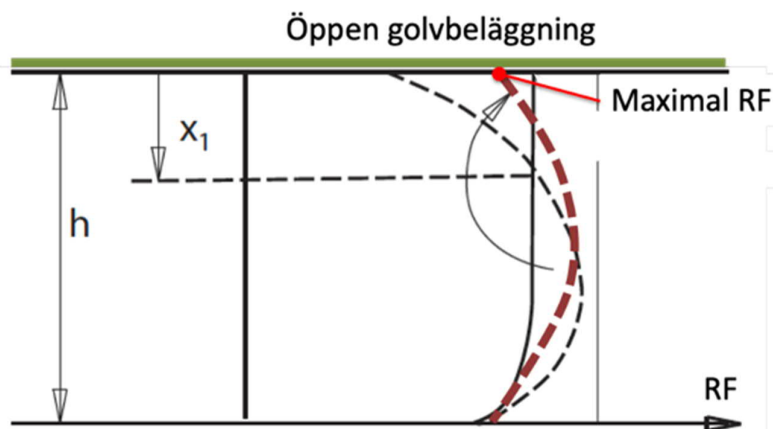


PRAKTISKA VÄGLEDNINGAR FÖR SÄKRARE UTTORKNINGSTIDER HOS BETONGBJÄLKLÄG

Fuktomfördelningsberäkningar



Anders Kumlin, Sture Lindmark, Mathias Lindskog,
S. Olof Mundt-Petersen, Lars-Olof Nilsson, Nilla Olsson,
Mikael Oxfall, Johan Tannfors

2021-05-11

FÖRORD

Denna rapport redovisar resultatet av projektet Praktiska vägledningar för säkrare uttorkningstider hos betongbjälklag vars syfte är att möjliggöra förbättrad hantering av uttorkning av betongbjälklag genom att ta fram vägledningar som möjliggör säkra omfördelningsberäkningar. Slutrapporten har arbetats fram gemensamt av arbetsgruppen. Projektet har samfinansierats med medel från Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, (SBUF), Cementa AB och Boverket.

Arbetet i projektet har genomförts i samverkan med projektets Referensgrupp och Styrgrupp.

Vi vill rikta ett stort tack till finansierare samt till referensgrupp och styrgrupp för diskussioner, åsikter, engagemang och bidrag till projektet! Arbetsgruppen som genomfört arbetet och tagit fram vägledningar är:

Anders Kumlin, Anders Kumlin AB
Sture Lindmark, FuktCom
Mathias Lindskog, Fuktanalys
S. Olof Mundt-Petersen, Polygon | AK
Lars-Olof Nilsson, Moistenginst
Nilla Olsson, NCC
Mikael Oxfall, NCC
Johan Tannfors, Polygon | AK

Malmö, maj 2021

Nilla Olsson
Projektledare

SAMMANFATTNING

Dagens RBK-system för hantering av mätningar efter uttorkning av betonggolv inför applicering av en fuktkänslig golvbeläggning bygger på fuktomfördelningsberäkningar som gjordes 1979. Förutsättningarna då var att golvbeläggningen betraktades som helt tät. Beräkningarna gjordes med stora förenklingar, bl a ingick inte avjämningen och hysterés hos sorptionskurvorna användes inte. Dessa beräkningar ledde fram till mätningar på ett s k ekvivalent djup, som har använts sedan dess. På det djupet förväntade man sig få ett mätvärde som är en prognos av den maximala relativa fuktigheten RF man kommer att få närmast under golvbeläggningen.

Idag är golvbeläggningarna inte längre "helt täta", i jämförelse med betongen eftersom vi ofta använder betong med mycket lågt vattencementtal som medför att betongen är mycket tät mot fuktransport. Detta leder fram till att maximal RF under golvbeläggningen som regel blir betydligt lägre, ibland mycket lägre, än på det ekvivalenta djupet.

För att kunna bedöma hur fuktigt det blir maximalt under golvbeläggningen krävs det därför idag en beräkning av omfördelningen av kvarvarande fukt vid golvläggning lämpligen baserad på fuktmätning på mer än ett djup. En sådan beräkning kallas en fuktomfördelningsberäkning.

Omfördelning av fukt under en golvbeläggning påverkas av en mängd parametrar. De mest avgörande är tätheten mot fukt hos golvbeläggningen och hos betongens övre del. Dessa materialegenskaper måste vara kända och kända i rätt RF-intervall. Dessutom är det så att fuktomfördelningen sker i en komplicerad process som är olika på olika djup, med uppfuktning på vissa djup som följer så kallade scanningkurvor. Detta måste beskrivas så korrekt som möjligt under en fuktomfördelningsberäkning.

Tidigt i projektet har en preliminär Vägledning för fuktomfördelningsberäkningar utarbetats. Vägledningen har prövats i en första workshop på ett väl definierat fall. Dess olika delar har sedan analyserats med jämförande beräkningar och parameterstudier. Betydelsen av olika parametrar har på så sätt kunnat kvantifieras. Med resultat och erfarenheter från dessa studier och denna workshop har Vägledningen reviderats.

Den reviderade Vägledningen har i slutet av projektet testats i en andra workshop. I denna konstruerades fyra testfall, med ökande svårighetsgrad, där nödvändiga parametrar var exakt definierade i det första fallet och var alltmer öppna för deltagaren att själv kvantifiera i övriga testfall. Beräkningsresultaten från workshopen sammanställdes och analyserades. Uppkomna skillnader i resultaten förklarades och behov av förbättring av Vägledningen identifierades.

Arbetet har lett fram till ett förslag till slutversion av Vägledningen för fuktomfördelningsberäkningar (se bilaga 9). Till denna har också utarbetats en Dokumentationsinstruktion (se bilaga 10) som ska möjliggöra en granskning av en fuktomfördelningsberäkning. Dessutom har ett Beställningsformulär (se bilaga 11) tagits fram som gör det tydligt vad som ska ingå i en beställning av en fuktomfördelningsberäkning.

INNEHÅLL

1. BAKGRUND, SYFTE OCH GENOMFÖRANDE	5
1.1 FUKTOMFÖRDELNINGSBERÄKNINGAR IDAG	5
1.2 TEKNISK BAKGRUND	5
1.3 SYFTE	7
1.4 GENOMFÖRANDE	8
1.4.1. Mall för beställnings & dokumentation.....	8
1.4.2. Vägledning för omfördelningsberäkning i golvkonstruktioner	8
1.4.2.0 Vägledning beräkningar	8
1.4.2.1 Materialegenskaper	8
1.4.2.2 Randvillkor mot mark.....	9
1.4.2.3 Initial fuktprofil = fuktprofil vid golvläggning.....	9
1.4.2.4 Initialvillkor vid omfördelningsberäkning	10
1.4.2.5 Round-Robin omfördelningsberäkning.....	10
1.5 BEGRÄNSNINGAR	10
2. KALIBRERING AV BERÄKNINGSVERKTYG.....	11
2.1 INTRODUKTION.....	11
2.2 SYFTE.....	11
2.3 AVGRÄNSNINGAR - BERÄKNINGSFALL	12
2.4 SAMMANFATTANDE ANALYS OCH DISKUSSION.....	12
2.5 SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER	13
3. INVERKAN AV FUKTBEROENDET HOS YTSKIKT	14
3.1 BAKGRUND – SYFTE	14
3.2 BERÄKNINGSFALL.....	14
3.3 RESULTAT	14
3.4 SLUTSATSER.....	14
4. RANDVILLKOR MOT MARK	16
5. WORKSHOP 1 - ROUND-ROBIN TEST: FUKTOMFÖRDELNINGSBERÄKNINGAR FÖR ETT VÄL DEFINIERAT FALL	18
5.1 BAKGRUND	18
5.2 SYFTE - AVGRÄNSNINGAR	18
5.3 METOD - BERÄKNINGSFALL	18
5.4 BERÄKNINGSRESULTAT.....	18
5.5 SLUTSATS OCH REKOMMENDATIONER	19
6. WUFI – MÖJLIGHETER OCH BEGRÄNSNINGAR	21
6.1 BAKGRUND - MÖJLIGHETER.....	21
6.2 BEGRÄNSNING 1 – ENDAST EN SORPTIONSKURVA.....	21
6.3 BEGRÄNSNING 2 – FUKTTRANSPORTBESKRIVNING MED D	21
6.4 BEGRÄNSNING 3 – TEMPERATURGRADIENT	22
7. PARAMETERSTUDIE	23
8. INVERKAN AV SCANNINGFÖRLOPP.....	26
9. SIMSCAN: VERKTYG FÖR SCANNINGKURVOR.....	27
10. WORKSHOP 2 – TEST AV DOKUMENT	29

10.1 HEMUPPGIFT 1 – PÅGJUTNING PÅ PLATTBÄRLAG.....	30
10.2. HEMUPPGIFT 2 – BJÄLKLAG MED KVARSITTANDE FORM AV TRP-PLÅT	30
10.3 HEMUPPGIFT 3 – FOGGJUTNING MELLAN HD/F-PLATTOR	32
11. SLUTSATSER.....	33
12. FORTSATT ARBETE	34
HÄNDELSEFÖRLOPPET I DE ÖVERSTA SKIKTEN I BETONGEN OCH AVJÄMNINGSMASSAN	34
HUR HANTERA GOLVVÄRME	34
BERÄKNINGSOSÄKERHETEN OCH SÄKERHETSMARGINALER (SE DOKUMENTATIONSMALL) VS BEFINTLIGA PÅSLAG	34
HÄRDNINGBEROENDE HOS BETONGENS FUKTEGENSKAPER, FÖRE OCH EFTER GOLVLÄGGNING	35
KRITISKA GRÄNSVÄRDEN, RF VS W + OLIKA MATERIAL	35
FUKTMÄTNING I BETONG	35
BLIND VERIFIERING I SIN TILLÄMPADE MILJÖ AV MÄTSYSTEM, OMFÖRDELNINGSBERÄKNINGAR OCH SKADOR SYSTEMET	35
KVALITETSSÄKRING AV OMFÖRDELNINGSBERÄKNINGAR.	36
PARAMETERSTUDIEN SOM UTFÖRTS INOM RAMEN FÖR DETTA PROJEKT AVSER ETT SPECIFIKT VANLIGT FÖREKOMMANDE FALL, I STUDIEN KALLAD "BASFALL"	36
2D-OMFÖRDELNINGSBERÄKNINGAR	36
VEM ÄGER OCH FÖRVALTAR VÄGLEDNINGEN	36
KOMPETENSKRAV PÅ UTFÖRARE OCH RELEVANTA (KRAV PÅ?) UTBILDNINGAR.....	36
MATERIALDATA – MÄTMETODER OCH BERÄKNINGSMETODER.....	36
LITTERATURFÖRTECKNING.....	38
BILAGOR.....	39
1. KALIBRERING AV BERÄKNINGSVERKTYG	
2. INVERKAN AV FUKTBEROENDET HOS YTSKIKT	
3. RANDVILLKOR MOT MARK	
4. WORKSHOP 1 - ROUND-ROBIN TEST AV ETT VÄL DEFINIERAT FALL	
5. PARAMETERSTUDIE	
6. INVERKAN AV SCANNINGFÖRLOPP	
7. SIMSCAN: VERKTYG FÖR SIMULERING AV SCANNINGKURVOR	
8. WORKSHOP 2 – TEST AV DOKUMENT	
9. VÄGLEDNING FÖR FUKTOMFÖRDELNINGSBERÄKNINGAR	
10. DOKUMENTATIONSINSTRUKTION	
11. BESTÄLLNINGSFÖRMULÄR	

1. BAKGRUND, SYFTE OCH GENOMFÖRANDE

1.1 Fuktomfördelningsberäkningar idag

I dagsläget har byggbranschen återkommande omfattande problem med att klara uttorkning av betong innan golvläggning. Detta skapar hinder i produktion, ökade kostnader, ökad teknisk och ekonomisk risk samt ökad miljöpåverkan.

Ett sätt att säkerställa att betongen är tillräckligt torr är att göra en beräkning av hur fuktförhållandena kommer att omfördelas i bjälklagskonstruktionen över tid. Tillvägagångssättet anges som ett alternativ i RBK-systemet. Denna typ av beräkning kallas fuktomfördelningsberäkning, eller bara omfördelningsberäkning.

