Jämförelse, kontroll och kalibrering av beräkningsverktyg

1 Introduktion

1.1 Bakgrund

Fuktomfördelningsberäkningar, fortsättningsvis kallat omfördelningsberäkningar, utförs idag med olika beräkningsverktyg och i olika delar av projekterings- och produktionsprocessen. Oavsett i vilket skede en omfördelningsberäkning utförs så syftar denna till att fastställa när det är möjligt att applicera ovanpåliggande ytskikt med acceptabel risk för att fuktrelaterade skador inte ska uppstå. Primärt används beräkningsverktygen WUFI (ref X), KFX (ref X) och Sture REDIST (ref X) för beräkningarna. Samma beräkningsverktyg, WUFI, KFX och Sture REDSIT, är även inkluderade det aktuella projektet som denna rapport är en del av. Ytterligare tillgängliga programvaror som skulle kunna vara lämpliga för ändamålet är VADAU (ref X) och DELPHINE (ref X).

Sedan länge är det känt att de olika beräkningsverktygen, WUFI, KFX och Sture REDSIT, som används för omfördelningsberäkningar skiljer sig något åt och delvis har olika förutsättningar, möjligheter och begränsningar för att utföra omfördelningsberäkningar. Skillnaderna mellan verktygen avser flera olika delar såsom t.ex.:

- Beräkningsverktygens numeriska uppbyggnad och lösningsmodeller t.ex. förmågan att beakta eller inte beakta hysteres och så kallade scanningkurvor samt i sammanhanget hur dessa beaktas numeriskt.
- Beräkningsverktygens möjligheter att hantera och applicera olika typer av materialdata såsom t.ex. fuktberoende fukt- och värmeledningsförmåga samt kurformad eller linjärt punktvis utformad sorptionskurva etc.
- Beräkningsverktygens möjlighet och struktur för att modelera material, materialskikt och sammansatta konstruktioner av olika material med t.ex. antalet tillgängliga celler eller antalet möjliga material att applicera i modellen samt i förekommande fall hur de appliceras i cellerna och cellstrukturen.
- Beräkningsverktygens användarvänlighet.

Eftersom programen inte har utvärderats och jämförts tidigare är det även okänt om numeriska avvikelser eller avvikande kända numeriska lösningsmetoder som skapar divergens i resultaten kan förekomma i de olika beräkningsverktygen.

Även om det finns svårigheter i att fastställa huruvida de olika beräkningsverktygen räknar rätt finns det ett behov av att säkerställa så att verktygen räknar lika samt att effekten av eventuella skillnader i verktygen fastsälls och hanteras.

1.2 Syfte

Projektets övergripande syfte avser att utvärdera möjligheter, risker och begränsningar för att utföra omfördelningsberäkningar samt att ta fram riktlinjer för hur omfördelningsberäkningar kan utföras på ett systematiskt och likvärdigt sätt.

Det övergripande syftet samt det faktum att omfördelningsberäkningar utförs med olika beräkningsverktyg med olika förutsättningar, möjligheter och begränsningar gör att jämförelse, kontroll och kalibrering av de beräkningsverktyg som används i projektet och tillika används i skarpa projekt är fullt nödvändig.

Syftet med jämförelsen, kontrollen och kalibreringen är att säkerställa så att likvärdiga resultat erhålls när beräkning utförs på en och samma konstruktion med samma rand- och initialvillkor samt likvärdig materialdata.

I de fall avvikelser i resultat uppstår från de olika beräkningsverktygen är avsikten att rapportera samt om möjligt fastställa och förklara de faktorer som ger upphov till avvikelsen. Vid avvikelser utvärdera om dessa har någon påverkan på omfördelningsberäkningar.

1.3 Avgränsningar

Jämförlen, kontrollen och kalibreringen som avses i denna rapport avgränsas till en utvärdering av två grundläggande beräkningsfall.

Projektet ger utrymme för ytterligare jämförelse, kontroll och kalibrering under löpnade parameterstudier för andra konstruktioner och konstruktionsuppbyggnad utöver de studerade två grundläggande beräkningsfallen.

2.2 Metod och material

I övergripande ordalag kan den metod som använts för jämförelse, kontroll och kalibrering av de tre utvärderade beräkningsverktygen liknas med så kallande BESTest som vanligtvis utförs för olika typer av energiberäkningsverktyg. Tillskillnad från BESTest finns dock i inga analytiska och numeriska lösningsmetoder att jämföra med. Vidare finns inga testfall med tillhörande kvantitativa resultat att förhålla sig till.

I kombination med empirisk validering har numeriska lösningsmetoder för de tre beräkningsverktygen som inkluderas i studien jämförts med varandra där så varit möjligt samt bedömts nödvändigt varvid betydande skillnader har konstaterats. En mindre begränsning föreligger då vissa numeriska metoder för utvärderade beräkningsverktyg inte alltid varit helt känd för alla verktyg. Skillnader som antas vara av större betydelse redovisas enligt nedan.

Sedan tidigare är det känt att det förekommer omfattande brister i för ändamålet relevant materialdata för vanligt förekommande material i de konstruktioner som omfördelningsberäkningar vanligtvis utförs på. Vidare föreligger oklarheter och osäkerheter i de mätmetoder som tillämpas i fält för fastställande av relativ fuktighet i betong. Några testfall med tillhörande föreskrivna resultat liknande BESTest metoden finns inte.

I brist på användbar materialdata har ändamålsenligt syntetisk materialdata skapats. Framtagen syntetisk materialdata avser att efterlikna motsvarande verkliga material. Skillnader i de numeriska lösningsmetoderna mellan använda beräkningsverktyg har också gjort att den syntetiska materialdatan har justerats och anpassats på ett sådant sätt att den går att tillämpa på samtliga beräkningsverktyg. I sammanhanget har även intentionen varit att skapa så enkel syntetisk materialdata som möjligt.

I den mån det varit möjlig har de numeriska lösningsmodellerna för ingångsdata anpassats i så stor utsträckning som möjligt för att ta bort systematiska skillnader och tvinga beräkningsverktygen att bete sig lika. I sammanhanget har även problemformuleringen och randvillkor anpassats och ställts så att de överensstämmer.

Potentiella brister i de mätmetoder som tillämpas i fält samt bristern av specifika testfall att jämföra kvantitativa resultat mot har gjort att resultatet från beräkningsverktygen endast jämförs med varandra.

Sammanfattningsvis har två beräkningsmodeller skapats med empiriskt framtagen syntetisk materialdata som systematiskt justerats i syfte att erhålla korrelation i resultatet mellan de ingående beräkningsverktygen. Intentionen har varit att såväl beräkningsmodellerna som den syntetiskt framtagna materialdatan skall vara så enkla som möjligt. Respektive materialdata och beräkningsmodell samt hur dessa har justerats och processen för att erhålla korrelation mellan resultaten redovisas i resultatdelen. Processen att erhålla korrelation ses som en del av resultatet och en del av det studien avser att ge svar på då fokus i ett ingenjörsmässigt perspektiv många gånger handlar om hur man kan erhålla korrelation, inte att man erhåller korrelation. Oklarheter och osäkerheter i mätmetoder för fastställande av relativ fuktighet i betong gör att testfallen, i likhet med testfall i BESTest samt i strid med GLP (ref X), inte är kontrollerade i verkligheten eller i sin tillämpbara miljö. De tester och jämförelser som framgent borde genomföras genom tillexempel blinda jämförelser mellan beräkningar och mätningar i fält är helt enkelt inte möjliga att genomföra idag beroende på att osäkerheter tillgängliga mätmetoder och mätsystem.

När avvikelser i resultaten mellan de olika beräkningsprogrammen noterats för likvärdiga beräkningsfall har randvillkor, syntetisk materialdata eller beräkningsmodell justerats i en empirisk iterativ process i syfte att nå korrelation och orsaker till avvikelser rapporteras.

Resultaten presenteras i form av en fuktprofil efter 2 års och 5 års uttorkning. För mer komplexa bjälklagsuppbyggnader med ett förhållandevis tätt ytskikt plottat även RF över tiden i 10 år för en position i överkant av konstruktionen precis under övre tätskikt.

2.2.1 Beräkningsverktyg

Utvärderade beräkningsverktyg är enligt ovan redovisat WUFI (ref X), KFX (ref X) och Sture REDSIT (ref X). Ingen närmare beskrivning ges av utvärderade beräkningsverktyg. För ytterligare fakta om respektive beräkningsverktyg hänvisas till respektive upphovsman samt för respektive beräkningsverktyg vetenskapligt presenterad och granskad litteratur.

2.2.2 Svårigheter att ansätta identiska materialdata i de tre beräkningsverktygen

Flera skäl till att det är svårt att ansätta identisk materialdata i de tre använda beräkningsverktygen har observerats. Vid uppförande av beräkningsmodellerna och applicering av identisk materialdata i de tre olika beräkningsverktygen observerades primärt två svårigheter av betydelse enligt nedan redovisat.

KFX och REDIST har en desorptions- och en absorptionsisoterm för förhållandet mellan relativ fuktighet och materialets vatteninnehåll. Vidare kan KFX och REDIST beakta inverkan av hysterses och på olika sätt ta fram så kallade skanningkurvor som baseras på hur uppfuktnings och

uttorkningsprocessen fortlöper. WUFI har endast en sorptionsisoterm varför inverkan av hysteres och appliceringen av skanningkurvor behöver beaktas med ingenjörsmässiga metoder genom t.ex. justeringar i materialdata. För att skapa jämförbara förutsättningar i de aktuella fallen har såväl materialdata som beräkningsverktygen KFX och Sture REDSIT justerats och anpassats på ett sådant sätt att de endast har en sorptionsisoterm i likhet med förutsättningarna i WUFI. För fall 1 – 4 nedan beaktas därför inte inverkan av hysteres mellan två kurvor.

Ytterligare en orsak som skapar avvikelser vid applicerad materialdata är att de olika beräkningsverktygen har olika metoder för hur funktionsbaserad materialdata ansätts. I KFX och Sture REDIST ansätts tillexempel sorptionsisotermerna och fuktberoende diffusionsmotståndet med olika typer av kurvanpassning till ett visst antal föreskrivna punkter. I WUFI sker motsvarande applicering av materialdata genom styckvis linjär interpolation mellan punkter, d.v.s. att räta linjer dras mellan punkterna.

I WUFI finns möjligheten att hantera fukttransport i material på olika sätt. I studerade fall har all fukttransport genom materialen hanterats i parametern diffusionsmotstånd.

3 Resultat och beräkningsprocess – Fall 1 – 4 enkel beräkningsmodell

3.1 Modell, materialdata samt start- och randvillkor

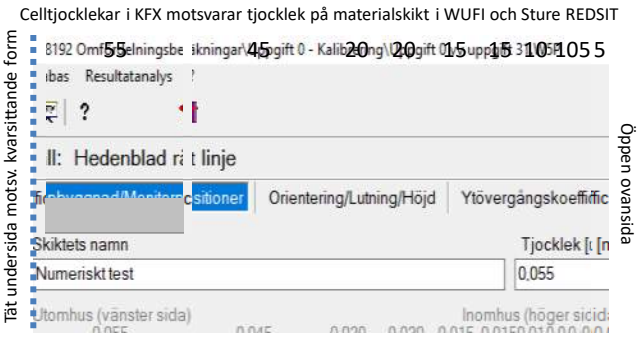
Initialt var avsikten att skapa en så enkelt beräkningsmodell som möjligt baserad på en så enkel konstruktion som möjligt både med avseende på konstruktionens och modellens geometri och dels med avseende på ingående materialdata.

För att inte förvirra läsaren vill vi i proaktivt syfte redan nu påtala att resultaten i nedan redovisad beräkningsprocess visar att för komplex materialdata användes initialt i fall 1, dvs det som var tänkt att utgöra ett så enkelt fall som möjligt. En alternativ orsak till misslyckandet i fall 1 kan vara att använd materialdata inte applicerades med tillräckligt hög noggrannhet/ överenstämmelse i respektive beräkningsverktyg. Ur ett tillämpat och ingenjörsmässigt perspektiv är observationer rörande avvikelser och fel viktiga att rapportera och kan många gånger också utgöra det viktgaste resultatet även om det ur andra aspekter kanske kan te sig konstigt att fel som noterats rapporteras.

I fall 1 - 4 studeras en enkel konstruktion med 200 mm betong och ett helt tätt skikt i botten som antas motsvarande en tät kvarsittande form. Fall 5 utgörs av en mer komplex konstruktion enligt specificerat under en separat rubrik.

För att ge förutsättningar för att skapa så hög korrelation som möjligt för beräkningsmodellens fysiska uppbyggnad mellan de olika beräkningsverktygen har materialskikten av betong i WUFI och Sture REDSIT satts till samma tjocklek som den celltjocklek som skapats i KFX. Detta beroende på att KFX begränsas av maximalt 10 celler. I WUFI används totalt 100 celler och i Sture REDSIT 93 celler i utgångsläget. Antalet celler för respektive materialskikt i WUFI och Sture REDSIT varierar men överskrider vida det totala antalet celler som finns tillgängliga i KFX.

Nedan illusteras den fysiska beräkningsmodellen samt materialtjocklekar för WUFI och Sture REDSIT respektive KFX.



Figur 1. Fysisk modelluppbyggnad och materialskikt för fall 1 samt skillnader mellan de olika beräkningsverktygen.

Omgivande klimat på ovan och undersidan av bjälklaget sätts till 20 °C och 50 % relativ fuktighet.

I KFX och Sture REDSIT ansätts tätheten på kvarsittande form i botten till oändligt tät. I WUFI ansätts istället ett mycket tätt ytskikt motsvarande ett membran om Sd = 1 000 000 m. Ovansidan av konstruktionen ansätts ett ytövergångsmotstånd/ytskikt med Sd = 0,0075 m motsvarande Z = 300 s/m. Värmeytövergångsmotstånd vid ytan har försummats i samtliga beräkningsverktyg och beräkningsmodeller.

Fall 1 - 4 beräknades huvudsakligen av fyra personer varav en med KFX, två med WUFI och en med Sture REDSIT.

