

Utredning av funktionell uttorkningsnivå hos betong med mineraliska tillsatsmaterial

Slutrapport

Marcin Stelmarczyk, The Green Dragon Magic
Ted Rapp, Sveriges Byggindustrier
Hans Hedlund, Skanska Sverige AB

2019-05-10

Förord

Projektets arbetsgrupp vill rikta ett stort tack till samtliga branschens representanter som deltog i arbetet med både sin tid, energi, idéer, branschkunskap och erfarenhet.

Projektets arbetsgrupp vill rikta ett stort och varmt tack till SBUF för finansiering av detta projekt.

Sammanfattning

Denna rapport sammanfattar projektet SBUF 13354 *Utredning av funktionell uttorkningsnivå hos betong med mineraliska tillsatsmaterial*. Kort bakgrund till projektet ges tillsammans med dess syfte. Genomförandet beskrivs inkl. utförda simuleringar av fuktomfördelning i golvsystem samt förenklade, praktiska försök. Resultaten summeras och förklaras. Det konstateras att modern betong med mineraliska tillsatser saknar förmåga att buffra limfukt samt att den inte omfördelar fukt på samma klassiska sätt som gammaldags betong gjorde. Det konstateras vidare att ett skikt avjämnning vid limning med vattenbaserat lim är ett måste för betong med alla vattencementtal. Samtidigt identifieras möjligheter till avjämnning och pålimning av ytskikt innan dagens uttorkningskrav är uppfyllt med bibehållen fuktsäkerhet. Slutligen ges rekommendation till uppföljningsprojekt med syfte att validera detta koncept och eliminera konstaterade osäkerheter i resultaten.

Innehållsförteckning

Förord.....	1
Sammanfattning.....	2
Innehållsförteckning.....	3
1 Inledning.....	4
1.1 Bakgrund	4
1.2 Rapportens struktur	4
2 Projektens genomförande.....	4
2.1 Litteraturstudie.....	4
2.2 Simulering.....	4
2.3 Mätförsök	6
3 Resultat.....	7
3.1 Litteraturstudie.....	7
3.2 Simulering.....	7
3.2.1 Uttorkning	8
3.2.2 Direktlimning av ytskikt (fall 2) med vattenbaserat lim	9
3.2.3 Direktlimning av ytskikt (fall 2) med icke vattenbaserat lim.....	10
3.2.4 Limning av ytskikt på avjämning (fall 3)	12
3.2.5 Trägol med tätskikt och luftspalt (fall 1).....	13
3.2.6 Trägol limmat på avjämning (fall 5).....	13
3.2.7 Tätskikt på betong (fall 4).....	13
3.3 Mätförsök	14
3.4 Slutsatser	14
4 Rekommendationer.....	15
5 Referenser	16
Bilageförteckning.....	16

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Projektet SBUF 13354 startades då olika slags indikationer pekade på skillnader i materialegenskaper mellan gammaldags betong med endast Ordinarie Portlandcement (OPC) som bindemedel och moderna betonger med mineraliska tillsatser så som slagg och flygaska. Projektet syfte var att medelst litteratursökning, simulering av omfördelning av fukt i golvsystem samt förenklade mät försök försöka svara på frågan om den nya betongen samverkar annorlunda avseende fuktutbyte med de övriga materialen i ett golvsystem jämfört med hur den gamla betongen gjorde.

1.2 Rapportens struktur

Rapporten är uppdelad i fyra delar:

- Inledning
- Projektets genomförande – här redovisas det arbetet som utfördes under projektet.
- Resultat – här redovisas en övergripande bild av resultaten. För detaljer se rapportens bilagedel.
- Rekommendationer – här redovisas vad projektet rekommenderar avseende generellt arbete av liknande slag i framtiden. Här finns även rekommendationer för framtida utveckling avseende fukt i PPB.

Rapporten innehåller även bilagor med detaljerade simuleringsresultat samt en publicerad artikel.

2 Projektens genomförande

Projektet genomfördes under ledning av Sveriges Bygginstrier. Arbetet rörande litteraturstudien och simuleringarna utfördes initialt av Avdelningen för byggnadsmaterial vid LTH och senare av The Green Dragon Magic (GDM). De praktiska försöken utfördes i Sveriges Bygginstriers regi med hjälp av andra professionella aktörer.

2.1 Litteraturstudie

Litteraturstudien utfördes med det initiala syftet att få fram materialdata nödvändiga för simulering av de tilltänkta typfallen. Studien tittade även närmare på tidigare utförda studier av fukt samverkan inom golvsystem.

Då projektet fattade beslut att använda nyutvecklade mjukvara för simulering av fuktflöde utökades litteraturstudien till att även omfatta nödvändiga materialmodeller, huvudsakligen för simulering av hysteres inom sorption.

Slutligen kompletterades tidigare framtagna materialdata med nyinmätta egenskaper för betong med Bascement från SBUF 13198.

2.2 Simulering

I samband med projektets startmöte, som även var ett styr- och referensgruppmöte, valdes Wufi bort som simuleringsverktyg. Anledningen till detta var att ingen deltagare som ansåg sig kunna verktyget kände sig bekväm med alla inställningar, kunde redovisa någorlunda för hur Wufi räknar

eller huruvida hysteres tas hänsyn till i dess materialmodeller. Som alternativ diskuterades KFX men detta verktyg hade för begränsad kapacitet till modellering av komplex konstruktion (antal beräkningsceller) och krävde manuell växling av sorptionskurva vid byte mellan uttorkning och uppfuktning. Slutligen utnyttjades möjligheten till samarbete med SBUF 13197 och 13140 där det ändå skulle tas fram ett forskningsverktyg för omfördelning av fukt, som ett led i utvecklingen av nya materialmodeller för bl.a. sorption och beräkningskärna för fukt i PPB. Den första versionen av verktyget, FEM ϕ -ca, togs fram enligt direkta önskemål om kapacitet och materialmodellering från SBUF 13354, se Fig. 1.

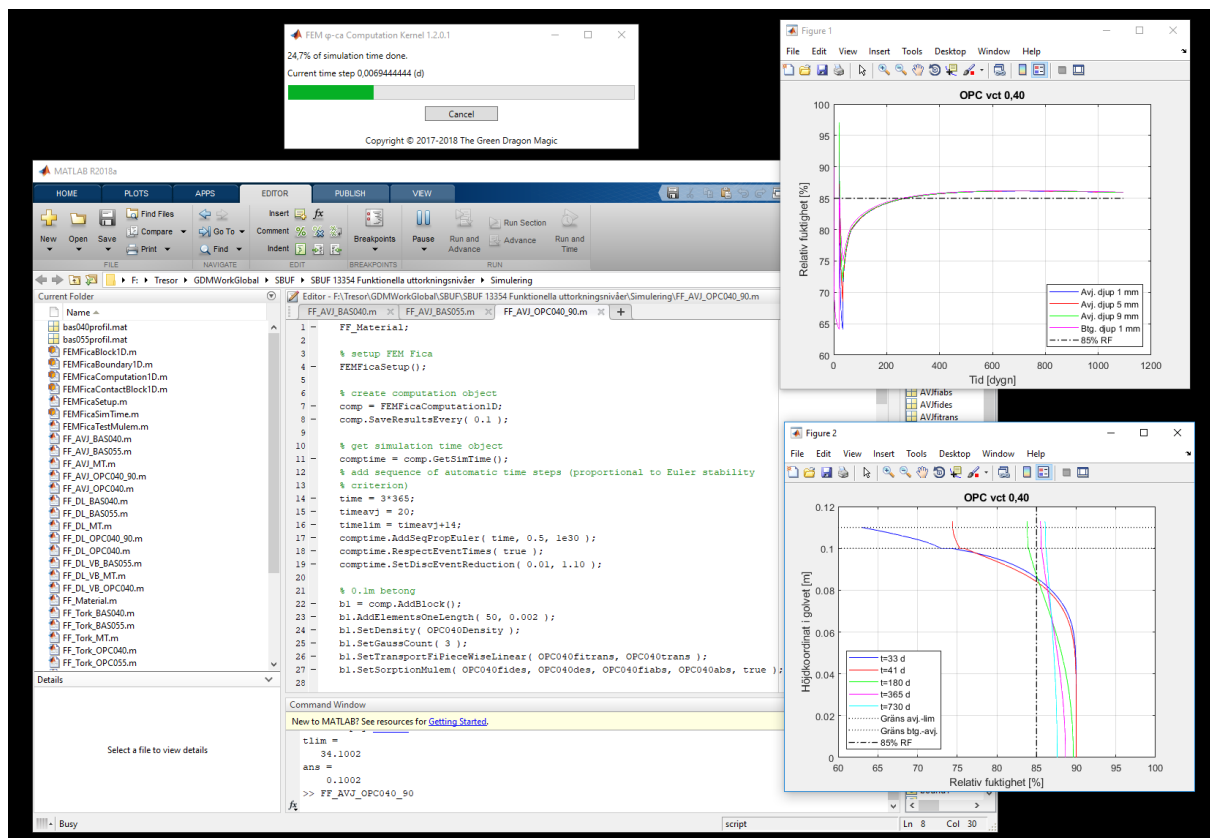


Fig. 1 FEM ϕ -ca med styrande skript i Matlab samt två resultatfönster med diagram

Simuleringsfasen inleddes först med jämförelse av uttorkningsförlopp mellan betong med OPC och modern tät betong, baserat på materialdata från den första delen av litteraturstudien. Resultaten ledde till vidare val av fall med ytskikt direktlimmat på betong både med vattenbaserat lim och med icke vattenbaserat. Som slutligt simuleringsfall valdes ytskikt med vattenbaserat lim på avjämning på betong, då de tidigare simuleringarna antydde att där fanns det intressanta resultat att upptäcka.

Efter första omgången simulering konstaterades att de övriga fallen trägolvs (olika utföranden) samt tätskikt på betong (inför bruk och kakel) kan bedömas utan explicit simulering, givet de tidigare framtagna simuleringsresultaten.

Slutligen utfördes simuleringar av samtliga de tidigare fallen med materialdata för betong med Basement, då dessa blev tillgängliga från SBUF 13198.

2.3 Mätförsök

Mätuppställning designades för att utföra några enkla tester som kunde ge en första indikation om förväntad skillnad hos betong med mineraliska tillsatser i förmåga att buffra limfukt samt förmåga att inte släppa från sig vatten på samma sätt som betong med OPC. Till detta användes två existerande plattor samt två nygjutna. De gamla, väl uttorkade plattorna användes till test med direktlimning av ytskikt. De två nya användes till test med avjämning och därefter pålimning av ytskikt innan betongen uppfyllde uttorkningskravet på 85% på ekvivalent djup, se Fig. 2.



Fig. 2 Framtagning av mätobjekt. Vänster – avjämning av två av plattorna, höger – pålimning av ytskikt direkt på betongytan.

Mätningen omfattade följande moment, se exempel i Fig. 3:

- Mätning av RF i betong samt avjämning
- Försök att rycka bort remsor av pålimmad matta
- Kontroll huruvida limmet/mattan luktar på undersidan efter avlägsnande



Fig. 3 Undersökningsmoment. Vänster - avlägsnande och inspektion av ytskikt, höger provtagning för RF-mätning i avjämning.

3 Resultat

Nedan summeras projektresultaten. Som en del i redovisningen av dessa har projektet i samarbete med SBUF 13197, 13198 samt 13140 redan 2018-04-15 publicerat en industriell artikel med delresultat, se bilaga 3. Detta valde projektet att göra i stället för att dela upp slutrapporten i två delar.

3.1 Litteraturstudie

Litteraturen som fanns användbar inom detta projekt listas nedan:

- Materialdata:
 - Nilsson 1980 – sorptionsdata för betong med OPC
 - Hedenblad 1993 – transportdata för betong med OPC
 - Saeidpour & Wadsö 2016 – sorptions- och transportdata för betong med inblandning av slagg och silikastoft
 - Nilsson m.fl. 2018 – sorptions- och transportdata för betong med inblandning av slagg och silikastoft
 - SBUF 13198 Slutrapport – sorptions- och transportdata för betong med Bascement
- Modelling:
 - Zhang 2014 – omfattande sammanställning och jämförelse av olika modeller för sorption och deras inverkan på fukttransport
 - Mualem 1974 – vald modell för sorption inkl. hysteres, som utgår från desorptions- och absorptionskurvor
- Försök på golvsystem:
 - Wengholt Johnsson 1995 – undersökning av emissioner som resultat av hydrolys i golvsystem för olika golvkonstruktioner, material och uttorkningsgrad

Sammanfattningsvis kan konstateras att den huvudsakliga skillnaden mellan betong med endast OPC som bindemedel och betong med mineraliska tillsatser ligger i att den senare är väsentligt tätare och har mycket lägre förmåga att transportera fukt. Initialt fanns inte data för betong med Bascement inmätta och data för betong med slagginblandning användes. Då skillnaden mellan dessa och betong med endast OPC var mycket större än av källorna redovisade skillnader mellan olika vattencementtal valde projektet att använda endast en uppsättning av data för simulering av denna betong under namnet ”modern tät betong”. Då mer differentierade data blev tillgängliga från inmätning av betong med Bascement, togs även två av dessa recept med olika vct in med tillhörande data.

För exakta referensuppgifter se kapitel 5.

3.2 Simulering

För detaljerad redovisning av simuleringar inkl. val av materialdata, konstruktion och simuleringsresultat se bilaga 1. Nedan ges en summering med tillhörande bedömning.

Projektets mål var att undersöka hur fuksamverkan påverkas av betong med mineraliska tillsatser i 5 olika fall av golvkonstruktion, se Fig. 4. Två utav fallen, 2 och 3, valdes för simulering. De övriga fallen, 1, 4 samt 5, kunde bedömas med rimlighetsresonemang baserat på resultaten från de två som simulerats.

