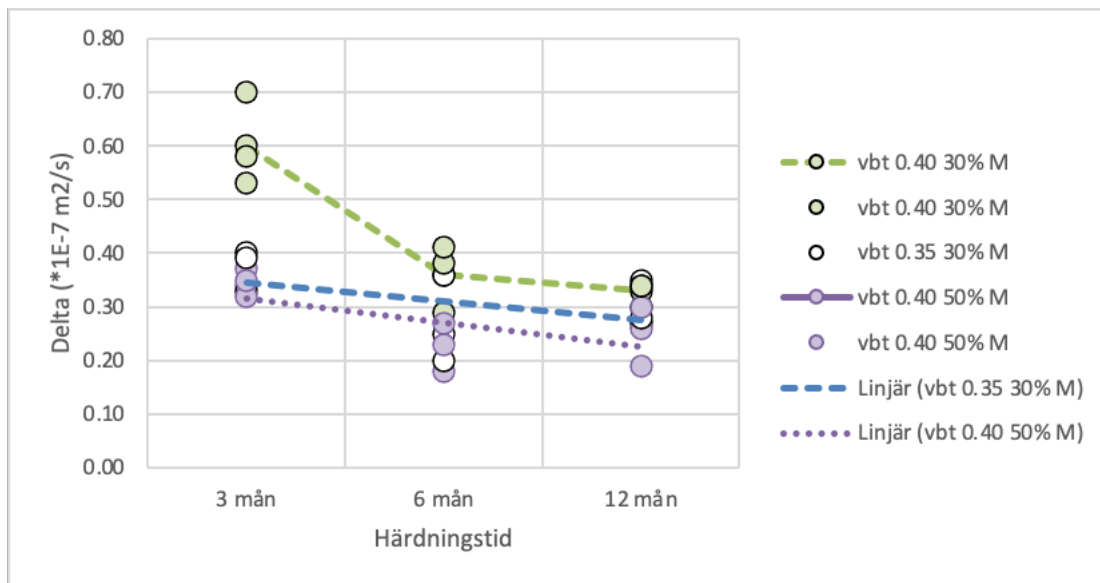


Fig. 5.7.3 Fukttransportkoefficienten δ (m^2/s) utvärderade ur tre burkar för varje betong och härdningstid. Betongerna med vbt 0.35 och 0.40 med slagginblandning. Observera skillnaden i skala på y-axeln jämfört med föregående figur.

Inverkan av härdningstiden är uppenbarligen möjlig att kvantifiera med burkmetoden. Men skillnaden mellan 3 och 12 månaders härdningstid är inte särskilt stor, cirka en faktor 2 för de tätare betongerna och ännu mindre skillnader för de mer öppna betongerna.

TABELL 5.7 Utvärdering av viktändringar från Burkmetoden

BURKMETODEN för fukttransportkoefficient							Version 8 2023-02-20/L-O Nilsson Moistenginst AB									
T-medel(C):	20	RF2-medel(%):			60.7	Diameter:	0.175	m	Tjocklek:	0.214	m	Area:	0.0241	m ²		
RF1(%)min:	81.3	78.2	78.4	90.5	88.7	86.8	86.2	83.6	82.5	84.6	78.7	84	93.3	91.6	89.8	
RF1(%)max:	86.3	86.7	84.8	91.2	89.7	89	87.9	87.1	85.7	90	88.4	87	95	93.6	90.1	
vm g/m ³	17.2															
BETONG	vbt 0.35 30% M			vbt 0.40			vbt 0.40 30% M			vbt 0.40 50% M			vbt 0.55 30% M			
Härdning	3 mån	6 mån	12 mån	3 mån	6 mån	12 mån	3 mån	6 mån	12 mån	3 mån	6 mån	12 mån	3 mån	6 mån	12 mån	
Lutning k	0.000492	0.000420	0.000413	0.001650	0.001566	0.001494	0.000686	0.000563	0.000527	0.000573	0.000474	0.000473	0.001780	0.001623	0.001551	
kg/ROT(s)	1.67E-06	1.43E-06	1.40E-06	5.61E-06	5.33E-06	5.08E-06	2.33E-06	1.91E-06	1.79E-06	1.95E-06	1.61E-06	1.61E-06	6.06E-06	5.52E-06	5.28E-06	
kg/m ² ROT(s)	6.96E-05	5.94E-05	5.84E-05	2.33E-04	2.21E-04	2.11E-04	9.71E-05	7.96E-05	7.45E-05	8.10E-05	6.70E-05	6.69E-05	2.52E-04	2.30E-04	2.19E-04	
Utvärdering																
vbt	0.35	0.35	0.35	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.55	0.55	0.55	
kg bindemedel B	500	500	500	460	460	460	460	460	460	460	460	460	338	338	338	
Fuktkapacitet																
dw/dRF per kg C	0.18	0.18	0.18	0.30	0.30	0.32	0.21	0.25	0.27	0.22	0.26	0.26	0.43	0.43	0.56	
dw/dRF kg/m ³	90	90	90	138	138	147	97	115	124	101	120	120	145	145	189	
RF1	0.813	0.782	0.784	0.905	0.887	0.868	0.862	0.836	0.825	0.846	0.787	0.84	0.933	0.916	0.898	
RF2	0.607	0.607	0.607	0.607	0.607	0.607	0.607	0.607	0.607	0.607	0.607	0.607	0.607	0.607	0.607	
RESULTAT	m ² /s															
Delta min	3.7E-08	2.6E-08	3.0E-08	1.9E-07	1.9E-07	1.7E-07	6.0E-08	3.6E-08	3.3E-08	3.4E-08	2.2E-08	2.5E-08	1.7E-07	1.5E-07	1.3E-07	
Delta max	5.8E-08	5.8E-08	5.5E-08	2.0E-07	2.1E-07	2.0E-07	6.8E-08	4.8E-08	4.3E-08	5.2E-08	5.3E-08	3.1E-08	1.9E-07	1.7E-07	1.4E-07	
Diffusiviteten D _w =	1.11E-11	1.12E-11	1.05E-11	2.53E-11	2.58E-11	2.37E-11	1.22E-11	7.17E-12	5.95E-12	8.81E-12	7.62E-12	4.52E-12	2.22E-11	2.05E-11	1.25E-11	

5.8 Jämförelse mellan burkmetoden och koppmetoden. RF-beroendet.

Resultaten från burkmätningarna på betonger som härdat i 12 månader jämförs med resultatet från koppmätningarna i nedanstående tabell.

TABELL 5.8 Medelvärden av fukttransportkoefficienter utvärderade med burkmetoden och koppmetoden på fem betonger, härdade 12 månader, i något olika RF-intervall.

	RF (%)	Betong				
		V30M 0.35	V30M 0.4	V30M 0.55	V50M 0.4	V 0.4
Koppar	85 - 33	3.13E-08	4.58E-08	8.51E-08	5.02E-08	9.91E-08
	94 - 33	3.57E-08	4.98E-08	9.10E-08	5.13E-08	1.20E-07
	94 - 85	6.14E-08	7.32E-08	1.25E-07	5.80E-08	2.43E-07
Burkar	95 - 61	2.97E-08	3.26E-08	1.34E-07	2.46E-08	1.73E-07
	olika RF: 85-90					
Koppar	T-test:	0.06	0.12	0.20	0.43	0.01

Medelvärdena i de olika RF-intervallen åskådliggörs i figur 5.8.1 och 5.8.2.

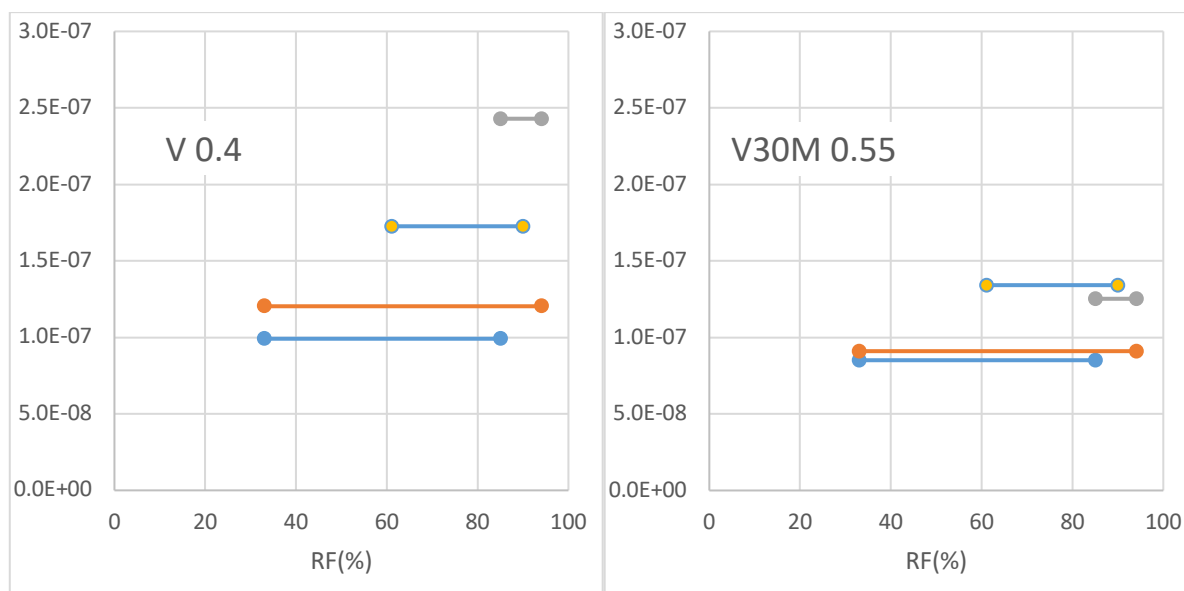


Fig. 5.8.1 Fukttransportkoefficienter från de båda metoderna (orange, blå och grå linjer från koppmetoden, gula linjer från burkmetoden) för de två betongerna med störst fukttransportkoefficient, med vbt 0.40 utan slagginblandning respektive med vbt 0.55 och 30 % slagginblandning.

