Round-Robin test - fuktomfördelningsberäkningar

Introduktion

Bakgrund

Utförande av fuktomfördelningsberäkningar, fortsättningsvis kallat omfördelningsberäkningar, i olika typer av betongbjälklag blir allt vanligare i syfte att kunna applicera ytskikt i så tidigt skede som möjligt. Beräkningarna utförs med olika beräkningsverktyg och är oftast aktuellt inför applicering av ytskikt men förekommer även i andra delar av projekterings- och produktionsprocessen.

Det är allmänt känt att beräkningsverktygen WUFI (ref X), KFX (ref X) och Sture REDSIT (ref X) idag används för utförande av omfördelningsberäkningar. 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 hysterés 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 kurvformad eller styckvis punktvis linjärt 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.

Utöver skillnaderna i respektive programvara så kan det även skilja på hur konsulten som utför beräkningen bygger sin beräkningsmodell för det specifika fallet. Sådana skillnader kan tillexempel utgöras av:

- Om konsulten avser att utföra en beräkning i syfte att nå ett resultat så nära sanningen som möjligt eller ett mer grovt, kanske bara dimensionerande, resultat som enbart bekräftar huruvida ytskikt kan appliceras eller inte.
- Om säkerhetsmarginaler beaktas samt hur och när i beräkningsprocessen säkerhetsmarginaler i så fall beaktas.
- Hur den faktiska beräkningsmodellen ser ut och vilken noggrannhet den har. Tex hur den initiala fuktprofilen är applicerad.

Genom ett fåtal spontana och oplanerade jämförelser av beräkningar som utförts för samma fall i verkligheten av olika ingenjörer har skillnader mellan de olika beräkningarna noterats vid jämförelse. Bakomliggande orsaker till skillnaderna i resultatet har inte beretts möjliget att analyseras närmare.

Baserat på att skillnader i beräkningsresultat noterats samt att det finns flera olika faktorer som skulle kunna ge upphov skillnader finns det anledning att kontrollera om skillnader av väsentlig karaktär förekommer vid utförande av omfördelningsberäkningar. I det fall skillnader noteras är det också rimligt att, om möjligt, försöka fastställa vad skillnaderna i resultatet beror på.

Syfte

Studien syftar till att utvärdera om skillnader av väsentlig karaktär riskerar att förekomma vid utförande av omfördelningsberäkningar. I det fall skillnader förekommer avses att försöka fastställa vad skillnaderna kan bero på.

Avgränsningar

Studien är en pilotstudie i syfte att ge en indikation om, och i så fall hur stora avvikelser som kan förekomma i beräknat resultat för en omfördelningsberäkning. Eftersom syftet är att ge en första indikation är det även motiverat att begränsa studien till ett specifikt beräkningsfall. Beräkningsfallet är förvisso ett fingerat fall men vår bedömning är att mycket snarlika fall finns i verkligheten där omfördelningsberäkningar utförs.

Denna specifika studie begränsas också till de tre beräkningsverktyg, WUFI, KFX och Sture REDSIT, som bedöms vara de mest vanligt förekommande vid utförandet av omfördelningsberäkningar i Sverige.

Mot bakgrund av eventuella oklarheter rörande osäkerheter och potentiella skillnader i mätmetoder för mätning av relativ fuktighet i betong begränsas studien till beräkningar utan jämförelser mot uppmätta värden.

Metod

I ett övergripande perspektiv genomfördes studien som ett Round-Robin test där sju stycken konsulter med hög fuktteknisk kompetens och omfattande erfarenheter av att utföra omfördelningsberäkningar gavs i uppdrag att med valfritt beräkningsverktyg enskilt utföra en omfördelningsberäkning för ett specifikt specificerat fall enligt nedan redovisat.