Observera att syftet med simuleringarna och projektet inte var att undersöka fallen nedan i någon form av helhet som golvlösning, utan endast hur fuktsamverkan påverkas i dessa fall av skillnaden i materialegenskaper för betong. Projektet har inte heller tittat närmare på huruvida dagens uttorkningskrav och kritiska RF är korrekta utan utfört en jämförelse av fuktsamverkan utifrån ett antaget kritiskt RF på 85%, då det oftast är den nivån som används idag.

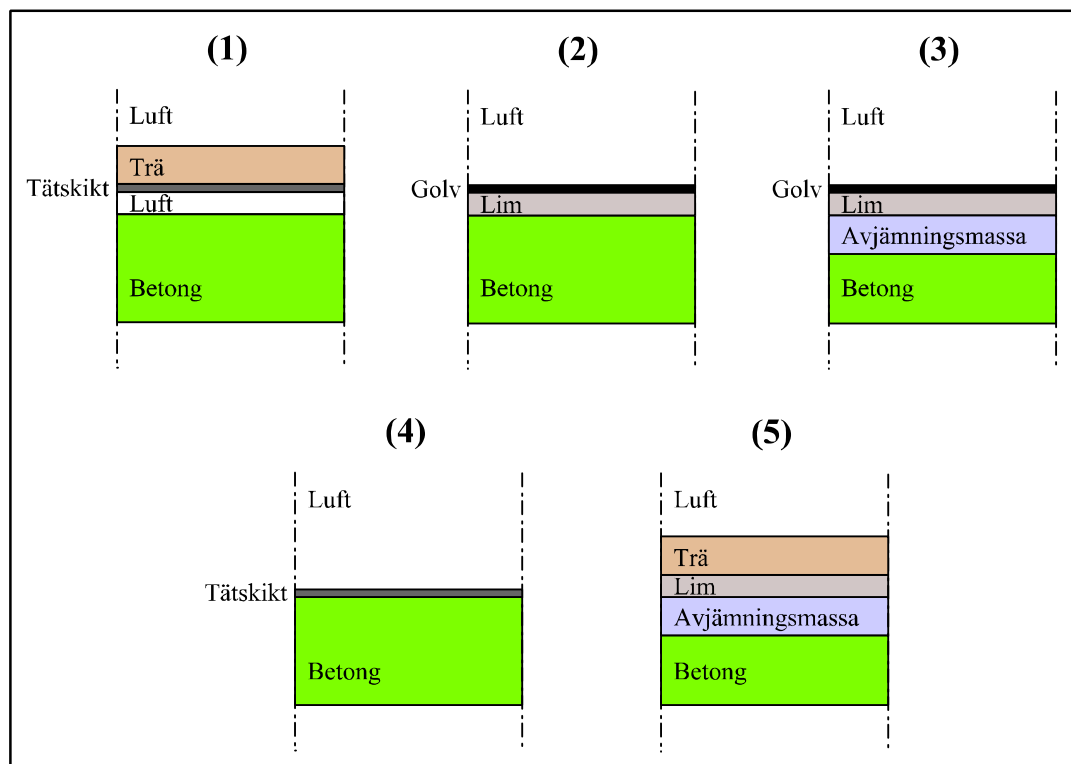


Fig. 4 Fem fall av golvkonstruktion som projektet undersökte.

3.2.1 Uttorkning

Undersökt betong med mineraliska tillsatser har en mycket låg förmåga till transport av fukt. Den är så låg att diffusionsuttorkning i princip sätts ur spel på en byggarbetsplats. Tabellen nedan redovisar tider för diffusionsuttorkning till 85% RF på ekvivalent djup från angiven självuttorkningsnivå. Tiderna skall inte tolkas som typiska torktider, då självuttorkning och diffusionsuttorkning i verkligheten pågår parallellt och inte den ena efter den andra.

Betong	Start RF (%), antagen nivå av självuttorkning	Tid i simuleringen för diffusionsuttorkning till 85% RF på ekvivalent djup (d)
Betong med OPC vct 0,40	90	171
Betong med OPC vct 0,55	95	371
Modern tät betong	90	1320
Betong med Bascement vct 0,40	90	4202
Betong med Bascement vct 0,55	95	4414

Tab. 1, Jämförelse av uttorkningstider från antagen nivå av självuttorkning till 85% RF på ekvivalent djup för 100 mm tjock platta med ensidig uttorkning mot luft med 60% RF och 20 °C.

Däremot ger jämförelsen en förståelse för att det huvudsakligen är självuttorkning man måste satsa på vid uttorkning av betong med mineraliska tillsatser. En annan slutsats är att en uttorkningsåtgärd, som sätts in för att uppfylla ett missat uttorkningsmål, med största sannolikhet inte kommer ha någon större verkan inom överskådlig tid.

3.2.2 Direktlimning av ytskikt (fall 2) med vattenbaserat lim

Den nya täta betongen lämpar sig inte för direktlimning av ytskikt med vattenbaserat lim. Den låga fukttransporten gör att uttorkning inte medför några klassiska uttorkningsprofiler utan en mer jämn RF över hela tvärsnittet, eftersom den huvudsakligen beror på självuttorkning. Detta kombinerat med att fukt inte transporteras snabbt nog djupare in i konstruktionen ger bristande förmåga till buffring av limfukt. Exempel på detta visas i Fig. 5 där betongens översta skikt, som är i kontakt med limmet, befinner sig över 85% RF i ca 100 dagar trots antagen orimligt hög grad av självuttorkning (80% RF). Detta skall jämföras med 0 dagars kontakt med betong med RF över 85% i fallet med betong med endast OPC. Som kommentar kan nämnas att detta fenomen inte borde vara en överraskning. Redan i Wengholt Johnsson 1995 redovisas ett test med direktlimmat ytskikt på betong med OPC och 5% silikastoft och vbt 0,40 som resulterade i påtagliga emissioner trots att betongen var självuttorkad till 85% RF. Detta ökar risken för alkalitransport från betong till lim och matta och kommer att resultera i hydrolys med ev. tillhörande emissioner samt nedbrytning av lim och/eller matta.

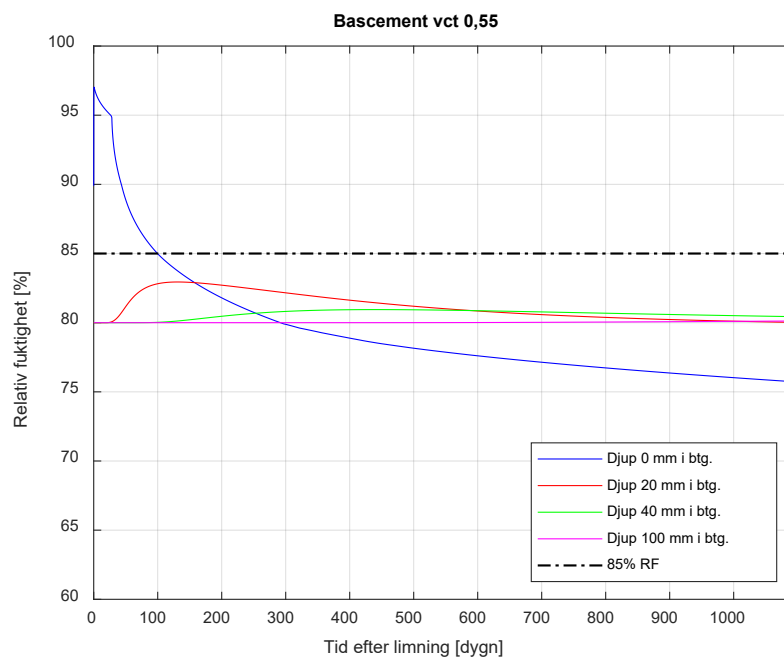


Fig. 5 Omfördelning efter limning av ytskikt på betong med Bascement vct 0,55 självuttorkad till 80% RF i hela tvärsnittet. Betongens yta befinner sig över 85% i ca. 100 dygn.

Som summering redovisas tabellen nedan, där jämförelse görs mellan simulering av olika material för samma golvfall.

Material	Startvillkor	Lim i kontakt med betong RF>85% under tidsperiod (d) efter limning
OPC vct 0,40	Uttorkningsprofil med 85% på ekvivalent djup	0
OPC vct 0,55	Ej simulerat då materialet har större förmåga till fuktbuffering och bör ge mer gynnsamma resultat än OPC vct 0,40	
Modern tät	80% RF i hela tvärsnittet (motsvarar självuttorkning)	240
Bas vct 0,40	Ej simulerat då materialet har mindre förmåga till fuktbuffering och bör ge mindre gynnsamma resultat än Bascement vct 0,55	
Bas vct 0,55	80% RF i hela tvärsnittet (motsvarar självuttorkning)	100

Tab. 2, Jämförelse av omfördelningsresultat från direktlimning av ytskikt med vattenbaserat lim.

3.2.3 Direktlimning av ytskikt (fall 2) med icke vattenbaserat lim

Icke vattenbaserat lim används i en begränsad omfattning. Därför är detta fall kanske inte av större betydelse i praktiken. En studie har utförts främst för att påvisa en fundamentalskillnad i beteende mellan betong med relativt sett hög fukttransportförmåga och med låg dito.

Betong med relativt hög fukttransportförmåga omfördelar fukten inom sig till en jämn nivå över hela konstruktionen efter att ett tätt ytskikt läggs på. Om den är väl uttorkad får erhålls förloppet i Fig. 6. Om den är dåligt uttorkad erhålls ett förlopp visat i Fig. 7.

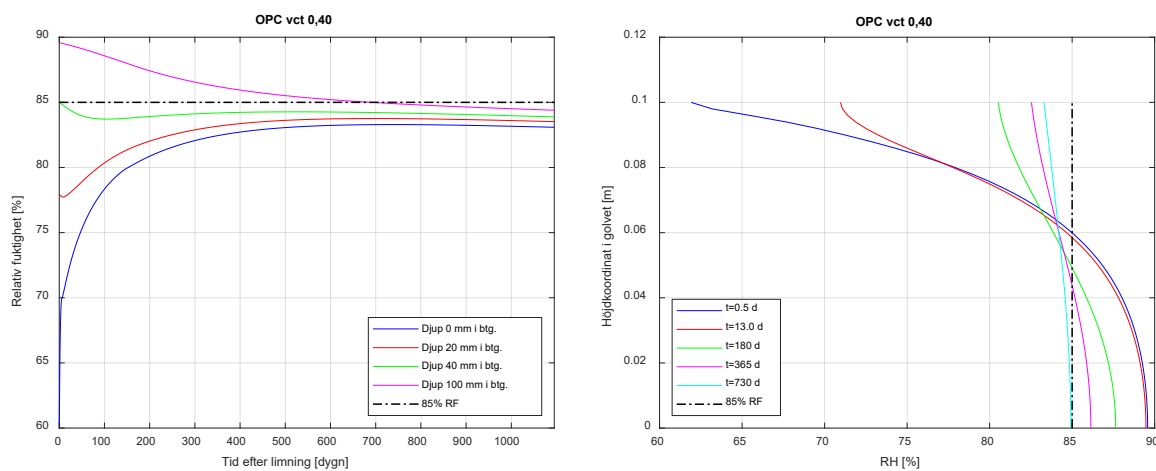


Fig. 6 Omfördelning efter limning med icke vattenbaserat lim av ytskikt på betong med OPC vct 0,40 uttorkad till 85% RF på ekvivalent djup. Betongen omfördelar till ett RF under 85%. Vänster – tidsbaserat förlopp på olika djup, höger – profiler vid olika tidpunkter.

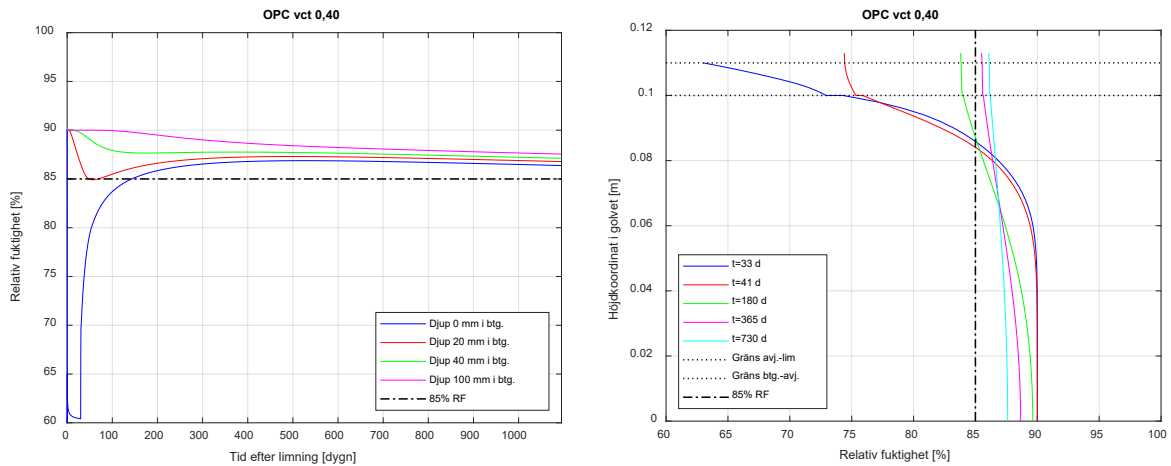


Fig. 7 Omfördelning efter limning med icke vattenbaserat lim av ytskikt på betong med OPC vct 0,40 ensidigt uttorkad i 30 dygn i 60% RF från antagen självuttorkningsnivå på 90% RF. Betongen omfördelar till ett RF på över 85%. Vänster – tidsbaserat förlopp på olika djup, höger – profiler vid olika tidpunkter.