Utgångspunkten var att utföra beräkningarna för en betong med vct 0,5 och baserad på Hedenblads materialdata (Hedenblad, 1996, Materialdata för fukttransportberäkningar, T19:1996 ISBN 91-540-5766-3). För att erhålla korrelation mellan beräknade resultat behövdes dock materialdata för sorptionskurva och fukttransportkoefficient justeras. Avvikelser och justeringar i syfte att erhålla korrelation mellan beräknad och uppmätt data redovisas för respektive fall.

Utgångspunkten är att samtliga beräkningar startar med en rak fuktprofil igenom konstruktionen på 90 % relativ fuktighet. Då 90 % relativ fuktighet i beroende på sorptionskurvans specifika utformning i vissa fall har motsvarat olika ”start”-fukthalt redovisas detta separat för respektive fall enligt nedan.

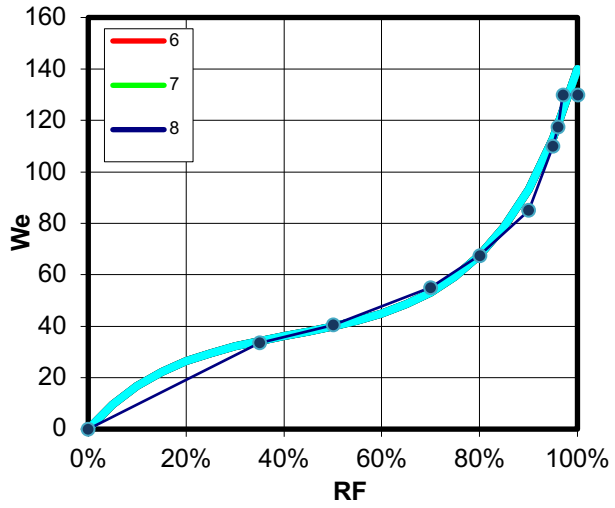
I beräkningsverktyget WUFI och har de materialdata som inte beaktas i KFX och Sture REDSIT ansatts enligt nedan:

- Skrymdensitet = 2308 kg/m^3
- Porositet= 0,15 m^3/m^3
- Specifik värmekapacitet = 850 J/kgK
- Värmeledningsförmåga = 1,7 W/mK (ingen fuktberoende värmeledningsförmåga har ansatts)
- All fukttransport beror av diffusionsmotstånd varför vätsketransportkoefficienter = 0.
- Svag linjärt temperaturberoende värmeledningsförmåga (- 20 °C - 1,694 W/mK / 80 °C – 1,741 W/mK)
- Entalpi = 0

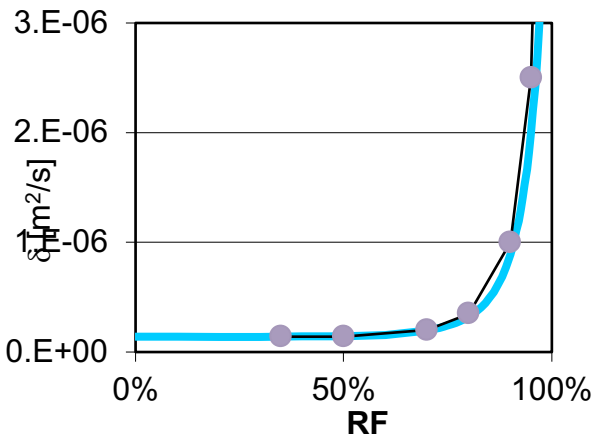
3.2 Fall 1

3.2.1 Fall 1 – Basmodell, specifik indata och startvillkor

För fall 1, det första fall som beräknades, har specifik materialdata för sorptionsisoterm och diffusionsmotstånd enligt nedan använts. Fall 1 har primärt beräknats med WUFI och KFX.



Figur 2. Sorptionsisoterm för WUFI (svart styckvis linjär interpolation mellan svarta punkter) och KFX (turkos) för fall 1. Sorptionsisotermen för REDIST liknar isotermen för KFX.



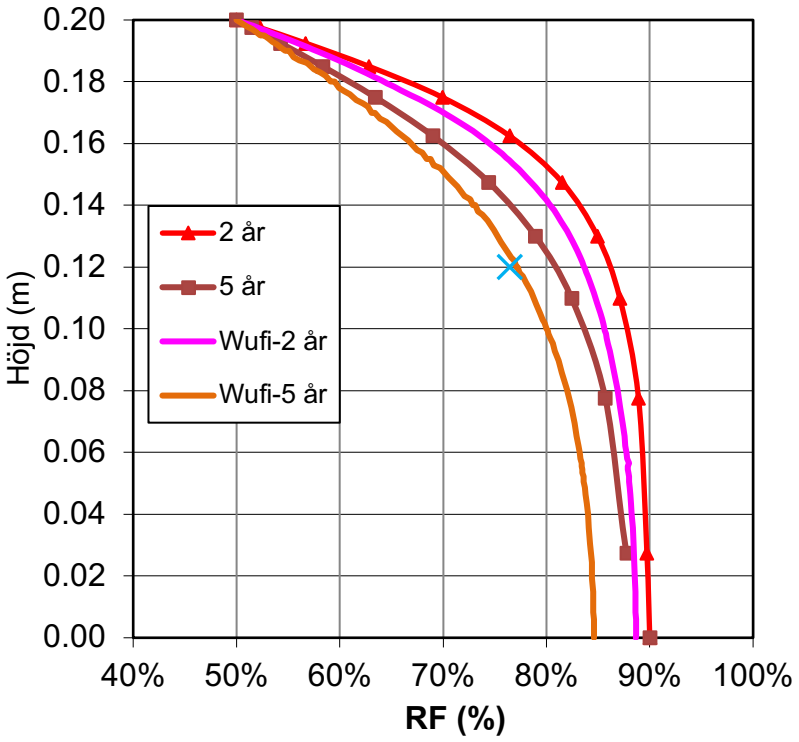
Figur 3. Fuktberoende diffusionsmotstånd för WUFI (svart styckvis linjär interpolation mellan lila punkter) och KFX (blå) för fall 1. Sorptionsisotermen för Sture REDIST liknar isotermen för KFX.

Då programvarorna ger olika förutsättningar för att hantera sorptionskurvans exakta utseende har detta i fall 1 gjort att samma RF gett olika initialt vatteninnehåll enligt nedan.

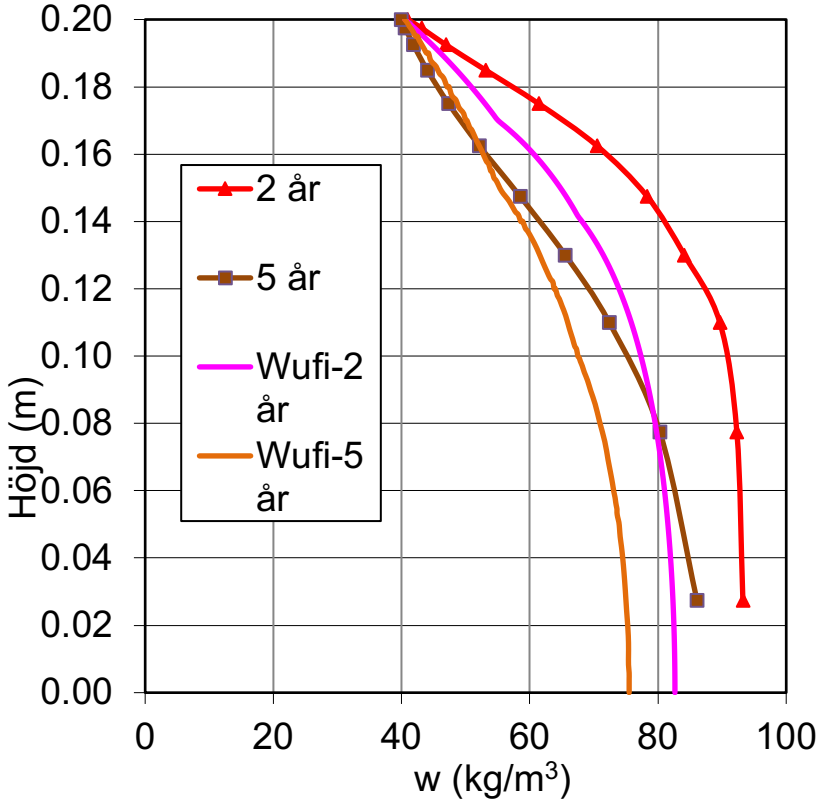
- RF 90 % i WUFI motsvarar 85,00 kg/m^3 enligt figur 2
- RF 90% i KFX och Sture REDSIT motsvarar 93,24 kg/m^3 enligt figur 2

3.2.2 Fall 1 – Resultat

Nedan redovisas en fuktproil för RF och vatteninnehåll efter 2 respektive 5 års tid beräknade med WUFI och KFX. Vidare redovisas beräknad RF på ekvivalent mätdjup efter 5 år för Sture REDSIT.



Figur 4. Beräknad fuktprofil (%) efter två år med KFX (röd) respektive WUFI (rosa). Beräknad fuktprofil efter fem år med KFT (mörkbrun) respektive WUFI (ljusbrun) samt beräknad RF på ekvivalent mätdjup, 40 % av totala tjockleken, med Sture REDSIT (turkost kryss).



Figur 5. Beräknat vatteninnehåll (kg/m^3) efter två år med KFX (röd) respektive WUFI (rosa). Beräknat vatteninnehåll efter fem år med KFT (mörkbrun) respektive WUFI (ljusbrun).

Avlästa värden för ekvivalent mätdjup enligt RBK metoden på 40 % av totala tjockleken från ytan efter 2 år respektive 5 års uttorkning.

Tabell 1. Beräknad relativ fuktighet på ekvivalent mätdjup efter 2 respektive 5 års uttorkning.

	RF på ekvivalent mätdjup	
	2 år	5 år
KFX	86,0 %	80,6 %
Sture REDSIT	-	78,8 %
WUFI	84,0 %	77,1 %

3.2.3 Fall 1 – Diskussion och felanalys

Även om det finns likheter i uttorkningstrenden så är de avikelser i resultatet från de olika beräkningsverktygen som redovisas i figur 4 och 5 samt i tabell 1 förhållandevis stora. Resultaten i figur 4 och 5 indikerar på en likvärdig trend för uttorkning och fuktprofilen för de olika beräkningsverktygen där ytan som förväntat torkar snabbare jämfört med djupare ner i betongbjälklaget.

För den icke insatte skulle en skillnad på ca 2 % på ekvivalent mätdjup kunna te sig som förhållandevis liten. I det specifika fallet där intentionen varit att få enhetlig indata är en avvikelse på 2 % på ekvivalent mätdjup enligt tabell 1 att beakta som förhållandevis stor. Vidare avviker profilerna för vatteninnehåll och relativ fuktighet enligt figur 4 och 5 från varandra på ett signifikant sätt.

Betydelsen av 2 % högre relativ fuktighet på ekvivalent mätdjup skulle i ett tillämpat perspektiv för ett verkligt projekt i en mycket grov uppskattning t.ex. kunna antas motsvara 2 månaders uttorkningstid. Med reservation för mängder av kringliggande faktorer har ett vanligt projekt med en entreprenadsumma på ca 200 miljoner, motsvarande nyproduktion av ca 70 lägenheter, fasta kostander på cirka 2 miljoner per månad. I praktiken kan en felkalkyl på 2 % relativ fuktighet således kunna motsvara ca 4 miljoner. Vid en förlängs uttorkningstid som ger en försening och vitesföreliggande där vitet normalt motsvarar 2 % av entreprenadsumman/vecka skulle bara vitet kunna uppgå till ca 32 miljoner.

Sammanfattningsvis kan det konstateras att även om uttorkningsförloppet visar på en liknande trend är resultaten enligt figur 4 och 5 inte acceptabla och orsaken till avvikelserna måste fastställas.

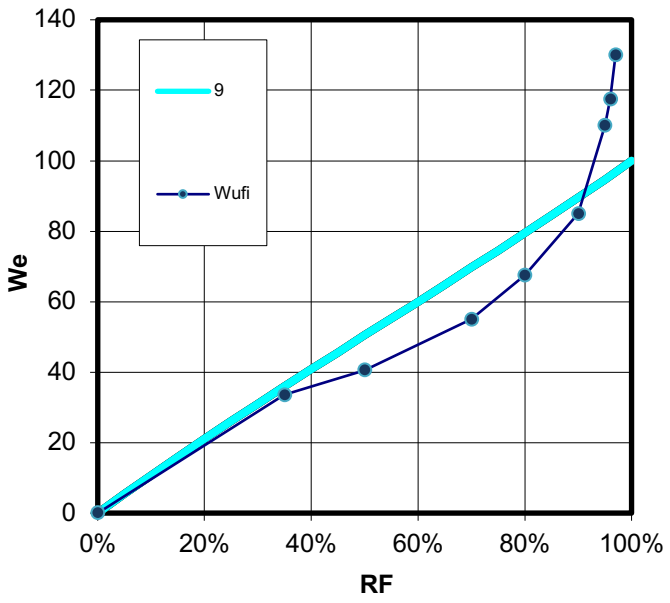
4 Fall 2

4.1 Fall 2 – Justeringar i specifik indata och startvillkor

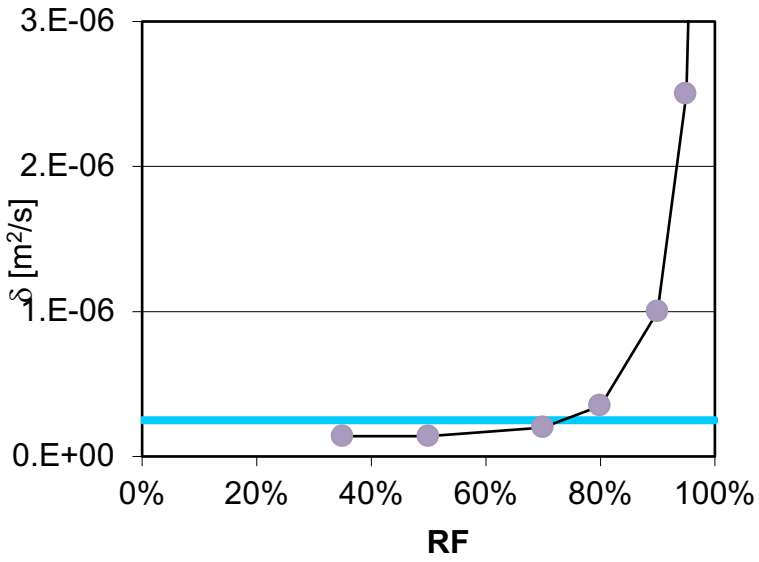
I syfte att erhålla korrelation mellan de olika beräkningsverktygen efter misslyckanet i fall 1, enligt figur 4 och 5, har förenklingar och justeringar i materialdata gjorts för att denna ska efterlikna varandra i en ännu högre grad jämfört fall 1, figur 2 och 3, vid beräkning i de tre olika verktygen. Anpassningen och justeringen av materialdatan har skett i en iterativ process mellan de tre beräkningsverktygen dels för att erhålla acceptabel överensstämmelse för samma beräkning i de olika verktygen men även övervinna den svårighet som föreligger i att kunna applicera helt överensstämmande materialdata i samtliga tre beräkningsverktyg samtidigt.

