

FÖRENKLAD METOD FÖR BEDÖMNING AV OMFÖRDELNING AV FUKT I GOLVKONSTRUKTIONER

Sture Lindmark

2019-11-01

Sammanfattning

I rapporten redovisas en förenklad metod för bedömning av risken att kritiskt RF-värde för golvliv (85%) skall komma att överstigas efter omfördelning av fukt i en konstruktion bestående av limmad matta på avjämningsmassa på underlag av betong. Metoden har utvecklats genom att pröva olika varianter av förenklade metoder mot en stor mängd utförligt beräknade omfördelningsförlopp. Med "utförlig" avses att beräkningarna har utförts med hänsyn till hysteres mellan sorptionsisotermer, scanning-kurvor mellan dessa isotermer samt med hänsyn till att fukttransportkoefficienten beror av huruvida materialet är under torkning eller uppfuktning. Beräkningarna har utförts för en mängd variationer av betongtjocklekar, avjämningsmassa, torkningsklimat, mm. Totalt har utförts ca 15000 olika beräkningsfall för vct 0,55 och 3500 för vct 0,40.

Beräkningarna har utförts med materialdata för betong med Basement med vct 0,40 och 0,55 enligt SBUF-projekt 13198, samt med materialdata för en vanligt förekommande, s.k. normaltorkande avjämningsmassa från Saint-Gobain Sverige AB (Weber). Materialdata har modifierats med vissa säkerhetsfaktorer i syfte att öka säkerhetsmarginalen i den förenklade metoden.

Den förenklade metoden innebär att en parameter X beräknas enligt

$$X = (92 - RF_{32mm}) \cdot (92 - RF_{uk,avj}) \cdot \frac{T_{avj}}{z_{matta}}$$

där

RF_{32mm} är RF-värdet vid limning på djupet 32 mm under betongens yta

$RF_{uk,avj}$ är RF-värdet i avjämningsmassans underkant vid tiden för limning

T_{avj} är avjämningsmassans tjocklek i meter och

z_{matta} är mattans ånggenomgångsmotstånd dividerat med 1.000.000 [s/m].

Om parametern X är större än ett visst värde kommer RF vid limmet inte att överstiga 85% förutom den tid direkt efter limning då limfukten skapar en omedelbar pik i RF-nivån, vilken enligt beräkningarna varar 1-2 dygn. (Bland de ca 19.000 beräkningar som genomförts fanns ett enda undantag från detta: I det fallet blev tiden över 85%RF knappt tre dygn.)

Vid praktisk användning utvärderas beräkningen enligt följande

- om $X < 0,5$: RF vid limmet kommer att överstiga 85%. Konstruktionen måste fortsätta torka.
- om $0,5 < X < 1,5$: En utförlig beräkning bör genomföras
- om $X > 1,5$: Konstruktionen kan bedömas ha torkat så väl att RF vid limmet inte kommer att överstiga 85% mer än några enstaka dygn.

Beräkningarna, och därmed metoden, är begränsad till de material som nämndes ovan, maximal avjämningsmassa 50 mm, maximal betongtjocklek 200 mm och krav på kontinuerlig torkning, utan fuktillförsel som kan förändra den karaktäristiska uttorkningsprofilen.

Vid praktisk användning bör mätvärdet på 32 mm djup kunna ersättas med mätvärde från 35 mm djup (detta ger även en ökad säkerhet i bedömningen) och mätvärdet för RF längst ner i avjämningsmassan kan sannolikt ofta ersättas med det mätvärde som erhålls vid en mätning enligt GBR:s mätmetod.

Förord

Detta har varit ett mycket intressant projekt att få arbeta med, och det hade inte skett om inte jag hade haft så trevliga branschkollegor som kommit med uppmuntran och glada tillrop! Jag sänder därför ett varmt tack till

- Thomas Linneroth, Monomeet AB, som tog det egentliga initiativet till projektet,
- Christer Allsten, Thage i Skåne AB, som omedelbart förstod behovet och värdet av metoden och som har varit projektansvarig,
- Marcin Stelmarczyk, Green Dragon Magic, för hjälp med materialdata och intressanta diskussioner,
- Tony Cerdic och Stefan Thulin, båda vid Monomeet AB,
- Jörgen Grantén och Nicklas Sahlén, båda vid FuktCom ,
- Hans Hedlund, Skanska/SBUF och Ted Rapp, Sveriges Byggindustrier

Varmt tack till SBUF, Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, som har stått för en stor del av finansieringen av projektet!

Lund och Gimdalen, 2019-11-01

Sture Lindmark

1 INNEHÅLL

1	INNEHÅLL.....	3
2	BAKGRUND.....	5
3	PROJEKTETS SYFTE OCH MÅL	5
4	GRUNDPRINCIP VID OMFÖRDELNING	5
5	ALLMÄNT OM EN FÖRENKLAD METODIK	8
6	TILLVÄGAGÅNGSSÄTT I DETTA PROJEKT	9
6.1	OMFATTNING	9
7	UTFÖRLIGA BERÄKNINGAR.....	10
7.1	SAMMANSTÄLLNING AV SÄKERHETSMARGINALER	14
7.1.1	Säkerhetsfaktorer.....	14
7.1.2	Hysteres i transportkoefficienten.....	14
7.1.3	Limfuktmängdens fördelning i de översta cellerna	14
7.1.4	Reduktion av transportkoefficienter	14
8	RESULTAT AV UTFÖRLIGA BERÄKNINGAR	16
9	FÖRENKLADE BEDÖMNINGSMETODER.....	19
9.1	BEDÖMNING GENOM JÄMFÖRELSE MED BERÄKNAT FALL	19
9.2	BEDÖMNING GENOM ENKLA JÄMFÖRELSE.....	20
9.2.1	Enbart värde i avjämningsmassan.....	20
9.2.2	Enbart värde på 40% av betongtjockleken	22
9.2.3	Enbart värde på djupet 32 mm i betongen.....	24
9.3	KOMBINATION AV GRÄNSVÄRDEN	25
9.4	BEDÖMNING VIA BERÄKNAD PARAMETER	28
9.5	BEDÖMNING VIA PARAMETER BASERAD PÅ $RF_{40\%}$	31
9.6	DISKUSSION KRING DE OLIKA METODERNA.....	32
10	REKOMMENDATION: FÖRSLAG TILL FÖRENKLAD METODIK.....	33
10.1	BEGRÄNSNINGAR.....	34
10.2	KOMPLETTERING / ALTERNATIV METODIK.....	34
11	BEHOV AV FORTSATT UTVECKLING	35
12	REFERENSER	36
13	BILAGOR.....	37

De resultat och slutsatser som redovisas i denna rapport gäller för de materialkvaliteter som har använts i denna studie och med de säkerhetsfaktorer som har lagts till på dessa materialdata. Det är okänt huruvida resultaten kan flyttas över på betong med annan mikrostruktur (särskilt de med öppnare struktur). Även andra avjämningsmassor kan medföra andra slutresultat.

Den förenklade bedömningsmetod som anges är en förenklad metod! Det betyder att det inte kan förväntas att den alltid visar rätt resultat och i de fall den tyder på ett gränsfall mellan acceptabelt och icke acceptabelt resultat bör en utförlig beräkning göras.

2 BAKGRUND

I modernt husbyggande används ofta betong med mycket lågt vattencementtal (v_{ct}^1) i syfte att skapa självuttorkning så att golvbeläggning kan läggas inom en rimlig tid. Sedan några år tillbaka används nu också så kallad "modern" betong där delar av Portlandcementet ersatts med något restmaterial, framförallt flygaska. På betongen läggs ofta en avjämningsmassa.

Under de senaste åren har det vid upprepade tillfällen noterats att denna "moderna" betong inte torkar som förväntat. En vanlig situation är att traditionell RBK-mätning [6] visar att fuktillståndet på s.k. ekvivalent djup är för högt och att den fortsatta uttorkningen går extremt långsamt; praktiskt sett sker ingen torkning alls.

För byggtreprenören innebär detta ett svårt problem: Att vänta ut torkningen kan ta lång tid och därmed försena hela bygget och bli kostsamt. Alternativt chansar man; lägger golven och hoppas att det ska gå bra ändå.

Ett sätt att hantera denna situation är att göra en s.k. prognosticerande omfördelningsberäkning, dvs man utför en beräkning där man med utgångspunkt i en mätt eller bedömd fuktfördelning i konstruktionen vid tiden för limning beräknar vilken fuktighet som kan komma att uppstå vid mattlimmet. En sådan beräkning förutsätter tillgång till detaljerade materialdata för betong, avjämningsmassa samt matta och även kunskap om randvillkor runt konstruktionen. Själva beräkningstekniken är komplicerad.

Mot bakgrund av det ovanstående är det uppenbart att det finns ett behov av att utveckla en metodik så att byggtreprenören själv, inom rimliga gränser, kan göra en bedömning som åtminstone skiljer ut de verkligt riskabla fallen från de ofarliga.

3 PROJEKTETS SYFTE OCH MÅL

Projektets syfte är att bidra till att byggtreprenören skall kunna minimera sina risker och kostnader i samband med limning av mattor på underlag av avjämningsmassa på "modern" betong.

Projektets mål är att hitta en metod att kunna göra en enklare bedömning av kommande fuktnivå vid limmet än att göra en fullständig omfördelningsberäkning. Strävan är att denna metod skall bygga på sådana parametrar som byggtreprenören kan mäta på platsen. Detaljerade uppgifter om materialegenskaper skall inte behövas.

Ett andra mål är att undersöka vilka parametrar som har störst betydelse för den kommande omfördelningen och som man därför måste ha god kunskap om.

4 GRUNDPRINCIP VID OMFÖRDELNING

"Omfördelningen av fukt" är den fukttransportprocess som äger rum efter att betongen (eller avjämningsmassan) har belagts med ett ytskikt, t.ex. en limmad

¹ v_{ct} =vattencementtal=massa blandningsvatten/massa cement.

v_{bt} =vattenbindemedelstal=massa blandningsvatten/massa cement, där "cement" omfattar både Portlandcement och eventuella mineraliska tillsatsmaterial.

$v_{ct_{ekv}}$ =ekvivalent vattencementtal, samma typ av kvot som de föregående, men varje tillsats-material vägs in med en effektivitetsfaktor. Används då betongfabriken tillsätter mineraliska tillsatsmaterial. För tillverkade cement med inblandning av mineraliska tillsatsmaterial är $v_{ct} = v_{ct_{ekv}} = v_{bt}$. För Bascement, som denna rapport bygger på, används begreppet v_{ct} .

plastmatta. Under denna process omfördelas den fukt som fanns kvar i konstruktionen vid limningen. Processen fortgår tills att all kvarvarande fukt har samma termodynamiska tillstånd.

Innan mattan limmas har betongen torkat mot omgivande luft, utsatts för fukt från den färskavjämningsmassan, och sedan torkat tillsammans med avjämningsmassan. Under den inledande torkningen skapas en uttorkningsprofil i betongen. När avjämningsmassan läggs på ökas betongens fukthalt nära ytan. Ju tjockare avjämningsmassa, desto större blir inverkan på betongens fuktprofil. Härvid följer fuktillståndet i betongen en absorptionsscanningisoterm. Samtidigt torkar avjämningsmassan och följer då en desorptionisoterm.

I samband med limningen tillförs limfukt ånyo till avjämningsmassans övre del. Denna ökar då sitt fuktillstånd längs en absorptionsscanningisoterm

Efter att mattan limmats sker en omfördelning där

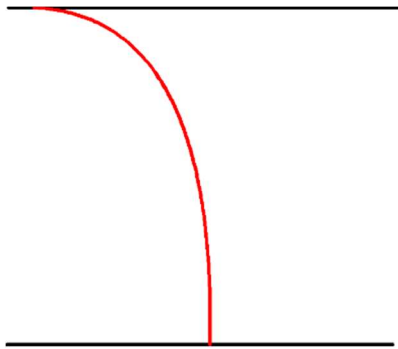
- översta delen av avjämningsmassan inledningsvis torkar till följd av att limfukten sprids nedåt och, i någon mån, torkar bort genom mattan,
- de övre, men inte allra översta, delarna av avjämningsmassan fuktas upp längs en absorptionsscanningisoterm pga den limfukt som sprids nedåt,
- nedre delen av avjämningsmassan sannolikt torkar längs desorptionisotermen genom att avge fukt till betongen,
- övre delen av betongen fuktas upp via en absorptionsscanningisoterm,
- nedre delen av betongen fortsätter torka längs desorptionisotermen.

I ett något senare skede, och beroende på fuktfördelningen vid processernas början kommer

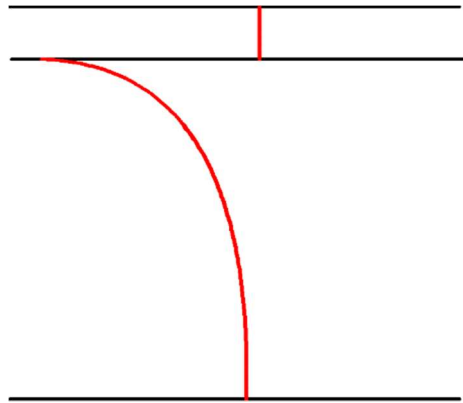
- avjämningsmassans övre delar att börja fuktas upp, längs en absorptionsscanningisoterm, pga fukt som tillförs underifrån,
- undre delen av avjämningsmassan antingen att torka genom att avge fukt uppåt, eller fuktas upp genom att ta upp fukt från betongen,
- översta delen av betongen antingen att torka längs en desorptionsscanningisoterm genom att avge fukt till avjämningsmassan, eller att fuktas upp längs en absorptionsscanningisoterm genom att ta emot fukt från nedre delen av betongen
- nedre delarna av betongen att torka längs desorptionisotermen.

Ett försök att grafiskt illustrera vad som sker visas i figurerna 1-7 nedan. Figurerna är enbart principiella, varken exakta former eller tider kan anges generellt.

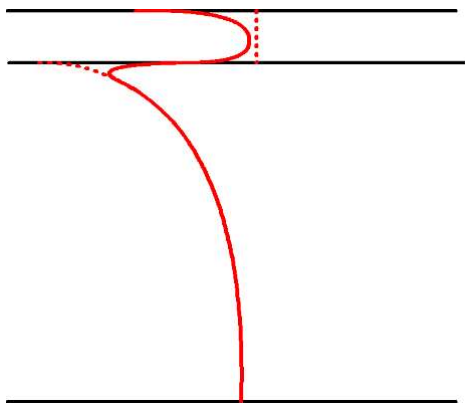
Dessa komplext samspelande processer medför att det är omöjligt att förutse exakt vilka delar av konstruktionen som kommer att torka eller fuktas upp och från vilka RF-nivåer detta sker, och därmed inte heller huruvida processerna följer scanningisotermerna eller någon av extremisotermerna. Både absorptionsscanning och desorptionsscanning kommer att förekomma. Detta kan endast hanteras numeriskt (successiv lösning av transportekvationerna). För ett korrekt resultat krävs att även den omfördelning av fukt som sker i betongen från tiden för avjämningsmassans fram till limning beaktas (beräknas). Om detta inte görs blir antagandet om startprofil i betongen (vid limningstidpunkten) felaktigt.



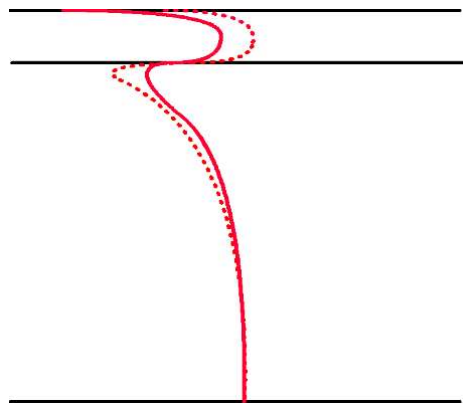
Figur 1: Fuktprofil (RF) i betongen, efter viss torkning men innan avjämning läggs på.



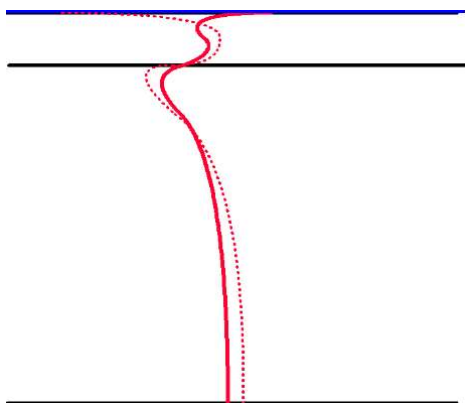
Figur 2: Fuktprofil i betong och avjämning just efter att avjämning lagts på.



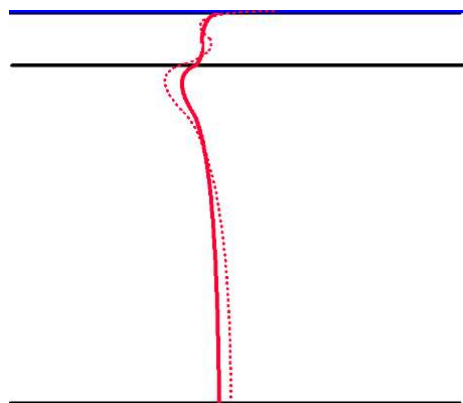
Figur 3: Kort tid efter att avjämning lagts på: Avjämningens övre och undre delar har torkat, betongens övre delar har fuktats upp.



Figur 4: Som föregående men ytterligare en tid senare.



Figur 5: Mattan har just limmats. Limfukten fuktar upp avjämningens övre delar.



Figur 6: Fuktprofilen rätas ut allt mer allteftersom tiden går.

Figur 1-7: Principiellt förlopp vid omfördelning av fukt då betongen beläggs med avjämningsmassa och sedan limmad matta. Exakta kurvformer beror av materialegenskaper, starttillstånd och randvillkor. (Streckade kurvor visar profilen i föregående figur.) Till sist nås en och samma RF tvärs igenom (förutsatt att temperaturen är densamma tvärs igenom).

De nämnda faktorerna i omfördelningsprocessen samspelar på ett komplext sätt:

- Tjock betong innebär att det finns mycket fukt att hämta upp till avjämningen
- En tunn avjämningsmassa medför snabb torkning av avjämningsmassan, men också en begränsad förmåga att ta emot fukt från betongen utan att skadligt hög RF uppnås vid limmet
- En tjock avjämningsmassa medför långsam torkning av avjämningsmassan, men om torkningen hinner ske innan matta limmas erhålls en stor förmåga att ta emot fukt från betongen utan att skadligt hög RF uppnås vid limmet
- Tjock avjämningsmassa medför att torkningen av själva avjämningsmassan kan bli begränsande på så sätt att kvarvarande fukt i själva avjämningsmassan räcker för att, efter omfördelning, skapa skadliga fuktnivåer vid limmet.
- En tät betong innebär att avjämningsmassan inte kan torka nedåt i betongen.
- En mycket tät matta innebär att all fukt som finns kvar kan användas för att skapa skadliga fuktnivåer vid limmet, förr eller senare.
- En öppen matta kan släppa igenom fukt och kan därmed "förlåta" en relativt stor mängd kvarvarande fukt.
- Etc.

5 ALLMÄNT OM EN FÖRENKLAD METODIK

För att en förenklad bedömningsmetodik skall kunna fungera måste den bygga på de parametrar som mätteknikern/byggentreprenören kan känna till. Detta innebär

- RF i betongen på ett eller flera djup
- Betongens tjocklek
- Betongens uttorkningsmöjligheter; 1- eller 2-sidig
- RF i avjämningsmassan på ett eller flera djup
- Avjämningsmassans tjocklek
- Golvbeläggningens täthet (ånggenomgångsmotstånd)

Till detta kan även komma betongens cementtyp och vct, men det är ofta omständligt att omsätta detta till användbara materialegenskaper vad gäller fuktbindningsförmåga och fukttransportförmåga.

För avjämningsmassor är materialdata kända för allmänheten endast i ett fåtal fall. Detaljerade materialegenskaper för avjämningsmassan är därför olämpliga som ingångsparameter i en förenklad bedömningsmetodik.

De komplexa sammanhang som beskrevs i avsnitt 3 innebär att mätteknikern måste utvärdera dels fukttillståndet i enbart avjämningsmassan, dels fukttillståndet i helheten (betong + avjämningsmassa) och han/hon måste på något sätt väga in mattans förmåga att låta fukt passera. Att sedan dessutom säga något om när eller hur länge fukttillståndet överskrider det kritiska värdet går inte att göra utan utförliga beräkningar.

6 TILLVÄGAGÅNGSSÄTT I DETTA PROJEKT

Mot bakgrund av beskrivningen i föregående avsnitt genomfördes projektet på så sätt att en stor mängd omfördelningsfall beräknades utförligt, varefter olika varianter av förenklade bedömningsmetoder testades mot de resultat som beräkningarna hade skapat. Med "mängd fall" menas att följande kombinationer beräknades

- 2 vct (0,55 och 0,40)
- 3 olika betongtjocklekar (120, 160, 200 mm)
- 4 olika avjämningstjocklekar (5, 12, 25, 50 mm)
- 3 olika åldrar på betongen då avjämning applicerades (12, 17, 22 veckor)
- 15 olika fuktprofiler i betongen då avjämning applicerades
- 3 olika åldrar på avjämningen då matta limmades (2, 5, 8 veckor)
- 3 olika torkningsklimat över avjämningen fram till att matta limmades (18° och 40, 50 respektive 65%RF)
- 4 olika tätheter på mattan ($z=700.000$, $1.500.000$, $3.000.000$ samt $10.000.000$ s/m)

Följande parametrar hölls konstanta:

- En enda cementtyp (Bascement)
- En enda mängd limfukt (90 g/m^2)
- Ett enda klimat efter mattläggning ($20^\circ\text{C}/45\%\text{RF}$)
- Endast ensidigt torkande konstruktion

Det har inte varit möjligt att utföra beräkningarna för andra cement än Bascement eftersom erforderliga materialegenskaper inte finns tillgängliga.

Sammantaget medförde detta att 15344 omfördelningsberäkningar genomfördes för vct 0,55. För vct 0,40 begränsades omfånget till 3559 genom att bara ytterlighetsfallen beräknades. Beräkningarna simulerade ett 12 år långt förlopp. (För några av kombinationerna har det inte varit möjligt att numeriskt beräkna omfördelningsförloppet.)

6.1 Omfattning

Beräkningarna, och den förenklade metoden, har utförts för en ensidigt torkande, homogen platta av betong och avjämningsmassa med variationer i initiala fuktprofilen.

Ursprungligen var avsikten att projektet skulle studera följande konstruktioner:

1. Platta-på-mark, tjocklek ca 120 och mer, med avjämning 10 mm eller mer
2. Plattbärlag med pågjutning och avjämning
3. HD/F 270 mm med avjämning >30 mm med krav på RF både 90% och 85%.
4. Skarvgjutningar mellan HD/F-plattor
5. Voter med lägre vct intressant särfall

Projektet har fokuserat på punkt 1. Punkt 2 avser en konstruktion som är mycket lik den i punkt 1. Den huvudsakliga skillnaden är skillnader i möjligheter att torka nedåt.

Den metod som föreslås längre ned bygger på att ingen som helst uttorkning sker nedåt. Därmed kommer den att ge resultat på säkra sidan även för punkt 2. HD/F-element (pkt 3) bedöms ha gynnsammare torkningsmöjligheter nedåt än vad en homogen platta har, varför även HD/F-element antogs vara ett mindre riskabelt fall än platta-på-mark (pkt 1).

Enligt RBK-systemet gäller andra ekvivalenta djup för fallen 2 och 3, men detta är inget skäl att behandla dem annorlunda i denna studie eftersom ekvivalent djup är grunden för utvärdering av en noggrann mätning enligt RBK [6], medan den grund för bedömning som förhoppningsvis kan utvecklas i detta projekt kanske bygger på andra förutsättningar.

Punkterna 3 och 4 kräver 2D-beräkningar för att omfördelningsberäkningen ska bli tillförlitlig. Tidigare beräkningar har dock visat att 2D-effekterna på en skarvgjutning mellan HD/F-element är försumbara (åtminstone då fogbredden är ca 50 mm eller mer), varför endimensionell beräkning kan användas. Beräkningar med WUFI 2D blir väldigt förenklade och onyanserade jämfört med det som kan göras för punkterna 1&2 i det beräkningsprogram som har använts i detta projekt. I kombination med tidsbrist har punkt 3 därför inte prioriterats.

Förutsatt att plattan ovanför en eventuell vot är någorlunda normalt tjock (>120 mm) och mattan någorlunda normal så gör den täta strukturen i betong med Bascement att en underliggande vot av ännu tätare betong nästan inte har någon betydelse för vad som sker vid limmet. Av detta skäl har inga särskilda beräkningar utförts för punkt 5.

Punkterna 2-5 skulle kunna behöva undersökas närmare i en eventuell fortsättning av projektet.

7 UTFÖRLIGA BERÄKNINGAR

Syftet med de utförliga beräkningarna var att skapa en mängd referensfall som skulle tjäna som databas för att pröva olika hypoteser om förenklade bedömningsmetoder.

Med "utförlig" avses att beräkningarna utförts med hänsyn till så många faktorer som möjligt och så nyanserat som möjligt. Det finns dock fortfarande faktorer som endast beskrivs approximativt och även sådana som överhuvudtaget inte berörs.

Här ges endast en kort beskrivning av hur de utförliga beräkningarna har utförts. En mer detaljerad beskrivning finns i bilagorna.

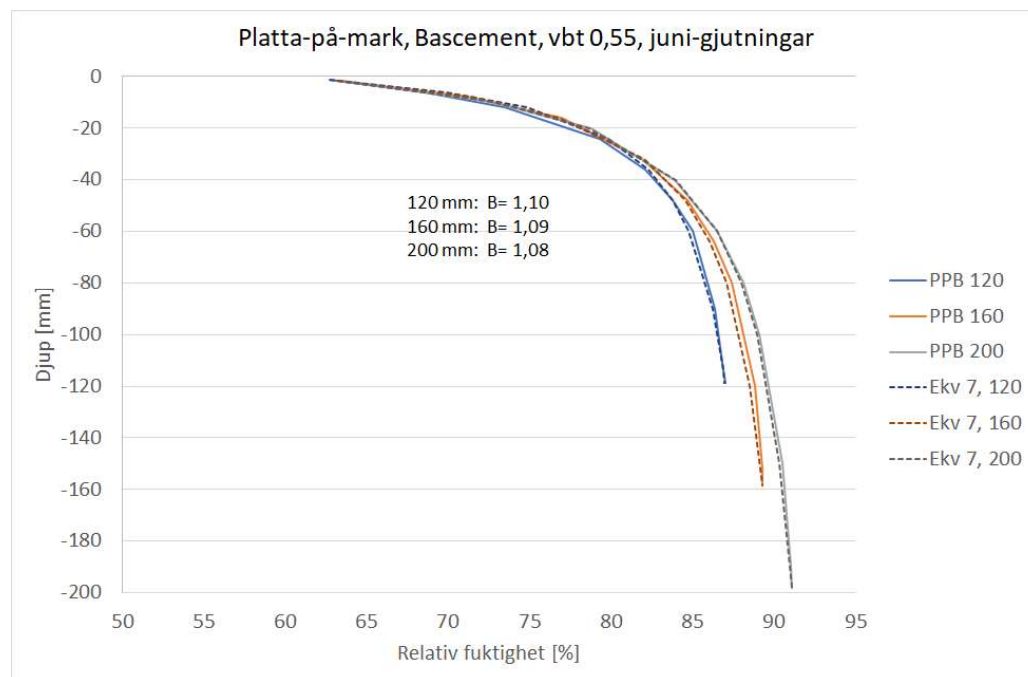
För att få fram en rimligt realistisk fuktprofil som råder genom avjämningsmassa och betong vid limning, startades fukttransportberäkningarna redan vid tidpunkten då avjämningsmassan lades på. Betongen har då en viss ålder (12, 17 eller 22 veckor i beräkningarna). Till följd av självtorkning och torkning utåt har en fuktprofil etablerats genom betongen. Exempel på sådana profiler beräknades med PPB [5]. Ur dessa resultat utvecklades en teknik att skapa realistiska fuktfördelningar i betongen utan att göra PPB-beräkningar för vartenda beräkningsfall (se bilaga 5). Dessa profiler kunde varieras från relativt tvära (med hög fuktighet nära betongens yta) till tämligen flacka, dvs med låg fuktighet nära betongens yta). Profilernas form skapades utifrån ett antagande om vilken grad av självuttorkning som kunde nås på stort djup (där uttorkning utåt inte har hunnit spela någon roll vid tiden då avjämningsmassan läggs på) och på ett val av styrande parametrar som i testkörningar mot PPB hade visat sig ge rimliga initialprofiler.

Det antogs sedan att avjämningsmassan hårdnar och får sina slutliga fuktegenskaper så snabbt att någon avancerad hänsyn till det exakta strukturutvecklingsförloppet inte behöver tas. Detta innebär att avdunstning från den helt färska avjämningsmassan

inte beaktades, och att den täta strukturen säkerligen användes från ett alltför tidigt skede. Båda dessa omständigheter gör att avjämningen i verkligheten torkar lite fortare i det tidiga skedet än vad beräkningarna (med fullt utvecklade materialegenskaper) visar. För att i viss mån motverka denna brist, ansattes att avjämningsmassan håller 96%RF redan från första ögonblicket. Uppenbarligen medför detta tillvägagångssätt att den beräknade fuktprofilen vid limning inte är helt sann, men detta behövs inte heller: Det viktiga är att få fram en profil som på ett rimligt realistiskt sätt återspeglar hur fuktprofilen i avjämningen (och betongens yta) påverkas av avjämningens tjocklek och av det yttre klimatet (utan abrupta stegvisa förändringar, godtyckliga gissningar, eller rätlinjiga, gissade fördelningar, mm) så att omfördelnings-beräkningen slutligen ger ett samband mellan en RF-profil vid tiden för limning och den RF som uppstår under mattan under omfördelningsförloppet. I beräkningarna beräknades avjämningens torkning för klimaten 18°C samt 40, 50 respektive 65%RF.

När mattan limmas har beräkningarna nu skapat en kontinuerlig fuktprofil ned genom avjämning och betong. Från att avjämningen lades på har betongens övre delar genomgått uppfuktning. Detta förlopp simuleras med absorptionsscanning-kurvor. Beroende på hur tjock avjämning som används och på hur länge det dröjer innan mattan limmas, kan betongen sedan även hinna börja torka igen. Detta förlopp följer då en desorptionsscanningkurva, vilket simuleras i beräkningarna.

När mattan limmas börjar en omfördelning ske i avjämningsmassan. Även detta förlopp modelleras med scanningkurvor, och i den mån det även påverkar fuktillståndet i betongen så beräknas även detta med scanningkurvor. Beräkningarna växlar således mellan absorptionsscanning och desorption-scanning allteftersom processen fortskrider. När mattan limmas tillförs limfukt. I beräkningarna fördelas denna fukt i avjämningens översta cell. Om limfuktmängden överskrider den tomma porvolymen i översta cellen



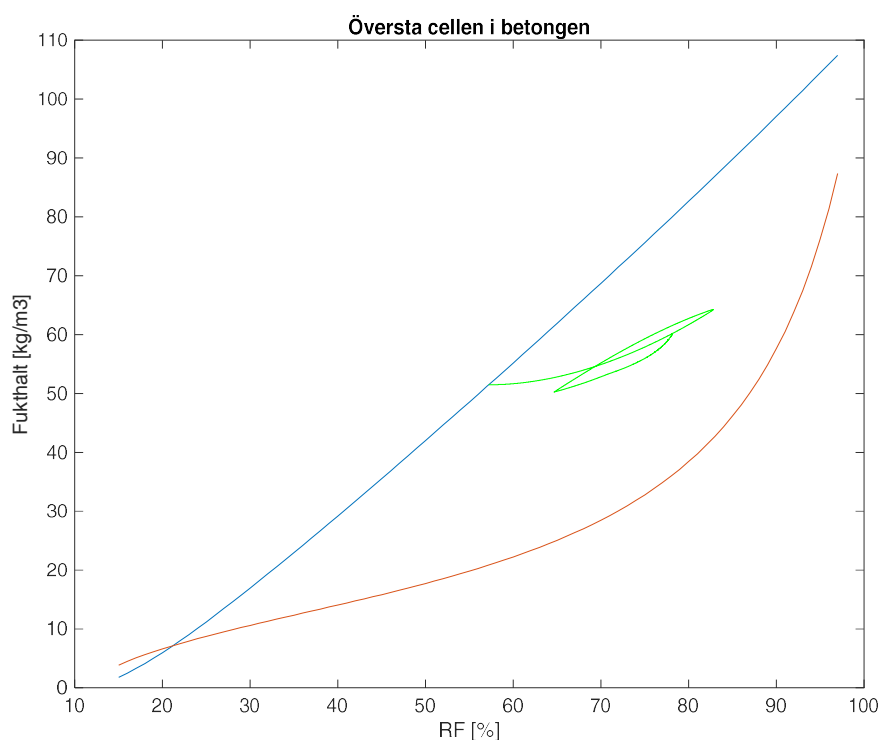
Figur 7: Exempel på hur simulerade initialprofiler i betongen har anpassats till profiler beräknade med PPB. Se vidare Bilaga 5.

ansätts att den översta cellen fylls helt, och resterande fukt fördelas i nästa cell. RF i nästa cell beräknas då med ett förenklat förfarande som efterliknar ett scanningförlopp. (Med "fylls helt" avses här att avjämningen når RF=97%, längs absorptionsisotermen, vilket är det högsta värde som materialdata fanns tillgängliga för. I verkligheten finns ytterligare något utrymme.)

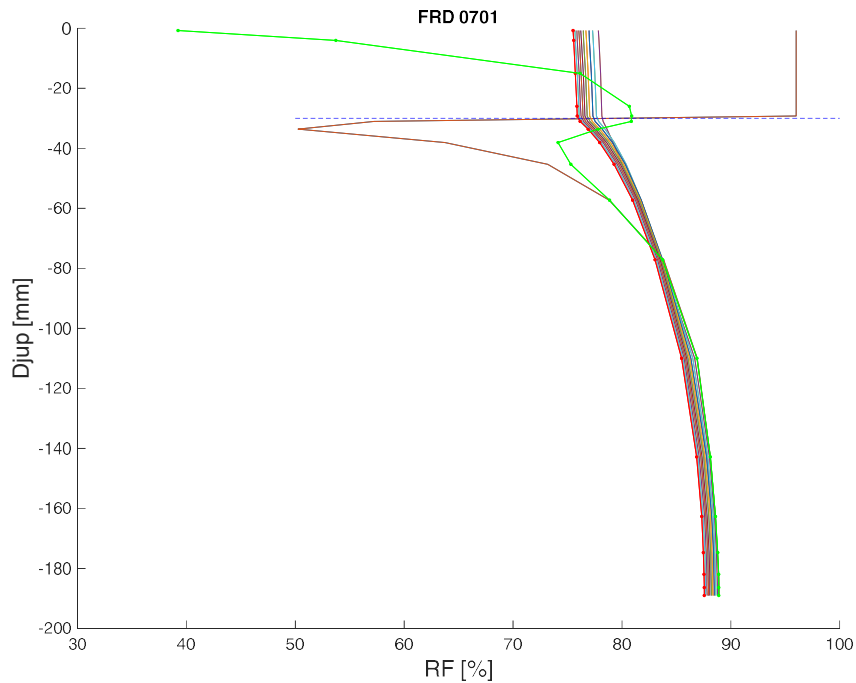
När hela förloppet är beräknat noteras dels vilken maximal RF som uppkommer under omfördelningsförloppet, dels hur länge RF>85% råder i avjämningens översta beräkningscell.

Mätningar av Stelmarczyk [8] visar att betongens fukttransportegenskaper är starkt beroende av betongens ålder: Från 6 månader till 12 månader minskar fukttransportkoefficienten med en faktor 5-10 beroende på vct. I beräkningarna representeras detta genom att fukttransportkoefficienten räknas ned rätlinjigt proportionellt mot åldern. Efter 12 månaders ålder behålls dock konstanta värden. På samma sätt räknas koefficienterna upp för tiden före 6 månader.

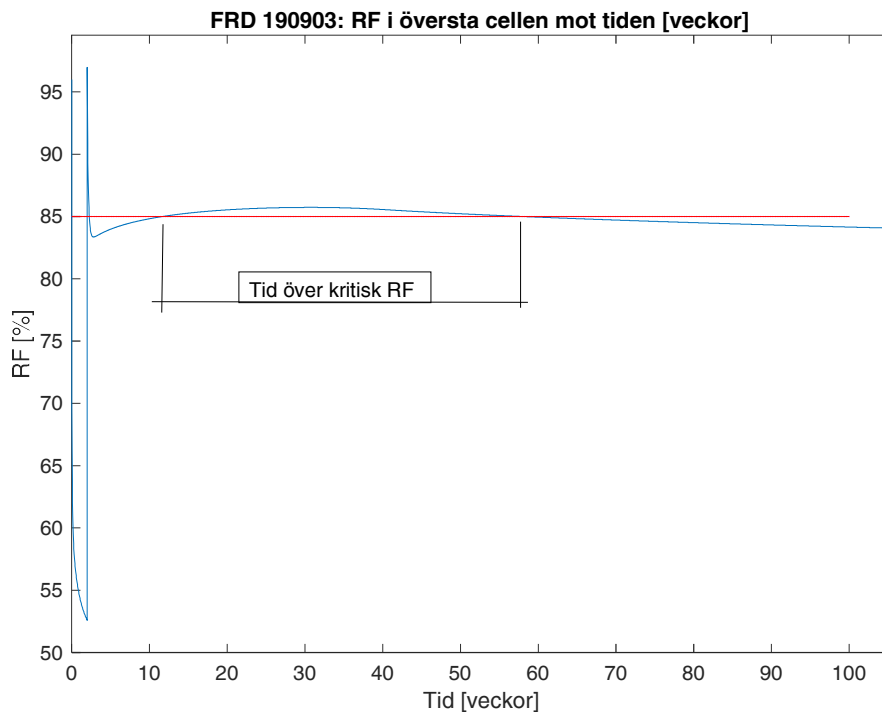
Tillgängliga materialdata har säkerligen någon osäkerhetsmarginal. För att inte skapa beräkningsresultat som är överdrivet optimistiska har en säkerhetsfaktor därför lagts på. För betongen sätts denna till 1,2 under omfördelningsförloppet, dvs fukttransportkoefficienterna höjs med 20% jämfört med Stelmarczyks data. På så sätt sker omfördelningen något snabbare än vad data egentligen anger, vilket medför större risk för hög RF under mattan. Slutresultaten blir därmed "på säkra sidan". Under tiden som betongen och avjämningen torkar mot luft sätts säkerhetskoefficienten istället till 1,0. Detta görs för att inte överdriva den uttorkning som sker innan avjämning läggs på. (Detta har dock mindre betydelse eftersom studiens huvudmoment är att jämföra den fuktprofil som råder vid tiden för limning med vilket resultat som erhålls under omfördelningsförloppet.



Figur 8: Exempel på scanningförlopp med den scanningmodell som använts i beräkningarna: Den gröna kurvan visar hur en beräkningscell fuktas upp från ett läge på desorptionsisotermen, upp till ca 85%RF, och sedan torkas till ca 65% för att återigen fuktas upp (se vidare Bilaga 2).



Figur 9: Exempel på hur fuktprofilen förändras under 5 års förlopp. 25 mm avjämning på 160 mm betong. Gröna linjen (med prickar) visar fördelningen vid tiden för limning. Röda linjen med prickar visar sluttillståndet. Den "vassa" profilen som visar ca 50%RF vid djupet ca 35 mm visar RF-fördelningen strax efter att avjämningsmassan lagts på.



Figur 10: Exempel på beräkningsresultat (blå kurva: utveckling av RF i beräkningscellen närmast limmet) och illustration av hur tid över kritisk RF (85%) definieras.

Exakt *hur* fuktprofilen skapades är av underordnad betydelse.) På samma sätt har avjämningsens transportkoefficienter ökat med 20% under omfördelningsförloppet, men bibehållits oförändrade under tiden fram till limning.

Materialdata för avjämningsmassa har erhållits från Anders Anderberg, Weber/Saint-Gobain Sweden. Materialdata för betong har hämtats från Stelmarczyk *et al.*

Det beräknade omfördelningsförloppet avser en period om 12 år från limning.