Omfördelningsberäkningar har förekommit i Sverige under en längre tid, men då de betraktats som svåra och komplicerade beräkningar har endast en handfull personer i Sverige har kunnat göra dem. Två omständigheter har gjort att denna typ av beräkningar har ökat kraftigt. För det första har efterfrågan från branschen ökat på grund av de ökande problemen med uttorkning av betong. För det andra har ett användarvänligt beräkningsprogram, WUFI, blivit vanligt i Sverige. I detta program är det enkelt att göra en beräkning och presentera ett resultat, MEN det är dock väldigt svårt att göra en korrekt beräkning som ger ett tillförlitligt resultat. Genom granskning har det konstaterats att direkt felaktigt utförda beräkningar är vanligt förekommande idag.

Omfördelningsberäkningar görs idag av konsulter, på olika sätt och med olika antaganden och förenklingar. Det finns inga riktlinjer för hur beräkningarna ska göras. Beräkningsmetodiken behöver därför standardiseras/definieras/beskrivas så att beräkningar görs på ett transparent sätt och med acceptabla antaganden. Vidare måste det gå att beställa en omfördelningsberäkning på ett tydligt sätt och den måste kunna dokumenteras korrekt för att säkerställa såväl förståelse och granskning som spår- och repeterbarhet.

Kombinationen av ett lättanvänt program och en beräkning som kräver hög kompetens medför en risk att beräkningar utförs på felaktigt sätt och därmed stora risker för framtida fuktskador i golv, speciellt för entreprenörerna.

Förutom risken för skador finns även möjligheter. Om vi kan utföra pålitliga omfördelningsberäkningar finns möjlighet till förkortade produktionstider, vilket i förlängningen skulle innebära både minskade kostnader och möjligheter till reducerad miljöpåverkan.

För att minska både risk och kostnader behöver branschen en tydlig process för beställning, utförande och dokumentation av omfördelningsberäkningar.

1.2 Teknisk bakgrund

Många golvmaterial och lim som ska läggas på betongbjälklag är fuktkänsliga. Betongbjälklaget måste därför torkas ut för att golv materialet inte ska skadas av fukt och/eller alkali/hydroxidjoner. För att kontrollera att uttorkningen har nått tillräckligt långt görs fuktmätningar i betongen. Sedan länge har sådana mätningar gjorts på ett visst djup i bjälklaget, det s k ekvivalenta (mät)djupet. Det ekvivalenta mätdjupet kvantifierades 1979 med hjälp av ett antal omfördelningsberäkningar av mycket enkelt slag, Nilsson (1979).

Förutsättningarna när det ekvivalenta mätdjupet togs fram 1979 var att:

- golvbeläggningen var matta som betraktades som helt tät,
- den enda betong som ingick i beräkningarna hade ett relativt högt vattencementtal, vct, och var därför inte alls så tät som ovanpåliggande matta,
- bjälklaget bestod endast av ett material, en homogen betong, utan t ex någon avjämning,
- limfukt beaktades inte,
- hysteres i de övre delarna av bjälklaget beaktades inte.

Vissa golvbeläggningar är mer genomsläppliga för fukt, t ex linoleum, trägolv och textila golv. Detta beaktas idag genom att tillåta högre RF på samma ekvivalenta mätdjup som för täta beläggningar. Dessa golvbeläggningar tål egentligen inte högre RF än tätare golvmaterial, men man tillåter högre RF på mätdjupet eftersom det kommer att bli torrare än så under beläggningen på grund av dessa materials större fuktgenomsläpplighet.

Den acceptabla RF-nivån på mätdjupet, vid användning av genomsläppliga golvbeläggningar, har satts efter "erfarenheter". De gränser som sattes 1979 har visat sig fungera någorlunda. De erfarenheter man har förlitat sig på är relevanta så länge man har golvbeläggningar med ungefär samma fukttransportmotstånd och betong med samma fukttransportegenskaper som tidigare.

Med nya fuktegenskaper hos beläggningar och nya betongkvaliteter gäller inte dessa erfarenheter längre. Man måste basera sig på en bedömning av vilken fuktnivå man kommer att få alldeles under golvbeläggningen, inte på mätdjupet. För att bedöma detta krävs en omfördelningsberäkning. Förfarandet anges även i RBK-systemet som ett sätt att verifiera att uttorkningen av betongen är tillräcklig.

De omfördelningsberäkningar som avses i detta dokument syftar till att kvantifiera de fukttillstånd som kommer att uppstå under en golvbeläggning som appliceras på ett undergolv bestående av en avjämning på ett betongbjälklag och då ta hänsyn till alla relevanta faktorer. Som regel ska den beräknade, maximala fuktbelastningen på ytskiktets undersida jämföras med ett acceptabelt fukttillstånd, RF_{OK} , ofta missvisande kallat "kritiskt fukttillstånd". Syftet med omfördelningsberäkningen är att kontrollera att den existerande fuktfördelningen vid tiden för golvläggning kan godkännas som en tillräcklig grad av uttorkning, dvs att det kritiska fukttillståndet för beläggningen inte överskrids under brukstiden.

Golvmaterialleverantörer måste därför tänka om, från erfarenheter av vad man kunnat tillåta på mätdjupet, till vad man kan tillåta på undersidan av golvbeläggningen. Man måste ta fram kunskap om de kritiska fukttillstånden för golvmaterialen, vilket bland annat har konstaterats i SBUF 13498 Fuktegenskaper för golvkonstruktioner - materialegenskaper.

Med ett allmänt accepterat sätt att genomföra omfördelningsberäkningar öppnar sig flera nya möjligheter:

- byggtiderna kan kortas genom att torkkrav blir mer exakt kvantifierade istället för de schablonartade krav som gäller idag,
- potentiell möjlighet till applicering av ytskikt på betonger med höga uppmätta fuktnivåer,
- inverkan av de verkliga egenskaperna hos ingående material kan kvantifieras; idag "klumpas" t ex alla golvbeläggningar av en viss typ ihop utan hänsyn till att de är olika täta och hänsyn tas inte till olika betonger,

- fuktskaderisken blir mindre om man tar hänsyn till fukt från avjämningar och lim, vilket negligeras idag,
- mätdjupen för kontrollmätningar kan nyanseras och acceptabla fuktnivåer på dessa mätdjup kan kvantifieras på ett mer tillförlitligt sätt,
- materialleverantörer kan "uppmuntras" att låta testa sina material och tillhandahålla uppgifter om de egenskaper som krävs.

1.3 Syfte

Det övergripande syftet med projektet är att möjliggöra förbättrad hantering av uttorkning av betongbjälklag genom att ta fram vägledning som möjliggör säkra omfördelningsberäkningar. Projektet syftar till att utarbeta praktiska vägledningar för att beskriva hur moderna omfördelningsberäkningar vid applicering av ytskikt på betongbjälklag ska genomföras, hur de ska beställas och hur de ska dokumenteras.

I arbetsgruppen bakom denna projektansökan ingår majoriteten av de personer som utfört omfördelningsberäkningar i Sverige under längre tid. Arbetsgruppen har i ett förarbete till denna projektansökan identifierat ett antal frågeställningar som kräver känslighetsanalyser och Round-Robin tester innan slutgiltiga vägledningar kan publiceras. Projektets detaljerade syfte är att genomföra dessa analyser och tester. Resultaten från detta arbete ska sedan ligga till grund för vägledning för omfördelningsberäkning, samt mall för beställning och dokumentation.

Användare av dokumenten:

- Mall för beställning av omfördelningsberäkning ska användas av entreprenörer, och eventuellt byggherrar, som har behov av en omfördelningsberäkning. Discipliner som kommer att vara hjälpta av detta är projekteringsledare, projektchefer, platschefer och skadeutredare.
- Vägledning för utförande av omfördelningsberäkningar ska användas av den som utför beräkningen, oftast en konsult.
- Mall för dokumentation av omfördelningsberäkningar ska innehålla två delar:
 - En sammanfattande del som beskriver resultatet på ett lättillgängligt sätt för uppdragsgivaren och som uppskattar säkerheten i resultaten.
 - En detaljerad beskrivning av indata och antaganden som möjliggör tredjepartsgranskning av beräkningen.

Dokumenterna ska säkerställa att relevanta och välavvägda materialparametrar används och att materialdata är tillämpad på ett korrekt sätt för att kunna bygga hållbara bjälklagskonstruktioner av cementbaserade material, utan ökad risk för fuktskador.

1.4 Genomförande

Projektets genomförande redovisas kortfattat i följande kapitel och i detalj i bilagorna 1–11. Här ges en översikt.

Strukturen för dokumenten togs fram tidigt i projektet. De frågeställningar som identifierats i förarbetet har undersökts genom känslighetsanalyser och Round-Robin tester.

Slutsatserna från känslighetsanalyser och Round-Robin tester har inarbetats i bilagorna till rapporten som är:

- mall för beställning,
- mall för dokumentation,
- vägledning för utförande av omfördelningsberäkningar samt,
- verktyg för scanningkurvor.

1.4.1. Mall för beställnings & dokumentation

Det är viktigt att beräkningsuppdraget preciseras i detalj och att förutsättningarna anges noggrant. Mall för beställning av omfördelningsberäkning ska innehålla en kort bakgrund, en precisering av det aktuella syftet och en detaljerad lista över aktuella förutsättningar.

För att omfördelningsberäkningar ska vara användbara för branschen behöver resultaten av beräkningen dokumenteras i två delar. En del som beskriver resultatet på ett lättillgängligt sätt för uppdragsgivaren och som uppskattar säkerheten i resultaten. Säkerheten kan t.ex. värderas enligt det system som ByggaF anger för fuktsäkerhetsprojektering. Den andra delen ska möjliggöra tredjepartsgranskning av beräkningen där indata och antaganden beskrivs i detalj inklusive källor.

Utifrån arbetsgruppens breda erfarenhet av denna typ av uppdrag i kombination med resultaten i round-robintesten har dessa mallar tagits fram.

1.4.2. Vägledning för omfördelningsberäkning i golvkonstruktioner

1.4.2.0 Vägledning beräkningar

För att beräkningar ska blir tillförlitliga och jämförbara behövs en vägledning för utförande av omfördelningsberäkningar.

Strukturen för denna togs fram inledningsvis. För att färdigställa den behövdes dock ett antal saker klargöras. Dessa är kopplade till de olika delmomenten i en omfördelningsberäkning.

1.4.2.1 Materialegenskaper

För fuktberäkningar krävs i första hand två fuktegenskaper hos alla ingående material: sorptionskurvor och fukttransportkoefficienter. Egenskaperna måste gälla för just de material som är aktuella, inte bara för "liknande" material eller material i samma materialgrupp. Här kan man inte vara nog försiktig. Fuktegenskaperna måste vara kvantifierade i rätt RF-intervall, dvs i det RF-intervall som uppkommer under beräkningen.

Under en omfördelning kommer delar av vissa material att bli uppfuktade. Det innebär att det inte räcker med de fuktegenskaper som gäller vid desorption, utan det krävs även fuktegenskaper som gäller vid övergång mellan desorption och absorption, s k skanning; i första hand absorptionsskanning, dvs uppfuktning efter en viss uttorkning.

Här finns ett antal förutsättningar/antaganden som har utretts inom projektet.

1. Hur viktigt det är att beakta fuktberoendet hos PVC-mattor och linoleummattor.

2. Hur mycket på säkra/osäkra sidan hamnar man när man bortser från ett trägolvs fuktkapacitet.
3. Hur stort blir felet om man vi bortser från fuktberoendet hos ett limmat trägolvs fuktmotstånd Z (och fuktkapacitet)!

1.4.2.2 Randvillkor mot mark

I en platta på mark är det rimligt att tro på att RF är 100 % i marken. Marktemperaturen alldeles under bjälklagskonstruktionen kräver egentligen en 4D-beräkning, med t ex Heat. Marktemperaturen under byggtiden är lägre än under brukstiden. Det "svåraste" snittet är centralt i byggnaden. I Fukthandboken (Arfvidsson et al 2018) finns diagram som kan ge viss vägledning med hänsyn till byggnadens storlek, isoleringstjocklek, marktyp etc. men detta gäller för brukstiden.

Projektet ska utarbeta en lathund med vägledning kring hur man beskriver randvillkoren under byggtiden och i det tidiga bruksskedet i första hand för en rektangulär byggnad, som funktion av byggnadens storlek och markförhållanden.