I syfte att erhålla ännu större överensstämmelse i materialdata som applicerades i de tre olika beräkningsverktygen ansattes en linjär sorptionsisoterm enligt figur 6 och ett konstant, icke fuktberoende, ångenomsläpplighet för den betong som beräkningen utförs på. Notera att det inte

var möjligt att utforma en helt exakt linjär sorptionsisoterm i KFX och Sture REDSIT varför det kvarstår en mindre avvikelse i ansatt initialt vatteninnehåll för 90 % RF.



Figur 6. Linjär sorptionsisoterm (turkos) som använts för beräkning i fall 2 i samtliga beräkningsverktyg, jämfört med sorptionsisoterm som använts i WUFI i fall 1. (Använd linjära sorptionsisoterm RF 0 % = w 0 kg/m^3, RF 100 % = w 100 kg/m^3)



Figur 7. Konstant ånggenomsläpplighet (turkos) δ = 2,5*10^{-7} motsvarande my = 100 som använts för beräkning i fall 2 i samtliga beräkningsverktyg, jämfört med förutsättningarna för ånggenomsläpplighet som använts i WUFI i fall 1. (RF 0 % = diffusionsmotstånd/ my = 100, RF 100 % = diffusionsmotstånd/ my = 100)

Initialt ansatt vatteninnehåll vid omfördelningsberäkningens start enligt fall 1 satt till 90 % vilket motsvarar vattenhinnehåll enligt nedan.

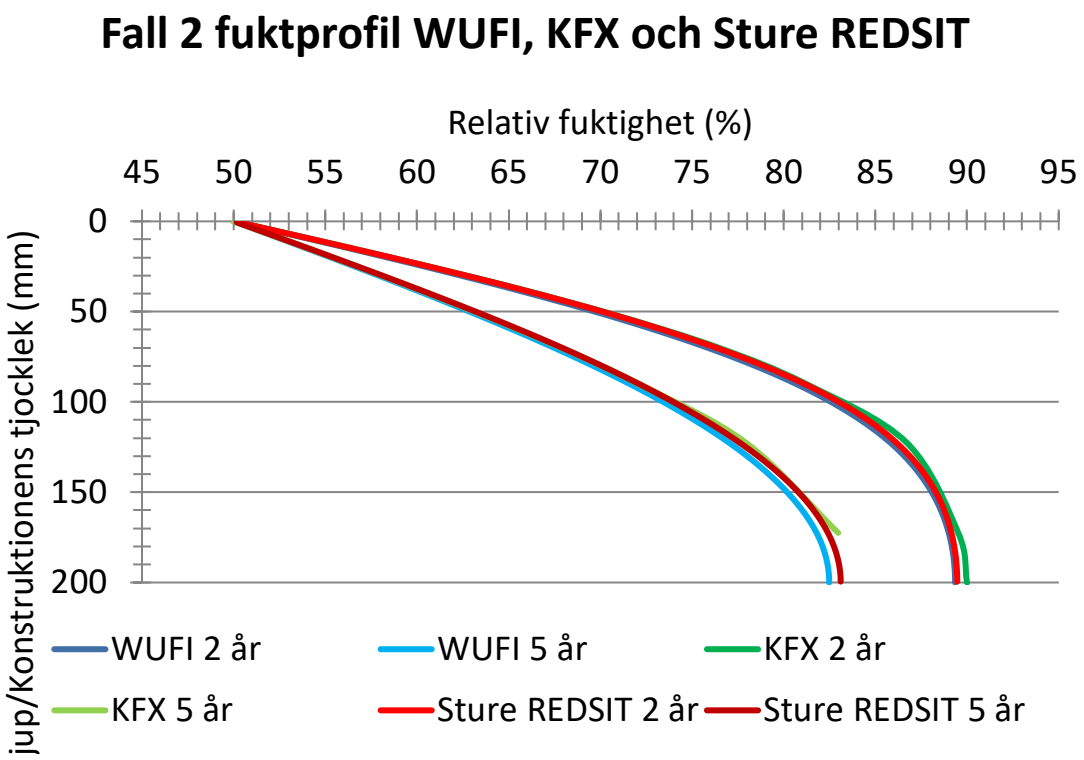
- RF 90 % i WUFI och Sture REDSIT motsvarar 90,00 kg/m^3 enligt figur 6
- RF 90 % i KFX motsvarar 89,5 kg/m^3

Skillnaden i initialt vatteninnehåll beror av att KFX sorptionskurva skapas genom kurvpassning i tre punkter och en helt linjär sorptionskurva därför inte är möjlig att skapa i KFX. Detta är egentligen en begräsning i WUFI men som hanterades i KFX och Sture REDSIT. Trots stora ansträngningar kvarstår således vissa skillnader i applicerad materialdata för de olika beräkningsverktygen.

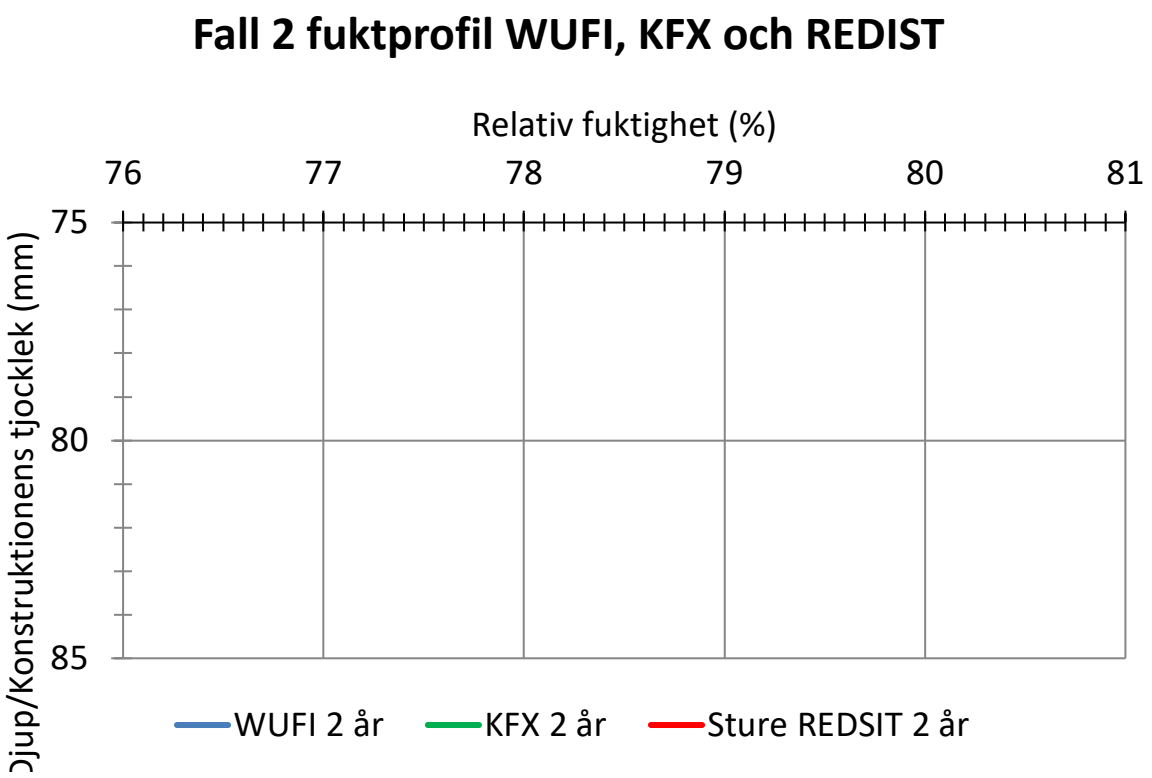
För fall 2 har även cellstorlekens och cellutformningens betydelse studerats. Beräkningar i programvaran Sture REDSIT utförts med dels 31 beräkningsceller och dels med 93 beräkningsceller i syfte att studera eventuella skillnader i resultatet beroende på antalet beräkningsceller. Motsvarande antal celler i KFX är 10 celler och i WUFI 100 celler enligt fall 1. För KFX har betydelsen av beräkningscellernas form testats med dels graderade celler och dels jämna celler.

4.2 Fall 2 – Resultat

Nedan redovisas en fuktproil för RF och vatteninnehåll efter 2 respektive 5 års tid beräknade med WUFI, KFX och Sture REDSIT.

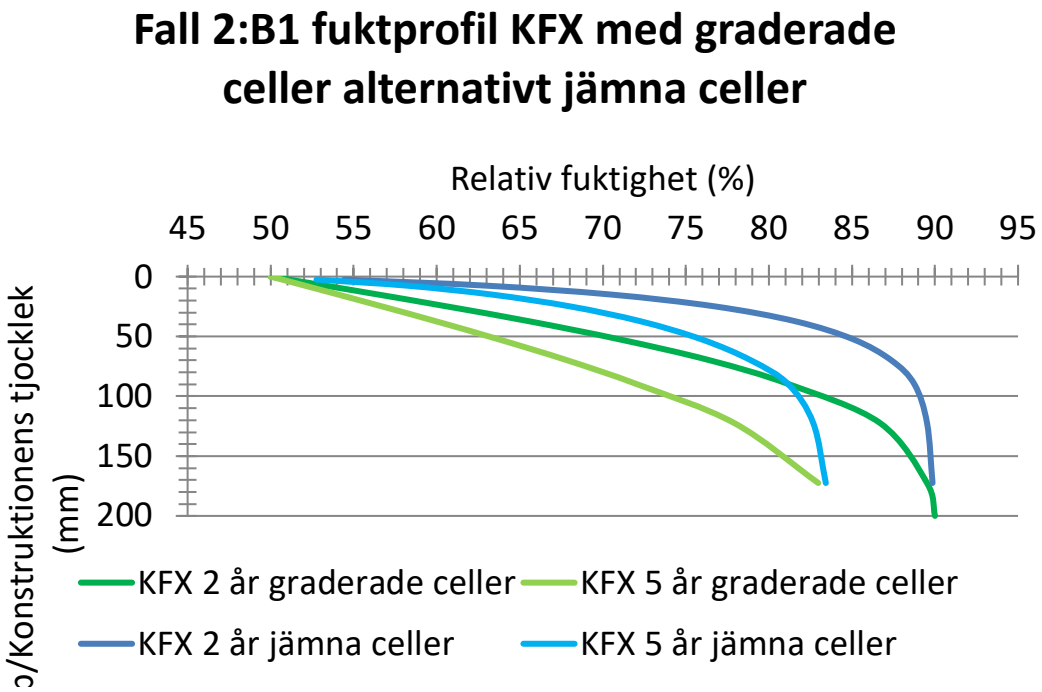


Figur 8. Beräknad fuktprofil (%) efter 2 år med WUFI (mörkblå), KFX (mörkgrön) och Sture REDSIT (mörkröd) Beräknad fuktprofil efter 5 år med WUFI (turkos), KFX (ljusgrön) och Sture REDSIT (röd).



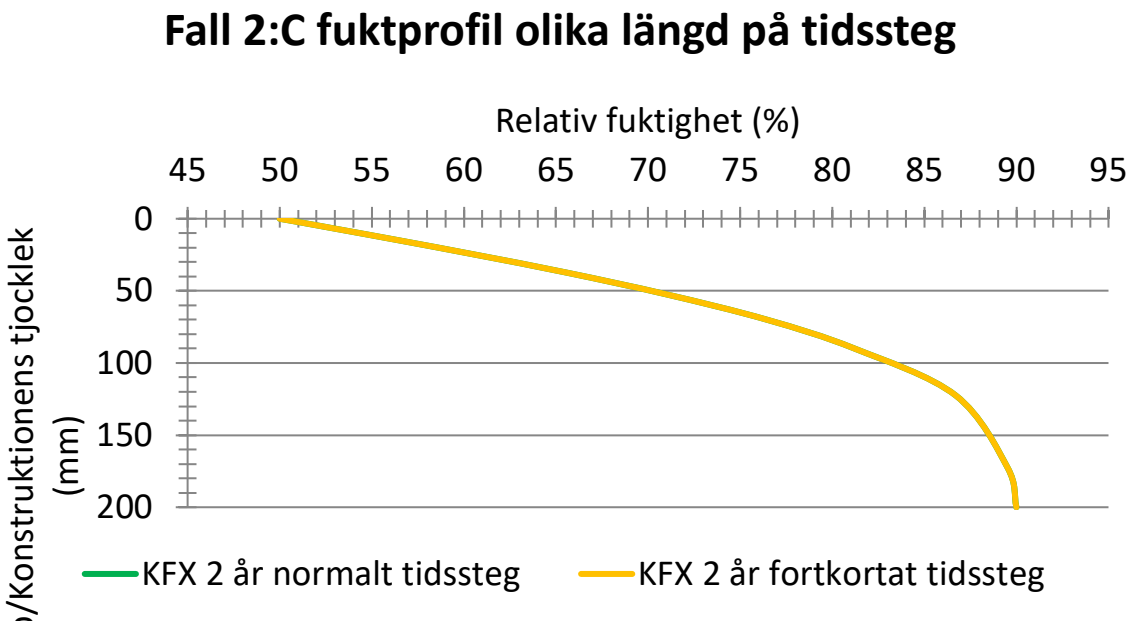
Figur 9. Förstorad del kring ekvivalent mätdjup 80 mm efter 2 års för WUFI (mörkblå), KFX (mörkgrön), Sture REDSIT (mörkröd).