Temperaturgradienter beaktas inte. Det antogs att när omfördelningsförloppet väl startar är temperaturen konstant både tvärs igenom betongen och över tid.

Torkningsklimatet efter avjämnning fram till mattlimning ansätts vara konstant (40, 50 eller 65%RF vid 18°C). Torkningsklimatet efter limning av matta har ansatts vara 20°C/45%RF.

Det förutsätts i beräkningarna att fuktförloppen är så långsamma att värmetransporten aldrig utgör en begränsning.

Detaljerna i beräkningsförfarandet beskrivs i bilagor nedan.

7.1 Sammanställning av säkerhetsmarginaler

7.1.1 Säkerhetsfaktorer

I beräkningarna har materialens fukttransportkoefficienter efter limning höjts med 20% för att inte underskatta risken att omfördelning leder till höga fuktnivåer under mattan. Huruvida 20% är tillräckligt eller inte är inte känt.

7.1.2 Hysteres i transportkoefficienten

I beräkningarna har det antagits att fukttransportkoefficienterna är beroende av fukthalten snarare än av RF. För betong med Bascement med lågt vct ($\leq 0,40$) förefaller detta stämma väl (enligt data från Stelmarczyk *et al* [8]), men för vct 0,55 medför detta förfarande att fukttransportkoefficienten vid absorption överskattas. Detta medför en viss säkerhetsmarginal i slutresultaten. (Se Bilaga 2, avsnitt 2.5)

7.1.3 Limfuktmängdens fördelning i de översta cellerna

I beräkningarna fördelas limfukten på de översta cellerna på så sätt att tillgängligt utrymme i varje cell beräknas, och sedan fylls cellerna successivt. Med "fylls" menas att cellen tillförs så mycket fukt att den når 97%RF. OM det fortfarande finns limfukt kvar efter att den översta cellen fyllts fortsätts förloppet i underliggande celler. Slutligen nås en cell där resterande limfukt inte räcker för att skapa 97%RF. I denna cell beräknas då RF enligt ett förenklat absorptionsscanningförfarande. I verkligheten ryms mer fukt än vad som motsvarar 97% längs absorptionsisotermen, och därmed sprids limfukten inte lika djupt ned i materialet som beräkningarna förutsätter. Detta innebär att tiden med hög RF vid limmet, direkt efter limning, blir något längre i verkligheten än vad som har beräknats här. Kapillärsugning torde dock göra att fukten omfördelas nedåt i avjämnningen förhållandevis snabbt (jämfört med övriga hastigheter i dessa processer). Denna snabba kapillärsugning har inte tillgodoräknats i beräkningarna.

7.1.4 Reduktion av transportkoefficienter

I beräkningsprogrammet förutsätts att transportkoefficienter för betong med Bascement reduceras mycket kraftigt från 6 till 12 månaders ålder (efter 12 månader behålls konstanta värden).

Om denna sänkning av transportkoefficienterna inte är sann så har de utförliga beräkningarna gjort en underskattning av den RF som kommer att uppstå vid limmet / under mattan.

Testberäkningar visar att fukttransportkoefficientens storlek har mycket stor betydelse för vilka fuktighetsnivåer som uppnås vid limmet under omfördelningsförloppet.

8 RESULTAT AV UTFÖRLIGA BERÄKNINGAR

Resultaten av de utförliga beräkningarna har samlats i ett Excel-dokument för respektive vct (0,40 och 0,55), se Tabell 1 **Fel! Hittar inte referenskälla.** och Tabell 2.

Tabell 1: Utdrag ur resultatfilen för vct 0,55 (första 10 raderna av drygt 15000).

T btg	Härtdid	RF selfdry	T avj	Temp ovan	RF ovan	Limvecka	z matta/10 ⁶	RF 40	RF 32	RF uk avj	Max RF	kritisk tid
0,12	12,00	94,00	0,005	18,00	65,00	2,00	0,70	92,28	91,21	70,10	95,14	27,08
0,12	12,00	94,00	0,005	18,00	65,00	2,00	0,70	91,37	89,81	56,39	93,67	0,05
0,12	12,00	94,00	0,005	18,00	65,00	2,00	0,70	90,66	88,82	55,75	93,66	0,05
0,12	12,00	94,00	0,005	18,00	65,00	2,00	0,70	90,04	87,95	55,29	93,65	0,05
0,12	12,00	94,00	0,005	18,00	65,00	2,00	0,70	89,48	87,18	54,93	93,65	0,05
0,12	12,00	92,00	0,005	18,00	65,00	2,00	0,70	90,35	89,30	56,79	93,68	0,05
0,12	12,00	92,00	0,005	18,00	65,00	2,00	0,70	89,59	88,18	55,93	93,67	0,05
0,12	12,00	92,00	0,005	18,00	65,00	2,00	0,70	88,93	87,24	55,36	93,66	0,05
0,12	12,00	92,00	0,005	18,00	65,00	2,00	0,70	88,34	86,42	54,94	93,65	0,05
0,12	12,00	92,00	0,005	18,00	65,00	2,00	0,70	87,82	85,70	54,61	93,64	0,05

Tabell 2: Förklaringar till variabelnamn i Fel! Hittar inte referenskälla..

Tbtg:	Betongplattans tjocklek	Meter
Härtdid:	Tiden för betongen att härda (och torka) fram till att avjämning applicerades	Veckor
RF selfdry:	Den RF betongen kan nå genom självuttorkning (vid tiden för applicering av avjämning). Detta är "RF på stort djup", dvs där uttorkning utåt inte har påverkat fuktillståndet	%
T avj:	Avjämnings tjocklek	Meter
Temp ovan:	Temperatur i lokalen efter att avjämning lagts på (endast 18 grader möjligt)	°C
RF ovan:	RF i lokalen efter att avjämning lagts på	%
Limvecka:	Antalet veckor från avjämning till limning av matta (dvs tidpunkt för RBK-mätning [6])	Veckor
z matta:	Golvbeläggnings ånggenomgångsmotstånd	s/m
RF 40:	RF på 40% av plattjockleken (traditionellt ekvivalent djup)	%
RF32 mm:	RF på 32 mm djup	%
RF uk avj:	RF i underkant av avjämningsmassan	%
Max RF:	Maximal RF vid limmet från ett dygn efter limning och framåt	%
Kritisk tid:	Den tid som RF vid limmet överstiger 85% (från två dygn efter limning och under de 12 år resultaten avser)	Veckor
RF maxmax:	Det maximala RF som uppnås vid limmet (pga limfukt)	%

Variabeln $RF_{uk\ avj}$ avser RF i understa beräkningscellen i avjämningsmassan vid den tid då mattan limmas. Värdet erhålls ur beräkningarna som ett resultat av vilken fuktprofil som fanns i betongen då avjämningsmassan applicerades, vilken tjocklek avjämningsmassan har och vilket torkningsklimat som fanns ovanför avjämningsmassan.

Generellt gäller att maximal RF vid limmet når knappt 97%RF i nästan samtliga fall. Detta beror på den tillförda limfukten och på hur det har antagits att denna limfukt fördelas i avjämningsmassans översta del. I samtliga fall har dock denna "akuta" effekt av limfukten försvunnit efter ca två dygn. Därför avser den redovisade variabeln "Maximal RF" den maximala RF som uppnås i underlagets översta beräkningscell från och med dygn tre och fram till beräkningsförloppets slut (12 år, motsvarande 624 veckor).

I diagrammen nedan visas dels vilken maximal RF som har uppnåtts vid limmet för samtliga fall (för tiden efter de första två dygnen), dels den tid som $RF > 85\%$ råder.

Som framgår av Diagram 1 överskrids RF över 85% i samtliga beräknade fall för vct 0,55. I många av dessa fall råder dock de maximala värden under endast en mycket kort tid. (Det hade varit önskvärt att ha några beräkningsfall där 85% inte uppnås överhuvudtaget, men det har inte funnits tid att komplettera med sådana beräkningar.) Genom att inte bedöma vilken RF som uppnås utan istället titta på *hur länge* $RF > 85\%$ råder kan utvärderingen av resultaten göras bättre. Ett exempel ges i Diagram 2.

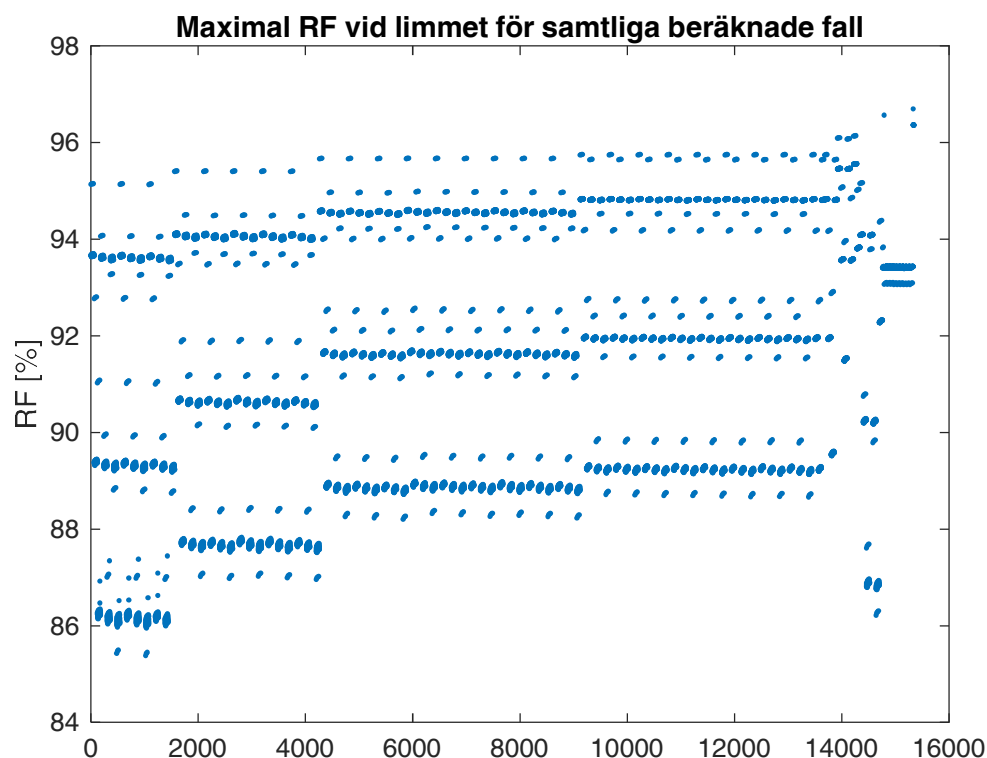


Diagram 1: Maximal RF i underlaget närmast limmet (förutom de första två dygnen) för samtliga beräknade fall. Vct 0,55. (x-axeln anger beräkningsfallets nummer.)

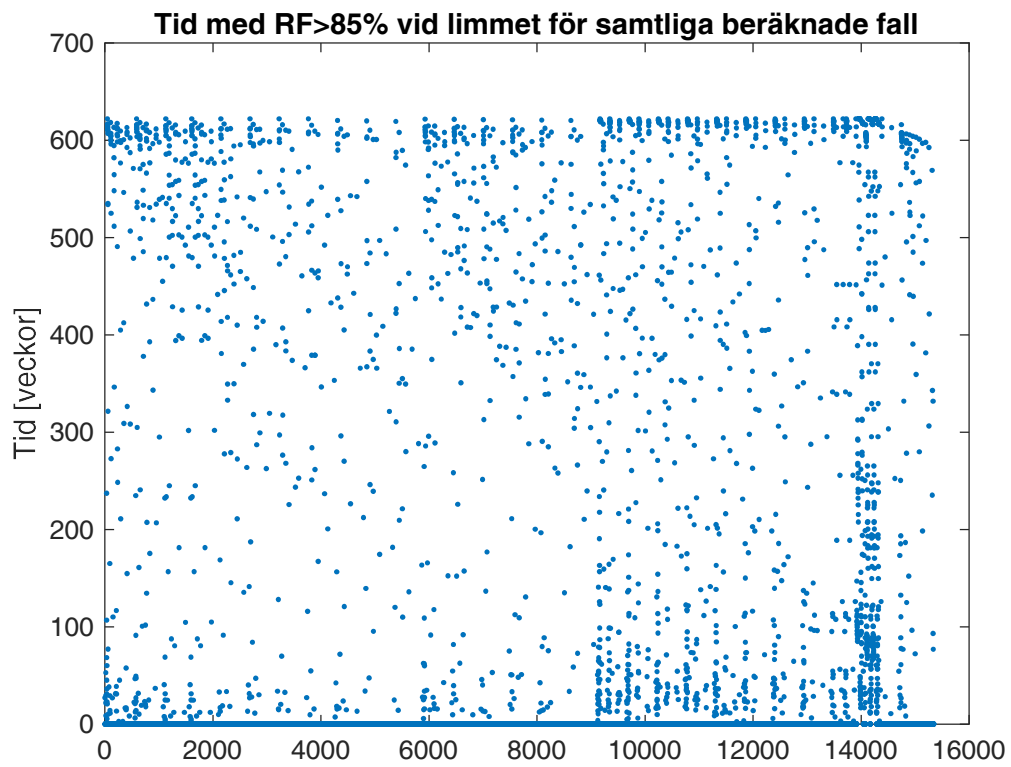


Diagram 2: Tid som RF>85% råder i underlagets översta beräkningscell för samtliga beräknade fall. Vct 0,55. (x-axeln anger beräkningsfallets nummer.)

9 FÖRENKLADE BEDÖMNINGSMETODER

I de följande fyra underavsnitten beskrivs och prövas några hypoteser om olika metoder att göra en preliminär bedömning av en konstruktion utifrån mätta värden och kunskap om konstruktionens utformning, materialkvaliteter, mm.

9.1 Bedömning genom jämförelse med beräknat fall

Ett första sätt att bedöma en aktuell situation är att i Excel-dokumentet (**Fel! Hittar inte referenskälla.**) leta fram ett liknande fall och se vilket resultat detta ger. "Letandet" görs med de filtreringsfunktioner som finns i Excel. (Filen kan erhållas från författaren.)

För att använda resultaten i Excel-dokumentet som referens för ett aktuellt tillstånd kan endera av följande tillvägagångssätt användas:

Alternativ 1:

Välj betongtjocklek

Välj avjämningstjocklek

Välj hårdtid

Välj RF ovan

Välj limvecka

Välj z_{matta}

Se om det finns ett fall där $RF_{selfdry}$ (motsvarande RF på stort djup), RF40, RF32 och $RF_{uk,avj}$ stämmer med det aktuella fallet

Avläs MaxRF och kritisk tid för detta fall

Undersök hur känsligt resultatet är för en smärre ändring i någon indata

Gör en förnuftig slutbedömning

Alternativ 2:

Välj andra värden på hårdtid, RFovan och limvecka

Undersök om det nu finns ett fall där $RF_{selfdry}$ (motsvarande RF på stort djup), RF40, RF32 och $RF_{uk,avj}$ stämmer med det aktuella fallet

Avläs MaxRF och kritisk tid för detta fall

Undersök hur känsligt resultatet är för en smärre ändring i någon indata

Gör en förnuftig slutbedömning

I första hand bör man sträva efter att hitta ett fall där det beräknade fallet har ungefär samma RF-fördelning (dvs samma värden på $RF_{selfdry}$ (dvs RF på stort djup), RF40,

RF32mm och $RF_{uk,avj}$) som har mätts på det aktuella objektet. Det är inte lika viktigt att härdtid, betongtjocklek, limvecka mm stämmer.

9.2 Bedömning genom enkla jämförelser

I detta avsnitt prövas ett antal sätt att med enkla jämförelser bedöma konstruktionen.

9.2.1 Enbart värde i avjämningsmassan

Med en tillräckligt tjock och samtidigt tillräckligt torr avjämningsmassa finns en möjlighet att skadliga fuktillstånd i limzonen kan undvikas oavsett övriga parametrar. Ett par exempel visas i Diagram 3 och Diagram 4 (dessa avser 50 respektive 12 mm avjämningsmassa).

Diagrammen visar, som väntat, att maximal RF vid limmet blir högre ju högre RF i underkanten av avjämningsmassan var vid limningstillfället. Det framgår dock att maximal RF vid limmet kan bli högre än 85% även i situationer där RF i underkant av avjämningsmassan är mycket låg vid limningstidpunkten.

Diagrammen visar således att detta är ett alltför förenklat sätt att bedöma situationen.

(För 50 mm avjämningsmassa saknas startvärden lägre än 84%. Detta beror på att denna tjocka avjämningsmassa inte hinner torka bättre inom de torkningstider som användes som indata i de utförliga beräkningarna (upp till 8 veckor)).

I Diagram 5 visas sambandet mellan RF i avjämningsmassan och den tid som $RF > 85\%$ råder vid limmet. Figuren visar samtliga beräknade fall och som synes går det inte att urskilja någon form av gränsvärde för maximal acceptabel RF i underkant av avjämningsmassan.

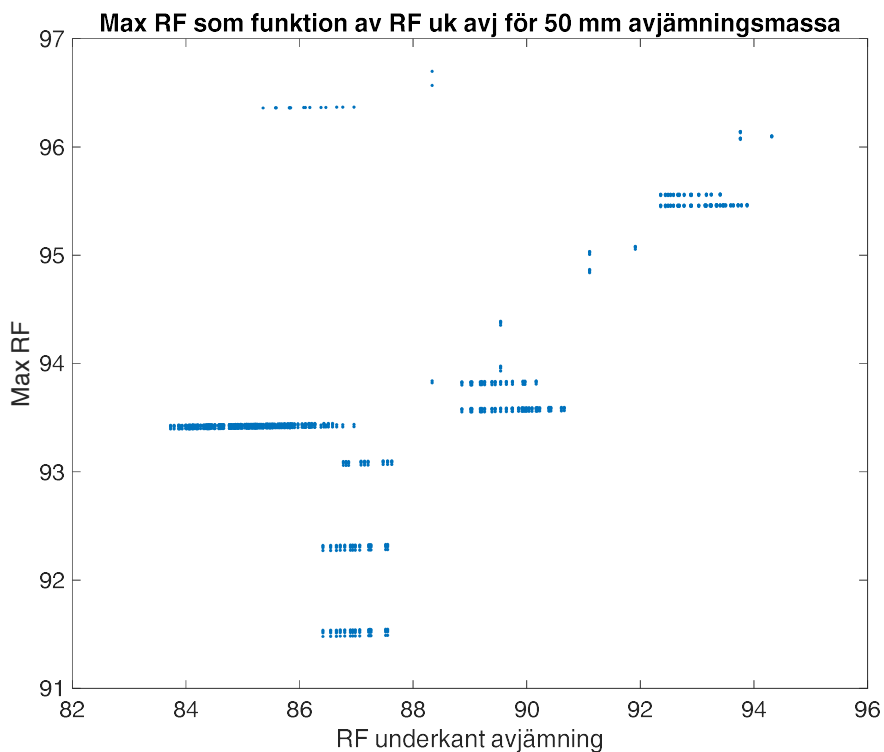


Diagram 3: Samband mellan maximalt uppnådd RF i limzonen (förutom första två dygnen) och RF i underkant 50 mm avjämningsmassa vid limningstidpunkten. (En punkt för varje beräknat resultat.) vct 0,55.

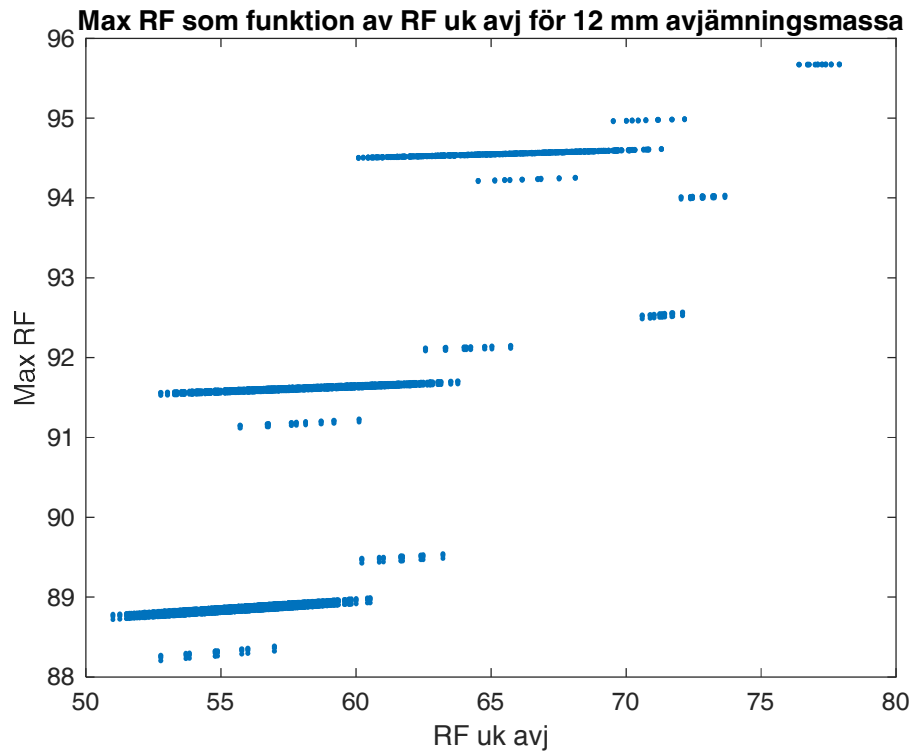


Diagram 4: Samband mellan maximalt uppnådd RF i limzonen (förutom första två dygnet) och RF i underkant 12 mm avjämningsmassa vid limningstidpunkten. (En punkt för varje beräknat resultat.) vct 0,55.

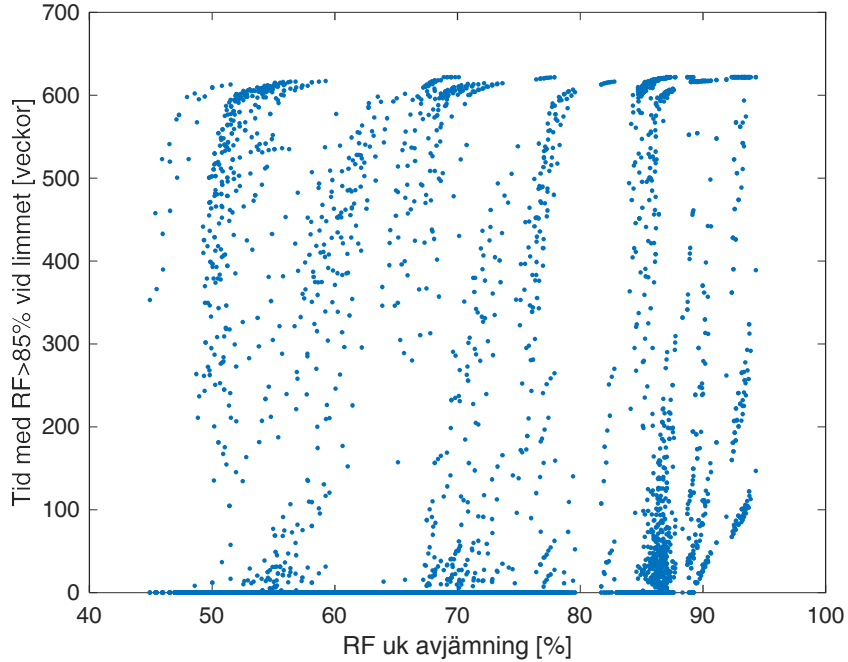


Diagram 5: Samband mellan RF i underkant avjämningsmassan vid tid för limning och den tid som RF>85% råder i underlaget närmast under limmet. Samtliga beräknade fall för vct 0,55..

9.2.2 Enbart värde på 40% av betongtjockleken

Det klassiska sättet att bedöma kommande fuktillstånd under en tät matta är att mäta RF i betongen på s.k. ekvivalent djup. För en ensidigt torkande platta, som i de beräknade fallen, är detta djup ca 40% av plattjockleken.

Detta bedömningskriterium kan egentligen inte användas i en konstruktion där betongen beläggs med en avjämningsmassa. Trots det kan det vara intressant att se hur pass väl det skulle fungera om man ändå – i strid med teorierna - tillämpade detta kriterium. I de följande två figurerna visas detta för dels vct 0,40, dels vct 0,55.

För vct 0,40 (Diagram 6) framgår att om RF på djupet 40% av plattjockleken är under ca 86,5-87% så kommer tiden då RF överskrider 85% vid limmet att begränsas till någon tiondels vecka. För vct 0,55 blir motsvarande gränsvärde på 40% av betongtjockleken 85%.

Kommentar: Det är orimligt att fuktillståndet vid limmet skulle kunna bedömas enbart utifrån ett värde relativt djupt ned i betongen eftersom fuktillståndet på detta djup knappast påverkas av vad som sker i avjämningsens övre del. Skulle förhållandena vara sådana att avjämningsmassan inte har hunnit torka tillräckligt väl innan mattan limmas så kan det knappast hjälpa att betongen är väl torkad på djupet 40%. Även om resultaten i Diagram 6-Diagram 7 antyder att det skulle fungera så bör därför detta kriterium inte användas.

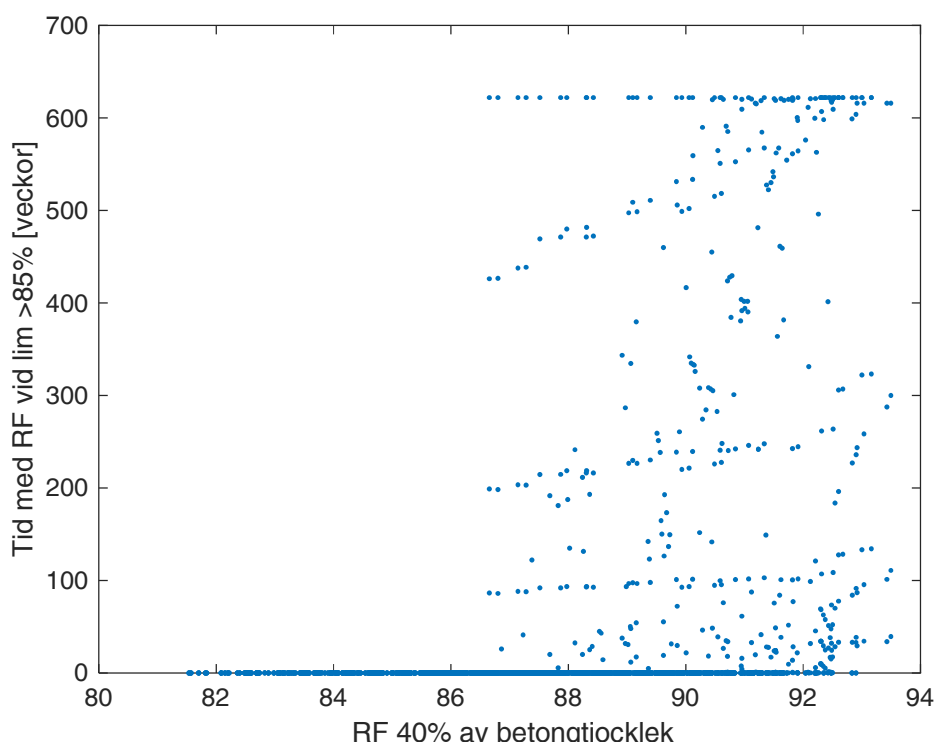


Diagram 6: Tid för RF>85% vid limmet under omfördelningsförloppet mot mätt RF-värde på djupet 40% av betongtjockleken vid tiden för limning. vct 0,40. Detta bedömningskriterium bör inte användas.

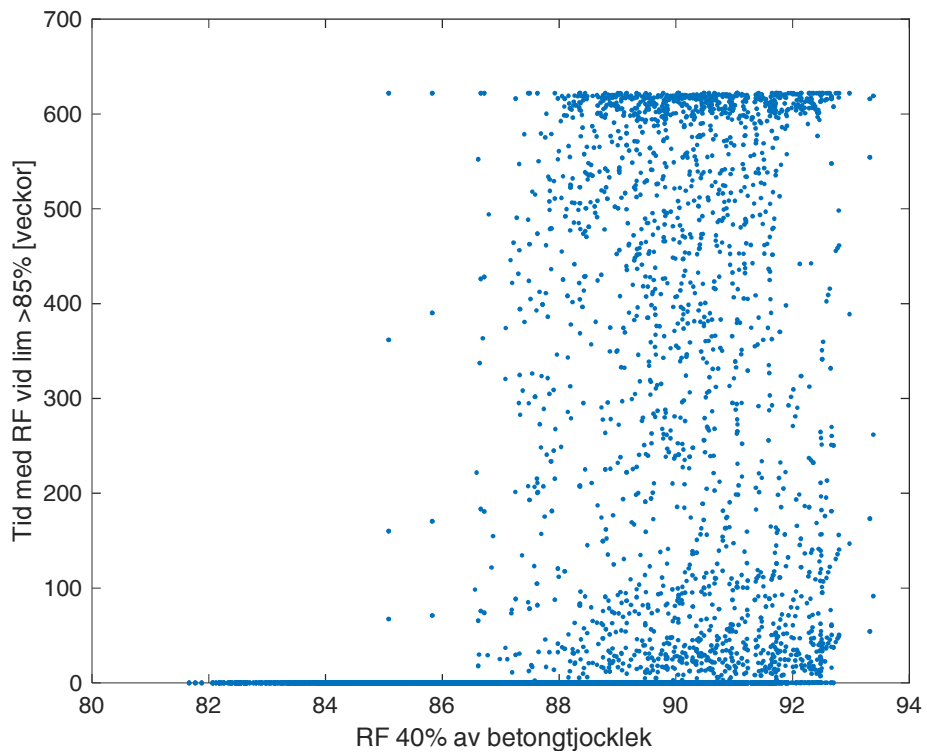


Diagram 7: Tid för RF>85% vid limmet under omfördelningsförloppet mot mätt RF-värde på djupet 40% av betongtjockleken vid tiden för limning. vct 0,55. Detta bedömningskriterium bör inte användas.

9.2.3 Enbart värde på djupet 32 mm i betongen

I Diagram 8 visas sambandet mellan RF 32 mm under betongens yta (vid limningstidpunkten) och den tid som RF>85% kommer att råda vid limmet. Här framgår att om RF på djupet 32 mm ned i betongen är under ca 81-82% så kommer RF>85% aldrig att råda mer än 0,1 vecka (dvs mindre än 17 timmar), oavsett vilken betongtjocklek, matta eller tjocklek på avjämningsmassa som använts i dessa beräkningar. Diagrammet visar också att det finns kombinationer som resulterar i minimal tid över 85% även om RF på 32 mm djup är så högt som 92-93%!

Kommentar: Det är orimligt att fuktillståndet vid limmet skulle kunna bedömas enbart utifrån ett värde relativt djupt ned i betongen eftersom fuktillståndet på detta djup knappast påverkas av vad som sker i avjämningsens övre del. Mätning på 32 mm djup har dock bättre förutsättningar att fungera som ensamt kriterium än vad mätning på 40% av plattjockleken har. Även om resultaten i Diagram 8 antyder att det skulle fungera så bör detta kriterium inte användas.

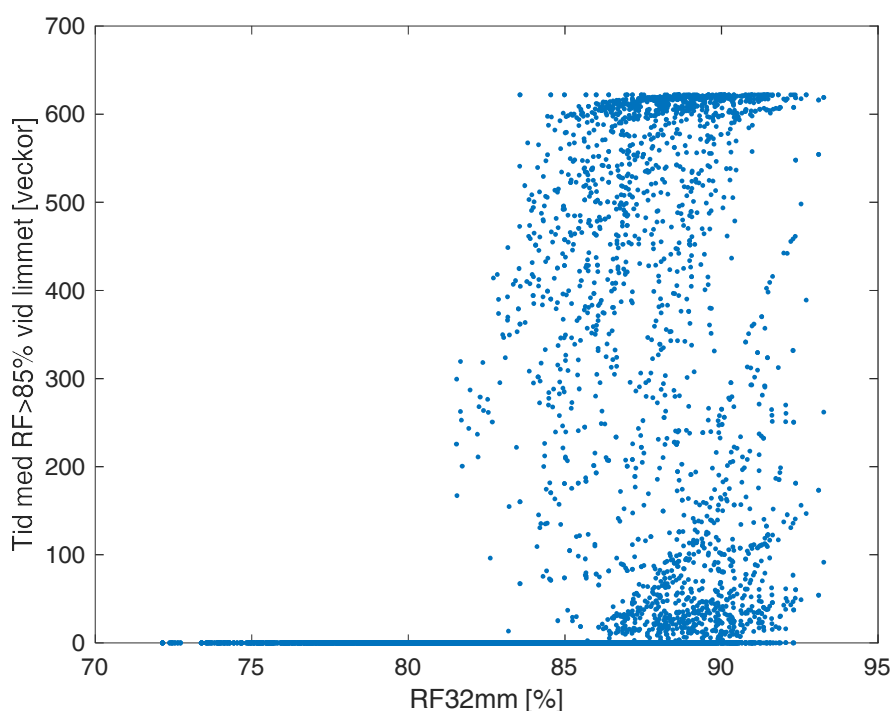


Diagram 8: Samband mellan RF vid 32 mm djup (i betongen!) vid tid för limning och den tid som RF>85% råder i underlaget närmast under limmet. Samtliga beräknade fall. (Ett principiellt likadant diagram kan ritas med utgångspunkt i mätvärdet på 40% av plattjockleken.; se texten). Vct 0,55. Detta bedömningskriterium bör inte användas.

9.3 Kombination av gränsvärden

Genom att ansätta någon form av *gränsvärden för flera olika parametrar* kan det kanske vara möjligt att bedöma risken för $RF > 85\%$ under omfördelningsförloppet:

Hypotes 1: Om $RF_{32\text{mm}}$ är mindre än 88%, $RF_{\text{uk,avj}}$ är mindre än 80%, avjämnningen tjockare än 10 mm och mattan öppnare än 3 Ms/m så borde RF vid limmet inte överstiga 85% mer än något dygn (utöver de två första dygna efter limning).

Resultatet av testen av denna hypotes (för vct 0,55) visas i Diagram 9, av vilket det framgår att hypotesen ger rätt resultat i så gott som samtliga fall: Endast i två fall blir tiden med $RF > 85\%$ väsentlig (14 respektive ca 23 veckor). I övrigt är tiden över 85% begränsad till drygt ett dygn (utöver de två första dygna efter limning).

Hypotesen är framgångsrik men svår att omforma till något generellt.

Hypotes 2: Om $RF_{32\text{mm}}$ är mindre än 91%, $RF_{\text{uk,avj}}$ är mindre än 75%, avjämnningen tjockare än 10 mm och mattan öppnare än 3 Ms/m så borde RF vid limmet inte överstiga 85% mer än något dygn (utöver de två första dygna efter limning).

Resultatet av test av denna hypotes (ör vct 0,55) visas i Diagram 10, vilket visar att hypotesen inte håller: Tiden med $RF > 85\%$ vid limmet blir mycket lång i många fall.

Hypotes 3: Om $RF_{32\text{mm}}$ är mindre än 91%, $RF_{\text{uk,avj}}$ är mindre än 75%, avjämnningen är 25 mm eller tjockare och mattan har $z \leq 3$ Ms/m så borde RF vid limmet inte överstiga 85% mer än något dygn (utöver de två första dygna efter limning).

Resultatet av test av denna hypotes (för vct 0,55) visas i Diagram 10, vilket visar att hypotesen håller: Tiden med $RF > 85\%$ begränsas till maximalt 0,05 veckor, dvs ca 8 timmar (utöver de två inledande dygna). (Om mattans z tillåts vara upp till 10×10^6 s/m håller hypotesen inte).

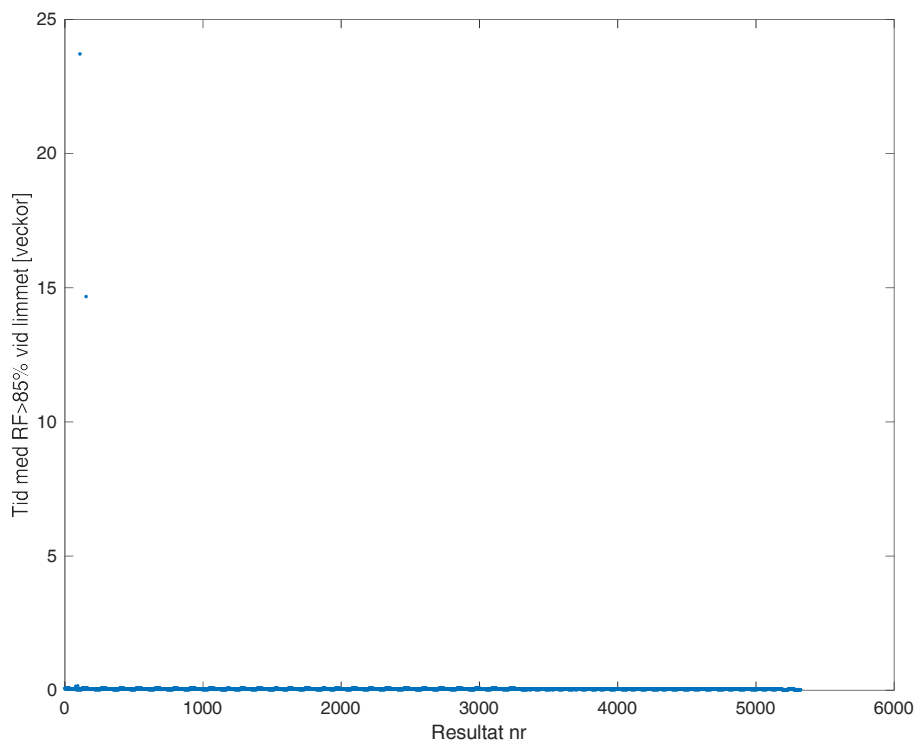


Diagram 9: Resultat av test av hypotes 1, vct 0,55: Beräknad tid med $RF > 85\%$ vid limmet begränsas till mindre än 0,16 veckor (ett drygt dygn) för samtliga utom två (som når 14 respektive 23 veckor med $RF > 85\%$).

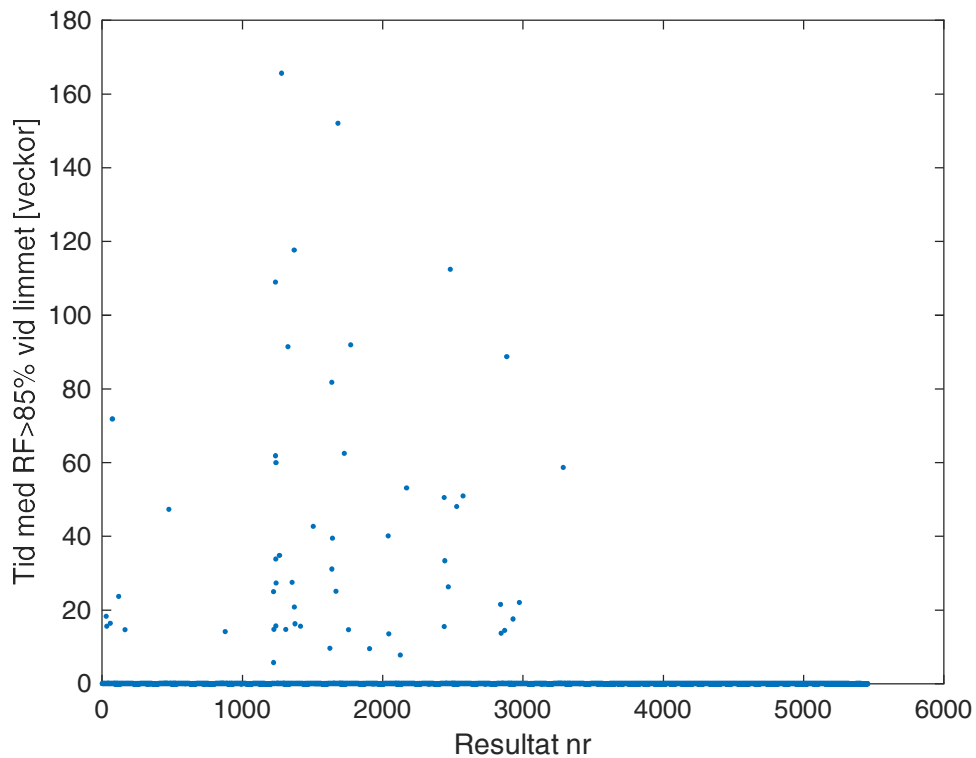


Diagram 10: Resultat av test av hypotes 2, vct 0,55: Beräknad tid med RF>85% vid limmet blir väsentlig i många av de undersökta fallen.