1.4.2.3 Initial fuktprofil = fuktprofil vid golvläggning

Aktuell fuktprofil före omfördelningens start kan beräknas på olika sätt och kopplas till fuktmätningresultat på ett eller flera djup. I princip är det bjälklagets fuktprofil efter uttorkning som ska beräknas eller beskrivas, vid tidpunkten för applicering av det fuktkänsliga ytskiktet. Beräkning kan ske med prognostiseringsverktyg som till exempel TorkaS för betong med Byggcement, eller Bi-Dry alternativt PPB för betong med Bascement. Uttorkningsberäkningarna görs för så långa torktider att ett antal relevanta fuktprofiler erhålls som kan utgöra "initial fuktprofil" inför omfördelningsberäkningar. Alternativt kan fuktprofilen uppskattas med hjälp av RBK-mätningar på ett antal djup i aktuellt bjälklag.

1.4.2.3.1 Initial fuktprofil – effekt av avjämning

Hänsynstagande till avjämning innebär en särskild frågeställning. Den uttorkade betongytan kommer att uppfuktas något då avjämningen appliceras. Under det fortsatta uttorkningsskedet torkar först avjämningen både uppåt och nedåt till betongen. Så småningom torkar betongen genom avjämningskiktet.

Projektet har utrett i vilken utsträckning det går att förenkla användningen av desorptionsskanningkurvor genom en känslighetsanalys. Vidare kommer alternativet att helt bortse från avjämningen att kommenteras i vägledningen.

1.4.2.3.2 Bestämning av initial fuktprofil

Beräkning av initial fuktprofil kan naturligtvis göras med samma beräkningsverktyg som ska användas för omfördelningsberäkningen, med vissa reservationer, se nedan. Eftersom det är fråga om beräkning av uttorkning av betongkonstruktioner kan med fördel också andra verktyg användas, t ex TorkaS, BI-Dry och PPB, som f n inte är användbara för omfördelningsberäkningar.

Dessa beräkningsprogram tar hänsyn till sådant som är speciellt för uttorkning av betong, som normalt inte ingår i andra beräkningsverktyg, framförallt självuttorkning, kemisk bindning av vatten samt åldersberoende sorptionskurvor och fukttransportegenskaper. Dessa parametrar måste beaktas på något förenklat sätt om mer traditionella fuktberäkningsverktyg används för uttorkningsberäkningen.

Uttorkningsberäkningen syftar inte till att beskriva uttorkningsförloppet i minsta detalj, utan till att få fram en sannolik fuktprofil vid tidpunkten för applicering av golvmaterialen med beaktande av uttorkningsförhållandena under tiden närmast dessförinnan.

En uppmätt fuktprofil (RF-profil) kan användas som utgångspunkt för omfördelningsberäkningen. I så fall är det viktigt att absolutvärdena hos uppmätta RF är så tillförlitliga som möjligt, tex genom RBK-metoden.

Genom känslighetsanalyser och beräkningsjämförelser har lämplig avvägning mellan uttorkningsberäkningar och uppmätning för att bestämma den initiala fuktprofilen analyserats, med hänsyn till aktuella förutsättningar i ett antal typfall.

1.4.2.4 Initialvillkor vid omfördelningsberäkning

Omfördelningsberäkningen startar med den initiala fuktprofilen och att ett ytskikt appliceras. Innan beräkningen startas ska två moment genomföras.

1.4.2.4.1 Definition av startpunkter på absorptionsskanningkurvor

Genom känslighetsanalys har osäkerheten med användning av en sorptionskurva kvantifierats. Ett verktyg, SimScan, har utvecklats som ger en absorptionsskanningkurva vid en startpunkt (w , RF) på desorptionsisotermen för ett material där data finns för desorption, absorption och någon/några skanningkurvor.

1.4.2.4.2 Hänsyn till limfukt

Vid användning av vattenbaserade lim får det översta skiktet av avjämnningen ett omedelbart fukttillskott. Detta kan modelleras på olika sätt och under olika antaganden, vilka påverkar osäkerheten i beräkningen. Skillnaderna vid modellering och mellan olika antaganden har kvantifierats i projektet genom känslighetsanalyser.

1.4.2.5 Round-Robin omfördelningsberäkning

Med ytskiktets fukttransportmotstånd tillagt och ändring av randvillkoren till de som gäller under brukstiden görs nu omfördelningsberäkningen med start i den initiala fuktprofilen, inklusive eventuell limfukt och med hänsyn till att fuktförhållandena på vissa djup följer absorptionsskanningkurvor.

Den sista stora delen av detta projekt utgjordes av en workshop med Round-Robin tester av ett antal vanliga bjälklagsuppbyggnader i olika beräkningsverktyg som används i Sverige idag; Wufi, Wufi2D, KFX, Vadau. Olika antaganden prövades och effekterna av dessa analyserades. Beräkningsverktygens för- och nackdelar har dokumenterats och en "Att tänka på"/"Att göra"-lista för respektive beräkningsverktyg har utarbetats.

1.5 Begränsningar

Problematiken inom uttorkning av betongbjälklag innehåller flera olika delar:

- fuktmätning; vi vet inte om vi mäter rätt,
- kritiska och högsta tillåtna fukttillstånd; vi vet inte vad som är kritiskt,
- brister och luckor i materialdata; vi vet att det saknas uppgifter om relevanta materialegenskaper och kvalitetssäkrade metoder för att ta fram dessa",
- fuktomfördelningsberäkningar; vi vet att vi räknar på olika sätt.

Detta projekt är begränsat till den sista punkten, fuktomfördelningsberäkningar.

2. KALIBRERING AV BERÄKNINGSVERKTYG

2.1 Introduktion

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 REDIST (ref X) för beräkningarna. 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 REDIST, 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 hur dessa beaktas numeriskt.
- Beräkningsverktygens möjligheter att hantera och applicera olika typer av materialdata såsom t.ex. fuktberoende fukt- och värmeledningsförmåga samt representation av sorptionskurvor etc.
- Beräkningsverktygens möjlighet och struktur för att modellera 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 programmen 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 att verktygen räknar lika samt att effekten av eventuella skillnader i verktygen fastställs och hanteras.

2.2 Syfte

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 att likvärdiga resultat erhålls när beräkning utförs på en och samma konstruktion med samma rand- och initialvillkor samt likvärdiga 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 avvikelser. Vid avvikelser var avsikten att utvärdera om dessa har någon påverkan på omfördelningsberäkningar.

2.3 Avgränsningar - Beräkningsfall

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

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.

Beräkningsfallen, beräkningsresultaten och diskussionen redovisas i detalj i Bilaga 1.

2.4 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 funktionsbaserade 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 funktionsbaserade 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. funktionsbaserade 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 liktydiga materialdata 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 hysteres och scanningkurvor har på så vis omintetgjorts. Orsaken är att möjligheten som finns för att beakta hysteres i KFX och REDIST idag är "besvärlig" i WUFI. Den påverkan på beräknat resultat som hysteres 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 systematiskt har justerats har varit förhållandevis 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 parametrar som man kan justera i beräkningsverktygen.

2.5 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 beroende på de olika förutsättningar som finns för att ansätta liktydiga materialdata i respektive verktyg.
 - o Skillnaderna på ekvivalent mätdjup för mer komplexa fall kunde erhållas ner till 0.2 % RF.
 - o Justeringar i såväl beräkningsverktygen som anpassning till optimala materialdata har varit nödvändig för att erhålla korrelation.
 - o Olikheter i begränsningar, möjligheter och förutsättningar i de olika beräkningsverktygen gör det svårt att erhålla exakt samstämmighet i beräknade 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 applicerade materialdata kan ha stor betydelse för beräknat resultat. Mycket exakt mätdata krävs för ett antal parametrar för att kunna utföra pålitliga omfördelningsberäkningar.
4. 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.
5. 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.

3. INVERKAN AV FUKTBEROENDET HOS YTSKIKT

3.1 Bakgrund – syfte

Vid fuktomfördelningsberäkningar beskrivs som regel ett golvmaterial som ett fukttransportmotstånd, eller fuktmotstånd, Z (s/m) eller ett SD-värde (m). Dessa är inga konstanter utan i hög grad beroende av fuktnivån RF.

Här görs en jämförelse mellan beräkningar med ett konstant fuktmotstånd Z i ett visst RF-intervall för golvbeläggningen och beräkningar med fuktberoende fukttransportkoefficient δ (RF).

3.2 Beräkningsfall

Totalt 18 beräkningsfall har undersökts, tolv utan avjämning och sex med 30 mm avjämning, med PVC-matta, linoleummatta respektive trägolv:

A. UTAN avjämning: 20 cm betong, ensidig uttorkning

V. "Vinterfallet": uttorkning ett år i konstant +20°C 30 % RF; omfördelning i +20°C 30 % RF

S. "Sommarfall 1": uttorkning ett år i konstant +20°C 50 % RF; omfördelning i +20°C 50 % RF

B. MED 30 mm avjämning på 20 cm betong, ensidig uttorkning

S. "Sommarfall 2": uttorkning ett år i konstant +20°C 50 % RF; omfördelning i +20°C 50 % RF

Detaljerade beskrivningar av beräkningsfallen och beräkningsresultaten redovisas i Bilaga 2.

3.3 Resultat

Beräkningarna med fuktberoende δ (RF) får anses vara det helt korrekta sättet att behandla inverkan av fuktberoendet ytskiktens fuktmotstånd Z . Beräkningarna med konstant Z i ett visst givet RF-intervall, här (30,85), ger tydligt ett helt annat resultat.

För PVC-mattan blir maximal RF under mattan 0.5 - 0.7 % RF högre i de olika beräkningsfallen om man använder ett konstant Z för RF-intervallet (30,85). Detta beror inte på att man räknat med eller utan fuktberoende Z utan på att RF-intervallet (30,85) har för låg övre intervallgräns; beräknad maximal RF är betydligt högre, ca 88-90 % RF. Fuktmotståndet Z (30,85) är helt enkelt större än det verkliga fuktmotståndet hos mattan eftersom RF under mattan är större än 85 %! Det är på "säkra sidan" att räkna med ett för stort fuktmotstånd.

För linoleummattan fås samma effekt, men så mycket större, upp till 8.5 % RF högre med konstant Z (i "fel" RF-intervall. Detta beror även här på att det konstanta fuktmotståndet Z som använts gäller i ett för "torrt" RF-intervall, dvs på "säkra sidan.

För trägolvet är bilden mer oklar. Här är den mest avgörande parametern vilket klimat man har ovanför golvmaterialet eftersom trägolvet har så litet fuktmotstånd.

3.4 Slutsatser

Slutsatserna av dessa beräkningsfall är

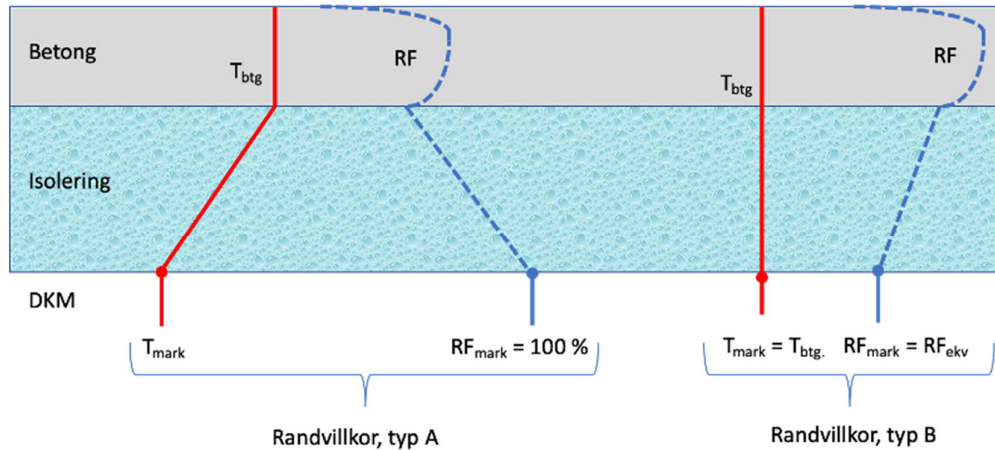
1. Fuktomfördelningsberäkningar bör göras med fuktberoende fukttransportkoefficient för golvmaterialet.

2. Fuktomfördelningsberäkningar kan göras med konstant fuktmotstånd, om man säkerställer att det konstanta fuktmotståndet Z gäller i ett RF-intervall med en övre gräns som är mindre än beräknad maximal RF under golvbeläggningen. Beräkningen blir då på "säkra sidan". Om skillnaden är stor mellan beräknad maximal RF och den övre gränsen i RF-intervallet kan skillnaden blir lite väl stor.
3. Fuktomfördelningsberäkningar får inte göras med fuktmotstånd hos golvmaterialet som gäller i RF-intervall där den övre RF-gränsen är större än beräknad maximal RF under golvbeläggningen.