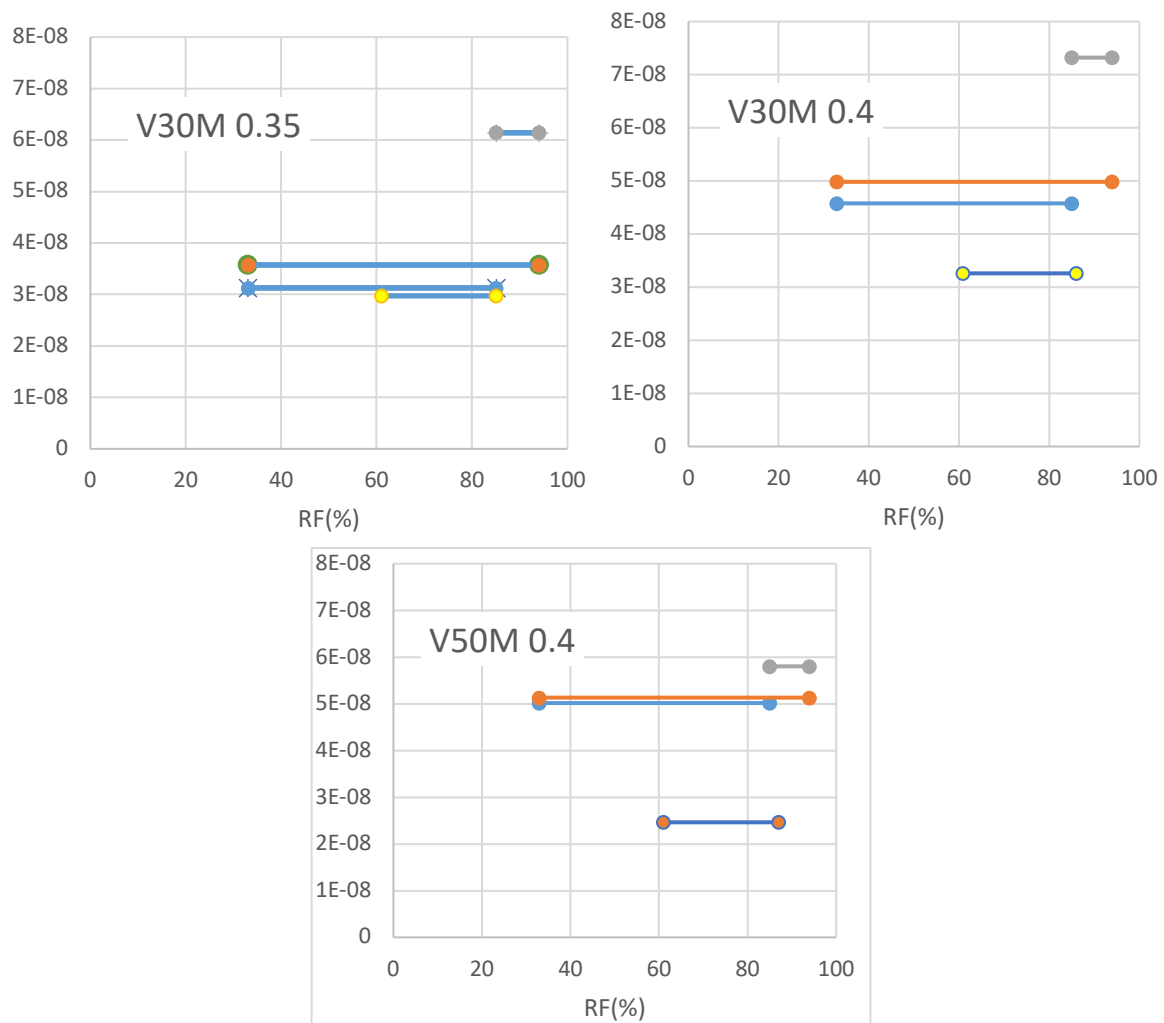


Fig. 5.8.2 Fukttransportkoefficienter från de båda metoderna (linjer mellan 61 och 90 % RF från burkmetoden; övriga från koppmetoden) för de tre betongerna med minst fukttransportkoefficient. Observera skillnaden i skala på y-axeln jämfört med föregående figur.

Värdena från de båda metoderna överensstämmer relativt väl. Skillnaderna mellan metoderna ligger inom en faktor 2. Koppmetoden gav för en betong (med 50 % slagginblandning) dubbelt så stor fukttransportkoefficient som burkmetoden. Burkmätningar gav en större fukttransportkoefficient än koppmetoden för de båda betongerna med störst fukttransport och tvärtom för de tre andra betongerna.

Resultaten tyder på ett visst fuktberoende hos fukttransportkoefficienten hos alla betongerna, störst för betongen V 0.4 utan slagginblandning, vilket också är vad Olsson et al (2018) såg för bruk.

På sista raden i Tabell 5.8 finns resultatet av ett s k t-test av medelvärdena från koppmätningarna i de båda RF-intervallen. Siffran ange sannolikheten för att medelvärdena är lika, dvs att det inte finns något RF-beroende. För betong V 0.4 är sannolikheten 1 %, för betong V50M 0.4 43 %, dvs för V 0.4 finns det ett tydligt fuktberoende hos fukttransportkoefficienten medan för V50M 0.4 är det ytterst tveksamt. Övriga tre betonger är sannolikheterna 6-20 %.

5.9 Jämförelse med tidigare mätningar

En jämförelse med data för ett antal andra betonger vars fukttransportegenskaper också nyligen bestämts med Burkmetoden visas i figur 5.9.

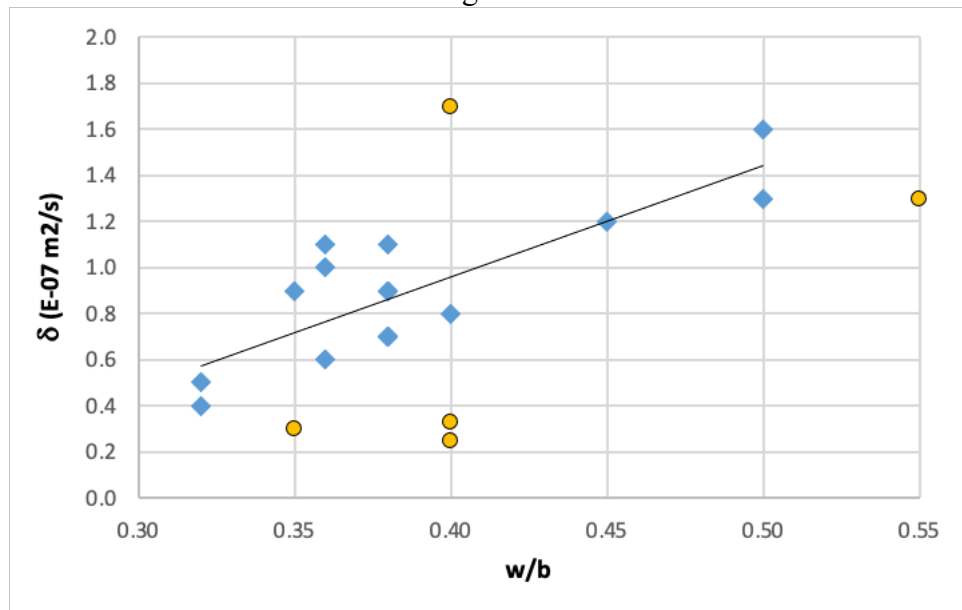


Fig. 5.9. Fukttransportegenskaper hos betonger uppmätta med Burkmetoden, från Nilsson (2023) (blå diamanter) och Tabell 5.7 (orange cirklar).

Värdena för de här undersökta betongerna avviker något från tidigare resultat. Betongen utan slagginblandning, med vct 0.40, har mycket större fukttransportkoefficient än övriga betonger. Betongerna med 30-50 % slagginblandning och vbt 0.35-0.40 har däremot betydligt lägre, ca hälften så stor, fukttransportkoefficient.