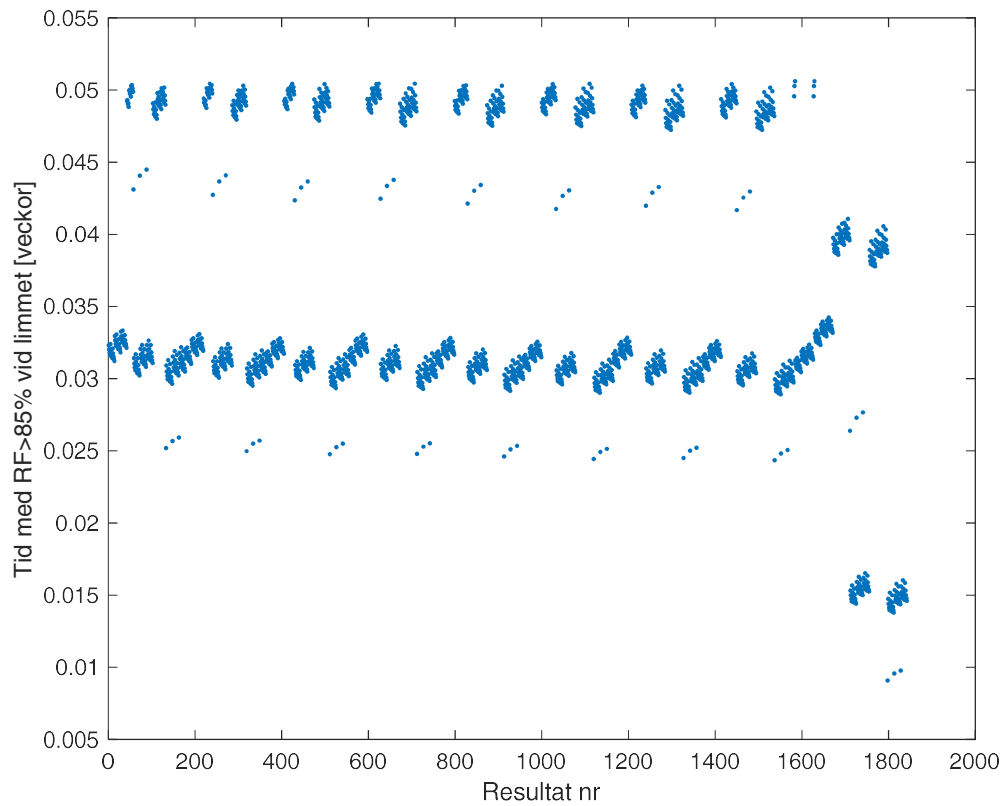


Diagram 11: Resultat av test av hypotes 3, vct 0,55: Beräknad tid med RF>85% vid limmet begränsas till mindre än 0,05 veckor (ca 8 timmar).

Hypotes 4: Om RF_{32mm} är mindre än 93%, $RF_{uk,avj}$ är mindre än 65%, avjämningen är 25 mm eller tjockare och mattan har $z \leq 10$ Ms/m (!) så borde RF vid limmet inte överstiga 85% mer än något dygn (utöver de två första dyggen efter limning).

Resultatet av test av denna hypotes visas i Diagram 12, vilket visar att hypotesen håller: Tiden med $RF > 85\%$ begränsas till maximalt 0,03 veckor, dvs ca 5 timmar (utöver de två inledande dyggen). Observera dock att för denna hypotes ger databasen blott ca 65 resultat. För tunnare avjämningar än 25 mm håller inte denna hypotes.

Hypotes 5: Om RF_{32mm} är mindre än 93%, $RF_{uk,avj}$ är mindre än 65%, avjämningen är 12 mm eller tjockare och mattan har $z \leq 3$ Ms/m (!) så borde RF vid limmet inte överstiga 85% mer än något dygn (utöver de två första dyggen efter limning).

Resultatet av test av denna hypotes visar att hypotesen håller: Tiden med $RF > 85\%$ begränsas till mindre än 12 timmar (utöver de två inledande dyggen). (inget diagram)

OBSERVERA att alla resultat av dessa hypotestester bygger på att materialdata, initialprofiler etc är så som beskrivs i avsnitten om bakomliggande beräkningar.

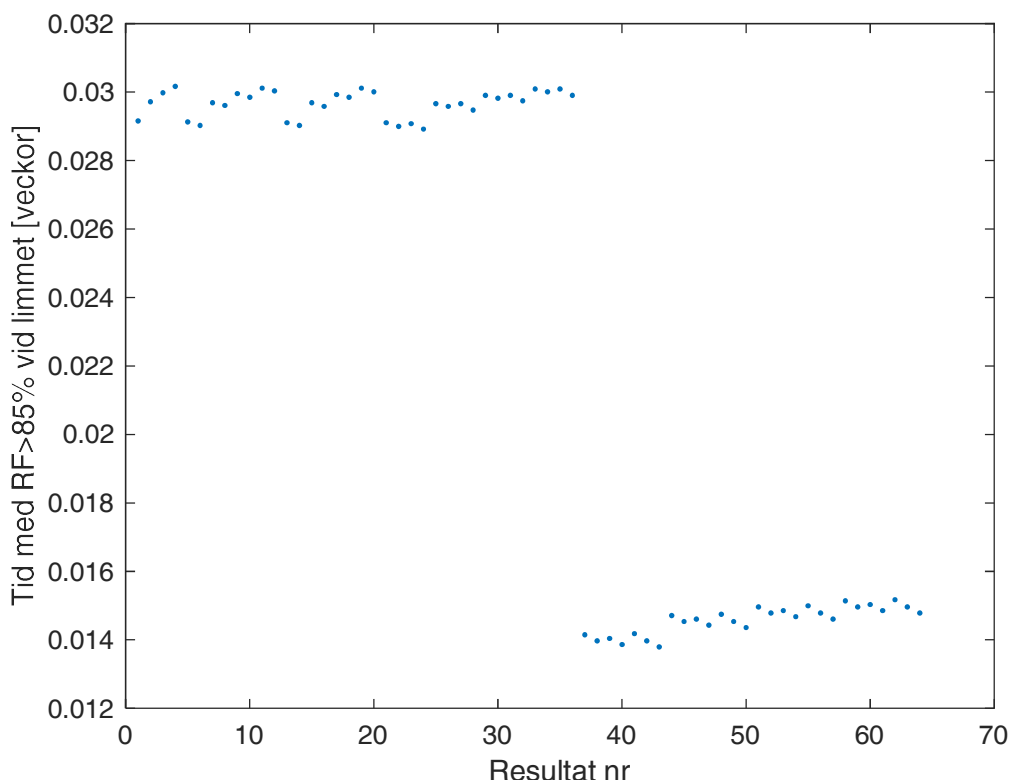


Diagram 12: Resultat av test av hypotes 4, vct 0,55: Beräknad tid med $RF > 85\%$ vid limmet begränsas till ca 0,03 veckor (nägra timmar).

9.4 Bedömning via beräknad parameter

Hypoteserna i föregående avsnitt blir alltför oflexibla för att kunna användas i en verklig situation. Avsikten i detta avsnitt är därför att försöka skapa en parameter som skulle kunna beräknas ur de olika variablerna i databasen (**Fel! Hittar inte referensälla.**) så att det med denna parameter blir möjligt att bedöma kommande RF vid limmet. Baserat på de olika hypoteser och utfallen av dessa som visades i föregående avsnitt har ett sådant samband kunnat skapas:

Vi definierar parametern X som

$$X = (92 - RF_{32mm}) \cdot (92 - RF_{uk,avj}) \cdot \frac{T_{avj}}{z_{matta}} \quad (Ekv. 1)$$

(RF-värden anges i procent, T_{avj} anges i meter, z_{matta} anges i Ms/m)

Parametern $RF_{uk,avj}$ avser relativa fuktigheten vid avjämningsmassans underkant, dvs vid gränsen till betongen. Att mäta detta är omöjligt. I fortsättningen antogs att ett tillräckligt väl uppskattat värde kan fås genom att mäta på ett uttaget prov av avjämningsmassans understa del (cirka 5-10 mm tjockt). I vissa fall kan även ett uttaget prov enligt GBR visa tillräckligt rätt eftersom den metoden tenderar visa det högsta värde som finns i avjämningsmassan, och eftersom det värdet i regel finns just i avjämningsmassans undre del. Eftersom mätvärdet för $RF_{uk,avj}$ är svårt att mäta helt korrekt måste kravet på X tas till så pass högt att smärre fel i $RF_{uk,avj}$ blir betydelselösa för den slutliga bedömningen.

Plottas kritisk tid (dvs tid med $RF > 85\%$ vid limmet) mot parametern X erhålls Diagram 13-Diagram 16. Som framgår av diagrammen gäller att om $X > 1$ så kommer RF vid limmet inte att överstiga $RF = 85\%$ mer än ca 0,2 veckor (ca 30-35 timmar) för vct 0,55 och max ca en 0,1 vecka (17 timmar) för vct 0,40, med ett (enda) undantag för vct 0,40; en prick har värdet $X = 1,05$ varvid överkritisk tid blir 0,41 veckor, dvs 69 timmar. Alla här angivna tider avser tid utöver de två första dygnet då limfukten skapar hög RF.

Både för vct 0,55 och 0,40 uppfyller ungefär hälften av de beräknade resultaten villkoret $X > 1$.

Av Diagram 14 och Diagram 16 framgår tydligt att det finns något av en gråzon vid det ungefärliga intervallet $0,5 < X < 1,5$. Om det beräknade värdet för parametern X hamnar i detta intervall kan det vara lämpligt att göra en mer utförlig beräkning.

Observera att detta samband gäller för de resultat som beräknats i detta projekt, med de materialdata, randvillkor, antaganden och förenklingar som redovisas i annat avsnitt.

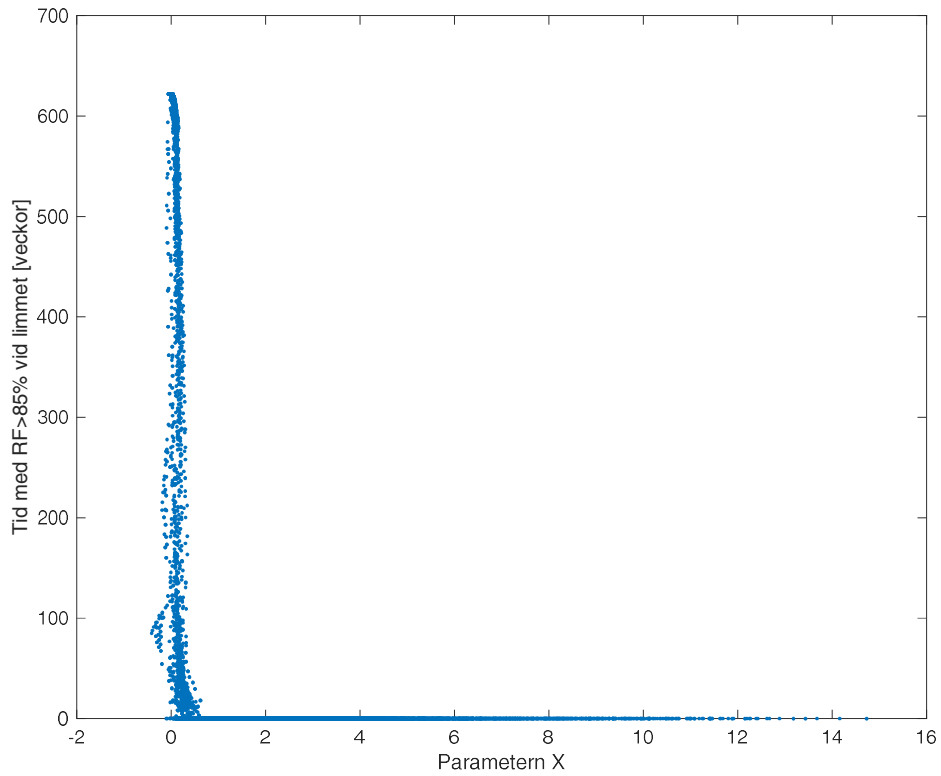


Diagram 13: Resultat av test av parameter X enligt texten. Vct 0,55. Beräknat för samtliga resultat i databasen (15344 st).

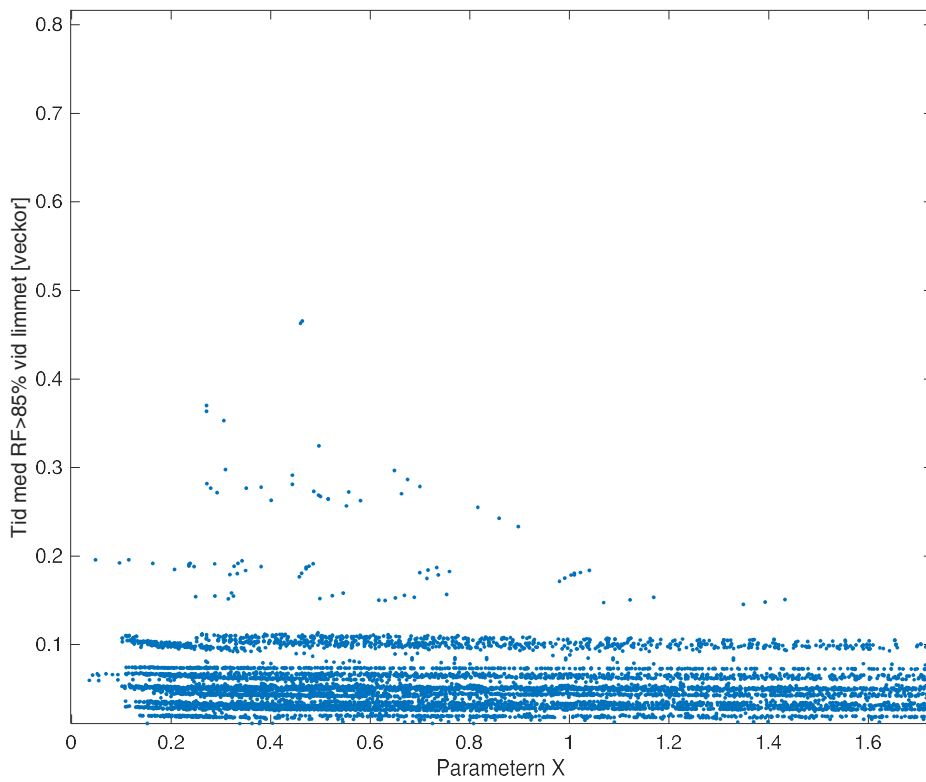


Diagram 14: Delsförstoring ur Diagram 13. Vct 0,55.

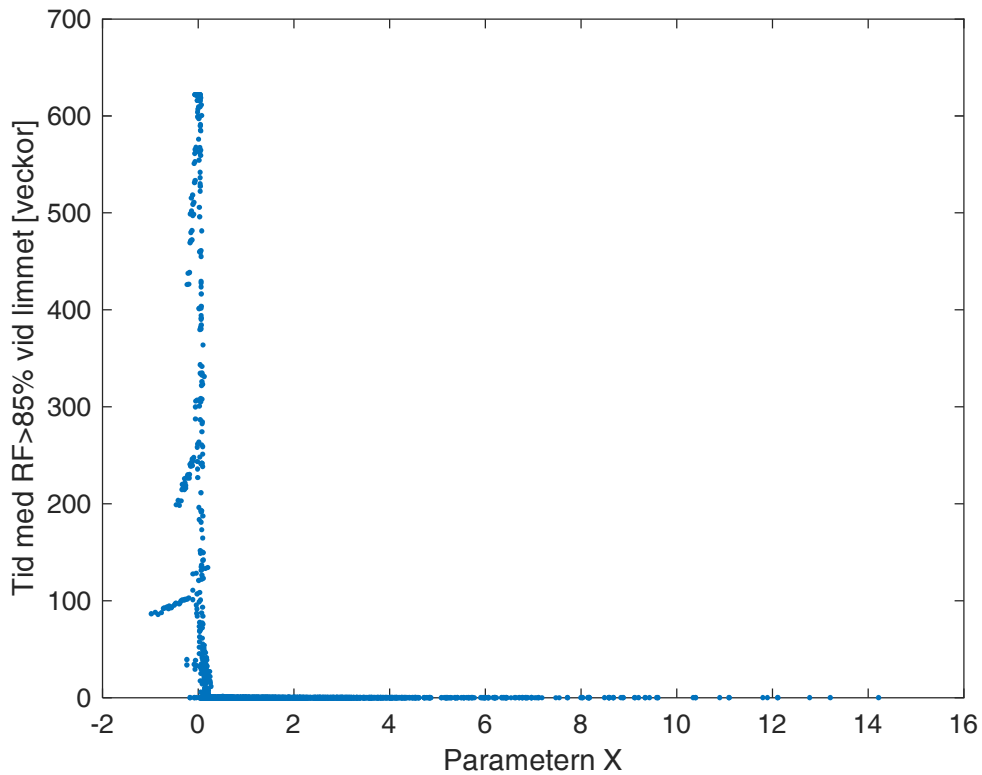


Diagram 15: Resultat av test av parameter X enligt texten. Vct 0,40. Beräknat för samtliga resultat i databasen (3559 st).

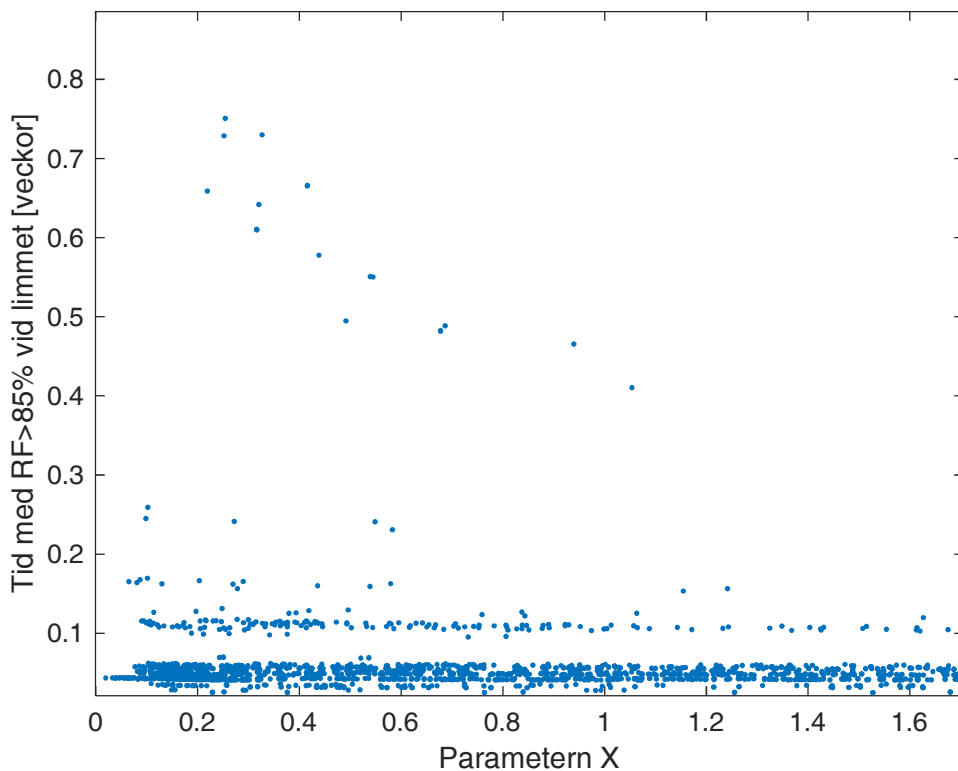


Diagram 16: Delsförstoring ur Diagram 15: Resultat av test av parameter X enligt texten. Vct 0,40. Beräknat för samtliga resultat i databasen (3559 st).

9.5 Bedömning via parameter baserad på RF_{40%}

Modellen i föregående avsnitt (ekvation 1) har en uppenbar svaghet: Om betongen har $RF < 85\%$ på traditionellt ekvivalent djup (40% av plattjockleken för ensidigt torkande platta) och avjämningen samtidigt har $RF < 85\%$ tvärs igenom, så kan omfördelning inte leda till högre RF än 85% vid limmet. Det måste därför finnas någon nedre gräns, uttryckt som RF i betong respektive avjämning, där RF vid limmet inte kan komma att överstiga 85% oavsett vilken tjocklek avjämnings-massan har eller vilken täthet mattan har.

En förbättrad version av ekvation 1 skulle därför kunna bygga på mätvärde från traditionellt ekvivalent djup (40% för ensidigt torkande platta). Ett första test visar att samma villkor som ovan fungerar bra, dvs $X > 1$ medför att kritisk tid är några enstaka dygn. Genom att sänka gränsvärdet för RF₄₀ (RF-värdet i betongen) till 91% kan villkoret modifieras till att X skall vara $X > 0,5$ för att tiden över 85% skall begränsas några till enstaka dygn.

Bytet från RF_{32mm} till RF₄₀ medför således ingen väsentlig förändring, men rent logiskt kan kravet $X > 1$ i detta fall kompletteras med att om både $RF_{40} < 85\%$ och $RF_{uk,avj} < 85\%$ så kommer $RF = 85\%$ inte att överskridas vid mattan.

(Eftersom det kan ifrågasättas om 40% verkligen är det ekvivalenta djupet för dessa betongkvaliteter borde en utredning av verkligt ekvivalent djup ha gjorts, men det har inte funnits tid till detta.)

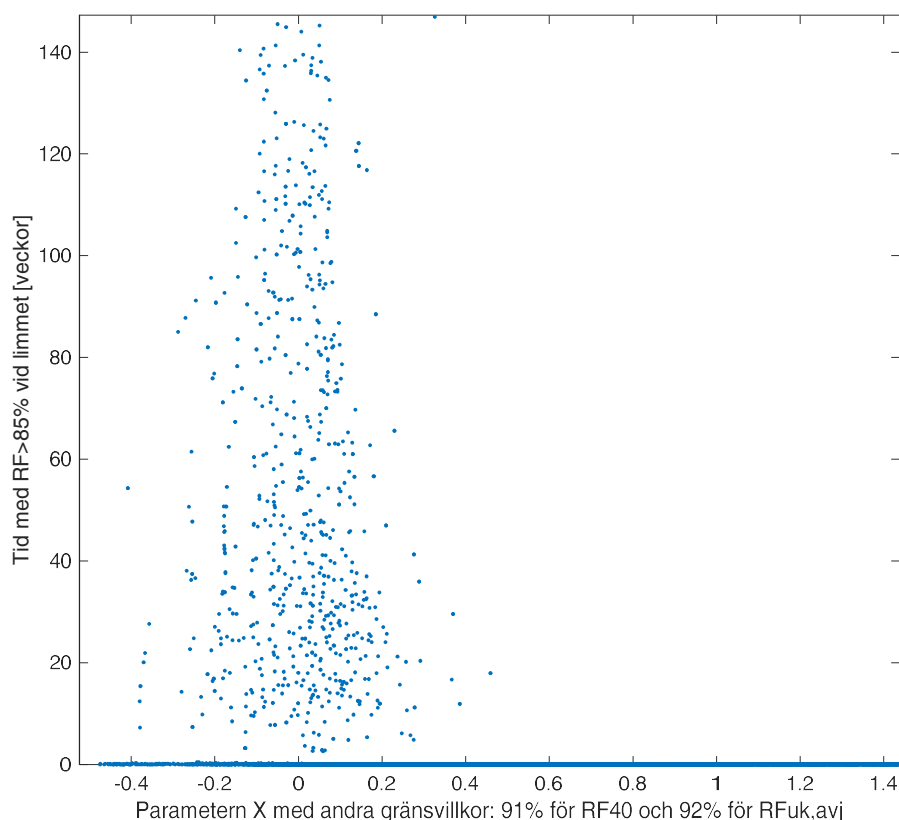


Diagram 17: Test av ekvation 1 med RF_{32mm} utbytt till RF_{40%} och gränsvärdet för betongen satt till 91%. Diagrammet visar att med denna kombination räcker $X > 0,5$ som krav för att undvika $RF > 85\%$ vid limmet under mer än några enstaka dygn.

9.6 Diskussion kring de olika metoderna

Den första metoden – jämförelse med referensfall i databasen – är relativt enkel att utföra, men det finns naturligtvis en risk att man inte lyckas hitta något lämpligt referensfall.

De förenklade metoderna som bygger på att enbart titta på ett enda mätvärde, antingen nere i betongen eller i avjämningsmassan, är olämpliga eftersom de är alltför ologiska: Det är inte rimligt att ett enda värde skall kunna återspegla effekten av alla andra väsentliga parametrar. Möjligen kan man i sin bedömning av situationen använda detta som ytterligare stöd för sin slutsats.

De förenklade metoderna med en kombination av gränsvärden är effektiva, men blir för oflexibla för att kunna användas på ett bra sätt i praktiken.

Den sista metoden, baserad på parametern X , förefaller både vara enkel att använda och ge tydliga resultat. Den är också logiskt riktig på så sätt att den återspeglar effekten av de variabler som vi lätt kan inse måste ha stor betydelse för vilken RF som nås under omfördelningsförloppet: RF i betongen, RF i avjämningsmassan, avjämnings tjocklek, och mattans täthet. Att sambandet blir så oerhört enkelt som ekvation (1) visar är dock förvånande. Kanske är förklaringen att metoden inte tar sikte på att avgöra vilken RF som uppnås eller hur länge RF överskrider 85%, utan på att avgöra *hurvida* RF kommer att överstiga RF=85% under mer än 1-2 dygn.

I metoden behövs RF-värdet i avjämningsmassans underkant. Detta kan inte mätas explicit med någon nu standardiserad mätmetod. I praktiken är det dock det högsta RF-värdet i avjämningsmassan som behövs, och i beräkningarna har detta alltid representerats av värdet i avjämnings underkant. I praktiken bör det därmed vara möjligt att RF-värdet i underkant av avjämningsmassan kan bedömas ur en GBR-mätning om man antar följande resonemang:

- En tunn avjämnning hinner torka väl tvärs igenom och därmed visar GBR-värdet RF både i underkanten och vid övriga djup i avjämnningen.
- En tjock avjämnning är fuktigare i underkanten, men det kan möjligen antas att GBR-värdet visar det högsta värde som finns i avjämnningen, dvs det som finns i underkanten. Om man inte vill lita på det senare antagandet tar man ut prover från flera olika djup i avjämnningen och bedömer RF i underkanten på basis av dessa värden. För att få tillräcklig mängd provmaterial kan flera borrhävar behöva tas ut.

10 REKOMMENDATION: FÖRSLAG TILL FÖRENKLAD METODIK

Mot bakgrund av resultaten ovan kan följande förfarande vara en lämplig förenklad metod att bedöma en situation där uttorkningskravet 85% på ekvivalent djup inte är uppfyllt.

1. Kontrollera att förutsättningarna enligt avsnitt 10.1 är uppfyllda.
2. Mät RF på djupet 32 mm i betongen. Justera mätvärdet mht temperaturen så att det gäller för 20°. Kalla detta RF_{32mm} .
(mätt från betongens yta, inte avjämningsens).
3. Mät (eller bedöm) RF i underkant av avjämningsmassan. Om mätning görs vid annan temperatur än 20°C: Justera mätvärdet mht temperaturen så att det gäller för 20°. Kalla detta $RF_{uk,avj}$.

4. Beräkna parametern X enligt ekvation 1:

$$X = (92 - RF_{32mm}) \cdot (92 - RF_{uk,avj}) \cdot \frac{T_{avj}}{z_{matta}}$$

där T_{avj} är avjämningsmassans tjocklek i meter och z_{matta} är mattans ånggenomgångsmotstånd dividerat med 1.000.000 [s/m].

5. Utvärdera:

Om $X < 0,5$: RF vid limmet kommer att överstiga 85% under väsentlig tid. Konstruktionen behöver torka mer innan matta limmas.

Om $0,5 < X < 1,5$: Gör en utförlig beräkning.

Om $X > 1,5$: Tiden med RF > 85% vid mattlimmet kommer att vara maximalt ett par dygn utöver den RF-topp som uppstår under ca 1-2 dygn omedelbart efter limning av mattan.

För närmare bedömning av lämpliga gränsvärden se Diagram 13 - Diagram 16.

Exempel: RF på 32 mm djup har mätts till 89%, GBR-mätning på avjämningsmassan, som är 20 mm tjock, visar 60%, och mattans ånggenomgångsmotstånd är 2.800.000 s/m. *Antag* att GBR-mätningen visar det högsta värdet i avjämningsmassan (så som beskrevs i avsnitt 9.4), och att detta finns i massans underkant. Parametern X får då värdet

$$X = (92 - RF_{32mm}) \cdot (92 - RF_{uk,avj}) \cdot \frac{T_{avj}}{z_{matta}} = \\ (92 - 89) \cdot (92 - 60) \cdot \frac{0,020}{2,8} \approx 0,69$$

Beräkningen visar att $X < 1$ och därmed att RF vid limmet kommer att överstiga 85% mer än något dygn. Värdet är dock något av ett gränsfall, och därför bör en utförlig beräkning utföras.

Kommentar: Metoden bygger på ett mätvärde på 32 mm djup i betongen. I praktiken går det inte att mäta grundare än 35 mm med teknik enligt RBK-metoden. Det

bedöms att mätvärdet från 35 mm kan ersätta mätvärde från 32 mm djup och att detta ökar säkerhetsmarginalen i den slutliga bedömningen.

Värdet $RF_{uk,avj}$, dvs RF-värdet vid avjämningsmassans underkant, kan vara svårare att mäta. Det som eftersträvas är att få fram ett mätvärde som visar den högsta RF som förekommer i avjämningsmassan, vilket under normala torkningsomständigheter är nära dess underkant. Mätning enligt GBR-metoden (www.golvbranschen.se) ger vanligtvis ett värde mycket nära det maximala som råder i avjämnningen. GBR-metoden bör därför kunna användas. Vid tveksamhet kan prov tas ut från flera olika djup för att få ett säkrare mätvärde. Lämplig mätmetod bör avgöras av erfaren mättekniker, med hänsyn till bland annat de torkningsomständigheter som har förevarit.

10.1 Begränsningar

Metoden ovan är baserad på de utförliga beräkningar som gjordes, vilka omfattade begränsade intervall på flera parametrar. Detta innebär att följande krav måste vara uppfyllda för att metoden skall kunna användas:

1. Betong med Cementa Basement, vct maximalt 0,55
2. Betongen måste ha härdat och torkat kontinuerligt i minst 12 veckor innan avjämningsmassa läggs på. Ingen fukttilförsel får ha förekommit som kan ha förändrat uttorkningsprofilen.
3. Avjämningsmassa med fuktegenskaper liknande Weberfloor 140 Nova eller Weberfloor 110 Fine
4. Avjämnningens tjocklek max 50 mm
5. Avjämningsmassan måste ha härdat och torkat kontinuerligt i minst 2 veckor innan matta limmas. Ingen fukttilförsel får ha förekommit som kan ha förändrat uttorkningsprofilen.
6. Mattans ånggenomgångsmotstånd $700.000 \leq z \leq 10.000.000$ s/m
7. Limfuktmängd maximalt 90 g/m^2 .
8. Metoden kan inte användas för annat kravvärde än 85%RF vid limmet.

Lita inte blindt på metoden! Väg in övriga omständigheter och gör en helhetsbedömning! Jämför med erfarenhet från liknande fall.

10.2 Komplettering / alternativ metodik

Om inte mättekniken har anpassats i förväg till den ovan beskrivna metoden är det troligare att mätning har gjorts på djupet 40% av betongens tjocklek än på 32 mm djup. I ett sådant fall kan den modifierade ekvationen enligt avsnitt 9.5 användas. Denna kan då också kompletteras med kriteriet att om både RF i betongen (på 40% av tjockleken) och RF i avjämnningen är mindre än 85% så kommer RF inte att överstiga 85% vid limmet (förutom några få inledande dygn pga limfukt).

11 BEHOV AV FORTSATT UTVECKLING

1. Genomför en laboratoriestudie av omfördelningsförlopp för att få kompletta referensfall att jämföra både de utförliga beräkningarna och den förenklade metoden mot.
2. Mät erforderliga materialdata för sådana material som kan komma ifråga: Betong med olika cementtyper och vct/vct, olika avjämningsmassor och mattor. Mät isotermer och scanningisotermer, mät fukttransportförmågan.
3. Utökade kritiska studier av den föreslagna metodens tillförlitlighet.
4. Studera fler scanningkurvor! Det behövs säkrare information om hur kurvorna ser ut för olika material och materialkvaliteter.
5. GBR-metoden: Går det att använda GBR-metoden för att uppskatta RF i underkant av avjämningsmassan? Hur tillförlitligt är resultatet?
6. Utför kompletterande beräkningar för att se om metoden kan användas för andra uttorkningskrav, t.ex. 90%RF.

12 REFERENSER

1. Ahlgren, L: Fuktfixering i porösa byggnadsmaterial, Rapport 36, avd Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola, 1972.
2. Anderberg, A: "Moisture properties of self-levelling flooring compounds", Rapport TVBM-3120, avd Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola, 2004.
3. Brunauer, S: The adsorption of gases and vapours, Oxford university Press, 1944
4. Gregg, S.J, Singh, K.S.W: Adsorption, surface area and porosity, Academic press, London, 1967, 2nd print
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_u ttorkning/
9. Zhang, Z: Modelling of sorption hysteresis and its effect 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

13 BILAGOR

1. Beräkningsprincip
2. Materialdata och simulering av materialdata
3. Några känslighetstest
4. Inledande, förenklade beräkningsfall
5. Beräkningar med simulerade initialprofiler
6. Val av initial fuktprofil

1. Bilaga 1: Beräkningsprincip

Beräkningen av omfördelningsförloppet innebär lösning av massbalansekvationen

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{dg}{dx} \quad (\text{Ekv. 2})$$

där

- w = fukthalten [kg/m^3]
- g = fuktflödet [$\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$]
- t = tiden [s]
- x = lägeskoordinat [m]

Ekvationen utvecklas till

$$\frac{dw}{dt} = C(\varnothing) \frac{d\varnothing}{dt} = -\frac{d}{dx} \left\{ v_s(\theta) \delta_v(\varnothing) \frac{d\varnothing}{dx} \right\} \quad (\text{Ekv. 3})$$

där

- \varnothing = relativa fuktigheten [-]
- $C(\varnothing)$ = materialets fuktkapacitet, $C = \delta w / \delta \varnothing$
- $v_s(\theta)$ = mättnadsånghalten vid temperaturen θ [g/m^3]
- $\delta_v(\varnothing)$ = fukttransportkoefficienten [m^2/s]

Ekvationen löses numeriskt med metoden explicita framåtdifferenser.

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.

Fuktkapaciteten är i praktiken lutningen hos sorptionsisotermen. Vid scanningförlopp ersätts denna av en fuktkapacitet för scanningförloppet, se Bilaga 2, rubrik 2.4.

I beräkningarna förutsätts att värmeutbyte inte påverkar fukttransportförloppen.

1.1. Randvillkor

Vid konstruktionens överyta ansätts ett ytövergångsmotstånd för fukttransport $z=50$ s/m fram till att mattan läggs på. Därefter gäller enbart mattans ånggenomgångsmotstånd.

Vid konstruktionens undersida ansätts att inget fuktutbyte alls sker.

1.2. Startvillkor

Beräkningen startas med en fuktprofil i betongen som beräknas enligt bilaga 5 samt med antagandet att avjämningsmassan håller 96%RF tvärs igenom.

2. Bilaga 2: Materialdata och simulering av materialdata

2.1. Betong med Bascement

Materialdata för betong med Bascement har hämtats från SBUF-projekt 13198. I det projektet redovisas både desorptions- och absorptionsisotermer, samt transportkoefficienter för såväl absorption som desorption, som funktion av relativ fuktighet. Använda materialegenskaper framgår av texten nedan.

2.2. Avjämningsmassa

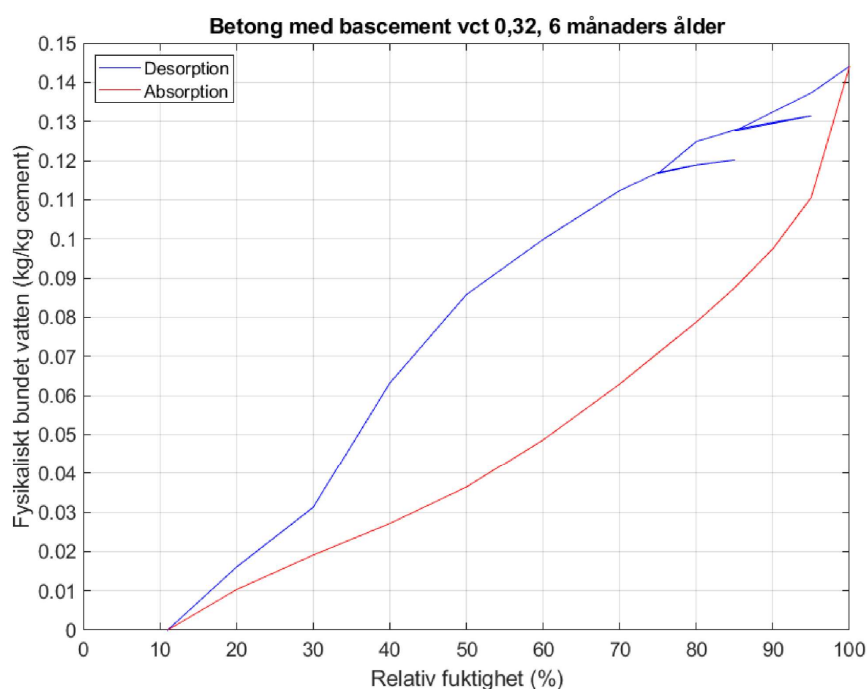
Materialdata för avjämningsmassor har inhämtats dels genom personlig kommunikation med Anders Anderberg (Weber, tidigare LTH), dels från [2].

Anderberg mätte fukttransportkoefficienten enbart under desorption. Använda materialegenskaper framgår av texten nedan.

2.3. Sorptionsisotermer

Använda sorptionsisotermer för betong med olika vct och och vid olika ålder redovisas i Figur 11-Figur 14.

Sorptionsisotermer för avjämningsmassan kan av sekretessskäl inte redovisas.



Figur 11: Sorptionskurvor för betong av Cementa Bascement, vct 0,32. Förstagångsdesorption. Observera att "torrvikt" har definierats som vikten vid jämvikt med 11%RF.

2.3.1. Modell för sorptionsisotermer i denna studie

En matematisk funktion har anpassats till Stelmarczyks redovisade isotermer. De mätta och de anpassade kurvorna redovisas i följande figurer.

Som framgår av diagrammen är skillnaden marginell mellan 6- och 12-månadersvärdena för respektive vct.