Nedan redovisas en jämförelse för samma beräkning utförd i KFX med skillnaden att i två av fallen är det graderade celler och två av fallen är det jämt fördelade celler



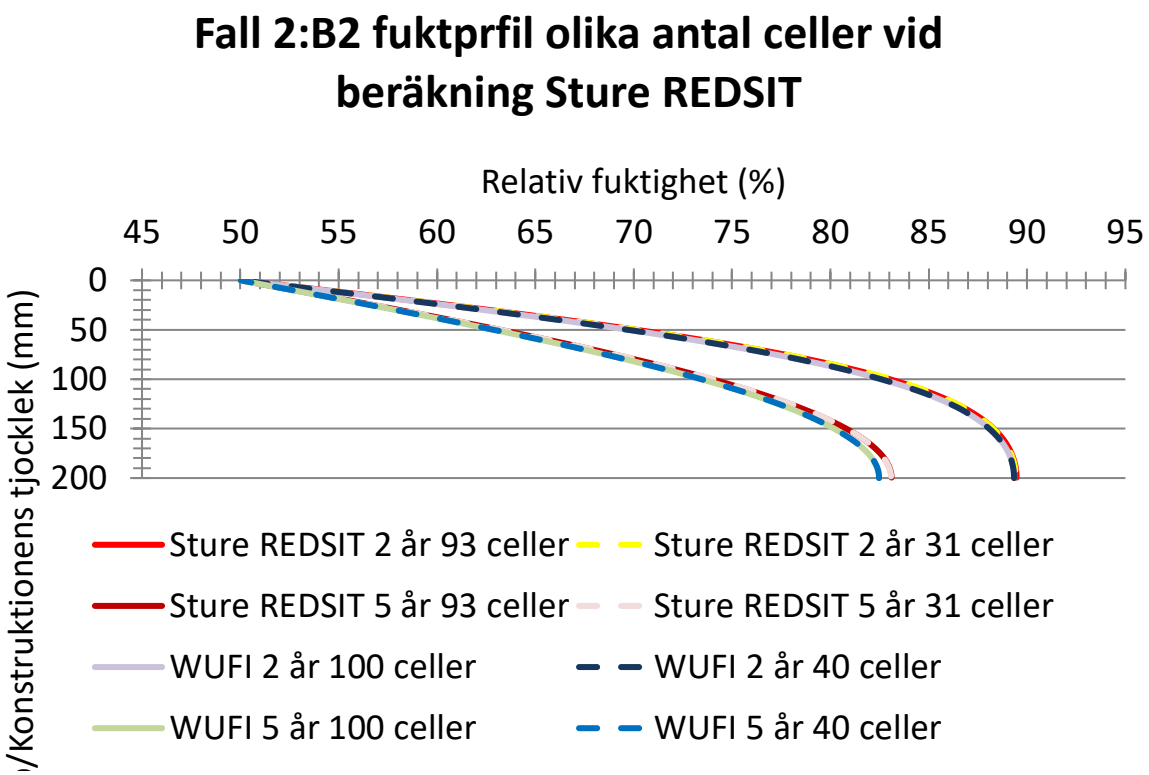
Figur 10. Skillnader i beräkningsresultat om graderade eller jämna celler använts i KFX. KFX 2 år graderade celler (mörkgrön), KFX graderade celler 5 år (ljusgrön), KFX jämnt jämna celler 2 år (mörkblå), KFX jämnt fördelade celler 5 år (turkos).

Nedan redovisas beräkningar i KFX med varierad längd på tidsstegen i beräkningen.



Figur 11. Beräkning med olika tidssteg i KFX. Normalt tidssteg (grön) och förkortat tidssteg (gul). Notera att linjerna ligger på varandra varvid den gula linjen täcker den gröna.

Nedan redovisas beräkningar med olika antal celler, 31 respektive 93, i Sture REDSIT.



Figur 12. Beräkning med Sture REDSIT och WUFI med olika antal celler. Sture REDSIT 2 år och 31 celler (streckad gul), 2 år och 93 celler (röd), 5 år och 31 celler (streckad ljusröd), 5 år och 93 celler (mörkröd). WUFI 2 år och 40 celler (streckad mörkblå), 2 år och 100 celler (ljuslila), 5 år och 40 celler och 5 år (streckad blå) och 5 år 100 celler (grön). Notera att linjerna ligger ovanpå varandra.

4.3 Fall 2 - Diskussion och felanalys

Justeringar där enklare och ännu mer exakt överensstämmande materialdata använts i de tre beräkningsverktygen ger bättre korrelation mellan de beräknade fuktprofilerna enligt figur 8 och 9. Största differensen är mellan WUFI och KFX där resultatet för KFX ger ett högre RF jämfört med WUFI. Resultaten från Sture REDSIT ligger mellan WUFI och KFX. Största avvikelsen mellan WUFI och KFX är på 0,84 % enheter och uppstår på djup över 120 mm ner i betongen. Vid ekvivalent mätdjup om 80 mm från ytan skiljer det 0,575 % mellan WUFI och KFX efter 2 år. Den något lägre start vattenmängd som applicerats i KFX är sannolikt inte orsaken till differensen.

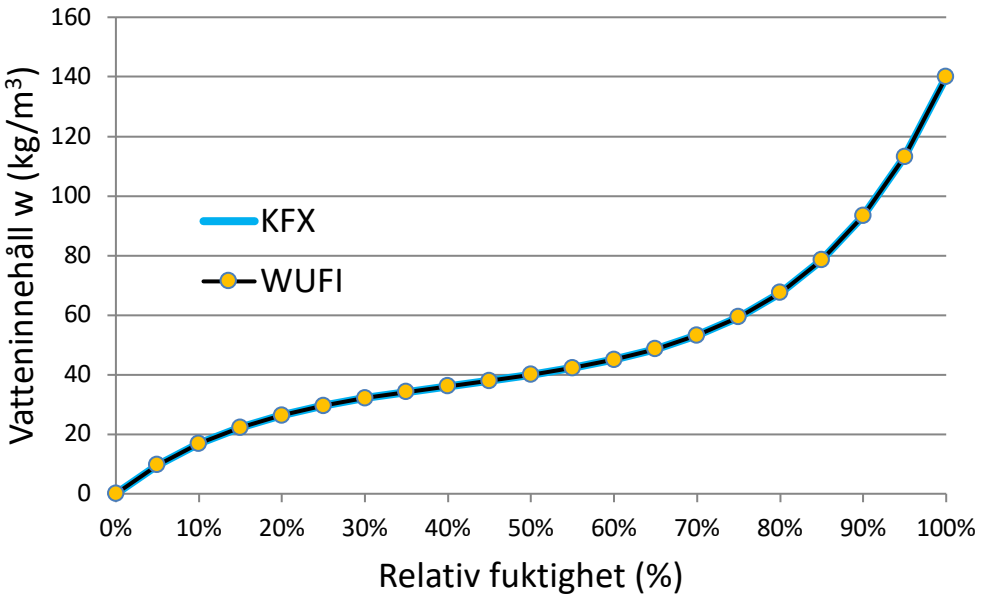
Jämförelse mellan resultaten i fall 1, figur 4 och fall 2, figur 8 och 9, visar att precisionen i överensstämmande materialdata påverkar resultatet på ett sätt som inte bör negligeras. Även mindre skillnader i hur indata appliceras i beräkningsverktygen påverkar resultatet även om dessa skillnader skulle kunna antas vara små.

För KFX med 10 celler är det av stor betydelse för resultatet om graderade eller jämnt fördelade celler används enligt figur 10. Däremot noteras ingen betydande skillnad om normalt eller kort tidssteg används i KFX enligt figur 11. För Sture REDSIT och WUFI föreligger ingen signifikant skillnad om 31 celler eller 93 celler respektive 40 eller 100 celler används vid beräkningen enligt figur 12.

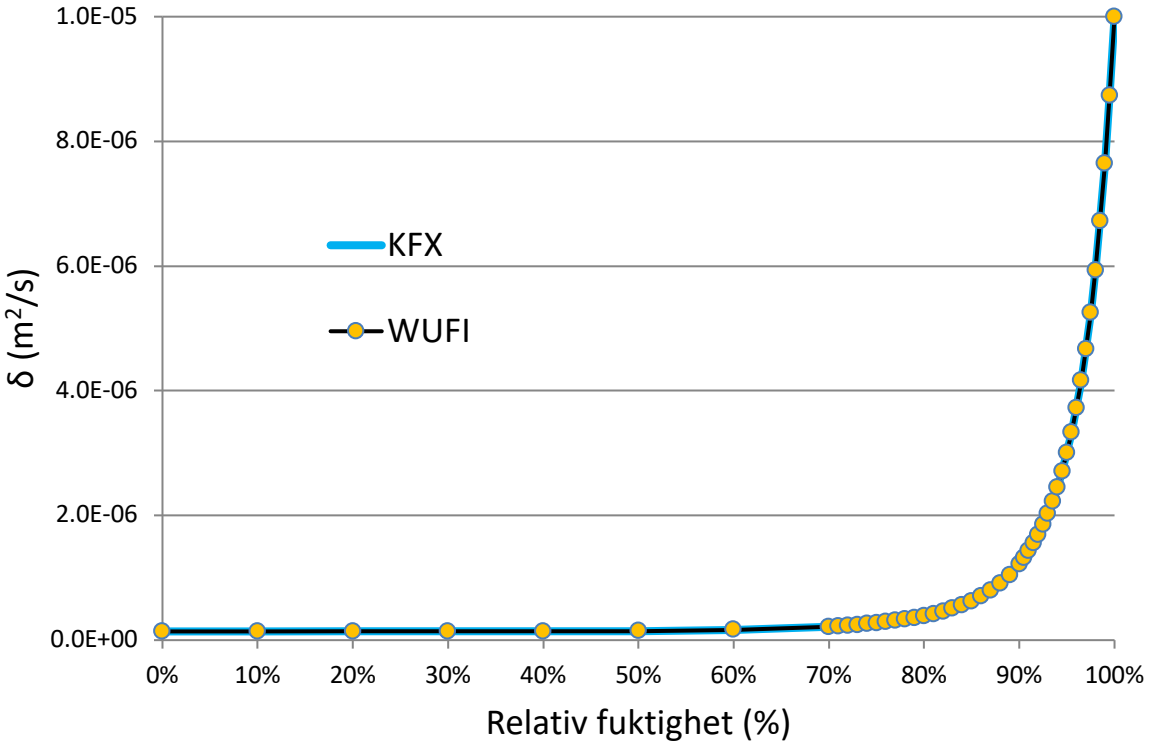
5 Fall 3

5.1 Fall 3 – Justeringar i specifika indata och startvillkor

I fall 3 utfördes med en syntetisk framtagen materialdata med kurvformad sorptionsisoterm och kurvformat ånggenomgångsmotstånd, dvs mer verklighetsanpassad materialdata. För att erhålla bättre överensstämmelse jämfört fall 1 utfördes en mycket tätare styckvis linjär interpolation mellan punkterna i WUFI hämtat från en sorptionsisoterm och fukttransportkoefficienten i KFX. Anpassningen till WUFI genom styckvis linjära interpolationen mellan punkter skedde för sorptionsisotermen i intervall om 5 % och för fukttransport koefficienten i interall om 0,5 % mellan 100 – 90 % RF, intervall om 1 % mellan 90 – 70 % och fortsättningsvis intervall om 10 % från 70 % enligt figur 13 och 14 nedan. Skillnader mellan KFX och Sture REDSITs algoritmer för kurvformering gör att perfekt korrelation mellan sorptionsisotermen och fukttransportkoefficienten inte kan erhållas på ett enkelt sätt.



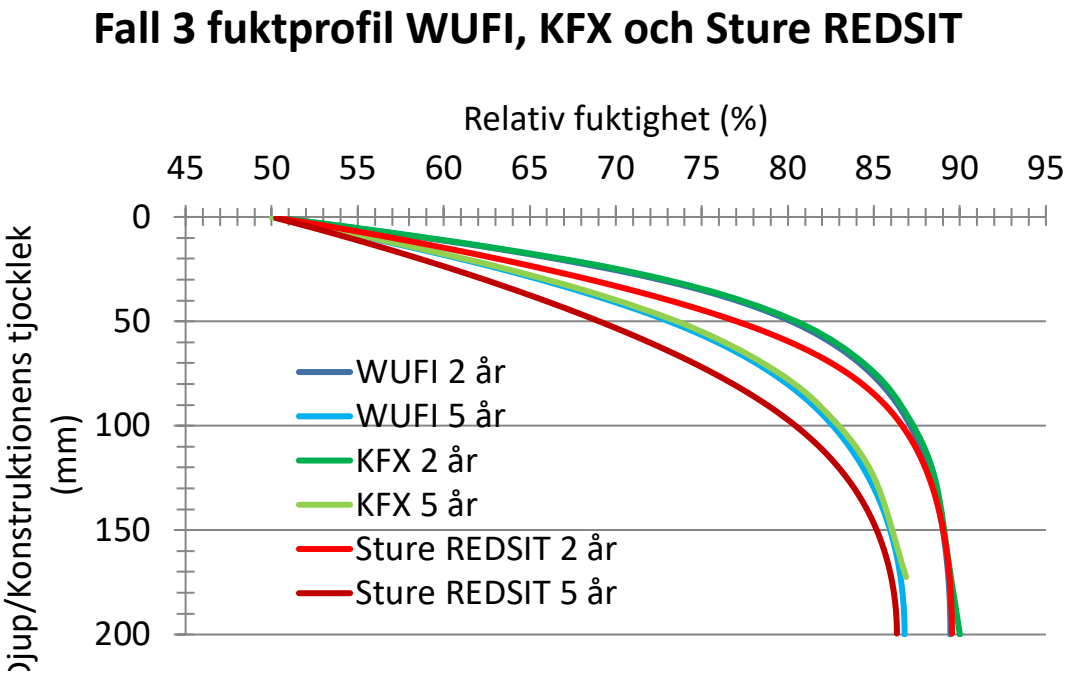
Figur 13. Sorptionsisoterm KFX (turkos) och WUFI (svart med gul cirkel).