Hela idéen med ett uttorkningskrav på 85% RF på ekvivalent djup bygger på denna omfördelning. Det ekvivalenta djupet är anpassat så att den fuktigare betongen under djupet skall kunna släppa ifrån sig fukten till den torrare över djupet och att allt skall landa under 85% RF.

Betong med mycket låg fukttransportförmåga omfördelar inte i samma omfattning. Den visar sig i simulering att omfördelningen är mycket begränsad och omfattar endast betongens översta del under mycket kort tid efter matläggningen. Under resten av tiden kommer betongen att torka mycket långsamt. Eftersom dess täthet gör att den begränsar fuktflödet i större omfattning än ytskiktet kommer ingen fukt att samlas i närheten av limmet eller ytskiktet. Exempel på detta visas i Fig. 8.

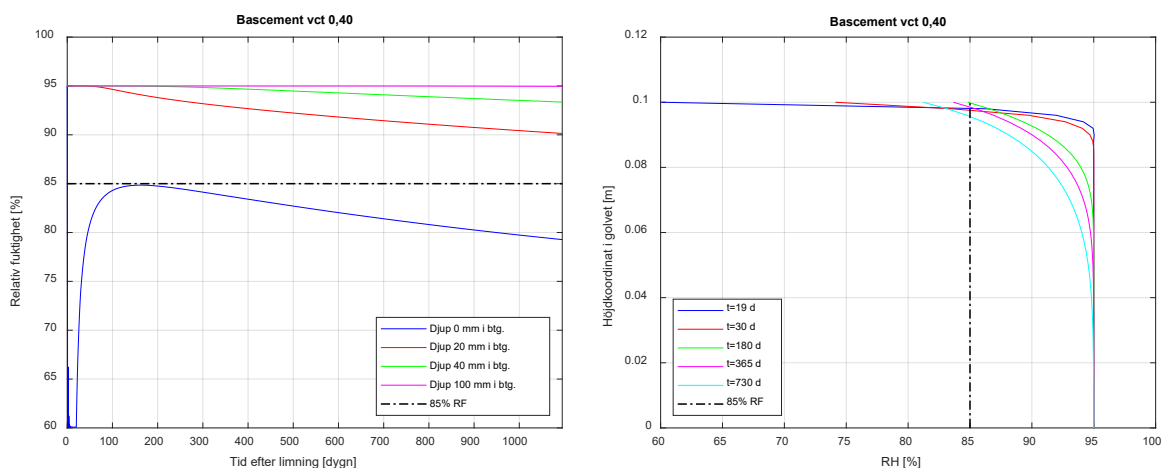


Fig. 8 Omfördelning efter limning med icke vattenbaserat lim av ytskikt på betong med Bascement vct 0,40 ensidigt uttorkad i 20 dygn i 60% RF från antagen självuttorkningsnivå på 95% RF. Klassisk omfördelning av fukt sker i väldigt begränsad omfattning. RF i betongens yta överskrider aldrig 85% RF. Vänster – tidsbaserat förlopp på olika djup, höger – profiler vid olika tidpunkter.

Detta är kanske den mest intressanta funktionella upptäckten i detta projekt. Då den täta betongen övertar rollen från ytskiktet av funktionell flaskhals som reglerar hur mycket fukt släpps ut från golvet till luften ovan, blir hela samspelet annorlunda. Här finns det en klar möjlighet att utnyttja tätheten i det nya materialet konstruktivt utan att äventyra fuksäkerheten.

3.2.4 Limning av ytskikt på avjämning (fall 3)

I detta fall sammanförs lärdom från fall 2. Avjämningen har använts som buffert för limfukten och simuleringar utförts för att se om tätheten går att använda konstruktivt tillsammans med vattenbaserad lim. Svaret är ja! Exempel på detta ges i Fig. 9 och Fig. 10. Den täta betongen får torka mot luft en kort stund för att initiera en liten uttorkningsprofil i den översta delen. Därefter avjämnas den med 10 mm avjämning med god transportförmåga för fukt. Avjämningen torkas väl till under 70% RF, vilket tar ca 2 veckor. Sedan limmas ytskiktet på med vattenbaserat lim. Resultaten visar att efter omfördelning hamnar RF i både avjämningen och betongytan väl under 85%. Omfördelning i resten av konstruktionen uteblir i princip och hela systemet övergår i långsam, säker uttorkning.

Som referens har även betong med OPC simulerats med både godkänd uttorkningsprofil och icke godkänd nivå av självuttorkning som start med liknande resultat som i fall 2, kapitel 3.2.3.

Dessa resultat visar tydligt att dagens syn med uttorkningskrav djupt in i betongen inte är anpassade till betong med låg fukttransportförmåga. De uttrycker fel typ av krav. Det borde vara möjligt att byta ut dagens principiella syn där *betongen får vara så öppen som den vill, så länge den är tillräckligt torr* mot att *betongen får vara hur blött den vill, så länge den är tillräckligt tät*.

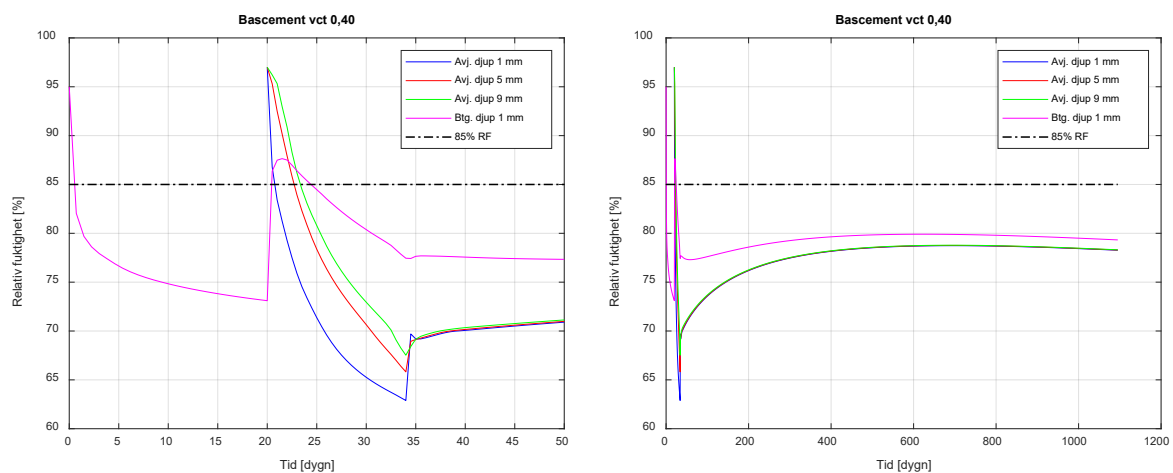


Fig. 9 Omfördelning efter uttorkning mot luft från 95% RF, därefter avjämning ($t=20d$) och vattenbaserad limning av ytskikt ($t=34d$) på betong med Bascement vct 0,40. Vänster – initialt förlopp, höger – långsiktigt förlopp.

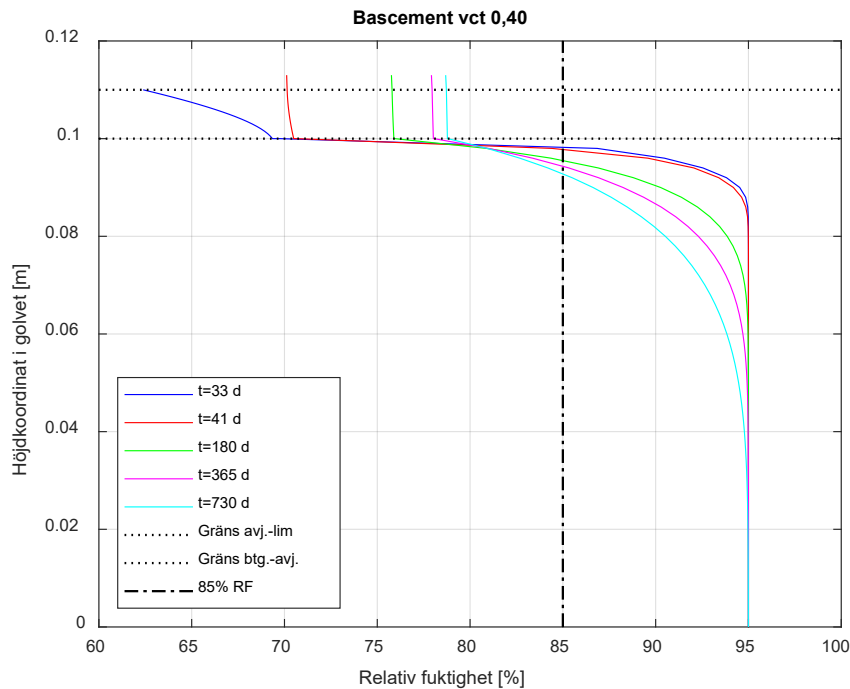


Fig. 10 Fuktprofil i betong med Basement vct 0,40 vid omfördelning efter uttorkning mot luft, därefter avjämning ($t=20d$) och vattenbaserad limning av ytskikt ($t=34d$).

Detta behöver naturligtvis undersökas noggrant i praktiken, men simuleringsresultaten talar sitt tydliga språk och visar att i detta fall ger den tätare betongen nya möjligheter. Man skulle kunna korta byggtider genom att fokusera på att invänta täthet i stället för ett uppfyllt uttorkningskrav. Man skulle även kunna spara både pengar och CO₂-avtryck genom att välja högre vct och inte sikta på självuttorkning. Detta borde vara möjligt med bibehållen fuktsäkerhet då betongens egna egenskaper begränsar fuktflödet i hela konstruktionen.

3.2.5 Träggolv med tätskikt och luftspalt (fall 1)

I detta fall bör den täta betongen ge samma principiella fördel som i fall 2 med icke vattenbaserat lim. Frånvaro av typisk omfördelning bör möjliggöra golvläggning innan dagens uttorkningskrav uppnåtts. Huruvida omfördelning verkligen uteblir i specifika fall bör kontrolleras med hänsyn till val av tätskikt och träggolv. Naturligtvis bör även dagens krav på hur tätskiktet läggs samt frånvaro av organiskt material i luftspalten beaktas.

3.2.6 Träggolv limmat på avjämning (fall 5)

Detta fall bör rimligen motsvara förhållanden i det simulerade fall 3, se kapitel 3.2.4. Detta innebär att dagens uttorkningskrav bör kunna ersättas med ett mer anpassat sådant, som möjliggör tidigare avjämning och golvläggning.

3.2.7 Tätskikt på betong (fall 4)

Fall 4 hanterar påläggning av tätskikt, som normalt sett är vattenbaserat och behöver torka innan det uppnår sin täthet. Här är det viktigt att komma ihåg slutsatserna från vattenbaserad direktlimning i fall 2, se kapitel 3.2.2. Då den täta betongen inte är kapabel att buffra fukt även om den rimligen är väl självuttorkad måste tätskiktet få torka ut väl mot luft, innan eventuellt bruk och kakel läggs på. Annars riskerar fukt att stängas inne, höja betongytans RF och öppna upp för alkalitransport.

3.3 Mätförsök

Följande observationer gjordes i den förenklade mätuppställningen:

- Vid direktlimning på betong
 - Påtagligt lättare att rycka loss ytskiktet efter viss tid.
 - Sur/kemisk lukt noteras i växande styrka med tiden.
- Vid limning på avjämning
 - Ytskiktet sitter hårt fast.
 - Nästan ingen lukt alls, utom små indikationer vid sista testet 111 dagar efter limning.
 - Högre RF-nivåer i avjämning än vid simulering
 - Vid sista mätningen av RF i avjämningen 111–112 dagar efter limning noterades höjning av värden.

Följande slutsatser har dragits av ovanstående:

- Skillnad i lukt samt vidhäftning av ytskikt indikerar större nedbrytning vid direktlimning på betong än vid limning på avjämning. Detta stämmer väl med slutsatser från simuleringar om den täta betongens bristande förmåga till buffring av limfukt.
- Högre RF-nivåer i avjämning jämfört med simulering samt märkbar ökning av RF i sista mätningen antyder att betongen släpper ifrån sig mer fukt än i simuleringarna. Då testet med direktlimning på betong bekräftade täthetsrelaterade problem för betong med samma vct som var 11 månader gammal och betongen i avjämningstestet var endast 2 månader gammal vid avjämning och 2,5 månader gammal vid limning av ytskikt, konstateras att betongen i de senare med hög sannolikhet inte uppnått sin högsta täthet vid åldern för testet och helt enkelt var för ung för denna tillämpning.

Testet bekräftar alltså skillnad i buffringsförmåga för limfukt samt indikerar att önskvärd täthet för konstruktivt utnyttjande i fall 3 med hög sannolikhet inte uppnåtts 2–2,5 månader efter gjutning för betong med Bascement vct 0,55.

För detaljerade resultat av mätförsök se bilaga 2.

3.4 Slutsatser

Betong med mineraliska tillsatser och fullt utvecklade täthet uppför sig klart annorlunda i golvsystem än betong med endast OPC. De noterade skillnaderna omfattar:

- I princip ingen diffusionsuttorkning
- Bristande förmåga att buffra limfukt
- Nästan ingen klassisk omfördelning av fukt efter påläggning av tätskikt

Detta medför att all pålimning av ytskikt med vattenbaserad lim kräver en väl uttorkad avjämning. De genomförda simuleringarna visar att ca 10mm bör vara fullt tillräckligt. Samtidigt öppnas möjligheten att utnyttja betongens täthet. Då omfördelning inte äger rum på klassiskt vis har simuleringarna visat att det bör vara fullt möjligt att avjämna och pålimma ytskikt innan uttorkningskrav på 85% är uppfyllt på ekvivalent djup i betongen.