5.10 Fukttransportkoefficienter för beräkningar – förslag 1

För beräkningar av uttorkningsförlopp och fuktomfördelning behövs fuktberoendet hos fukttransportkoefficienterna. Detta kan uppskattas ur ovanstående mätningar. Ett exempel ges i nedanstående figur, för betongen med vct 0.40, utan slagginblandning. Mätvärdena från koppmetoden för denna betong har den största spridningen. Spridningen har markerats genom att visa alla utvärderade fukttransportkoefficienter i ett antal RF-intervall.

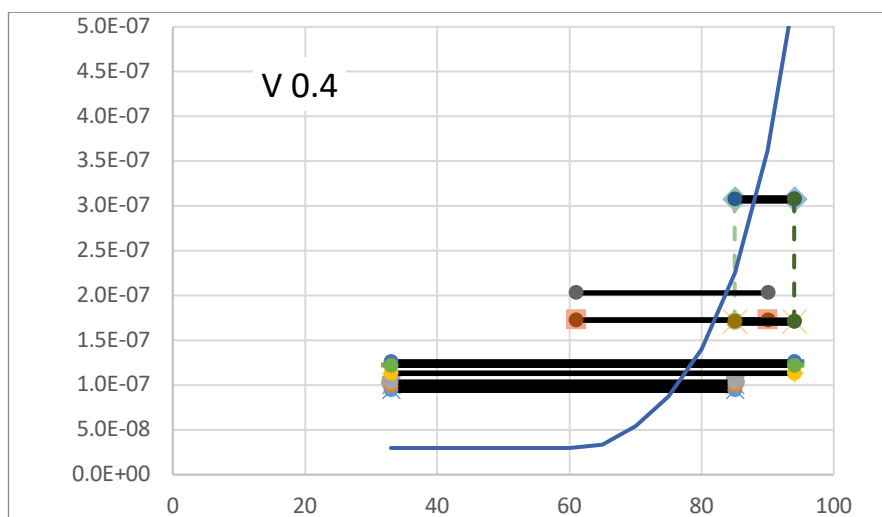


Fig. 5.10.1 Fukttransportkoefficienter för betongen med vct 0.40, utan slagginblandning, i olika RF-intervall (horisontella linjer) jämförda med en RF-beroende fukttransportkoefficient (kurva) motsvarande hälften av fukttransportkoefficienten för ett motsvarande bruk från Olsson et al (2018).

Som framgår av figuren ”passar” inte den inlagda kurvan; linjerna är inte medelvärdet av kurvan i respektive RF-intervall. Den borde ligga betydligt högre vid låga RF och något lägre vid höga. Ett nytt försök har gjorts i figur 5.10.2.

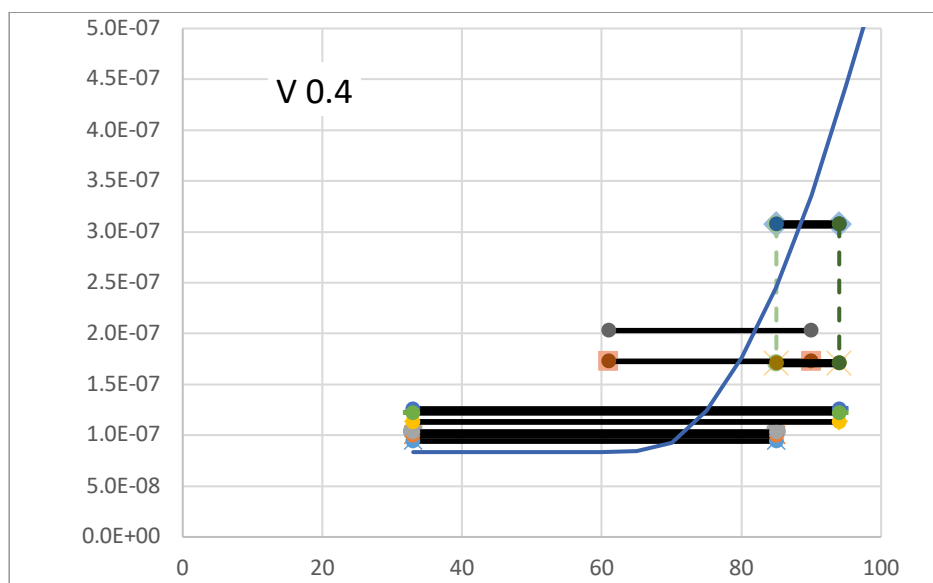


Fig. 5.10.2 Fukttransportkoefficienter för betongen med vct 0.40, utan slagginblandning, i olika RF-intervall (horisontella linjer) jämförda med en passad RF-beroende fukttransportkoefficient (kurva).

Men värdena i figur 5.10.1 och 5.10.2 är extremvärden. Utvärderingen av lämpliga fukttransportkoefficienter för fuktberäkningar borde baseras på medelvärden och den spridning som erhållits i mätningarna. En sådan utvärdering görs nedan.

Resultatet av t-testet i Tabell 5.8 visade att sannolikheten är stor för att det faktiskt finns ett visst RF-beroende hos fukttransportkoefficienten för fyra av de fem betongerna, mycket stort (99 %) hos V 0.4 och relativt stort (80-94 %) hos de tre betongerna med 30 % slagginblandning, märkligt nog störst hos betongen med lägst vbt. För betongen med störst slagginblandning, V50M 0.4, är sannolikheten lägst, bara 57 %, dvs det är tveksamt om det finns ett fuktberoende hos denna betong.

Frågan är hur skillnaden mellan koppmätningarna och burkmätningarna ska hanteras. Spridningen hos resultaten från de båda metoderna är mindre än skillnaden mellan dem och ingen av de båda metoderna kan påstås ge säkrare resultat än den andra. Här har valts att utgå ifrån medelvärdet från de nio provkropparna av respektive betong och lägga till ett visst fuktberoende från skillnaden mellan koppmätningarna i de två RF-intervallen.

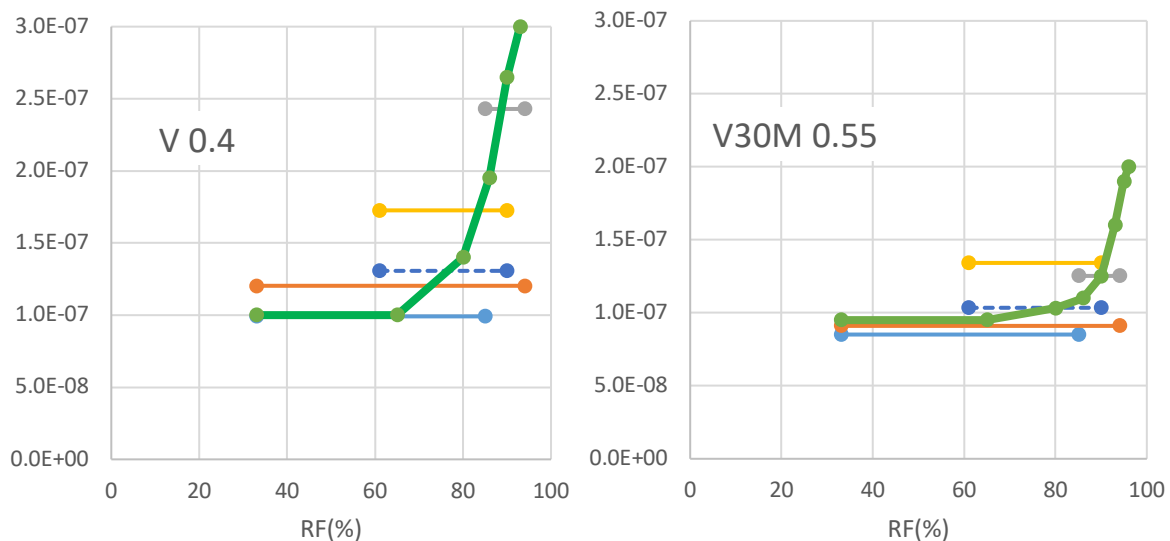


Fig. 5.10.3 Förslag (grön tjock kurva) till fukttransportkoefficienter för betongerna V 0.4 och V30M 0.55. Streckad linje är medelvärdet av kopp- och burkmätningarna

För betong V50M 0.4 föreslås en konstant fukttransportkoefficient på $\delta = 4 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ i hela fuktområdet, se figur 5.10.4.