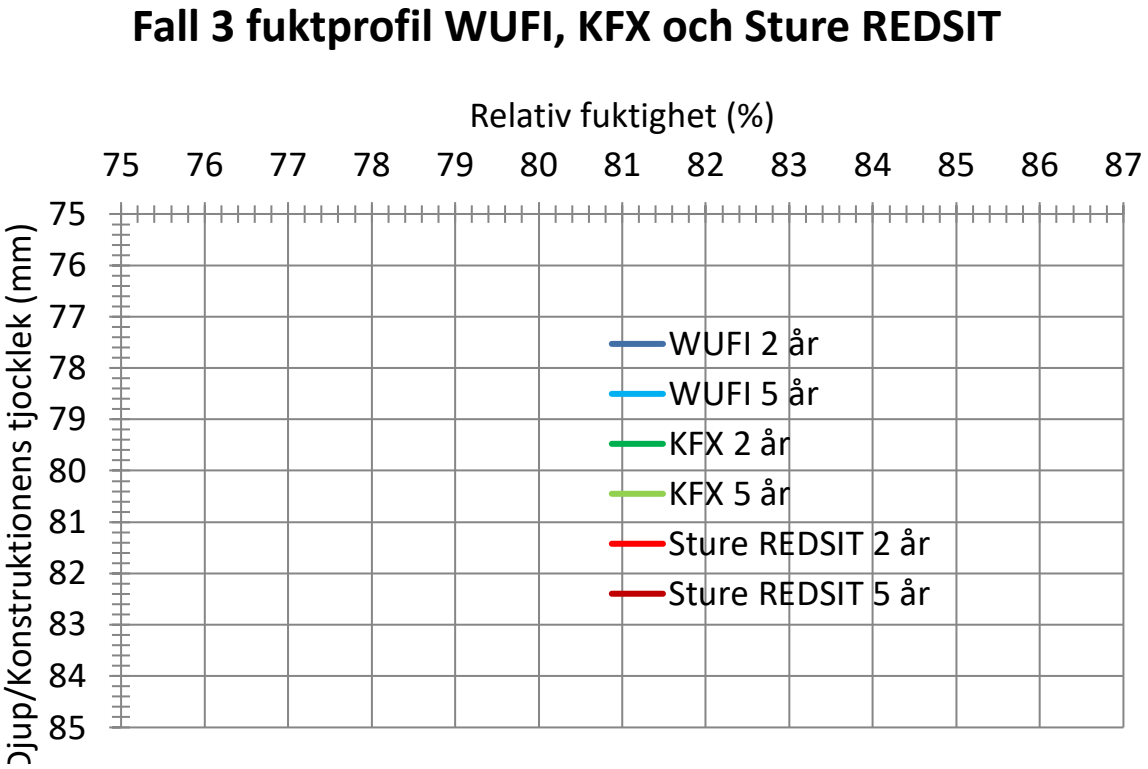
Figur 14. Sorptionsisoterm KFX (turkos) och WUFI (svart med gul cirkel).

5.2 Fall 3 – Resultat

Nedan redovisas beräknad fuktprovil efter 2 respektive 5 år med de tre beräkningsverktygen.



Figur 15. Beräknad fuktprofil (%) efter 2 år med WUFI (mörkblå), KFX (mörkgrön) och Sture REDSIT (mökröd) Beräknad fuktprofil efter 5 år med WUFI (turkos), KFX (ljusgrön) och Sture REDSIT (röd).



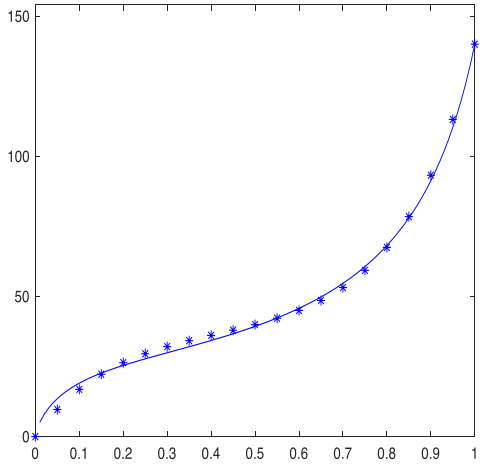
Figur 16. Förstorad del kring ekvivalent mätdjup 80 mm efter 2 års för WUFI (mörkblå), KFX (mörkgrön), Sture REDSIT (mörkröd).

Tabell 2. Beräknad relativ fuktighet på ekvivalent mätdjup efter 2 respektive 5 års uttorkning.

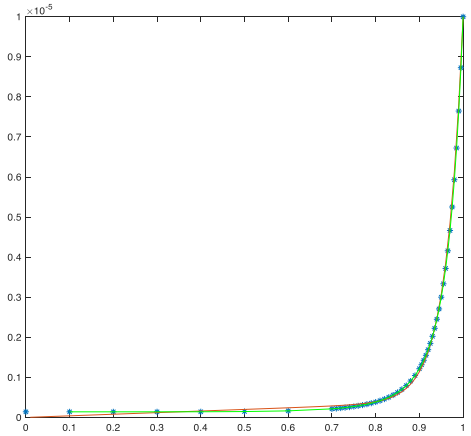
	RF på ekvivalent mätdjup	
	2 år	5 år
KFX	85,48 %	80,17 %
Sture REDSIT	84,31 %	76,81 %
WUFI	85,43 %	79,97 %

5.3 Fall 3 – Diskussion och felanalys

En mycket tätare styckvis linjär interpolation mellan punkterna med en högre överensstämmelse för sorptionsisotermen och fukttransportkoefficienten mellan WUFI och KFX ger en bra korrelation mellan beräknat resultat med en avvikelse på ca 0,05 – 0,20 %. Resultaten från Sture REDSIT avviker med över 1 % på ekvivalent mätdjup efter 2 år och ca 3 – 3,5 % efter 5 år. Avvikelsen av beräknade värden för Sture REDSIT antas bero på skillnaden som uppstått i att få enhetlig materialdata för de variabla sorptionsisotermen och fukttransportkoefficienten.

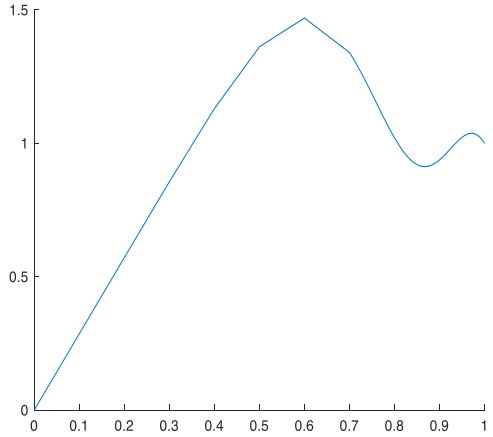


Figur 17. Skillnader i använd sorptionsisoterm. Punkterna avser sorptionsisotermen som skapats genom linjär styckvis interpolation i WUFI och genom kurvpassning i KFX. Blå linjen visar sorptionsisotermen som använts vid beräkning i Sture REDSIT.



Figur 18. Skillnader i använd fukttransportkoefficient Punkterna avser fukttransportkoefficienten som skapats genom linjär styckvis interpolation i WUFI och genom kurvpassning i KFX. Röd linje avser den fukttransportkoefficient som använts vid beräkning i Sture REDSIT i fall 3. Grön linje avser en förbättrad fukttransportkoefficient som använts vid beräkning med Sture REDSIT i fall 4.

Även om skillnaderna mellan sorptionskurvorna och fukttransportkoefficienterna spontant kan uppfattas som obetydliga visar en plottning av kvoten mellan fukttransportkoefficienten i KFX och Sture REDSIT på en förhållande vis stor skillnad enligt redovisat i figur 19.



Figur 19. Kvoten mellan använd fukttransportkoefficient som använts vid beräkning i KFX och i Sture REDSIT.

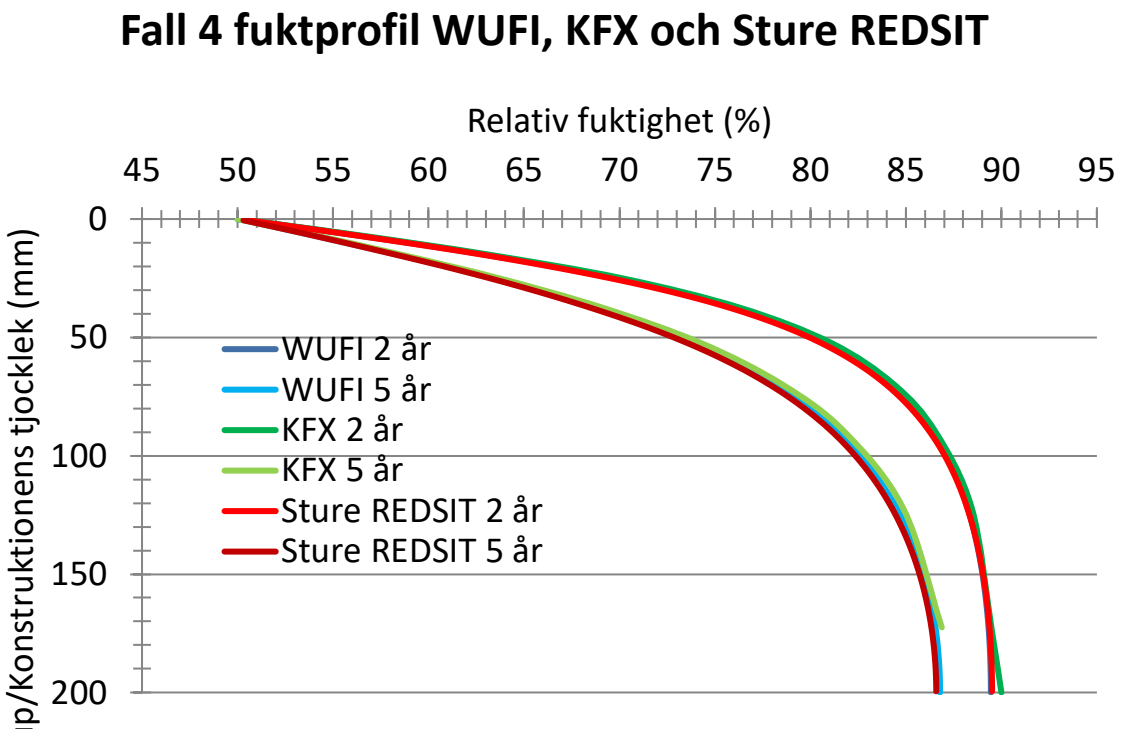
6 Fall 4

6.1 Fall 4 – Justeringar i specifik indata och startvillkor

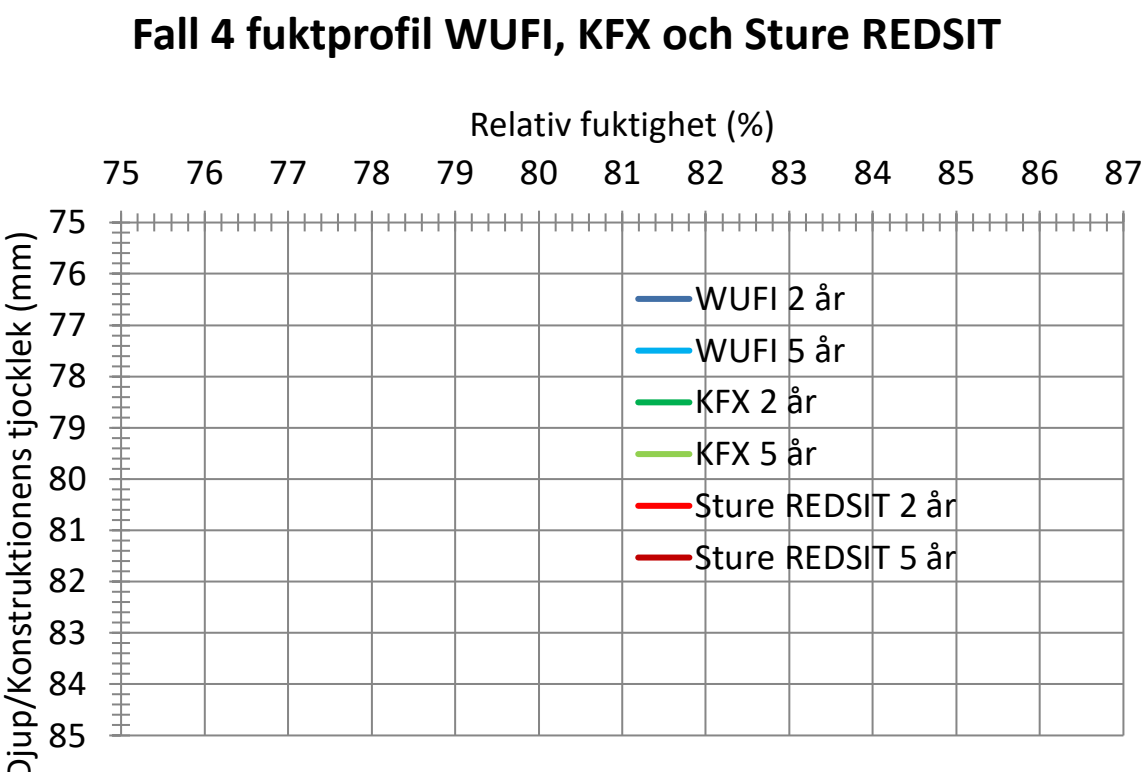
I fall 4 justeras sorptionsisotermen och fukttransportkoefficienten i Sture REDSIT för bättre överensstämmelse med KFX och WUFI enligt fall 3.