4. RANDVILLKOR MOT MARK

Randvillkoren i marken under en platta på mark är två. Det ena är RF i dräneringslagret som sätts till 100 % RF. Det andra är marktemperaturen som beror på uteklimatet, rumsklimatet, byggnadens storlek och form samt värmeisoleringen under betongplattan.

Ett förenklat sätt att beräkna temperaturskillnaden över värmeisoleringen har tagits fram. Med denna kan man antingen välja marktemperaturen och RF = 100 % som randvillkor i marken eller använda en ekvivalent RF i marken och konstant temperatur genom hela konstruktionen.



Figur 4.1. De båda alternativa randvillkoren i marken. (DKM = Dränerande och Kapillärbrytande Material)

För att beräkna marktemperaturen krävs egentligen icke-stationära 3D-beräkningar för hela bottenplattan och en så stor markvolym under denna att randvillkoren kan beskrivas, som regel med årsmedeltemperaturen på stort avstånd från byggnaden. För den aktuella tillämpningen är detta sällan rimligt; förenklade beräkningar bör kunna användas i de flesta fall.

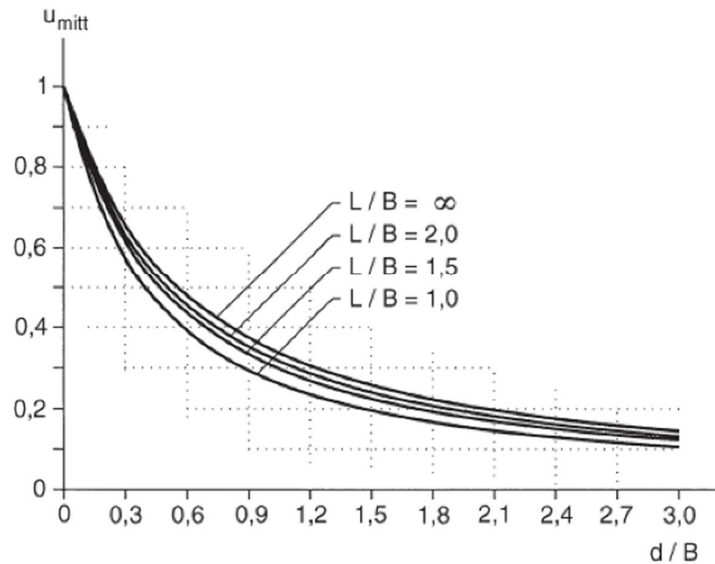
En rimlig approximation är att basera randvillkoret i marken på de stationära temperaturförhållanden som kommer att råda under byggnadens mitt då värmekudden byggts upp. Detta borde ge förhållanden som är på "säkra sidan", dvs uttorkningsmöjligheterna nedåt underskattas under fuktomfördelningen.

Temperaturskillnaden ΔT över en värmeisolering mot mark mitt under en rektangulär byggnad med längd x bredd = $L \times B$ (m) kan beräknas med en metod enligt Fukthandboken, Arfvidsson et al (2018):

$$\Delta T = T_{\text{inne}} - T_{\text{mark}} = (1 - u_{\text{mitt}}) \cdot T_{\text{inne}} - T_{\text{ute}} \quad (1)$$

där temperaturerna inomhus och utomhus är årsmedeltemperaturer.

Storheten u_{mitt} kan uppskattas ur nedanstående figur hämtad ur Fukthandboken.



Figur 4.2. Storheten u_{mitt} som funktion av den "ekvivalenta jordtjockleken" d (m) och byggnadens bredd B (m) för några olika rektangulära former hos byggnaden.

En fylligare beskrivning ges i Bilaga 3.

Där redovisas också resultatet av en icke-stationär beräkning av marktemperaturens variation under en årscykel. Temperaturskillnaden blir omvänd alldeles i början, under någon vecka. Det tar ca en månad för att temperaturskillnaden ska bli $+2\text{C}$, vilket motsvarar en ekvivalent RF i marken på 90 % enligt randvillkoret B. ovan. Efter två månader nås ca 3C , motsvarande 85 % RF och efter fyra månader nås ca 4C , motsvarande 80 % RF i marken enligt randvillkor B.

Beräkningen är ett extremfall och ändå nås rimliga uttorkningsmöjligheter nedåt redan någon månad efter att betongplattan gjutits. Randvillkoret enligt ekvation (1) bör därför vara användbart i de flesta fall.

5. WORKSHOP 1 - ROUND-ROBIN TEST: FUKTOMFÖRDELNINGSBERÄKNINGAR FÖR ETT VÄL DEFINIERAT FALL

5.1 Bakgrund

Sedan länge är det känt att de olika beräkningsverktygen som används för omfördelningsberäkningar skiljer sig något åt och delvis har olika förutsättningar, möjligheter och begränsningar för att utföra omfördelningsberäkningar.

Utöver skillnaderna i respektive programvara så kan det även skilja på hur konsulten som utför beräkningen bygger sin beräkningsmodell för det specifika fallet.

5.2 Syfte - avgränsningar

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.

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 REDIST, som bedöms vara de mest vanligt förekommande vid utförandet av omfördelningsberäkningar i Sverige.

5.3 Metod - beräkningsfall

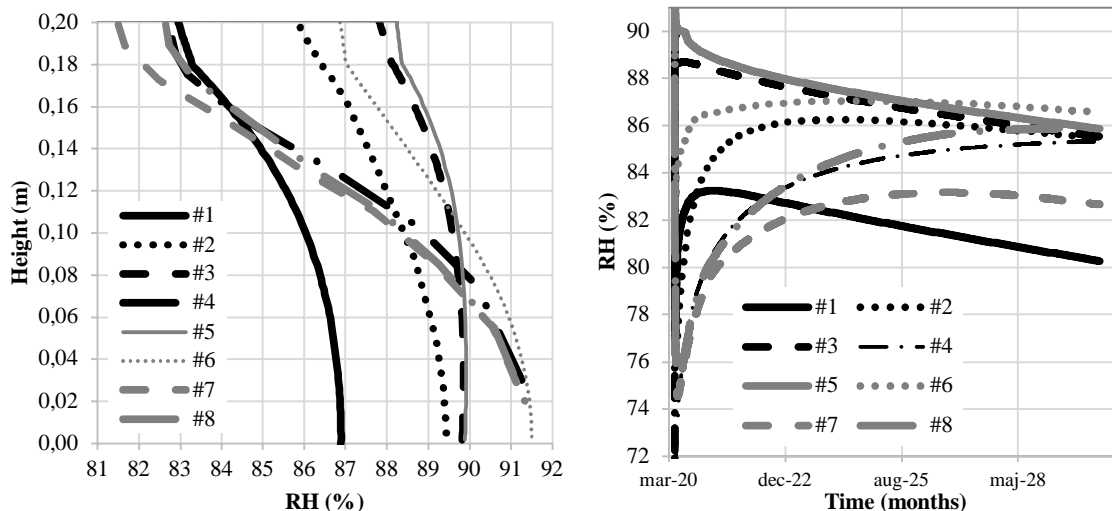
Studien genomfördes som ett Round-Robin test där sju stycken konsulter med hög fuktteknisk kompetens och omfattande erfarenheter av att utföra omfördelningsberäkningar gavs i uppdrag att med valfritt beräkningsverktyg enskilt utföra en omfördelningsberäkning för ett väldefinierat fall.

Beräkningsfallet var ett 180 mm betongbjälklag på kvarsittande plattform, avjämnat och uttorkat i ett givet klimat. Mätvärden från avjämnningen och på "ekivalent" djup i betongen tillhandahölls. Med dessa uppgifter skulle en initial fuktprofil konstrueras och en fuktomfördelningsberäkning göras efter applicering av en plastmatta med väldefinierade fuktegenskaper.

Alla detaljer i förutsättningarna ges i Bilaga 4.

5.4 Beräkningsresultat

Exempel på beräknade fuktprofiler och RF under golvbeläggningen ges i nedanstående figur.



Figur 5.1. Beräknad fuktprofil (RF) i bjälklaget under ytskiktet efter två år (till vänster). Beräknad RF över 10 års tid under plastmattan (till höger).

Ytterligare beräkningsresultat ges i Bilaga 4 där också en övergripande och detaljerad analys görs av skillnaderna mellan beräkningsresultaten.

5.5 Slutsats och rekommendationer

Nedan sammanfattas slutsatserna som kan dras av studien 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 faktorer och parametrar 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 att 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 WUFIs fingerade fasta scanningkurva som inkluderas i sorptionsisotermen jämfört beräkningar med KFX och REDIST.
- f. Vilken påverkan har korrekt ånggenomgångsmotstånd på ytskiktet samt med det även vilken betydelse det har för inom vilket intervall ytskiktets fukttransportmotstånd är testat. Vilken inverkan har ett variabelt fukttransportmotstånd.

6. WUFI – MÖJLIGHETER OCH BEGRÄNSNINGAR

6.1 Bakgrund - möjligheter

Beräkningsverktyget Wufi har fått stor spridning i Sverige och används bland annat för beräkningar av fuktomfördelning i betongbjälklag. Verktöget är någorlunda användarvänligt och har detaljerade anvisningar för de flesta frågor en användare ställs inför.

Den stora fördelen med Wufi är hanteringen av randvillkoren för den aktuella konstruktionen. De flesta av de klimatparametrar som ingår är avsedda för konstruktioner i klimatskalet och används inte alls för betongbjälklag.

En annan stor fördel med Wufi är en omfattande databas med materialegenskaper för många material och produkter. Materialdata för olika betonger och avjämningsmassor är dock rätt begränsade. Användaren har ett stort ansvar att införskaffa nödvändiga materialdata för de material som ingår i den konstruktion denne vill göra beräkningar för. De material som ingår i databasen är sällan de som ingår i en betongbjälklagskonstruktion i Sverige.

Programmet har vissa begränsningar, särskilt för fuktomfördelningsberäkningar. Eftersom Wufi fått så stor spridning, och är så användbart, beskrivs här de begränsningar som programmet har som påverkar möjligheterna att använda det för fuktomfördelningsberäkningar.

I samband med workshop 1 gavs möjlighet till att få detaljerad information om Wufi direkt från utvecklarna.

6.2 Begränsning 1 – endast en sorptionskurva

I Wufi kan man bara använda en sorptionskurva för respektive material. Denna begränsning komplicerar en fuktomfördelningsberäkning eftersom det i delar av konstruktionen behövs flera skanningkurvor, för ett och samma material, som startar i olika punkter på desorptionsisotermer.

Wufi har väldigt många beräkningsceller och det är orimligt att beskriva olika materialegenskaper, t ex skanningkurvor, och olika initiala fukthalter för varje beräkningscell. Istället tvingas man gruppera flera beräkningsceller till ett materialskikt med vissa egenskaper, och samma initiala fukthalt, som då blir desamma för alla beräkningsceller i skiktet.

Detta leder fram till att man ibland måste avbryta beräkningen, spara de beräknade fukthalterna, ändra skanningkurvorna och fortsätta beräkningen. Detta är komplicerat men fullt genomförbart och det kräver en stor omsorg av användaren.

6.3 Begränsning 2 – fukttransportbeskrivning med D

Fuktflödet beskrivs i Wufi med en ekvation med två termer. Den ena termen har ångtrycket p som fukttransportpotential och diffusionsmotståndsfaktorn $\mu(RF)$ som fukttransportegenskap. Den andra termen har fukthalten w som fukttransportpotential och diffusiviteten D som fukttransportegenskap.

Den första termen sägs ofta beskriva "ångtransport" och den andra termen sägs beskriva "vätsketransport". Detta kan vara relativt korrekt för vissa material, som t ex tegel, där det finns vätsketransport och diffusion av vattenånga. För många andra material sker den övervägande fukttransporten inte på dessa vis, men ekvationen i Wufi kan användas ändå. Det är mer fråga om vilken metod man har använt för att mäta fukttransportegenskaperna och vilken ekvation som använts i utvärderingen av mätresultaten.

Termen med fukthalt som drivkraft för fukttransporten w och diffusiviteten D som fukttransportegenskap är egentligen avsedd för ren vätsketransport. Den har i WUFI två alternativa diffusiviteter D_{ww} respektive D_{ws} . Den ena diffusiviteten används av Wufi då det yttersta materialet står i direktkontakt med vatten, t ex då det utsätts för regn. Då används denna diffusivitet på alla djup och i alla material. När regnet upphör och det inte längre finns vatten på ytan används den andra diffusiviteten.

