BILAGA 6

SBUF 13701

Milstolpe 5 och 7:

Inverkan av simulerat scanningförlopp på beräknat omfördelningsförlopp

Lund 2020-05-13

Sture Lindmark

Tekn. Dr.

FuktCom Konsult Lindmark AB
Org nr 556726-3289
Skiffervägen 32
SE-224 78 LUND

Sture.Lindmark@Fuktcom.se
www.fuktcom.se
Mobil 073 - 80 83 600

Sammanfattning

I rapporten redovisas resultat av beräkningar som utförts i syfte att undersöka hur stor betydelse valet av modell för scanningisotermerna har på beräknad maximal RF närmast under en limmad matta efter omfördelning av kvarvarande fukt. Beräkningarna är i huvudsak utförda för enkla konstruktioner av enbart matta och betong. Syftet med detta är att hålla förutsättningarna så enkla som möjligt för att underlätta tolkningen. En kompletterande beräkning har utförts där även avjämningsmassa och limfukt simuleras.

I beräkningarna har två typer av scanningförlopp simulerats: Dels en version där absorptions- och desorptionsscanningisotermer har olika form, dels en där desorptionsscanningisotermen ansätts ha samma form som absorptionsscanningisotermen. Utöver detta har det även prövats att beräkna scanningen utan egentlig scanning, utan enbart med ett direkt ”hopp” över från desorptionsisotermen till absorptionsisotermen.

Resultaten visar att så länge någon form av rimlig scanningisoterm används så har den exakta formen på scanningisotermen liten betydelse för beräknad maximal RF under det huvudsakliga omfördelningsförloppet (dvs det omfördelningsförlopp som sker veckor och månader efter mattläggning, inte de närmaste dygnen efter mattläggning). Däremot har valet av form på scanningkurvan mycket stor betydelse för beräknad maximal fukthalt. OM det är transporten av hydroxidjoner som är avgörande för risken för nedbrytning av mattlim, och om det är rätt att denna transportkoefficient är beroende av fukthalten, så har scanningkurvans form stor betydelse för hur stor risken för limnedbrytning blir.

Beräkning utan scanning, genom att låta uppfuktning ske längs desorptions-isotermen, ger lägre RF-värden men högre fukthaltsvärden än beräkning med en rimlig scanningkurva. Vid uppfuktning längs absorptionsisotermen erhålls istället högre RF-värden men lägre w-värden.

En svårighet i beräkningarna är att modellera fukttransportkoefficienten på rätt sätt. I litteraturen redovisas vanligtvis endast data för fukttransport vid antingen ren desorption eller ren absorption, men för en korrekt omfördelningsberäkning behövs data för fukttransportkoefficienten både vid desorptionsscanning och vid absorptionsscanning. I beräkningarna har fukttransportkoefficienten tagits från data mätta vid ren desorption, och sedan modellerats som beroende av fukthalten för att på så sätt kunna användas även vid absorptionsscanning.

En slutsats av studien är att det behövs mer information om hur scanning sker och hur scanningkurvor ser ut under olika omständigheter.

En annan slutsats är att det behövs mer information om hur fukttransportkoefficienten varierar med RF eller fukthalt vid scanningförlopp.

Innehåll

1 Inledning 4

2 Definitioner 4

3 Scanningförloppet 4
3.1 Allmänt om scanningisotermer 5
3.2 Scanningisotermer för cementbundna material 6

4 Rapporten ..... **Fel! Bokmärket är inte definierat.**
4.1 Milstolpe 5: Desorptionsscanning 10
4.2 Milstolpe 7: Absorptionsscanning 11

5 Modeller för scanningkurvor i denna rapport 11
5.1 Modell 1 11
5.2 Modell 2 15
5.3 Modell 3 15

6 Scanningförloppets inverkan på beräknat omfördelningsförlopp 15
6.1 Förutsättningar 15
6.2 Modell 1 16
6.2.1 Kommentarer 18

6.3 Modell 2 21
6.3.1 Kommentar 21

6.3.2 Mer komplex konstruktion 22

6.4 Modell 3 25
6.5 Modell med $\delta_v = \delta_v(ø)$ 25
6.5.1 Kommentar 26

7 Beräkning utan scanning 26
7.1 Uppfuktning längs desorptionsisotermen 27
7.2 Uppfuktning längs absorptionsisotermen 28

8 Diskussion 30

9 Slutsatser 30

10 Referenser 32

11 Bilagor 33

1 Inledning

I projektets leveransplan anges att

- Milstolpe 5 syftar till att utreda i vilken mån det går att förenkla användningen av desorptionsscanningkurvor genom att visa hur stor effekt olika modeller för desorptionsscanningkurvor har på det slutligt beräknade resultatet
- Milstolpe 7 syftar till att visa vilken betydelse modellen för absorptionsscanningkurvor har, och hur stor betydelse det har att man använder en absorptionsscanningkurva och inte bara “går tillbaka upp” längs desorptionsisotermen

Dessa deluppgifter ligger så nära varandra att jag har valt att redovisa dem i en och samma rapport.

2 Definitioner

Absorptionsisoterm: Med absorptionsisoterm avses i denna rapport enbart den absorptionsisoterm som erhålls vid uppfuktning *från ett helt uttorkat tillstånd.* (Med ”helt uttorkat” avses att allt fysikaliskt bundet vatten har torkats bort, men inget av det kemiskt bundna.)

Desorptionsisoterm: Med desorptionsisoterm avses i denna rapport enbart den desorptionsisoterm som erhålls vid torkning med start vid kapillärmättnad. Detta kan betyda 100%RF eller den lägre RF som porlösningen får pga lösta ämnen, trots att inget undertryck råder i porlösningen. Alla andra jämviktskurvor, som startar vid en punkt på absorptionsisotermen eller på en absorptionsscanningisoterm, kallas *desorptionscanningkurvor*.

Absorptionscanningkurva: Jämviktsfuktkurva som erhålls då uppfuktning startar i ett inte helt torrt material. Startpunkten kan ligga på desorptionsisotermen eller någonstans mellan absorptions- och desorptionsistotermerna.

Desorptionscanningkurva: Jämviktsfuktkurva som erhålls då torkning startar i ett material som tidigare genomgått uppfuktning. Startpunkten ligger någonstans mellan absorptions- och desorptionsistotermerna. (Desorption kommer att starta från ett läge <u>på</u> absorptionskurvan endast i det fall att tidigare uppfuktning har skapat kapillär mättnad i materialet. Torkning kommer då att ske längs (den ordinarie) desorptionskurvan.)

3 Scanningförloppet

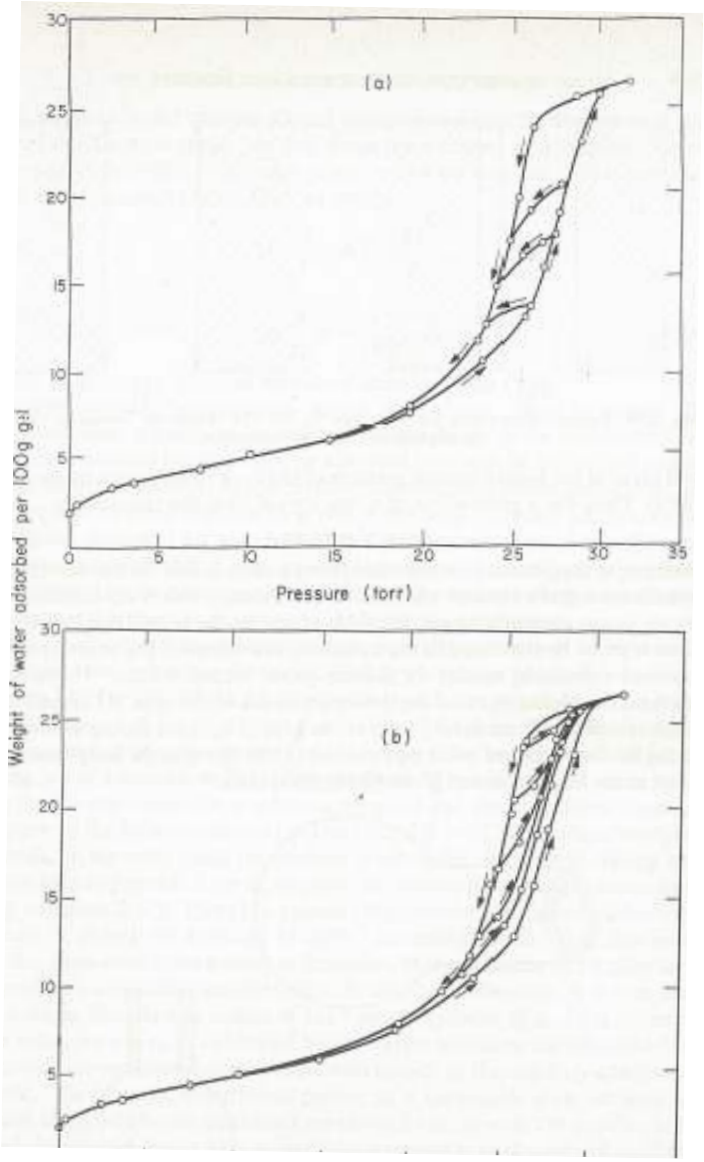
När ett material övergår från torkning till uppfuktning (eller tvärtom) följer fukttillståndet en s.k. scanningkurva som löper mellan de båda isotermerna, se till exempel Figur 1 och Figur 2. Vid en noggrann omfördelningsberäkning måste sådana scanningkurvor användas.

Scanningförlopp i betong och avjämningsmassor är ofullständigt undersökta. Några exempel ges i följande avsnitt. Eftersom de exakta formerna är dåligt kända är det inte möjligt att helt säkert veta hur absorption- respektive desorptionsscanning-isotermerna bör modelleras.

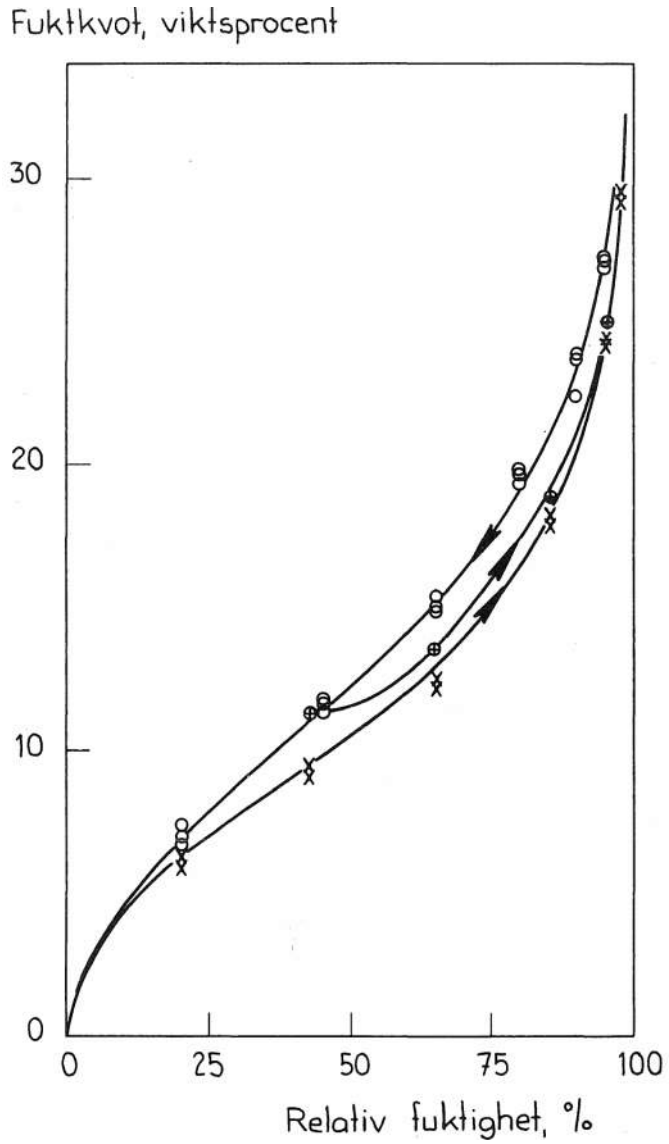
3.1 Allmänt om scanningisotermer

Denna rapport syftar inte till att ge npågon utföärlig genomgång av vad som sker med fukten i materialets porer i samband med scanning. Beskrivningar finns i t.ex. [1], [2], [3], [9].

Ett par exempel kan dock nämnas: Gregg och Singh [1] anger, med referens till Rao *et al*, att absorptionsscanningkurvan aldrig ska nå helt över till den absorptionskurva som gäller efter fullständig torkning, se Figur 1. Rao mätte på titanoxidgel. Som framgår av Figur 1 är porerna i detta material i huvudsak samlade i ett relativt snävt storleksintervall, inte alls lika utbrett som i Portlandcement-baserade material. Det är inte känt vilken effekt denna olikhet i porstorleksfördelning har på scanning-kurvornas utseende.



Figur 1: Exempel på scanningkurvor mätta på titanoxidgel. [1] (med referens till Rao, K.S: J. phys. Chem, 45, 506, 517, 1941)

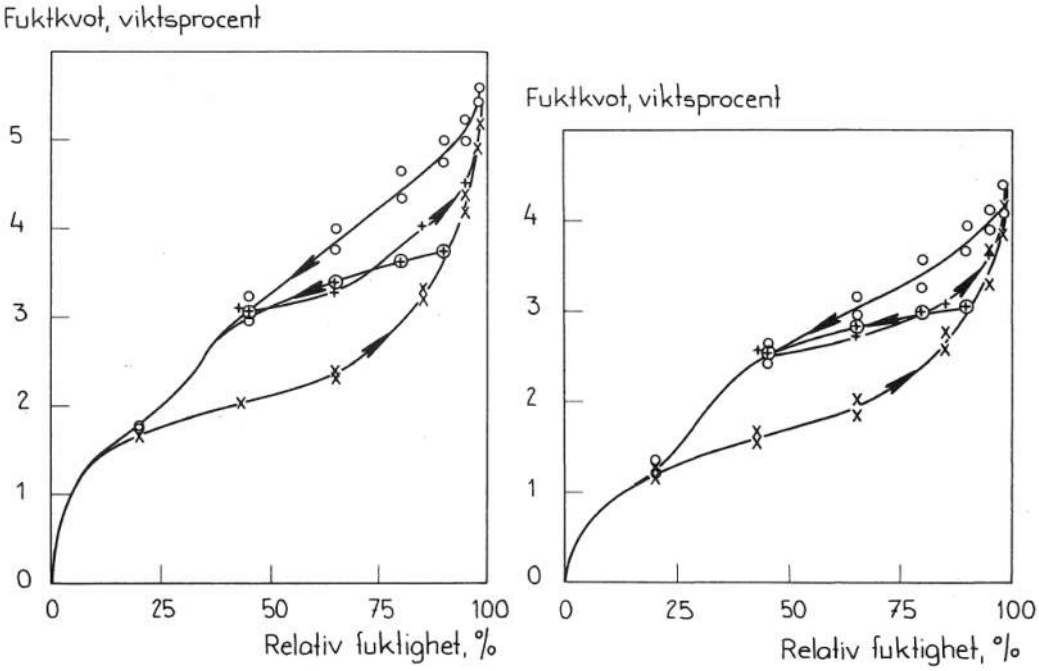


Figur 2: Isotermer för furu, densitet 510 kg/m^3, samt en absorptionsscanningkurva enligt Ahlgren [2].