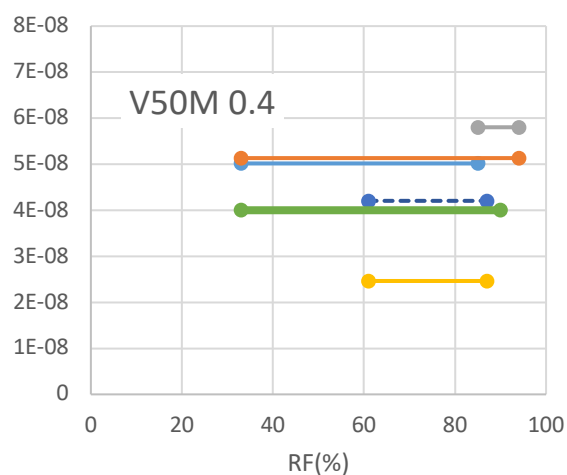


Fig. 5.10.4 Förslag (grön tjock linje) till fukttransportkoefficient för betong V50M 0.4. Streckad linje är medelvärdet av kopp- och burkmätningarna

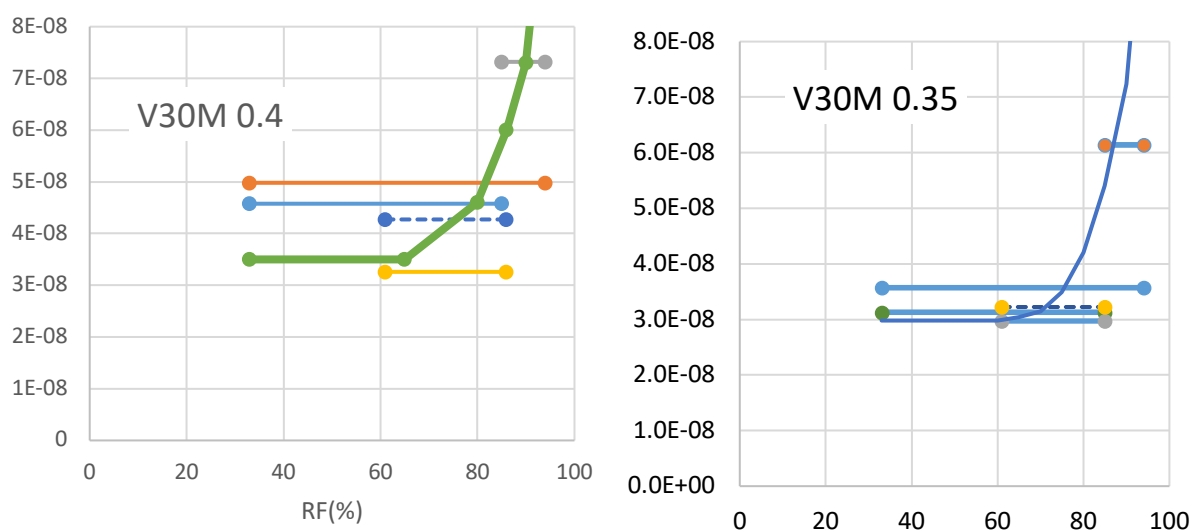


Fig 5.10.5 Förslag (grön tjock kurva) till fukttransportkoefficienter för betongerna V30M 0.4 och V30M 0.35. Streckad linje är medelvärdet av kopp- och burkmätningarna

Förslagen till fukttransportkoefficienter för de fem betongerna är sammanställda i Tabell 5.10.

TABELL 5.10 Förslag 1 till fukttransportkoefficienter (m^2/s) för de fem betongerna, välhårdade, baserat på de utförda kopp- och burkmätningarna.

RF (%)	V 0.4	V30M 0.35	V30M 0.4	V30M 0.55	V50M 0.4
33	1.00E-07	2.50E-08	3.50E-08	9.50E-08	4.0E-08
65	1.00E-07	2.50E-08	3.50E-08	9.50E-08	4.0E-08
80	1.40E-07	3.80E-08	4.60E-08	1.03E-07	4.0E-08
86	1.95E-07	5.00E-08	6.00E-08	1.10E-07	4.0E-08
90	2.65E-07	6.20E-08	7.30E-08	1.25E-07	4.0E-08
93	3.00E-07	7.50E-08	1.00E-07	1.60E-07	4.0E-08

5.11 Fukttransportkoefficienter för beräkningar – förslag 2

Ett alternativt sätt att utvärdera RF-beroendet hos fukttransportkoefficienterna är att använda fundamentalpotentialen ψ , på samma sätt som Olsson et al (2018). Olsson hade flera punkter; här finns bara två.

Fundamentalpotentialen ψ beräknas som det uppmätta fuktflödet [kg/(m²s)] multiplicerat med tjockleken d [m] hos provskivorna, i en serie RF-intervall (ϕ_0 , ϕ).

$$\psi(\phi_0, \phi) = J(\phi_0, \phi) \cdot d$$

Dessa har beräknats för de fem betongerna i de två RF-intervallen, se Tabell 5.11.1.

Olsson et al (2018) använde följande ekvationer för utvärderingen

$$\psi(\phi) = k \cdot (\phi_{lim} - 0.11) + a \cdot e^{b \cdot \phi}, \quad \phi \geq \phi_{lim},$$

$$\psi(\phi) = k \cdot (\phi - 0.11), \quad \phi \leq \phi_{lim},$$

$$D_v = \frac{d\psi}{dv} = a \cdot b \cdot e^{b \cdot \phi} / v_s, \quad \phi \geq \phi_{lim},$$

$$D_v = \frac{d\psi}{dv} = k / v_s, \quad \phi \leq \phi_{lim},$$

där ϕ är den relativa fuktigheten RF, ϕ_{lim} är RF där fukttransportkoefficienten inte längre är konstant, 0.11 är RF = 11 %; här används 0.33 (= 33 % RF) som undre gräns, a , b och k är parametrar, D_v är fukttransportkoefficienten med ånghalten v som transportpotential, v_s är mätnadsånghalten.

Här har $\phi_{lim} = 0.70$ (70% RF) valts som gränsen för när fukttransportkoefficienten inte längre är konstant utan börjar bli RF-beroende, med ledning av resultaten från Olsson et al (2018), med ett undantag, betong V50M 0.4, som har en i det närmaste konstant fukttransportkoefficient.

Passningen mellan de båda första ekvationerna och uppmätta värden på fundamentalpotentialen i de båda RF-intervallen visas i figur 5.11.1 för de fem betongerna. Använda parametervärden ges i Tabell 5.11.1. Passningen är inte helt perfekt men duger här.

Genom att sedan derivera fundamentalpotentialen med avseende på ånghalten v erhålls fukttransportkoefficienten D_v enligt de båda sista ekvationerna ovan.

De utvärderade värdena ges sist i Tabell 5.11.1 och åskådliggörs i figur 5.11.2.

Den femte betongen, V50M 0.4, med 50 % slagginblandning föreslås ha (nästan) en konstant fukttransportkoefficient på $4\text{--}5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$.

TABELL 5.11.1 Utvärdering av fukttransportkoefficienternas RF-beroende med hjälp av fundamentalpotentialen ψ ("PSI"), med metoden enligt Olsson et al (2018)

RF (%)	Betong	PSI(33,RF) [kg/ms]			
	V30M 0.35	V30M 0.4	V30M 0.55	V50M 0.4	V 0.4
33	0	0	0	0	0
85	2.81E-10	4.12E-10	7.66E-10	4.51E-10	8.92E-10
94	3.77E-10	5.26E-10	9.60E-10	5.42E-10	1.27E-09
k	3.59E-10	4.99E-10	9.29E-10	5.24E-10	1.14E-09
a	2.00E-12	3.30E-12	9.70E-12	4.00E-11	1.85E-12
b	5.09	4.9	4.4	2	6.5
RF (%)	PSI(33,RF)				
33	0	0	0	0	0
70	2.03E-10	2.87E-10	5.55E-10	3.20E-10	5.96E-10
75	2.24E-10	3.15E-10	6.07E-10	3.20E-10	6.63E-10
80	2.50E-10	3.51E-10	6.71E-10	3.20E-10	7.56E-10
85	2.84E-10	3.97E-10	7.52E-10	3.20E-10	8.85E-10
90	3.28E-10	4.56E-10	8.52E-10	3.20E-10	1.06E-09
94	3.72E-10	5.15E-10	9.50E-10	3.20E-10	1.25E-09
	$D_v = d\text{PSI}/dv \text{ (kg/ms/kg/m}^3\text{=m}^2\text{/s)}$				
33	2.08E-08	2.89E-08	5.37E-08	3.03E-08	6.58E-08
70	2.08E-08	2.89E-08	5.37E-08	3.03E-08	6.58E-08
70	2.08E-08	2.89E-08	5.37E-08	3.03E-08	6.58E-08
75	2.68E-08	3.69E-08	6.69E-08	3.03E-08	9.10E-08
80	3.45E-08	4.71E-08	8.33E-08	3.03E-08	1.26E-07
85	4.45E-08	6.02E-08	1.04E-07	3.03E-08	1.74E-07
90	5.74E-08	7.69E-08	1.29E-07	3.03E-08	2.41E-07
94	7.04E-08	9.35E-08	1.54E-07	3.03E-08	3.13E-07