Det bör samtidigt observeras att simuleringarna och de förenklade testerna endast påvisar en möjlighet till utnyttjande och inte beskriver en validerad och kvalitetssäkrad metod. Osäkerhet råder om när betong med mineraliska tillsatser uppnår en önskvärd täthet. Det vore även högst önskvärt att kontrollera inte bara relativ fuktighet utan även emissionsnivåer i mer omfattande försök med representativa golvsystem i likhet med Wengholt Johnsson 1995.

4 Rekommendationer

Projektet rekommenderar i enlighet med slutsatserna ett uppföljningsprojekt:

- Med syftet att ta fram en konceptvalidering för utnyttjande av betongens täthet i framtagning av golvsystem
- Där ett flertal kombinationer av bindemedel, vct samt tidpunkt efter gjutning för avjämning och pålimning av ytskikt tas fram och testas.
- Där testerna omfattar utöver mätning av relativ fuktighet i betong och avjämning även mätning av emissioner från ev. hydrolys i lim- och ytskikt för att påvisa när sådan sker och när den inte gör det.

Efter publicering av artikeln i bilaga 3 har ett nytt projekt, SBUF 13560, sökts, beviljats och är i skrivande stund i full gång. Del 1 av SBUF 13560 följer till fullo rekommendationen ovan och de önskade försöken pågår.

5 Referenser

Nilsson 1980 – L.-O. Nilsson, *Betonghandboken*, fig. 14.3:5–6, 1980

Hedenblad 1993 – G. Hedenblad, *Moisture Permeability of Mature Concrete, Cement Mortar and Cement Paste*, TVBM-1014, Lund Institute of Technology 1993

Mualem 1974 – Y. Mualem, *A Conceptual Model of Hysteresis*, *Water Resources Research*, 10:514-520, 1974

Olsson m.fl. 2018 - N. Olsson, L.-O. Nilsson, M. Åhs, samt V. Baroghel-Bouny, *Moisture transport and sorption in cement based materials containing slag or silica fume*, *Cement and Concrete Research*, 2018

Saeidpour & Wadsö 2016 - M. Saeidpour, L. Wadsö, *Moisture diffusion coefficients of mortars in absorption and desorption*, *Cement and Concrete Research*, 2016

Wengholt Johnsson 1995 - H. Wengholt Johnsson, *Kemisk emission från golvsystem – effekt av olika betongkvalitet och fuktbelastning*, Chalmers Tekniska Högskola 1995

Zhang 2014 – Z. Zhang, *Modelling of sorption hysteresis and its effect on moisture transport within cementitious materials*, Doktorsavhandling, Université Paris-Est, 2014

Bilageförteckning

1. Resultat från simuleringarna
2. Resultat från försöken
3. Industriell artikel, *Finns det någon fördel med modern, tät betong?*, publicerad 2018-04-15 på PPB:s webbsajt.

Simuleringsresultat inom SBUF 13354

Detta dokument beskriver resultat av simulerad uttorkning och omfördelning av fukt i golvsystem inom SBUF 13354. Syftet med dessa simuleringar var att jämföra hur modern betong med mineraliska tillsatser uppför sig fuktmässigt i typiska sammanhang i ett golvsystem jämfört med hur gammaldags betong baserad på endast OPC gjorde. Simuleringarna fokuserade på fyra olika fall:

- Diffusionsuttorkning från antagen nivå av självuttorkning
- Omfördelning vid direktlimning av ytskikt på betong med vattenbaserat lim
- Omfördelning vid direktlimning av ytskikt på betong med icke vattenbaserat lim
- Diffusionsuttorkning av avjämning på betong och omfördelning vid limning av ytskikt på avjämningen med vattenbaserat lim

Dessa fall täcker inte alla tänkbara användningsområden men har funnits tillräckliga för att visualisera de skillnader som den moderna betongens låga fuktransport huvudsakligen leder till.

1 Förutsättningar

1.1 Materialdata

Initialt har tre olika slags betong med varierande egenskaper används:

- **OPC vct 0,40** – motsvarar gammaldags betong med endast OPC som bindemedel, vattencementtal 0,40, sorptionsdata hämtade från Nilsson 1980, transportdata hämtade från Hedenblad 1993
- **OPC vct 0,55** – som ovan fast med vattencementtal 0,55, materialdata medelvärdesbildade mellan vct 0,50 och vct 0,60
- **Modern tät betong** – betong med egenskaper karakteristiska för en betong med mineraltillsatser, sorption och transportdata baserade på Saeidpour & Wadsö 2016 samt Olsson m.fl. 2018.

Då skillnaden i transport mellan betong med OPC resp. med inblandning av mineraliska tillsatser var omfattande valdes det att inte specificera vattencementtalet för den moderna täta betongen utan att studera den principiella skillnaden mellan betongerna.

Nyligen har inmätning av fuktegenskaper hos betong med Bascement avslutats. Som komplettering till de tre ursprungliga betongerna utfördes även simuleringar för:

- **Bas vct 0,40** – betong med Bascement, data från SBUF 13198
- **Bas vct 0,55** – betong med Bascement, data från SBUF 13198

För simulering av avjämningsmassa har materialdata för Weberfloor 140 Nova använts.

För simulering av limfukt från vattenbaserat lim har materialdata för CascoProff Universal används och ytskiktet motsvarar Tarkett iQ Optima.

1.2 Konstruktion och miljö

Som konstruktion har ett betonggolv används. Golvet har en tjocklek på 100mm. Avjämning som läggs på i den sista simuleringsfallet har en tjocklek på 10mm. Mellan Avjämningen och betongen simuleras ett lager primer med ett ångmotsstånd på 5000 s/m.

Som omgivande miljö på ovansidan används luft med 60 % relativ fuktighet. Golvet undre sida är förseglad i simuleringarna.

Man kan alltså tolka simuleringarna som 10 cm platta på mark med enkelsidig uttorkning eller 20 cm bjälklag med dubbelsidig uttorkning.

1.3 Simulering

Simulering har utförts med en nyutvecklade forskningsmjukvara FEM ϕ -ca, baserad på finita elementmetoden med 2-nodselement med linjära ansatser för lösning av massflödesekvationen i ett isoterm fall vid 20 °C. Då FEM ϕ -ca är en beräkningskärna utan eget grafiskt användargränssnitt har den styrts av skript från Matlab där även samtliga diagram är framtagna.

Betongen har simulerats med 50 element, avjämningen med 20 och det vattenbaserade limskiktet med 6.

För modellering av sorption inkl. hysteres från data omfattande en desorptions- och en absorptionskurva har modellen i Mualem 1974 använts.

1.4 Begränsningar

Simuleringarna nedan gäller endast de redovisade konstruktionerna och materialen i simulerad kombination. Då samtliga data använda i simuleringarna avser mogen betong (ålder större eller med ett år) råder det viss osäkerhet avseende betongens beteende vid tidigare ålder. Tätheten hos betong med mineraliska tillsatser utvecklas över viss tid. Detta kan spela roll vid praktiskt tillämpning av metodik som visas i simuleringar och medföra skillnad i resultat särskilt vid användning av mycket ung betong.

Simuleringarna skall huvudsakligen ses som jämförelse av funktionsprinciper. Innan praktiska metoder som ger bra resultat med god säkerhet kan basera sig på dessa måste mer utveckling inkl. praktisk validering att ske.

2 Uttorkning

Uttorkningsjämförelsen utgår från ett konstant RF i hela konstruktionen som antas uppnått genom självuttorkning. Därefter simuleras diffusionsuttorkning tills 85% RF uppnås på djup av 40mm som motsvarar ett ekvivalent djup enligt RBK.

Observera att något olika startvärden för RF har valts i simuleringarna då lägre vattencementtal i regel ger en bättre självuttorkning.

2.1 OPC

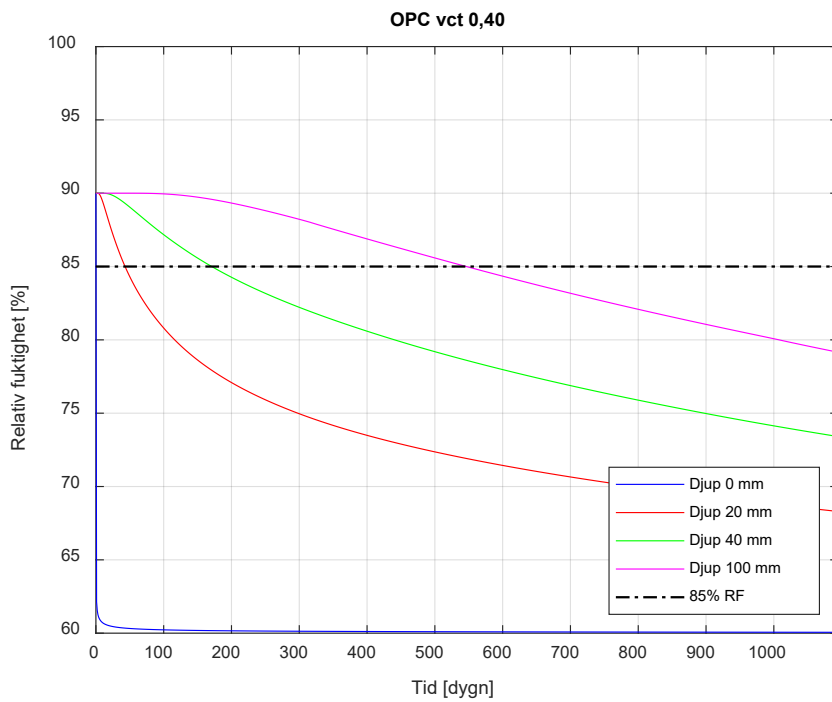


Fig. 1 Diffusionsuttorkning av betong med OPC vct 0,40 från antagen självuttorkningsnivå 90% RF, relativ fuktighet på olika djup som funktion av tid.

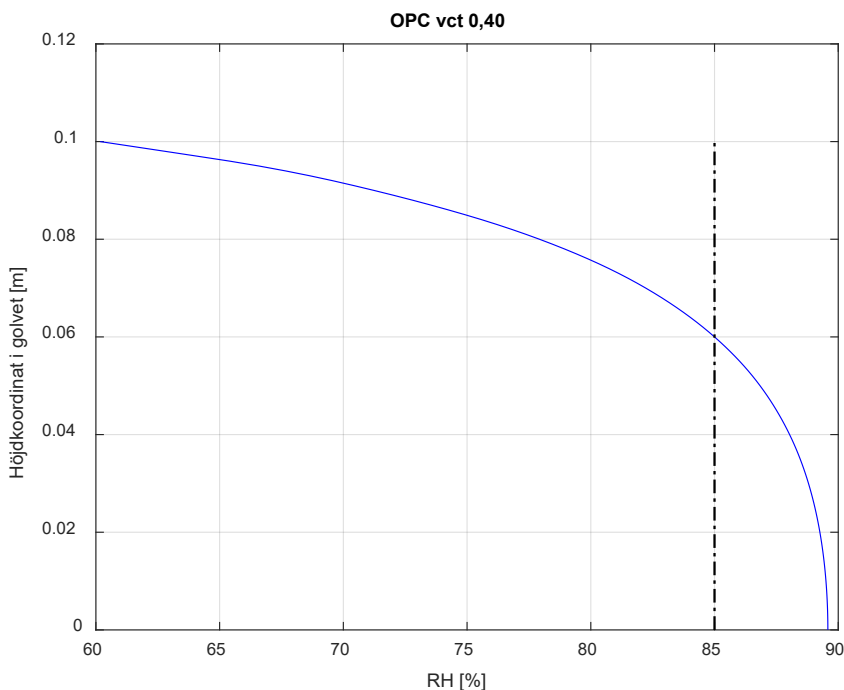


Fig. 2 Uttorkningsprofil i betong med OPC vct 0,40 vid uppnått krav på 85% RF på ekvivalent djup, som relativ fuktighet på olika djup i konstruktionen 171 dygn efter gjutning.

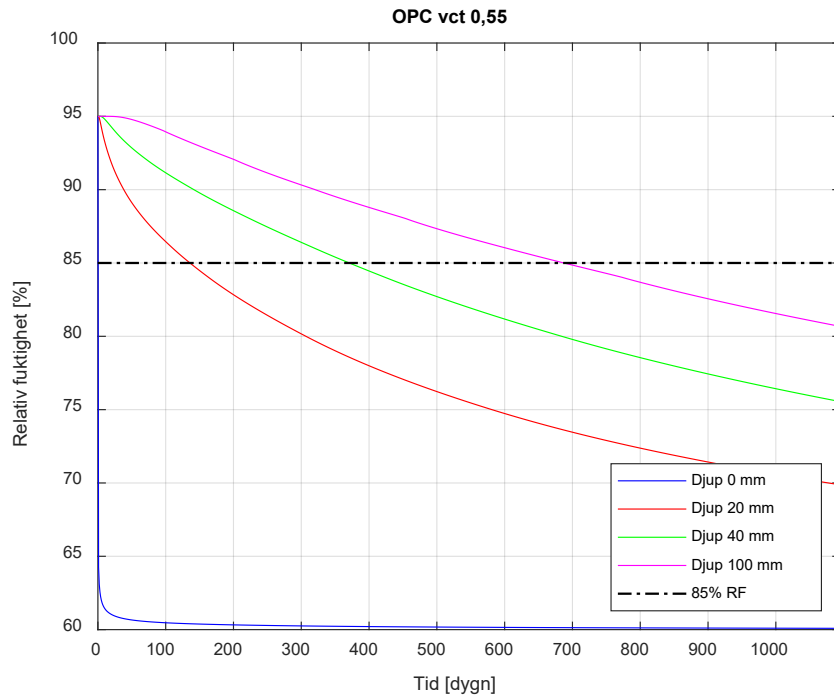


Fig. 3 Diffusionsuttorkning av betong med OPC vct 0,55 från antagen självuttorkningsnivå 95% RF, relativ fuktighet på olika djup som funktion av tid.