Samtliga konsulter utförde uppgiften enligt de former och förfarande som de normalt sett utför motsvarande uppdrag på i verkligheten. Konsulterna var medvetna om studiens syfte men eftersom deras eget resultat var en del av hela resultatet kände de samtidigt inte till slutresultatet när beräkningen utfördes varför studien skulle kunna anses vara enkelblind.

Det specifika beräkningsfallet som Round-Robin testet utfördes på redovisas under kommande rubrik och är ett fingerat framtaget fall i syfte att efterlikna en verklig situation som konsulten kan ställas inför. Specifik indata är utformad så den överensstämmer med de förhållanden som råder i verkligheten både med avseende på innehåll och tilltång till faktisk materialdata men även andra förutsättningar och ingångsvärden samt med dessa följande möjligheter och begräsningar. Således har även begränsningar medvetet inkluderats i de givna förutsättningarna för att tvinga konsulten till

egna antaganden för vissa enskilda specifika parameterar. Notera att just brister i tillgänglig indata såsom fullständig information om startvillkor och randvillkor och komplett materialdata samt om denna t.ex. är framtagen i korrekta mätintervall eller om vissa parameterar helt eller delvis saknas är något som är vardagligt förekommande när omfördelningsberäkningar behöver utföras.

Ett fall där förutsättningarna innehåller en till viss del begränsad information om hur själva uppgiften skall lösas gör också att inverkan av olika tolkningar och potentiella angrepssätt enligt de förutsättningar som råder i verkligheten kan studeras. Försöksuppställningen avser att inkludera skillnader baserat på faktorer som t.ex. hur konsulten bygger sin beräkningsmodell, om och hur materialdata appliceras samt om och i så fall var och hur konsulten beaktar säkerhetsmarginaler.

Genom att olika beräkningsverktyg används beaktas även möjliga skillnader som skapats av de olika förutsättningar som ges med respektive programvara. De tre beräkningsverktygen som används i denna studie har i ett separat moment utanför detta specifika delmoment kalibrerats mot varandra varvid skillnader i verktygen konstaterats men också vidare hur de faktorer som ger avvikelser kan eller inte kan hanteras.

Resultat för det studerade fallet presenteras dels som beräknad fuktprofil efter 2 respektive 5 år samt dels som beräknad relativ fuktighet under de första 10 åren på en dimensionerande position strax under ovanpåliggande ytskikt/ plastmatta.

Efter utförd uppgift skickar konsulterna sina beräkningsresultat till en helt utomstående person som inte själv utfört någon beräkning varvid denne i sin tur sammanställer resultaten och plottar dem mot varandra.

En av de sju personer som utförde omfördelningsberäkningarna gjorde två beräkningar för två olika fall med hänvisning till oklarheter som medvetet införts i uppgiften varför det totalt sett redovisas åtta olika beräkningsresultat.

Efter sammanställning har resultatet från samtliga beräkningar presenterats för de medverkande konsulterna. Vid detta tillfälle har konsulterna också redovisat sin fysiska beräkningsmodell samt ansatt materialdata, start- och randvillkor, och eventuella övriga antaganden, föreklingar etc. Detta har skett samtidigt som resultaten har analyserats i gruppen.

Studerat fall

Nedan redovisas uppgifterna för det fall som konsulterna ålagts att studera

Indata till beräkningsuppgift

Konstruktion uppifrån består av:

- Tarkett Eminent, 2 mm
- 20 mm avjämningsmassa
    - TM snabb (TM snabb antas ha likande materialdata som Weber Core 130)
    - RF avjämning uppmätt 70 %
- 180 mm OPC-betong vct 0,4
    - RF 90 % på ekvivalent mätdjup 72 mm från betongytan
- Enkelsidig uttorkning med kvarsittande tät plåtform i botten

Omgivande randvillkor:

- Uttorkningsklimat innan matta appliceras T = 16 °C, RF = 60 %
- Omgivande klimat efter det att matta applicerats T = 20 °C, RF = 50 %