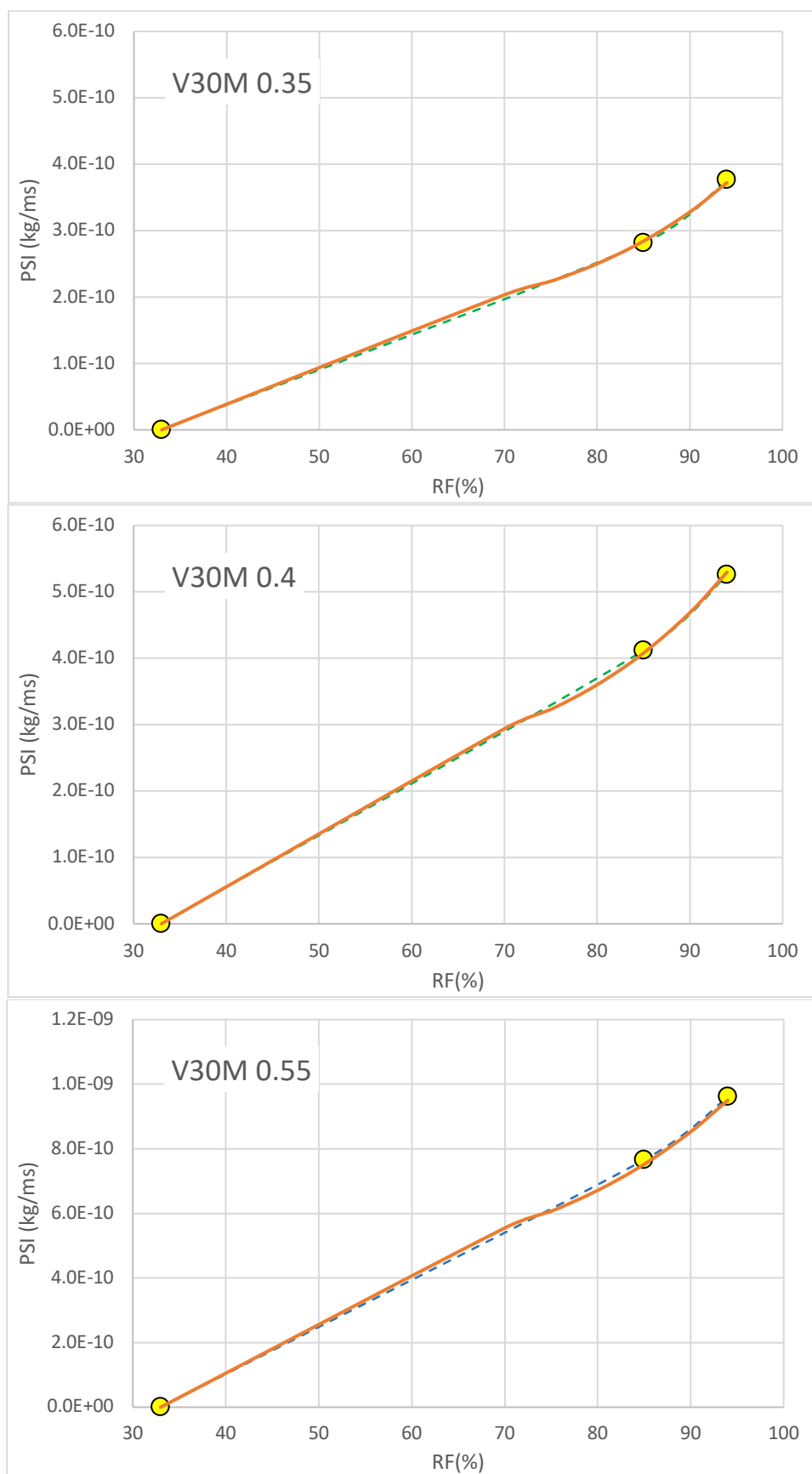


Fig 5.11.1A Passning mellan de båda första ekvationerna och uppmätta värden på fundamentalpotentialen i de båda RF-intervallen. Betongerna med 30 % slagg

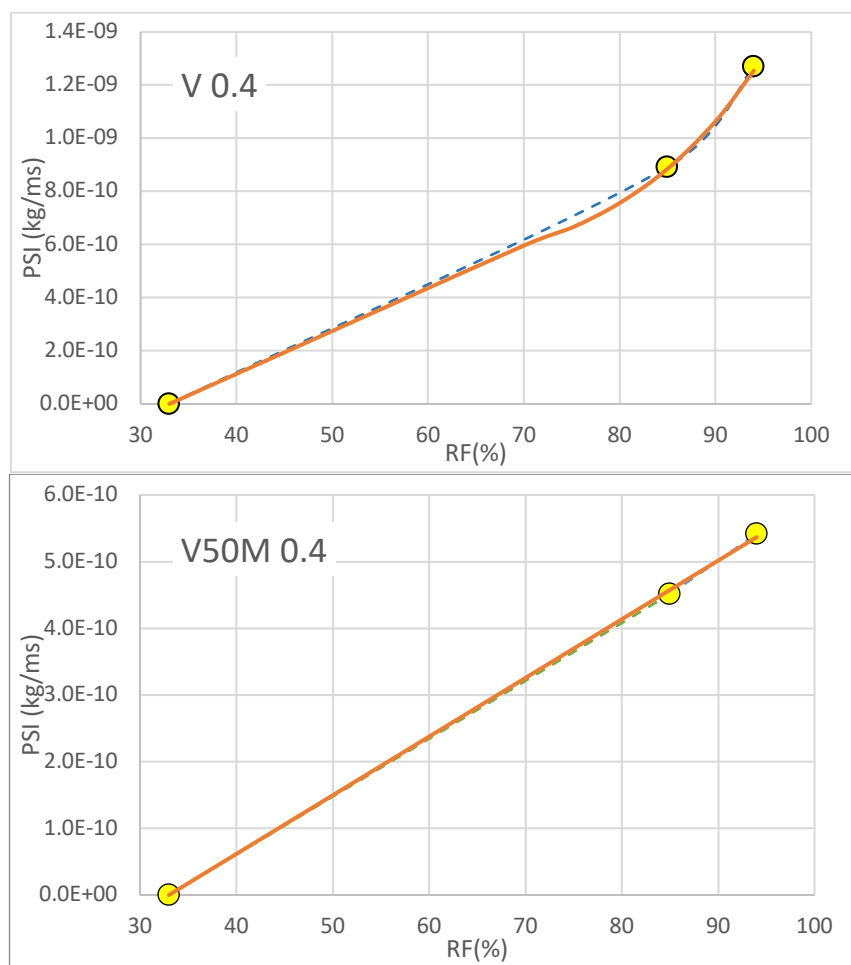


Fig 5.11.1B Passning mellan de båda första ekvationerna och uppmätta värden på fundamentalpotentialen i de båda RF-intervallen. Betongerna utan slagg och med 50 % slagg

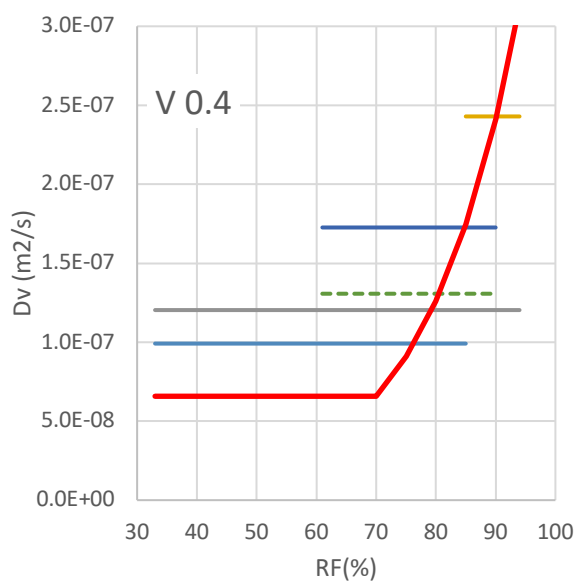


Fig 5.11.2A Fukttransportkoefficienten D_v (m²/s) för de fem betongerna, utvärderade med hjälp av fundamentalpotentialen. Betongen V 0.4 utan slagginblandning