6.2 Fall 4 – Resultat

Nedan redovisas beräknad fuktprofil efter 2 respektive 5 år med de tre beräkningsverktygen.



Figur 15. Beräknad fuktprofil (%) efter 2 år med WUFI (mörkblå), KFX (mörkgrön) och Sture REDSIT (mökröd) Beräknad fuktprofil efter 5 år med WUFI (turkos), KFX (ljusgrön) och Sture REDSIT (röd).



Figur 16. Detaljerad del av beräknad fuktprofil på djupet kring ekvivalent mätdjup 80 mm efter 2 års för WUFI (mörkblå), KFX (mörkgrön), Sture REDSIT (mörkröd).

Tabell 3. Beräknad relativ fuktighet på ekvivalent mätdjup efter 2 respektive 5 års uttorkning.

	RF på ekvivalent mätdjup	
	2 år	5 år
KFX	85,48 %	80,17 %
Sture REDSIT	85,26 %	79,68 %
WUFI	85,43 %	79,97 %

6.4 Fall 4 – Diskussion och felanalys

Genom ytterligare justering i materialdata samt viss anpassning i beräkningsverktygen har korrelation erhållits för beräknat resultat med materialparameterar som kan förväntas i verkligheten. Avvikelserna i resultatet mellan de olika beräkningsverktygen har för fall 4 med ytterligare justeringar i indata kunnat fastställas till ca 0,22 % efter två år samt 0,49 % efter 5 år på ekvivalent mätdjup.

7 Resultat och beräkningsprocess – Fall 5 komplex modell

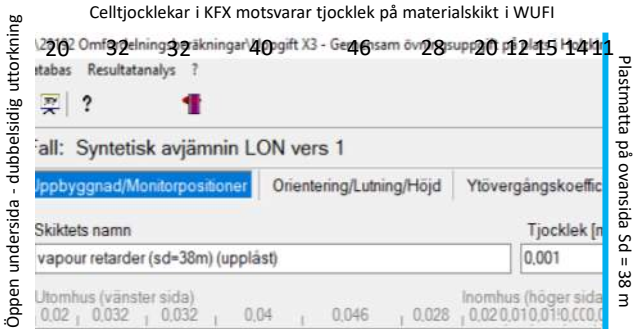
7.1 Modell, materialdata samt start- och randvillkor

Efter den första grundläggande kalibreringen har en mer komplex beräkningsmodell skapats. Denna baseras på ett verkligt fall med en konstruktion med flera olika materialskikt.

I fall 5 studeras en konstruktion med dubbelsidig uttorkning, 220 mm betong, 30 mm avjämning och en ovanpåliggande plastmatta Sd = 38 m enligt nedan specificerat.

För att ge förutsättningar för att skapa så hög korrelation som möjligt för beräkningsmodellens fysiska uppbyggnad mellan de olika beräkningsverktygen har materialskikten av betong och avjämning i WUFI generellt satts till samma tjocklek som den celltjocklek som skapats i KFX. Åtgärden beror som tidigare påtalats på att KFX begränsas av maximalt 10 celler. I WUFI används totalt 70 celler med en variation mellan 6 till 3 celler per materialskikt. I WUFI har också ytterligare ett materialskikt om 1 mm ansatts överst i avjämningen i syfte att användas vid beaktade av limfukt. Vidare har ett skikt med 1 mm ansatts överst i modellen för att skapa ånggenomgångsmotståndet som plastmattan gett upphov till. Detta motstånd kan även appliceras som ett separat tätskikt vid ytan.

I figur 17 nedan illusteras den fysiska beräkningsmodellen samt material tjocklekar för WUFI och KFX. I fall 5 har en initial fuktprofil applicerats i betongen enligt redovisat i figur 17. Avjämningsmassan bedöms vara jämt uttorkad till 60 % RF med tillägget att 100 g/m^2 limpfukt applicerats i det översta 1 mm tjocka skiktet i avjämningsmassan.



Figur 17. Fysisk modelluppbyggnad och materialskikt för fall 1 samt skillnader mellan de olika beräkningsverktygen.

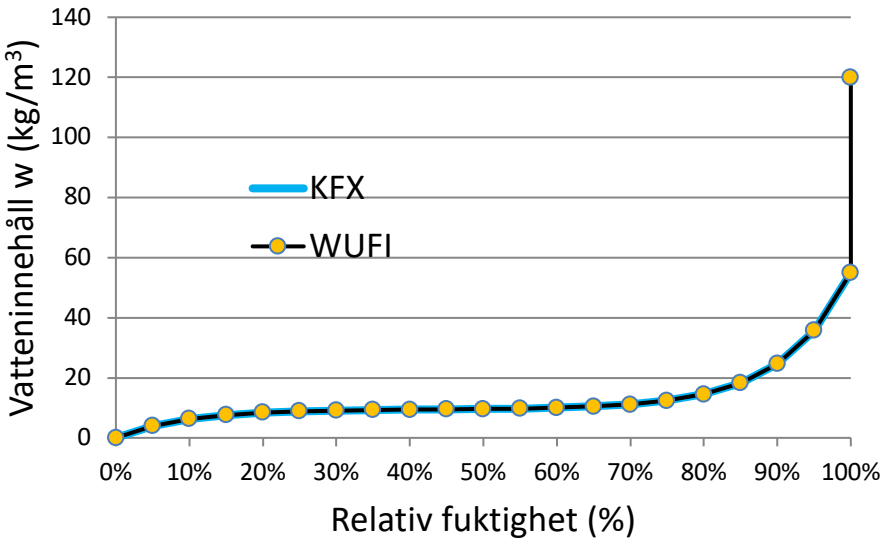
Omgivande klimat på ovan och undersidan av bjälklaget sätts till 20 °C och 50 % relativ fuktighet.

Ytövergångsmotståndet för såväl värme som diffusions genom den öppna undersidan och uttorkning nedåt försummas i samtliga beräkningsverktyg och beräkningsmodeller.

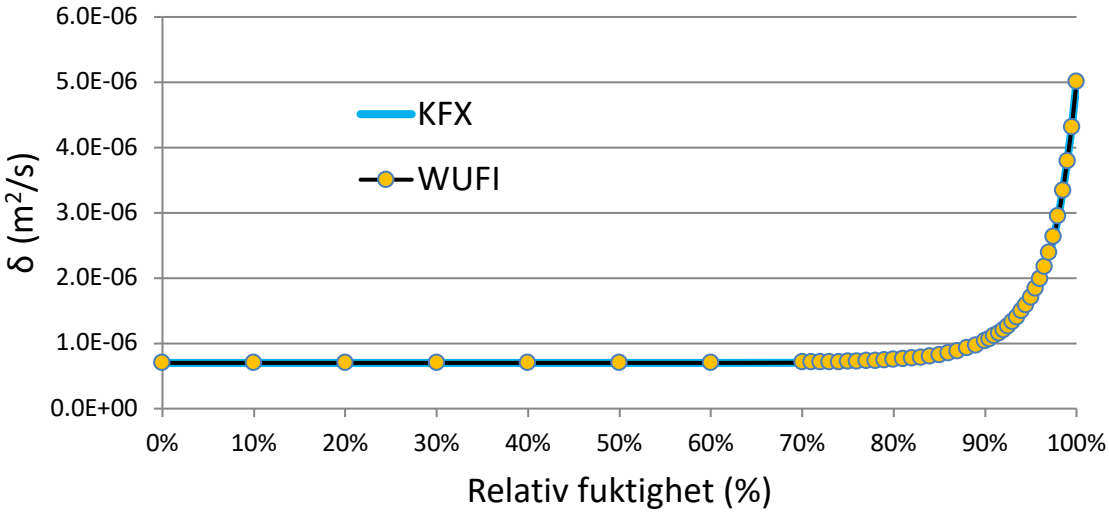
Baserat på erfarenheterna från fall 1 – 4 har syntetisk materialdata skapats i syfte att få så liktydig materialdata som möjligt när den appliceras i använda beräkningsverktyg.

Materialparametrar för den syntetiskt skapade betong vct 0,5 motsvarar de som använts och presenteras i fall 1 – 4 med sorptionsisoterm och fukttransportkoefficient enligt figur 13 och 14.

Sorptionsisotermen och fukttransportkoefficienten för den syntetiska avjämningsmassa som skapats specifikt för fall 5 redovisas i figur 18 och 19 enligt nedan. I enlighet med tidigare appliceras materialdatan genom kurvpassning i KFX och styckvis linjär interpolation mellan punkter i WUFI. För sorptionsisotermen i det översta skiktet i avjämningen har ett extra utrymme applicerats mellan 99,9 % och 100% för att kunna hantera vatten i form av limfukt som appliceras i beräkningsmodellen.



Figur 18. Sorptionsisoterm för WUFI (svart styckvis linjär interpolation mellan svarta punkter) och KFX (turkos) för fall 5.



Figur 19. Fuktberoende diffusionsmotstånd för WUFI (svart styckvis linjär interpolation mellan lila punkter) och KFX (blå) för fall 5.

I beräkningsverktyget WUFI och har den materialdata för avjämning som inte beaktas i KFX ansatts enligt nedan:

- Skrymdensitet = 1728 kg/m^3
- Porositet= 0,34 m^3/m^3
- Specifik värmekapacitet = 850 J/kgK
- Värmeledningsförmåga = 1,7 W/mK (ingen fuktberoende värmeledningsförmåga har ansatts)
- All fukttransport beror av diffusionsmotstånd varför vätsketransportkoefficienter = 0.
- Svag linjärt temperaturberoende värmeledningsförmåga (- 20 °C - 1,694 W/mK / 80 °C – 1,741 W/mK)
- Entalpi = 0

Plastmattan på konstruktionens ovansida har ansatts till 1 mm tjock med ett konstant icke fuktberoende Sd = 38 m vilket motsvarar Z = 1 450 000 s/m i KFX.

I beräkningsverktyget WUFI och har de materialdata för plastmattan som inte beaktas i KFX ansatts enligt nedan:

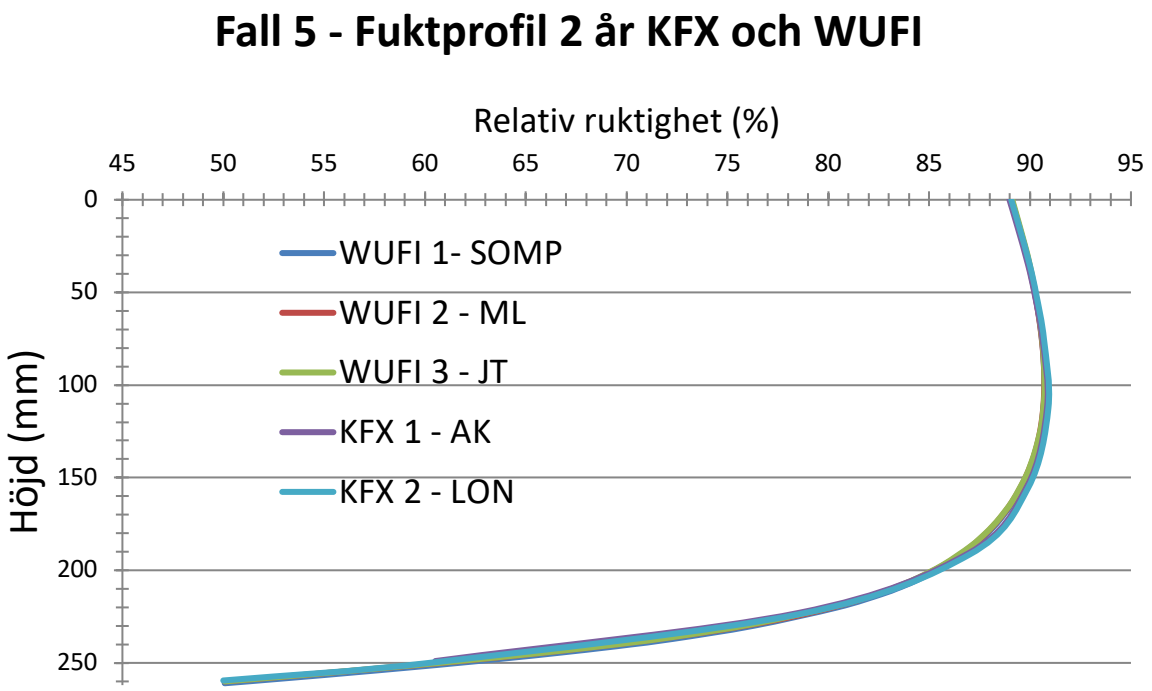
- Ingen sorptionsisoterm har ansatts för plastmattan
- Skrymdensitet = 130 kg/m^3
- Porositet= 0,001 m^3/m^3
- Specifik värmekapacitet = 2300 J/kgK
- Värmeledningsförmåga = 2,3 W/mK (ingen fuktberoende värmeledningsförmåga har ansatts)
- All fukttransport beror av diffusionsmotstånd varför vätsketransportkoefficienter = 0.
- Svag linjärt temperaturberoende värmeledningsförmåga (- 20 °C – 2,294 W/mK / 80 °C – 2,314 W/mK)
- Entalpi = 0

Fall 5 beräknades av fem personer, tre med WUFI och två med KFX.