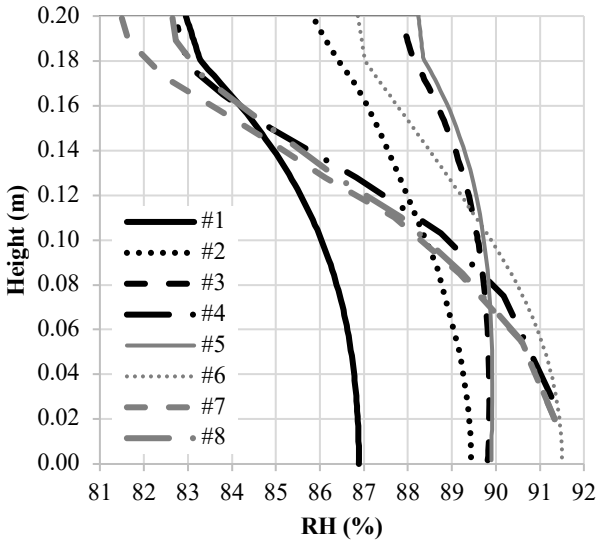
Ytterligare information till konsulten inför beräkning av uppgiften

Nedan redovisas den ytterligare information som gavs konsulterna inför uppdraget att utföra beräkningsuppgiften.

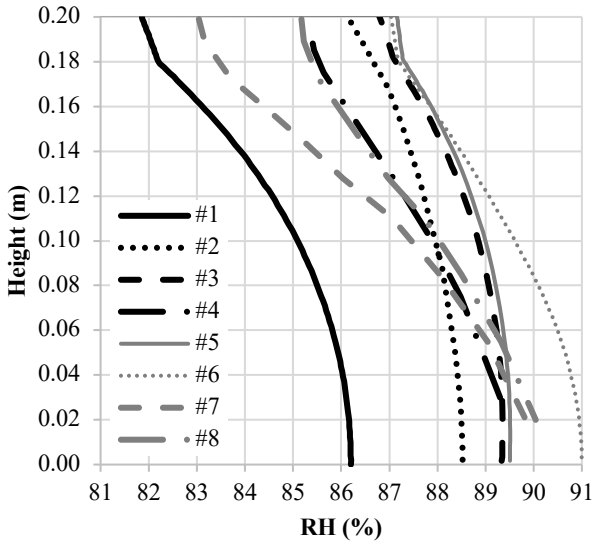
- Uppgiften avser att ge underlag för ett Round-Robin test där även ingenjörsmässiga antagenden, metoder, modeller mm beaktas för att lösa aktuellt problem.
- För att skapa dessa förutsättningar har uppgiften medvetet utformats på ett sådant sätt att konsulterna ska tvingas till olika antaganden etc.
- Samtidigt är syftet att skapa någon form av verkligt problem som vi kan ställas inför.
- Även om ni saknar relevant indata för uppgiften så ska ni göra det bästa av situationen

Resultat

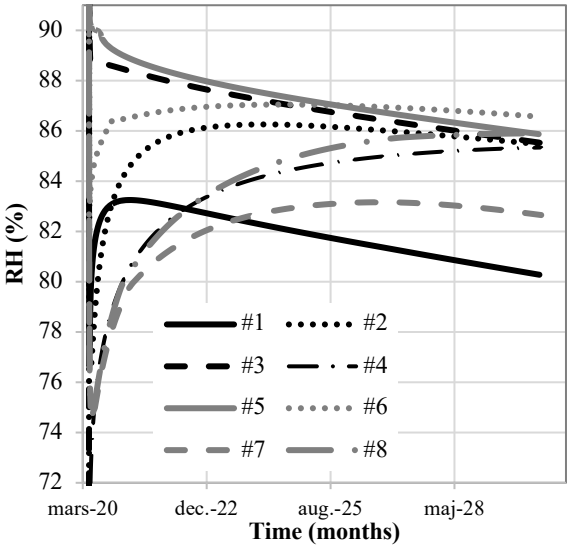
Nedan redovisas resultatet för de totalt åtta olika beräkningar som utförts. Dels redovisas en fuktprofil i konstruktionen under mattan efter 2 år respektive 5 år. Vidare redovisas den relativa fuktigheten plottat över tiden i 10 år i en position som konsulten bedömt som dimensionerande någon stans strax under det övre ytskiktet/ plastmattan som applicerats.