Alla diffusiviteter i Wufi ökar monotont med fukthalten, dvs de minskar aldrig då fukthalten ökar. Detta är inte teoretiskt korrekt. Diffusiviteten kan mycket väl vara mindre vid en högre fukthalt; det beror på materialets porstorleksfördelning och konnektiviteten mellan porer av olika storlek. Matematiskt är diffusiviteten beroende av hur sorptionskurvan, egentligen suctionkurvan, lutar vid olika fuktnivåer. Suctionkurvor har inte alltid en lutning som hela tiden blir större.

Så länge det inte finns några temperaturgradienter i ett material kan man använda vilken term som helst för att beskriva fukttransport. Det är mer en fråga om vilka mätvärden som finns tillgängliga för det aktuella materialet. För fuktomfördelningsberäkningar med Wufi sätter man lämpligen diffusiviteterna D_{ww} och D_{ws} lika med noll och använder därmed bara den första termen och då med diffusionsmotståndsfaktorn $\mu(RF)$ som fuktberoende, dvs som en funktion av RF .

I Wufi finns detta redan för många av de material där fuktegenskaperna kommer från svenska publikationer. Det vanliga sättet i Sverige att beskriva den totala fukttransporten i ett material med ånghalten som transportpotential och en fukttransportkoefficient $\delta(RF)$ som egenskap har i Wufi räknats om till diffusionsmotståndsfaktorn $\mu(RF)$.

- Använd diffusionsmotståndsfaktorn $\mu(RF)$, och inte diffusiviteter D , för fuktomfördelningsberäkningar med Wufi.
- Säkerställ att diffusionsmotståndsfaktorn $\mu(RF)$ beskriver den totala fukttransporten, dvs granska källan till uppgifterna.

6.4 Begränsning 3 – temperaturgradient

Vid fukttransport under en temperaturgradient i materialet, t ex vid golvvärme och vid temperaturskillnader över ett bjälklag, fungerar inte ånghalten/ångtrycket som ensam fukttransportpotential i material med vätsketransport eller transport av adsorberat vatten, t ex betong och trä. Vätsketransport drivs av porvattentrycket som kan beskrivas som en funktion av RF . Transport av adsorberat vatten beskrivs sannolikt bättre med RF än ånghalten/ångtrycket som transportpotential. Av dessa skäl bör inte Wufi användas vid temperaturgradienter i material med vätsketransport eller väsentlig transport av adsorberat vatten.

- Använd inte Wufi för fuktomfördelningsberäkningar i konstruktioner med golvvärme eller med temperaturskillnader.

De flesta andra tillgängliga beräkningsverktygen har samma begränsningar. Det är bara VaDau som kan beskriva fukttransport med porvattentrycket som transportpotential. Det är dock komplicerat att bestämma tillhörande fukttransportkoefficienter.

7. PARAMETERSTUDIE

I BILAGA 5 redovisas resultat från en omfattande parameterstudie utförd i syfte att undersöka vilka faktorer som har stor betydelse vid en omfördelningsberäkning, och som således måste anges med god precision.

Parameterstudien har utförts på så sätt att ett basfall har definierats, där alla parametrars värden är givna, och därefter har en parameter i sänder varierats och beräknat resultat jämförts med basfallet.

Basfallet har definierats som en ensidigt torkande konstruktion bestående av matta med fuktgenomgångsmotståndet $z=1,5$ Ms/m limmad till en 25 mm tjock avjämningsmassa som i sin tur är lagd på 180 mm betong med egenskaper liknande vct 0,50. Limmet antags tillföra fukt med 100 g/m² och primern mellan avjämningsmassa och betong har fuktgenomgångsmotståndet $z=5000$ s/m. En viss initial fuktfördelning har antagits råda i konstruktionen. Storleken på inverkan av de olika parametervariationerna är mycket troligt beroende av basfallets exakta utformning och av den initiala fuktfördelningen. Man kan således inte utgå från att varje parametervariation alltid, oavsett övriga förutsättningar, har just den relativa inverkan som redovisas i denna rapport.

I varje enskild omfördelningsberäkning bör beräkningsresultatets känslighet för variationer i indata kontrolleras separat. Resultaten av denna parameterstudie visar dock följande:

- Initialprofilen: Vid mycket tät golvbeläggning har fuktfördelningen i betong och avjämningsmassa liten betydelse för vilken maximal RF som uppnås under omfördelningsförloppet. Det är istället den totala mängden fukt i underlaget som har betydelse. Vid öppen golvbeläggning har fördelningen (initialprofilen) stor betydelse. Kravet på noggrann inmätning av fuktfördelningen ökar således ju öppnare golvbeläggning som används.

I fall där avjämningsmassan är tunn i förhållande till betongtjockleken behöver den initiala fuktfördelningen i avjämningsmassan inte beskrivas i detalj. Det räcker att istället ansätta ett konstant RF-värde tvärs igenom som ger en bra representation av avjämningsmassans medelfukthalt. Exakt vad "tunn" innebär är inte möjligt att ange helt generellt.

- Representation av initialprofilen: Olika beräkningsverktyg ger olika förutsättningar för att beskriva initialprofilen. För WUFI har det visats att för det basfall som använts i denna studie kan en grov beskrivning med en "trappa" baserad på tre mätvärden (ett i avjämningsmassan, två i betongen) ge god överensstämmelse med en beräkning baserad på en mycket finindeldad beskrivning av initialprofilen. I REDIST anges RF-profilen normalt alltid med en finindeldad kurva (ett värde för varje cell).

Två extremt felaktiga initialprofiler i betongen har prövats. Dessa profiler utgörs av räta linjer, dvs ingen som helst naturlig krökning i fuktfördelningen. Dessa profiler skapar avvikelser om -11 till +3 % RF från basfallets beräknade ca 83,5 % som maximal RF. Dessa avvikelser är en god indikation på de största möjliga fel som felaktigheter i initialprofilen kan ge upphov till. Självklart gäller dessa värden enbart för just det aktuella basfallet, men eftersom detta fall är någorlunda likt vanligt förekommande konstruktioner kan värdena ändå vara av visst intresse.

- Golvbeläggningens täthet: Golvbeläggningens täthet har generellt en stor betydelse för vilken maximal RF som kommer uppstå närmast under golvbeläggningen. Betydelsen blir större ju öppnare golvbeläggningen är. För att få god precision i beräknad maximal RF krävs därför bättre precision i angiven täthet ju öppnare golvbeläggningen är.

- Avjämningsmassans sorptionsisoterm och fukttransportkoefficient: Ju lägre avjämningsmassans isoterm ligger, desto högre kommer beräknad RF närmast under golvbeläggningen att bli. I basfallet i denna studie är avjämningsmassan 25 mm och betongen 180 mm. Ett fel i avjämningsmassans isoterm om 25% ger vid detta tjockleksförhållande ett fel i beräknad maximal RF om ca 0,3 % RF.

Även avjämningsmassans fukttransportkoefficient har begränsad betydelse så länge avjämningsmassan är tunn i förhållande till betongen. Vid det tjockleksförhållande som nämndes ovan kan ett fel om 25 % i angiven transportkoefficient orsaka ett fel i maximal beräknad RF om ca 0,1-0,2% RF. Ju öppnare golvbeläggningen är desto större blir detta fel.

- Avjämningsmassans tjocklek: En tunnare avjämningsmassa medför högre RF närmast under golvbeläggningen, förutsatt att avjämningsmassan är så torr då golvbeläggning påförs att den senare kommer att fuktas upp. Ju tunnare avjämningsmassan är desto viktigare är det att ha en korrekt uppgift om dess tjocklek för att nå god precision i omfördelningsberäkningen. I de studerade fallen kan skillnaden mellan 10 och 30 mm avjämningsmassa orsaka en förändring av maximal beräknad RF om ca 1,5 %RF.
- Betongens sorptionsisoterm och fukttransportkoefficient: Betongen är det material som volymmässigt dominerar konstruktionen. Dess isoterm har därför stor betydelse för hur mycket fukt som totalt finns i konstruktionen. I det basfall som har använts i denna studie medför ett fel om 25 % i betongens isoterm att beräknad maximal RF förändras med 0,2 – 0,3 % RF.

Betongens transportkoefficient: Ett fel om 25% i betongens transportkoefficient kan förändra beräknad maximal RF med 0,4 – 0,8 % RF. Förändringen är relativt starkt beroende av golvbeläggningens täthet. REDIST och WUFI visar dock kvalitativt olika inverkan av betongens transportkoefficient.

- Hysteres: För en korrekt beräkning av utvecklingen av RF närmast under golvbeläggningen krävs att hänsyn tas till hysteresen mellan absorptions- och desorptionsisotermerna i avjämningsmassa och betong. Om endast en enda isoterm används kommer materialets fuktkapacitet att överskattas, vilket leder till att beräkningsresultaten visar en alltför liten förändring av RF vid en given ändring av fukthalten (under pågående scanningförlopp).
- Dynamiska scanningisotermerna: Med "dynamiska" avses här att scanningisotermerna hela tiden beräknas utifrån det fuktillstånd som råder (beskrivet som kombinationen av RF och fukthalt). Det är detta som sker i verkliga material, och korrekta beräkningsresultat kräver således strängt taget att hänsyn tas till detta. I REDIST görs detta med automatik. I beräkningsverktyg som WUFI är det däremot i praktiken omöjligt att utföra eftersom det kräver byte av isotermerna vid olika tider för olika djup i konstruktionen, och varje sådan scanningisoterm måste beräknas och matas in manuellt. Den förenklade scanningisoterm som använts i WUFI i denna parameterstudie ger dock en förhållandevis bra överensstämmelse till motsvarande beräkningar utförda i REDIST som hanterar både absorptions- och desorptionsscanning. Det finns dock skillnader i beräkningsresultaten från de båda programmen som möjligen kan bero på att scanning hanteras på olika sätt.
- Limfukt: Mängden limfukt och tekniken att placera och fördela denna i beräkningarna har liten eller försumbar betydelse för beräknad maximal RF under det egentliga omfördelningsförloppet, förutsatt att avjämningsmassan har någorlunda tjocklek (ca 15 mm eller mer) och är någorlunda normalt torkad, dvs ca 75 % RF eller lägre. I de studerade fallen förändras beräknad maximal RF med ca 0,3 %RF då limfuktmängden ökas från 0 till 100 g/m². Limfukten har däremot betydelse i ett tidigt skede eftersom RF i gränsen mellan avjämningsmassa och golvbeläggning kommer att vara mycket hög (ca > 95 % RF) under tiden närmast efter att golv lagts.

- Omgivande klimat ovanför och under golvet efter golvläggning: Årstidsberoende fluktuationer i klimatet ovanför golvet har mycket liten inverkan på beräknad maximal RF under golvbeläggningen. Ett konstant årsmedelvärde kan i de flesta fall användas. Vid mycket öppen golvbeläggning kan dock årstidsvariationerna bli märkbara.
- Cellstorlek: För att få god precision i beräknad maximal RF närmast under golvbeläggning/lim bör översta beräkningscellen i avjämningsmassan vara så tunn som möjligt. En celltjocklek upp till ca 3-5 mm i avjämningsmassan bedöms vara acceptabel, om dock beroende av skiktets totala tjocklek. Även indelningen av celler i betongen påverkar resultatet i avjämningsmassans översta cell.
- Tidssteg: I denna studie har tidssteget i de numeriska beräkningarna inte påverkat vilken maximal RF som uppnås. I praktiska beräkningar bör, som alltid, tidssteget varieras i syfte att kontrollera att valet av tidssteg inte påverkar det beräknade resultatet.
- Beräkningsverktygen WUFI respektive REDIST har i denna studie givit i huvudsak mycket likartade resultat. I enstaka fall syns en kvalitativ skillnad i resultaten, se t.ex. avsnitt 6.6.1 – 6.6.2. Även i beräkningen av basfallet erhålls en viss skillnad; 83,64 % RF för REDIST mot 83,15 % RF för WUFI. De exakta orsakerna till dessa skillnader är inte kända, men det förefaller troligt att de olika sätten att hantera scanning respektive fukttransportkoefficientens RF- eller fukthaltsberoende kan vara orsak.