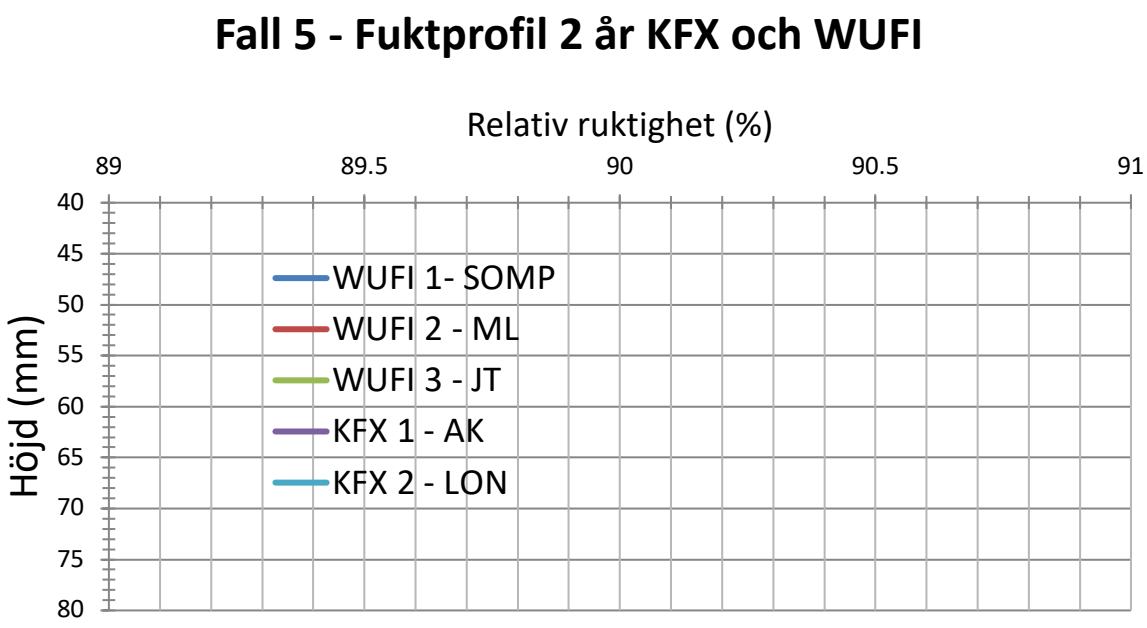
7.2 Fall 5

7.2.1 Fall 5 – Resultat

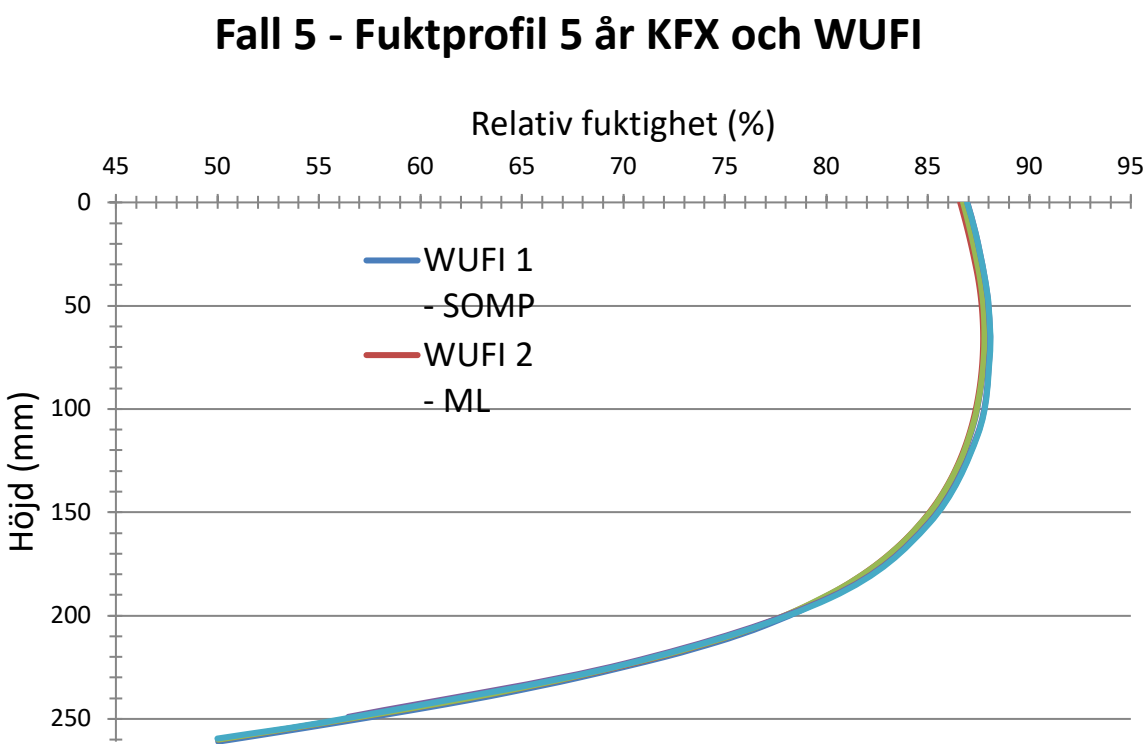
För fall 5 redovisas beräknad fuktprofil efter 2 respektive 5 år samt RF under plastmattan över en 10 års period för KFX och WUFI. Sammanlagt har tre personer utfört beräkningarna i WUFI och två personer i KFX.



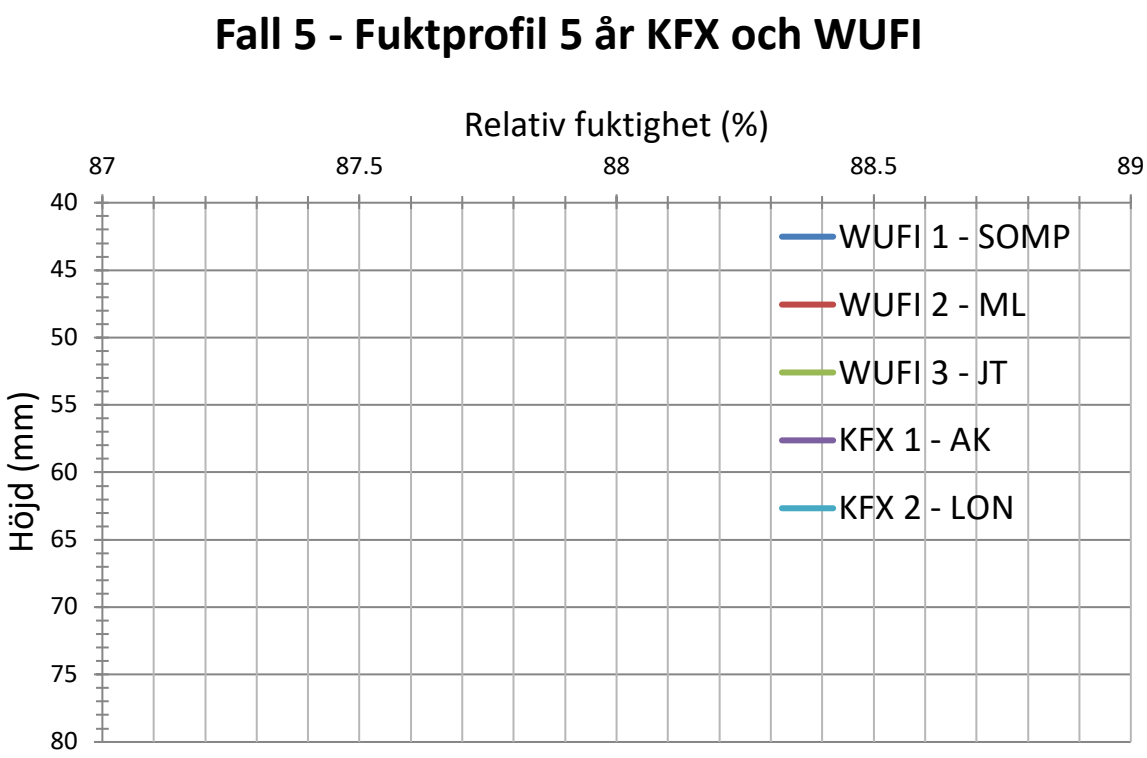
Figur 20. Beräknad fuktprofil (%) efter 2 år för tre beräkningar utförda med WUFI (blå, röd och grön) och två beräkningar utförda med KFX (lila och turkos).



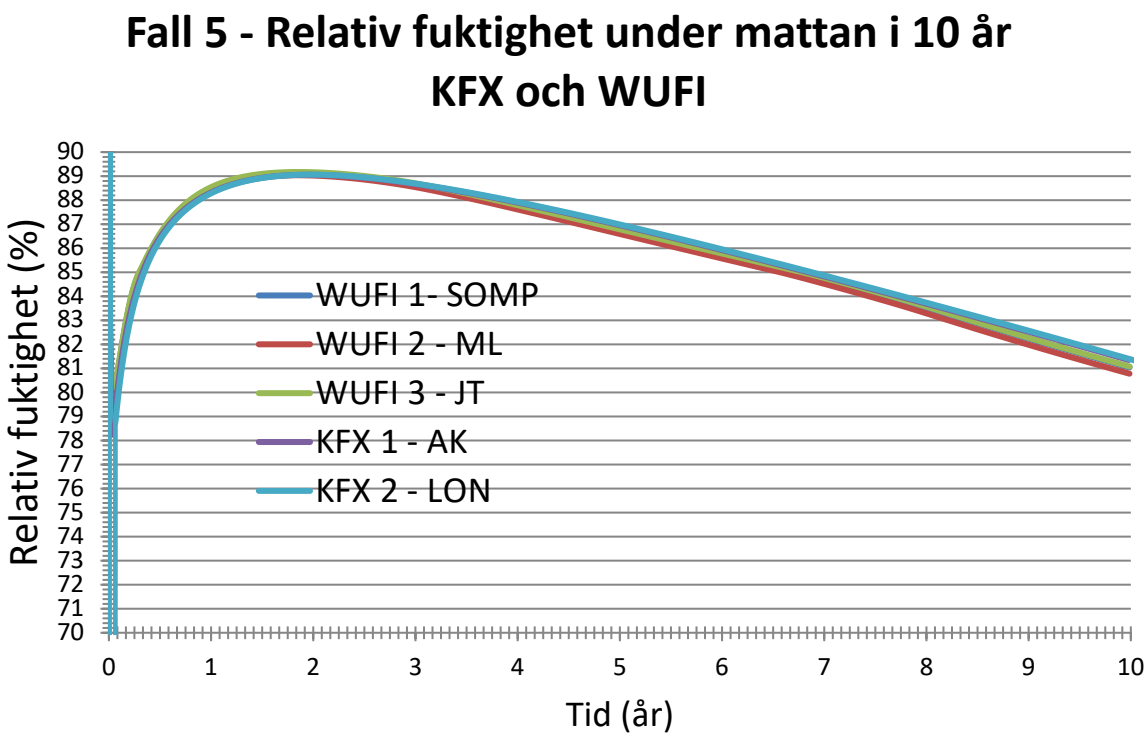
Figur 21. Detaljerad del av beräknad fuktproil på djupet kring ekvivalent mätdjup efter 2 år för tre beräkningar utförda med WUFI (blå, röd och grön) och två beräkningar utförda med KFX (lila och turkos).



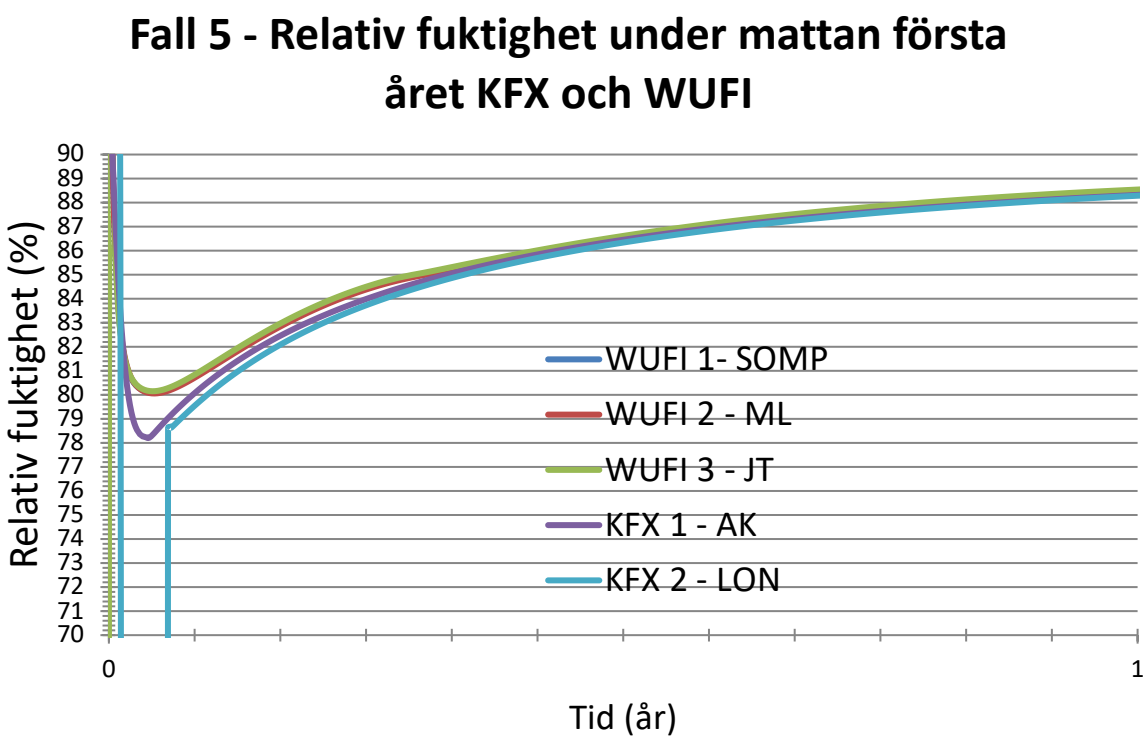
Figur 22. Beräknad fuktprofil (%) efter 5 år för tre beräkningar utförda med WUFI (blå, röd och grön) och två beräkningar utförda med KFX (lila och turkos).