Figur 1. Beräknad fuktprofil (RF) i bjälklaget under ytskitet efter två år.



Figur 2. Beräknad fuktprofil (RF) i bjälklaget under ytskitet efter fem år.



Figur 3. Relativ fuktighet över 10 års tid på dimensionerande position under ytsiktet/ plastmatta

Analys

Övergripande analys

Ur ett övergripande perspektiv kan det konstateras att även om det finns viss korrelation i mönstret mellan vissa av konsulternas resultat så ar det ett resultat med förhållandevis stor spridning.

Skillnaden mellan högsta och lägsta relativ fuktighet för de olika fallen under ytskitet studerat över tiden enligt figur 3 är ca 7 % (ca 90 % RF för #5 i tidigt skede under år 2020 samt ca 83 % RF för #1 år 2021 och #7 år 2026). Notera att högsta relativ fuktighet också inträffar vid olika tidpunkter. Beräknad fuktprofil efter 2 år samt 5 år ger likande resultat med ca 6,5 % skillnad respektive ca 5 % skillnad mellan högsta och lägsta beräknade relativ fuktighet.

En spridning på ca 7 % är alldeles för stor för att ge tillförlitlighet för omfördelningsberäkningar. Betydelsen av ca 7 % relativ fuktighet på dimensionerade djup strax under ytskitet/plastmattan kan i ett verkligt projekt genom en mycket grov uppskattning t.ex. kunna antas motsvara 7 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 7 % relativ fuktighet således motsvara ca 14 miljoner bara i ökade entreprenadkostander. Vid vitesföreligganden motsvarande 2 % av entreprenadsumman kan summan uppgå till över 100 miljoner kronor.

Även om samtliga redovisade resultat av beräknad fuktprofil enligt figur 1 och 2 redovisar någon form av profil och vissa enstaka likheter kan skådas så förekommer det även en signifikant avvikande form och utseende på beräknade profiler.

Av spridningen i resultaten enligt figur 1, 2 och 3 framgår tydligt att en standard och riktlinjer för hur omfördelningsberäkningar skall utföras behöver upprättas. Orsakerna till skillnaderna i resultaten bör också fastställas oavsett bakomliggande orsak.

Detaljerad analys – skillnader mellan olika fall

Baserat på de förutsättningar som konsulterna erhållit för att lösa uppgiften, inklusive de luckor som medvetet implementerats i förutsättningarna, kan det konstateras att skillnaderna mellan de olika konsulternas resultat kan bero på flera olika orsaker. Kända faktorer som sannolikt kan ha orsakat skillnaderna i resultaten utgörs bland annat av:

- Skillnader i förutsättningar, möjligheter och begränsningar i de tre beräkningsverktyg som använts. T.ex. att KFX och Sture REDSIT har en desorptions- och en adsorptionsisoterm och beaktar scanning medan WUFI endast har en sorptionsisoterm för både adsorption och desorption.
- Variationer i hur använd materialdata applicerats, t.ex. med vilken noggrannhet och på vilket sätt som materialdata applicerats i programvaran där KFX och Sture REDSIT anpassar vissa parameterar genom kurvanpassning medan WUFI har en styckvis linjär interpolation mellan punkter, d.v.s. att räta linjer dras mellan ett valfritt antal definierade punkter.
- Variationer i använd materialdata, t.ex. att vissa konsulter hade tillgång till korrekt materialdata för angiven avjämningsmassa medan andra konsulter tvingades att använda materialdata för en annan avjämningsmassa med skillnader i diverse olika materialparameterar.
- Olika sätt som hur startvillkor applicerats, t.ex. hur mycket och var limfukt applicerats eller hur fuktprofilen applicerades i konstruktionen.
- Om fokus lagts på att räkna så rätt som möjligt eller om säkerhetsmarginaler beaktas på något sätt och i så fall när, var och hur dessa säkerhetsmarginaler implementerats i beräkningsmodellen. Har t.ex. en rak fuktprofil modellerats eller en kurva eller något däremellan som t.ex. en trappstegsformad fuktprofil.