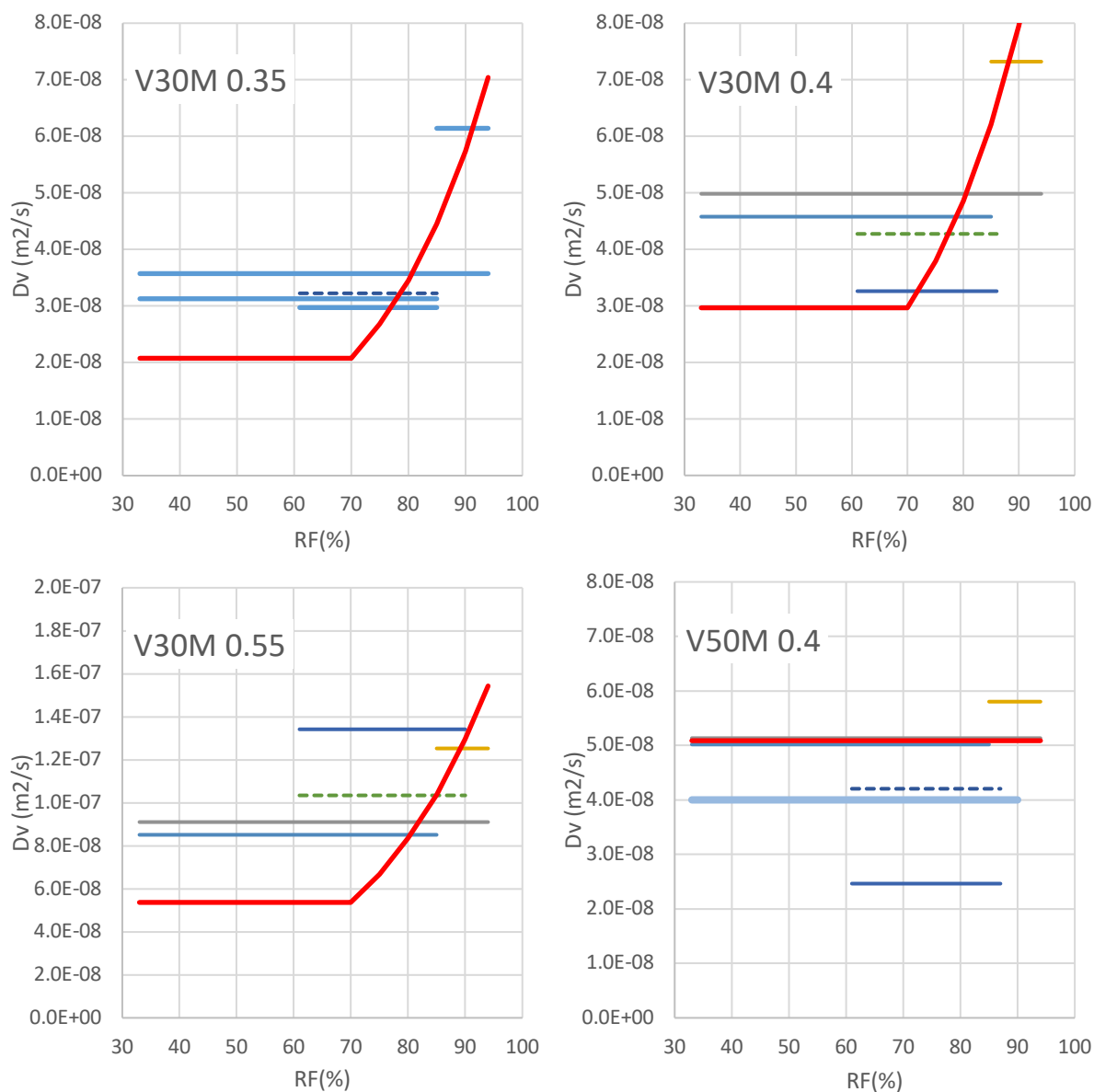


Fig 5.11.2B Fukttransportkoefficienten D_v (m^2/s) för de fem betongerna, utvärderade med hjälp av fundamentalpotentialen. Betongerna med slagginblandning.
 Streckad linje är medelvärdet av kopp- och burkmätningarna

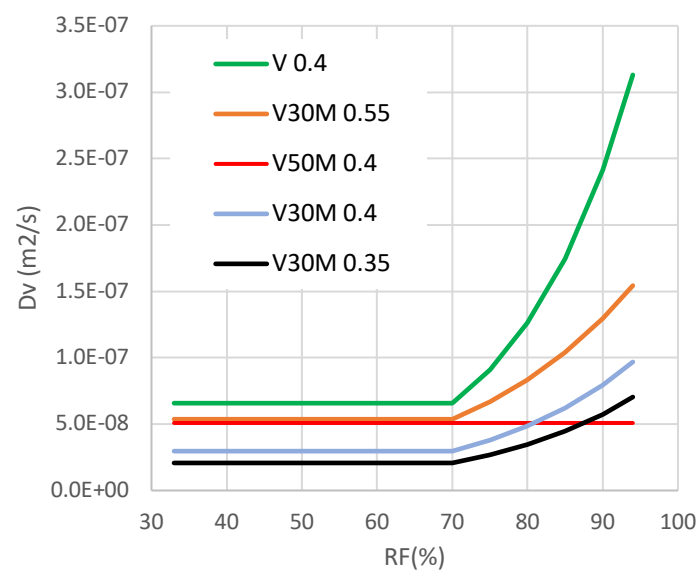


Fig 5.11.2C Fukttransportkoefficienten D_v (m²/s) sammanställda för de fem betongerna.

6 Slutsatser

- Desorptionsisotermerna uppvisar en horisontell ”platå” i området 85-95 % RF, särskilt vid slagginblandning. Det kan bero på att dagens cement och bindemedelskombinationer är mer reaktiva än cement för 30-50 år sedan.
- Denna platå innebär att fuktkapaciteten är i det närmaste noll i detta område, vilket medför att det riskerar att bli stora systematiska fel i RF-mätningar, särskilt om RF-givaren har en stor fuktkapacitet. Stora skillnader har också erhållits vid mätning av RF med olika givare på betongerna med slagginblandning och låga vbt.
- Slagg leder till bildandet av mer C-S-H-gel som fyller kapillärporstrukturen (...förstärker platån på desorptionsisotermen) och förfinar porstorleksfördelningen. Det senare ses också som en lägre fukttransportförmåga över hela RF-intervallet.
- Trots förfinad och förtätad porstruktur torkar betongerna med slagg bättre än referensen upp till 12 månader, se Carlswärd (2020) och Tabell 5.2. Detta förklaras sannolikt av att en förfining av porstrukturen bidrar till en ökad självuttorkning (större andel av vattnet binds i gelporer som töms vid lägre RF), vilket yttrar sig som den aktuella platån hos desorptionsisotermen.
- Fukttransportkoefficienterna bestämda med koppmetoden i två olika RF-intervall har gjort det möjligt att kvantifiera fuktberoendet. Resultaten visar ett tydligt fuktberoende för fyra av fem testade betonger, vilket inte helt överensstämmer med en del tidigare mätningar som visade fuktberoende fukttransportkoefficienter bara för material med rent Portlandcement.
- Burkmetoden har gjort det möjligt, för första gången, att bestämma fukttransportkoefficientens åldersberoende. Från tre till tolv månaders ålder minskade fukttransportkoefficienten som mest med en faktor 2.

7 Referenser

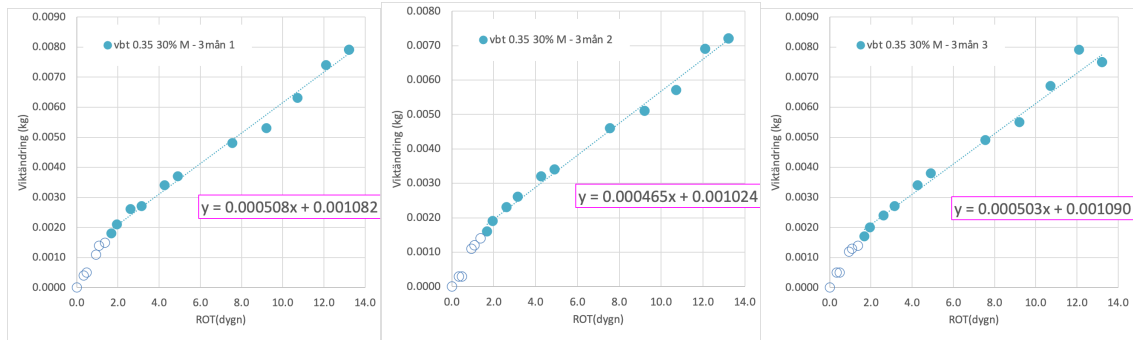
- Carlswärd, J. (2020) *Uttorkningsegenskaper hos klimatförbättrad betong*, Bygg & Teknik 6/20.
- Hedenblad, G. (1993) *Water vapour permeability of cement-based materials*. Rapport TVBM-1014, Avd. Byggnadsmaterial, LTH
- Hedenblad, G. (1996) *Materialdata för fukttransportberäkningar*. BFR T-skrift; Vol. T19:1996.
- Linderöth, O. (2020) *Hydration, pore structure and related moisture properties of fly ash blended cement-based materials. Experimental methods and laboratory measurements*. Rapport TVBM-1039, Avd. Byggnadsmaterial, LTH
- Linderöth, O., Johansson, P. & Wadsö, L. (2020) *Development of pore structure, moisture sorption and transport properties in fly ash blended cement-based materials*, Construction and Building Materials, [Volume 261](#), 20 November 2020, 120007, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120007>
- Nilsson, L.-O. (1980) *Hygroscopic moisture in concrete – drying, measurements and related material properties*. Rapport TVBM-1003, Avd Byggnadsmaterial, LTH
- Nilsson, L.-O. & Bergström, K. (2020) *The tin can method for determining moisture transport properties of concrete*. Nordiskt Byggfysiksymposium 2020, Tallin
- Nilsson, L.-O. (2021) *Kapitel 17 Fukt och betong, Betonghandbok, Material*, 2021, AB Svensk Byggtjänst: Stockholm.
- Nilsson, L.-O. (2023) *Moisture transport properties of concrete with SCMs – descriptions, test methods and some applications*. Ibausil, Weimar, 13-15 September 2023
- Olsson, N., Nilsson, L.-O., Åhs, M. & Baroghel-Bouny, V. (2018) *Moisture transport and sorption in cement-based materials containing slag or silica fume*. Cement and Concrete Research, 2018. **106**: p. 23-32.
- Saeidpour, M. & Wadsö, L. (2016) *Moisture diffusion coefficients of mortars in absorption and desorption*. Cement and Concrete Research, 83, 179-187. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.02.003>