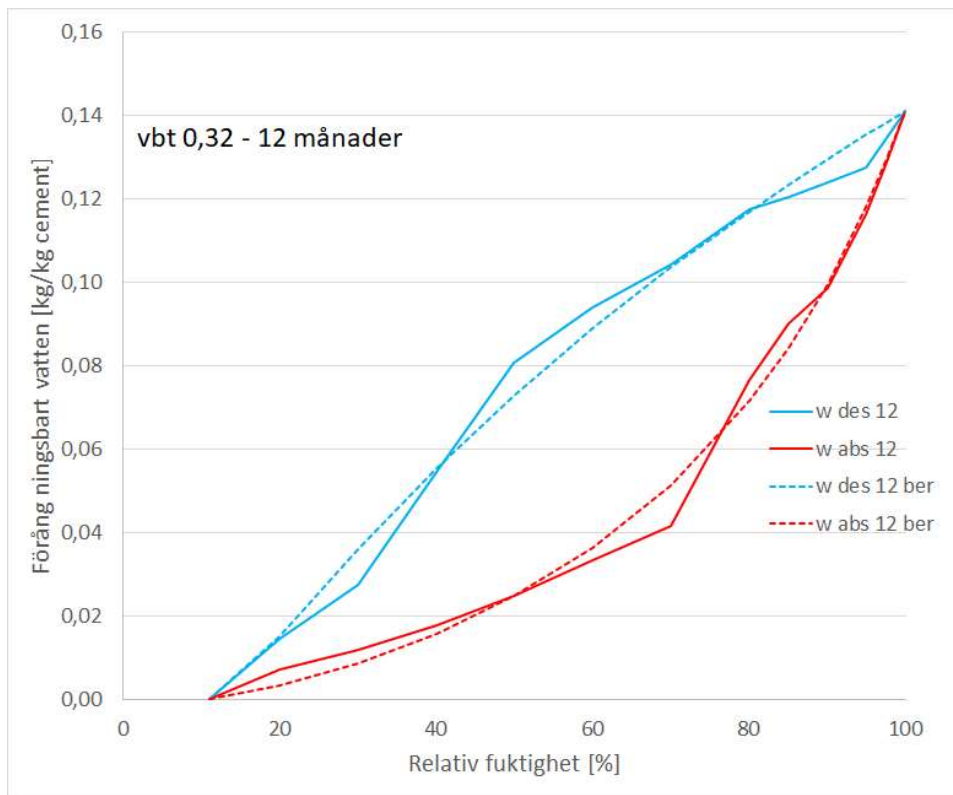
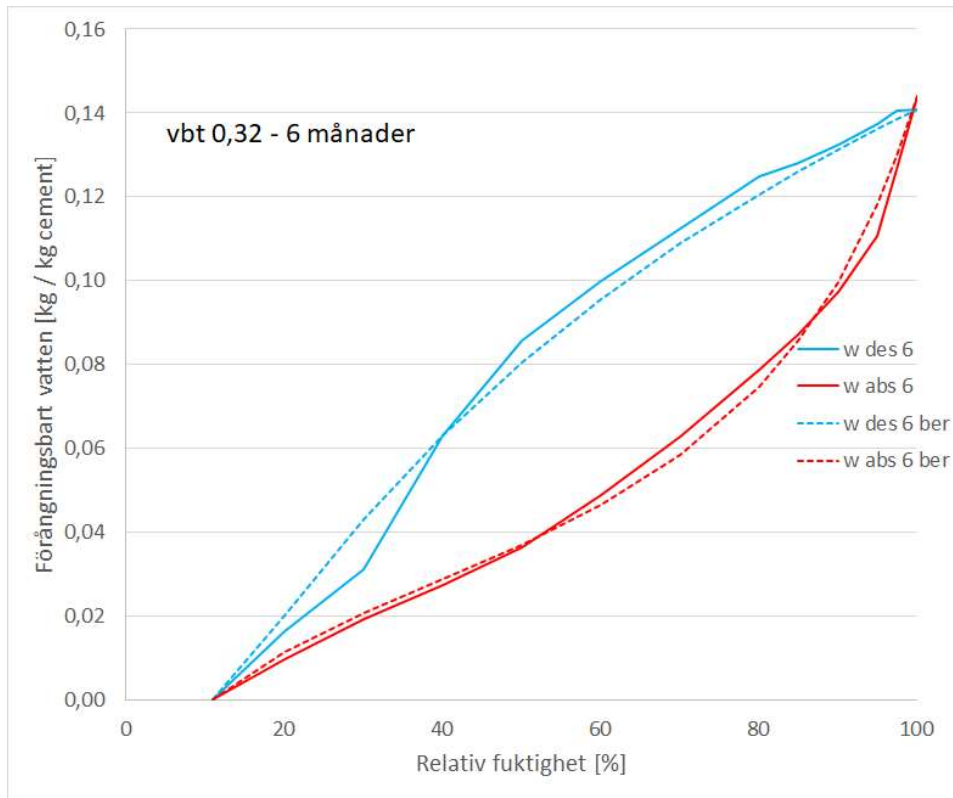
Den ekvation som används som beskrivning av sorptionsisotermerna är

$$w(\phi) = k \frac{(\phi - \phi_0)^n}{(A + (\phi - \phi_0))(B - (\phi - \phi_0))} \quad (\text{Ekv. 4})$$

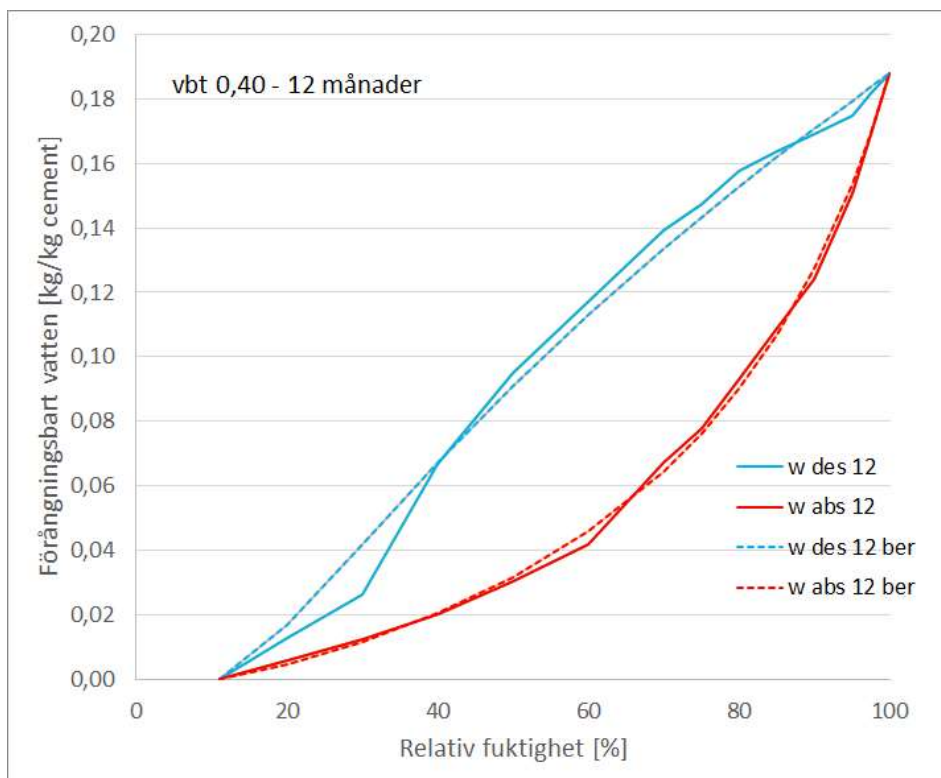
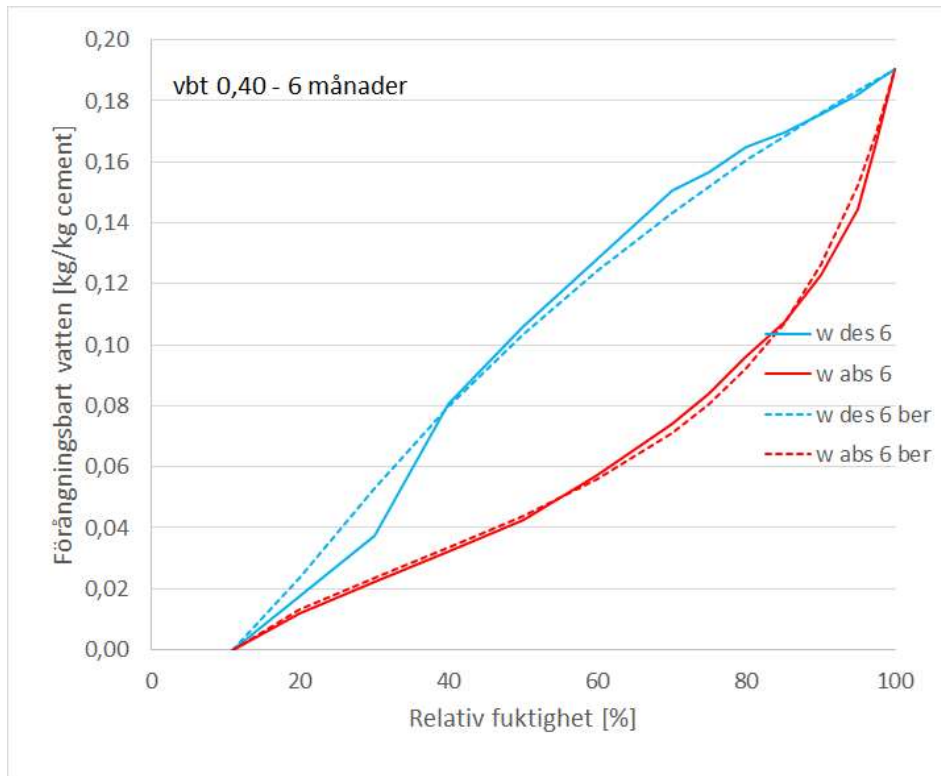
Där k, A, B och n är passningskonstanter. ϕ_0 är den RF där innehållet av förångningsbart vatten har definierats som 0 (11%RF i Stelmarczyks fall).

Användning av ekvation (4) medför att isotermerna parallellförskjutits uppåt något lite jämfört med Stelmarczyks sätt att redovisa dem. Detta påverkar absoluta innehållet av förångningsbart vatten, men ändrar inte fuktbufferingskapaciteten.

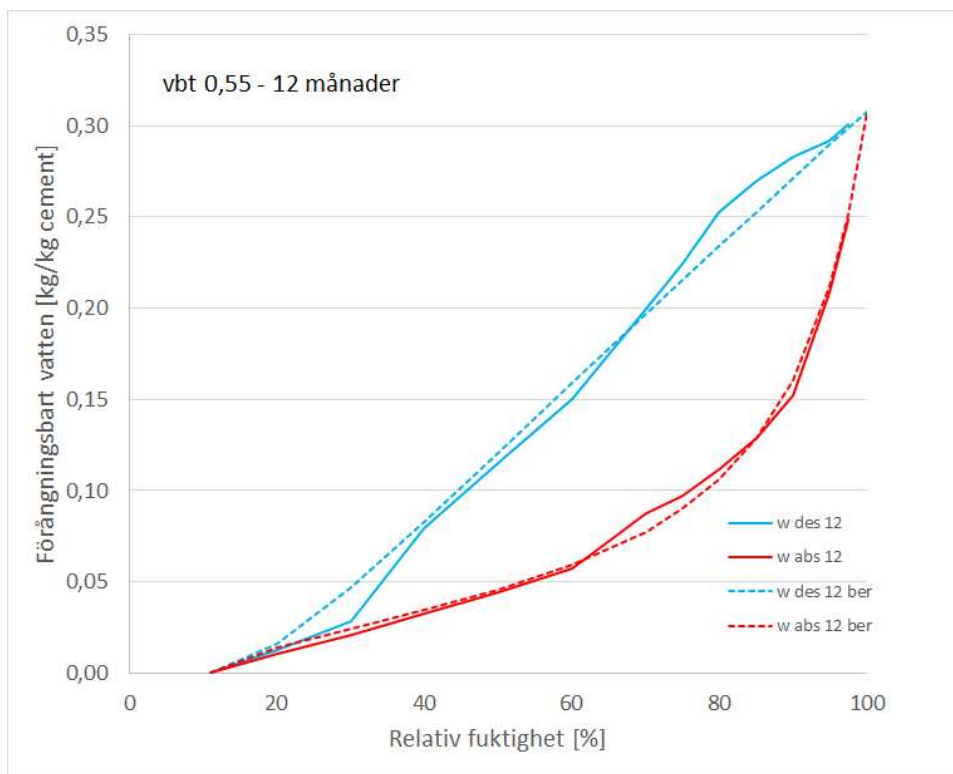
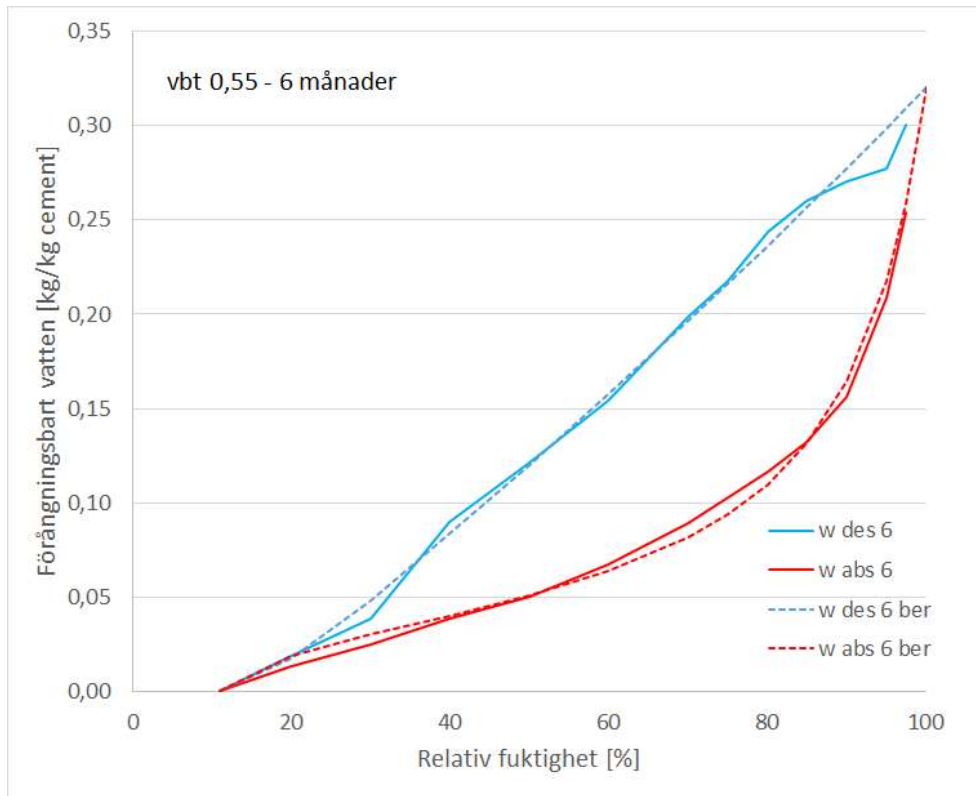
Samma ekvation kan anpassas även till avjämningsmassans isotermer.



Figur 12: Sorptionsisotermer för betong vct 0,32, olika åldrar. Bascement. Heldragen linje: Mätdata enligt Stelmarczyk. Streckad linje: Anpassning med ekvation (4).



Figur 13: Sorptionsisotermer för betong vct 0,40, olika åldrar. Bascement. Heldragen linje: Mätdata enligt Stelmarczyk. Streckad linje: Anpassning med ekvation (4).

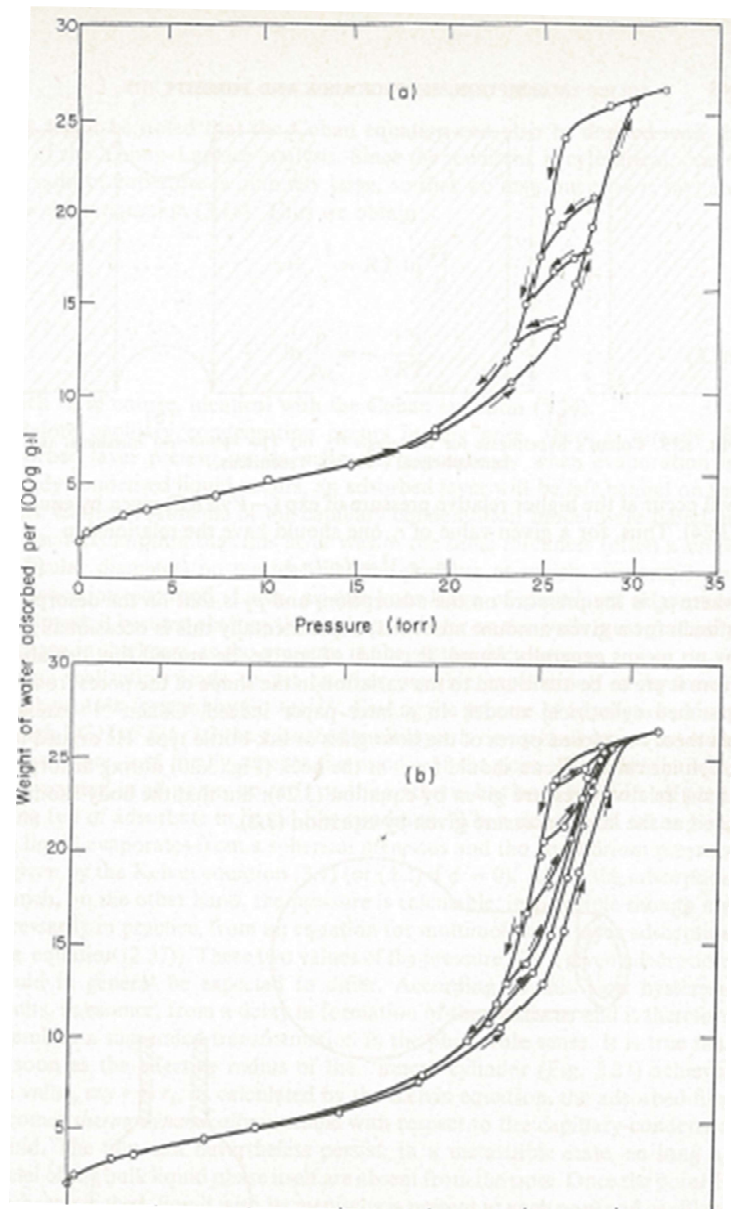


Figur 14: Sorptionsisotermer för betong vct 0,55, olika åldrar. Basement. Heldragen linje: Mätdata enligt Stelmarczyk. Streckad linje: Anpassning med ekvation (4).

2.4. Scanningisotermer

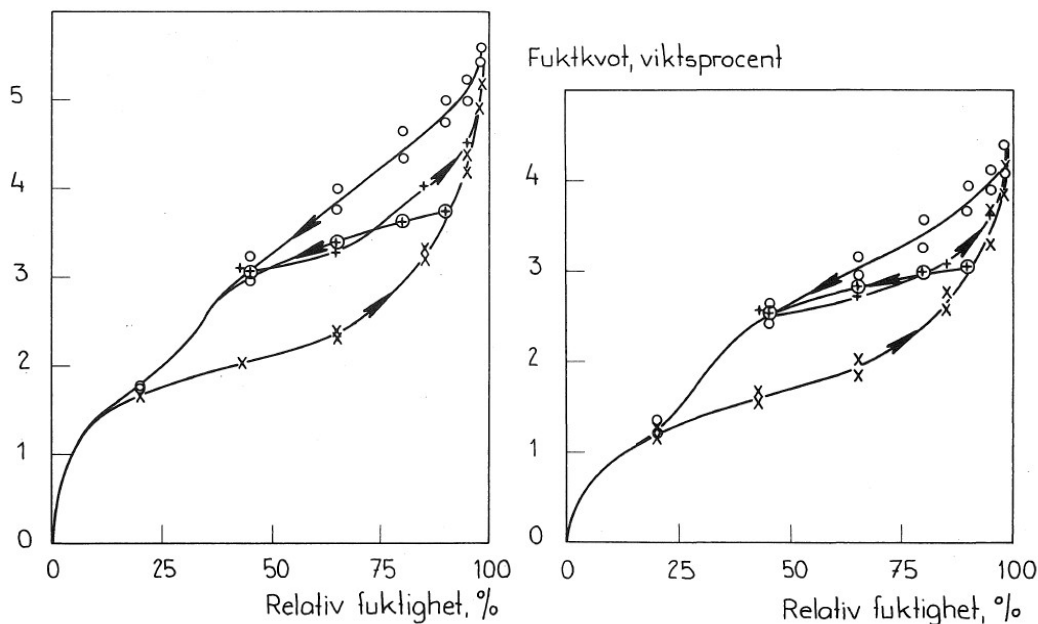
När ett material övergår från torkning till uppfuktning eller tvärtom följer fuktillståndet en s.k. scanningkurva som löper mellan de båda isotermerna, se t.ex. Figur 15. Vid en noggrann omfördelningsberäkning måste sådana scanningkurvor användas.

Ytterst få scanningisotermer för cementbundna material finns redovisade i litteraturen. Ahlgren [1] ger exempel på scanningkurvor för betong (Figur 16) som kvalitativt visar samma form som i Figur 15.



Figur 15: Exempel på scanningkurvor. [4] (med referens till Rao, K.S: J. phys. Chem, 45, 506, 517, 1941)

Fuktkvot, viktsprocent



Figur 16: Exempel på scanningkurvor [1]. Vänster: Betong, $C=400 \text{ kg/m}^3$, vct 0,55 (fig 1:2). Höger: Betong, $C=334 \text{ kg/m}^3$, vct 0,44 (fig 1:3)

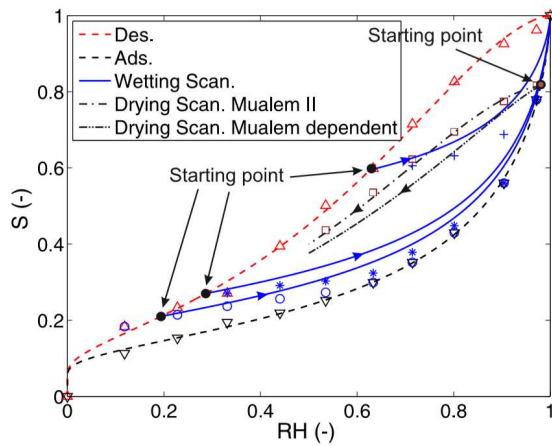
Liknande kurvor för cementbaserade material finns sammanställda av Zhang [9], se Figur 17. Här visas kvalitativt samma form som i Gregg&Singh [4] och Brunauer [3]: Absorptionsscanningkurvan är konkv uppåt, medan desorptionsscanning-kurvan är konv uppåt.

Ytterligare några exempel på scanningkurvor redovisas av Anderberg [1] och av Åhs [10], se figurer nedan. Dessa kurvor avviker från vad som redovisas av Gregg&Singh respektive Zhang på så sätt att

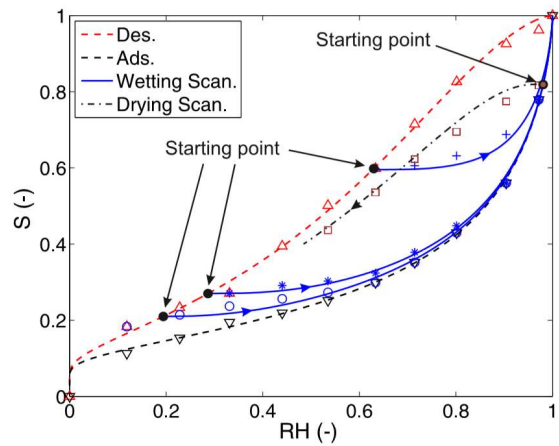
1. Absorptionsscanningkurvorna går över helt från desorptionskurvan till absorptionskurvan, trots att materialet ifråga aldrig hade torkats fullständigt. Detta syns möjligen i några fall även i Zhangs sammanställning (Figur 17), men strider mot vad som anges i av Brunauer respektive Gregg & Singh.
2. 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 insvägningsförlopp. Man kan möjligen spekulera i att en eventuell brist på egentlig jämvikt kan ha resulterat i en avvikande scanningkurva.

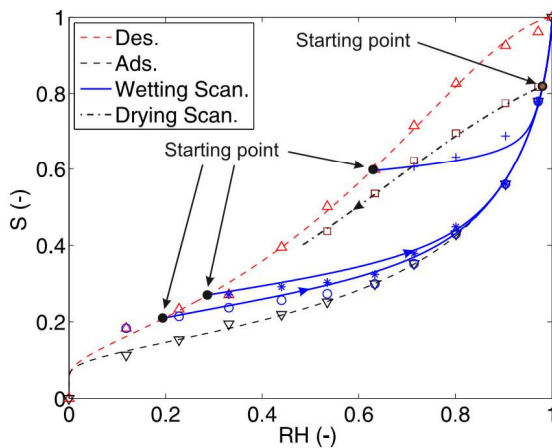
Även Ahlgren [1] redovisar dock scanningkurvor för asbestcement och porballastbetong där desorptionsscanningkurvan visar liknande konkv form uppåt som i Anderbergs och Åhs kurvor (se Figur 16). Möjligen visar resultaten av Anderberg, Åhs och Ahlgren att scanningkurvor faktiskt har denna konkava form för vissa material.



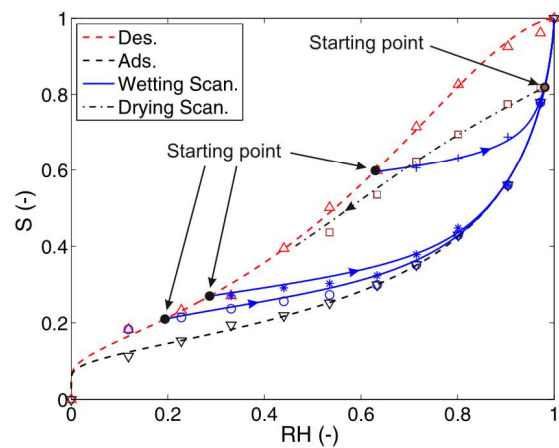
(a) Mualem's models [52, 54].



(b) Li's model [58].

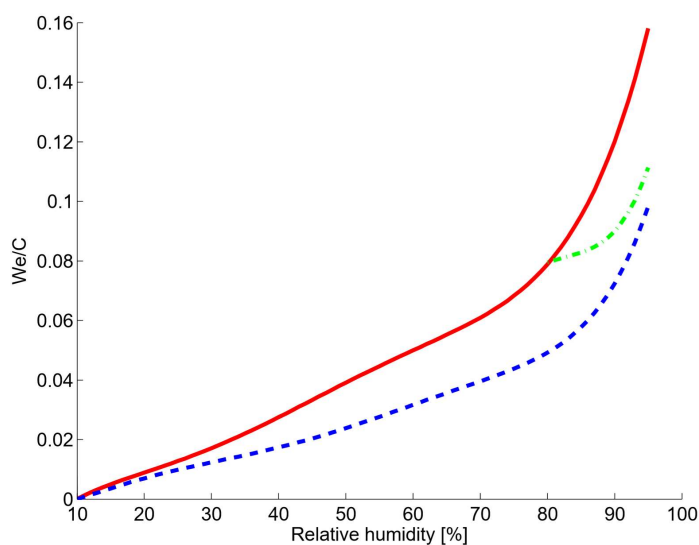


(c) Modified Wei's model (proposed).

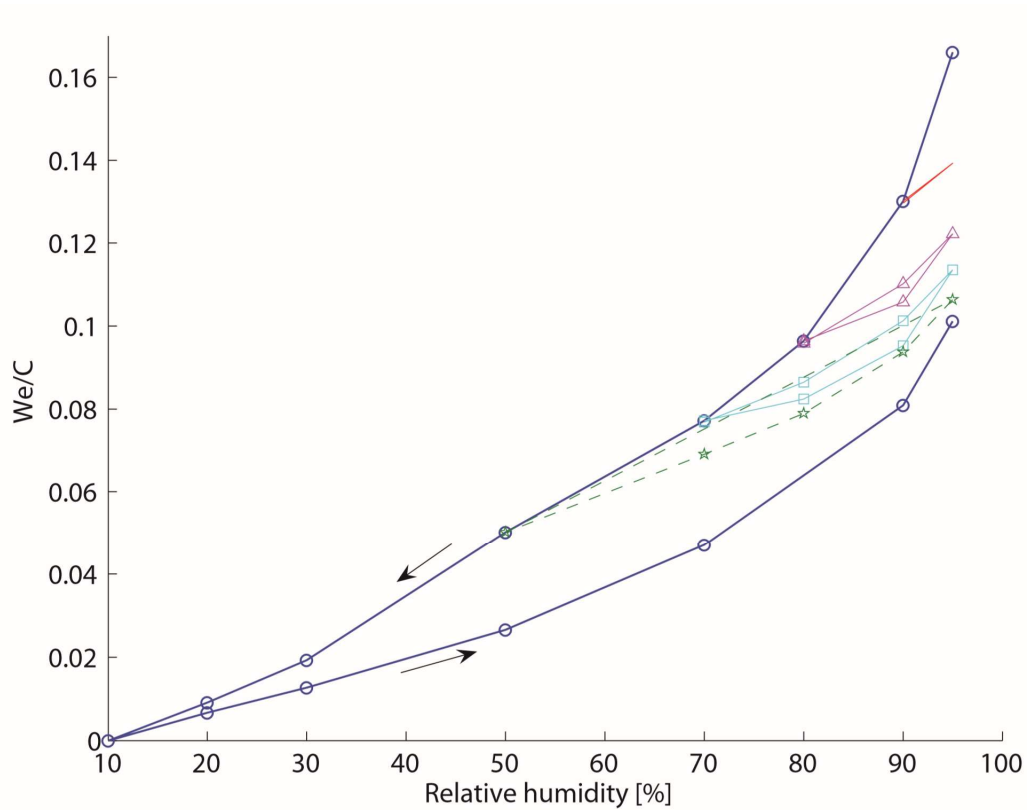


(d) Improved Rubin's model (proposed).

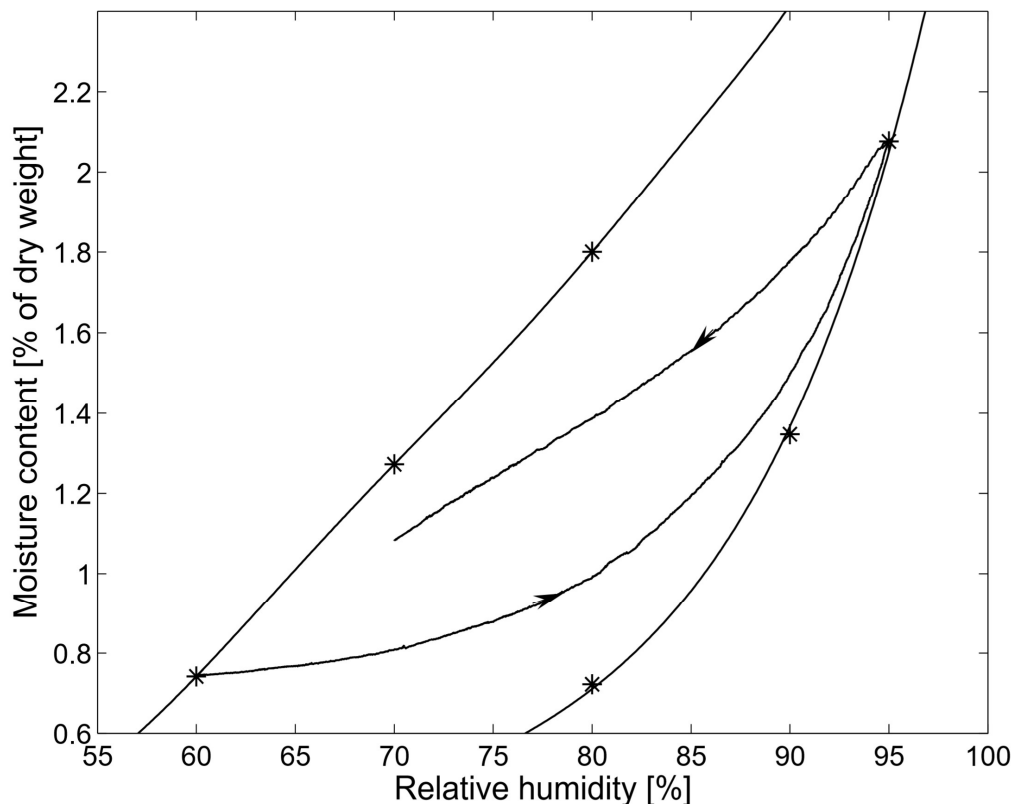
Figur 17: Exempel på mätta scanningsisotermerna (markerade punktvis med ringar, trianglar, etc) och simulerade (heldragna). Formen på de mätta scanningsisotermerna är kvalitativt lik vad som beskrivs av Brunauer [3] respektive Gregg&Singh [4]. Ur [9] efter Baroughel-Bouny.



Figur 18: Desorptions- och absorptionsisoterm för betong vct 0,65, samt en absorptionsscanningkurva (grön) som beskriver hur fuktillståndet ändras då materialet fuktas upp efter att först ha torkats till 80%RH. [10]



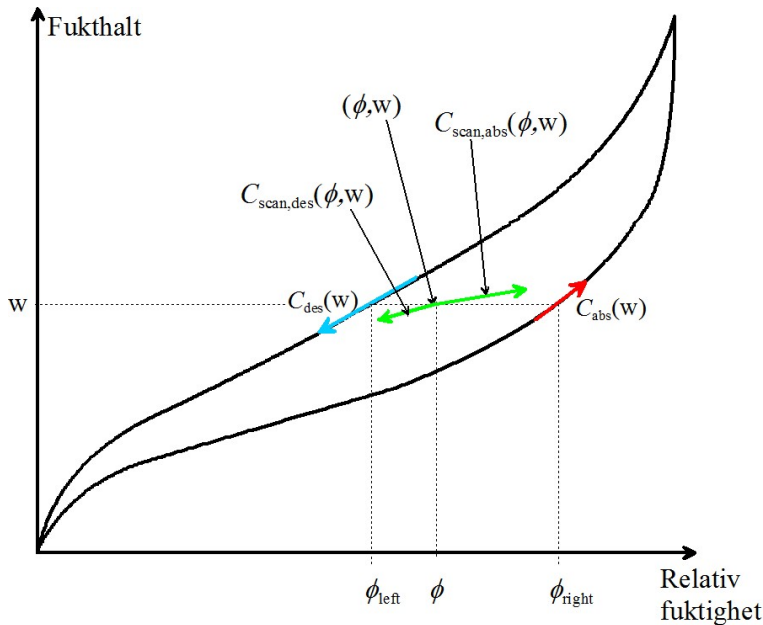
Figur 19: Desorptions- och absorptionskurvor för betong vct 0,65, samt 4 olika scanningsisotermer [10].



Figur 20: Exempel på mätta scanningsisotermer för en golvavjämningssmassa [2]

2.4.1. Modell för scanningsisotermer i denna studie

För utveckling av beräkningsprogrammet som använts för omfördelningsberäkningar i detta projekt har ett flertal modeller för scanningsisotermer provats. Den som har fallit bäst ut beskrivs i det följande.



Figur 21: Illustration av hur scanningskapaciteten beräknats

Absorption:

$$C_{scan,abs} = andel \cdot C_{abs}(w) \quad (Ekv. 5)$$

$$andel = \left(\frac{\phi + k - \phi_{left}}{\phi_{right} - \phi_{left}} \right)^{exponent} \quad (Ekv. 6)$$

Termen k behövs för att undvika att scanningskapaciteten blir 0 i de fall aktuell ϕ är lika med ϕ_{left} . I praktiken – i beräkningarna – inträffar detta endast när fuktillståndet går från att följa desorptionsisotermer till att följa en scanningsisoterm. Termen används enbart när $\phi \leq \phi_{left} + 0,001$ och den sätts då till $k = 0,001$. I andra lägen är $k=0$ och påverkar således inte den beräknade scanningsabsorptionskapaciteten. (Denna teknik har vidareutvecklats efter att beräkningarna genomfördes.)

Exponenten kan varieras för att få olika form på scanningsloopen, se Bilaga 3. Dess inverkan är dock förhållandevis begränsad. Som standardvärde kan exponenten sättas till 1.

Desorption:

$$C_{scan,des} = andel \cdot C_{des}(w) \quad (Ekv. 7)$$

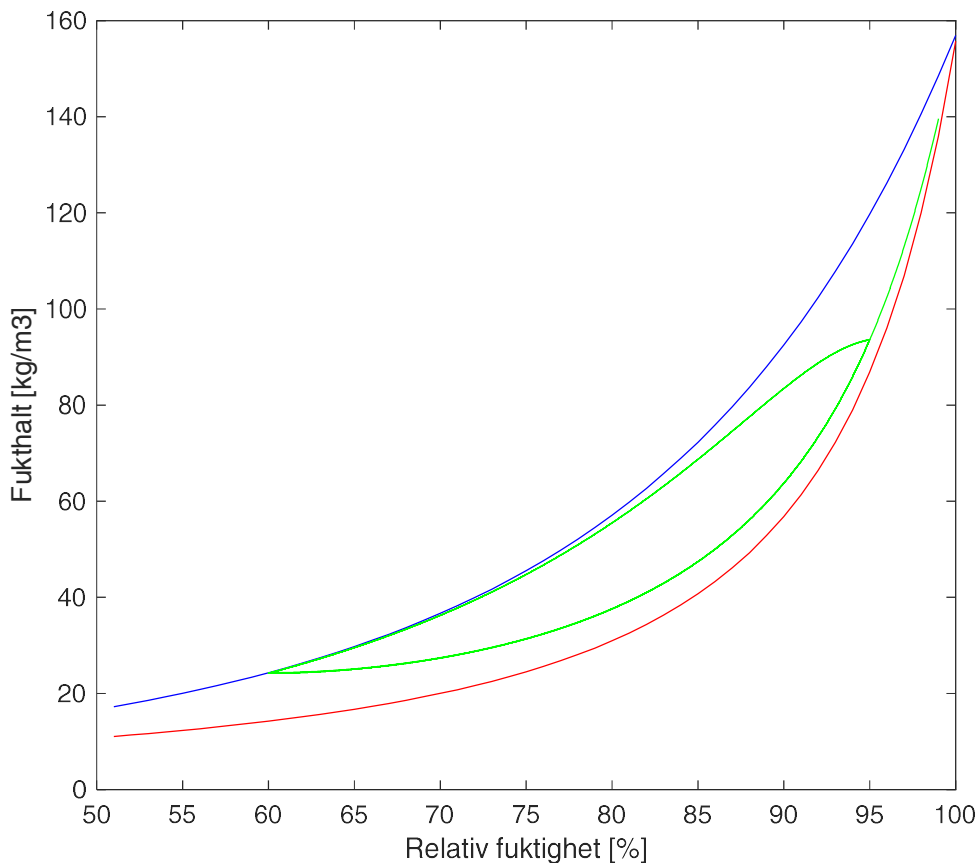
$$andel = \left(\frac{\phi_{right} - \phi}{\phi_{right} - \phi_{left}} \right)^{exponent} \quad (Ekv. 8)$$

Vid desorptionsscanning behövs nästan aldrig någon k -term eftersom desorptionsscanningen nästan aldrig utgår från absorptionsisotermer. Dock finns ett undantag: När översta cell(erna) i avjämningsmassan tillförs fukt från limmet kommer de i vissa fall att nå "kapillär mättnad" vilket i dessa beräkningar definieras som jämvikt med 97%RF längs absorptionsisotermer. Precis som vid absorptionssscanning med start på desorptionsisotermer innebär detta fall att

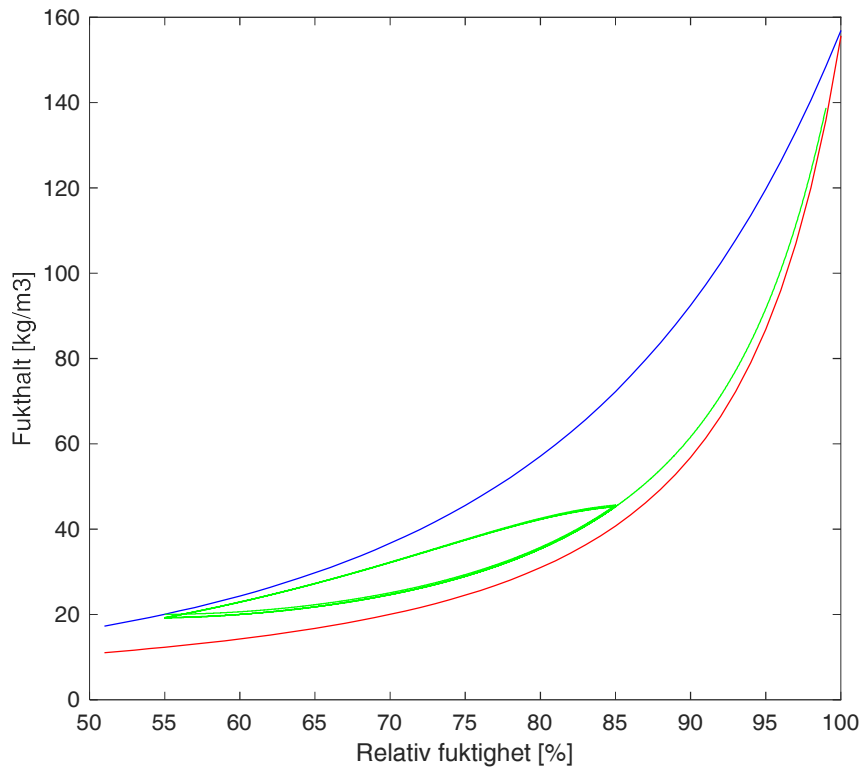
scanningkapaciteten blir 0, och då måste en k -term användas för att undvika orimliga resultat.