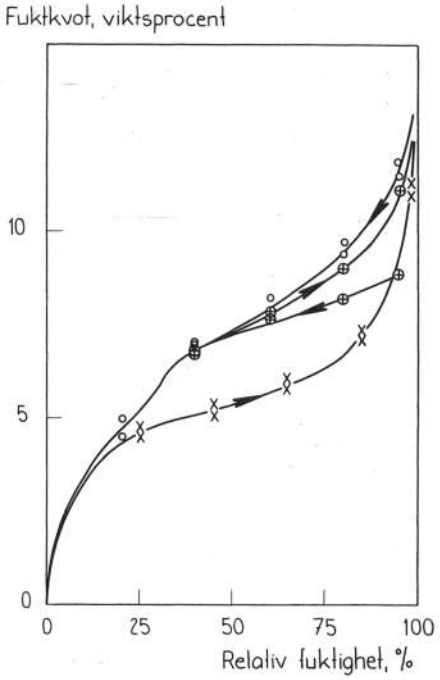
3.2 Scanningisotermer för cementbundna material

För cementbundna material finns endast ett fåtal scanningisotermer redovisade i litteraturen. Följande exempel kan nämnas:

Ahlgren [2] ger ett par exempel på scanningkurvor för betong (Figur 3). Dessa överensstämmer kvalitativt med kurvorna i Figur 1 i den meningen att desorptionsscanningkurvan är konvex uppåt medan absorptionsscanning kurvan är konvex nedåt.



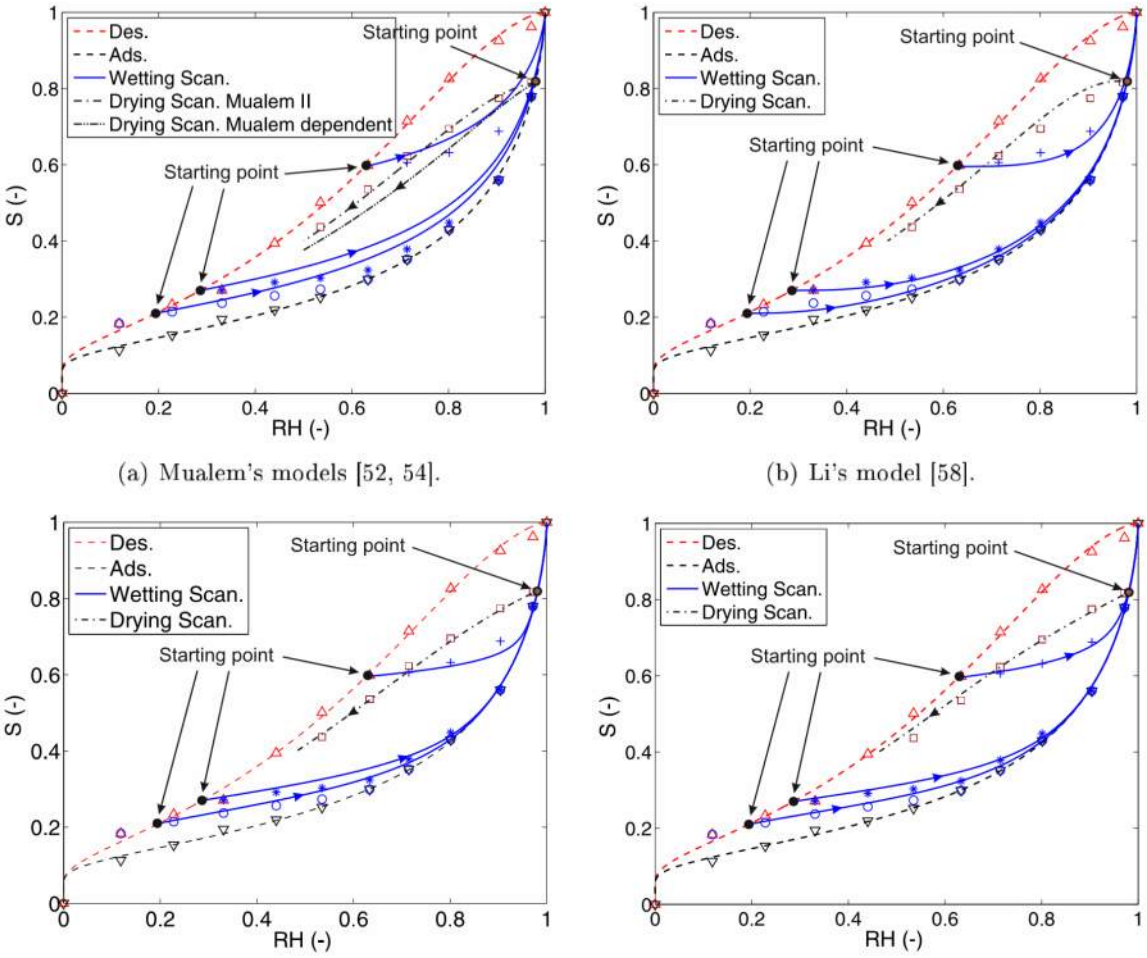
Figur 3: Exempel på scanningkurvor [2]. Vänster: Betong, C=400 kg/m^3, vct 0,55 (fig I:2). Höger: Betong, C=334 kg/m^3, vct 0,44 (fig I:3)



Figur 4: Isotermer och scanningisotermer för asbestcementbetong, "löspressad", ρ =1880 kg/m^3, porositet=37 %. [2]

Liknande kurvor för cementbaserade material finns sammanställda av Zhang [9], se Figur 5. Även här visas kvalitativt samma form som i Gregg&Singh [1] och

Brunauer [3]: Absorptionsscanningkurvan är konvex nedåt, medan desorptionsscanningkurvan är konvex uppåt.



(a) Mualem's models [52, 54].

(b) Li's model [58].

(c) Modified Wei's model (proposed).

(d) Improved Rubin's model (proposed).

Figur 5: Exempel på mätta scanningisotermer (markerade punktvis med ringar, trianglar, etc) och simulerade (heldragna). Formen på de mätta scanningisotermerna är kvalitativt lik vad som beskrivs av Brunauer [3] respektive Gregg&Singh [1]. Ur [9] efter [12].

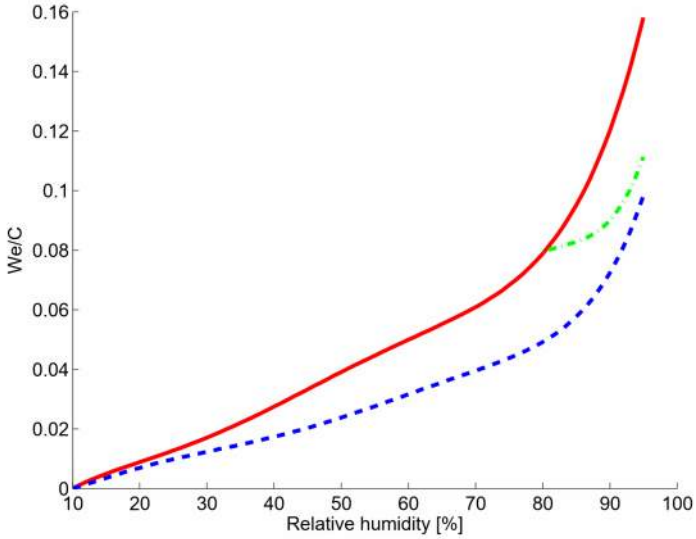
Ytterligare några exempel på scanningkurvor redovisas av Anderberg [4] och av Åhs [10], se figurer nedan. Dessa kurvor avviker dock från vad som redovisas av Gregg&Singh och Zhang (i de flesta fall) på så sätt att

1. Absorptionsscanningkurvorna förefaller gå över helt från desorptionskurvan till den absorptionskurva som gäller efter fullständig torkning, trots att materialet inte hade torkats fullständigt före absorptionsförloppet. Detta syns möjligen i några fall även i Zhangs sammanställning (Figur 5), men strider mot vad som anges av Brunauer respektive Gregg & Singh.
2. Desorptionsscanningkurvorna är lätt konkava uppåt. Detta avviker från vad som visas om scanningkurvor av Brunauer och av Gregg&Singh.

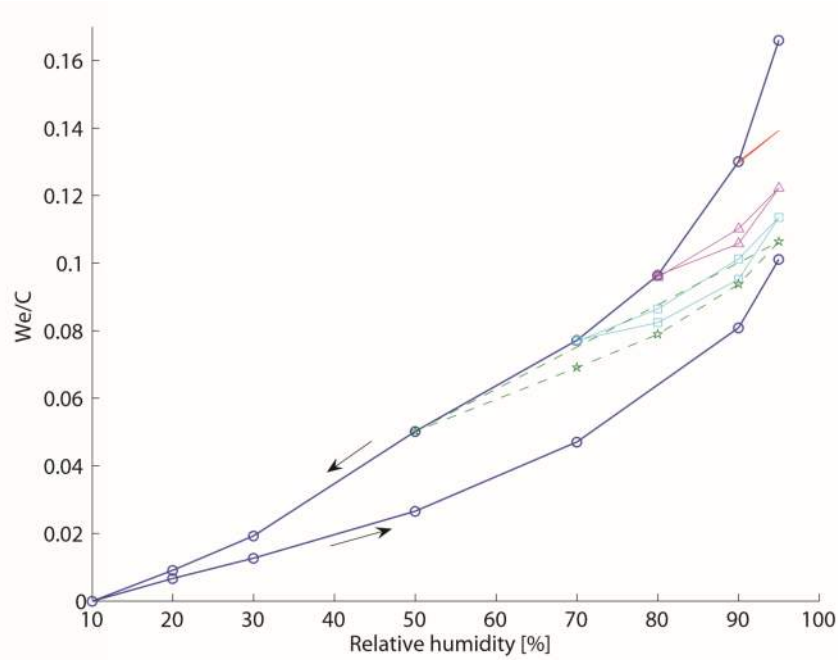
Åhs [10] beskriver att mätning av scanningkurvor gjordes genom att man inte väntade ut fullständig jämvikt vid varje RF-nivå, utan extrapolerade fram ett slutvärde från ett insvängningsförlopp. Man kan möjligen spekulera i att en eventuell

brist på egentlig jämvikt kan ha resulterat i en avvikande scanningkurva: Vid absorptionsscanning skulle detta kunna medföra ofullständig fuktupptagning och därmed en alltför flack absorptionsscanningkurva. Motsvarande brist på jämvikt vid desorptionsscanning skulle ge en överdrivet konvex form uppåt vilket inte stämmer med Åhs' resultat. Idén om ofullständig jämvikt förefaller således inte riktig. Möjligen skulle den ändå vara rätt, om bristen på egentlig jämvikt under absorptionen leder till att desorptionsscanningkurvorna startar i ett läge där jämvikt inte råder.

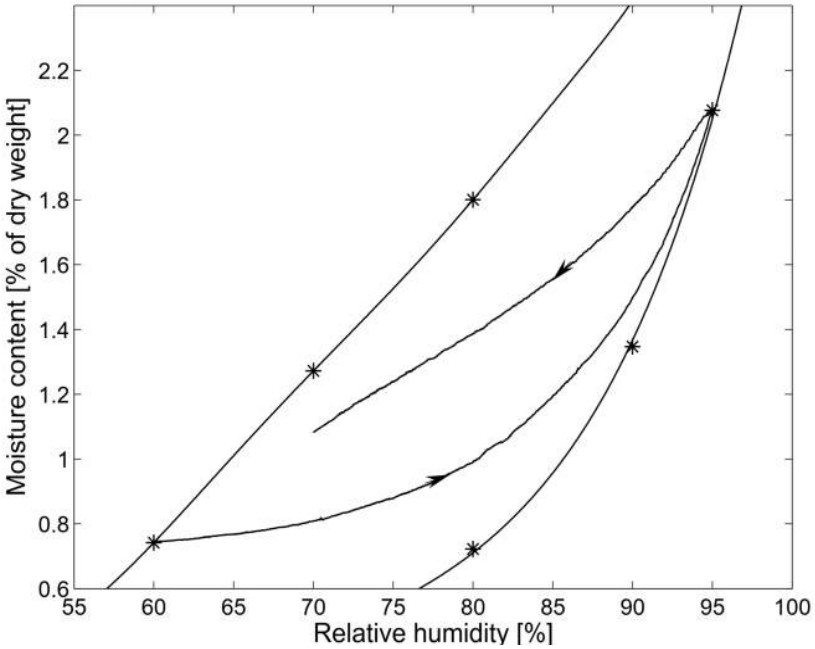
Anderberg mätte scanningisotermerna genom att göra en mycket långsam ökning av RF och samtidigt registrera ökningen i fukthalt [personlig kommunikation]. Det förefaller rimligt att ett sådant förfarande skulle kunna ha ökat risken för att den verkliga jämvikten aldrig uppnåddes.



Figur 6: Desorptions- och absorptionsisoterm för betong vct 0,65, samt en absorptionsscanningkurva (grön) som beskriver hur fukttillståndet ändras då materialet fuktas upp efter att först ha torkats till 80%RF. [10]



Figur 7: Desorptions- och absorptionskurvor för betong vct 0,65, samt 4 olika scanningisotermer [10].



Figur 8: Exempel på mätta scanningisotermer för en golvavjämningsmassa enligt Anderberg [4].

4 Olika scanningförlopp

4.1 Milstolpe 5: Desorptionsscanning

Desorptionscanningförloppet (milstolpe 5) inträffar då ett material börjar torka från ett utgångsläge på en absorptionsisoterm. För att detta ska kunna ske måste materialet först ha torkat och sedan återuppfuktats till ett läge på en absorptionsscanningisoterm. I en omfördelningsprocess inträffar detta typiskt vid limning av en matta på ett tidigare delvis torkat underlag (avjämningsmassa eller betong). Limfukten gör då att underlagets fukttillstånd - omedelbart efter limning - “hamnar” på en absorptionscanningisoterm. Därefter kommer det material som påverkades av limfukten att återigen börja torka innan fukt från djupare ned i konstruktionen omfördelas upp mot de övre delarna. Under denna (tillfälliga) torkningsprocess kommer fukttillståndet att följa en desorptionsscanningisoterm. När fukt kommer upp från längre ned i konstruktionen kommer fukttillståndet i materialet att övergå från desorptionsscanningisotermen till en absorptionsscanningisoterm.

Ett annat fall som kan bli aktuellt är då en delvis torkad betong beläggs med avjämningsmassa: Fukt från avjämningsmassan kommer då att höja fukttillståndet i betongens översta delar, och härvid kommer fukttillståndet att ändras längs en absorptionsscanningisoterm. När hela konstruktionen sedan återigen torkar kommer de berörda delarna av betongen att följa en desorptionsscanningisoterm.