BILAGA 1 (3 sidor)

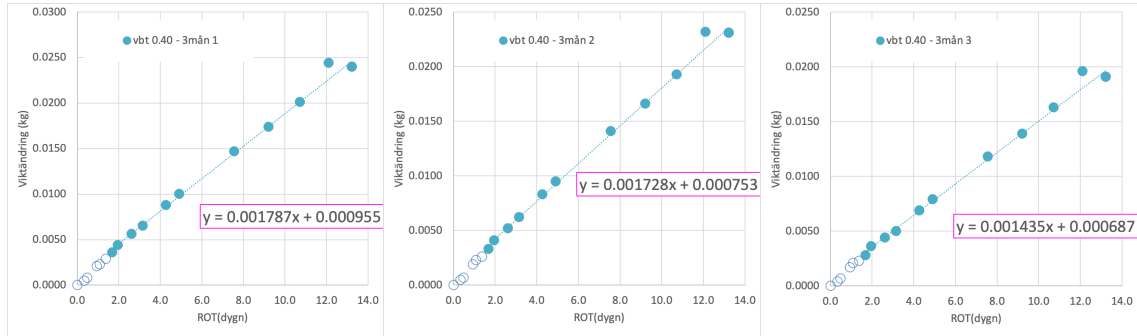
Utvärderingen av viktändringarna hos burkarna som funktion av kvadratroten ur tiden visas i diagramform på följande sidor, för alla 45 burkarna.

Utvärdering av viktändringar från Burkmetoden – 3, 6 & 12 månaders härdning

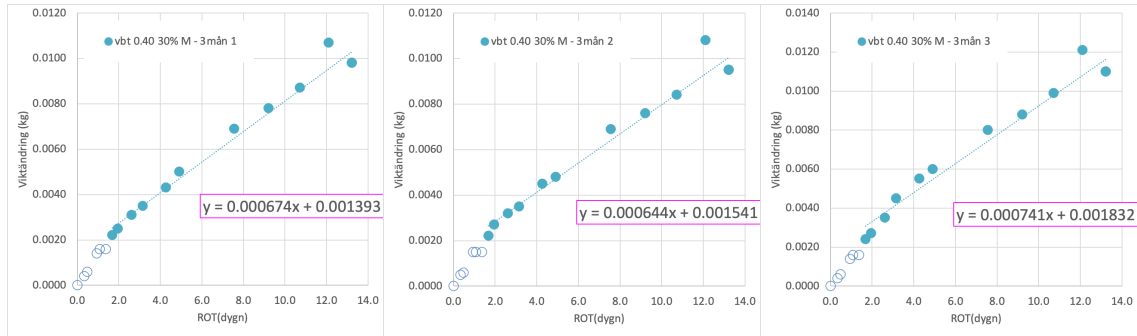
vbt 0.35 30% M - 3mån



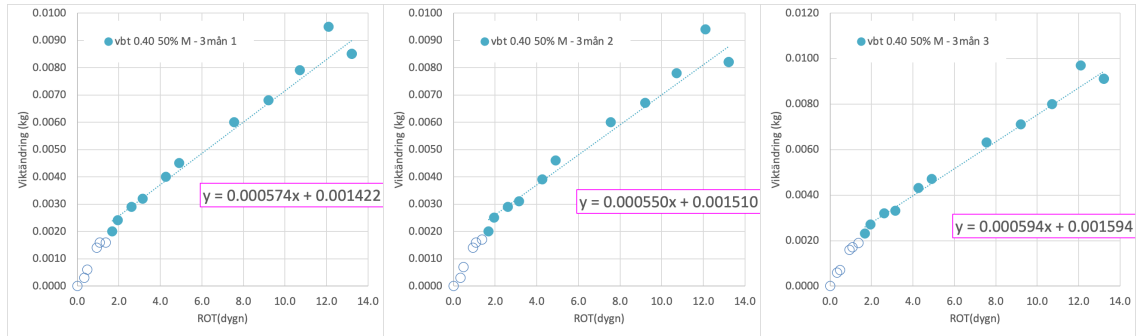
vbt 0.40 - 3mån



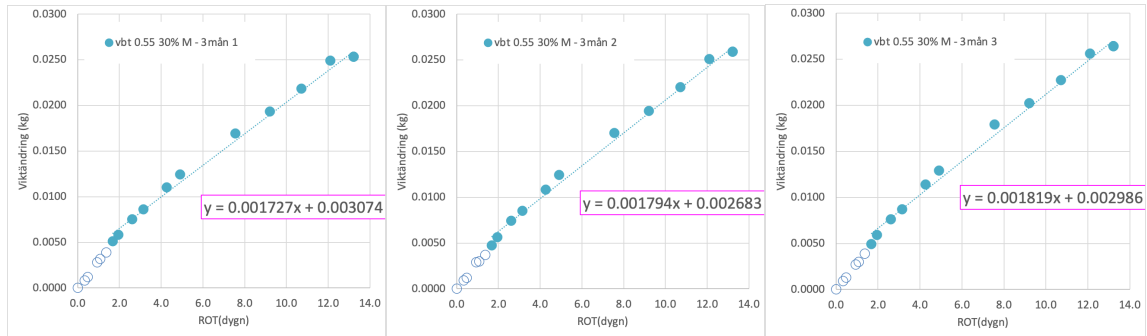
vbt 0.40 30% M - 3mån



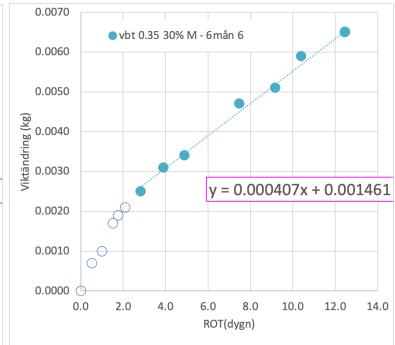
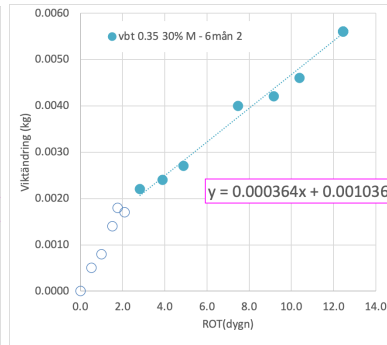
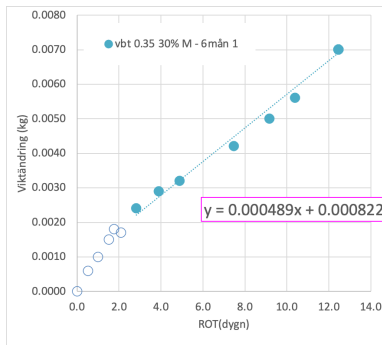
vbt 0.40 50% M - 3mån



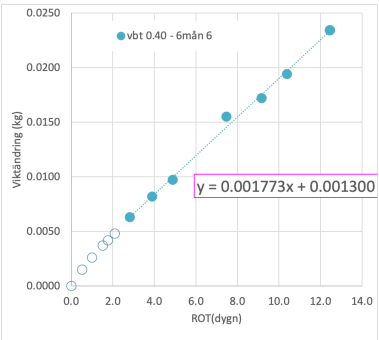
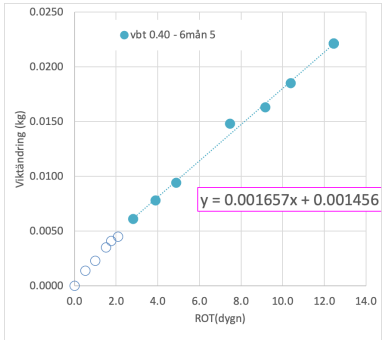
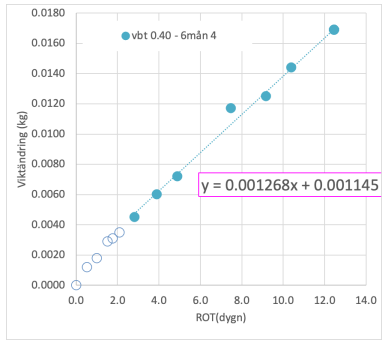
vbt 0.55 30% M - 3mån



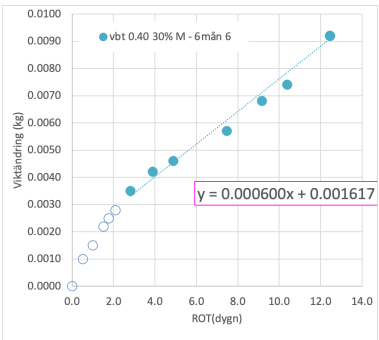
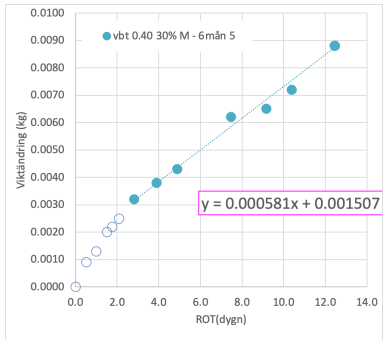
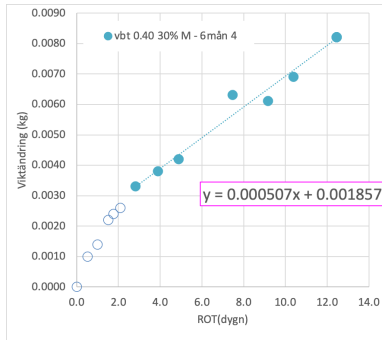
vbt 0.35 30% M - 6mån