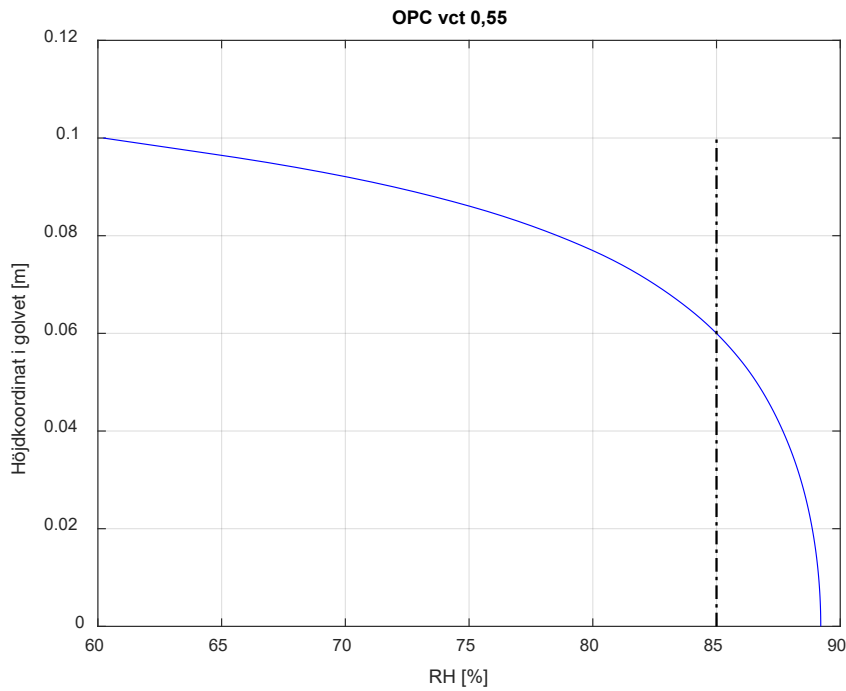


Fig. 4 Uttorkningsprofil i betong med OPC vct 0,55 vid uppnått krav på 85% RF på ekvivalent djup, som relativ fuktighet på olika djup i konstruktionen 371 dygn efter gjutning.

2.2 Modern tät betong

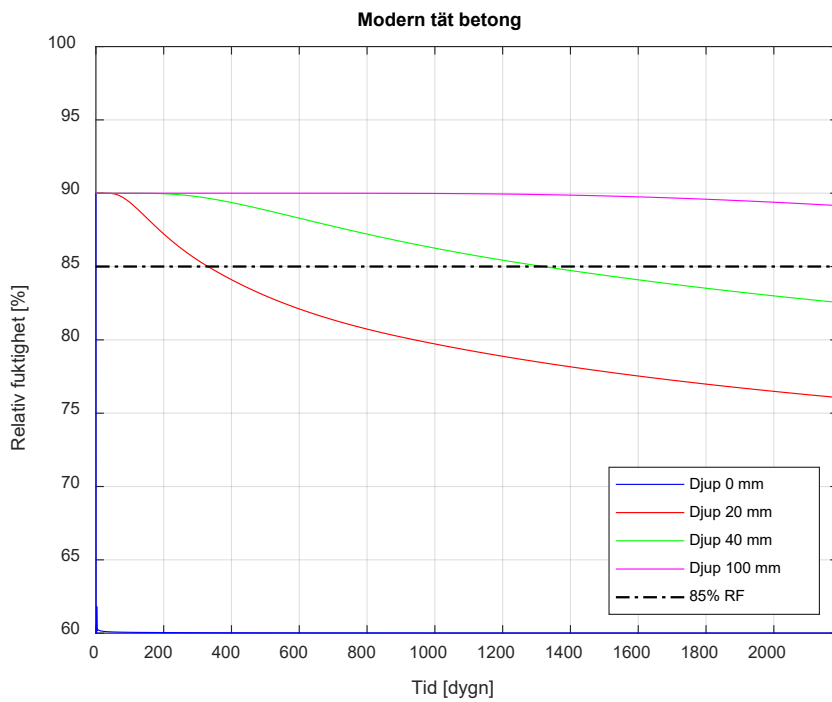


Fig. 5 Diffusionsuttorkning av modern tät betong från antagen självuttorkningsnivå 90% RF, relativ fuktighet på olika djup som funktion av tid.

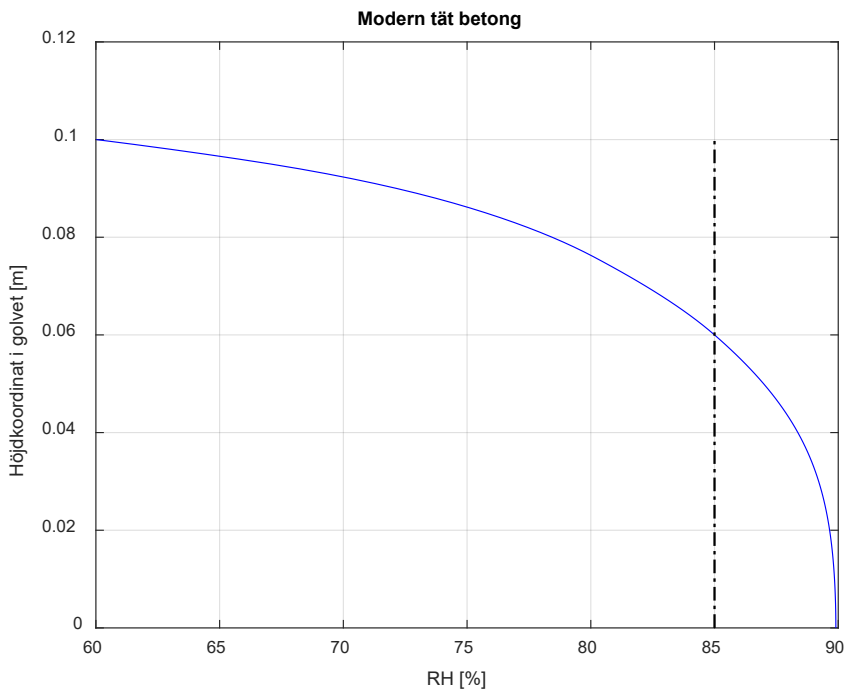


Fig. 6 Uttorkningsprofil i modern tät betong uppnått krav på 85% RF på ekvivalent djup, som relativ fuktighet på olika djup i konstruktionen 1320 dygn efter gjutning.

2.3 Basement

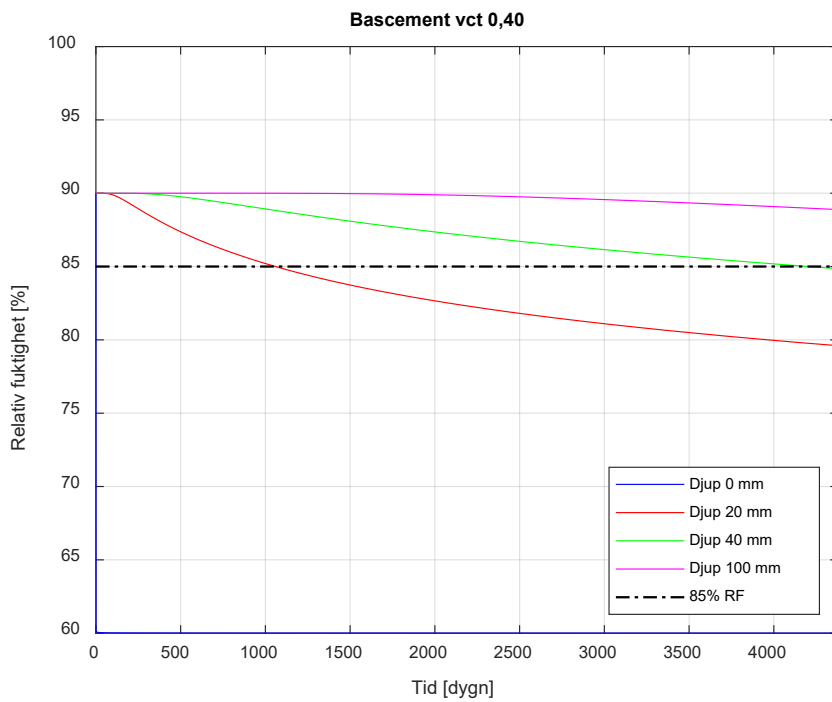


Fig. 7 Diffusionsuttorkning av betong med Basement vct 0,40 från antagen självuttorkningsnivå 90% RF, relativ fuktighet på olika djup som funktion av tid.

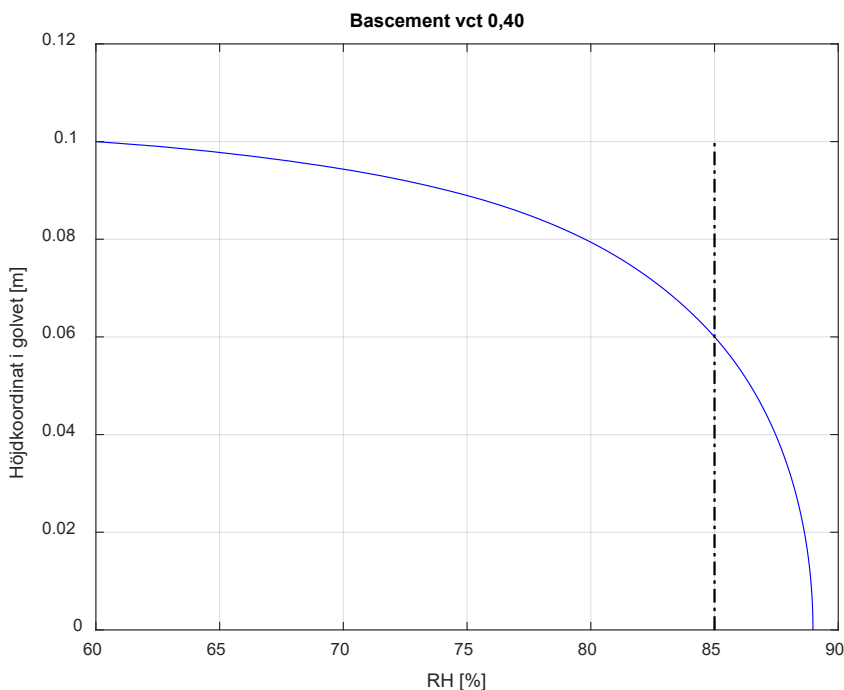


Fig. 8 Uttorkningsprofil i betong med Basement vct 0,40 vid uppnått krav på 85% RF på ekvivalent djup, som relativ fuktighet på olika djup i konstruktionen 4202 dygn efter gjutning.

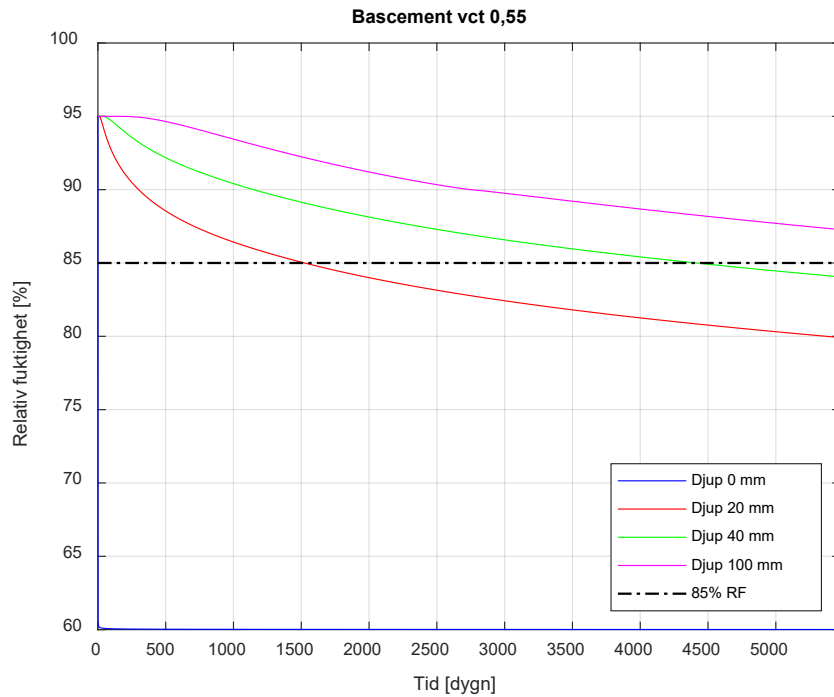


Fig. 9 Diffusionsuttorkning av betong med Bascement vct 0,55 från antagen självuttorkningsnivå 95% RF, relativ fuktighet på olika djup som funktion av tid.

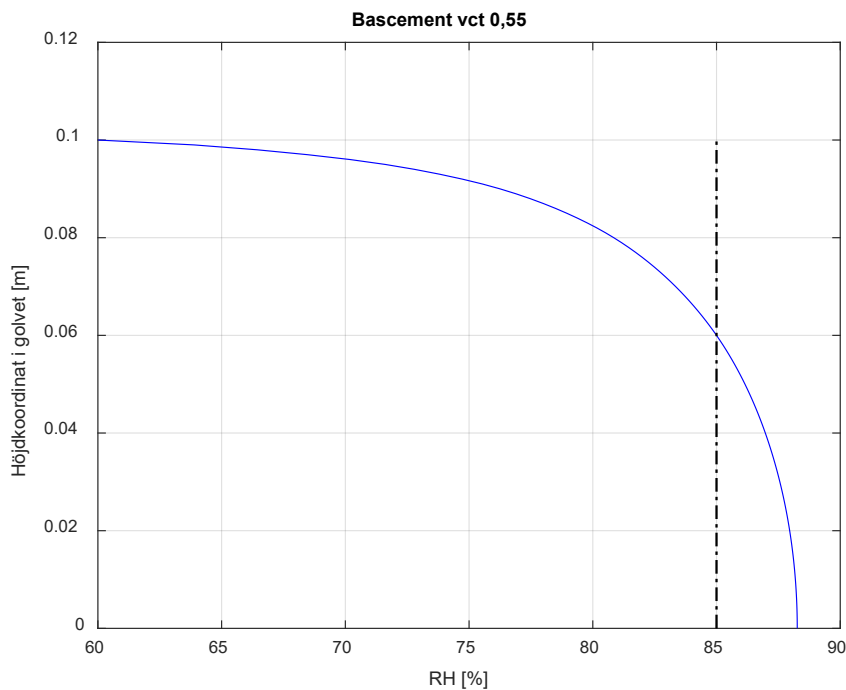


Fig. 10 Uttorkningsprofil i betong med Bascement vct 0,55 vid uppnått krav på 85% RF på ekvivalent djup, som relativ fuktighet på olika djup i konstruktionen 4414 dygn efter gjutning.