Med hänvisning till den stora spridningen av resultaten och olika antaganden, beräkningsverktyg, hantering av säkerhetsmarginaler etc. som konsulterna gjort så är det svårt att fastställa specifika orsaker till varje enskild avvikelse mellan de beräkningsresultat som redovisas i figur 1, 2 och 3. Skillnaderna beror sannolikt av flera olika orsaker.

Vid genomgång av resultaten och jämförelse mellan hur respektive konsult utfört sin specifika beräkning har skillnader som sannolikt påverkat resultatet enligt nedan specifikcerat noterats. Notera att baserat på den komplicerade bilden är de förklaringar som ges nedan mer eller mindre komplexa att förklara.

- Den initiala nedgången av relativ fuktighet i dimensionerande position i figur 3 som visas för flertalet beräkningar avser limfukt som alla konsulter utom #4 på något sätt applicerat i avjämningen i sina startvillkor. Noterbart är också att flertalet konsulter applicerat olika mängd limfukt och delvis på olika platser i sina startvillkor.
- Till skillnad från alla andra har #3 och #5 haft en rak fuktprofil med 90 % RF rakt igenom hela betongen och en rak profil genom avjämningsmassan som startvillkor. Ansatt startvillkor motiveras med att det utgör en säkerhetsmarginal. Den raka profilen ger upphov till ett högre fukttillskott jämfört med om man har en krökt profil. Detta förklarar således sannolikt även varför #3 och #5 har högst framräknat RF. Skillnaden bör beaktas dels som ett sätt att hantera en säkerhetsmarginal och dels som hur den faktiska modellen byggts. Det går att applicera en förhållandevis detaljerad fuktprofil i WUFI genom att applicera flera materialskikt. Beroende på hur hög detaljeringsgrad som önskas i fuktprofilen kan detta i sin tur vara tidskrävande.
- I uppgiften har information om huruvida fuktprofilen med RF 90 % på ekvivalent mätdjup avser med eller utan påslag för mätosäkerheter enligt RBK metoden har som förväntat resulterat i att konsulterna tolkat och hanterat detta olika.
- #1 har till skillnad från #3 och #5 fokuserat på att räkna så rätt som möjligt helt utan säkerhetsmarginaler med motiveringen att det får hanteras i ett senare skede. #1 har till skillnad från #3 och #5 dels antagit en krökt fuktprofil och dels dragit av påslag för mätfel enligt RBK metoden från 90 % relativ fuktighet på ekvivalent mätdjup. Detta kan förklara varför #1 får ett klart lägre beräknat resultat jämfört med #3 och #5.
- #1, #3, #5 och #6 har alla använt beräkningsverktyget WUFI. WUFI har sämre förutsättningar för att hantera applicering av materialdata (styckvis punktvis linjär interpolation) samt beaktar inte scanning jämfört KFX och Sture REDSIT. Även om vi genom andra studier inom ramen för projektet fått kännedom att detta har signifikant betydelse för det beräknade resultatet så överskuggas det av #1 låga resultat. #3, #5 och #6, dvs de tre andra som använt beräkningsverktyget WUFI, är annars de tre som har högts beräknade värden vilket skulle kunna indikera att begränsningen att bara kunna hantera en fast scanning i WUFI ger en högre beräknad RF.
- En del av uppgiften var att inte ge helt klar indata för ytskiktet/ plastmattans täthet. En konsult noterade helt korrekt att aktuellt ytskikt/ plastmattan kan ha olika tätheter beroende på i vilket intervall av relativ fuktighet som ånggenomgångsmotståndet är testat vid. En konsult utförde därför två olika beräkningar där den enda skillnaden var tätheten ytskiktet varvid två signifikant olika resultat erhölls. #8 är beräknat med Z = 5000 $*10^3$ s/m på ytskiktet vilket gav en maximalt relativ fuktighet på 85 % medan #7 är beräknat Z = 2000 $*10^3$ s/m på ytskiktet vilket gav en maximalt relativ fuktighet på 83 %. Ett lägre ånggenomgångsmotstånd gör att fukt kan transporteras snabbare ut ur betong och avjämningsmassa gör att konstruktionen kan torka snabbare. Utöver #7 och #8 konstateras att även tätheten på ytskiktet varierar mellan de olika konsulterna.