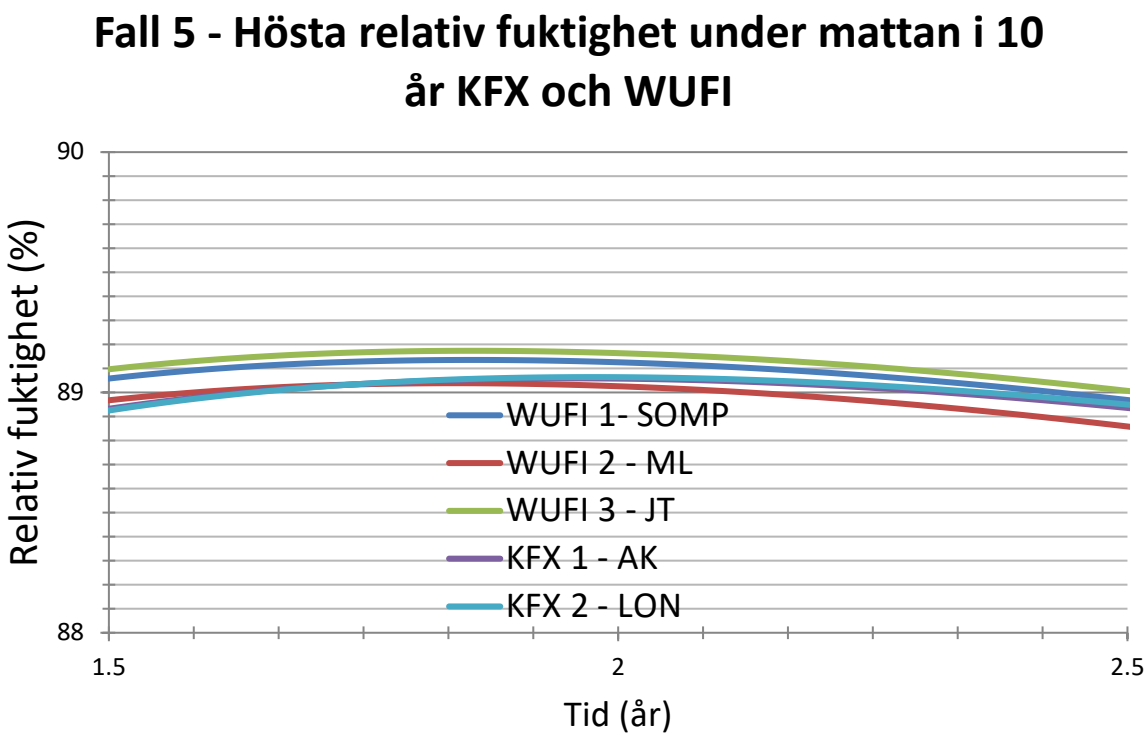
Figur 23. Detaljerad del av beräknad fuktproil på djupet kring ekvivalent mätdjup efter 5 år för tre beräkningar utförda med WUFI (blå, röd och grön) och två beräkningar utförda med KFX (lila och turkos).



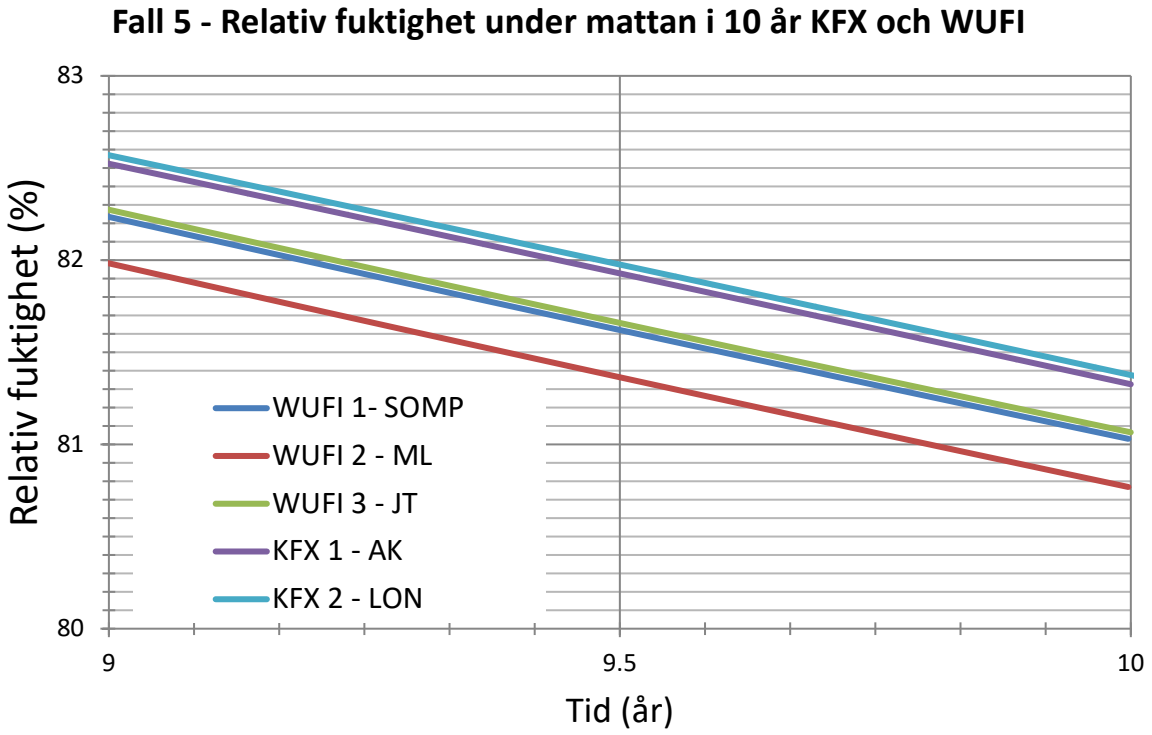
Figur 24. Beräknad relativ fuktighet under mattan under 10 års tid för tre beräkningar utförda med WUFI (blå, röd och grön) och två beräkningar utförda med KFX (lila och turkos).



Figur 25. Detaljerad del av beräknad relativ fuktighet under mattan under första året för tre beräkningar utförda med WUFI (blå, röd och grön) och två beräkningar utförda med KFX (lila och turkos).



Figur 26. Detaljerad del av beräknad relativ fuktighet under mattan vid högsta dimensionerande relativ fuktighet efter ca 1 år och 10 månader för tre beräkningar utförda med WUFI (blå, röd och grön) och två beräkningar utförda med KFX (lila och turkos).



Figur 27. Detaljerad del av beräknad relativ fuktighet under mattan efter 9 år för tre beräkningar utförda med WUFI (blå, röd och grön) och två beräkningar utförda med KFX (lila och turkos).

7.2.2 Fall 5 – Diskussion och felanalys

När liktydig materialdata samt övriga start- och randvillkor överensstämmer erhålls en god korrelation i beräkningsresultaten för såväl fuktprofiler som relativ fuktighet under plastmattan. Vid 2 års fuktprofil är avvikelsen ca 0,1 % och vid 5 års fuktprofil är avvikelsen ca 0,35 %. För beräknad relativ fuktighet under plastmattan förekommer en kraftig avvikelse initialt, under den första månaden som kan härledas till hur limfukt applicerats i beräkningsmodellen. Därefter erhålls en god korrelation mellan de fem olika beräkningarna. I samband med att dimensionerande tidpunkt uppnås efter cirka 1 år och 10 månader finns en största skillnad på ca 0,15 %. Efter 10 år föreligger en största skillnad om ca 0,55 % mellan de fem olika beräkningarna. De två beräkningarna för KFX följer varandra systematisk med en mycket liten avvikelse. Vidare följer två av tre WUFI beräkningar varandra med en mycket liten avvikelse. Avvikelsen mellan WUFI 1 – SOMP och WUFI 3 – JT jämfört WUFI 2 – ML skulle kunna förklaras av hur det översta tätskiktet applicerats där WUFI 1 – SOMP och WUFI 3 – JT applicerat detta som ett material ovanpå avjämningsmassan och WUFI 2 – ML applicerat det täta skiktet som en ytövergångskoefficient/ randvillkor.

8 Sammanfattande analys och diskussion

Genom en iterativ process där främst materialdata succesivt justerats har en god korrelation mellan de olika beräknade fallen erhållits för såväl enkla som mer komplicerade konstruktioner när beräkningarna utförs av olika personer och med olika verktyg. För att erhålla korrelation i beräkningsresultaten krävs dock stora ansträngningar och det föreligger en rad olika hinder som måste övervinnas.

Oavsett vilken materialdata som används så måste denna vara överensstämmande på en mycket hög detaljeringsgrad när den appliceras i respektive beräkningsverktyg. Små skillnader kan utan vidare ge upphov till betydande avvikelser vid jämförelse av beräknad fuktprofil, relativ fuktighet på ekvivalent mätdjup eller högsta relativ fuktighet under en plastmatta. Även materialdata som tillsynes ser ut att vara helt överensstämmande kan innehålla avvikelser som är tillräckligt stora för att skapa betydande divergens i det beräknade resultatet.

Hinder utgörs vidare av på vilket sätt och under vilka förutsättningar som materialdata appliceras i de olika beräkningsverktygens utformning. Ett exempel är om funktionsbaserad materialdata appliceras genom kurvpassning eller styckvis linjär interpolation mellan punkter. I det senare fallet måste antalet punkter som den styckvisa linjära interpolationen sker mellan vara förhållandevis högt. I det fall funktionsbaserad materialdata appliceras genom kurvpassning måste funktionen för den aktuella kurvan vara förhållandevis lika för att inga avvikelser ska förekomma mellan respektive materialdata. Sättet som t.ex. funktionsbaserad materialdata appliceras på i beräkningsverktygen varierar enligt ovan vilket i sin tur ger upphov till svårigheter i studien där beräkningsverktygen och materialdata har fått justeras samt interpoleras fram för att liktydig materialda överhuvudtaget ska kunna ansättas i verktygen. Sannolikheten för att ett och samma uppdrag som utförs med två olika beräkningsverktyg inte ger ett och samma entydiga svar är således förhållandevis stor beroende på förutsättningar, möjligheter och begränsningar i den aktuella programvaran.

I korta ordalag kan det konstateras att jämförelsen, kontrollen och kalibreringen av beräkningsverktygen bedöms ha lyckats men att det har varit en omständlig process att lyckas.

I samtliga fall i jämförelsen, kontrollen och kalibreringen av de tre beräkningsverktygen har kontinuerligt en sorptionsisoterm använts för samtliga verktyg och inverkan av hysterés och scanningkurvor har på så vis omintegjorts. Orsaken är att möjligheten som finns för att beakta hysteres i KFX och Sture REDSIT idag inte finns i WUFI. Den påverkan på beräknat resultat som hysterés kommer att ha måste utredas och i praktiken hanteras genom ingenjörsmässiga metoder.

Studien tar upp två specifika fall, ett väldigt enkelt och ett som är något mer komplext. Det komplexa fallet bedöms kunna motsvara ett vanligt förekommande fall från verkligheten. Med hänvisning till de avvikelser som konstaterats och olikheter i beräkningsverktygen finns ett legitimt skäl att fortsätta studera och jämföra hur de olika beräkningsverktygen fungerar för andra materialkombinationer och om de används på optimala sätt, t.ex. beaktar inverkan av hysteres.

I aktuell studie så ses även processen fram till att erhålla korrelation som en del av resultatet. Under denna har främst två intressanta observationer gjorts.

- Under beräkningsprocesserna har så gott som samtliga inblandade vid ett eller flera tillfällen gjort enstaka eller flera former av inmatningsfel. Samtidigt kan det konstateras att även små avvikelser kan få mycket stor betydelse för beräkningsresultatet. Problematiken bör i ett praktiskt perspektiv hanteras på ett sådant sätt att risken för inmatningsfel elimineras t.ex. genom någon form av kontrollsystem etc. Eventuella kontrollsystem skulle även kunna kombineras med system för erfarenhetsåterföring.
- Vidare har det konstaterats att den iterativa process som skett succesivt där främst förutsättningar och materialdata sustematiskt har justerats har varit förhållandvis rörig och periodvis svår att kontrollera. Desto fler individer som är inblandade när man samtidigt ska

försöka göra samma sak i flera olika beräkningsverktyg har varit svår. För framtida arbete bör det noteras att kalibreringar av detta slag tar mycket längre tid och kräver mycket mer energi och styrning än vad som initialt uppskattades. Den främsta orsaken till röran bedöms dels vara att få samtliga individer och beräkningsverktyg att göra samma sak, få alla individer att förstå vad de andra gör samtidigt men också det faktum att det är en rad olika parameterar som man kan justera i beräkningsverktygen.

2.6 Slutsatser och rekommendationer

Nedan sammanfattas slutsatser samt de rekommendationer som bedöms kunna ges baserat på resultaten från studien.

1. Det går att erhålla korrelation mellan de olika beräkningsverktygen som inkluderats i studien även om det är förhållandevis svårt med hänvisning till de olika förutsättningar som finns för att ansätta liktydiga materialdata i respektive verktyg.
    - Skillnaderna på ekvivalent mätdjup för mer komplexa fall kunde erhållas ner till
    - Justeringar i såväl beräkningsverktygen som anpassning till optimala materialdata har varit nödvändig för att erhålla korrelation.
    - Begränsningar, möjligheter och förutsättningar i de olika beräkningsverktygen utgjort en svårighet för att kunna erhålla exakt korrelation i beräknat resultat.
2. Skillnaderna mellan beräknat resultat för de olika beräkningsverktygen kunde fastställas till ca 0,2 % i relevanta sammanhang såsom t.ex. ekvivalent mätdjup runt 85 % relativ fuktighet samt för maximal relativ fuktighet under ytan på en tät matta.
3. Skillnader som kan uppfattas som mycket små och försumbara i applicerad materialdata kan ha stor betydelse för beräknat resultat. Mycket exakt mätdata krävs för ett antal parameterar för att kunna utföra pålitliga omfördelningsberäkningar.
4. Ytterligare parameterstudier krävs för att studera hur programvarorna beter sig när de utnyttjas optimalt och begränsningar tydliggörs
5. Ytterligare parameterstudier krävs utöver de fall som studerats i denna studie för att utreda hur beräkningsverktygen agerar när de används optimalt samt med andra material och materialkombinationer.
6. System för att hantera svårigheten och de fel som kan uppstå i att ansätta exakt samma materialdata samt rand- och startvillkor etc., dvs rena handhavandefel, bör upprättas i det fall omfördelningsberäkningar skall användas kommersiellt.