Precis som i flera av de modeller som Zhang [9] beskriver så ger modellen en förskjutning mellan scanninglooparna om förloppet upprepas flera cykler, se Figur 22-Figur 24. 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.

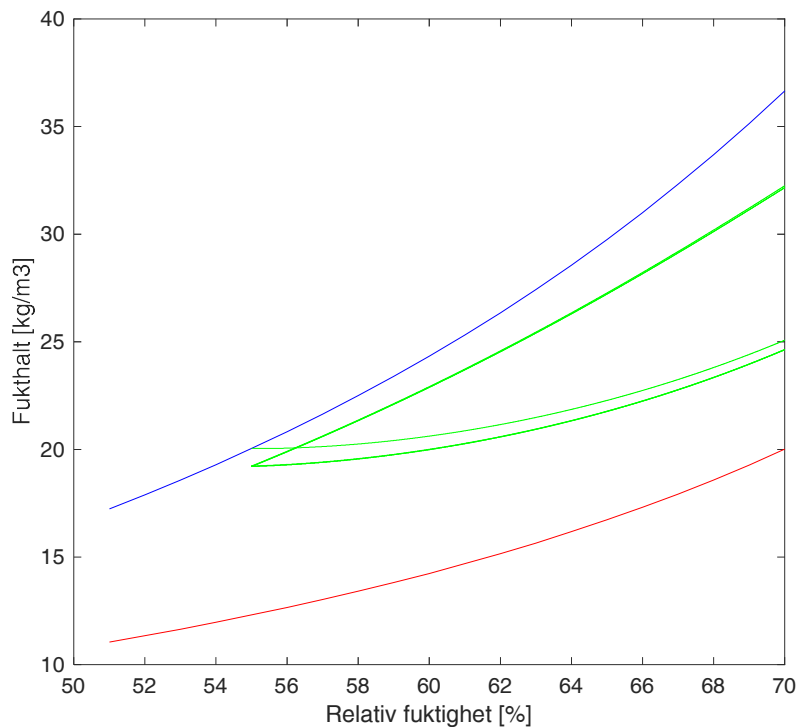
Ett skäl till att looparna förskjuts kan vara att beräkningen av nästa jämviktsläge sker explicit, dvs med start i en punkt (RF, w) beräknas nästa jämviktsläge enbart utifrån scanningkapaciteten i det första läget. Det förefaller rimligt att en bättre anpassning erhålls om beräkningen sker implicit,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



Figur 22: Exempel på beräknat scanningförlopp för ett fiktivt material med desorptions- och absorptionsisotemer enligt den blå respektive röda kurvan. Fukthalt (kg/m^3) mot RF. Uttorkning (längs desorptionsisotermen) till 50% 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 23: Exempel på beräknat scanningförlopp för ett fiktivt material med desorptions- och absorptionsisotermerna 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 24: 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.)

2.5. Fukttransportkoefficienter

I denna studie beräknas fuktflöden (1-dimensionellt) enligt

$$g = -\delta_v(w, t) \frac{dv}{dx} \quad (\text{Ekv. 9})$$

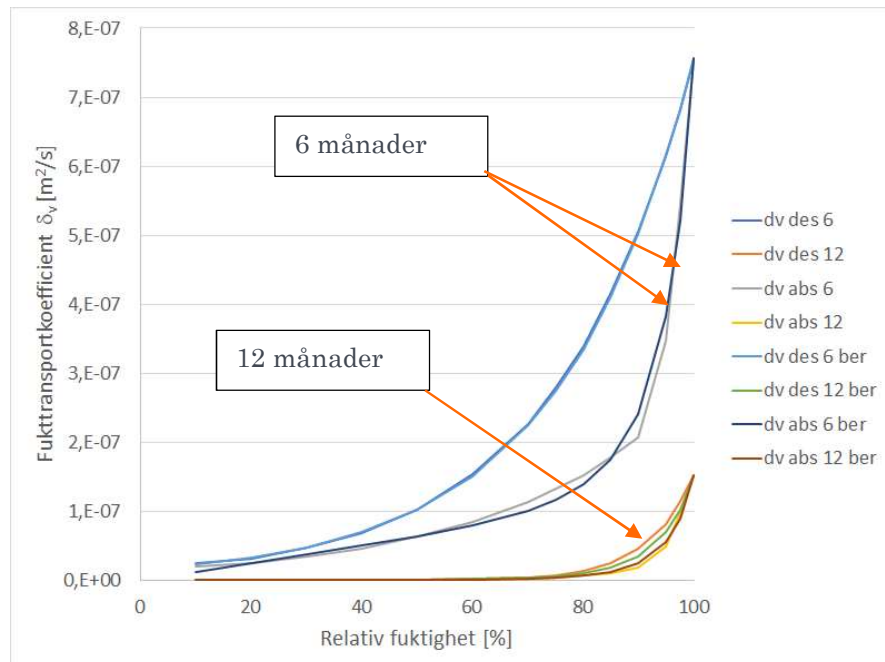
där δ_v är fukttransportkoefficienten δ med ånghalt v som drivande potential.

Fukttransportkoefficienten δ_v varierar både med materialets fukttinnehåll (uttryckt som fukthalt eller indirekt som relativ fuktighet) och med materialets ålder till följd av de strukturförändringar som sker över tid (se nedan). Eftersom fukttinnehållet 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.

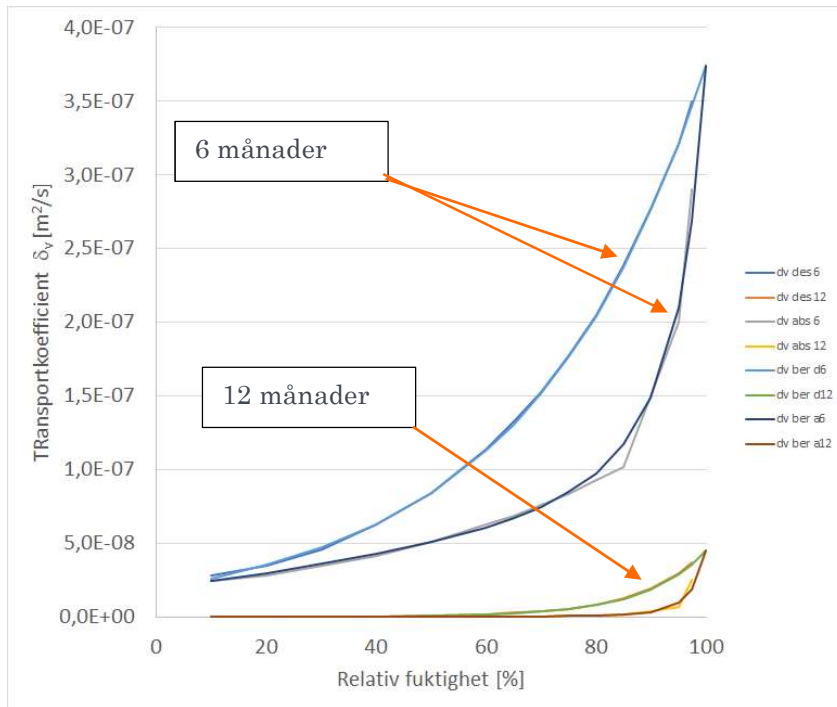
2.5.1. Fukttransportkoefficientens RF- och åldersberoende

I Figur 25 och Figur 26 visas dels hur transportkoefficienten för betong med Basement varierar med den relativa fuktigheten i materialet, dels hur fukttransportkoefficienten minskar med materialets tilltagande ålder. För vct 0,55 sjunker värdet med en faktor 5 mellan 6 och 12 månaders ålder, och för vct 0,32 nästan med en faktor 10.

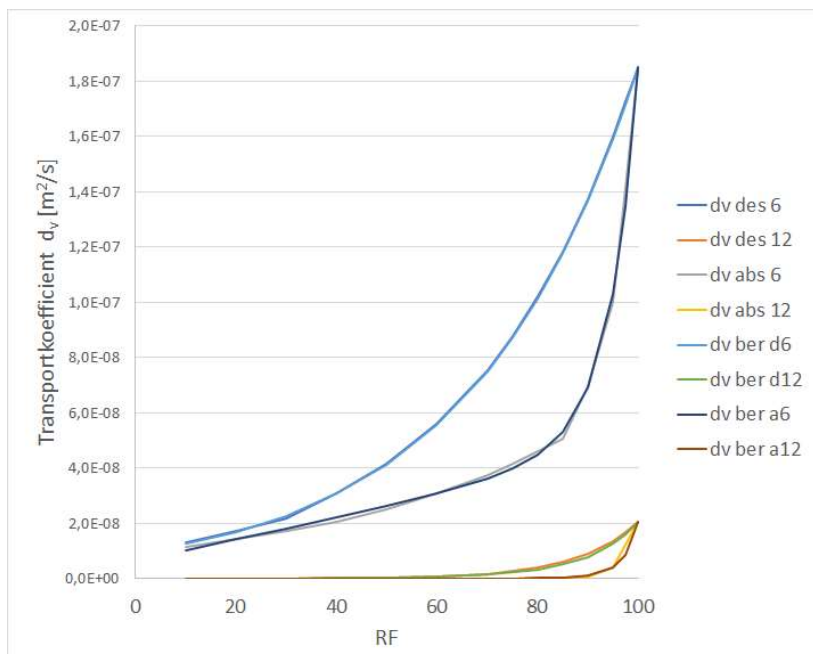
Dessa förändringar har stor inverkan på vilka fukttillstånd som kan uppstå i avjämningsmassan, se Känslighetstest nedan (avsnitt 3.1 i bilagorna). Detta gör att fukttransportkoefficienterna måste modelleras med både ett RF- och ett åldersberoende, se vidare nedan.



Figur 25: Fukttransportkoefficienter för betong med Basement, vct 0,55. Dels mätdata enligt Stelmarczyk, dels beräknade värden enligt ekvation (10).



Figur 26: Fukttransportkoefficienter för betong med Bascement, vct 0,40. Dels mätdata enligt Stelmarczyk, dels beräknade värden enligt ekvation (10).



Figur 27: Fukttransportkoefficienter för betong med Bascement, vct 0,32. Dels mätdata enligt Stelmarczyk, dels beräknade värden enligt ekvation 10.

2.5.2. 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. Figur 28.

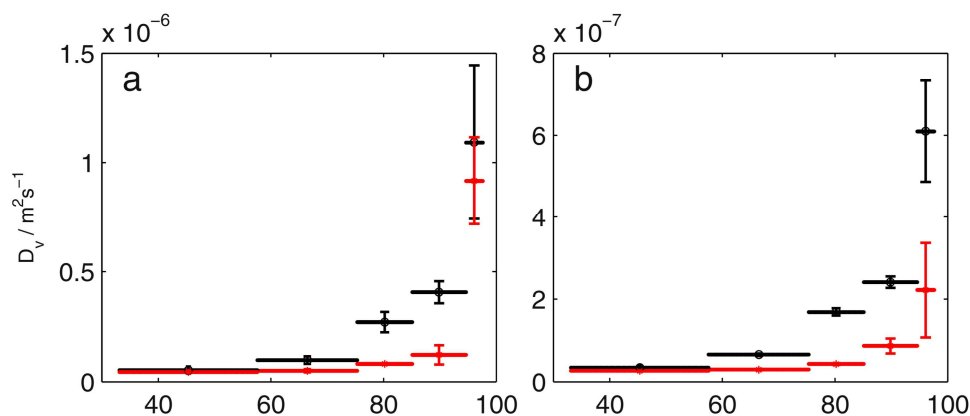
Stelmarczyk har redovisat fukttransportkoefficienter för betong av Cementas Bascement med vct 0,32, 0,40 och 0,55, se Figur 29. Som framgår av dessa diagram föreligger en avsevärd skillnad i fukttransportförmåga vid uppfuktning respektive torkning om fukttransportförmågan uttrycks *som funktion av relativa fuktigheten*. Vid en omfördelningsberäkning skiftar materialet mellan uppfuktning och torkning och det kan därför vara motiverat att uppdatera fukttransport-koefficienten efter vad som sker för tillfället. Med fukttransportförmågan uttryckt som funktion av relativa fuktigheten leder detta dock till numeriska problem vilka gör att fukttransportförmågans värde skiftar upp och ned på ett orealistiskt sätt (genom att den "hoppar" från ena kurvan till den andra), vilket i sin tur leder till att beräkningsresultatet "glider iväg" på ett sätt som inte syns realistiskt (se Figur 40).

Genom att istället uttrycka fukttransportförmågan som *funktion av materialets fukthalt* kan det kanske vara möjligt att få stabilare värden, vilket leder till minskade fluktuationer i beräkningsresultaten. För att pröva om det går att uttrycka fukttransportförmågan som funktion av fukthalten och om detta ger mindre spridning har diagrammen i Figur 30-Figur 32 ritats.

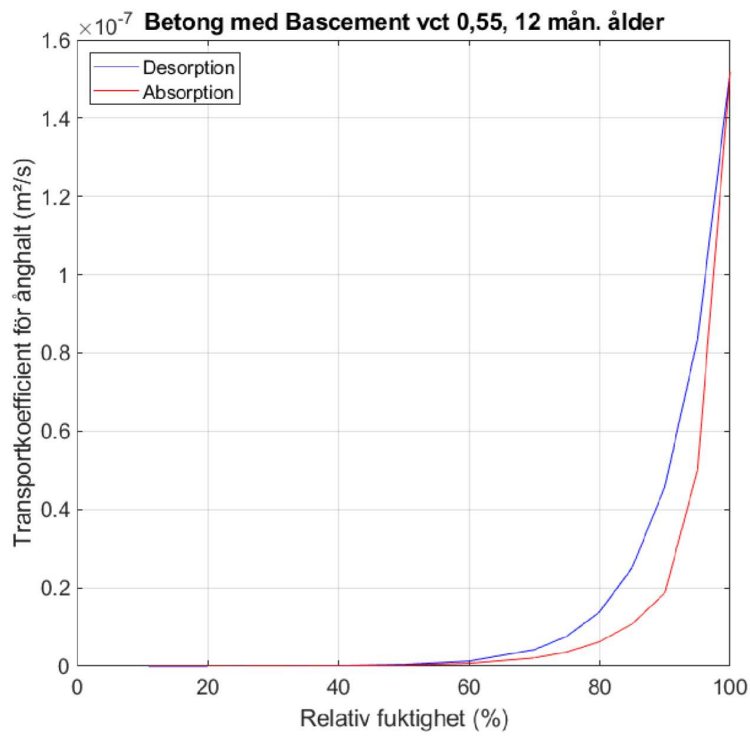
För vct 0,32 och 0,40 och vid ålder 12 månader visar dessa diagram att fukttransportförmågan är tydligt kopplad till fukthalten. Vid 6 månaders ålder är kopplingen inte lika tydlig. För vct 0,55 är kopplingen vid 12 månaders ålder inte alls tydlig; hysteresen mellan uppfuktning och torkning blir snarare större än den som framgår av Figur 29 (med RF som oberoende parameter).

Trots avvikelsen för vct 0,55 har fukttransportkoefficienten genomgående beräknats som funktion av fukthalten i de utförda beräkningarna. För fallet vct 0,55 kan detta möjligen ha medfört en överskattning av fukttransportförmågan vid uppfuktning, men detta medför i så fall att resultaten visar lite högre värden än vad som verkligen erhålls, dvs slutresultaten är "på säkra sidan".

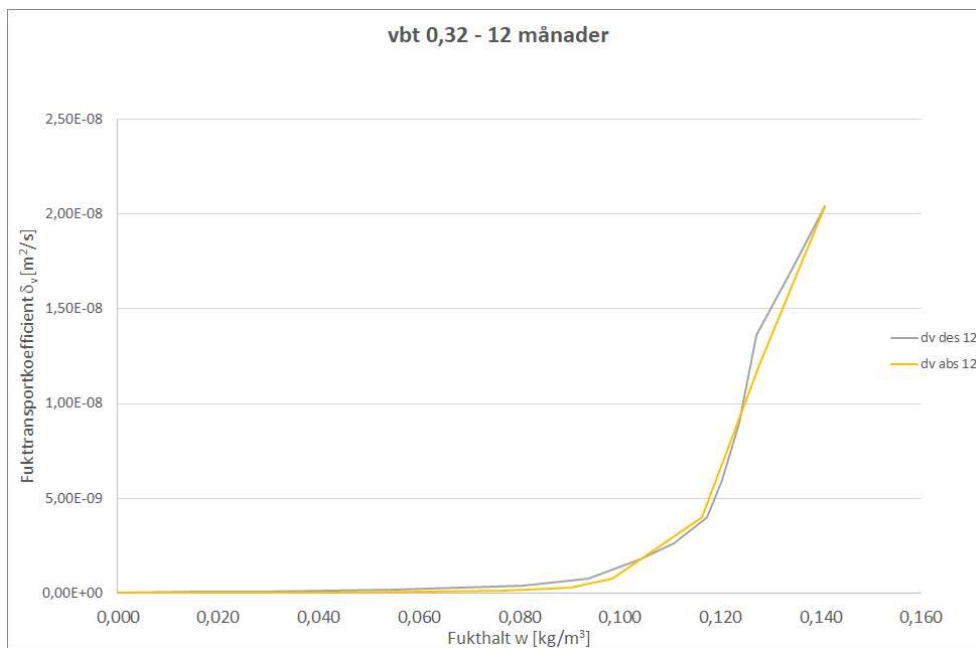
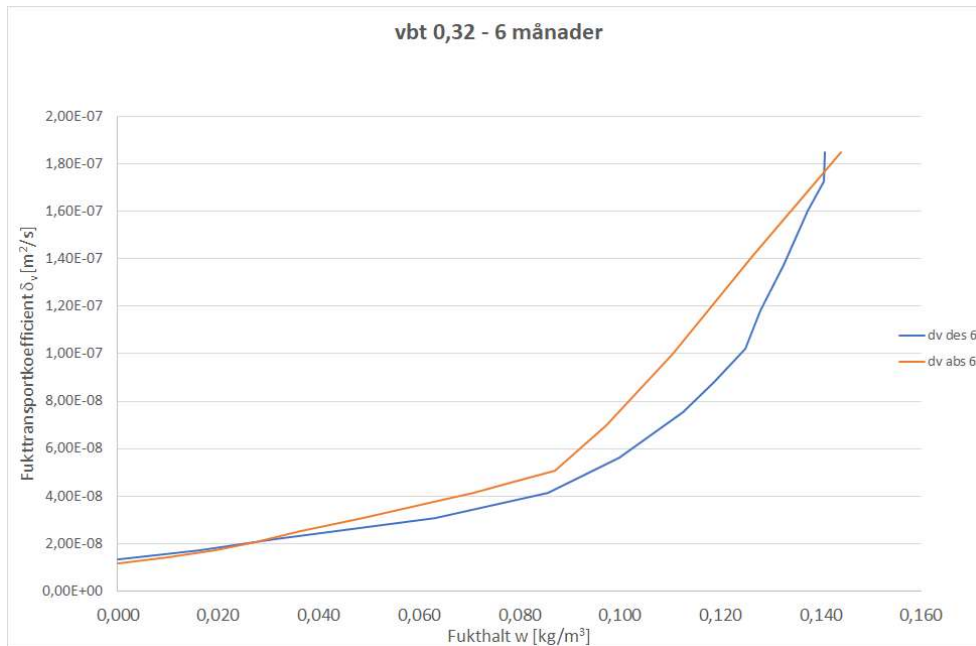
Att anta att fukttransportkoefficienten enbart är beroende av fukthalten är orimligt, eftersom porstrukturen efter en torkning-uppfuktningscykel inte är densamma som före torkningen, och därmed kan inte vattnet vara fördelat på samma sätt. Det innebär också att fukttransportkoefficientens värde blir beroende av hur hårt materialet har torkats innan det återigen börjar fuktas upp.



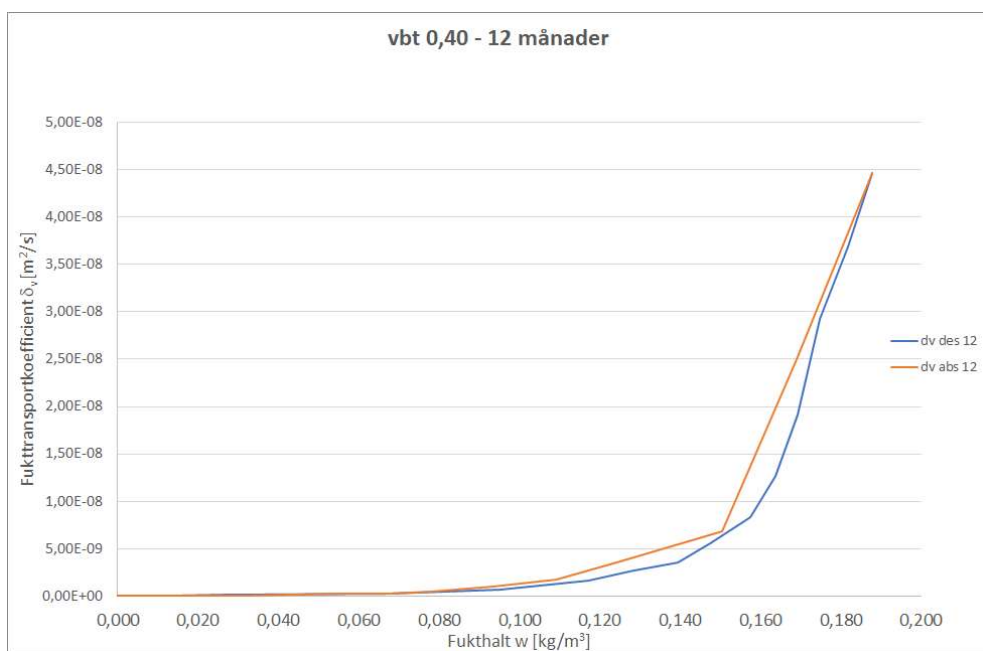
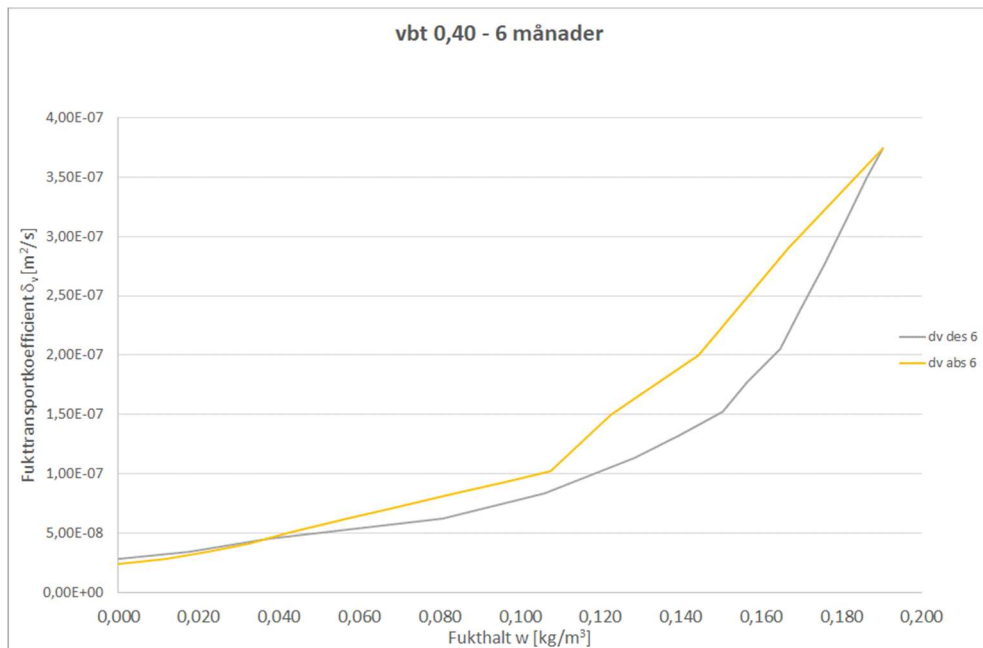
Figur 28: Fukttransportkoefficienter för OPC-bruk dels vid uppfuktning (röd), dels vid torkning (svart). vct 0,5 (vänster) respektive 0,4 (höger). [7]



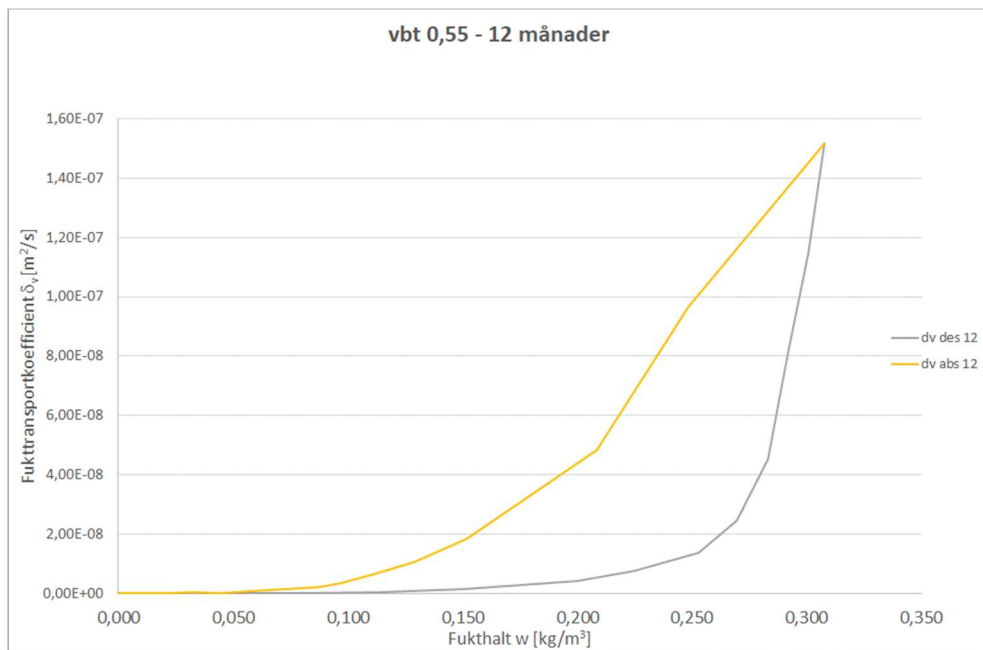
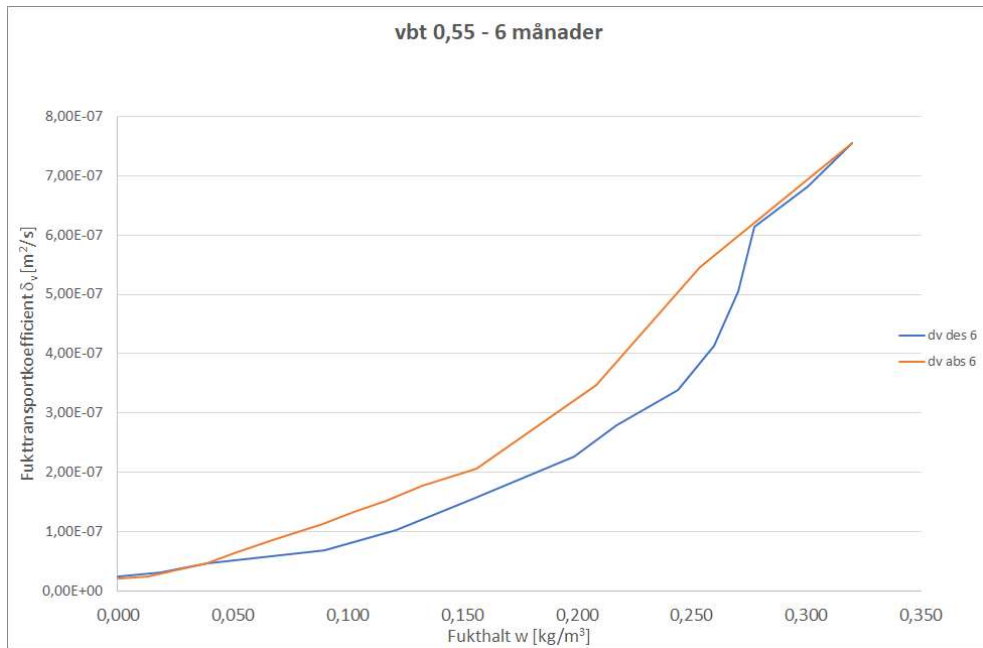
Figur 29: Fukttransportkoefficienten för vct 0,55 som funktion av RF vid absorption respektive desorption [8]



Figur 30: Fuktransportförmågan för betong med Bascement och vct 0,32 uttryckt som funktion av fukthalten, baserat på data från [8]. Övre: vid 6 månaders ålder. Nedre: Vid 12 månaders ålder. Observera även vad som sägs i texten om definitionen av "torr" vid 11%RF.



Figur 31: Fuktransportförmågan för betong med Bascement och vct 0,40 uttryckt som funktion av fukthalten, baserat på data från [8]. Övre: vid 6 månaders ålder. Nedre: Vid 12 månaders ålder. Observera även vad som sägs i texten om definitionen av "torr" vid 11%RF.



Figur 32: Fuktransportförmågan för betong med Bascement och vct 0,55 uttryckt som funktion av fukthalten, baserat på data från [8]. Övre: vid 6 månaders ålder. Nedre: Vid 12 månaders ålder. Observera även vad som sägs i texten om definitionen av "torr" vid 11%RF.

2.6. Modell för transportkoefficienter i denna studie

2.6.1. RF-beroendet – översatt till fukthaltsberoende

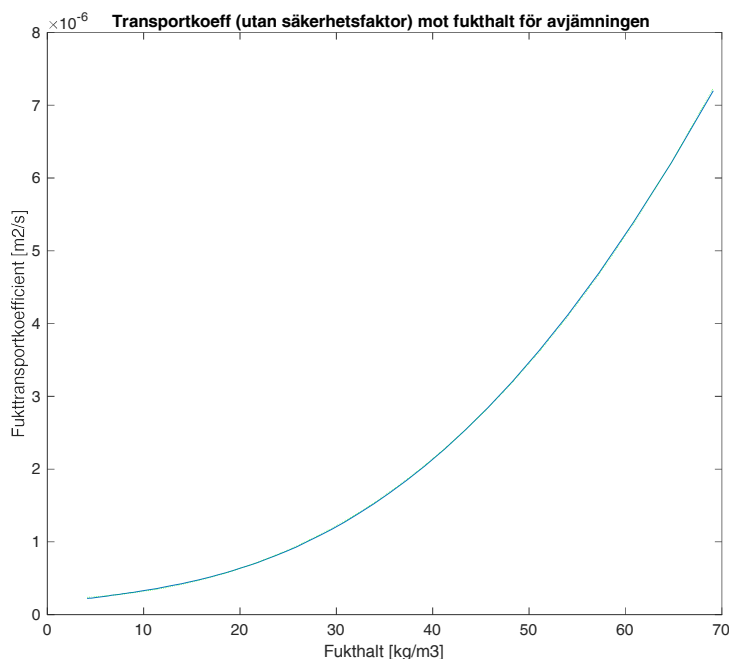
Transportkoefficienterna (vid absorption respektive desorption), uttryckta som funktion av relativa fuktigheten ϕ , beskrivs med följande ekvation

$$\delta_v(\phi) = k \frac{\phi^n}{B-\phi} + p\phi + q \quad (\text{Ekv. 10})$$

Koefficienterna p , q , k , B och n anpassas till kända data i separat procedur (och har naturligtvis inte samma värden som i isotermekvationen (ekv. 4)).

Denna ekvation används endast för att beskriva sambandet mellan RF och fukttransportkoefficient enligt mätningar Stelmarczyk *et al* [8]. Exempel på anpassningar ges i Figur 25-Figur 27.

I beräkningarna kombineras dessa beräknade koefficienter med Stelmarczyks isotermer, för att på så sätt ge ett samband mellan fukthalt och fukttransportkoefficient. Detta samband beskrivs med ett tredjegradspolynom, se Figur 33.



Figur 33: Fukttransportkoefficienten för betong med Bascement, vct 0,55, mot betongens fukthalt. Beräknat ur data för desorption [8]. (Två kurvor: En för mätdata, en för anpassat tredjegradspolynom. Avvikelsen mellan mätdata och beräknade värden enligt anpassad ekvation är inte urskiljbar.)

2.6.2. Hystereseffekter

Transportkoefficienternas hysteres är inte möjlig att hantera på ett välnyanserat sätt för alla material eftersom materialdata i regel saknas. Det är endast för betong med Basement som vi har tillräckliga data. För andra material måste därför någon form av förenklande antagande införas.

I början av projektet skapades olika förenklingar för att kunna hantera även betonger där kompletta data inte finns tillgängliga. Dessa förenklingar medför dock många approximationer, vilka i sin tur skapar osäkerhet i resultaten. Därför begränsades istället projektet till att gälla enbart betong med Basement.

För betong med Basement antogs att fukttransportkoefficienten kan beskrivas som funktion av fukthalten så som framgår av Figur 30 – Figur 33. Rent praktiskt gjordes detta genom att ett tredjegradspolynom anpassades till sambandet mellan fukthalt och fukttransportkoefficient (ur mätdata för RF, fukthalt och fukttransport vid desorption). Testberäkningar med denna version, jämfört med versionen där transportdata för absorptionen verkligen används, redovisas i Bilaga 3, avsnitt 3.2.2. Som framgår där är effekten av skillnaden mellan dessa två olika sätt att beskriva transportkoefficienterna vid scanning liten men märkbar.

2.6.3. Fukttransportkoefficientens åldersberoende

I beräkningsprogrammet har införts en funktion som gör att transport-koefficienten, sådan den rapporterats i [8] vid 6 månader, reduceras rätlinjigt proportionellt mot tiden fram till 12 månader, varefter den är konstant. Reduktionen från 6 till 12 månader motsvarar en faktor 5. Detta är inte en riktigt lika stor reduktion som framgår av data i [8] (som redovisar en sänkning med en faktor 5 för vct 0,55 och en faktor 10 för vct 0,32). Avsikten med att inte reducera mera är att undvika risken att underskatta vilken RF som kan uppstå vid limmet. Funktionen medför även att värdet vid 3 månaders ålder ökar med 40% jämfört med 6-månadersvärdet.

2.7. Säkerhetsfaktorer för fukttransportkoefficienter

De transportkoefficienter som redovisades i föregående stycken är behäftade med viss osäkerhet. Eftersom en underskattad transportkoefficient under omfördelningsfasen resulterar i för låga beräknade maximala RF-värden vid limmet, ökas därför samtliga värden med en säkerhetsfaktor i beräkningarna. Både för Basementbetong och för avjämningsmassa sätts faktorn till 1,2 (20% ökning). (Den något för lilla reduktionen av fukttransportkoefficienterna för vct 0,32 och 0,40 som nämndes i föregående stycke bidrar till att skapa resultat "på säkra sidan".)

Under den föregående fasen, dvs då betongen och avjämningsmassan torkar innan mattan limmats, medför en på detta sätt ökad fukttransportförmåga en överskattning av uttorkningen och därmed en underskattning av risken för höga fukttillstånd vid limmet efter omfördelning. Av detta skäl används två olika säkerhetsfaktorer; en som gäller för tiden fram till limning och en därefter (enligt ovan). För tiden från applicering av avjämningsmassa fram till limning används säkerhetsfaktorn 1,0, dvs data enligt källorna accepteras som de är.

3. Bilaga 3: Några känslighetstest

I detta avsnitt redovisas några undersökningar av hur slutresultaten påverkas av smärre förändringar i data och beräkningsteknik.

3.1. Betongens fukttransportkoefficient

Enligt Stelmarczyk *et al* [8] minskar fukttransportkoefficienten för betong med Bascement mycket kraftigt från 6 månaders ålder till 12; minskningen kan ske med ungefär en faktor 5-10, se Figur 25-Figur 26. Detta innebär att omfördelning i betongen går betydligt långsammare om man räknar med värden vid den högre åldern. Detta minskar risken att fukt från betongen skall kunna orsaka höga fukttillstånd närmast under mattan.

För att pröva effekten av detta genomfördes två beräkningar med exakt samma förutsättningar utom att i den ena användes fukttransportkoefficienter för 6 månader och i den andra dito för 12 månader.

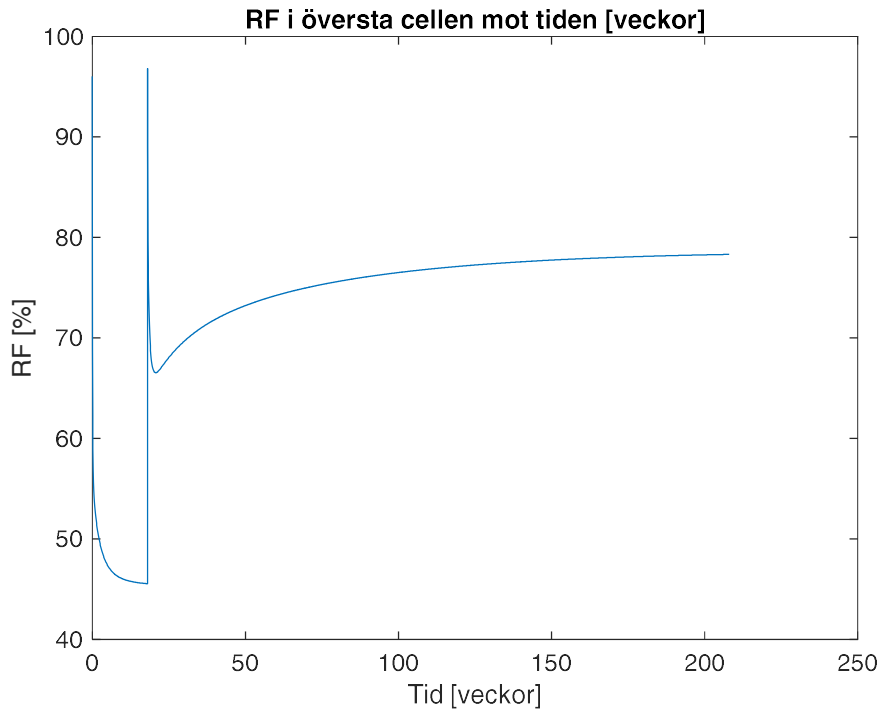
Förutsättningarna var:

Förutsättningar			
Cementtyp	Bascement		
vbt	0,4		
Betongtjocklek	160	mm	
Gjuttid:	sommar		
Torktid till avjämning [v]	18	veckor	
Torkprofil, vid avjämning	PMBas38J16		
Avjämning	Typ 1		
Avjämning tjocklek	30	mm	
Matta, z	3000000	s/m	
Tid för limning	18	veckor efter avjämning	
Limfukt	0,09	kg/m ²	
Klimat efter limning:	45%		
Simulerad tid	208	veckor	

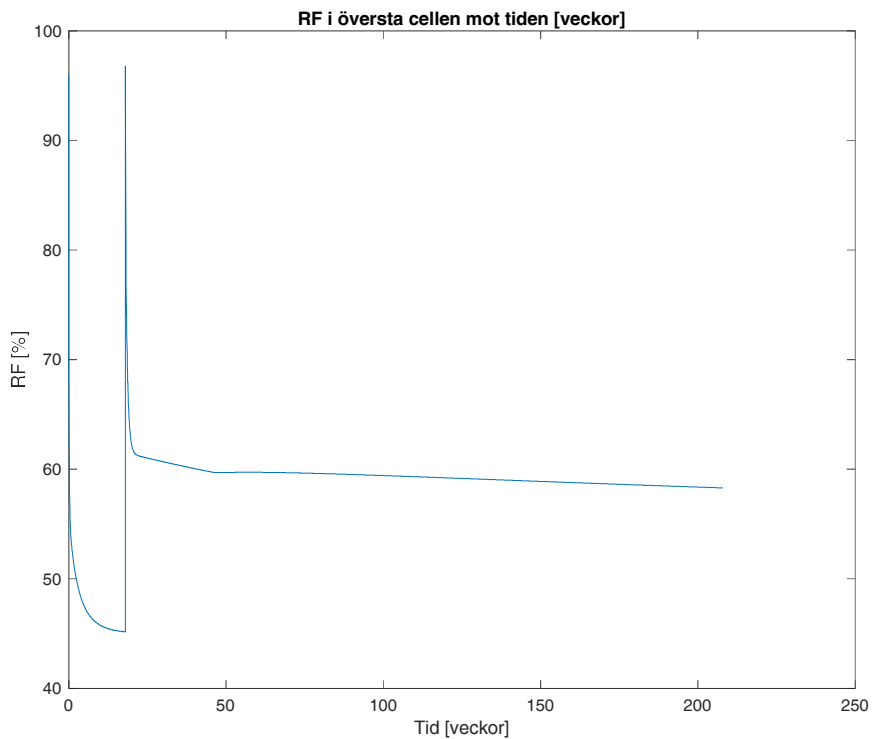
Obs Tiden fram till limning något längre än i övriga beräkningar (18 ist f 12 veckor.) Initialprofilen (kallad torkprofil i tabellen) beräknades med PPB [5].