4.2 Milstolpe 7: Absorptionsscanning

Fukttillståndsförändringar längs en absorptionsscanningisoterm sker i samband med att ett tidigare delvis torkat material återigen fuktas upp. Detta sker typiskt efter att en tät matta limmats på ett betongbjälklag vars övre del har hunnit torka och har lågt vatteninnehåll, men den undre delen fortfarande har kvar en hög fukthalt. Efter att mattan lagts omfördelas fukt från den nedre till den övre delen av betongen. Sådan återuppfuktning är orsaken till att omfördelningsberäkningar behövs, och således kommer absorptionsscanningisotermer att vara centrala i omfördelningsberäkningen.

5 Modeller för scanningkurvor i denna rapport

Vid en ändring av fukthalten *w* i ett material ändras även relativa fuktigheten ø enligt sambandet $C=\delta w / \delta ø$ där C är materialets fuktkapacitet (fuktbuffringskapacitet). Fuktkapaciteten ges alltså av lutningen på den isoterm som fukttillståndsförändringen följer. Vid scanning ges fuktkapaciteten av scanningisotermens lutning. För beräkningar av fukttransportprocesser där scanning förekommer behövs därför en modell för hur scanningisotermen ser ut.

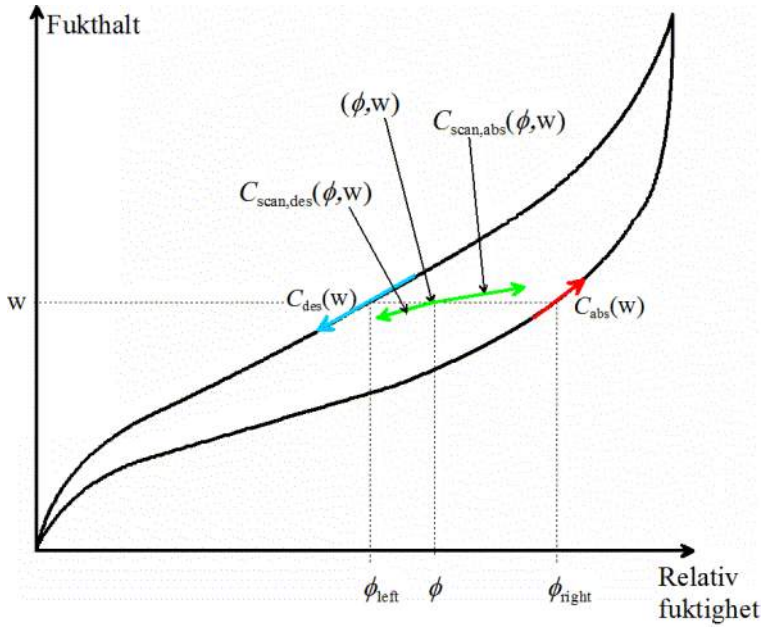
Ur de kvalitativa formerna på scanningisotermer som redovisades ovan kan tre modeller för scanningisotermer skapas:

1. Absorptionsscanningisotermen konkav uppåt, desorptionsscanning-isotermen konvex uppåt (i princip enligt Gregg&Singh). Graden av konkavhet/konvexhet varieras.
2. Absorptionsscanningisotermen konkav uppåt, desorptionsscanning-isotermen identisk med absorptionsscanningisotermen (detta efterliknar Åhs' resultat)
1. Rät linje med konstant lutning

I följande avsnitt prövas beräkningar med dessa modeller för att se vilken inverkan de har på beräkningsresultaten.

5.1 Modell 1

För Modell 1 används följande scanningmodell:



Figur 9: Illustration av hur scanningkapaciteten (fuktkapaciteten vid scanning) beräknats.

<u>Absorption</u>:

$$C_{scan,abs} = andel \cdot C_{abs}(w) \qquad \text{(Ekv. 1)}$$

$$andel = \left(\frac{\emptyset - \emptyset_{left}}{\emptyset_{right} - \emptyset_{left}}\right)^{exponent} \qquad \text{(Ekv. 2)}$$

Termen *andel* blir 0 i de fall fukttillståndet ligger precis på desorptionsisotermen. Detta ger att scanningkapaciteten blir 0 vilket ger orimliga resultat i beräkningen av ny RF. För att undvika detta införs en begränsning i beräkningarna så att *andel* aldrig är mindre än 0,01.

Exponent kan varieras för att få olika form på scanningloopen, se Figur 13. Beräkningstester visar att exponenten inte bör väljas mindre än ungefär 1 eftersom man då får kvalitativt tveksamma resultat, se vidare nedan.

<u>Desorption</u>:

$$C_{scan,des} = andel \cdot C_{des}(w) \qquad \text{(Ekv. 3)}$$

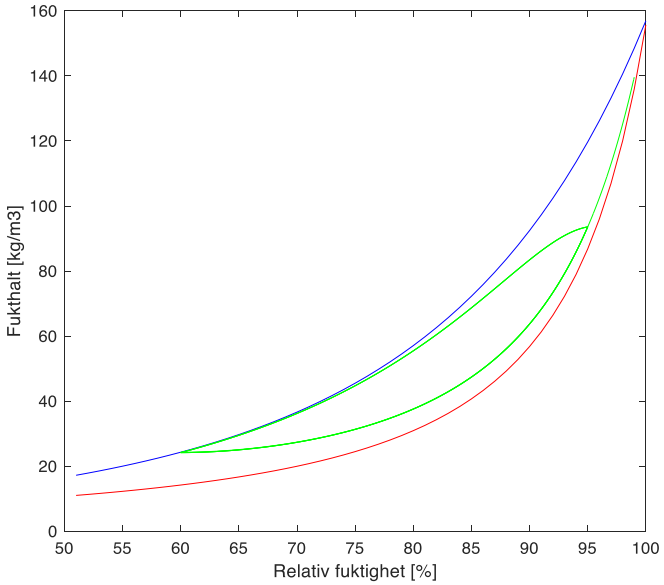
$$andel = \left(\frac{\emptyset_{right} - \emptyset}{\emptyset_{right} - \emptyset_{left}}\right)^{exponent} \qquad \text{(Ekv. 4)}$$

Även vid desorptionsscanning måste *andel* begränsas så att den aldrig är mindre än cirka 0,01. Detta inträffar dock bara om desorptionsscanning startar vid ett läge <u>på</u> absorptionskurvan, vilket endast inträffar i de fall cellerna har tillförts så mycket vatten (t.ex. från limfukt) att materialet (i de aktuella cellerna) har blivit kapillärt mättat. Vid lägre fukttillskott än så kommer fukttillståndet fortfarande att finnas på en absorptionsscanningisoterm, och därmed kommer *andel* inte att bli 0. I praktiska

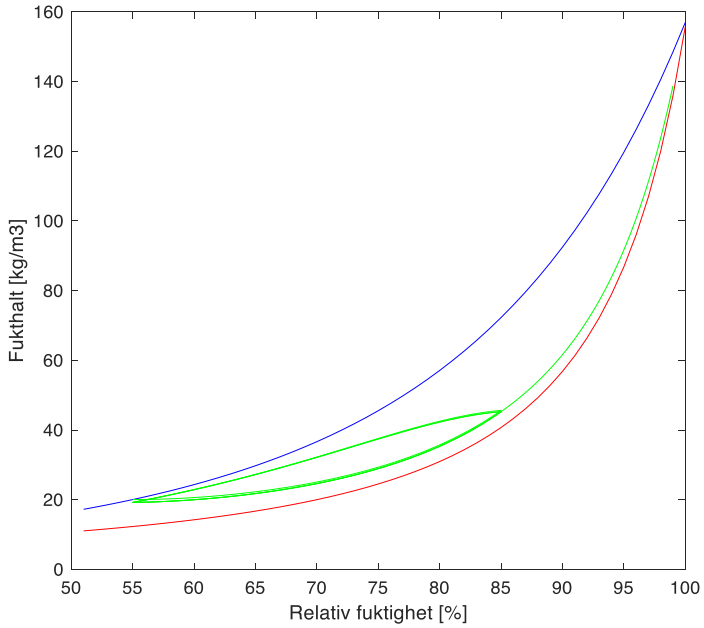
beräkningar är det ytterst sällan som fukttillståndet efter absorptionsscanning kommer att vara så nära absorptionsisotermen att *andel* bli besvärande liten. (I en automatiserad beräkning måste hänsyn dock tas till att detta trots allt kan inträffa.)

Precis som i flera av de modeller som Zhang [9] beskriver så ger modellen enligt ekv. 1-4 en förskjutning mellan scanninglooparna om förloppet upprepas flera cykler, se Figur 10-Figur 12. Detta fel är olika stort beroende på mellan vilka RF-nivåer cyklingen sker. Som framgår av figurerna är dock felet marginellt då modellen används inom intervall som är lämpliga för de scanningförlopp som är aktuella i denna studie. (Dessutom förekommer upprepade scanningcykler inte i en normal omfördelningsberäkning.)

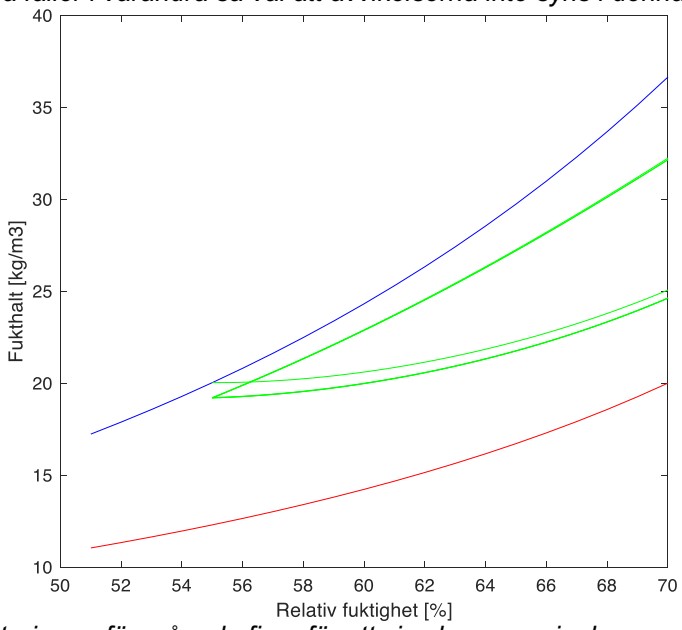
Ett skäl till att looparna förskjuts kan vara att beräkningen av nästa jämviktsläge sker explicit, dvs att med start i en punkt (RF,w) beräknas nästa jämviktsläge enbart utifrån scanningkapaciteten i det första läget. Det förefaller rimligt att en bättre anpassning erhålls om beräkningen sker implicit, så att hänsyn tas till vilken scanningkapacitet som råder även i slutpunkten (och därmed längs hela scanningförloppet). Detta har dock ännu inte införts i beräkningarna.



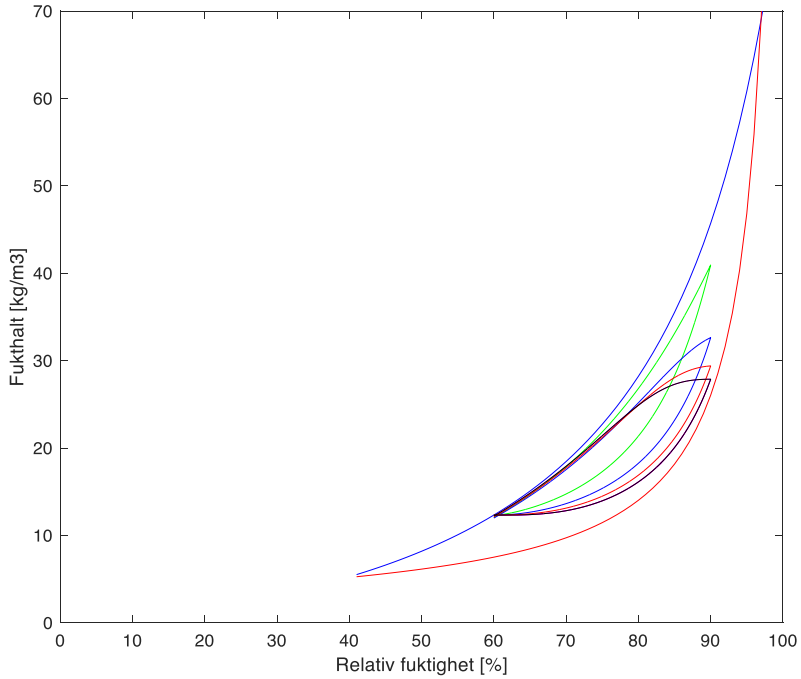
Figur 10: Beräknat scanningförlopp för ett fiktivt material med desorptions- och absorptionsisotermer enligt den blå respektive röda kurvan. Uttorkning till 50RF% följd av uppfuktning till 90%, därefter upprepat två gånger (tre scanningloopar vilka till synes faller på varandra) samt slutligen uppfuktning till 99%. Avvikelsen mellan de tre scanninglooparna är försumbar i förhållande till totala värdet.



Figur 11: Beräknat scanningförlopp för ett material med desorptions- och absorptionsisotermer enligt den blå respektive röda kurvan. Uttorkning till 55% följd av uppfuktning till 85%, därefter upprepat två gånger samt slutligen uppfuktning till 99%. Scanninglooparna faller i varandra så väl att avvikelserna inte syns i denna skala.



Figur 12: Delförstoring ur föregående figur för att visa hur scanninglooparna varierar. Första absorptionsscanningloopen (som startar på desorptionsisotermen vid 55%RF) ligger något högre, efterföljande två loopar ligger på varandra. (Den blå kurvan är desorptionsisotermen, den röda absorptionsisotermen.)



Figur 13: Exempel på hur exponenten i ekvation 2 och 4 påverkar beräknade scanningförlopp: Scanning från 60 till 90 till 60%RF. Grön: exponent=0,5, blå: 1,0, magenta: 1,5, svart: 2,0. (Beräknat för ett material liknande en avjämningsmassa.)

5.2 Modell 2

I modell 2 har desorptionsscanningkurvan har samma konkava form uppåt som absorptionsscanningkurvan. Avsikten är att i någon mån efterlikna de scanningkurvor som Åhs har redovisat. Modell 2 skapas ur modell 1 genom att desorptionsscanningkurvan sätts lika med absorptionsscanningkurvan, dvs de två kurvorna får exakt samma form; konkava uppåt.

5.3 Modell 3

För modell 3 ansätts att scanningkurvorna beskrivs som räta linjer mellan isotermerna. Det är uppenbart att denna form avviker från vad som sker i ett verkligt material, men modellen kan ge förutsättningar för enkel modellering i vissa beräkningsprogram.

6 Scanningförloppets inverkan på beräknat omfördelningsförlopp

I detta avsnitt redovisas beräkningar där allt utom scanningkurvans form (via dess exponent) har hållits konstant.