Vi vill poängtera att det är väsentligt att ha bra data dels på rådande fuktprofil, dels på materialens sorptionsisotermer, eftersom dessa tillsammans avgör hur stor total mängd fukt som finns i betongen och avjämningsmassan, och eftersom denna mängd har mycket stor betydelse för det beräknade resultatet.

8. INVERKAN AV SCANNINGFÖRLOPP

I BILAGA 6 redovisas resultat av beräkningar som utförts i syfte att undersöka hur stor betydelse valet av modell för scanningisotermerna har på beräknad maximal RF närmast under en limmad matta efter omfördelning av kvarvarande fukt. Beräkningarna är i huvudsak utförda för enkla konstruktioner av enbart matta och betong. Syftet med detta är att hålla förutsättningarna så enkla som möjligt för att underlätta tolkningen. En kompletterande beräkning har utförts där även avjämningsmassa och limfukt simuleras.

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

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

Beräkning utan scanning, genom att låta uppfuktning ske längs desorptionisotermen, ger för låga RF-värden och för höga fukthaltsvärden än beräkning med en rimlig scanningkurva. Vid uppfuktning längs absorptionsisotermen erhålls istället för höga RF-värden och för låga w-värden.

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

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

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

9. SIMSCAN: VERKTYG FÖR SCANNINGKURVOR

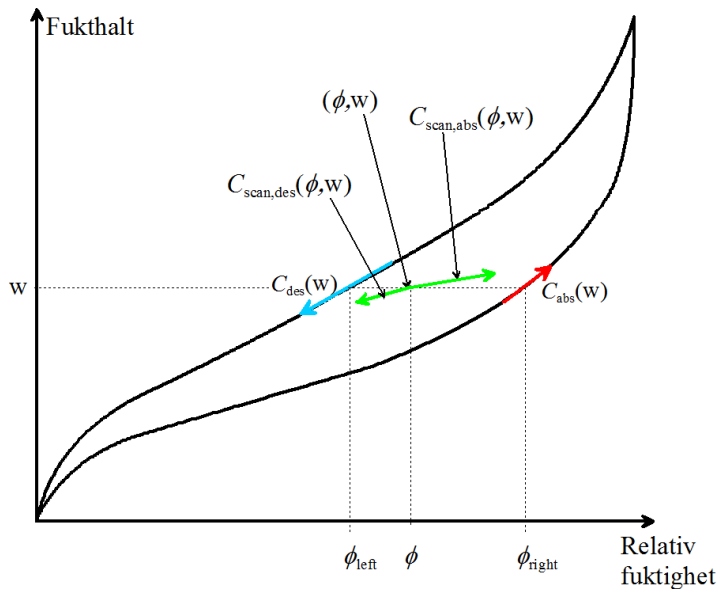
I projektplanen anges att milstolpe 8 avser utveckling av ett beräkningsverktyg för simulering av scanningsisotermer. Ett sådant verktyg har utvecklats och redovisas som en separat Excel-fil, kallad SimScan. I BILAGA 8 beskrivs verktyget och vad som görs i Excel-filen.

Scanningsisotermer är de jämviktskurvor som beskriver fuktillståndet i ett material som övergår från torkning till uppfuktning eller vice versa. I SimScan beräknas sådana scanningsisotermer med utgångspunkt i det aktuella fuktillståndet samt desorptions- och absorptionsisotermernas fuktkapacitet vid den aktuella fukthalten. I det följande beskrivs den matematiska modell som används i SimScan.

Scanningsisotermers form beskrivs utförligare i delrapport från Milstolpe 5 och 7, se BILAGA 7.

I modellen beräknas absorptionscanningkurvans fuktkapacitet (lutning) vid varje givet fuktillstånd (beskrivet som RF och w) som en fraktion av fuktkapaciteten enligt absorptionsisotermen vid denna fukthalt. På motsvarande sätt beräknas desorptionscanningkurvans fuktkapacitet (lutning) vid varje givet fuktillstånd (RF och w) som en fraktion av fuktkapaciteten enligt desorptionsisotermen vid den aktuella fukthalten. Vid fortsatt ändring av fukthalten under pågående scanningförlopp ändras fuktillståndet (RF) i enlighet med den aktuella scanningfuktkapaciteten. Fuktillståndet efter nästa tidssteg beräknas således helt och hållet utifrån den situation som råder före tidssteget.

Principen illustreras i Figur 9.1.



Figur 9.1. Illustration av hur scanningskapaciteten (fuktkapaciteten vid scanning) beräknats. ϕ och w är den RF och den fukthalt som råder vid jämvikt enligt scanningsisotermen.

En exponent k används för att ge scanningsisotermen lämplig form.

För att göra modellen för scanningsisotermer praktiskt användbar behövs fuktkapaciteten vid absorption respektive desorption som funktion av RF. Denna kan beräknas på flera olika sätt. I BILAGA 8 beskrivs en relativt enkel modell för sorptionsisotermer som gör det möjligt att enkelt beräkna fuktkapaciteten vid varje given RF. I beräkningsverktyget SimScan används en modell som baseras på tre passningsparametrar; A , B och n .

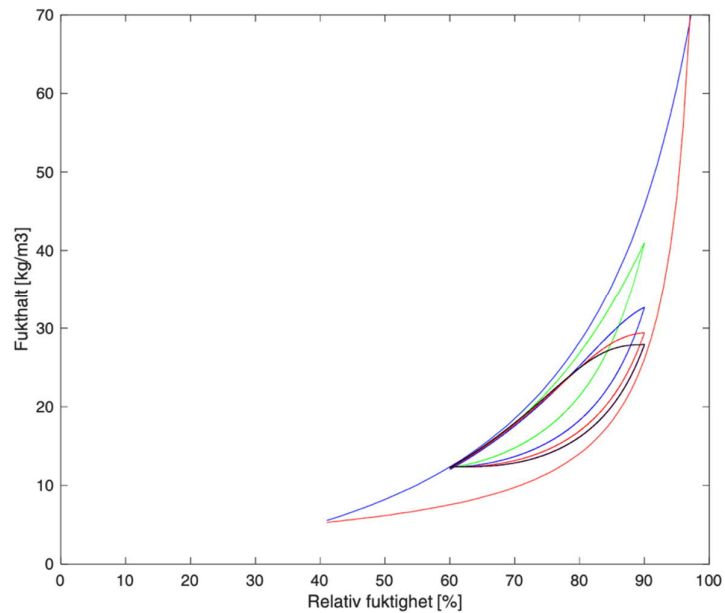
Excel-bladet SimScan innehåller sex flikar:

1. Instruktioner
2. Passa ABn
3. Scanning
4. Diagram 1
5. Testsida
6. Åtgärda fel

Som INPUT behövs data för absorptions- och desorptionsisotermer för det aktuella materialet. Operatören bör också ha en uppfattning om hur scanningisotermer rimligen ser ut för det aktuella materialet.

Som OUTPUT från Excel-filen erhålls scanningisotermer, absorption såväl som desorption, vid scanning från en RF till en annan. Gränsvärden för scanningintervallet anges av operatören. Lämpligen väljs det intervall som kan antas bäst motsvara den situation som kommande omfördelningsberäkning avser.

Utdata kan sedan kopieras in i annat beräkningsprogram, t.ex. WUFI, för fortsatt omfördelningsberäkning. I ett mer automatiserat program, som t.ex. REDIST, kan scanningkapaciteten beräknas allteftersom så att man inte i förväg behöver gissa vilket scanningintervall som blir relevant.



Figur 9.2 Exempel på hur exponenten k påverkar beräknade scanningkurvor i SimScan: Scanning från 60 till 90 till 60%RF. Grön: Exponent=0,5, blå: 1,0, magenta: 1,5, svart: 2,0. (Beräknat för ett material liknande en avjämningsmassa.)

10. WORKSHOP 2 – TEST AV DOKUMENT

Workshop 2 hade som mål att deltagarna skulle enas om utformningen av Vägledningen och Dokumentationsinstruktionen för fuktomfördelningsberäkningar. Utkast till dessa båda testades genom att använda dem i fyra "hemuppgifter" som alla deltagare skulle lösa inför workshopen.

Resultatet av dessa tester erhöles genom att jämföra deltagarnas respektive lösningar, identifiera eventuella skillnader samt förklara dessa skillnader. Skillnaderna diskuterades liksom konsekvenserna för utformningen av Vägledningen och Dokumentationsmallen.

Vid workshopen gjordes också grundliga genomgångar av tidigare delprojekt, främst parameterstudien och beräkningsverktyget SimScan. Dessa redovisas inte här.

De versioner av Vägledningen och Dokumentationsmallen som testades inför workshopen finns som bilagor till BILAGA 10.

Polygon | AK, genom S Olof Mundt-Pedersen och Oskar Linderoth, utformade fyra hemuppgifter med ökande svårighetsgrad och minskande preciseringsgrad. Den detaljerade beskrivningen av respektive hemuppgift finns som bilaga till BILAGA 10. Kompletterande information gavs för ett par av uppgifterna.

Till varje hemuppgift följde en Excelfil med materialegenskaper.

Sju projektdeltagare löste tre av de fyra hemuppgifterna, den fjärde var en "slamkrypare", fyllde i en utsänd redovisningsmall med beräkningsresultaten och en dokumentationsmall för varje uppgift. Dessa sändes sedan till projektledaren som lät sammanställa resultaten.

Sammanställningen utsändes i god tid inför workshopen och en del skillnader kommenterades via mail. Några frågetecken och enkla misstag besvarades respektive rättades till och några reviderade beräkningar gjordes före workshopen.

De fyra hemuppgifterna beskrivs i detalj i BILAGA 10. Lösningarna har sammanställts och skillnader identifierats och delvis förklarats.

Vägledningen och Dokumentationsmallen diskuterades i detalj vid workshopen. Beslut om förändringar har inarbetats i respektive dokument.

De fyra hemuppgifterna presenteras kort nedan, tillsammans med exempel på jämförelser mellan de sju beräkningarna för respektive uppgift.

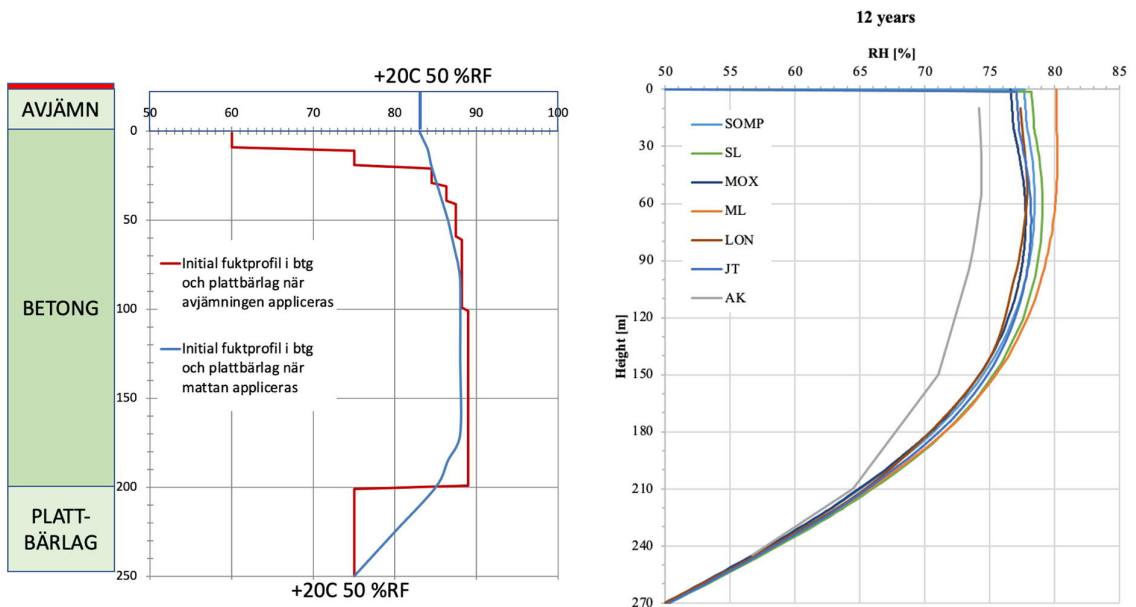
Alla detaljer redovisas i BILAGA 10.

10.1 Hemuppgift 1 – pågjutning på plattbärlag

På ett 50 mm tjockt plattbärlag, som levererats torkat till 75 % RF, har gjutits 200 mm betong med vct 0.5. Bjälklaget har senare avjämnats med 20 mm avjämnning. Efter uttorkning är initial fuktprofil vid mattläggning given, se figur 10.1.