Resultatet – se Figur 34 och Figur 35 - visar att förändringen i betongens transportkoefficienter har en mycket stor betydelse för slutresultatet!

Som en konsekvens av detta resultat har ett åldersberoende för fukttransportkoefficienterna införts i beräkningsprogrammet, se 2.6.3. För att minimera risken att betongens transportkoefficient underskattas har även en säkerhetskoefficient lagts in, se 2.7 ovan.



Figur 34: Resultat av känslighetstest 1: RF i översta cellen i avjämningsmassan beräknad med betongens fuktransportkoefficienter vid 6-månader. Vct 0,40.



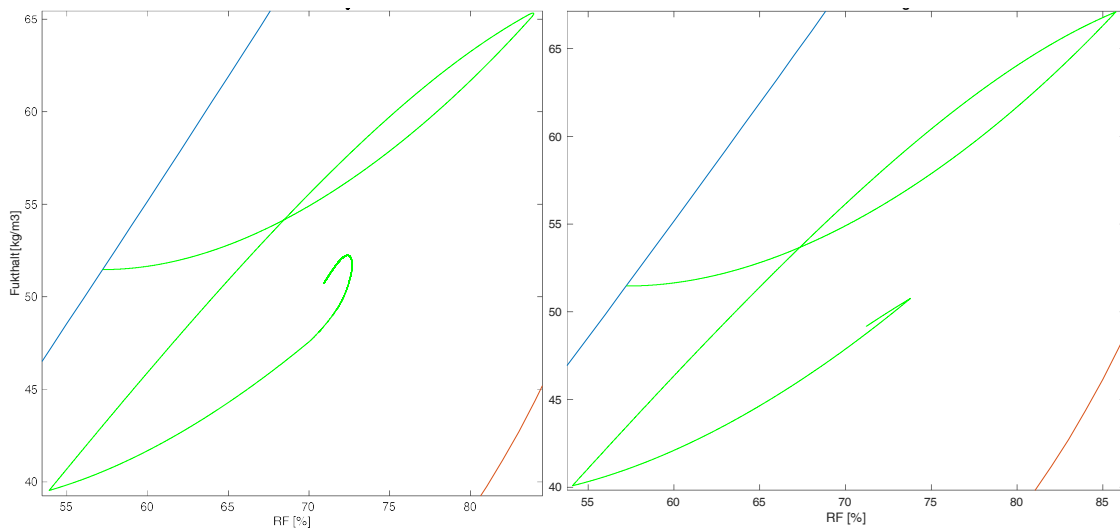
Figur 35: Resultat av känslighetstest 1: RF i översta cellen i avjämningsmassan beräknad med betongens fuktransportkoefficienter vid 12-månader. Vct 0,40.

3.2. Fukttransportkoefficient

Det saknas i många fall materialdata som visar hur fukttransportkoefficienten beror av om materialet håller på att torka eller håller på att fuktas upp. Speciellt saknas uppgifter om transportkoefficientens värden vid scanning. Därför är det intressant att undersöka hur beräkningsresultatet påverkas av olika antaganden om fukttransportkoefficientens variationer.

3.2.1. RF-beroende fukttransportkoefficient

I en första version av beräkningarna användes en teknik där fukttransportkoefficientens värde skiftades beroende på om materialet fuktades upp eller torkades (från värde vid absorption till värde vid desorption, och vice versa). Värdena är tydligt olika, se Figur 25-Figur 27. Vid scanningförlopp medför detta förfarande ständiga abrupta hopp mellan de olika värdena. Dessa hopp misstänktes kunna leda till ett annorlunda scanningförlopp än om beräkningarna utförs med en och samma transportkoefficient oavsett uppfuktning eller torkning. För att testa detta utfördes beräkningar dels med fukttransport för desorption respektive absorption (med data enligt [8]), dels med data enbart för desorption. Resultatet visas i Figur 36. Med varierad koefficient blev i detta fall maximal RF i betongens yta 72,6% och med konstant koefficient (desorption) blev värdet 73,8%. Vilket av dessa som är mest korrekt går inte att avgöra. Det rimliga borde vara att transportkoefficienten skall varieras beroende på hur nära respektive isotherm det aktuella fuktillståndet är (inte hoppa helt över enbart beroende på absorption eller desorption). En sådan förfining tillför dock marginell förbättring av resultatet, särskilt i jämförelse med de skillnader som orsakas av åldersbetingad förändring av transportkoefficienternas nivå.



Figur 37: Exempel på beräknade scanningförlopp. Vänster: Med skiftande transportkoefficient beroende på absorption eller desorption. Höger: Med enbart värdet på transportkoefficient vid desorption.

3.2.2. Fukthaltsberoende fukttransportkoefficient

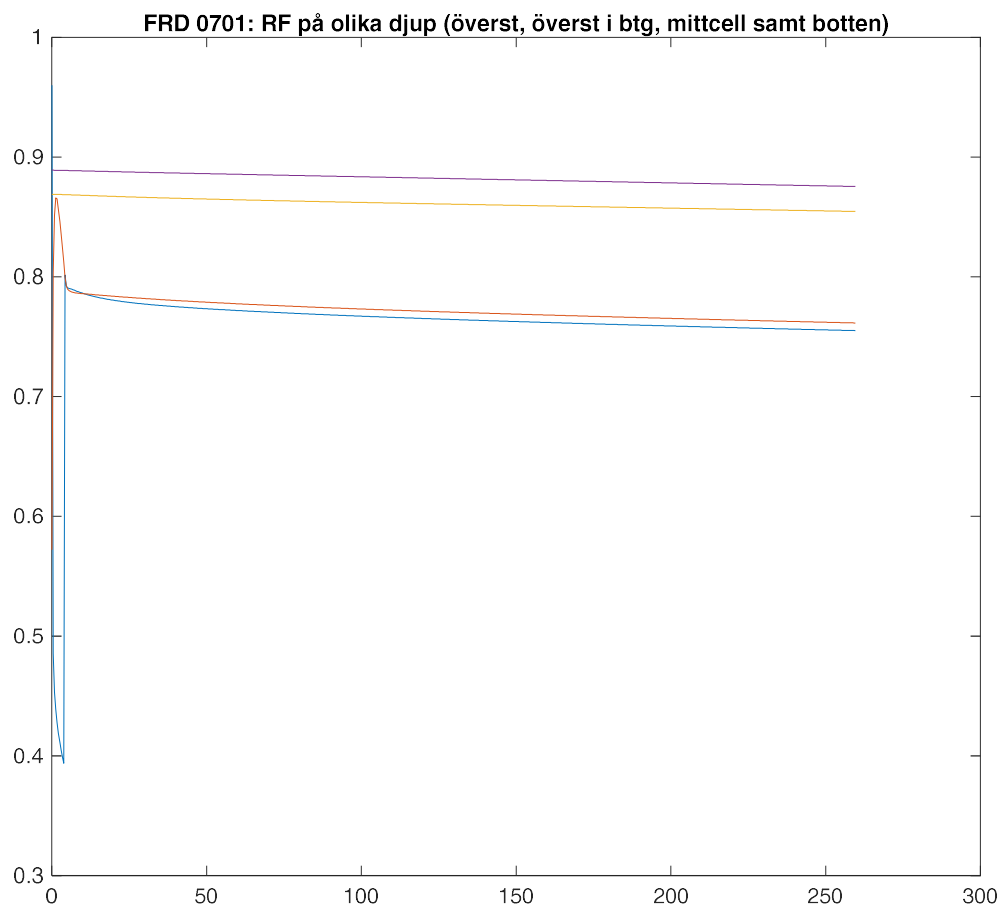
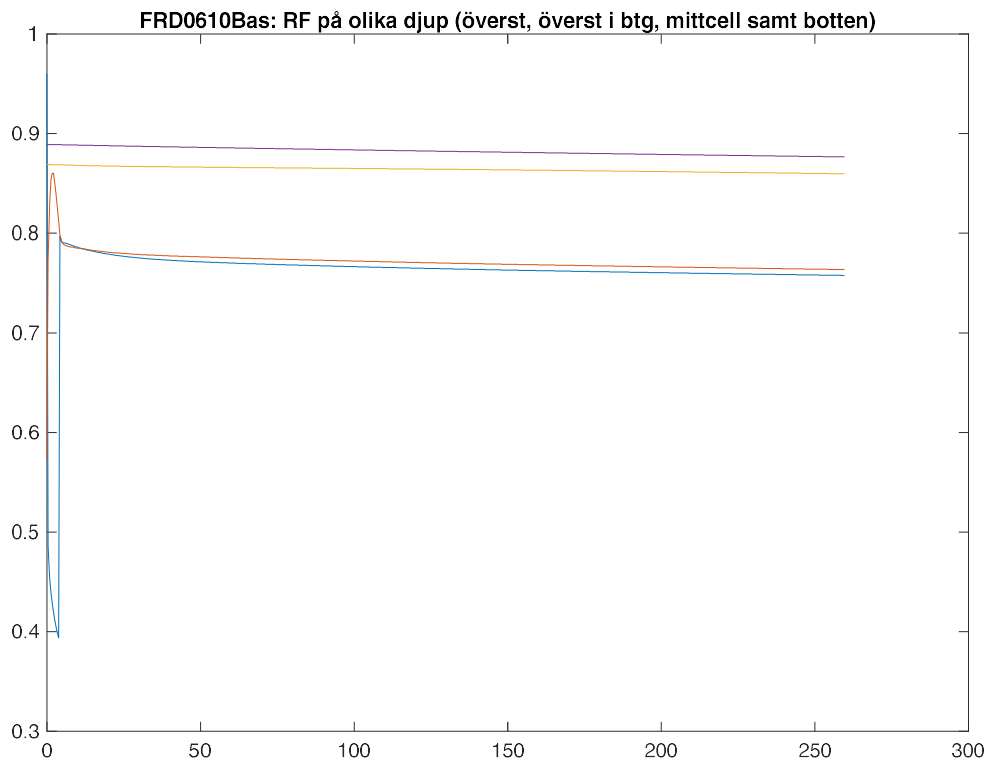
Som visades i Figur 30-Figur 32 finns det rimliga skäl att tro att fukttransportkoefficienten kan beskrivas med utgångspunkt i fukthalten, dvs RF-beroendet enligt Figur 25-Figur 27 skulle inte behöva beskrivas. Detta skulle kunna ge en möjlighet att undvika de ständiga skiftningar mellan värdet vid desorption respektive värdet vid absorption som uppstår under scanning (som i föregående avsnitt).

För att pröva detta gjordes jämförande beräkningar mellan ett fall med RF-beroende fukttransportkoefficient (vilket leder till abrupta, stegvisa förändringar av transportkoefficienten) och ett fall där fukttransportkoefficienten ansattes vara beroende av fukthalt, men inte av huruvida uppfuktning eller torkning pågår.

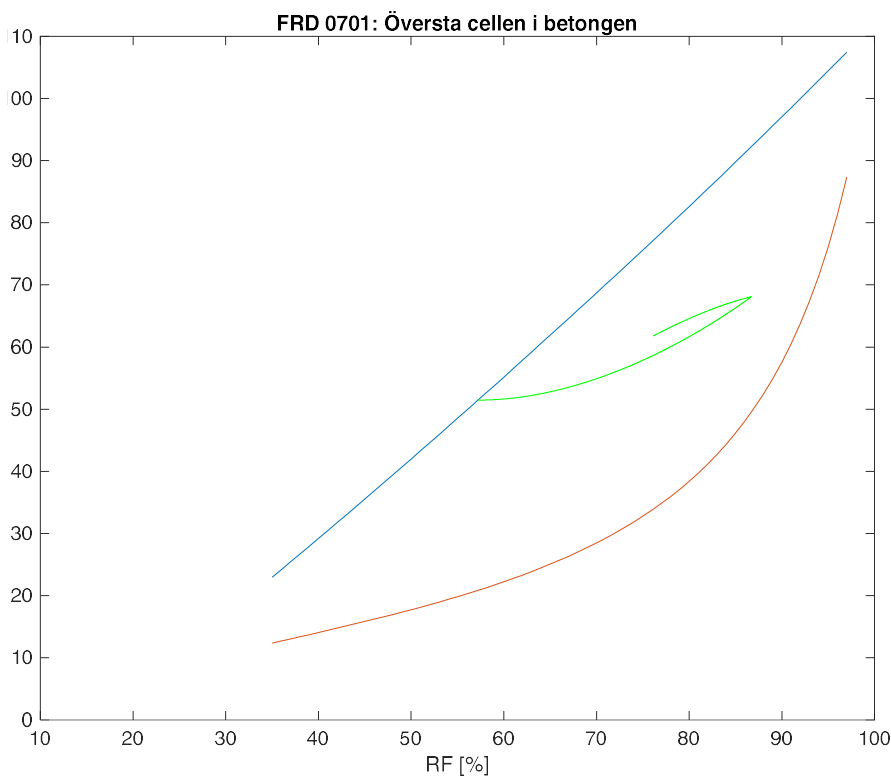
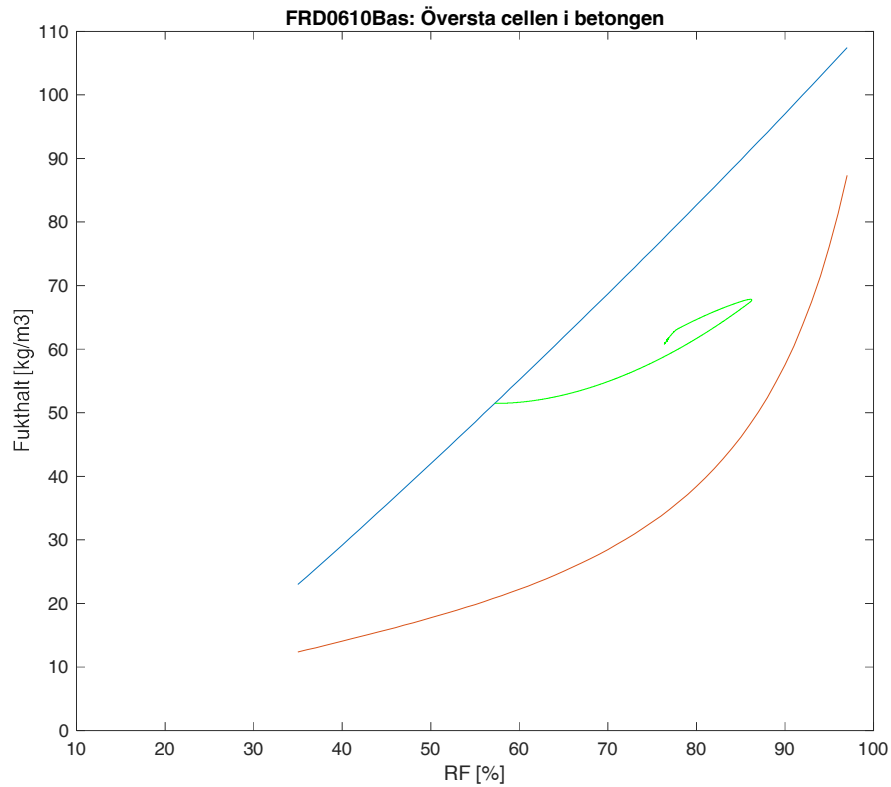
I första beräkningsfallet används 30 mm avjämningsmassa på 160 mm betong med Bascement, vct 0,55. Betongen har härdat och torkat 18 veckor när avjämningsmassan läggs på. Därefter sker ytterligare uttorkning under fyra veckor (mot 18°/35%RF) fram till att matta limmas. Limfukt 90 g/m², mattans z=3.000.000 s/m. Därefter fortsatt ensidig torkning mot 22°/45%RF under totalt 5 år. (Säkerhetsfaktorer för avjämningsmassans och betongens fukttransportkoefficienter sattes i detta fall till 1, dvs ingen modifiering av rapporterade data.)

Resultaten visas i Figur 38-Figur 42. Som framgår av dessa diagram är resultaten så gott som oberoende av vilken variant som används: Maximala värdet vid limmet är 86,3%RF för beräkning med RF-beroende transportkoefficienter och 86,7%RF vid beräkning med fukthaltsberoende transportkoefficient. Även i övrigt är resultaten mycket likartade. Det framgår dock även att scanningförloppet blir distinktare med den fukthaltsberoende fukttransportkoefficienten.

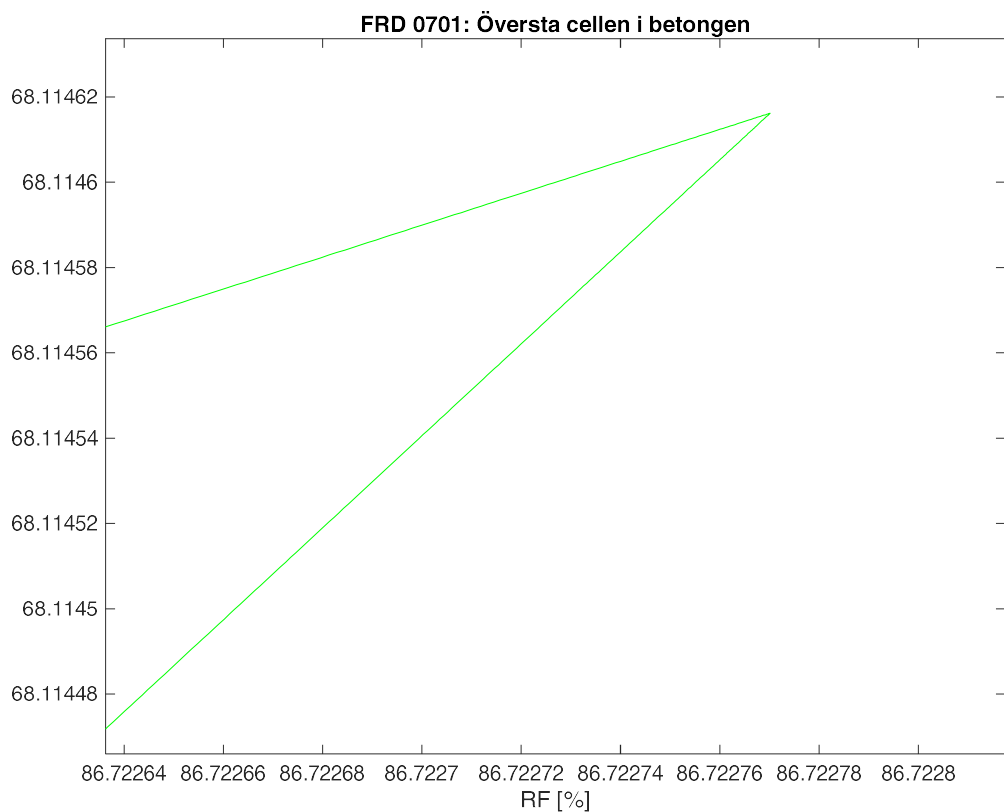
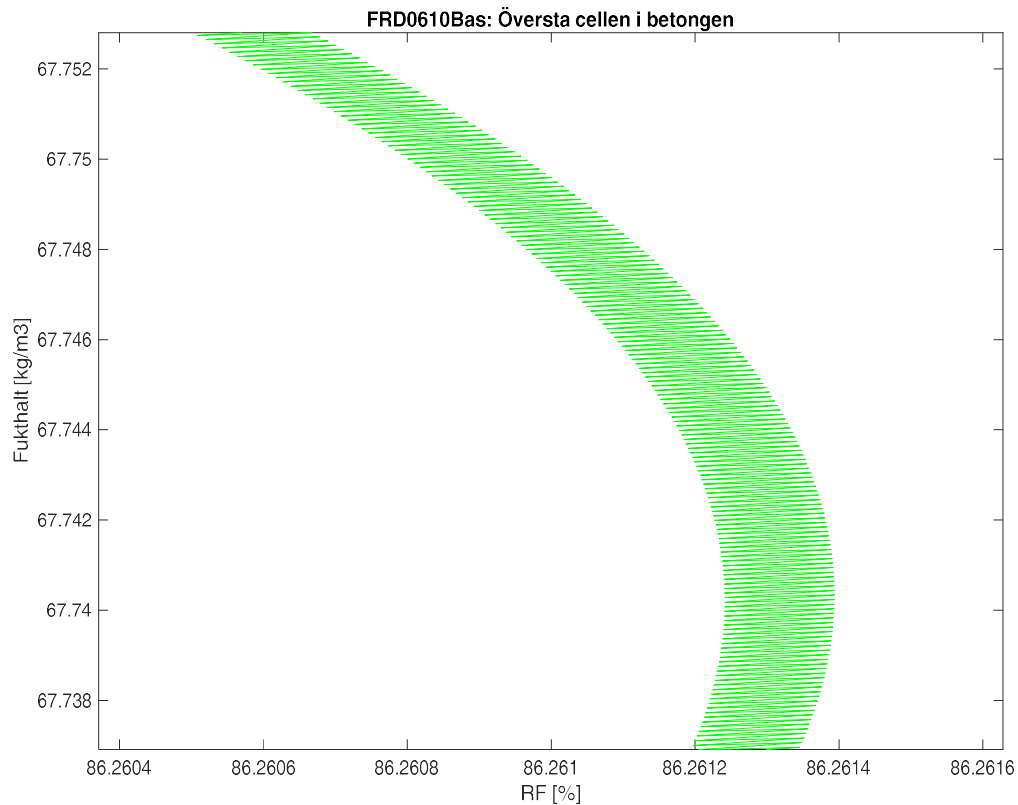
Beräkningsproceduren där fukttransportkoefficienten ansätts vara beroende enbart av fukthalten blev inledningsvis extremt mycket långsammare än då den beskrevs som funktion av RF, med varierande värden beroende på torkning eller uppfuktning. Detta berodde på den interpoleringsfunktion som först användes. För att undvika detta problem beskrivs istället fukttransportkoefficienterna som funktion av fukthalten med ett tredjegradspolynom. Därigenom blir beräkningen lika snabb som i den tidigare versionen med olika transportkoefficienter beroende på absorption eller desorption.



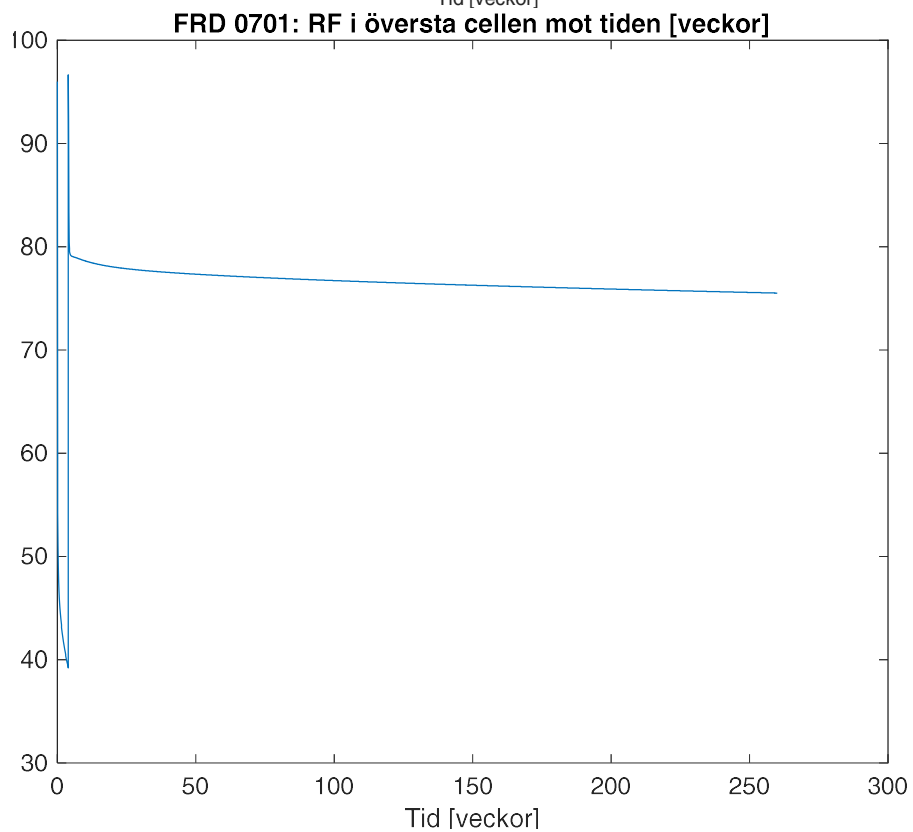
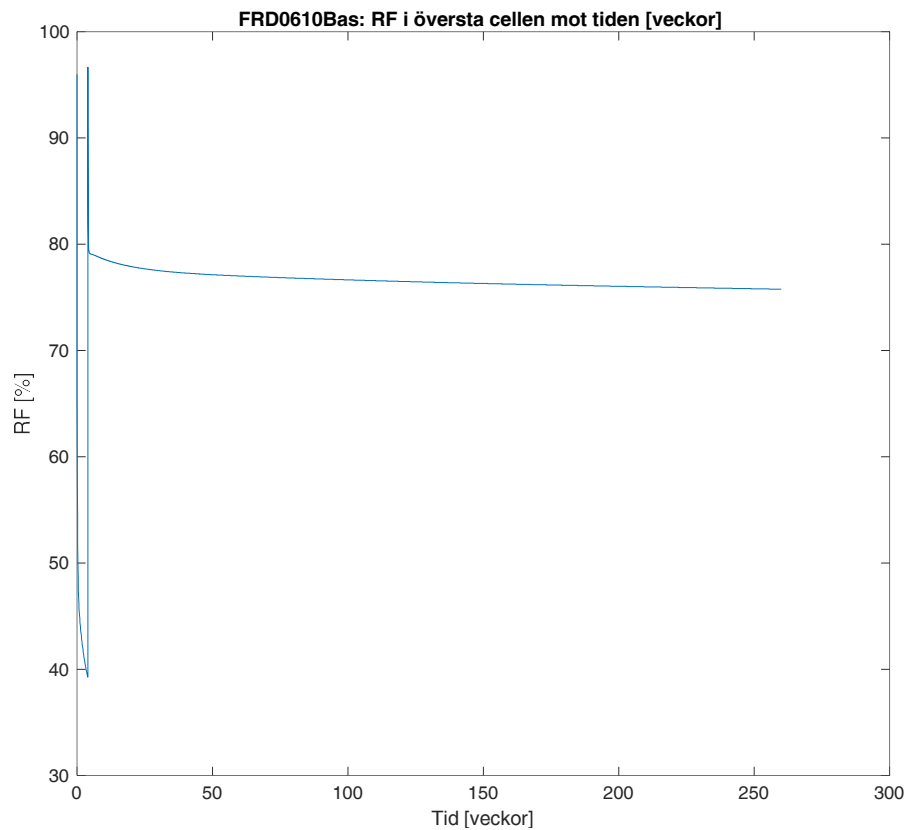
Figur 38: Övre: Beräkning med förloppsberoende fukttransportkoefficienter. Nedre: Beräkning med fukttransportkoefficient enbart beroende av fukthalt. Utveckling av RF på fyra olika djup i konstruktionen. Mycket likartade resultat.



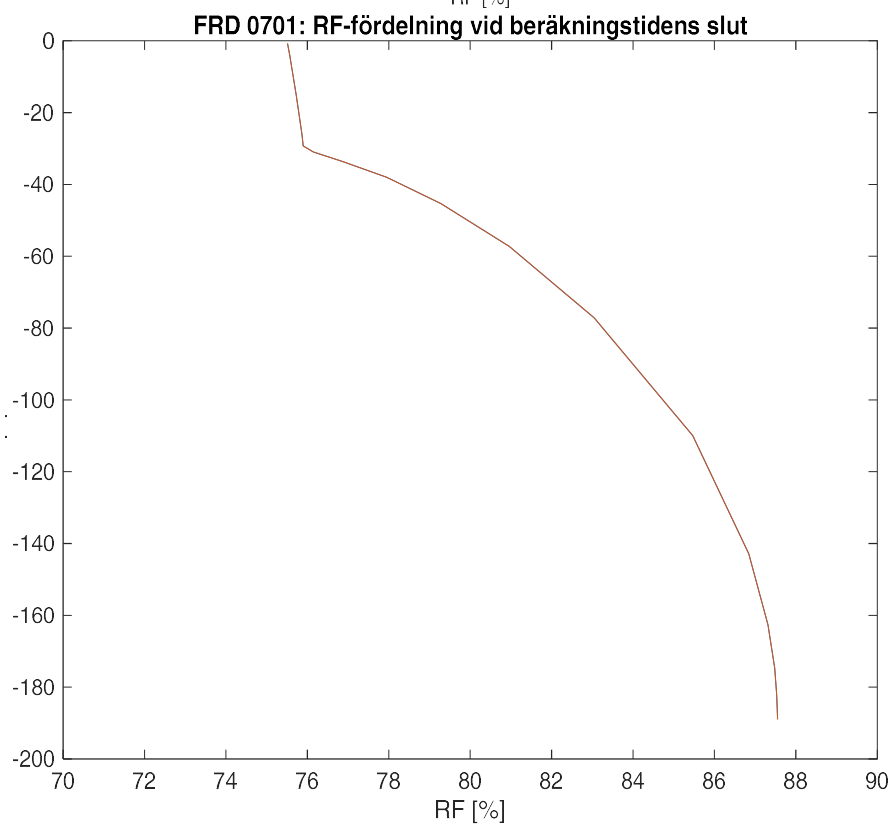
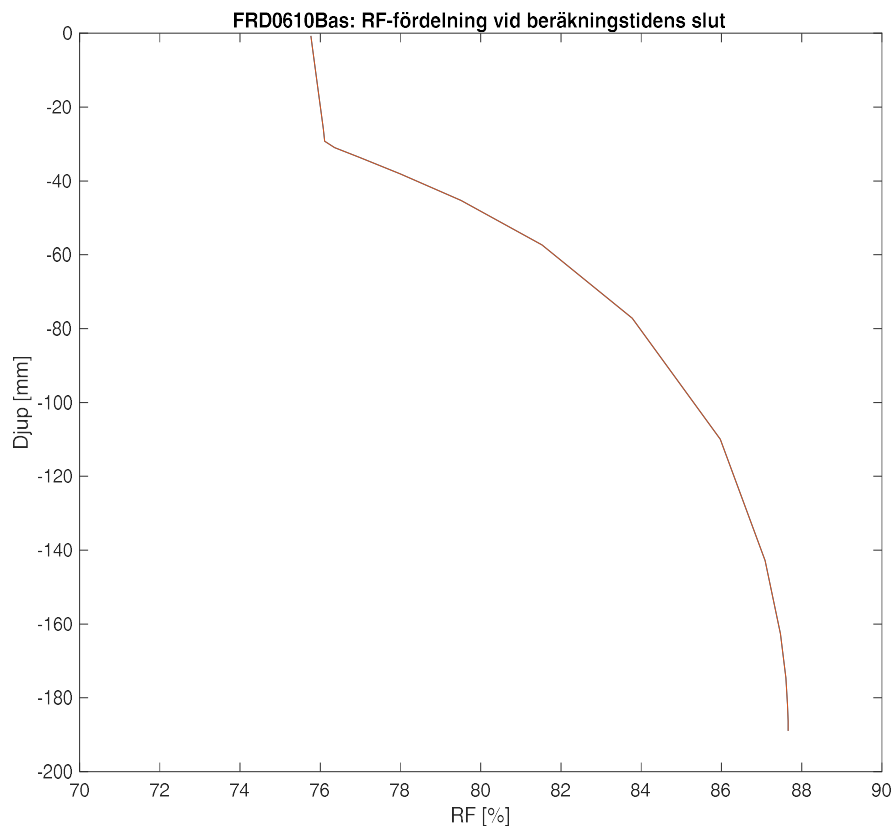
*Figur 39: Scanningförlopp i betongens översta beräkningscell.
 Övre: Beräkning med RF-beroende fukttransportkoefficienter.
 Nedre: Beräkning med fukttransportkoefficient enbart beroende av fukthalt.
 Mycket likartade resultat, men ändå något diffusare i övre fallet, se nästa figur.*



Figur 40 (övre och nedre): Delförstoringar av ungefär samma områden (där scanningen övergår från absorption- till desorptionscanning) i föregående diagram: Övre diagrammet visar hur transporten växlar riktning till följd av att fuktransportkoefficienten varierar kraftigt mellan absorption och desorption. Det nedre, där transportkoefficienten enbart bestäms av fukthalten, ger distinktare resultat. Observera skalorna!



Figur 41: Övre: Beräkning med RF-beroende fukttransportkoefficienter. Nedre: Beräkning med fukttransportkoefficient enbart beroende av fukthalt. RF i översta cellen (avjämningen) mot tiden. Sgs identiska resultat.



Figur 42: RF-fördelning vid beräkningens slut (5 år). Övre: Beräkning med RF-beroende fuktransportkoefficienter. Nedre: Beräkning med fuktransportkoefficient enbart beroende av fukthalt. Likartade resultat, men den nedre figuren ger någon procentenhet lägre RF som slutvärde.

3.3. Tidsteget

De numeriska beräkningarna görs med explicita framåtdifferenser. För att erhålla lyckade resultat krävs att tidsteget är tillräckligt kort i förhållande till cellernas fuktkapacitet och fukthaltsändringar. Explicita framåtdifferenser har dock fördelen att om tidssteget väljs för stort så havererar hela beräkningen. Ett lyckat beräkningsresultat visar således att tidssteget varit ok och de beräknade värdena är riktiga. (I en implicit metod kan lyckade resultat erhållas med större tidssteg, och i princip med alla tidssteg, men resultaten kan variera beroende på vilket tidssteg som används.)

Trots detta har ett känslighetstest utförts där maximala tidssteget varierades mellan 600 respektive 7200 sekunder. Detta gav som väntat ingen skillnad i resultat. Huvudberäkningarna har därför utförts med maximala tidssteg upp till ca 7200 sekunder (något varierande mellan de olika beräkningarna).

För att kunna hantera de abrupta effekterna som fås av tvära förändringar i RF-profilen just i förloppets början (då våt avjämningsmassa läggs på torkad betong) och då limfukt tillförs, används en procedur där tidssteget ökas allteftersom; det börjar med ett värde i storleksordningen 1-60 s vid förloppets början, ökas fram till limning, och startar där om med ett lågt värde för att sedan återigen ökas tills det maximalt tillåtna tidsteget nås, och sedan hålls detta konstant under resten av beräkningen.

3.4. Scanningfunktionen

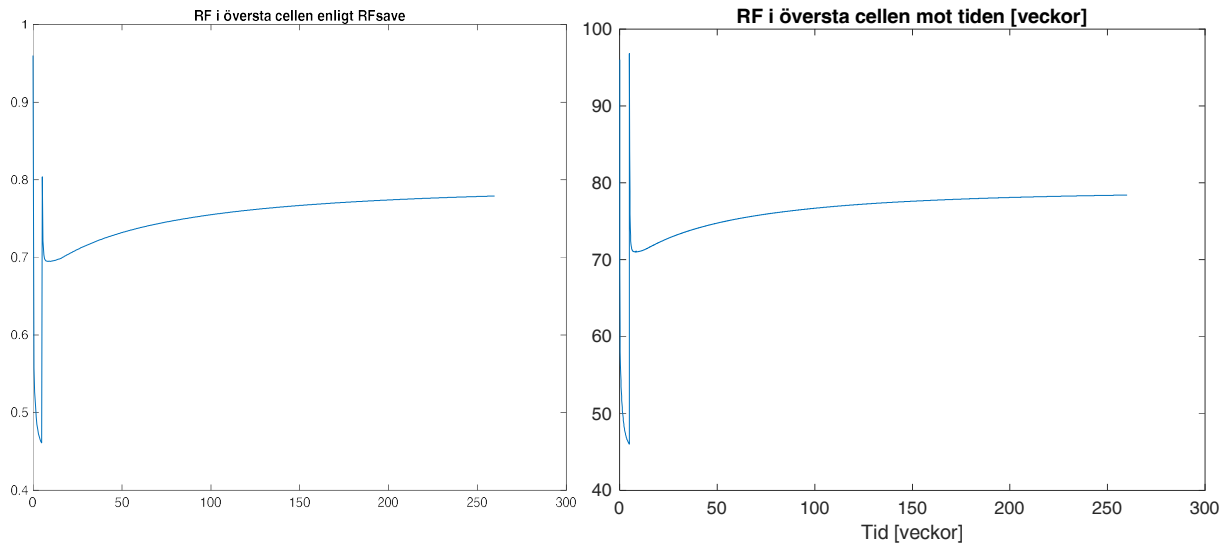
I beräkningarna tas hänsyn till att vid skifte från torkning till uppfuktning följer fuktillståndet (kombinationen av RF och fukthalt) en scanningisoterm som löper mellan desorptions- och absorptionsisotermen. Den exakta formen på scanningisotermen är okänd, men en enkel representation har införts i beräkningsprogrammet, se ovan.

Denna "enkla" funktion kan påverka beräkningsresultaten. För att testa detta genomfördes några identiska beräkningar där det enda som varierades var exponenten i ekvationerna 5-8. Resultaten visas i följande figurer.

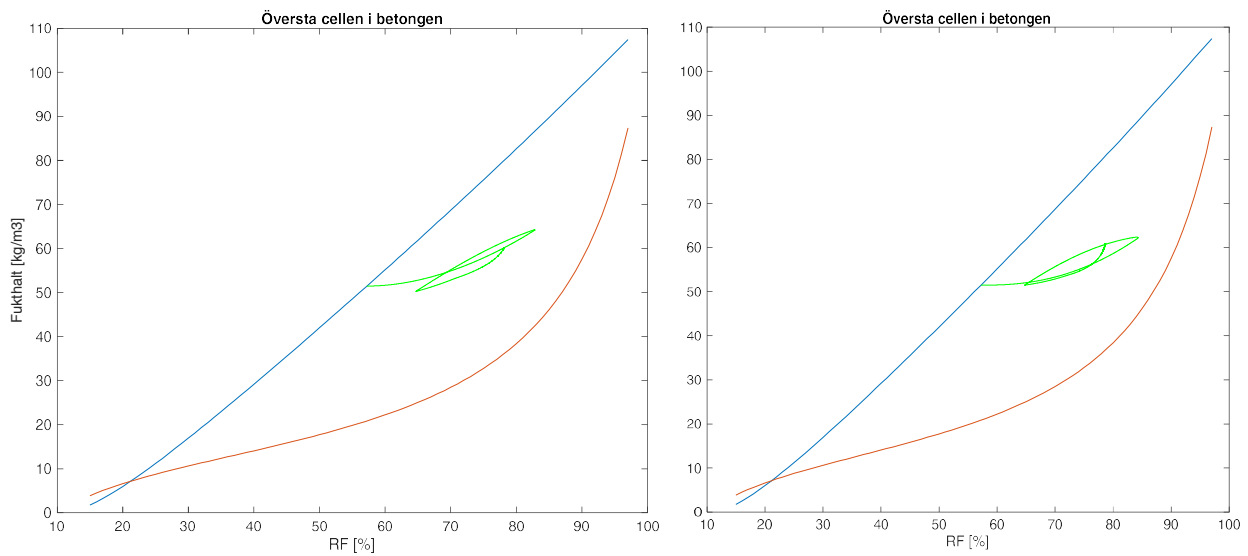
Beräkningen utfördes för ett fall enligt följande: 160 mm betong, Bascement, vct 0,55, härdad/torkad 18 veckor enligt PPB-förutsättningar [5], 20 mm avjämningsmassa, fortsatt torkning mot 45%RF 5 veckor, matta $z=5.000.000$ s/m, 260 veckors beräkningstid.