2.4 Summering av uttorkning

Tider för uppnått uttorkningskrav på 85% RF för de olika simuleringarna ges i tabellen nedan.

Material	Start RF (%), antagen nivå av självuttorkning	Tid för diffusionsuttorkning till 85% RF på ekvivalent djup (d)
OPC vct 0,40	90	171
OPC vct 0,55	95	371
Modern tät	90	1320
Bas vct 0,40	90	4202
Bas vct 0,55	95	4414

Slutsatser:

- Det som låter sig konstateras är att diffusionen är mycket lägre i den moderna täta betongen och ännu lägre i betongen med Bascement.
- Uttorkningstiderna är inte acceptabla i praktiken på en byggarbetsplats. Detta innebär att diffusionsuttorkningen i princip är satt ur spel.
- Eftersom den extrema tätheten inte infinner sig direkt efter gjutning utan tar tid på sig att utvecklas kommer en begränsad uttorkningsprofil att etablera sig i betongen innan porsystemet täpper till.
- Att sikta på uttorkningsåtgärder som lägre omgivande RF och högre temperatur då man missat sitt uttorkningskrav i verkligt projekt kommer med högsta sannolikhet inte att ge nämnvärd effekt inom överskådlig tid.

3 Vattenbaserat direktlimning av ytskikt

3.1 OPC

Samtliga simuleringar av OPC utgår från betong uttorkad till 85% RF på ekvivalent djup i enlighet med uttorkningsresultaten från kapitel 2.1.

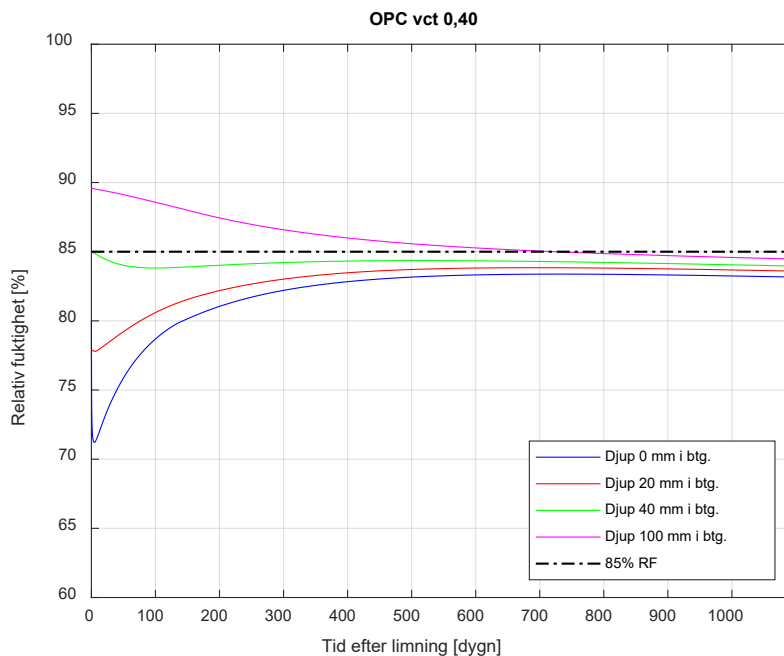


Fig. 11 Omfördelning efter limning av ytskikt på betong med OPC vct 0,40 uttorkad till 85% RF på ekvivalent djup i enlighet med Fig. 2. Betongytan kommer aldrig upp i 85% RF.

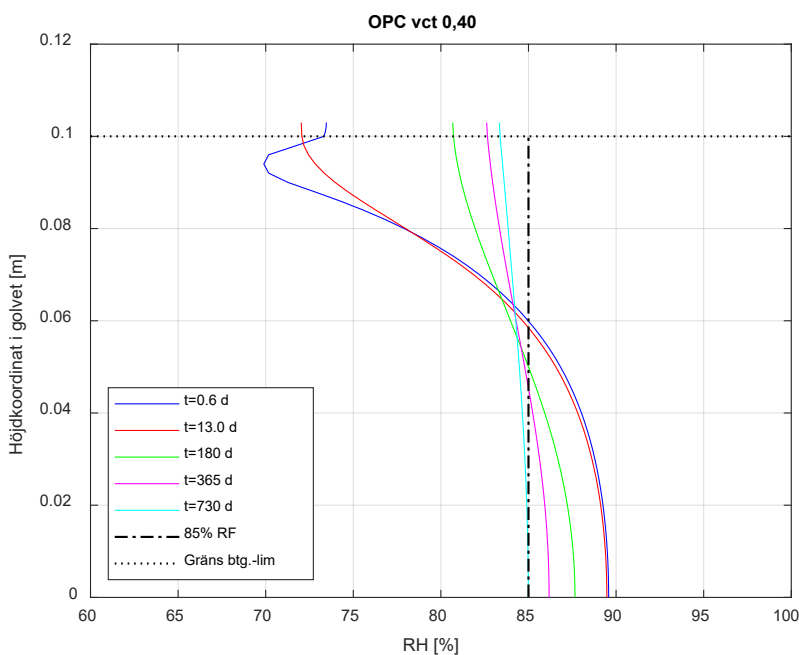


Fig. 12 Fuktprofil i betong med OPC vct 0,40 vid olika tidpunkter vid omfördelning efter limning av ytskikt med vattenbaserat lim.

3.2 Modern tät betong

Då den moderna täta betongen i princip inte diffusionsuttorkar över huvud taget antas den i simuleringarna nedan ha självuttorkat till 80% RF, vilket används som startvärde i hela betongen. Startvärdet kan tyckas lågt men vi vill visa att inte ens så god självuttorkning garanterar bra resultat i det simulerade fallet.

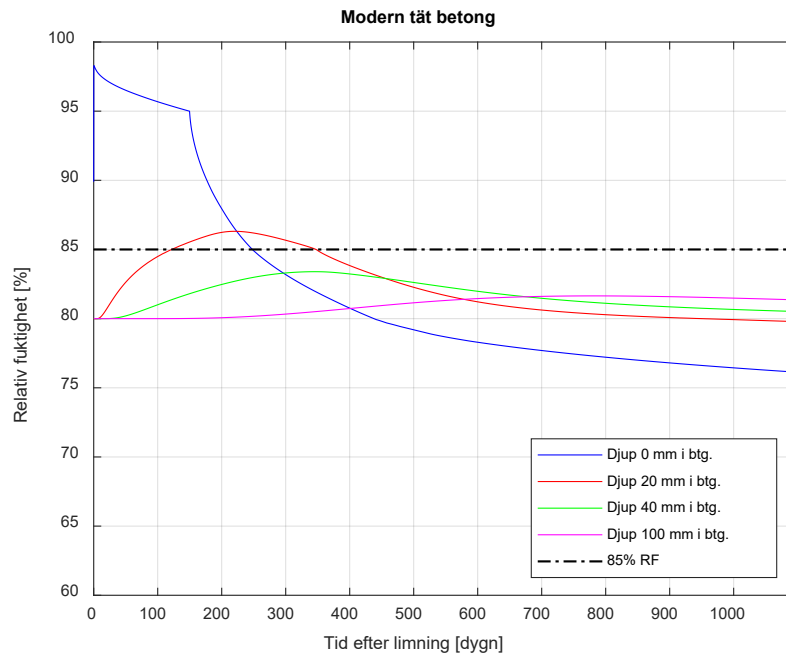


Fig. 13 Omfördelning efter limning av ytskikt på modern tät betong självuttorkad till 80% RF i hela tvärsnittet. Betongens yta befinner sig över 85% RF i ca. 240 dygn.

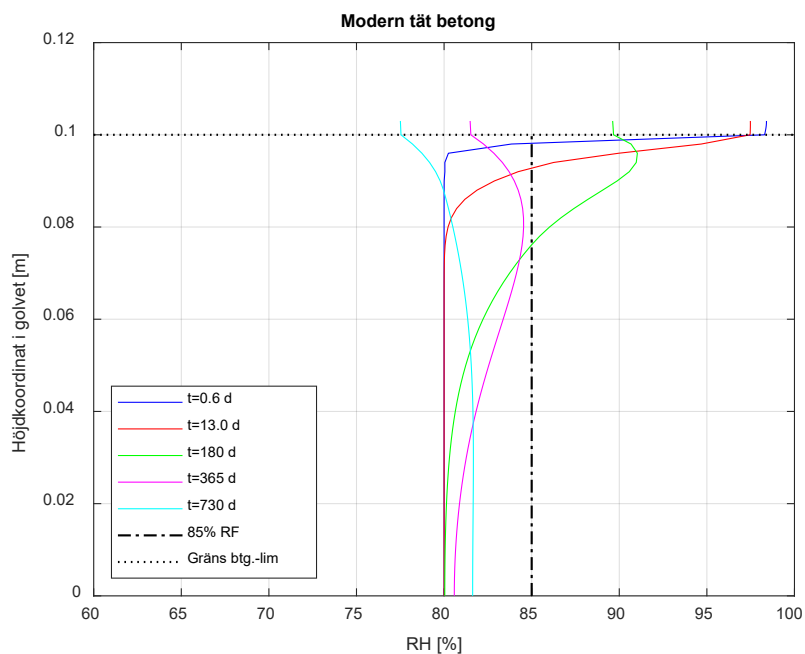


Fig. 14 Fuktprofil i modern tät betong vid olika tidpunkter vid omfördelning efter limning av ytskikt med vattenbaserat lim.

3.3 Betong med Bascement

Då betongen med Bascement inte tillåter en diffusionsuttorkning i praktiken, se Fig. 7 och Fig. 9, antas den i simuleringarna nedan ha självuttorkat till 80% RF, vilket används som startvärde i hela betongen. Startvärdet kan tyckas lågt men vi vill visa att inte ens så god självuttorkning garanterar bra resultat i det simulerade fallet.

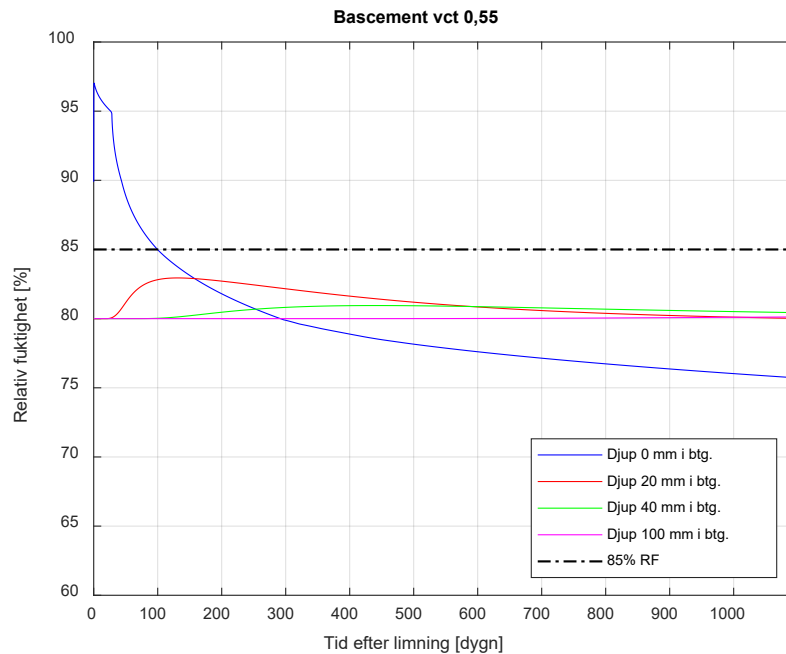


Fig. 15 Omfördelning efter limning av ytskikt på betong med Bascement vct 0,55 självuttorkad till 80% RF i hela tvärsnittet. Betongens yta befinner sig över 85% i ca. 100 dygn.

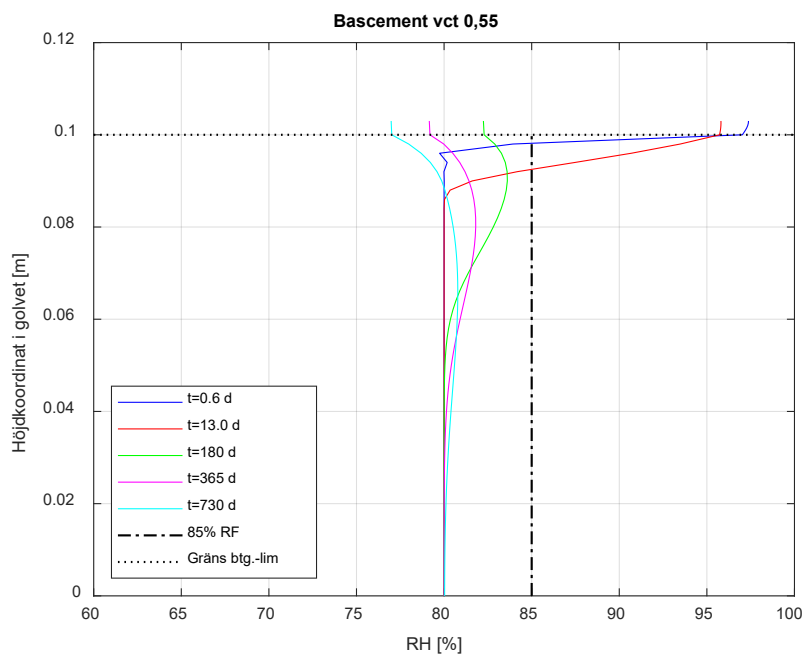


Fig. 16 Fuktprofil i betong med Bascement vct 0,40 vid omfördelning efter limning av ytskikt med vattenbaserat lim.