Fukthistorien var beskriven i kvalitativa termer. "Alla" materialegenskaper var givna, inklusive (absorptions-)skanningkurvor i en Excelfil.

Exempel på beräknade fuktprofiler ges i figur 10.1. Alla beräkningsresultat utom två ligger inom ± 1 % RF på alla djup och under 12-15 år. De två profiler som avviker beror på ett missförstånd om golvbeläggningens täthet respektive ett kopieringsfel från Excelfilen.



Figur 10.1. Given initial fuktprofil (till vänster) för Hemuppgift 1. Sju beräknade fuktprofiler efter 12 års fuktomfördelning (till höger)

10.2. Hemuppgift 2 – bjälklag med kvarsittande form av trp-plåt

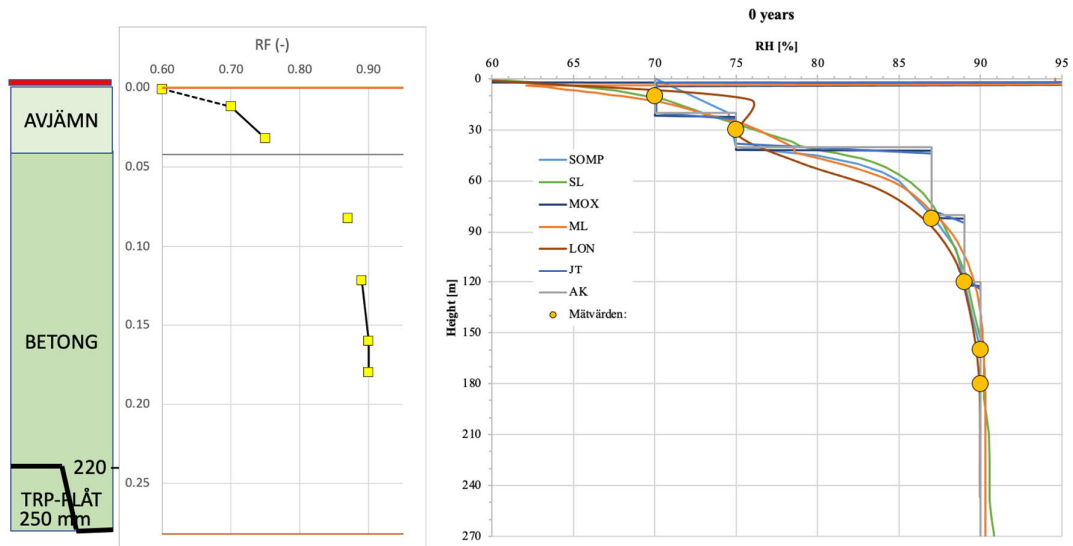
På en TRP-plåt har en betong gjutits med största tjocklek 250 mm som har avjämnats med 40 mm avjämnning. Efter uttorkning har RF mätts på fyra djup i betongen och på två 20 mm tjocka skikt av avjämnningen, se figur 10.2.

Fukthistorien var beskriven i osäkra, kvalitativa termer. "Alla" materialegenskaper var givna, exklusive skanningkurvor. Skanningkurvor skulle beräknas med verktyget SimScan, med givna exponenter för betong respektive avjämnning.

De konstruerade initiala fuktprofilerna visas i figur 10.2.

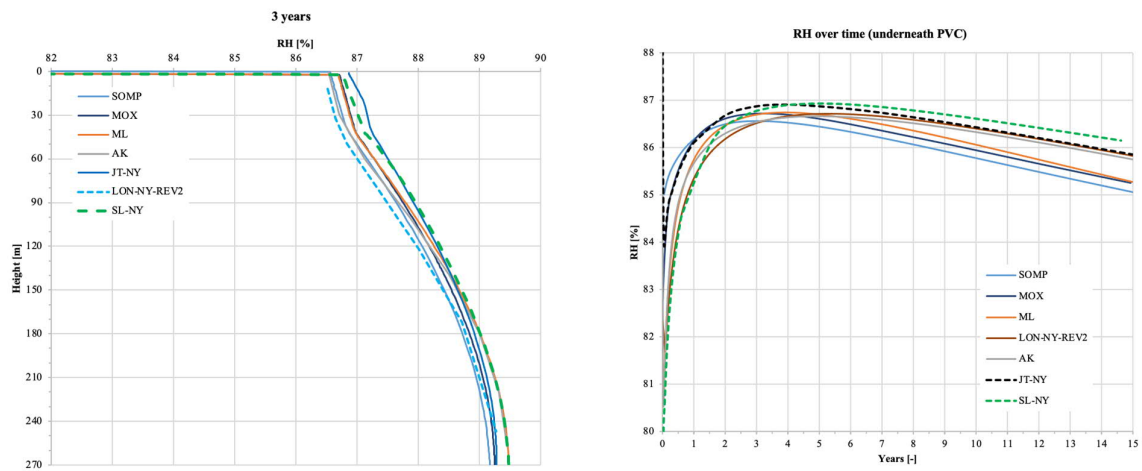
Fyra initialprofiler är beräknade kurvor som ligger inom någon % RF från mätvärdena på de fyra djupen. En av dessa ligger under mätvärdena medan de andra tre ligger på eller över mätvärdena. En ligger ett par % RF över mätvärdena i botten av betongen.

Tre initialprofiler är "trappor" där trappstegen börjar på respektive mätdjup, dvs är mycket på "säkra sidan". (Begreppet "trappa" förklaras i bilagan.)



Figur 10.2. Konstruktionen, med mätvärden på sex djup (till vänster). Sju konstruerade initiala fuktprofiler (till höger)

Orsaken till skillnader i beräkningsresultat identifierades varefter en del beräkningar reviderades där det gjorts misstag. Efter dessa ändringar ligger maximala RF hos alla beräkningarna inom ± 0.3 % RF, se figur 10.3.



Figur 10.3 Resultat av reviderade beräkningar: träarsprofiler respektive RF under mattan

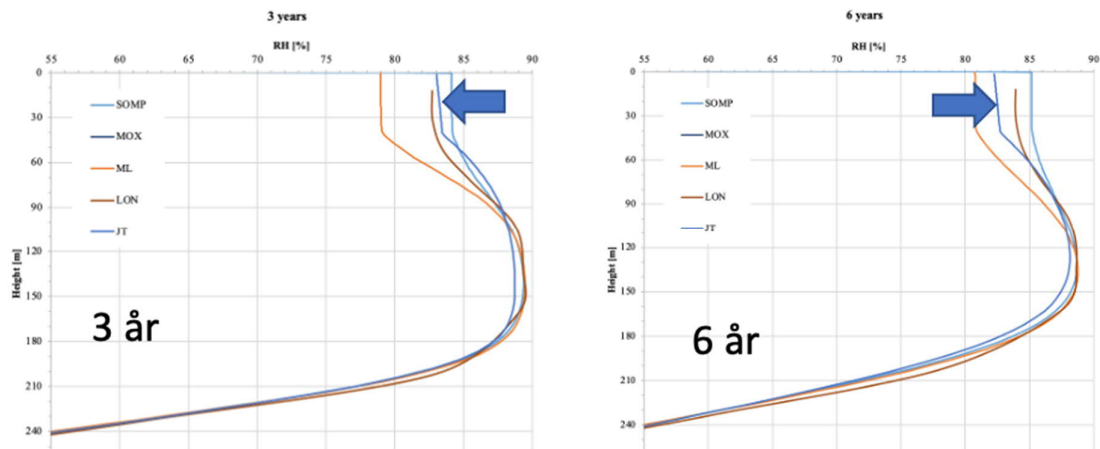
10.3 Hemuppgift 3 – foggjutning mellan HD/F-plattor

En 200 mm foggjutning i längsfogen mellan HD/F-plattor, som avjämnats med 40 mm avjämningsbalk, ska beräknas med en förenklad endimensionell modell. Det avjämnade bjälklaget har torkat fyra månader i +20°C / 60 % RF. Mätvärden var tillgängliga från fyra djup i fogbetongen och två skikt i avjämnningen efter uttorkningen.

Materialegenskaperna var avsiktligt oklara i denna uppgift. Bara produktnamnet var givet för plastmatta och avjämnning. För betongen fanns mätningar med Burkmetoden. Detta gav skillnader i använda materialdata.

Det är ungefär samma initialprofil i alla sex beräkningarna men det är mycket snabbare uttorkning nedåt i två. Det är också mycket snabbare omfördelning i dessa och de ger ett högre RF_{max} , men tidigt och under kort varaktighet. Förklaringen är mycket enkel: dessa beräkningar har mycket större fukttransportkoefficienter för betongen. Den ena berodde på ett enkelt räknepel medan den andra berodde på att operatören hade beaktat betongens unga ålder.

Övriga fyra beräkningar gav relativt lika resultat, se figur 10.4. De skillnader som finns berodde på olika fuktmotstånd hos mattan respektive olika lutning hos skanningkurvorna.



Figur 10.4. Beräknade fuktprofiler från fyra beräkningar varav en har mycket lägre Z-värde hos mattan än övriga.

Detaljerade jämförelser och förklaringar finns redovisade i BILAGA 10.

11. SLUTSATSER

Projektet har lett fram till bland annat följande slutsatser

- Fuktomfördelningsberäkningar kan möjliggöra kortare uttorkningstider utan att äventyra fuktsäkerheten.
- Materialleverantörer måste då lämna det gamla sättet att ange acceptabel fuktnivå efter uttorkning på ekvivalent djup och istället ange detta på materialets undersida.
- För att fuktomfördelningsberäkningar ska bli meningsfulla måste materialleverantörer
 - kunna tillhandahålla tillförlitliga fuktegenskaper hos sina material.
 - kunna tillhandahålla relevanta uppgifter om vilken fuktpåverkan materialen tål.
- Det går att erhålla mycket god korrelation mellan de olika beräkningsverktygen som inkluderats i studien även om det är förhållandevis svårt beroende på de olika förutsättningar som finns för att ansätta liktydiga materialdata i respektive verktyg. Olikheter i begränsningar, möjligheter och förutsättningar i de olika beräkningsverktygen gör det svårt att erhålla exakt samstämmighet i beräknade resultat.
- Beräkningsverktygen har alla vissa begränsningar. Så till exempel kan de för närvarande inte hantera konstruktioner med temperaturgradienter som t ex vid golvvärme.
- Fuktomfördelningsberäkningar bör göras med fuktberoende fukttransportkoefficient för golvmaterialet. Om ett konstant fuktmotstånd används är det viktigt att det gäller i ett RF-intervall som är relevant i beräkningen, dvs inte högre övre RF-intervallgräns än vad som uppkommer i beräkningen.
- Betongens fukttransportegenskaper är helt avgörande för resultatet av en fuktomfördelningsberäkning. Det är viktigt att
 - Säkerställa att använda data är korrekta och att ange källan.
 - Att beakta betongens härdningsbetingelser så att fukttätheten inte överskattas.
- Avjämnningen och delar av betongen kommer som regel att genomgå en uppfuktningsprocess.
 - Det är då viktigt att ha tillgång till scanningkurvor för dessa material.
 - Ett verktyg, SimScan, har tagits fram för att konstruera sådana kurvor, men förutsätter att sorptionskurvorna är kända.
- En fuktomfördelningsberäkning innehåller många detaljerade steg och det är lätt att göra enkla misstag. Det är därför viktigt att
 - Vägledningen för fuktomfördelningsberäkningar följs i detalj.
 - Beräkningen dokumenteras i detalj genom att följa Dokumentationsinstruktionen.

12. FORTSATT ARBETE

Under projektets gång har en hel del moment identifierats som kräver ytterligare undersökningar. Några av dessa kommenteras nedan.

Händelseförloppet i de översta skikten i betongen och avjämningsmassan

De översta skikten nära ytan i respektive material fuktas upp i samband med att ovanpåliggande material appliceras. För betong sker uppfuktningen när avjämningsmassan läggs på och för avjämningsmassan sker uppfuktningen av limfukt. Efter det att den översta ytan fuktats upp vet vi inte hur mycket och hur snabbt denna torkar ut eller hur fuktomfördelningen sker.

I samband med att avjämningsmassan appliceras på underliggande betong sker en uppfuktning av betongen. Hur mycket vatten som tränger ner i betongen och hur långt ner denna tränger är okänt. Uppfuktningen, hur stor eller liten den är och oavsett hur djupt den tränger ner ger upphov till att RF stiger, vilket sannolikt sker utmed en scanningisoterm. Eftersom dagens mätmetoder begränsas av att det inte går att mäta i betong på tunnare djup än 35 mm går det inte att säkert fastställa vilken RF betongen har i de översta 35 mm har vid mattläggning. I sammanhanget blir det relevant att kunna fastställa om vi fortfarande befinner oss på en scanningkurva eller om RF i betongen återgått till desorptionsisotermen.