I normalfallet används exponent=1. Figurerna nedan visar att skillnaden mellan exponentvärdet 1 respektive 1,5 ger 77,9 respektive 78,4%RF, dvs 0,5%-enheter i skillnad i slutlig RF. Om exponenten minskas till 0,75 blir slut-RF i avjämnings yta 77,3%. Olikheten i exponentvärde ger en större effekt på det maximala RF-värde som uppstår i samband med limning av mattan. Som framgår av figurerna skiljer det ca 17%RF. Varaktigheten av dessa värden är dock mycket kort.

I huvudberäkningarna har exponenten satts till 1.



Figur 43: Utveckling av RF i avjämningsmassans översta cell (1,5 mm):
 Vänster: Exponent=1, slutvärde: 77,9%. Höger: Exponent=1.5, slutvärde: 78,4%.



Figur 44: Samma beräkning som i föregående diagram, men resultat för betongens översta cell (2 mm). Vänster: Exponent=1. Höger: Exponent=1.5.

4. Bilaga 4: Inledande, förenklade beräkningsfall

I detta avsnitt redovisas beräkningar som gjordes i ett tidigt skede för att "gaffla in" svårigheter i beräkningsförfarandet. Dessa resultat har enbart tjänat som underlag för utformning av beräkningsmetodik och det slutliga angreppssättet.

För att kunna skapa en förenklad metodik krävs ett tillvägagångssätt som inte bygger på detaljerad kännedom om hela fuktprofilen i betong och avjämningsmassa. Metodiken måste snarare utgå från att man har få mätvärden (1-3 st), och den måste bygga på *antaganden* som gör att bedömningen med säkerhet hamnar på "säkra sidan". Beräkningarna i detta avsnitt görs därför utifrån mycket grovt förenklade fuktprofiler. De är dock sådana att de överskattar fukttinnehållet och transportmöjligheterna och ger därmed med nödvändighet resultat på säkra sidan.

4.1. Test 1

Detta test är ett extremfall och är enbart en första orientering.

Betong med egenskaper ungefär som Bascementbetong, vct 0,55 enligt Stelmarczyk *et al* [8], 160 mm tjock, fuktegenskaper som för en 20 veckor gammal betong. RF 91% tvärs igenom betongen (detta är ett extremfall!)

Avjämningsmassa liknande Weber 140/110, 50% RF tvärs igenom vid limningstillfället.

Limfukt 90 g/m². Temperatur 20°C och RF 45% i rummet ovanför. För både avjämningsmassan och betongen används säkerhetsfaktorn 1,2 efter limningen.

Ensidig torkning. 5 års beräkningstest.

Hur tjock avjämningsmassa behövs för att undvika RF>85% vid limmet för

- fall 1: $z_{matta}=3.000.000$ s/m?
- fall 2: $z_{matta} = 10.000.000$ s/m?

Resultat:

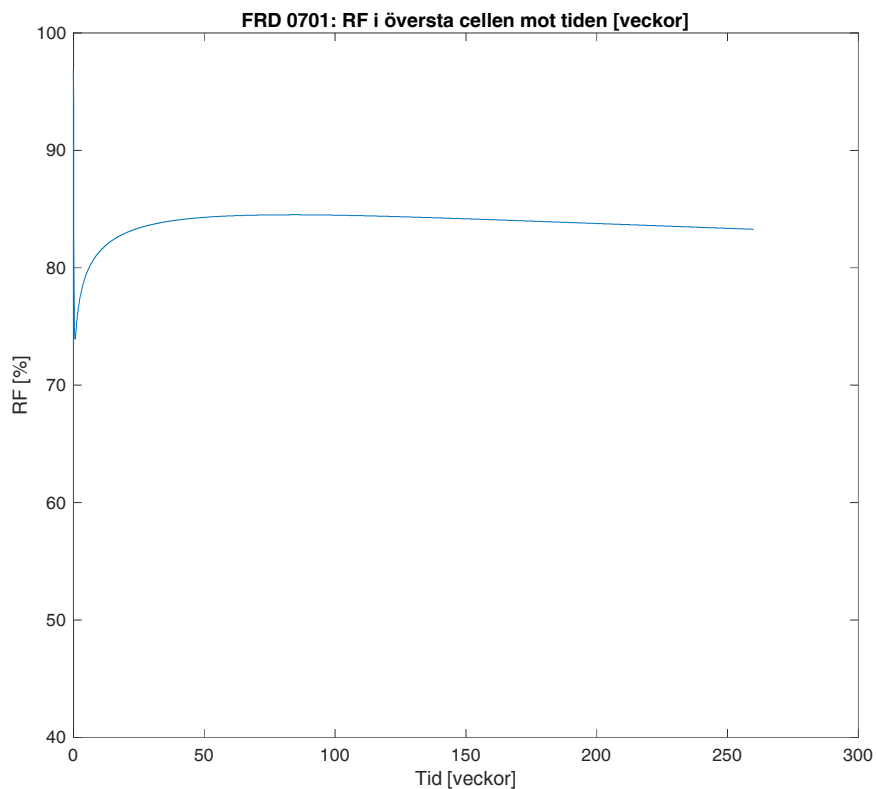
Fall 1 ($z_{matta}=3.000.000$):

- Avjämningsmassa 10 mm: max RF vid limmet: 86% (vid ca 48 veckor, över 85% från vecka 14 till 150)
- Avjämningsmassa 15 mm: max RF vid limmet: 84,5% (vid ca 85 veckor)

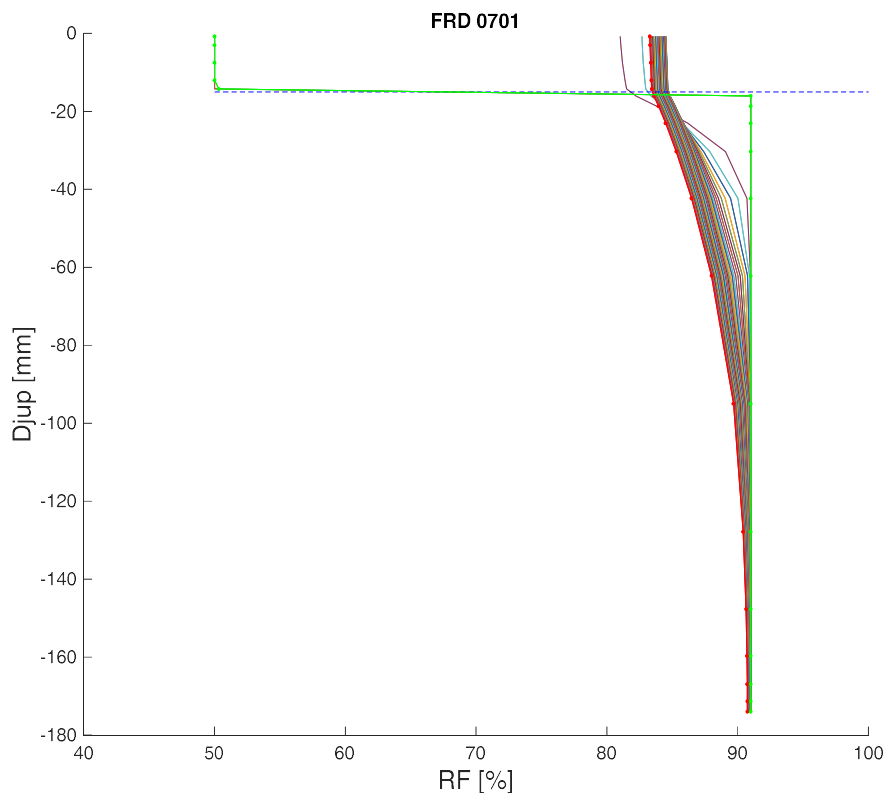
Fall 2 ($z_{matta}=10.000.000$):

- Avjämningsmassa 10 mm: Detta fall behöver inte räknas eftersom Test 1 visade att det inte fungerade med $z=3.000.000$ s/m.
- Avjämningsmassa 15 mm: Max RF ca 87% (efter 5 år), över 85%RF från vecka 35 och framåt (hinner inte börja avta under de 5 år beräkningen avser).
- Avjämningsmassa 25 mm: Max RF ca 86% (vid 10 år), över 85%RF från vecka 160 och framåt (hinner inte börja avta under de 10 år beräkningen avser).
- Avjämningsmassa 35 mm: Max RF ca 85,0 % (vid 713 veckor, dvs 13,7 år), på 85%RF från vecka 632 till 772).

Kommentar till Test 1: Antagandet att RF är 91% ända upp i betongens yta medför att resultaten är rejält på säkra sidan eftersom den under verkliga omständigheter betydligt torrare yt nära delen av betongen medför ett betydligt kraftigare motstånd mot fukttransport från betongen till avjämningsmassan. Den extremt täta mattan med $z=10.000.000$ kräver ca >35mm avjämningsmassa.



Figur 45: Resultat av Test 1, $z_{matta}=3.000.000$, 15 mm avjämningsmassa, RF i översta skiktet (1,5 mm) av avjämningsmassan. Maximal RF under omfördelningsförloppet: 84,5% (förutom den "spik" som uppstår i samband med limningen.)



Figur 46: Test 1, 15 mm avjämningsmassa: Fuktprofiler ritade ungefär var 9:e vecka. Grön linje (med prickar) visar RF vid tiden precis före limning (dvs den i detta fall antagna startprofilen).

4.2. Test 2

Detta är en vidareutveckling av det extremt renodlade Test 1: Det har rapporterats att mätvärdet på ekvivalent djup ofta är ca 88%RF vid den tid då man hade förväntat sig 85%. Orsaken till detta, eller ens sanningshalten i detta, är inte känd. Det ger dock en intressant utgångspunkt för viss nyansering av beräkningar liknande Test 1:

Antag att RF-profilen i betongen är 88% från dess yta och ned till 40% av djupet (det vanliga mätdjupet), och att RF därunder är 91% (en rimlig självuttorkning). Det antags alltså att RF gör ett abrupt steg från 88 till 91% vid 40% av djupet. Syftet med detta är att med säkerhet få resultat "på säkra sidan".

Antag vidare att avjämningsmassan håller 65%RF tvärs igenom den dag limning görs.

Hur tjock avjämning behövs för att undvika RF>85% för

- fall 1; mattans $z=3.000.000$,
- fall 2; mattans $z=10.000.000$,
- fall 3; mattans $z=700.000$ s/m?

(I övrigt samma förutsättningar som i Test 1.)

Fall 1: $Z_{matta}=3.000.000$:

- 10 mm avjämning (Avjämningsmassan är alltför dåligt torkad för att limfukten skall få plats i översta beräkningscellen. Beräkningarna justeras så att översta cellen är 2 mm istället för 1,5 mm.) RF vid limmet överstiger 85% från vecka 11 till vecka 43, och når som högst 85,1 vid 23 veckor. Se Figur 48.
- 20 mm avjämning: Maximal RF vid limmet: 82,9 (förutom spiken omedelbart efter limning)

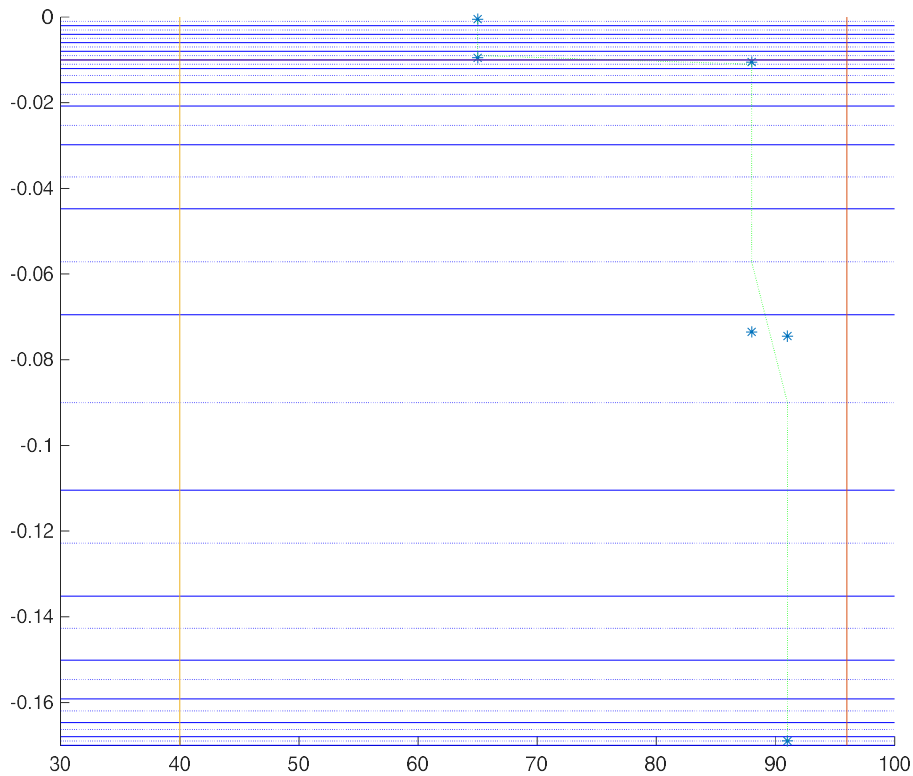
Fall 2: $Z_{matta}=10.000.000$

- 20 mm avjämning: RF vid limmet överskrider 85% från v.94 och når som mest 86,1% (efter cirka 417 veckor).
- 30 mm avjämning: RF vid limmet överstiger 85% fr.o.m. v 294 (5,6 år) och ökar oavbrutet fram till 10 år då den når 85,3% (fortfarande ökande).
- 40 mm avjämning: RF når max 84,7 (efter 720 veckor, därefter avtagande)

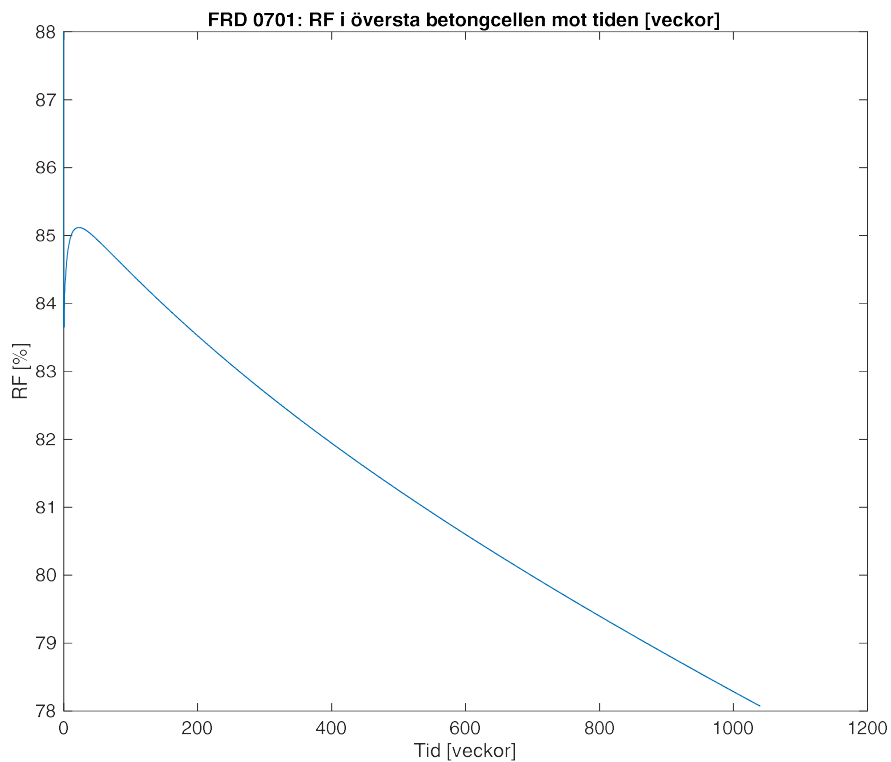
Fall 3; mattans $z=700.000$ s/m

- 10 mm avjämning: max 82,6%, vid limmet, efter 3-4 veckor (förutom första "spiken" av limmet som stannar över 85% mindre än ett dygn)

Kommentar till Test 2: Med den extremt täta mattan ($z=10.000.000$) krävs ca 40 mm avjämningsmassa för att undvika RF>85% med de antaganden som gällde för fuktprofil och säkerhetsfaktorer på materialens fukttransportkoefficienter. Liksom tidigare (Fall 1) innebär den antagna startfuktprofilen att fukttransporten sker snabbare än vad som kan bli fallet i verkligheten, dvs beräkningarna överskattar den maximala RF vid limmet. Med den öppna mattan ($z=700.000$) räcker det med 10 mm avjämning (och egentligen ännu mindre).



Figur 47: Initial fuktfördelning för Test 2, fall 1A. Stjärnprickar visar angivna data, grön streckad linje visar programmets interpolerade värden. Y-axeln anger djupet under avjämnings yta. X-axeln visar RF [%]. Heldragna blå linjer visar cellgränser, streckade blå linjer visar position för cellcentra.



Figur 48: Test 2, fall 1A (10 mm avjämningsmassa): RF i översta beräkningscellen når maximalt 85,1% och överskrider 85% från v 11 till 43. Obs 20 års beräkningstid!

4.3. Test 3

Det är orimligt att, som i föregående tester, ha en helt rak fuktprofil ned genom dels avjämningen, dels betongen. Som en grov approximation ansätts istället att RF vid avjämnings yta är 60% och att dess RF ökar med 0,5%/mm ned genom avjämnings ytan. I betongens yta ansätts samma värde som i avjämnings ytan och vid 40% av djupet ansätts 88%RF, med rätlinjig fördelning mellan dessa punkter. Därunder görs en abrupt ökning till 91% som sedan gäller ned genom hela betongen.

I övrigt samma förutsättningar som i Test 1 och Test 2. (I detta test ökas antal celler i betongen till 21 för att startprofilen skall bli som önskat.)

Fall 1: 10 mm avj., $Z_{matta}=700.000$: RF<85% efter några timmar och framåt

Fall 2: 10 mm avj., $Z_{matta}=3.000.000$: RF<85% efter några timmar och framåt

Fall 3: 10 mm avj., $Z_{matta}=10.000.000$: RF<85% efter några timmar och framåt (max 83,1% efter 671 veckor)

Fall 4: 20 mm avj., $Z_{matta}=700.000$: (behöver inte räknas)

Fall 5: 20 mm avj., $Z_{matta}=3.000.000$: (behöver inte räknas)

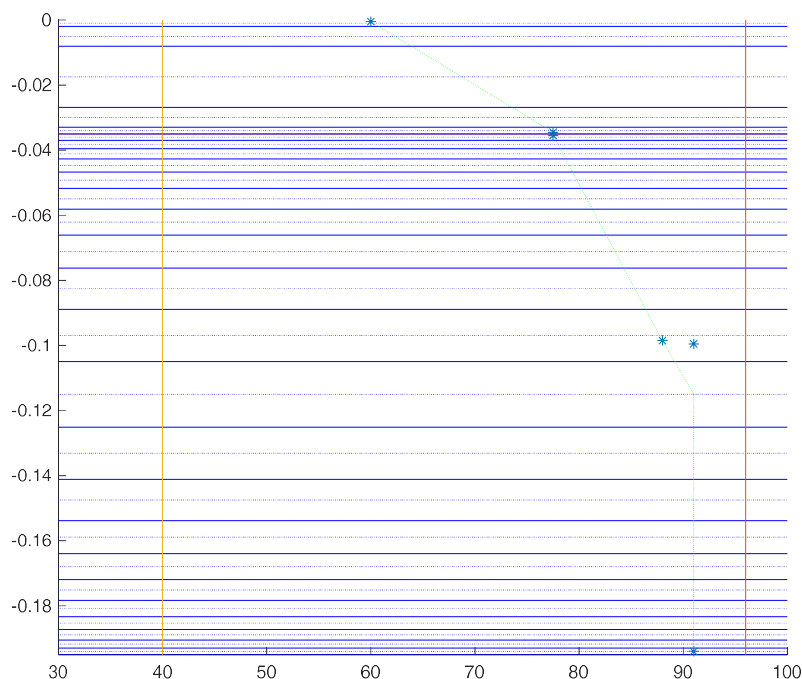
Fall 6: 20 mm avj., $Z_{matta}=10.000.000$: RF<85% efter några timmar och framåt (max 83% efter 760 veckor)

Fall 7: 35 mm avj., $Z_{matta}=700.000$: (behöver inte räknas)

Fall 8: 35 mm avj., $Z_{matta}=3.000.000$: (behöver inte räknas)

Fall 9: 35 mm avj., $Z_{matta}=10.000.000$: max 83,5%RF (efter 781 veckor)

Kommentar till test 3: Samtliga fall visar godkänt resultat. Den ansatta startfuktprofilen med rät linje från gränsen mellan avjämning och betong ned till traditionella mätdjupet ger dock en lite för "snäll" fördelning (dvs något torrare betong än vad den verkliga profilen visar), och dessutom medför den interpolering som beräkningsprogrammet gör av data mellan angivna indata att profilen blir lite för "snäll" även vid mätdjupet, se Figur 49. För att förbättra detta genomförs Test 4.



Figur 49: Ansatt startfuktprofil (vid limning) för Test 3, fall 9.

4.4. Test 4

RF vid avjämningens yta sätts till 60% och ökar sedan med 0,5%RF/mm ned genom avjämningen. I betongens yta ansätts samma RF som i underkant av avjämningen. Vid 40% av betongtjockleken ansätts 90%RF. För större djup ansätts 91%. Mellan betongens yta och traditionella mätdjupet ansätts en något krökt kurva så att RF vid djupet 15 mm är värdet vid gränsen avjämning-betong ökat med två tredjedelar av skillnaden mellan 90 och detta värde. Visst stöd för en sådan kurvform finns i Bilaga 6, Figur 58-Figur 59. Se exempel i Figur 50.

Med dessa förutsättningar genomförs följande beräkningar:

Fall 1: 10 mm avj., $Z_{matta}=700.000$: (behöver ej räknas)

Fall 2: 10 mm avj., $Z_{matta}=3.000.000$: (behöver ej räknas)

Fall 3: 10 mm avj., $Z_{matta}=10.000.000$: Max RF=85,0%, råder ca v. 400-600.

Fall 4: 20 mm avj., $Z_{matta}=700.000$: (behöver ej räknas)

Fall 5: 20 mm avj., $Z_{matta}=3.000.000$: (behöver ej räknas)

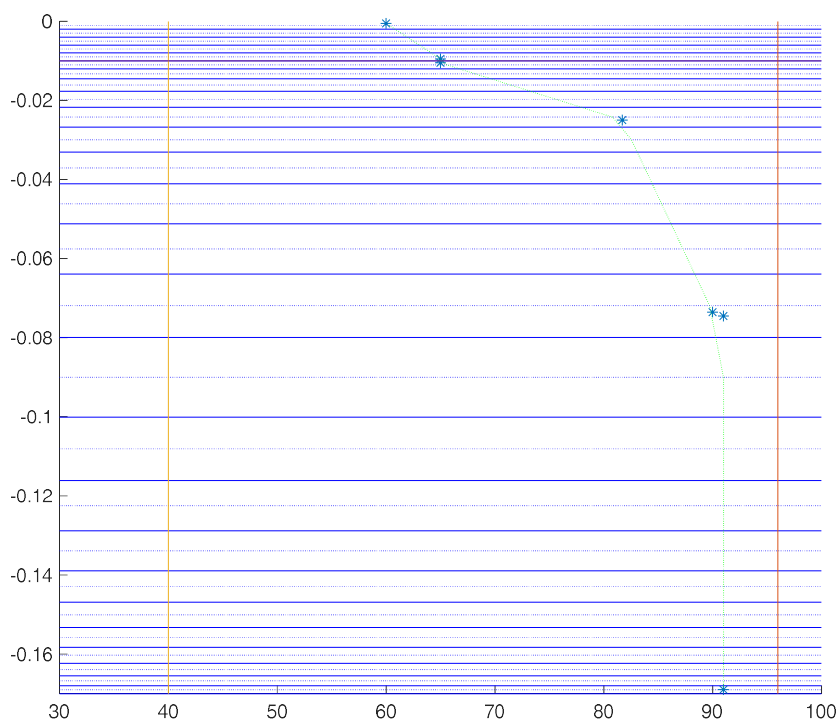
Fall 6: 20 mm avj., $Z_{matta}=10.000.000$: max RF=84,6% (vid 610 veckor)

Fall 7: 35 mm avj., $Z_{matta}=700.000$: (behöver ej räknas)

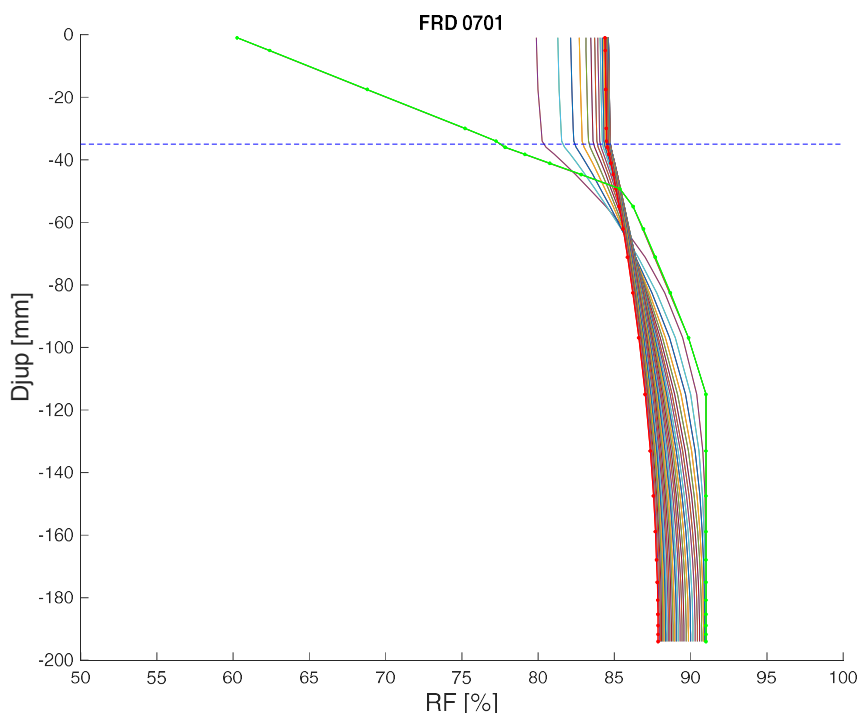
Fall 8: 35 mm avj., $Z_{matta}=3.000.000$: (behöver ej räknas)

Fall 9: 35 mm avj., $Z_{matta}=10.000.000$: max RF=84,6 (vid 690 veckor)

Kommentar (till test 4): Samtliga ger $RF \leq 85\%$ vid limmet.



Figur 50: Ansatt startfuktprofil (vid limning) för test 4, fall 1-3.



Figur 51: Fuktprofiler för Test 4, fall 9: vid limning (grön linje med prickar) och vidare fram till tiden 20 år (röd linje med prickar).

4.5. Test 5

Risken för hög RF vid mattlimmet minskar om de översta delarna av betongen har hunnit torka så att fuktransporten försvåras tillräckligt mycket. Kan man visa att det är "tillräckligt" torrt i en tillräckligt tjock zon nära betongytan samt att avjämningsmassan har hunnit torka tillräckligt väl, så är det kanske möjligt att göra en bra bedömning av risken för hög RF vid limmet. Detta betyder att en förenklad metodik skulle kunna bygga på att man mäter mycket närmare betongytan än normalt (dvs mindre djupt).

Av praktiska skäl är det grundaste möjliga mätdjupet 32 mm. I detta test ansätts att RF minskar linjärt från detta djup och upp till det värde som gäller i underkant av avjämningsmassan, och att värdet djupare än 32 mm är 91% (pga självuttorkning). En sådan fuktprofil torde alltid vara en överskattning av fuktförhållandena vid tiden för limning om bara torkningsförhållandena och torkningstiden har varit någorlunda rimliga.

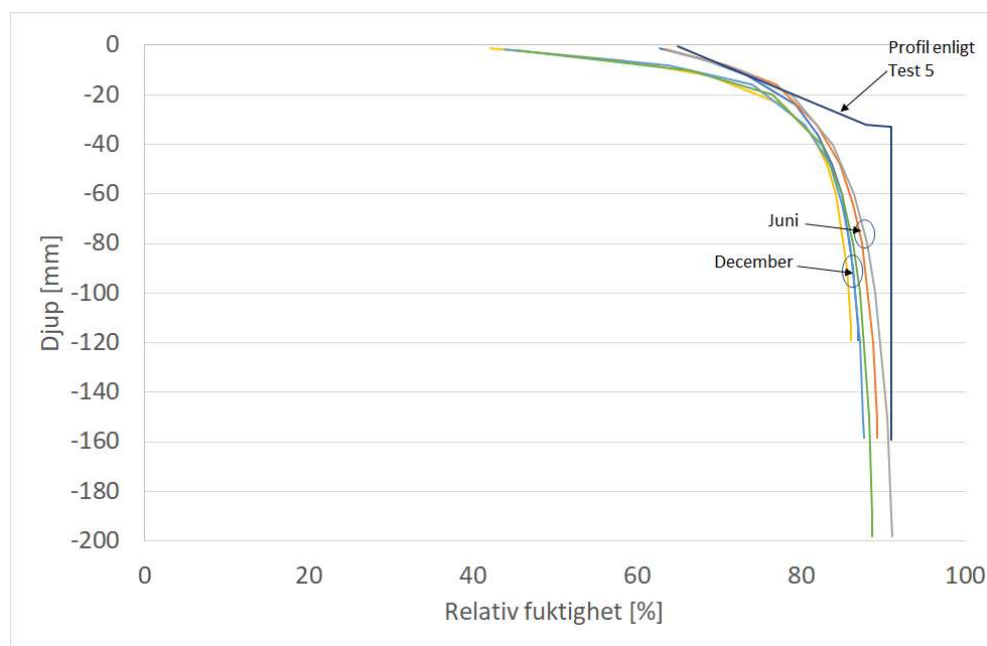
(Mätdjupet 32 är också praktiskt eftersom det visar sig att inflektionspunkten i fuktprofilerna ofta ligger ungefär 30-40 mm ned i betongen. Genom att mäta där minskas således risken att den exakta tidpunkten för mätning skall påverka mätresultatet.)

För denna beräkning ansätts att avjämningsmassan har ett visst RF-värde tvärs igenom. Detta stämmer bra för tunna avjämningsmassor, men vid tjocka avjämningsmassor kommer det att finnas en tydlig gradient över avjämningsmassan så att värdet är tydligt högre i botten än i ytan. Att jag ändå väljer att göra så här beror på att en mer precist fastställd profil genom avjämningsmassan kräver detaljerad beräkning för varje enskilt fall, och på att man vid mätning enligt nu gällande mätmetod (GBR) sannolikt registrerar det högsta RF-värdet som råder i avjämningsmassan. Eftersom det är detta (kanske alltför höga) mätvärde man kommer att ha som utgångspunkt vid en

förenklad bedömning, så förefaller det lämpligt att i beräkningarna ansätta det som värde tvärs igenom hela avjämnningen eftersom man då får resultat på säkra sidan.

Både antagandet om betongens fuktprofil, antagandet om avjämnningens fuktfördelning (samt säkerhetsfaktorerna på materialens fukttransportkoefficienter) bidrar alltså till att de nedan beräknade resultaten inte är underskattningar. Se även Figur 52.

Beräkningarna görs med materialegenskaper enligt Stelmarczyk *et al* [8] för betong med Bascement.



Figur 52: Illustration av antagen fuktfördelning i betongen i Test 5 (blå linje) i jämförelse med vad som beräknats med PPB [5] för betong med Bascement, vct 0,55. *Obs 1:* De beräknade kurvorna (gjutning juni och december) avser profil efter 18 veckor torkning varav 12 mot 60%RF innan avjämningsmassa lagts på.

Obs 2: Värdet vid betongens yta i den antagna profilen för Test 5 varierar från 65% och uppåt enligt Tabell 3&Tabell 4.

Tabell 3: Test 5: Beräknad maximal RF under omfördelningsförloppet för ett antal olika utgångssituationer. Startprofil i betong och avjämnning enligt vad som anges i texten ovan. Betongtjocklek 160 mm, vct ca 0,55. Beräkningstid 20 år. Klimat ovanför efter matläggning: 20°/45%RF. Resultaten är överskattningar; se texten.

Fall nr	Z _{matta}	Avjämnning		Mätvärde i betong Mät djup 32 mm	Max RF vid lim under omfördelning
		Tjocklek	Start-RF		
1	10.000.000	10	55%	90%	85,9%
2	10.000.000	10	55%	88%	85,8%
3	10.000.000	10	65%	90%	86,9%
4	10.000.000	10	65%	89%	86,8%
5	10.000.000	10	65%	88%	86,8%***
6	10.000.000	10	65%	87%	86,7%***

Fall nr	Z _{matta}	Avjämning		Mätvärde i betong Mät djup 32 mm	Max RF vid lim under omfördelning
		Tjocklek	Start-RF		
7	10.000.000	10	65%	86%	86,7%***
8	10.000.000	10	65%	85%	86,6%***
9	10.000.000	10	65%	80%	86,3%***
10	10.000.000	20	65%	90%	87,0%
11	10.000.000	10	75%	88%	*88,5%***
12	10.000.000	10	75%	85%	88,2%***
13	10.000.000	10	75%	80%	87,8%***
14	5.000.000	10	55%	90%	84,4%
15	5.000.000	10	65%	90%	86,3%
16	5.000.000	20	65%	88%	86,0
17	5.000.000	10	75%	90%	88,2%
18	3.000.000	10	55%	90%	83,8%
19	3.000.000	10	65%	90%	85,8%
20	3.000.000	10	65%	88%	85,5%
21	3.000.000	10	75%	90%	87,8%

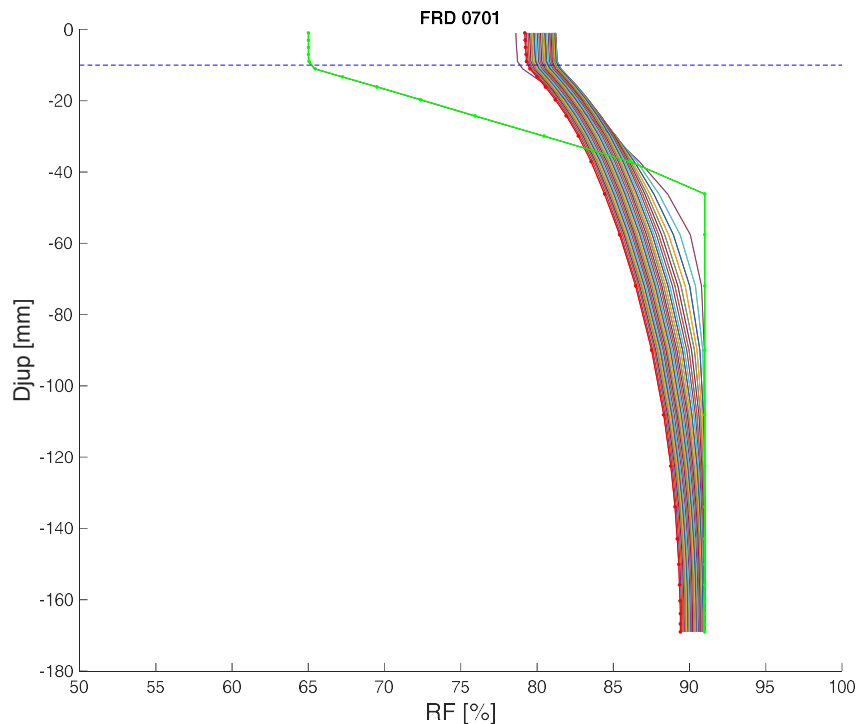
*Tre beräkningsceller i avjämningen

**En enda beräkningscell i avjämningen, 5 mm tjock. Pss får limfukten plats, men beräkningsresultaten blir något mindre precisa.

***De marginella förbättringarna i fallen 5-9 respektive 11-13 (m fl) beror på att RF ansätts vara 91% på djupet 33 mm (1 mm djupare än djupet för angivet mätvärde). Antagen fuktprofil vid start blir därför alltmer oralistisk ju lägre värde som anges vid mätdjupet.

Tabell 4: Test 5: Beräknad maximal RF under omfördelningsförloppet för ett antal olika utgångssituationer. Startprofil i betong och avjämning enligt vad som anges i texten ovan. Betongtjocklek 160 mm, vct ca 0,4. Beräkningstid 20 år. Klimat ovanför efter mattläggning: 20°/45%RF. Resultaten är överskattningar; se texten.

Fall nr	Z _{matta}	Avjämning		Mätvärde i betong (32 mm djup)	Max RF vid lim under omfördelning
		Tjocklek	Start-RF		
1	10.000.000	10	65%	90%	85,7%
2	3.000.000	10	65%	90%	84,4%
3	3.000.000	10	75%	90%	87,0%
4	3.000.000	10	80	90%	(utrymme saknas för limfukten)



Figur 53: Exempel på resultat från Test 5: initial fuktprofil (grön linje; RF i betongen 90% 32 mm under betongens yta, dvs 42 från avjämnings yta) och fördelningen var 17:e månad fram till 10 år efter limning. $Z_{matta} = 3.000.000$ s/m, omgivande klimat 20°/45%.

Kommentar till Test 5: Resultaten i tabellerna ovan är med säkerhet överskattningar av maximala RF-värden, men det är svårt att bedöma hur kraftiga överskattningar det rör sig om. Som förväntat så ger den tätare betongen (Tabell 4) bättre resultat vid i övrigt lika förutsättningar.

Som framgår av tabellen märks det knappt på slutresultatet om man ansätter ett lägre mätvärde vid mätdjupet. Detta beror på den extrema formen på den ansatta startprofilen; det sker en abrupt ökning i RF från angivet värde på mätdjupet 32 mm till det förutsatta värdet 91% som ansätts redan på djupet 33 mm. Denna abrupta ökning är nödvändig i en förenklad beräkning för att med säkerhet inte underskatta mängden fukt och hastigheten i fukttransporten underifrån. Dessvärre leder förenklingen till att resultaten blir svårtolkade och i verkligheten blir effekten av ett lägre mätvärde större än vad som framgår av tabellen.

5. Bilaga 5: Beräkningar med simulerade initialprofiler

Beräkningarna i föregående avsnitt bygger på extremt förenklade antaganden om initialprofilen i betong och avjämningsmassa. Detta leder till osäkerhet om vilken säkerhetsmarginal som finns i beräkningsresultaten, och delvis även till svårigheter att överhuvudtaget tolka resultaten. Det är därför önskvärt att kunna ansätta en rimligare initialprofil i betong och avjämnning.

Genom att ansätta en initialprofil i betongen vid tidpunkten då avjämningsmassa läggs på, och sedan beräkna hela torknings- och omfördelningsförloppet från den tidpunkten (då avjämningsmassan läggs på), inklusive effekterna av limfukt, fås betydligt säkrare slutresultat.

Sådana initialprofiler kan beräknas med PPB [5], men det kräver ett omfattande arbete med hantering av beräkningar och resultatfiler och man hamnar ändå i diverse antaganden om ort, årstid, klimat, tider, mm, vilka gör det hela svåröverskådligt. Ett sådant förfarande kan vara lämpligt i ett konkret verkligt fall, men i denna studie medför det enbart arbete utan att höja slutresultatets användbarhet.