3.4 Summering av vattenbaserad direktlimning

Tidsperioder då limmet är i kontakt med betong med RF över 85% för de olika simuleringarna ges i tabellen nedan.

Material	Startvillkor	Lim i kontakt med betong RF>85% under tidsperiod (d) efter limning
OPC vct 0,40	Uttorkningsprofil med 85% på ekvivalent djup	0
OPC vct 0,55	Ej simulerat då materialet har större förmåga till fuktbuffering och bör ge mer gynnsamma resultat än OPC vct 0,40	
Modern tät	80% RF i hela tvärsnittet (motsvarar självuttorkning)	240
Bas vct 0,40	Ej simulerat då materialet har mindre förmåga till fuktbuffering och bör ge mindre gynnsamma resultat än Bascement vct 0,55	
Bas vct 0,55	80% RF i hela tvärsnittet (motsvarar självuttorkning)	100

Slutsatser:

- Vid direktlimning av ytskikt med vattenbaserat lim mot modern tät betong samt betong med Bascement blir kontakttiden för limmet och betong med RF över 85% klart olika. För betong med OPC sker det inte alls. De erhållna tiderna för betong med mineraliska tillsatser 100–240 dygn är mycket mer än vad limtillverkare normalt rekommenderar (max ca 10 dygn).
- Risken ökar för alkalitransport från betong till limmet och hydrolys med ev. emissioner som följd.
- Modern tät betong samt betong med Bascement är för tät för att direktlimning med vattenbaserat lim skall fungera.

4 Icke vattenbaserad direktlimning av ytskikt

Det är inte ofta som icke vattenbaserat lim används. Situationen i följande simuleringar har därför begränsat värde för majoriteten av praktiska fall. Huvudanledningen till varför den tas med är av mer principiell karaktär, då den visar på en fundamental skillnad i beteende mellan betong som har relativt hög fukttransportförmåga (med OPC) och en med mycket låg sådan (modern tät samt med Bascement).

4.1 OPC från uttorkningsprofil

Simulering av betong med OPC nedan utgår från betong uttorkad till 85% RF på ekvivalent djup i enlighet med uttorkningsresultaten från kapitel 2.1.

Då det täta ytskiktet läggs på ser man i figurerna nedan en klassisk omfördelning av fukt i betongen. Då betongen utgår från en godkänd uttorkningsprofil kommer omfördelningen inte att leda till att RF i betongens ytskikt överstiger 85%.

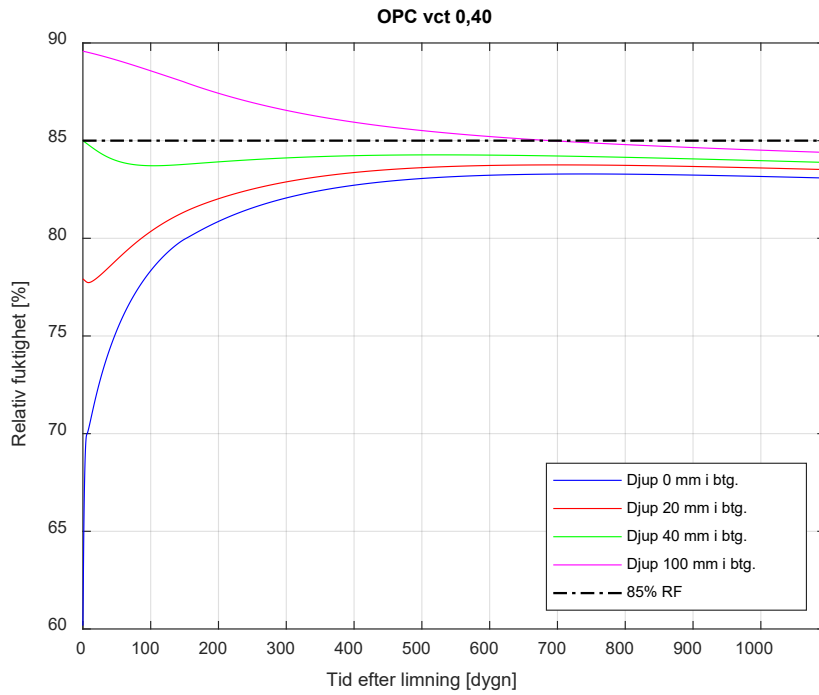


Fig. 17 Omfördelning efter limning med icke vattenbaserat lim av ytskikt på betong med OPC vct 0,40 uttorkad till 85% RF på ekvivalent djup i enlighet med Fig. 2. Betongens yta kommer efter omfördelning av fukt i betongen aldrig upp i 85% RF.

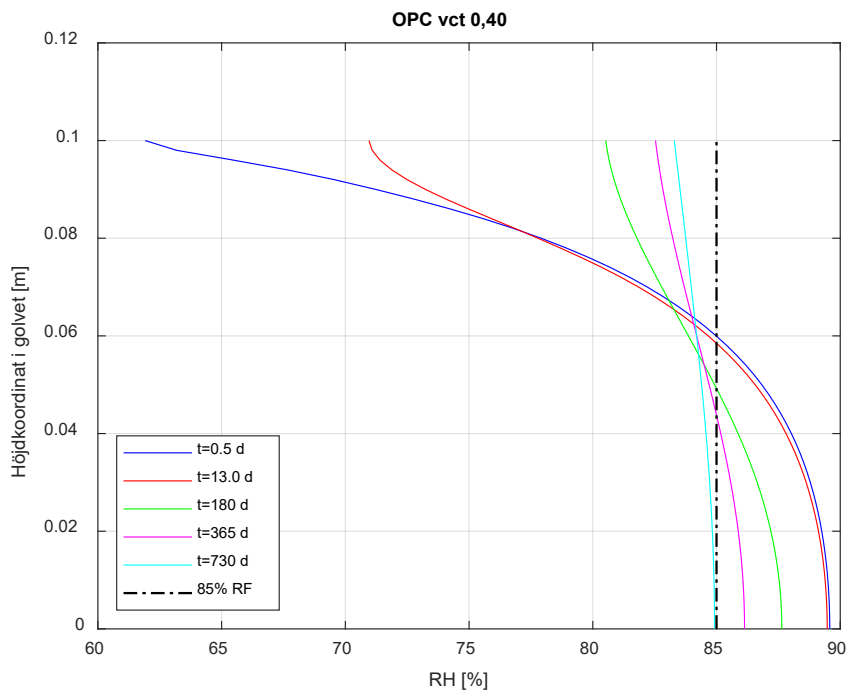


Fig. 18 Fuktprofil i betong med OPC vct 0,40 vid omfördelning efter limning av ytskikt med icke vattenbaserat lim.

4.2 Modern tät betong

Observera att här används som startvärde 95% RF i hela konstruktionen. Betongen får sedan torka ensidigt mot luft med 60% RF i 30 dagar. Detta skapar en liten uttorkningsprofil men den når inte djupt under ytan. Betongen uppfyller således inte de krav man normalt ställer på RF i betongen inför mattläggning.

Vad som händer efter mattläggningen är att den klassiska omfördelningen av fukt uteblir eller rättare sagt utspelar sig endast i mycket begränsad omfattning – i början och endast i det översta betongskiktet. Som resultat kommer betongens yta att öka i RF initialt men den kommer inte upp till 85% innan hela betongprofilen övergår till långsam uttorkning. I detta system blir betongen det tätaste delen som styr det totala fuktflödet, till skillnad från golv med öppen betong där ytskiktet oftast är styrande för fuktflödet.

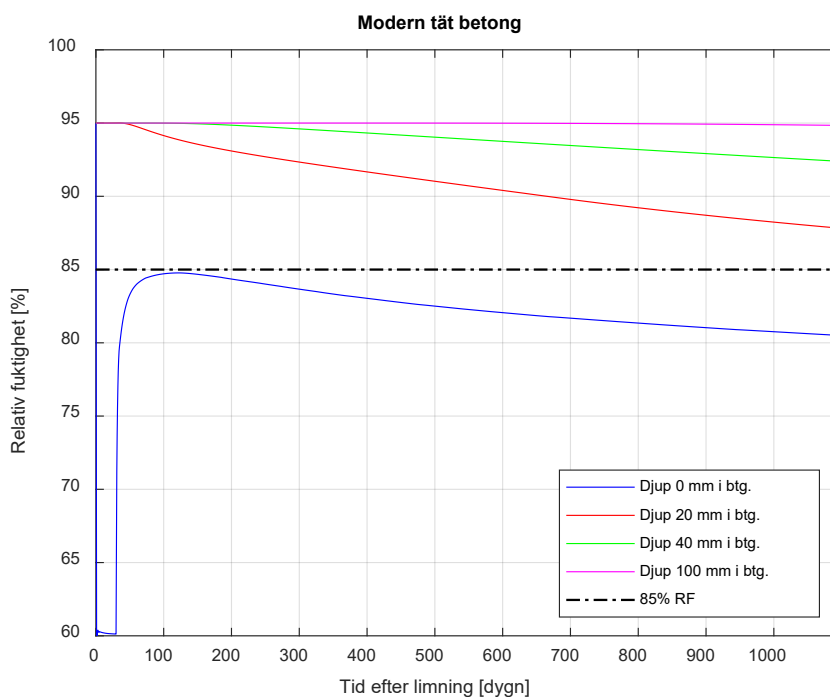


Fig. 19 Omfördelning efter limning med icke vattenbaserat lim av ytskikt på modern tät betong ensidigt uttorkad i 30 dygn i 60% RF från antagen självuttorkningsnivå på 95% RF. Klassisk omfördelning av fukt sker i väldigt begränsad omfattning. RF i betongens yta överskrider aldrig 85% RF.

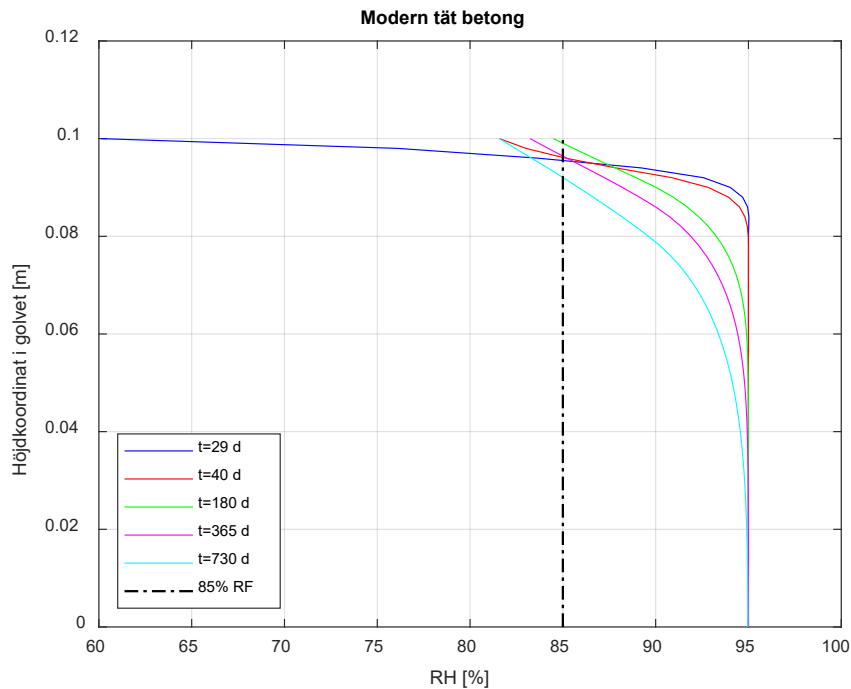


Fig. 20 Fuktprofil i modern tät betong vid omfördelning efter limning av ytskikt med icke vattenbaserat lim.

4.3 Betong med Basement

Observera att här används som startvärde 95% RF för vct 0,40 samt 90% för Bas vct 0,55 i hela konstruktionen. Betongen får sedan torka ensidigt mot luft med 60% RF i 20 dagar. Detta skapar en liten uttorkningsprofil men den når inte djupt under ytan. Betongen uppfyller således inte de krav man normalt ställer på RF i betongen inför matläggning.

Här syns samma fenomen som för modern tät betong. Klassisk omfördelning uteblir. Observera att de olika vattencementtalen som ger betong med olika täthet uppför sig något olika. Vct 0,40 som är tätare kan starta vid 95% RF och ge nästan samma resultat som vct 0,50 som startar vid 90% RF och är något öppnare. Skulle vct 0,55 startat vid 95% RF skulle ytskiktet kommit upp i och förbi 85% RF under en period.