Hur hantera golvvärme

Många betonggolv har golvvärme inkopplad under stora delar av perioden med fuktomfördelning. En del betongbjälklag har högre temperatur på undersidan än på ovansidan. För att då kunna beräkna fuktförhållandena krävs att man kan beskriva fukttransport under temperaturgradienter. Detta kräver en fukttransportekvation med tillhörande fukttransportkoefficienter som kan användas för detta. Det behövs också sorptionskurvor och scanningkurvor vid olika temperaturnivåer. Teorin för detta är klar men det fordras omfattande laboratoriemätningar under kontrollerade betingelser.

Beräkningsosäkerheten och säkerhetsmarginaler (se dokumentationsmall) vs befintliga påslag

Osäkerheten i fuktomfördelningsberäkningar utförda enligt den framtagna Vägledningen har inte kvantifierats i projektet. Det är därför svårt att välja en lämplig säkerhetsmarginal då beräkningsresultat ska jämföras med uppställda uttorkningskrav. Beräkningsosäkerheten bör kvantifieras på sätt som liknar kvantifieringen av mätosäkerheten i RBK-mätningar, dvs osäkerheten hos de ingående parametrar ska identifieras och effekten av dem kvantifieras. Notera att beräkningsosäkerheten kan utgöras/påverkas av flera olika faktorer, såsom t.ex.

- kvaliteten på materialdata,
- vald av beräkningsmetod, t ex trappsteg eller beräknad fuktprofil
- val av beräkningsverktyg,
- risken för inmatningsfel,
- antalet mätpunkter som initial fuktprofil beror av samt mätosäkerheten i dessa.

Osäkerheterna hos dessa parametrar kan sedan sättas sedan samman till en samlad beräkningsosäkerhet. Utöver beräkningsosäkerheten kan det vara relevant att omarbeta sättet att hantera mätosäkerheten i RBK-mätningarna när de tillämpas i en omfördelningsberäkning, se sista punkten ovan. I dagens system görs en mätning per position på ekvivalent mätdjup och en mätosäkerhet adderas till resultatet. Vid en omfördelningsberäkning görs ibland fyra mätningar i samma position men på olika djup för att ta fram en initial fuktprofil att använda vid

omfördelningsberäkningen. Flera mätningar, på olika djup, borde kunna reducera påslaget för mätfel.

Potentiella mätfel och potentiell beräkningsosäkerhet bör även viktas mot varandra, dvs sannolikheten att det blir fel i samtliga steg bör beaktas. Vidare bör det beaktas att underliggande teorier för dagens RBK-system inte beaktar någon beräkningsosäkerhet alls.

Härdningsberoende hos betongens fuktegenskaper, före och efter golvläggning
En avgörande parameter i en fuktomfördelningsberäkning är tätheten mot fukttransport hos betongens översta skikt. Egenskaperna hos detta skikt varierar med tiden och med djupet beroende på hur betongen har härdats fram till tidpunkten för golvläggning. Egenskaperna kommer även att fortsätta att ändras under fuktomfördelnings gång i takt med att bindemedelsreaktionerna fortsätter med olika hastighet på olika djup.

Detta behöver kvantifieras med laboratorieundersökningar och en modell behöver utvecklas, och verifieras, som kan beskriva betongens fukttransportegenskaper vid olika ekvivalent ålder.

Kritiska gränsvärden, RF vs w + olika material

Uttorkningskraven som används vid fuktomfördelningsberäkningar idag är som regel av väldigt enkelt slag: en RF-nivå som inte får överskridas. Underlaget för denna RF-nivå är magert och baseras på gamla erfarenheter av betong och golvmaterial för ett halvt sekel sedan. Det är inte alls säkert att det är en fuktnivå, RF eller fukthalt, som är det rätta sättet att beskriva ett kritiskt gränsvärde för att undvika nedbrytning eller förändring av golvmaterial och lim.

I och med omfördelningsberäkningarnas intåg kommer kritiskt gränsvärde sannolikt att flyttas till undersidan av golvmaterialet. Vidare kommer sannolikt flera olika kritiska gränsvärden för olika material behöva tas fram.

Oavsett hur det kritiska gränsvärdet beskrivs (RF, fukthalt eller annat) behöver det kritiska gränsvärdet harmonisera med vald mätmetod. Dagens gränsvärde baseras på en annan mätmetod än den som används i fält idag vilket i sin tur sannolikt ger en viss avvikelse. Satta gränsvärden måste vara fastställda med samma mätsystem som används i fält.

Vi vet att den RF-nivå som inte får överskridas gör detta under en kortare period vid mattläggning med anledning av limfukt. I sammanhanget saknas uppgifter helt och hållet om under vilket tidsintervall som den satta RF-nivån får överskridas och eventuellt hur mycket. Uppgifter om vilket tidsintervall som krävs för att en skada ska uppstå måste fastställas.

Detta kräver ordentliga laboratorieundersökningar och minst ett doktorandprojekt!

Fuktmätning i betong

RBK-mätningarna har förändrats mycket under senare år. Fuktomfördelningsberäkningar utgår som regel från dessa mätvärden. Fortfarande är vi inte säkra på att vi verkligen mäter rätt RF. För att klarlägga detta krävs ordentliga laboratorieundersökningar i form av jämförelser med material i jämvikt med tillförlitliga referensklimat.

Blind verifiering i sin tillämpade miljö av mätsystem, omfördelningsberäkningar och skador systemet

Med blind verifiering avses en verifieringsmetod för att kontrollera att fuktmätning i betong, omfördelningsberäkning och fastställande av eventuella skador ska utföras utan att de inblandade utvecklarna, och om möjligt utförarna, ska känna till resultaten i förväg. Metoden avser att säkerställa så att utvecklarna medvetet eller omedvetet inte ska kunna justera resultat, mätmetoder eller beräkningsverktyg så att bättre överensstämmelse erhålls. Vi har fått indikationer från utvärderingar av energiberäkningsverktyg och verifiering av fuktberäkningsverktyg att dessa i

kombination med de metoder som tillämpas kan missa både kvantitativa och kvalitativa aspekter som är av stor betydelse för resultatet. Vidare finns en dold omedveten, eller i vissa fall väl medveten, förmåga hos utvecklare och utvärderare att justera sina modeller, metoder eller verktyg så att de stämmer överens med uppmätta resultat utan att återge utförda justeringar. Risken med icke blinda studier är även att utvecklaren och utvärderaren fokusera på specifika detaljer som i sitt sammanhang är av mindre betydelse.

Eftersom beräkningsmetoder, mätningar och skador sker ute i fält är det också rimligt att den blinda verifieringen utförs i sin tillämpade miljö med samma förhållanden som råder under verkliga förhållanden.

Kvalitetssäkring av omfördelningsberäkningar.

Hur upprättar man ett förfarande för granskning som bland annat hanterar risken för inmatningsfel? Frågan kan inkluderas i punkten ovan som inkluderar beräkningsosäkerheten och säkerhetsmarginaler.

Parameterstudien som utförts inom ramen för detta projekt avser ett specifikt vanligt förekommande fall, i studien kallad "basfall"

Genom att göra en större mer heltäckande parameterstudie som inkluderar samtliga beräkningsverktyg med flera olika tjocklekar och fukttegenskaper på de olika materialskikten kan man ge en mer heltäckande bild av vilka faktorer som påverkar resultatet under olika förutsättningar. I den parameterstudie som utfördes inom projektet kunde även några avvikelser mellan de olika beräkningsverktygen noteras som inte kunde förklaras och det inte fanns möjlighet att studera närmare.

2D-omfördelningsberäkningar

2D-omfördelningsberäkningar istället för förenklade 1D-beräkningar har sannolikt stor påverkan på beräkningsresultatet och uppskattad RF under mattan. Sannolikt så "missgynnas" HDF bjälklag som erhåller en längre uppskattad uttorkningstid allt högre RF under golvmaterialet i en 1D beräkning jämfört om motsvarande beräkning utförs i 2D. Detta b.l.a. då fukttransport från foggjutningen breder ut sig i sidled i avjämningsmassan. Verktyg för 2D-beräkningar finns idag, t ex Wufi-2D och VaDau. Med hjälp av dessa verktyg bör man kunna identifiera hur stora fel man får om man gör beräkningar i 1D för ett antal fall där fukttransport förekommer i två dimensioner. Exempel på sådana konstruktioner är främst HDF-bjälklag med hål, foggjutningar samt hattbalkar som kompletteras med ovanpåliggande påggjutning och/eller avjämning. Även TRP-plåt som kvarsittande form och kantbalksförstärkningar/ bjälklag med voter påverkas sannolikt av fukttransport i flera dimensioner.

Vem äger och förvaltar vägledningen

Den framtagna Vägledningen bör förvaltas av någon officiell institution. Vilken och på vilket sätt bör klargöras och förankras. Frågan föreslås lyftas i projektets styrgrupp för vidare hantering.

Kompetenskrav på utförare och relevanta (krav på?) utbildningar

Fuktomfördelningsberäkningar kräver en gedigen kunskap om fuktmekanik och erfarenhet av beräkningsverktyg. För att kunna sprida denna kunskap och denna kompetens behöver utbildningar anordnas.

Materialdata – mätmetoder och beräkningsmetoder

Resultaten från projektet påvisar behovet av tillförlitliga och användbara materialdata för främst fukttransporttegenskaper, sorptionsisotermer och scanning för ingående material i en golvkonstruktion. Materialegenskaper måste vara uppmätt och användbar inom relevanta intervall och relevanta metoder. Vidare behöver, i det fall det saknas, lämpliga mätmetoder specificeras för att säkerställa att uppmätta materialparameterer går att använda i sitt sammanhang i en

omfördelningsberäkning. Ett stort ansvar vilar på materialleverantörerna att ta fram och bistå med tillförlitliga och användbara materialdata.

Burkmetoden är en mätmetod som skulle kunna användas för fastställande av betongens fukttransportförmåga. Metoden bör testas blint i round-robin-tester i sin tillämpade miljö för att fastställa dess prestanda. Vidare bör metoden utvecklas ytterligare för att kunna användas inom flera RF-intervall.

LITTERATURFÖRTECKNING

Anderberg, A. (2004) Moisture properties of self-levelling flooring compounds. Rapport TVBM-3120, Avd. Byggnadsmaterial, LTH

Arfvidsson, J., Harderup, L.-E. & Samuelson, I. Fukthandboken – Praktik och teori, utgåva 4, AB Svensk Byggtjänst, Stockholm.

Hedenblad, G. (1993) Moisture permeability of mature concrete and cement paste. Rapport TVBM-1014, Avd. Byggnadsmaterial, LTH

Karnehed, P. och Sjöberg, A. (2019) Modern betong torkar inte som förr. Bygg & teknik nr 2/19

Lindmark, S. (2019) Verktuget REDIST för fuktomfördelningsberäkningar, FuktCom, Lund

Lindmark, S. (2020) Verktuget SimScan för skanningkurvor, FuktCom, Lund

Nilsson, L.-O. (1979) Fuktmätning. Byggfukt i betongplatta på mark. Torknings- och mätmetoder. Del 2., rapport TVBM-3008, Avd. Byggnadsmaterial, LTH.

Nilsson, L.-O., Olsson, N.*, Mundt-Petersen, S.O., Lindmark, S., Lindskog, M., Kumlin, A., Oxfall, M., Tannfors., J. Modelling the moisture redistribution in concrete floors with screed and flooring material with varying properties. Konferensbidrag till NSB2020, Tallin 2021

Åhs, M. (2011) Redistribution of moisture and ions in cement-based materials. Rapport TVBM-1028, Avd. Byggnadsmaterial, LTH

BILAGOR

1. Kalibrering av beräkningsverktyg
2. Inverkan av fuktberoendet hos ytskikt
3. Randvillkor mot mark
4. Workshop 1 - Round-Robin test av ett väl definierat fall
5. Parameterstudie
6. Inverkan av scanningförlopp
7. SimScan: Verktyg för simulering av scanningkurvor
8. Workshop 2 – Test av dokument
9. Vägledning för fuktomfördelningsberäkningar
10. Dokumentationsinstruktion
11. Beställningsformulär