6.1 Förutsättningar

Beräkningarna grundas på ett utgångsfall som har valts så att det kan förväntas att scanningförloppets form skall ha väsentlig betydelse för slutresultatet. Utgångsläget är

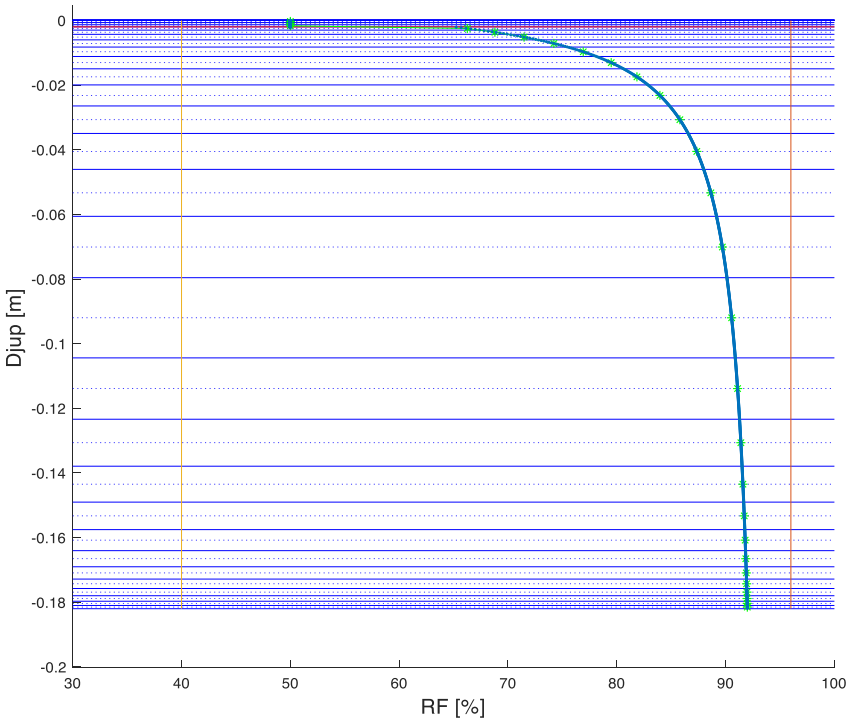
- 180 mm betong

- Två olika vct: Dels vct 0,40, C=450 kg/m^3 , dels vct 0,70, C=260 kg/m^3 (data enligt [11])
- Limmad pvc-matta, 2 mm, med konstant z=2.000.000 s/m (initialt 50%RF tvärs igenom)
- Limfukt 0 g/m^2
- Limmets fuktgenomgångsmotstånd z=0 s/m
- Initial fuktprofil i betongen enligt Figur 14, modellerat med RF_{yta}=65%, RF_{botten}=92% och B=1,06 (se Bilaga 1.1).
- Ensidig uttorkning (totalt tätt nedåt)
- 20°C
- 45%RF ovanför konstruktionen
- Ytövergångsmotstånd överyta z_{yta}=0 s/m
- Simulerad tid 10 år

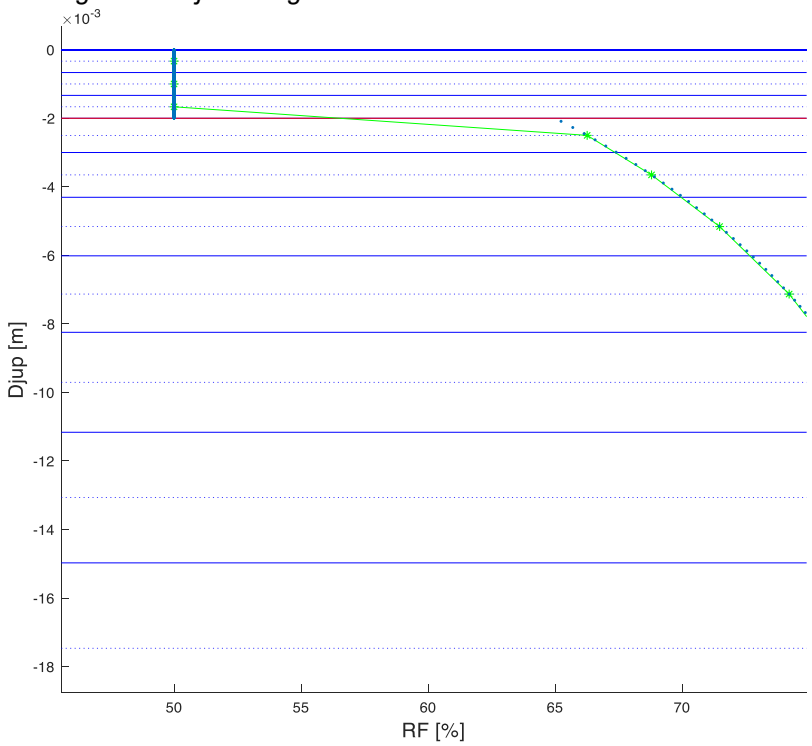
Hedenblad [11] mätte fukttransportkoefficienten som funktion av RF vid desorption. Värden vid absorption saknas. I beräkningarna antags att fukttransportkoefficienten är densamma vid en given fukthalt oavsett om materialet är under uppfuktning eller torkning. Visst stöd för detta finns i [7].

6.2 Modell 1

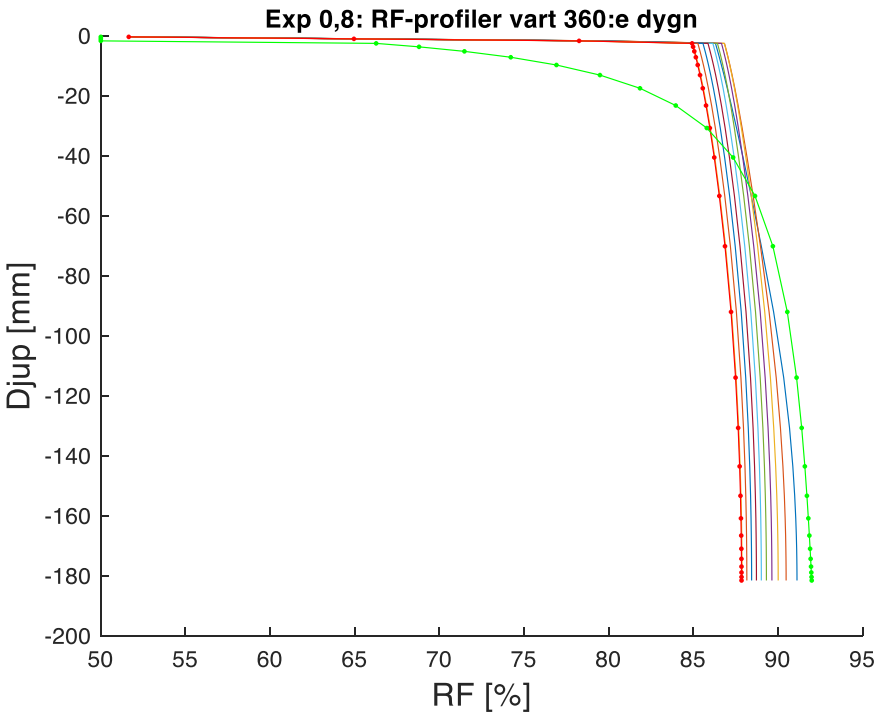
Betydelsen av scanningkurvans form prövas genom att exponenten i modellekvationen (ekvation 1-4) varieras. Valda värden för exponenten är 0,8, 1,0, 1,25, 1,5 och 2,0 (jfr Figur 13). Resultaten framgår av figurer nedan samt av Tabell 1. Som framgår av resultaten är exponentens belopp (bland de valda värdena) och scanningkurvans form (se Figur 13) av liten betydelse; Maximal beräknad RF varierar från 86,83 till 87,16%, dvs 87±0,16%RF (trots radikalt olika form på scanningkurvorna).



Figur 14: Initialprofil för beräkningstester. RF i betongens yta = 65%. RF i mattan = 50%. Heldragna blå linjer: Cellgränser. Streckade blå: Cellcentra. Röda: Materialgränser.



Figur 15: Delförstoring av initialprofil: Heldragna linjer: Cellgränser. Streckade linjer: Cellcentra. Blå prickar: Simulerad initialprofil. Grön kurva med prickar: Interpolerat initialvärde för varje cellcentrum (=det värde som verkligen används i beräkningsprogrammet).



Figur 16: Resultat med modell 1. Fuktprofilens utveckling ned genom konstruktionen över tid. Första beräkningsfallet med exponent = 0,8. Grön kurva med prickar: Initialprofil. Röd kurva med prickar: Profil vid 10 år. 12 månader mellan kurvorna. "Ekvivalent djup" går inte att urskilja. Orsaken är att mattan inte är tillräckligt tät. Under dessa förutsättningar existerar inget ekvivalent djup på det klassiska sättet.

Tabell 1: Sammanställning av resultat beräknade med modell 1 för olika antaganden om exponenten till scanningisotermens ekvation.

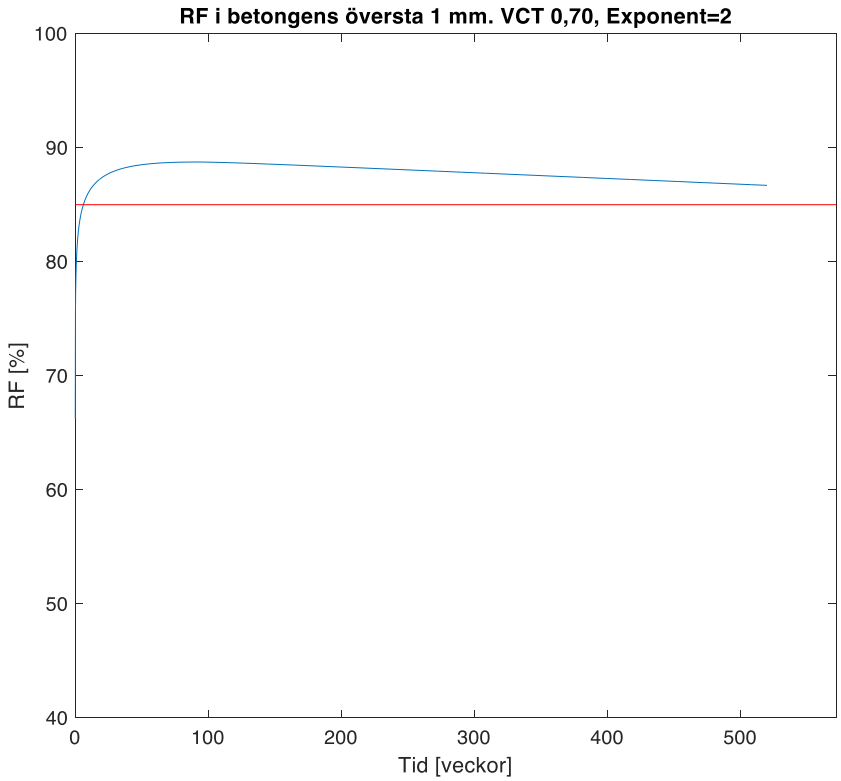
VCT	Exponent	Maximal RF [%]	Vid tid [veckor]
0,4	0,8	84,83	132
-"-	1,0	84,93	119
-"-	1,25	85,02	107
-"-	1,5	85,09	97
-"-	2,0	85,20	82
0,7	0,8	88,38	118
-"-	1,0	88,48	112
-"-	1,25	88,57	106
-"-	1,5	88,64	100
-"-	2,0	88,74	93
-"-	5,0	88,96	73

6.2.1 Kommentarer

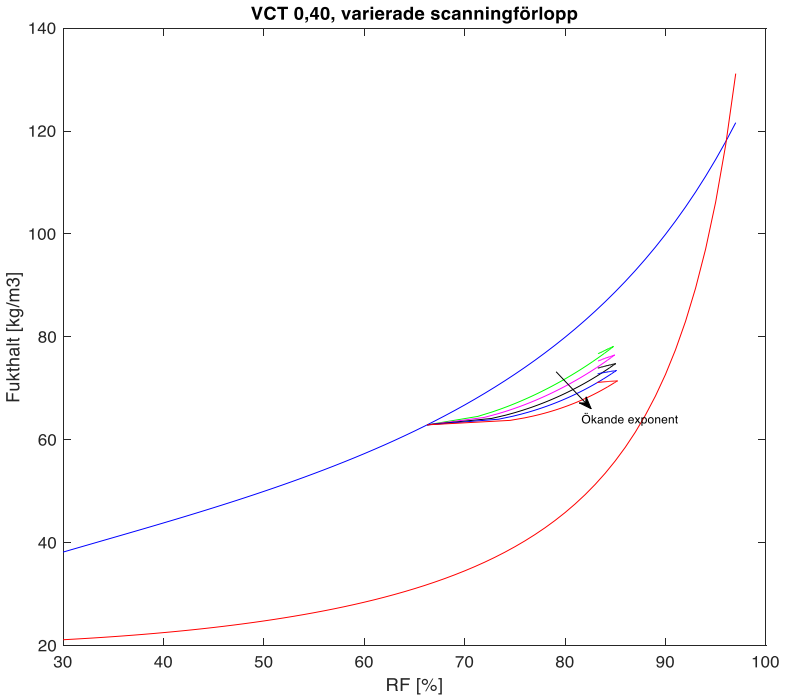
I Figur 17 nedan visas att RF når ett maximalt värde och sedan återigen minskar. Detta visar tydligt att mattans ånggenomgångsmotstånd ($z=2\times10^6$ s/m) är så lågt att det traditionella sättet att bedöma omfördelning, grundat på en helt tät matta, inte fungerar i detta fall.

Skillnaden i maximal RF blir liten trots att scanningförloppen skiljer sig tydligt åt, se Figur 18 och Figur 19. Observera att i Figur 19 finns resultat även för fallet att exponenten = 5, vilket ger en mycket snabb övergång mot absorptionskurvan. Trots detta blir RF mycket lik vad som erhålls för andra värden på exponenten.

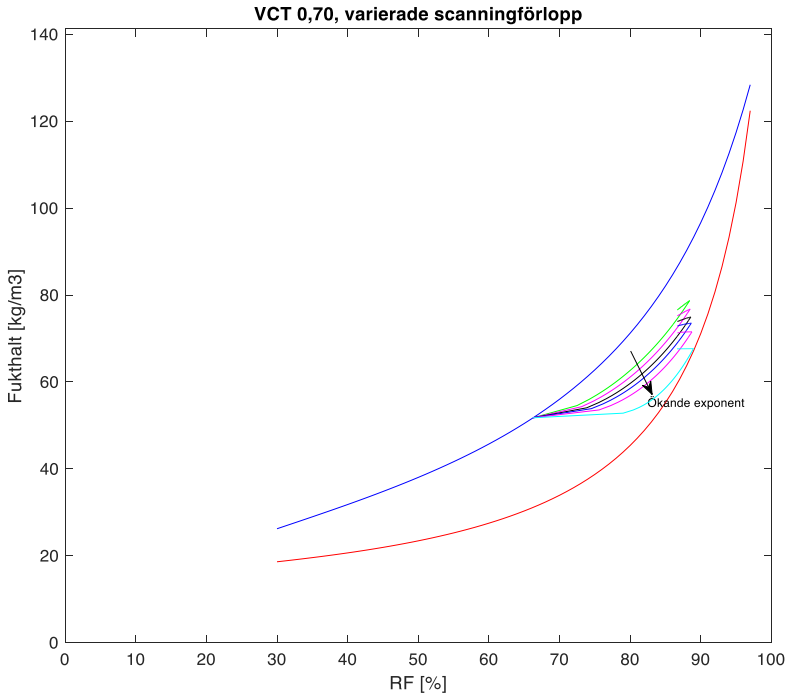
Däremot påverkas den beräknade fukthalten mycket starkt när exponenten varieras. Om problemet med förtvålning av mattlim beror av hur lätt hydroxidjoner transporteras i porsystemet, och om denna transportförmåga är beroende av fukthalten snarare än av RF, så indikerar resultaten att scanningkurvans form kan ha mycket stor betydelse för risken för skada.