Alternativt kan initialprofilen vid den tidpunkt då avjämningsmassan läggs på bedömas utifrån kännedom om klimatet vid betongens yta samt om vilken RF som kan hinna uppnås på stort djup i betongen. Detta görs enligt följande:

5.1. Simulerad initialfördelning vid applicering av avjämningsmassa

En initialprofil i en platta som torkar ensidigt kan simuleras approximativt med följande ekvation:

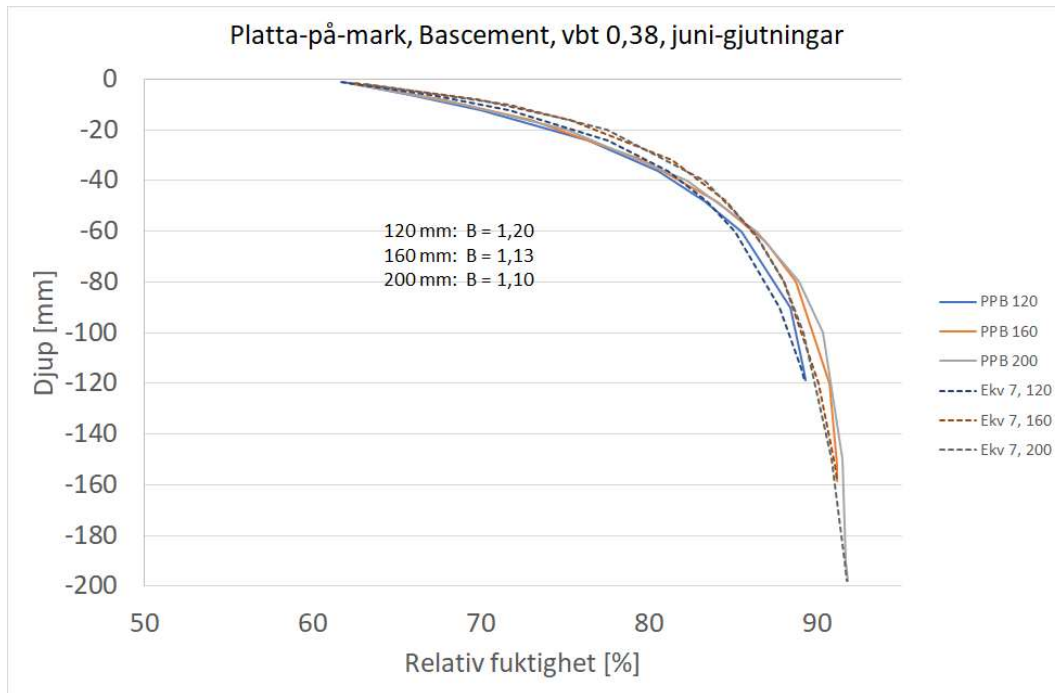
$$\phi(d) = \phi_{uk} + (\phi_{yta} - \phi_{uk}) \frac{(B-1)(1-d)}{B-1+d} \quad (\text{Ekv. 11})$$

där

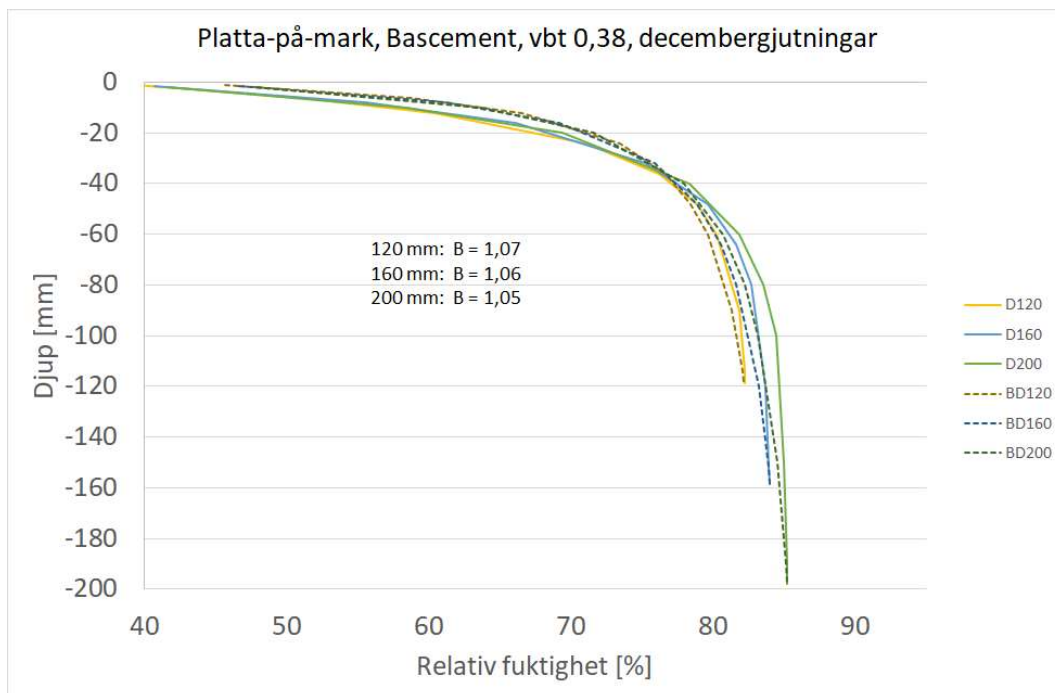
- d är djupet i plattan (räknat från överkant), angivet som andel av totala tjockleken, dvs $0 \leq d \leq 1$ och $d=0$ vid överkant
- ϕ_{uk} är RF i underkant plattan
- ϕ_{yta} är RF vid betongens yta (i praktiken lika med RF i luften ovanför)
- B är en passningsparameter som ger kurvan rätt krökning. Det gäller att $B > 1$ (och vanligtvis $B < 1,1$).

I de följande figurerna visas exempel på anpassning av ekv. 11 till profiler beräknade med PPB. Som framgår blir passningen mycket bra för vct 0,55 men något sämre för vct 0,38 (dock fortfarande väsentligt bättre än i föregående avsnitt).

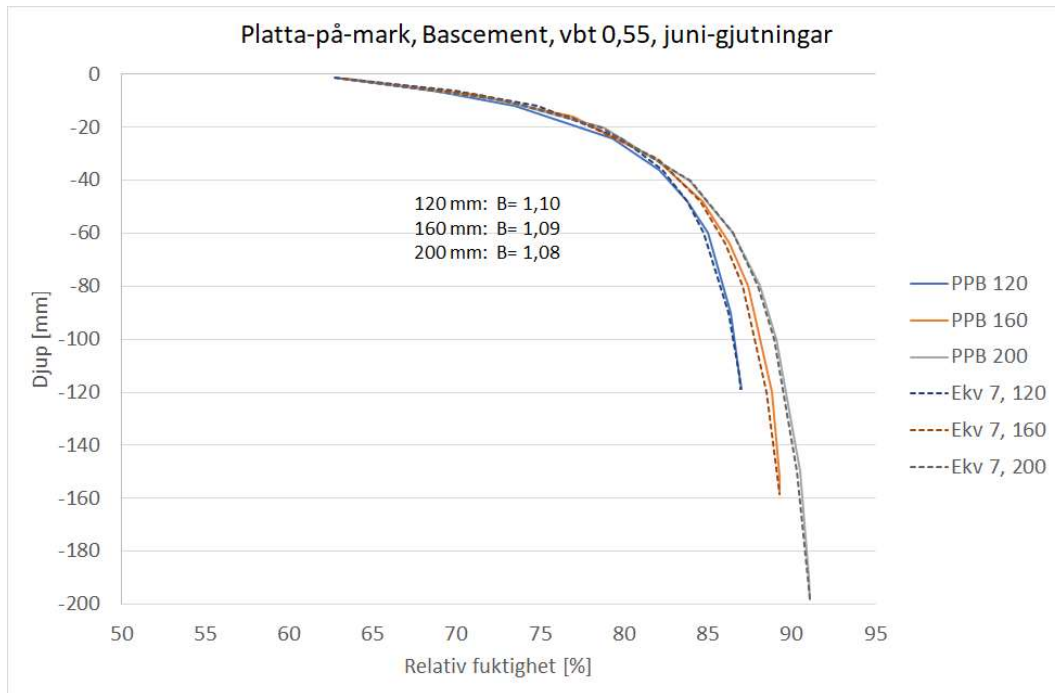
OBS 1: Ekvationen ger inte rätt profil utan att det finns något att jämföra med och anpassa parametern B mot! Den ger däremot en *rimlig* profil ned genom betongens djup med mycket bättre form än de grova, approximativa profiler som användes i föregående avsnitt. Den ger också ett mycket enkelt sätt att lägga in och variera startprofiler i omfördelningsberäkningarna.



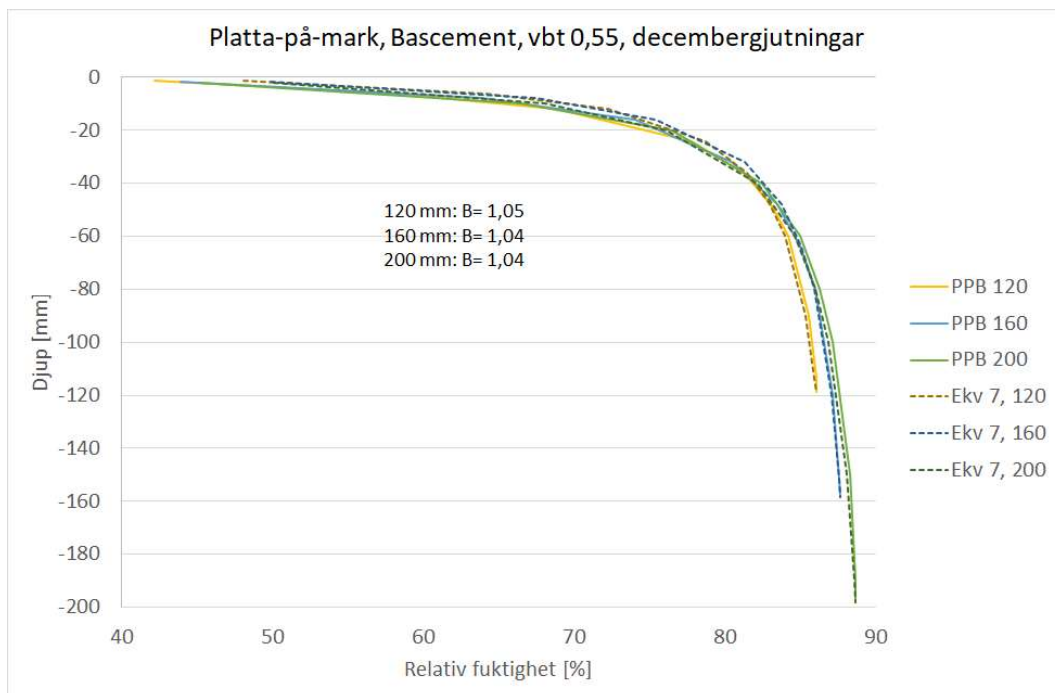
Figur 54: Exempel på anpassning av ekv. 11 till kurvor beräknade i PPB [5] för platta-på-mark med olika tjocklekar. Vct 0,38, 18 veckor härdning, klimat: Örebro, sommar.



Figur 55: Exempel på anpassning av ekv. 11 till kurvor beräknade i PPB [5] för platta-på-mark med olika tjocklekar. Vct 0,38, 18 veckor härdning, klimat: Örebro, vinter.



Figur 56: Exempel på anpassning av ekv. 11 till kurvor beräknade i PPB [5] för platta-på-mark med olika tjocklekar. Vct 0,55, 18 veckor härdning, klimat: Örebro, sommar.



Figur 57: Exempel på anpassning av ekv. 11 till kurvor beräknade i PPB [5] för platta-på-mark med olika tjocklekar. Vct 0,55, 18 veckor härdning, klimat: Örebro, vinter.

OBS 2: Ekvation 11 förutsätter att RF i bottnen av den ensidigt torkande plattan är känd. Så länge detta tillstånd inte påverkas av torkning utåt utan enbart av självuttorkning kan det bedömas relativt enkelt (som funktion av vct, årstid och härdningstid) med hjälp av beräkningar i PPB [5]. I Tabell 5 redovisas sådana (beräknade) värden som funktion av härdningstid vid konstant temperatur (5, 15 resp. 20°C). Värdena vid +5° blir mycket låga, och det är tveksamt om förutsättningen +5 under så lång tid som upp till 175 dygn (25 veckor) någonsin uppfylls. I de flesta byggen torde en högre temperatur hållas så snart tätt hus har skapats.

På liknande sätt torde det vara osannolikt att genomsnittliga härdningstemperaturen sett över flera månader är så hög som 20°C på något svenskt bygge. Som approximation antags därför i de fortsatta beräkningarna att huvuddelen av härdningen har skett vid 15°C och att rimlig självuttorkning efter 15-20 veckor härdning då kan vara 91, 88,5 och 87% för vct 0,55, 0,40 respektive 0,32. Dessa värden förmodas ge en viss säkerhetsmarginal i beräkningarna. (Som framgår av tabellen ovan har låg temperatur en väldigt positiv betydelse för självuttorkningen. Det intressanta i beräkningarna nedan är dock snarare att räkna på de mer riskabla fallen, vilka till exempel uppstår när betongen har fått härda under förhållandevis varma betingelser.)

Tabell 5: Beräknad RF efter självuttorkning vid konstant temperatur (+5, +15 resp. +20°C) för betong med Bascement och olika vct.

+ 5°C				
veckor:	10	15	20	25
vbt	70	105	140	175
0,55	88,1	86,5	85,5	84,9
0,40	79,5	77,6	76,6	75,9
0,32	64	59,8	57,4	55,8
+ 15°C				
veckor:	10	15	20	25
vbt	70	105	140	175
0,55	91,7	90,3	89,5	89,1
0,40	89,2	87,7	86,8	86,3
0,32	88,8	86,1	84,6	83
+ 20°C				
veckor:	10	15	20	25
vbt	70	105	140	175
0,55	93,4	92,3	91,6	91,1
0,40	90,7	89,5	88,8	88,3
0,32	91,5	89,2	88	87,1

5.1.1. Koefficienten B

Profilanpassningskoefficienten B blir större ju mer materialet har hunnit torka, dvs B ökar med ökad transportförmåga i betongen (dvs med ökande vct), med ökad tid för torkningsförloppet och även med ökad drivkraft för torkningen (dvs med sänkt RF i omgivningen).

Rimliga värden på B för vct 0,55 och 0,38, för torkningsprofiler enligt PPB för gjutningar i december respektive juni (se Figur 54-Figur 57) och 18 veckors härdning ges i Tabell 6.

Tabell 6: Exempel på rimliga värden för koefficienten B i ekvation 11, anpassade efter beräkningar i PPB, se Figur 54-Figur 57.

Vct	Vinter	Sommar
0,38	1,05-1,07	1,10-1,20
0,55	1,04-1,05	1,08-1,10

5.2. Resultat

Resultat av beräkningar enligt det ovan beskrivna redovisas i huvudtexten. Beräkningarna har utförts enligt följande:

1. Betongens härdningstid fram till att avjämning läggs på anges. Luftfuktigheten (och temperatur) under denna tid anges.
2. Gissad självuttorkning samt formfaktor B enligt ekvation 11 anges. Formfaktorn justeras tills en rimlig profil uppnås (ledning: se Figur 54-Figur 57/Figur 59).
3. Avjämning läggs på och tiden fram till mattläggning anges. Klimat ovanför avjämningen anges.
4. Vid tiden för limning registreras RF dels på djupet 32 mm, dels på 40% av betongtjockleken. Mattans täthet och mängden limfukt anges.
5. Klimat ovanför golvet anges och omfördelningsberäkningen genomförs.

Beräkningarna utfördes med variationer både i koefficienten B och i antagen RF i botten av plattan vid tiden för avjämning på ett sådant sätt att rimligt intressanta RF-värden erhöles på djupen 32 mm respektive 40% av betongtjockleken. (RF i botten bedömdes med utgångspunkt i rimlig självuttorkning.)

Tabell 7: Använda kombinationer av antagen RF i underkant platta samt värden på koefficienten B.

		B	
Vct	RF u.k.	Vinter	Sommar
0,55	91, 93	1,03 1,05 1,07	1,07 1,09 1,11
0,38	89, 91	1,04 1,06 1,08	1,09 1,15 1,21

5.2.1. Kommentarer till beräkningarna

Betongens ålder är mycket viktig eftersom den förtätning som sker fram till (åtminstone) 12 månaders ålder sänker betongens fukttransportförmåga mycket kraftigt.

Limfukten orsakar alltid en pik i RF i översta cellen. Beräkningarna visar dock att denna försvinner inom 1-2 dygn, ofta efter bara några timmar. Eftersom modellen inte är avsedd att täcka detta förlopp kan man dock inte lita fullt ut vare sig på vilken maximal RF som uppnås eller hur länge tillstånd över 85%RF varar.

Det beskrivna förfarandet innebär att självuttorkning i betongen efter tiden för applicering av avjämningsmassa inte tillgodoräknas. Om betongen är ca tre månader gammal eller äldre då avjämnning utförs så är dock den fortsatta självuttorkningen relativt liten, dvs felet av att inte ta hänsyn till den blir litet och utelämnandet medför dessutom att beräkningsresultaten hamnar "på säkra sidan".

6. Bilaga 6: Val av initial fuktprofil

(I denna bilaga redovisas beräkningar som gjordes i ett tidigt skede för att finna ett sätt att simulera både profiler i betongen och i avjämningsmassan vid tiden för limning av matta. Beräkningarna utmynnade dock i ett beslut att låta omfördelningsberäkningarna starta redan vid tiden för applicering av avjämningsmassa, eftersom det på så sätt är möjligt att använda den fuktprofil i betongen som räknats fram mha PPB [5]. Det mesta som står i denna bilaga har därför ingen praktisk betydelse i beräkningarna och det förfarande som beskrivs i rapporten, utan utgör bara bakgrund till varför jag valt att göra så som jag har gjort.)

För att kunna utforma en metodik för förenklad bedömning av kommande fuktillstånd (syftet med hela projektet) krävs en rimligt korrekt bild av betongens fuktprofil vid tiden för avjämnning samt vid tiden för golvläggning. Samtidigt går det inte att göra en noggrann anpassning till varje enskilt fall eftersom mängden beräkningsfall då blir oändlig. Därför måste någon form av standardiserade, förenklade uttorkningsprofiler skapas, och dessa måste väljas så att de ger en rimlig säkerhetsmarginal i det slutliga resultatet.

I det följande redovisas några olika beräkningar av vilka fuktprofiler som kan uppstå i betongen. Dessa profiler används sedan som utgångspunkt för de förenklade profiler som används i de egentliga beräkningarna i nästa avsnitt.

Uttorkningsprofilen vid tidpunkten för mattläggning uppstår genom att

1. Betongen härdar och torkar under tiden från gjutning till applicering av avjämningsmassa
2. Betongens yta fuktas upp i någon mån, nästan momentant, i samband med applicering av avjämningsmassa
3. Avjämningsmassan förlorar omedelbart något lite fukt till den delvis torkade betongen
4. Avjämningsmassa och betong fortsätter att torka fram till tiden för mattläggning.

6.1. Inledande torkning av betong

Här avses torkningsprocessen från tiden för gjutning till tiden för applicering av avjämningsmassa. Fuktprofilerna efter denna torkning har beräknats med PPB.

Avsikten var att få fram några rimliga fuktfördelningar att använda som startläge vid tidpunkten för beläggning med avjämningsmassa.

Kombinationerna angavs ovan och de beräknade profilerna namnges enligt följande tabeller.

- Cementtyp
- Årstid
- Ort
- Tider (tätt hus, styrt torkklimat)

2 principkonstruktioner: Platta-på-mark respektive plattbärlag (utökade med variationer av tjocklekar). Platta-på-mark avser mitt i stor platta, isolering under: 300 mm cellplast.

1 cementtyp (Cementas Bascement)

2 vct av respektive cementtyp (0,38 resp 0,55)

1 enda ort (Örebro, vintertid 18°C efter tätt hus)

2 gjuttidpunkter: Ett vinterfall; gjutning 1/12, ett sommarfall; gjutning 1/6.

1 enda torkningsförlopp (4 veckor till tätt hus, 6 veckor till styrt torkklimat, 8 veckor med styrt klimat, totalt 18 veckor (126 dygn) till avjämning)

De beräknade profilerna redovisas i Bilaga 5.

6.1.1. Bascementbetong

För beräkningarna i PPB användes:

Mark under: Grus/morän

Mark, startvillkor: Konstant 12°C

Randbeteende, 2 m under isoleringen: 6°C

Startvillkor isolering: Konstant, 12°C.

Betong 1: vct 0,38, C50/60, C=508 kg/m³, temp 15°C

Betong 2: vct 0,55, C28/35, C=350 kg/m³, temp 15°C

Undersida platta: Förseglad.

Ovansida: Härdningsklass 1, vindstill, 15°C, 80%RF,

Klimatdata Örebro (efter 7 dygn)

Tätt hus: 28 dygn (4 veckor)

Styrt klimat efter: 42 dygn (6 veckor), Torkklimat: 18°C, sommartid 60%RF, vintertid 35%RF.

Beräkningsslut: 126 dygn (18 veckor) eftersom detta är den tidpunkt då avjämning appliceras i beräkningarna nedan.

Inomhusklimat efter 126 dygn (dvs först efter den tid som beräkningen avser).

Ingen glättning, ingen täckning, ingen infravärme.

6.2. Resultat

Beräknade initialprofiler redovisas i Figur 58 och Figur 59.

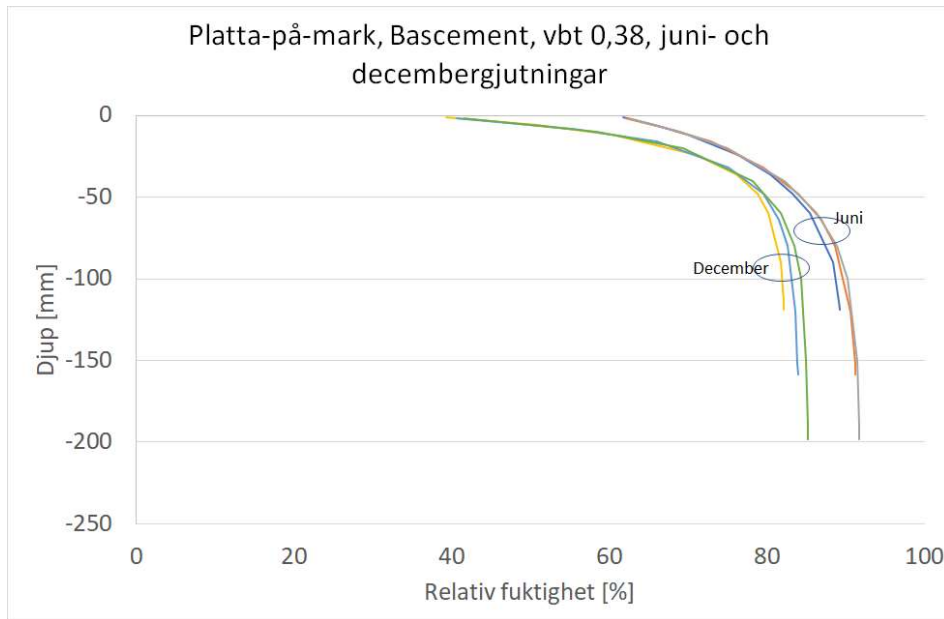
Figurerna visar att torkning sker effektivare i december: Djupt i betongen syns en kraftigare självtorkning för december- än för juniberäkningarna, vilken, enligt Stelmarczyk *et al*, beror på att betongen härdar vid lägre temperatur i det tidiga skedet, och vid ytan fås bättre torkning tack vare lägre ånghalt i omgivningen. Detta är särskilt markant för vct 0,38, men gäller även för vct 0,55.

Det kan noteras att oavsett vct och årstid så självtorkar dessa betonger till lägre än 92%RF.

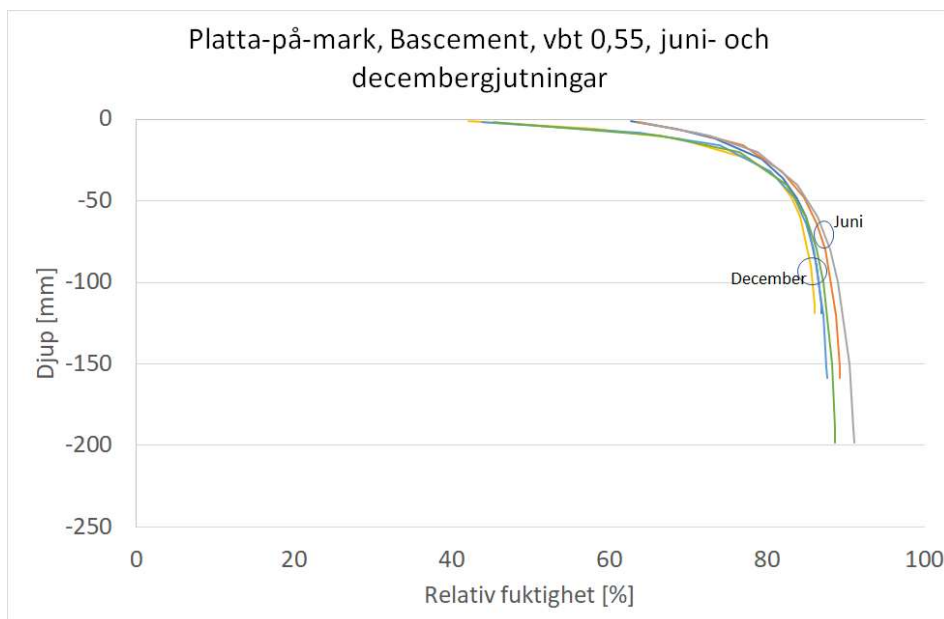
6.3. Diskussion

Redan av dessa få resultat framgår att det inte kommer att vara möjligt att beräkna realistiska initialprofiler i alla tänkbara betonger med hänsyn till konstruktionstyp och årstid för att sedan kombinera dessa profiler med alla varianter av avjämningar (tjocklek och startfuktprofil), yttre klimat, mattor, mm. Ett sådant tillvägagångssätt skulle leda till en oändlig beräkningsuppgift.

För att få fram en förenklad metodik för bedömning av fuktillståndet i en konstruktion krävs istället någon form av generalisering av fuktprofilen i betongen. En teknik för detta redovisas i Bilaga 5.



Figur 58: Fuktprofiler i betongen vid tid för avjämning. Vct 0,38. (Torkning mot 18 °C. December: 35%RF, juni: 60%RF). De tre kurvorna för respektive månad avser plattor med tjocklekarna 120, 160 respektive 200 mm tjocklek.



Figur 59: Fuktprofiler i betongen vid tid för avjämning. Vct 0,55. (Torkning mot 18 °C. December: 35%RF, juni: 60%RF). De tre kurvorna för respektive månad avser plattor med tjocklekarna 120, 160 respektive 200 mm tjocklek. Vid jämförelse med Figur 58 syns tydligt att självtorkningen inte får samma effekt, och att temperaturberoendet i det tidiga skedet inte är lika markant.

6.4. Inledande torkning av avjämningsmassa

Efter att betongen torkat och härdat en tid, appliceras avjämningsmassa. Denna torkar sedan fram till att matta limmas.

För att få fram en rimlig fuktfördelning vid tidpunkten då matta limmas, har följande beräkningar gjorts:

Fuktprofil för betongen har valts enligt föregående avsnitt, med modifiering enligt följande: Vid tiden för applicering av avjämningsmassa, skapas fuktprofilen i betongen genom att den ovan beräknade fuktprofilen modifieras så att RF i översta beräkningscellen (2 mm betong) sätts till 75%RF. Detta kan synas som mycket grovt, men det visar sig att valet har liten betydelse för slutresultatet.

Avjämningsmassa läggs på och det antags att dess initiala RF är 96%, samt att avjämningsmassan får sina slutliga egenskaper så snabbt att det i denna approximativa beräkning inte behöver tas hänsyn till strukturutveckling, kemisk bindning av vatten, mm (valet av initial RF = 96% är ett sätt att i någon mån ta hänsyn dels till tidig torkning innan strukturen har förtätats alltför mycket, dels till självuttorkning samt till att en liten mängd fukt sugs in i betongen).

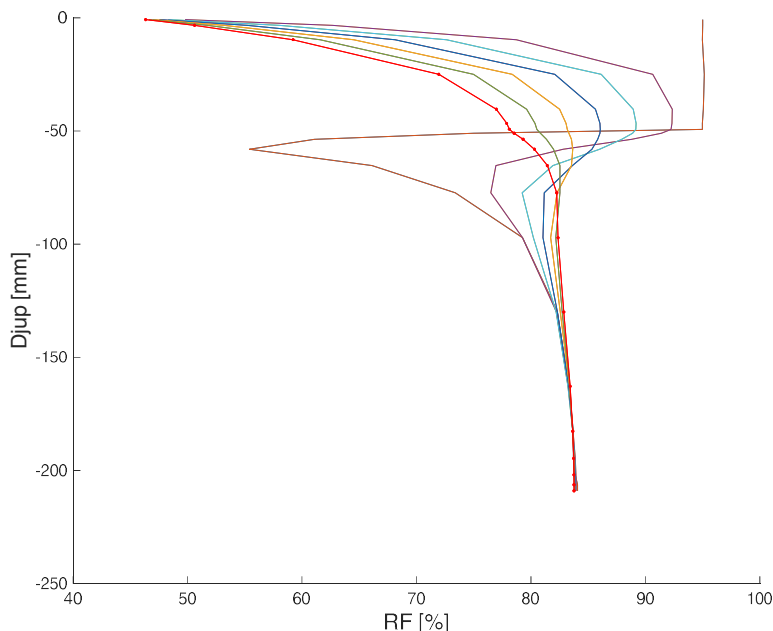
6.4.1. Beräknad fuktprofil i avjämningsmassa

Profilerna beräknas med samma program som sedan används för omfördelningsberäkningen, men i denna fas simuleras naturligtvis ingen matta.

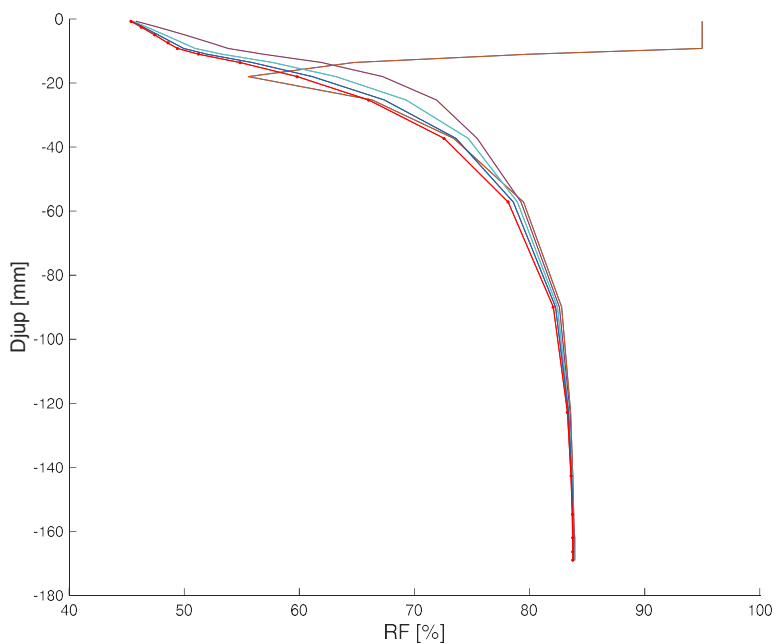
Exempel 1: Applicering vintertid

I denna beräkning antags att avjämningsmassan torkar i ett klimat 20°/45%RF. För övriga detaljer se bildtexterna.

Initiala fuktprofilen i betongen gäller för betong vct 0,38, Bascement, gjuten i december, tjocklek 160 mm (beräknad med PPB). Det antags att de variationer i fuktinnehåll som förekommer vid annat vct och annan tjocklek har obetydlig inverkan på slutlig fuktprofil i avjämningsmassan.



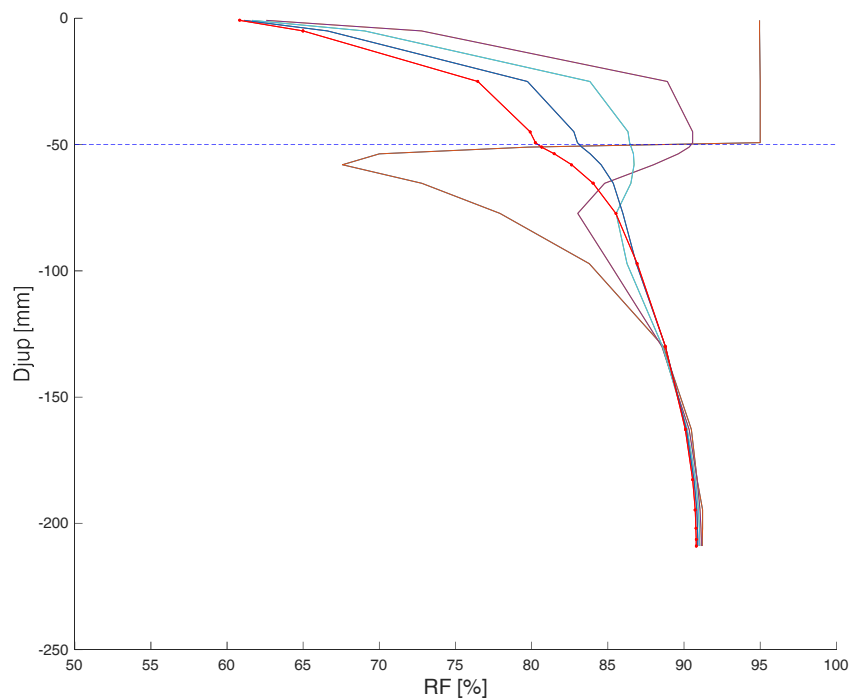
Figur 60: Beräknade fuktprofiler i 50 mm avjämningsmassa lagd vintertid på 160 mm betong vct 0,38 av Bascement som torkat 18 veckor enligt beräkningar i föregående avsnitt. RF i betongens översta 2 mm ökad från beräknade 40,7% till 75% för att ta hänsyn till fukt som tas upp från avjämningsmassan. Slutlig profil (efter 12 veckor, markerad med röd linje med prickar) kan approximativt beskrivas som en rät linje från 85% till omgivningens 45%RF.



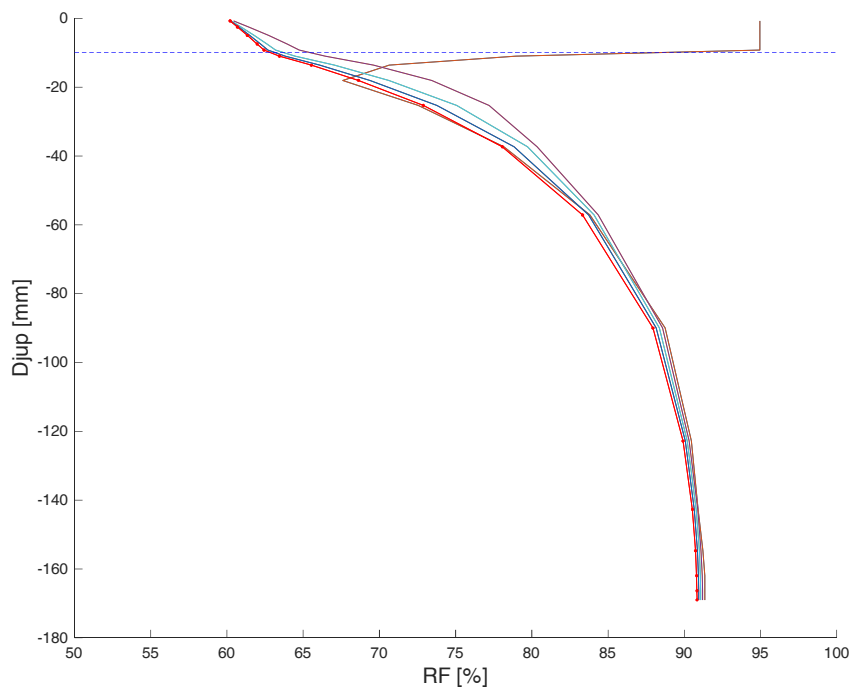
Figur 61: Beräknade fuktprofiler i 10 mm avjämningsmassa lagd vintertid på 160 mm betong vct 0,38 av Bascement som torkat 18 veckor enligt beräkningar i föregående avsnitt. RF i betongens översta 2 mm ökad från beräknade 40,7% till 75% för att ta viss hänsyn till fukt som tas upp från avjämningsmassan. Slutlig profil (efter 12 veckor, markerad med röd linje med prickar) kan beskrivas som en rät linje från 50 till omgivningens 45%RF.

Exempel 2: Applicering sommartid

I denna beräkning antags att avjämningsmassan torkar i ett klimat 20°/60%RF. För betongen gäller den uttorkningsprofil som bildas vid torkning i sommarklimat (60%RF i PPB), med justering från 62,2% till 75% i översta 2 mm. I övrigt lika som de två föregående exemplen.



Figur 62: Beräknade fuktprofiler i 50 mm avjämningsmassa lagd sommartid på 160 mm betong vct 0,38 av Bascement som torkat 18 veckor enligt beräkningar i föregående avsnitt. RF i betongens översta 2 mm ökad från beräknade 62,2% till 75% för att ta viss hänsyn till fukt som tas upp från avjämningsmassan. Slutlig profil (efter 12 veckor, markerad med röd linje med prickar) kan approximativt beskrivas som en rät linje från ca 85% till omgivningens 60%RF.



Figur 63: Beräknade fuktprofiler i 10 mm avjämningsmassa lagd sommartid på 160 mm betong vct 0,38 av Bascement som torkat 18 veckor enligt beräkningar i föregående avsnitt. RF i betongens översta 2 mm ökad från beräknade 62,2% till 75% för att ta viss hänsyn till fukt som tas upp från avjämningsmassan. Slutlig profil (efter 12 veckor, markerad med röd linje med prickar) kan beskrivas som en rät linje från 63 till omgivningens 60%RF.

6.5. Kommentarer

Resultaten i figurerna ovan visar att det är mycket svårt att utan detaljerade beräkningar förutsäga vilken RF-fördelning som bildas i avjämningsmassan under tiden från applicering till limning av matta. Fördelningen blir beroende av hur väl betongen har torkat innan avjämningsmassan läggs på och av klimatet i omgivningen, av avjämningsmassans tjocklek, av den verkliga torktiden (som här antogs vara 12 veckor), samt naturligtvis av avjämningsprodukternas egenskaper vad gäller strukturutveckling, kemisk bindning av vatten, mm.

Beräkningsresultaten visar också att RF-profilen i övre delen av betongen påverkas avsevärt av fukt från avjämningsmassan: Vid 50 mm avjämningsmassa ökar RF-värdena kraftigt, vid 10 mm avjämningsmassa är inverkan nästan omärkbar. Detta i sin tur påverkas också av hur tät golvmattan är. Detta innebär att i den övre delen av betongen beskrivs fuktillståndet av scanningisotermer! Startläget för betongen, vid tiden då mattan limmas, kan alltså inte anges längs desorptionsisotermer. Att ange startläget för betongen längs ett flertal scanningisotermer blir oöverskådligt svårt, och man kan få intryck av att beräkningarna blir omöjliga att genomföra. Men det finns en bra lösning: Genom att utföra hela beräkningen i ett svep, dvs från den tidpunkt då avjämningsmassan läggs på och framåt, och sedan ange en tidpunkt då ytans övergångsmotstånd ökar från 0 till mattans värde (t.ex. $Z_{matta}=2.800.000$ s/m) så sköter beräkningsprogrammet om all hantering av scanningfenomen i betongen.

Följden av detta är att beräkningarna måste inledas vid tiden då avjämningsmassan läggs på, med den fuktprofil i betongen som räknats fram med hjälp av PPB [5] eller motsvarande program. Den enda modifiering som behöver göras är att justera RF i betongens översta del för att ta hänsyn till kapillär insugning av vatten från den färska avjämningsmassan.

Detta sistnämnda har dock ringa betydelse, dels för att det handlar om små mängder fukt, dels för att det har marginell betydelse för slutresultatet om fukten skall torkas bort från 1-2 millimeter ned i betongen eller om den skall torka bort från avjämningsmassan.

Förändringen innebär också en förenkling eftersom beräkningen nu kan startas i ett läge där avjämningsmassans RF är hög tvärs igenom; det finns alltså inte längre behov av att ange en gissad fuktprofil genom avjämningsmassan, och inte heller av att ange någon godtyckligt modifierad fuktprofil ned genom betongen.

För att kunna använda denna metodik krävs dock att betongen har härdat så länge innan avjämningsmassan har lagts på, att effekter av fortsatt cementreaktion har obetydlig inverkan på slutresultatet. Enligt Stelmarczyks mätningar av hydrationsförlopp bör detta vara uppfyllt någon månad efter gjutning. Jämförelse av Stelmarczyks isotermer vid 6 respektive 12 månader visar att det sker endast en marginell förändring under denna period. Isotermerna kan således bedömas vara i huvudsak färdigutvecklade vid 6 månaders ålder, och kanske är de redan vid tre månader.