- #1 och #4 har haft tillgång till en mer fullständig materialdata för avjämningsmassan sorptionsisoterm och fukttransportkoefficient. Övriga konsulter har använt mindre tillförlitlig materialdata för avjämningen som de på ett eller annat sätt tvingats att modifiera efter bästa förmåga.

De olika sätten att applicera materialdata, start och randvillkor, sättet att bygga sin beräkningsmodell samt sättet att hantera eller inte hantera säkerhetsmarginaler och de konsekvenser det får för beräkningsresultatet har hjälpt oss att identifiera faktorer som behöver specificeras i riktlinjer och standarder. Studier i andra delar av projektet som är skilda från detta specifika moment visar också vikten av att hantera materialdata på ett mycket ackurate sätt för att erhålla överensstämmande beräkningsresultat.

Slutsats och rekommendationer

Nedan sammanfattas slutsatserna som kan dras och rekommendationer för fortsatt arbete.

1. Resultatet från Round-Robin testet visar tydligt att det råder en klar divergens i beräknat resultat för olika konsulter och att det finns ett stort behov av att skapa riktlinjer och standarder för hur omfördelningsberäkningar skall utföras.
2. Frågan säkerhetsmarginaler behöver utredas där det behöver fastställas om och i så fall när, var och hur eventuella säkerhetsmarginaler ska beaktas.
3. Eventuella skillnader i de olika beräkningsverktygen behöver utredas. Vidare behöver beräkningsverktygen kalibreras mot varandra samt faktorerer och parameterar som skapar avvikelser identifieras så att likvärdiga resultat kan erhållas alternativt att skillnader i framtida beräkningsresultat kan förklaras. En mindre sådan delstudie är även utförd i aktuellt projekt som är knuten till denna studie.
4. En omfattande parameterstudie bör ställas upp där en rad olika relevanta parametrar samt dess inverkan på beräkningsresultatet studeras. Parametrarna som studeras bör bland annat innefatta:
    a. Noggrannhet i och sättet att applicera initial fuktprofil beroende på olika förutsättningar.
    b. Inverkan av beakta eller försumma limfukt
    c. Inverkan av att använda eller inte använda scanning
    d. Vilken noggrannhet krävs på materialdata, främst sorptionsisotermer och fukttransportkoefficienter, samt sättet och med vilken noggrannhet materialdata appliceras på i beräkningsverktyget.
    e. Hur stor skillnad är det med WUFI:s fingerade fasta scanningkurva som inkluderas i sorptionsisotermen jämfört beräkningar med KFX och Sture REDSIT.
    f. Vilken påverkan har korrekt ånggenomgångsmotstånd på ytskiktet samt med det även vilken betydelse det har för inom vilket intervall ytskiktets ånggenomgångsmotstånd är testat. Vilken inverkan har ett variabelt ånggenomgångsmotstånd.