Figur 17: Exempel på beräknat förlopp för RF i betongens översta beräkningscell (1 mm). Vct 0,70, exponent = 2.



Figur 18: Omfördelningsförlopp beräknat med scanningmodell 1, varierade exponenter (0,8 – 2,0) för betong VCT 0,40. Fukthalt vs. RF i betongens översta 1 mm. Blå kurva: Desorptionsisoterm, Röd kurva: Absorptionsisoterm.

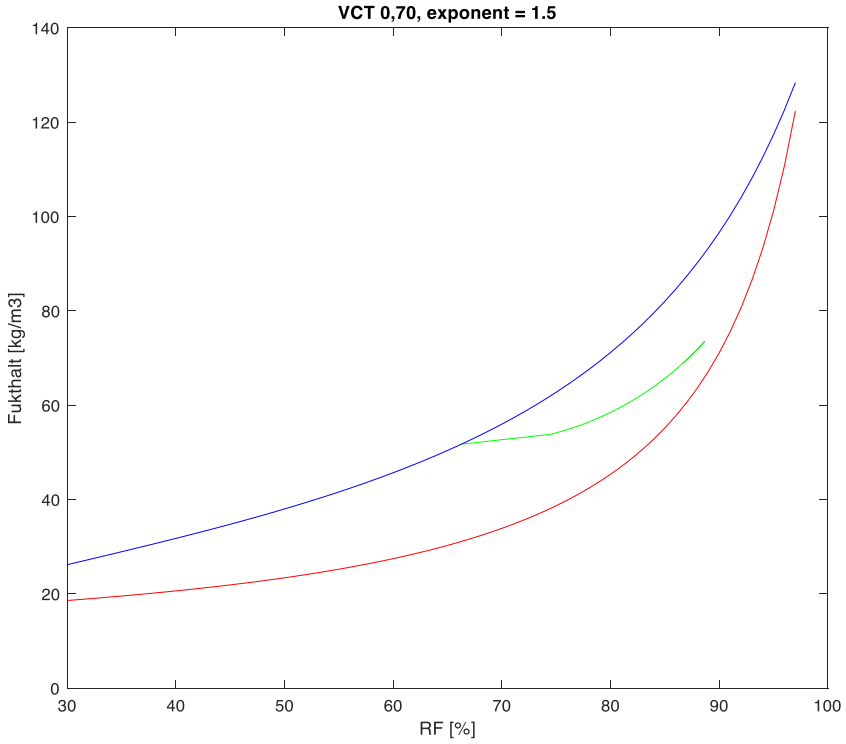


Figur 19: Omfördelningsförlopp beräknat med scanningmodell 1, varierade exponenter (0,8 – 5,0) för betong VCT 0,70. Fukthalt vs. RF i betongens översta 1 mm. Blå kurva: Desorptionsisoterm, Röd kurva: Absorptionsisoterm.

6.3 Modell 2

Här används samma beräkningsfall som för Modell 1, men desorptionsscanningkurvan sätts lika som absorptionsscanningkurvan.

Samma förutsättningar som för testerna av Modell 1. Exponenten sätts till 1,5 för att få en tydlig krökning på scanningisotermerna. Beräkningen utförs först för vct 0,70, se Figur 20.



Figur 20: Scanningförlopp beräknat med Modell 2 (desorptionsscanningkurvan konkav uppåt) för vct 0,70, exponent 1,5 och i övrigt samma förutsättningar som i 6.2. Maximal RF (88,63%) inträffar vid 93 veckor. Motsvarande fall beräknat med Modell 1 ger max RF 88,64% vid 100 veckor (Tabell 1). (Desorptionsförloppet syns inte i figuren eftersom scanningkurvorna för absorption och desorption är identiska.)

6.3.1 Kommentar

Eftersom maximal RF vid limmet, och tidpunkten för när detta värde inträffar, bestäms av absorptionsscanningkurvan, inses att formen på desorptionsscanningkurvan inte har någon betydelse så länge man inte är intresserad av vad som händer *efter* att det maximala värdet har passerats.

Desorptionsscanningisotermens form har dock *principiell* betydelse i ett mer komplext beräkningsfall där hänsyn tas till limfukt och till den uppfuktning av betongens översta delar som kan ske då avjämningsmassan läggs på (den senare effekten torde dock vara liten eftersom primern bromsar fuktinträngning i betongen). För att undersöka detta görs följande kompletterande beräkning:

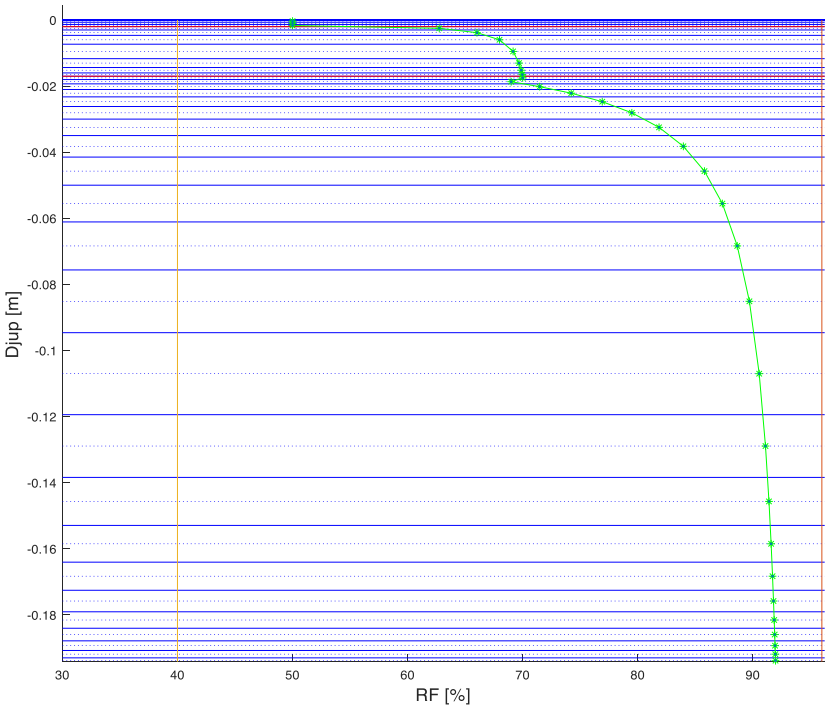
6.3.2 Mer komplex konstruktion

I detta fall görs ett försök att undersöka inverkan av scanningkurvornas form då limfukt och fukt från avjämningsmassan höjer fukttillstånden i sina respektive underlag så att desorptionsscanning inträffar i ett tidigt skede.

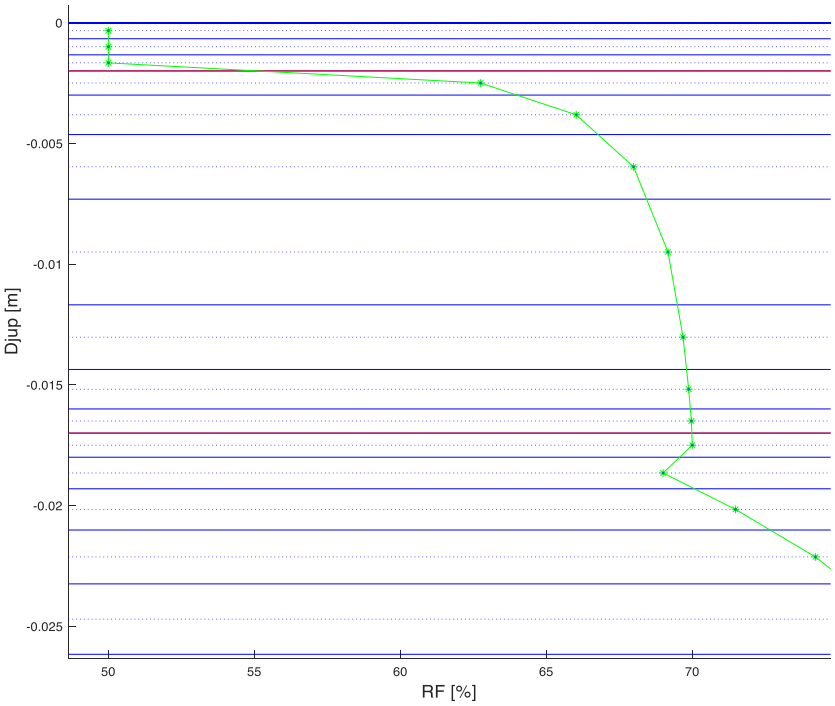
Uppfuktning av avjämningsmassans översta cell(er) simuleras genom att mängden limfukt fördelas i avjämningsmassans översta celler: Med början i översta cellen höjs fukthalten till kapillärmättnad (som i detta fall antags motsvara 97%RF). Limfukt som inte får plats i översta cellen fördelas på nästa och nästa cell. Dessa fuktas upp till kapillärmättnad så långt limfukten räcker. Slutligen avsätts den sista mängden limfukt i en cell, vars fukthalt ökas med den resterande mängden limfukt och vars RF ansätts som RF enligt desorptionsisotermen vid beräknad fukthalt, ökad med 7/8 av avståndet mellan absorptions- och desorptionsisotermen.

Fuktprofilen i betongen modifieras godtyckligt närmast under avjämningen för att grovt avspegla viss uppfuktning från avjämningen (Figur 21 och Figur 22).

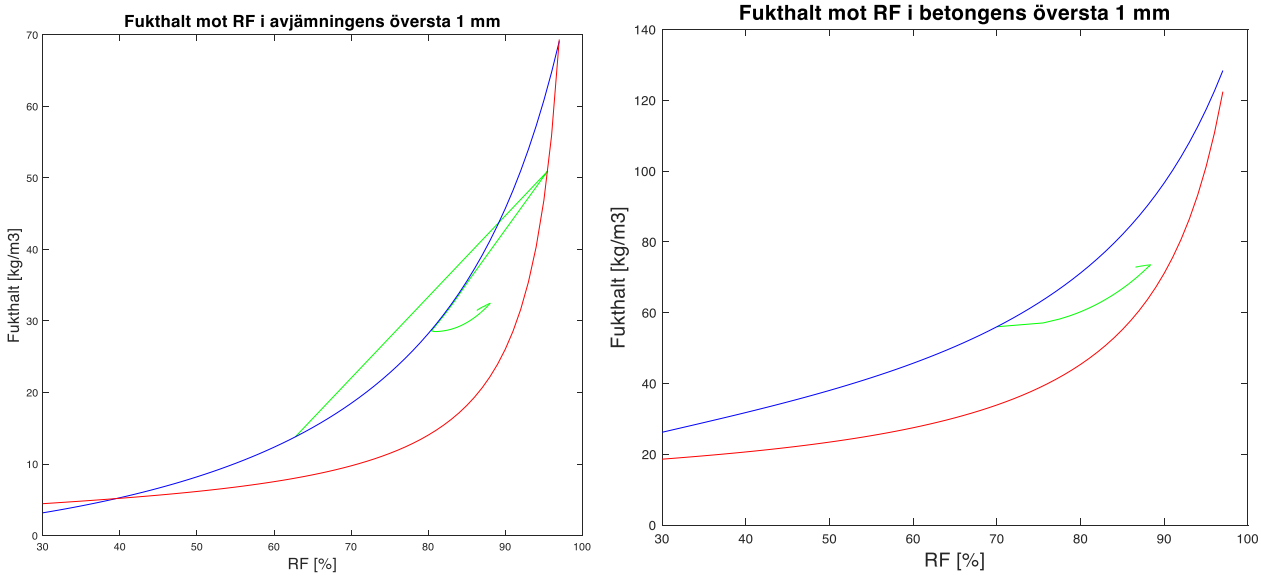
Övriga förutsättningar: Vct 0,70, exponent för scanningkurvan 1,5. Limfukt 90 g/m^2. Limmets ånggenomgångsmotstånd z=10.000 s/m. Avjämningsmassa 15 mm, med profil från 60 till 70%RF. Primerns ånggenomgångsmotstånd z=5000 s/m. Initialprofil enligt Figur 21. Fallet räknas med scanningkurvor enligt avsnitt 6.2 respektive 6.3.



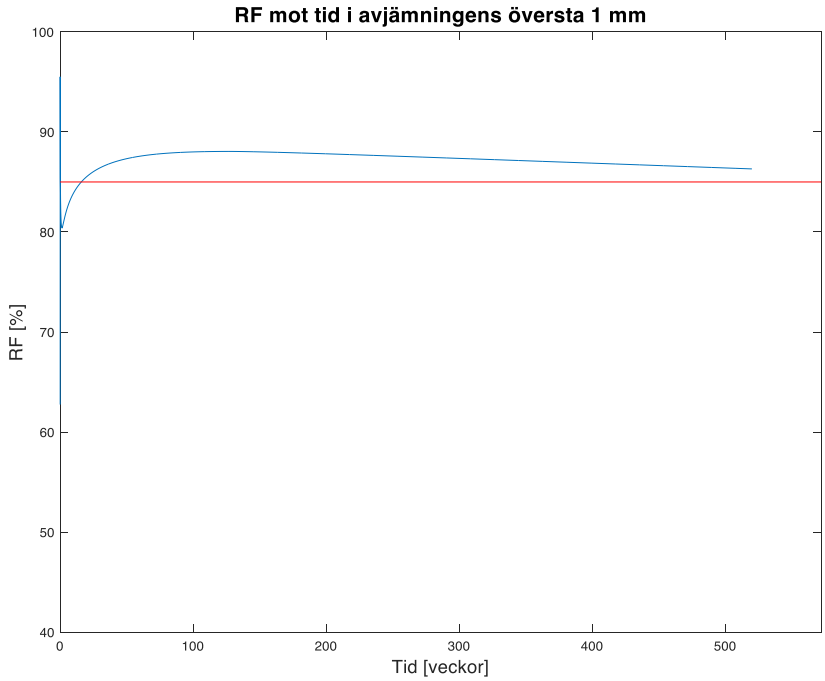
Figur 21: Initialprofil för beräkningsfall enligt avsnitt 6.3.2.