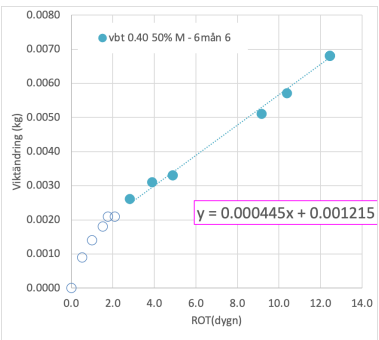
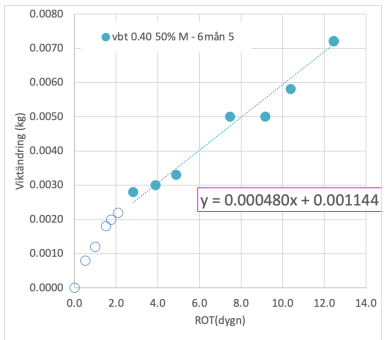
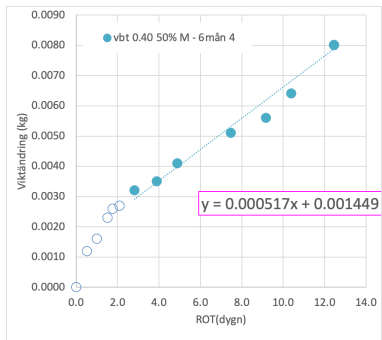
vbt 0.40 - 6mån



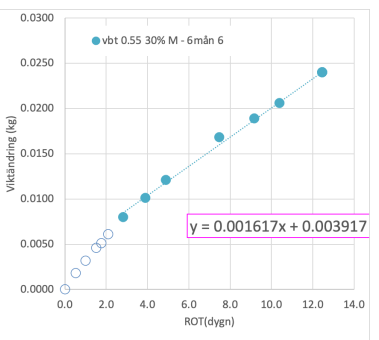
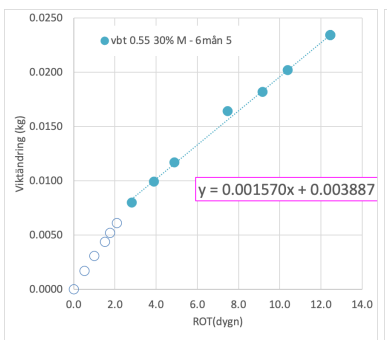
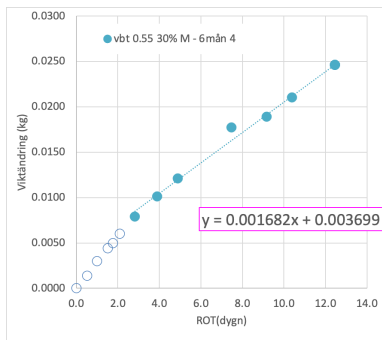
vbt 0.40 30% M - 6mån



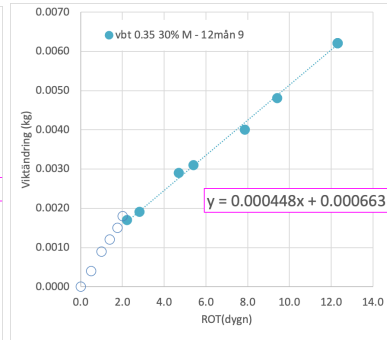
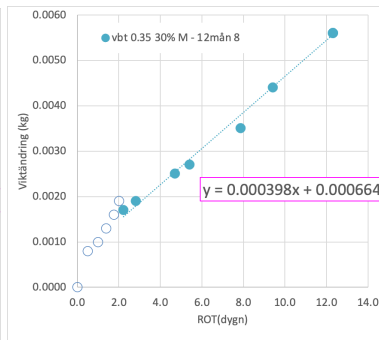
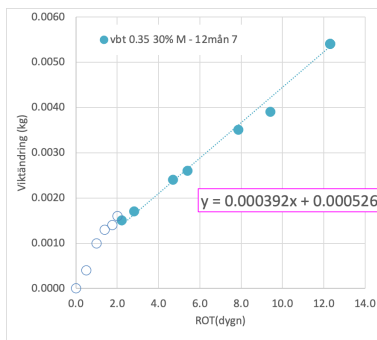
vbt 0.40 50% M - 6mån



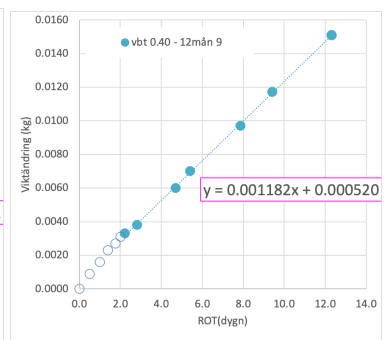
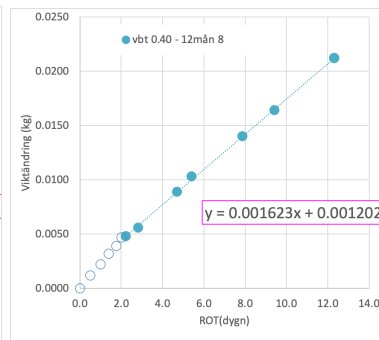
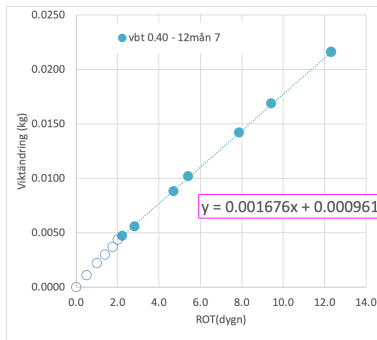
vbt 0.55 30% M - 6mån



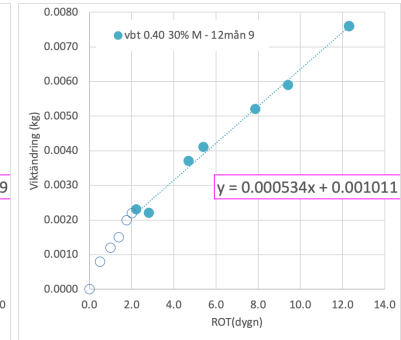
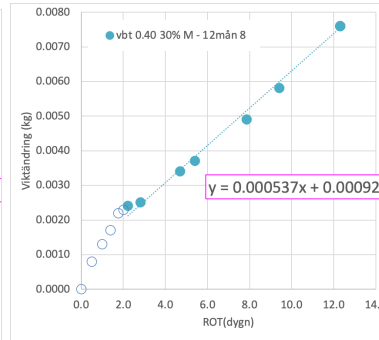
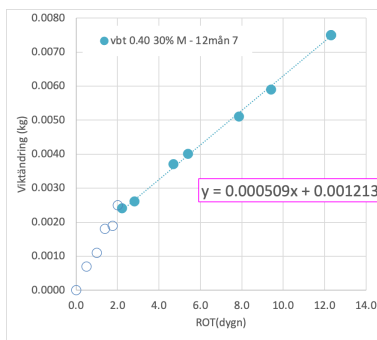
vbt 0.35 30% M - 12mån



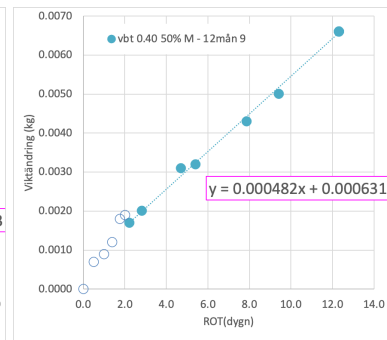
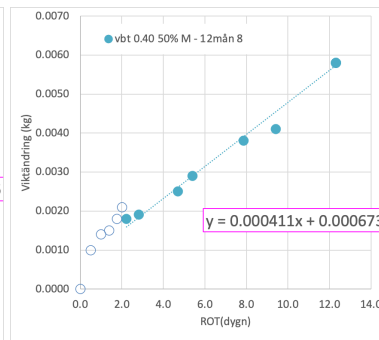
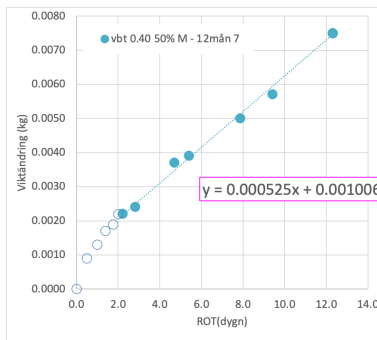
vbt 0.40 - 12mån



vbt 0.40 30% M - 12mån



vbt 0.40 50% M - 12mån



vbt 0.55 30% M - 12mån