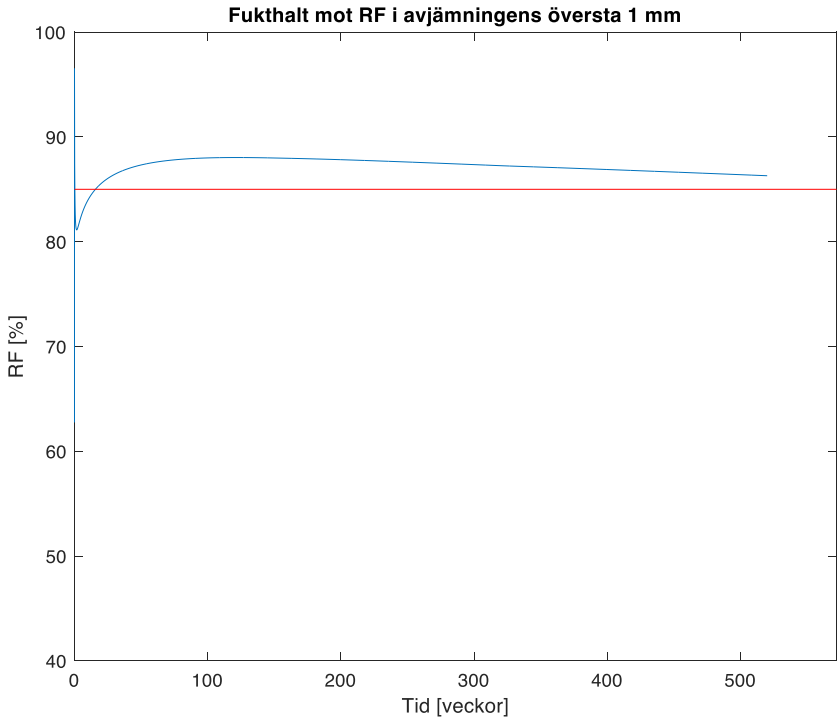
Figur 22: Detalj ur föregående figur. Röda linjer: Gräns mellan olika material. Fuktprofilen modifierad i betongens yta (höjd RF) för att pss simulera viss uppfuktning från avjämningsmassan.



Figur 23: Fall enligt avsnitt 6.3.2 beräknat med scanningmodell 1, dvs skilda absorptions- och desorptionsscanningkurvor.
Vänster: Avjämningsmassans översta beräkningscell (1 mm). Grön kurva ovanför desorptionsisotermen markerar inte verkliga värden, utan endast det initiala "hoppet" från RF=65% i avjämningens yta till det värde (ca 96%) som orsakas – ungefärligt - av limfukten.
Höger: Betongens översta beräkningscell (1 mm).



Figur 24: Beräkningsfall enligt avsnitt 6.3.2 beräknat med Modell 1: RF i avjämningens översta 1 mm. Maximalt värde (efter limfuktpiken) är 88,05% (vid 127 veckor).



Figur 25: Beräkningsfall enligt avsnitt 6.3.2 beräknat med Modell 2: RF i avjämningens översta 1 mm. Maximalt värde (efter limfuktpiken) är 88,03% (vid 121 veckor).

6.3.2.1 <u>Kommentar till komplext fall enligt 6.3.2</u>

Resultaten i Figur 24 respektive Figur 25 visar att desorptionsscanningkurvans form har en närmast icke märkbar effekt på maximal RF under omfördelningsförloppet;

beräkningarna visade 88,03 respektive 88,05%RF. Huvudorsaken är att scanningdesorption förekommer i mycket liten omfattning, både i tid och rum (endast ytligt och endast i ett mycket tidigt skede), även när desorptionsscanning faktiskt förekommer till följd av limfukt och initial uppfuktning av betongen pga fukt från avjämningen.

6.4 Modell 3

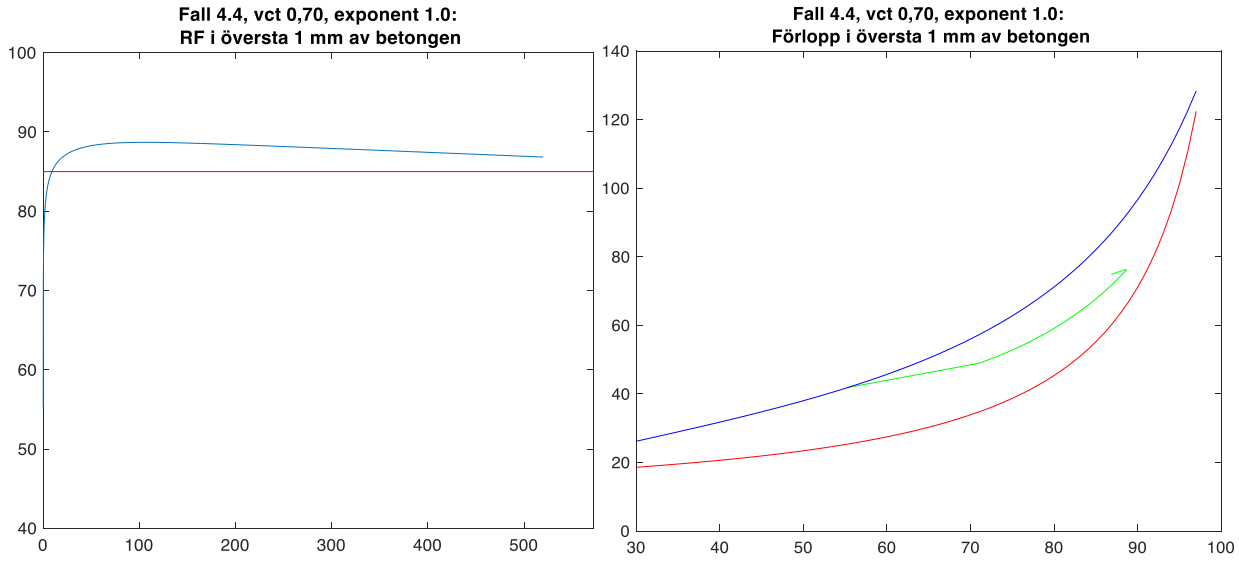
Modell 3 (se avsnitt 5.3) innebär att scanningkurvorna modelleras som räta linjer med viss föreskriven lutning, t.ex. en viss andel av endera isotermens lutning. Resultaten i föregående avsnitt visar dock att den exakta formen på scanningkurvan har liten betydelse för beräknad maximal RF, även då kurvan är tydligt krökt. Det är uppenbart att en rimligt vald konstant lutning bör ge resultat som i hög grad liknar de resultat som redovisades ovan. Observera dock att scanningkurvans form har liten betydelse för RF, men stor betydelse för uppnådd fukthalt. Valet av lutning är således inte betydelselöst.

6.5 Modell med $\delta_v = \delta_v(ø)$

Här prövas beräkningsfallen enligt ovan (modell 1 för vct 0,40 och 0,70) men med transportkoefficienten δ_v modellerad som beroende av materialets RF, inte av dess fukthalt (som tidigare). Eftersom data saknas för δ_v som funktion av RF vid absorption blir det tvunget att använda samma RF-beroende för δ_v vid absorption som vid desorption, dvs δ_v får värden mätta vid desorption, oavsett att aktuell RF är uppnådd genom uppfuktning. Det förefaller orimligt att detta skulle kunna vara korrekt, men eftersom data saknas går det inte att göra en bättre modell.

Tabell 2: Sammanställning av beräknade resultat för olika värden på exponenten till scanningisotermens ekvation, med $\delta_v = \delta_v(ø)$ (avsnitt 6.5).

VCT	Exponent	Maximal RF [%]	Vid tid [veckor]
0,4	0,8		
-”-	1,0	85,17	121
-”-	1,25		
-”-	1,5		
-”-	2,0	85,57	84
0,7	0,8		
-”-	1,0	88,70	108
-”-	1,25		
-”-	1,5		
-”-	2,0	89,07	88
-”-	5,0		



Figur 26: Omfördelningsförlopp beräknat med scanningmodell 1 (skilda absorptions- och desorptionsscanningkurvor), exponent = 1,0, med fukttransportkoefficienten angiven som δ_v =δ_v(RF).
Vänster: RF i betongens översta 1 mm mot tiden. Maximal RF 88,7 vid ca 108 veckor.
Höger: Grön kurva: Fukthalt vs. RF i betongens översta 1 mm. Blå kurva: Desorptionsisoterm, Röd kurva: Absorptionsisoterm. Jämför med Tabell 1 och Figur 19.

6.5.1 Kommentar

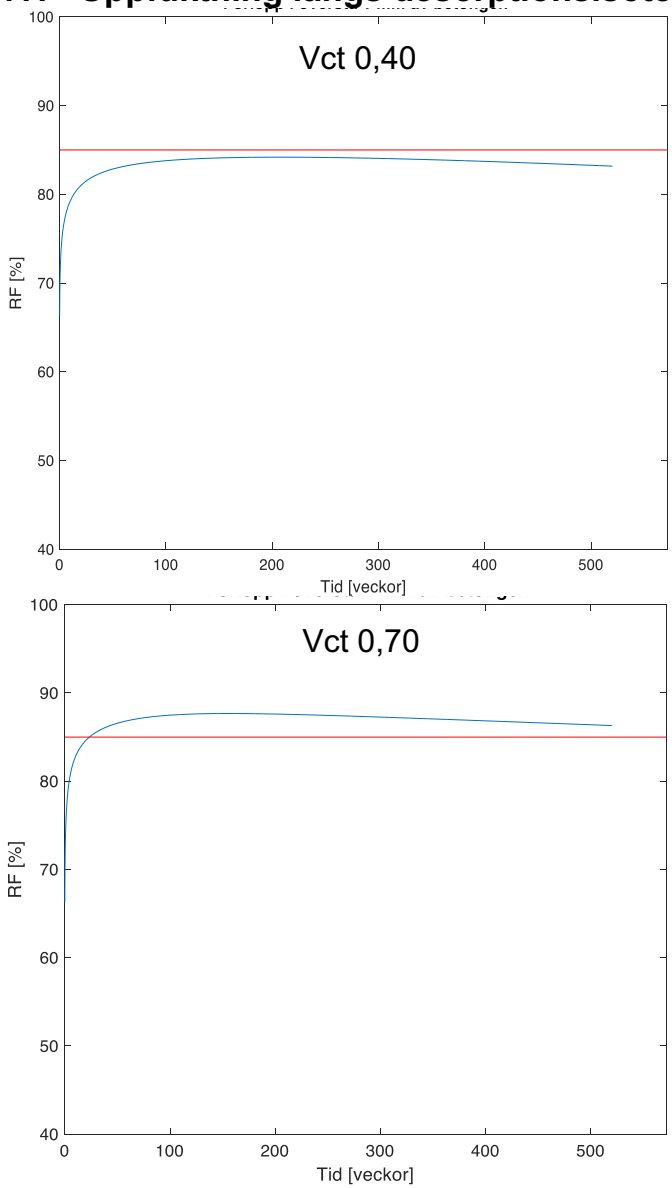
Vid jämförelse med resultaten i Tabell 1 syns att beräkningen med δ_v beroende av RF ger något högre maximal RF och att denna inträffar något tidigare. Förklaringen är att eftersom δ_v har ansatts vara beroende av RF enligt vad som mätts vid desorption så får koefficienten ett högre värde i varje tidssteg vid absorption än då δ_v ansätts vara beroende av uppnådd fukthalt.

Som nämnts ovan är det knappast realistiskt att δ_v skulle ha samma värde, vid given RF, vid absorption som vid desorption. Det förefaller troligare att absorption ger en lägre δ_v vid en och samma RF än vad desorption gör (eftersom fukthalten är lägre). Därmed borde ett realistiskt hänsynstagande till att förloppet sker i absorption medföra att omfördelningen sker långsammare än vad som anges i Tabell 2. Det förefaller således troligt att resultaten i Tabell 1 är närmare sanningen.

7 Beräkning utan scanning

I beräkningarna ovan (modell 1) visades att beräknad maximal RF blev nästan oberoende av scanningkurvans form. För tydlighetens skull redovisas i det följande beräkningar på samma fall som i avsnitt 6.2 men helt utan scanning. I avsnitt 7.1 redovisas omfördelningsförlopp beräknat med uppfuktning längs desorptions-isotermen och i avsnitt 7.2 med uppfuktning längs absorptionsisotermen. I beräkningarna medför det senare fallet att då materialet övergår från torkning (längs desorptionsisotermen) till uppfuktning, flyttas jämviktstillståndet abrupt från desorptionskurvan till ett läge på absorptionskurvan.

7.1 Uppfuktning längs desorptionsisotermen

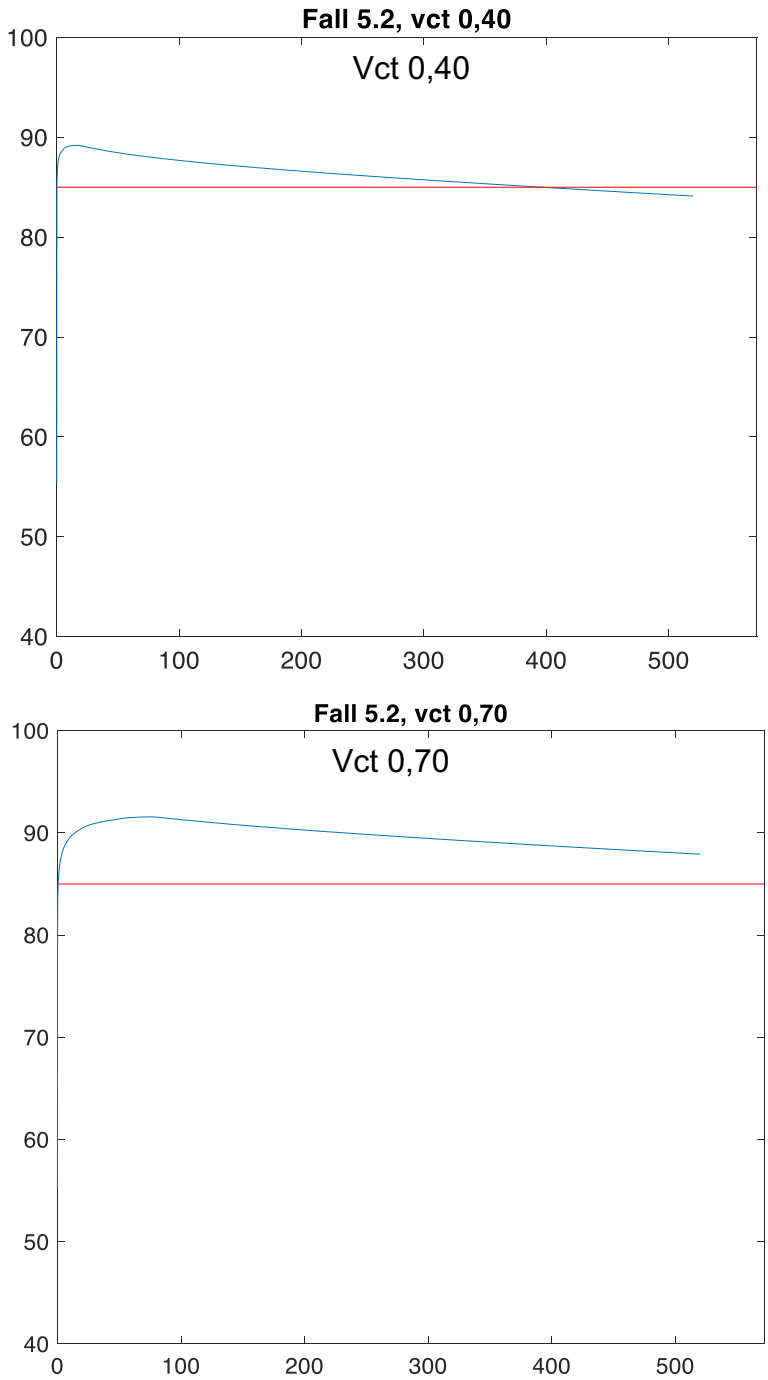


Figur 27: Omfördelningsförlopp beräknat utan scanningkurva; uppfuktning sker längs desorptionsisotermen: RF i betongens översta 1 mm mot tiden. Jfr Tabell 1.
Övre: vct 0,40: Maximal RF 84,19% vid ca 208 veckor.
Nedre: Vct 0,70: Maximal RF 87,67% vid ca156 veckor.

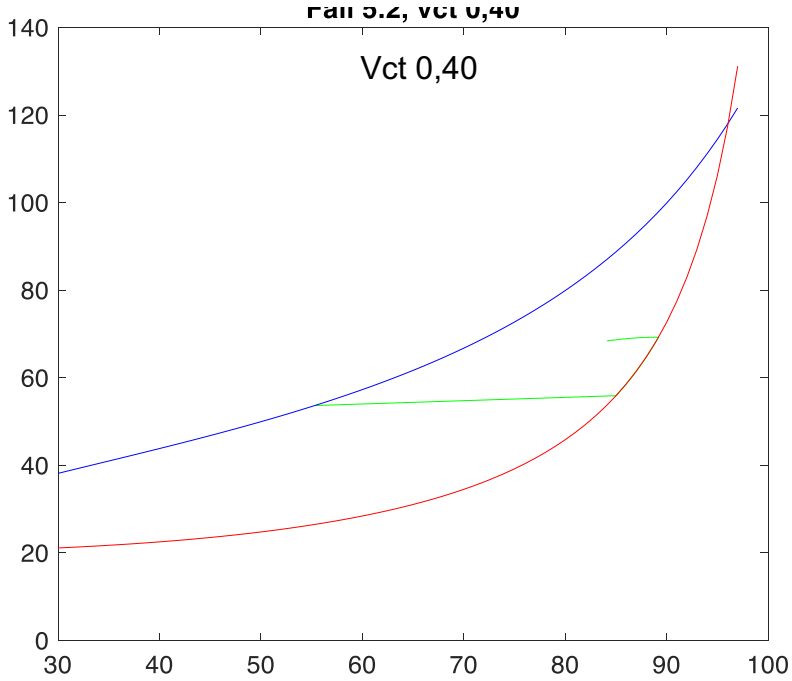
Som visas i Figur 27 så blir maximal RF cirka 1%-enhet lägre då fukttillståndet beräknas helt enligt desorptionsisotermen än då det beräknades med scanningisotermer (jfr Tabell 1). Detta beror på att desorptionsisotermen har brantare lutning än scanningisotermerna. Skillnaden blir olika stor för olika material beroende på hur isotermerna lutar och den skillnad mellan desorptionsisotermens och scanningisotermernas lutning som detta orsakar.

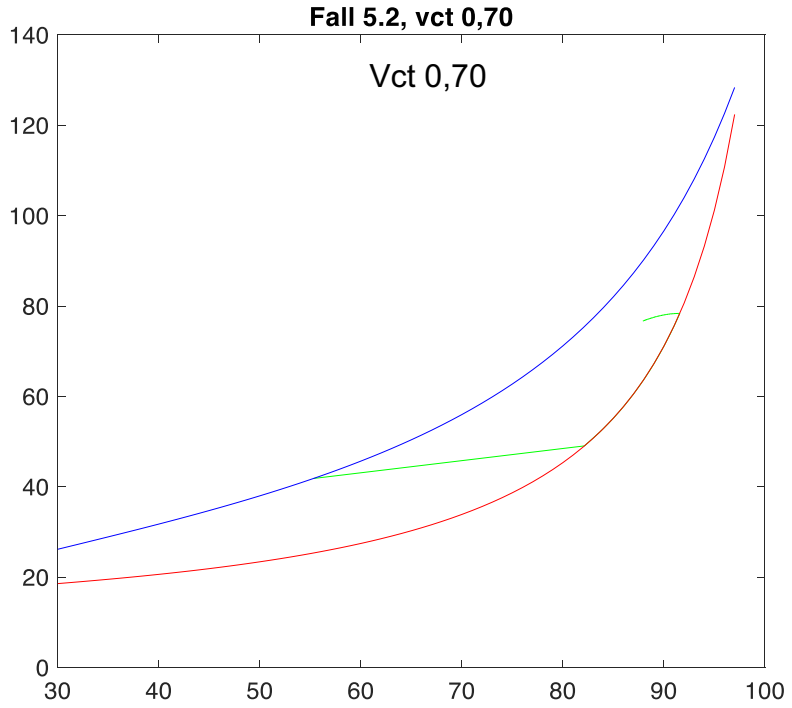
7.2 Uppfuktning längs absorptionsisotermen

Som visas i Figur 28 så blir maximal RF cirka 2,5%-enheter högre då fukttillståndet beräknas helt enligt absorptionsisotermen än då det beräknades med scanningisotermer (Tabell 1).



Figur 28: Omfördelningsförlopp beräknat utan scanningkurva; uppfuktning sker längs absorptionsisotermen: RF i betongens översta 1 mm mot tiden.
Övre: vct 0,40, maximal RF 89,2% vid ca 18 veckor (högre och tidigare än i Figur 27).
Nedre: vct 0,70, maximal RF 91,6% vid ca 77 veckor (högre och tidigare än i Figur 27).





Figur 29: Omfördelningsförlopp beräknat utan scanning; uppfuktning sker längs absorptionsisotermen: Grön kurva: Fukthalt mot RF i betongens översta 1 mm. Blå: Desorptionsisoterm. Röd: Absorptionsisoterm. Vid övergång från uttorkning (initialt läge på desorptionsisotermen) gör RF ett abrupt, nästan horisontellt hopp över till absorptions-isotermen. Att en svag lutning syns beror på den ökning i fukthalt som sker under det första tidssteget efter att torkningen övergått till uppfuktning. Härvid stiger RF från 55 till ca 84%. Därefter ökar RF och w (längs absorptionsisotermen) till motsvarande ca 89,6%RF följt av torkning (se även Figur 28).

8 Diskussion

Beräkningarna har i huvudsak utförts för enkla konstruktioner bestående av enbart betong och matta. Ett verkligt fall är betydligt mer komplext (med avjämningsmassa, med limfukt, limmets fuktgenomgångsmotstånd, avjämningsmassans fukt och primerns fuktgenomgångsmotstånd, uppfuktning av underliggande material pga fukt i lim och avjämningsmassa, olika initiala fuktfördelningsprofiler, mm). Dessutom påverkar scanningkurvans form det beräknade resultatet olika mycket beroende på vilka värden övriga parametrar har: Vid mycket tät betong eller mycket öppen matta hinner inga höga fukthalter uppstå närmast under mattan och då spelar scanningkurvans form ingen roll för bedömningen av konstruktionen. Om studien skulle utökas till att omfatta alla dessa variationsmöjligheter blir mängden beräkningsfall och resultat oöverskådligt stor. I ett verkligt fall kan det dock vara viktigt att beakta även dessa parametrar.

Modellen för scanningisotermer (ekvation 1-4) kan, via valet av exponent, modifieras till att ge mycket skilda former på scanningförloppet. Det är dock svårt att veta vilket värde som skall sättas på exponenten. Eventuellt bör scanningen beräknas med olika värde på exponenten vid absorptions- respektive vid desorptionsscanning. Vi behöver mer information om hur scanningisotermer egentligen ser ut för att kunna modellera detta på ett bra sätt.

Det är okänt hur desorptionsscanningkurvor ser ut i de fall desorption startar efter en föregående absorption där fukttillståndet inte har gått helt över till absorptions-isotermen utan ligger någonstans mellan de båda isotermerna. Eftersom information saknas om detta så vet vi inte heller hur en sådan desorptionsscanningkurva skall modelleras. I samband med omfördelningsberäkningar är denna brist dock inte så avgörande eftersom desorptionsscanning inte är aktuell annat än i ett fåtal undantagsfall, t.ex. vid omfördelning av limfukt. Eftersom just omfördelning av limfukt rimligen är ett förhållandevis kortvarigt fenomen kommer det inte att ha någon avgörande betydelse för fukttillståndet närmast under limmet i det senare skedet då fukt från underlaget omfördelas upp till detta skikt. I beräkningarna ovan visades att inverkan på maximal RF under det egentliga omfördelningsförloppet begränsades till enstaka hundradelar av procentenheter då hänsyn togs till den initiala omfördelningen av en rimlig mängd limfukt.

9 Slutsatser

Scanningförlopp har simulerats med en serie beräkningar för enkla konstruktioner bestående av enbart betong och matta. I en kompletterande beräkning har även inverkan av limfukt och uppfuktning av betongen pga fukt i avjämningsmassa studerats.

Scanningförloppen har modellerats dels som krökta förlopp mellan absorptions- och desorptionsisotermena (med olika val av krökning), dels som förlopp längs antingen desorptions- eller absorptionsisotermen. Scanningförlopp i form av rät linje med given lutning har inte beräknats eftersom övriga resultat visade att detta inte var nödvändigt.

I ett normalt omfördelningsfall sker desorptionsscanning under så kort tid och i så liten del av konstruktionen att dess inverkan på slutresultatet är försumbar. Med ”normalt” avses här att omfördelningsberäkningen avser en konstruktion där betongen har torkat oavbrutet fram till att primning och avjämning sker, och att torkningen sedan fortsätter oavbrutet fram till att mattläggning sker samt att

beräkningen enbart avser förloppet fram till att maximal RF under golvbeläggningen nås. Vad som händer därefter beaktas inte. OM även förloppet därefter ska beaktas måste desorptionsscanning hanteras. Den modell som redovisas i avsnitt 5.1 bedöms vara duglig, men exponenten måste anpassas till de aktuella materialen.

Resultaten visar att

- Scanningkurvans form har liten betydelse för beräknad maximal RF under det egentliga omfördelningsförloppet
- Scanningkurvans form har stor betydelse för beräknad maximal fukthalt under det egentliga omfördelningsförloppet. Detta *kan* ha stor betydelse för bedömning av risken för förtvålning av mattlim.
- Omfördelning som modelleras som uppfuktning längs absorptionsisotermen ger högre RF jämfört med beräkningar baserade på en rimlig scanningkurva
- Omfördelning som modelleras som uppfuktning längs desorptionsisotermen ger lägre RF jämfört med beräkningar baserade på en rimlig scanningkurva
- Scanningförloppet är beroende av fukttransportkoefficienten. Det är därför viktigt att ha tillräckligt god information om hur transportkoefficienten varierar under scanningförloppet (med RF, med fukthalt, eller på annat vis)
- Vi behöver mer information om hur scanning sker och hur scanningisotermer ser ut i material som betong och avjämningsmassor.

10 Referenser

[1] Gregg, S.J, Singh, K.S.W: Adsorption, surface area and porosity, Academic press, London, 1967, 2nd print

[2] Ahlgren, L: Fuktfixering i porösa byggnadsmaterial, Rapport 36, avd Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola, 1972.

[3] Brunauer, S: The adsorption of gases and vapours, Oxford university Press, 1944

[4] Anderberg, A: “Moisture properties of self-levelling flooring compounds”, Rapport TVBM-3120, avd Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola, 2004.

[5] Beräkningsprogram Produktionsplanering Betong, Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, 2018

[6] Manual – Fuktmätning i betong, Sveriges Byggindustrier, 2019.

[7] Saeidpour, L. Wadsö / Cement and Concrete Research 83 (2016) 179 –187

[8] Stelmarczyk, M, Rapp, T, Hedlund, H, Gränne, F: Bascementet inmätt – PPB beräknar uttorkning, SBUF/Sveriges Byggindustrier, project PPB Fukt, 2019. https://www.sbuf.se/ppb/Nyheter/PPB_beraknar_uttorkning/

[9] Zhang, Z: Modelling of sorption hysteresis and its eect on moisture transport within cementitious materials, Université Paris-Est, NNT: 2014PEST1055, 2014

[10] Åhs, M: Redistribution of moisture and ions in cement based materials, Report TVBM-1028, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Lund University, Lund 2011

[11] Hedenblad, G: Materialdata för fukttransportberäkningar, ISBN 9154057663, Byggforskningsrådet, Stockholm, 1996

[12] V. Baroghel-Bouny. Water vapour sorption experiments on hardened cementitious materials. Part I: Essential tool for analysis of hygral behaviour and its relation to pore structure. Cement and Concrete Research, 37:414_437, 2007.

11 Bilagor

1.1. Beräkningsprogrammet

Beräkningen av omfördelningsförloppet innebär lösning av massbalansekvationen

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{dg}{dx} \qquad (Ekv.\ 5)$$

där

w = fukthalten [kg/m^3]
g = fuktflödet [g/m^2/s]
t = tiden [s]
x = lägeskoordinat [m]

Ekvationen utvecklas till

$$\frac{dw}{dt} = C(\emptyset)\frac{d\emptyset}{dt} = -\frac{d}{dx}\left\{v_s(\theta)\delta_v(\emptyset)\frac{d\emptyset}{dx}\right\} \qquad (Ekv.\ 6)$$

där

Ø = relativa fuktigheten [-]
C(Ø) = materialets fuktkapacitet, C=δw / δØ
$v_s(\theta)$ = mättnadsånghalten vid temperaturen θ [g/m^3]
δ_v(Ø) = fukttransportkoefficienten [m^2/s]

Fuktkapaciteten ges av sorptionsisotermens lutning. Vid scanningförlopp ersätts denna av en fuktkapacitet för scanningförloppet, se nedan.

Som ekvationen visar tas ingen hänsyn till källtermer (t.ex. förbrukning av fukt till följd av fortgående cementreaktion) och att beräkningen utförs i en dimension.

I beräkningarna förutsätts att värmeutbyte inte påverkar fukttransportförloppen.

1.1. Beräkningsteknik

Balansekvationen (ekv. 1) löses numeriskt med metoden explicita framåtdifferenser.

1.1.1. Cellindelning

Materialskikten delas in i celler. Som standard sätts tjockleken på översta och nedersta cellen i varje skikt till 1 mm. För mellan liggande celler beräknas tjocklekarna som en geometrisk serie. Detta görs för att begränsa mängden celler och därmed mängden beräkningar som måste göras.

Minsta antal celler i ett skikt är 3. För tunna material (t.ex. mattor) kan detta medföra att översta och understa cellen är mindre än 1 mm tjocka.

1.1.2. Tidssteg

Tidssteget anges till delar av en sekund i början av förloppet och ökas sedan successivt tills det når ett förutbestämt, maximalt värde. Avsikten med detta förfarande är att använda korta tidssteg i början då det kan föreligga kraftiga gradienter som kan göra beräkningen instabil. Genom att sedan öka tidsstegets längd begränsas beräkningstiden.

1.1.3. Övrigt

Vid lösningen av ekvation 1 förutsätts att konstant temperatur råder och att värmeflöden inte är begränsande för fukttransporterna.

Beräkningsprogrammet har kontrollerats mot andra, väletablerade beräkningsprogram (WUFI, KFX).

1.2. Randvillkor

Vid konstruktionens ytor ansätts ett ytövergångsmotstånd för fukttransport, z_{yta}. Värdet är i storleksordningen 50-500 s/m beroende på omständigheterna.

1.3. Startvillkor

Beräkningen startas med en fuktprofil i konstruktionen. Profilen kan grundas på kända mätdata, på beräkningar eller på rena antaganden. I denna studie har initialprofilen simulerats med följande ekvation:

$$\emptyset(d) = \emptyset_{uk} + (\emptyset_{yta} - \emptyset_{uk)} \frac{(B-1)(1-d)}{B-1+d} \qquad (Ekv.\ 7)$$

där

- d är djupet i respektive skikt (räknat från dess överkant), angivet som andel av dess total tjocklek, dvs 0≤d≤1 och d=0 vid överkant
- $\emptyset_{uk}$ är RF i underkant skiktet
- $\emptyset_{yta}$ är RF vid skiktets yta
- B är en passningsparameter som ger kurvan rätt krökning. Det gäller att $B>1$ (och vanligtvis B<1,1). Vid höga värden på B blir kurvan en rät linje.

1.4. Limfukt

Eventuell limfukt fördelas i översta materialskiktets övre celler, med början på den översta. Cellerna fylls upp till kapillärmättnad så långt limfukten räcker. Till sist nås ett läge där resterande limfukt inte räcker för att fylla en cell till kapillärmättnad. Denna cell fylls då till den fukthalt som resterande limfukt räcker till, och cellens RF beräknas grovt med en enkel interpolation mellan absorptions- och desorptionsisotermen vid aktuell fukthalt. Metoden är grov, men beräkningsresultatet är i praktiken inte beroende av hög precision i detta skede.

1.5. Modell för sorptionsisotermer

Den ekvation som används som beskrivning av sorptionsisotermerna är

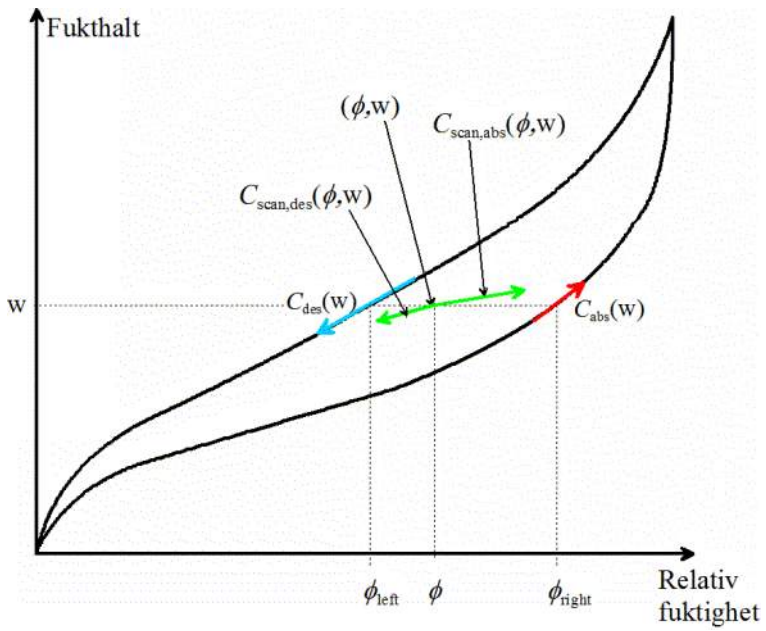
$$w(\phi) = k\frac{(\emptyset-\emptyset_0)^n}{(A+(\emptyset-\emptyset_0))(B-(\emptyset-\emptyset_0))} \qquad \textit{(Ekv. 8)}$$

Där w(ø) är fukthalten [kg/m^3] och k, A, B och n är passningskonstanter. $Ø_0$ är den RF där innehållet av förångningsbart vatten har definierats som 0.

1.6. Modell för scanningisotermer

När ett material övergår från torkning till uppfuktning eller tvärtom följer fukttillståndet en s.k. scanningkurva som löper mellan de båda isotermerna, se Figur 30. Vid en noggrann omfördelningsberäkning måste sådana scanningkurvor användas.

I beräkningarna har scanningisotermerna beskrivits med följande modell:



Figur 30: Illustration av hur scanningkapaciteten i punkten (ø,w) beräknas.

<u>Absorption</u>:

$$C_{scan,abs} = andel \cdot C_{abs}(w) \qquad \textit{(Ekv. 9)}$$

$$andel = \left(\frac{\emptyset+k-\emptyset_{left}}{\emptyset_{right}-\emptyset_{left}}\right)^{exponent} \qquad \textit{(Ekv. 10)}$$

Termen k behövs för att undvika att scanningkapaciteten blir 0 i de fall aktuell Ø är lika med $Ø_{left}$. I praktiken – i beräkningarna – inträffar detta endast när fukttillståndet går från att följa desorptionsisotermen till att följa en scanningisoterm. Termen används enbart när Ø<=$Ø_{left}$+0,01 och den sätts då till k =0,01 (k kan varieras från 0,001 till cirka 0,05 utan att några större förändringar kan ses i de beräknade resultaten). I andra lägen är k=0 och påverkar således inte den beräknade scanningabsorptionskapaciteten.

Exponenten kan varieras för att få olika form på scanningloopen. Dess inverkan på slutresultatet är dock relativt begränsad. Som standardvärde kan exponenten sättas till 1.

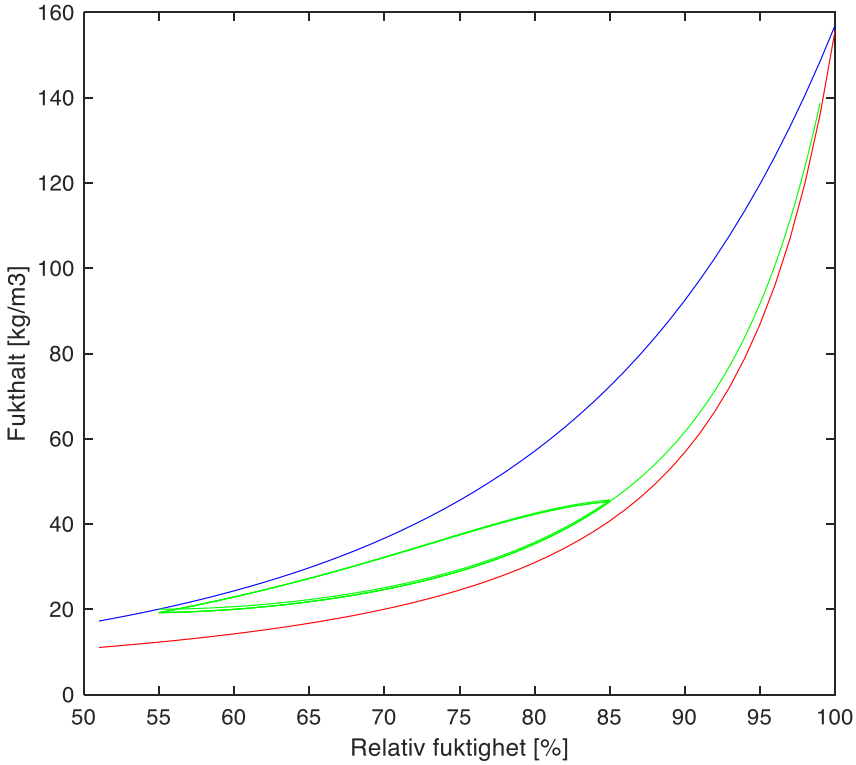
Desorption:

$$C_{scan,des} = andel \cdot C_{des}(w) \qquad \textit{(Ekv. 11)}$$

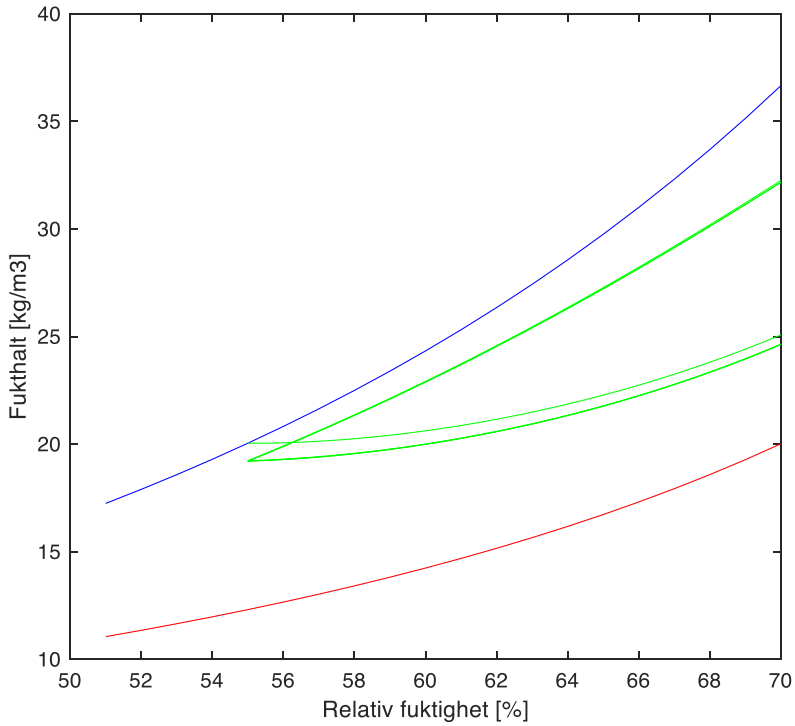
$$andel = \left(\frac{\emptyset_{right} - \emptyset}{\emptyset_{right} - \emptyset_{left}}\right)^{exponent} \qquad \textit{(Ekv. 12)}$$

Vid desorptionsscanning behövs nästan aldrig någon *k*-term eftersom desorptionscanningen nästan aldrig utgår från absorptionsisotermen. Undantaget från detta är när cell(erna) i ett material tillförs fukt från mycket våta, angränsande material, som till exempel när en relativt torr avjämningsmassa påförs lim inför golvläggning. Fukten i limmet kan då göra att de översta delarna av avjämningsmassan kan nå ”kapillär mättnad”. I en gränszon mellan den opåverkade avjämningsmassan och den kapillärmättade delen kommer fukttillståndet att beskrivas av en scanningabsorptionsisoterm, och vid fortsatt torkning sker en scanningdesorption. I vissa fall kommer scanningabsorptionen att medföra att scanningdesorptionen startar vid en punkt så nära absorptionskurvan att en k-term behövs.

Vid upprepade scanningcykler ger modellen en förskjutning mellan scanninglooparna, se Figur 31-Figur 12. Detta fel är olika stort beroende på mellan vilka RF-nivåer cyklingen sker. I en normal omfördelningsberäkning förekommer dock inte upprepade scanningcykler varför denna brist inte har någon praktisk betydelse.



Figur 31: Exempel på beräknat scanningförlopp för ett fiktivt material med desorptions- och absorptionsisotermer enligt den blå respektive röda kurvan. Fukthalt (kg/m^3) mot RF. Uttorkning (längs desorptionsisotermen) till 55% följd av uppfuktning till 85%, därefter upprepat två gånger samt slutligen uppfuktning till 99%. Scanninglooparna faller i varandra så väl att avvikelserna inte syns i denna skala.



Figur 32: Delförstoring ur föregående figur för att visa hur scanninglooparna varierar. Första absorptionsscanningen ligger något högre, efterföljande två loopar ligger på varandra. (Den blå kurvan är desorptionsisotermen, den röda absorptionsisotermen.)

1.7. Fukttransportkoefficienter

I denna studie beräknas fuktflöden (1-dimensionellt) enligt

$$g = -\delta_v(w,t)\frac{dv}{dx} \qquad \textit{(Ekv. 13)}$$

där δ_v är fukttransportkoefficienten δ med ånghalt v som drivande potential.

Fukttransportkoefficienten δ_v varierar både med materialets fuktinnehåll (uttryckt som fukthalt w eller indirekt som relativ fuktighet ø) och med materialets ålder till följd av de strukturförändringar som sker över tid. Eftersom fuktinnehållet vid en viss relativ fuktighet beror av om materialet håller på att torkas eller fuktas upp så kommer även fukttransportkoefficienten att ha en liknande hysteres.

1.7.1. Modell för fukttransportkoefficientens RF-beroende

Transportkoefficienterna (vid absorption respektive desorption), uttryckta som funktion av relativa fuktigheten ø, beskrivs med följande ekvation

$$\delta_v(\emptyset) = k\frac{\phi^n}{B-\phi} + p\emptyset + q \qquad \textit{(Ekv. 14)}$$

Koefficienterna p, q, k, B och n anpassas till kända data i separat procedur.

1.7.2. Fukttransportkoefficientens hysteres

Fukttransportkoefficienter i cementbundna material varierar beroende på om materialet tar upp eller avger fukt. I litteraturen saknas vanligtvis uppgifter om hur fukttransportförmågan varierar mellan absorption och desorption, men enstaka exempel finns, se t.ex. [7],[8].

I detta beräkningsprogram antags att fukttransportkoefficienten egentligen är beroende av fukthalten, oavsett om absorption eller desorption pågår. För cementbundna material är även detta en förenkling eftersom porstrukturen efter en torkning-uppfuktningscykel inte är densamma som före torkningen. Det innebär också att fukttransportkoefficientens värde blir beroende av <u>hur hårt</u> materialet har torkats innan det återigen börjar fuktas upp.

I brist på bättre approximation antags att fukttransportkoefficienten kan beskrivas som en funktion av fukthalten, oavsett om uppfuktning eller torkning pågår. Sambandet ”översätts” från sambandet enligt ekvation 10, via sorptionsisotermen (enligt ekvation 4) till ett tredjegradspolynom, vilket sedan används både vid torkning och vid uppfuktning.

1.7.3. Säkerhetsfaktorer för fukttransportkoefficienter

Fukttransportkoefficienter påverkar slutresultatet relativt kraftigt, framförallt vad gäller tidpunkt då högsta fukttillstånd uppnås. För att göra det möjligt att på ett enkelt sätt undersöka hur slutresultatet påverkas av smärre fel (osäkerheter) i materiadata används en säkerhetsfaktor i beräkningarna.