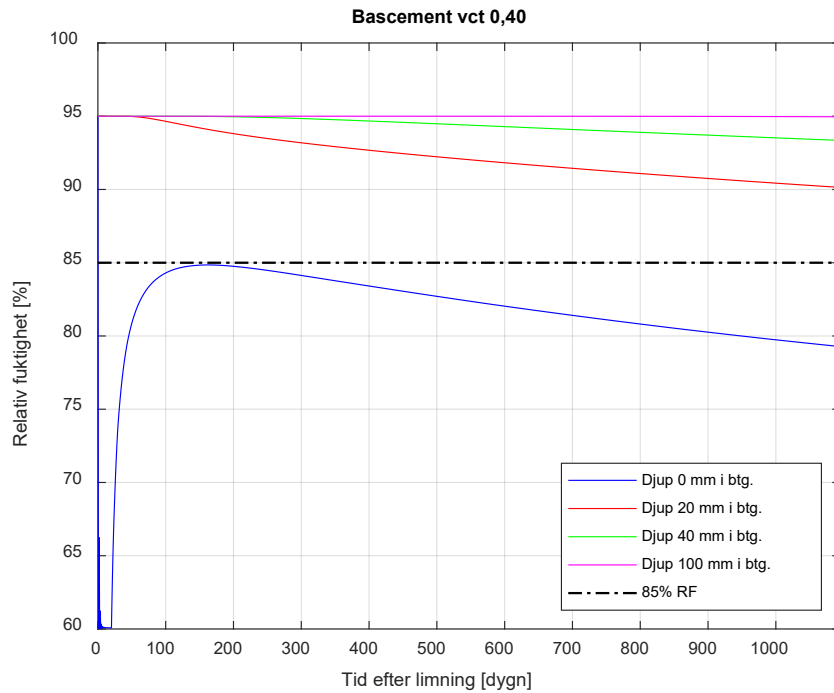


Fig. 21 Omfördelning efter limning med icke vattenbaserat lim av ytskikt på betong med Bascement vct 0,40 ensidigt uttorkad i 20 dygn i 60% RF från antagen självuttorkningsnivå på 95% RF. Klassisk omfördelning av fukt sker i väldigt begränsad omfattning. RF i betongens yta överskrider aldrig 85% RF.

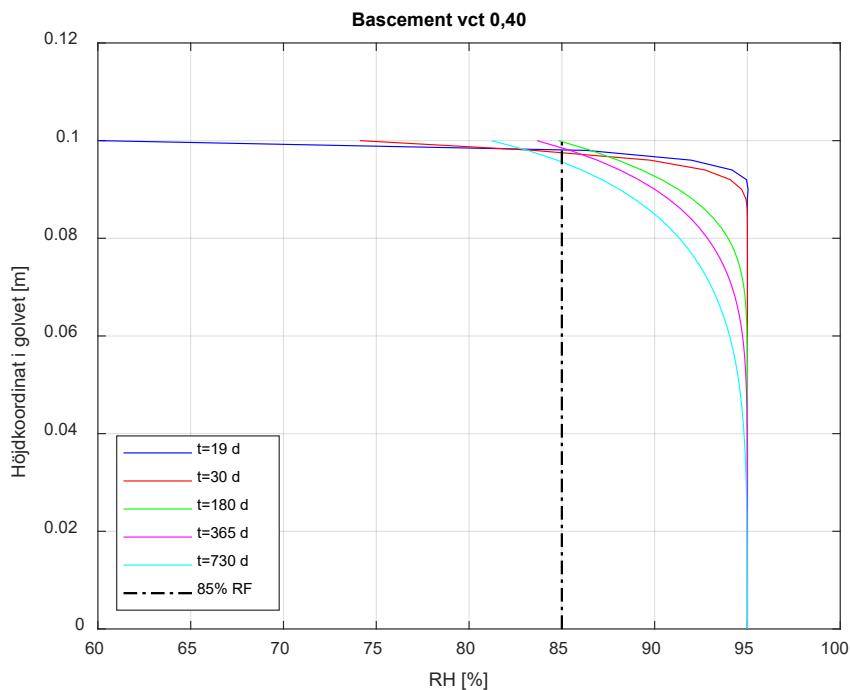


Fig. 22 Fuktprofil i betong med Bascement vct 0,40 vid omfördelning efter limning av ytskikt med icke vattenbaserat lim.

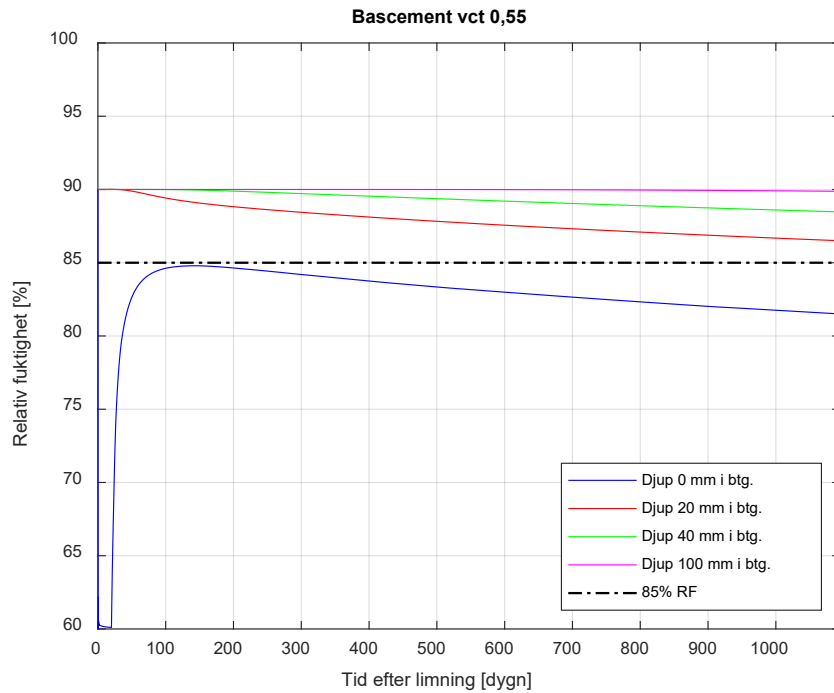


Fig. 23 Omfördelning efter limning med icke vattenbaserat lim av ytskikt på betong med Bascement vct 0,55 ensidigt uttorkad i 20 dygn i 60% RF från antagen självuttorkningsnivå på 90% RF. Klassisk omfördelning av fukt sker i väldigt begränsad omfattning. RF i betongens yta överskrider aldrig 85% RF.

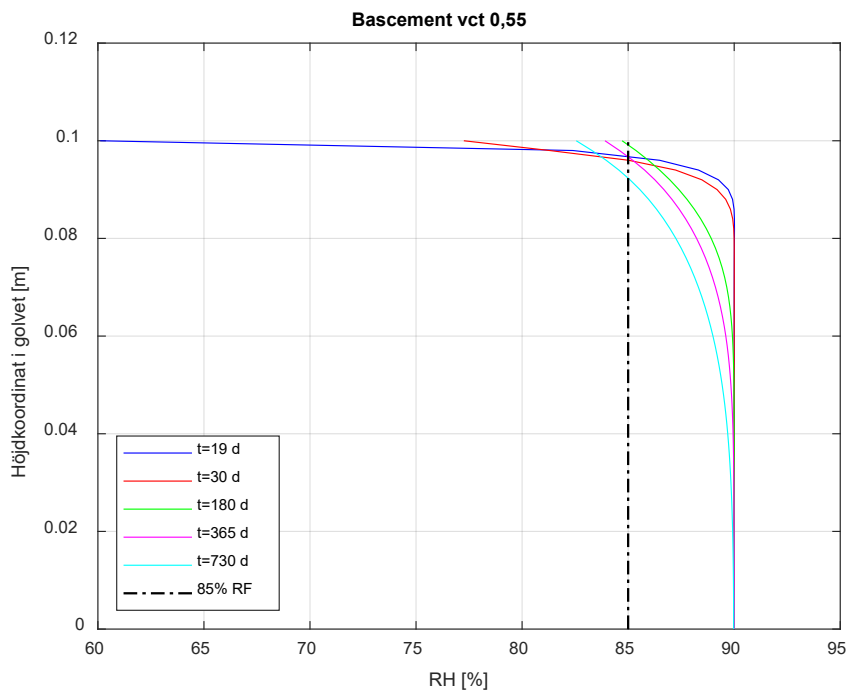


Fig. 24 Fuktprofil i betong med Bascement vct 0,55 vid omfördelning efter limning av ytskikt med icke vattenbaserat lim.

4.4 OPC från 90% RF

Det blir naturligtvis frestande att kolla om samma metodik fungerar för OPC. Svaret på denna fråga är nej, som diagrammen nedan visar. Konstant startvärde för RF på 90 % har använts. Betongen har först fått torka mot luft 60 % RF i 30 dygn och sedan har ytskiktet lagts på. Då det totalt sett är för mycket vatten i betongen kommer den klassiska omfördelningen att leda till en RF på över 85 % i hela konstruktionen.

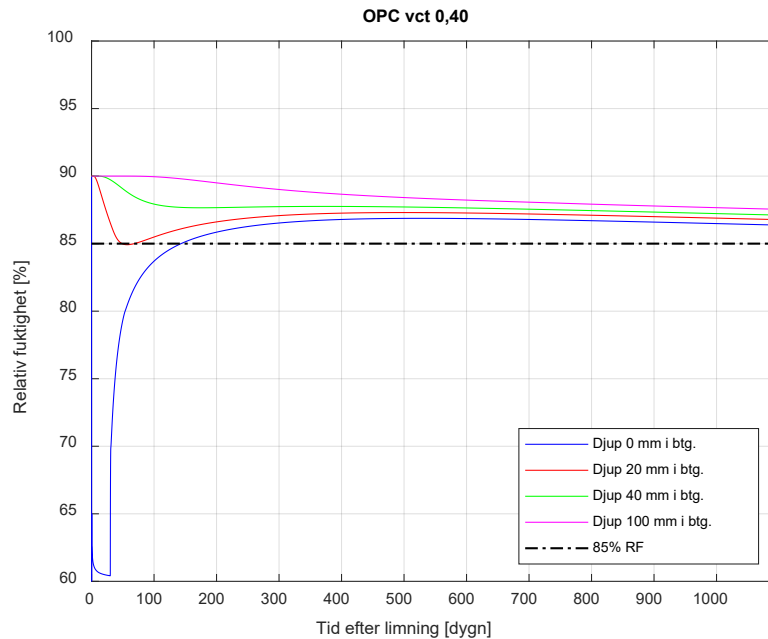


Fig. 25 Omfördelning efter limning med icke vattenbaserat lim av ytskikt på betong med OPC vct 0,40 ensidigt uttorkad i 30 dygn i 60% RF från antagen självuttorkningsnivå på 90% RF.

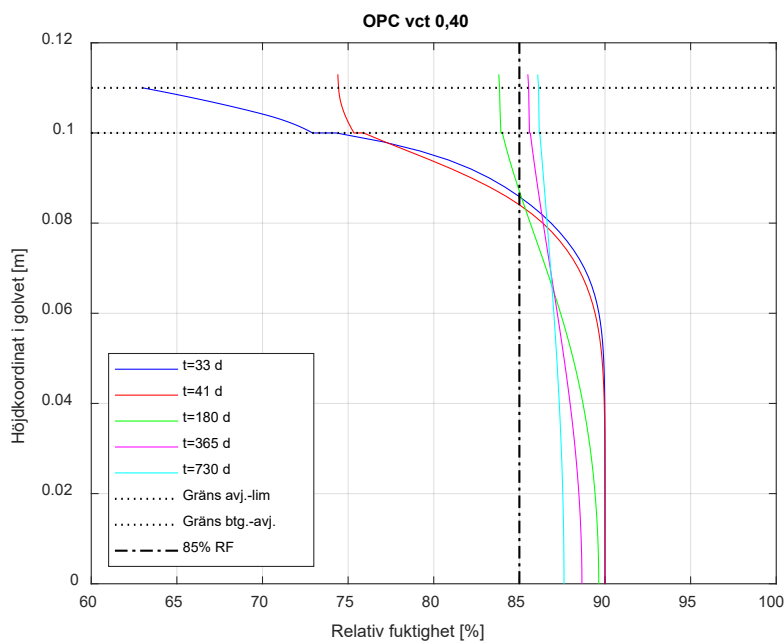


Fig. 26 Fuktprofil i betong med OPC vct 0,40 vid omfördelning efter limning av ytskikt med icke vattenbaserat lim.

4.5 Summering av icke vattenbaserad direktlimning

Simulering av icke vattenbaserad direktlimning visar tydligt på ytterligare en skillnad i beteende mellan betongerna med olika fukttransportförmåga i golvsystemet. För öppen betong måste uttorkning ta ner betongens totala fuktmängd. Då det tätare ytskiktet läggs på kommer omfördelning att ske i betongen och slutvärdet får inte överskrida 85%.

För den täta betongen ser det hela ut annorlunda. Omfördelningen efter påläggning av ytskikt är mycket mer begränsad och gäller endast den översta delen av betongen. Man måste initiera en liten uttorkningsprofil men det kan räcka med två till fyra veckors diffusionsuttorkning av ytan mot luft. Ekvivalent djup kommer inte att påverkas. Då det är betongen som är den mest begränsande delen för fuktflöde i hela golvet kommer fukten som betongen långsamt släpper ifrån sig att hinna passera genom ytskiktet och således inte att lagras under ytskiktet. Betongytan kommer i den simulerade fallen inte upp i 85% RF, vilket visar att uttorkningskravet på 85% för ekvivalent djup inte är relevant för tät betong.

5 Vattenbaserad limning av ytskikt på avjämning

I kapitel 2 visades att tät betong inte kan diffusionsuttorkas på ett realistiskt sätt. I kapitel 3 visades att god självuttorkning till 80% RF inte möjliggör vattenbaserad direktlimning av ytskikt då den låga transportförmågan för fukt drar ner betongens buffringsförmåga för limfukten. I kapitel 4 visades att omfördelning av fukt under tätskikt inte sker i den täta betongen på klassiskt vis, vilket gör uttorkningskravet på 85% på ekvivalent djup irrelevant. Finns det något konstruktivt sätt att kombinera dessa upptäckter på?

Som sista simuleringsfall har vattenbaserad direktlimning av ytskikt på avjämning valts. Här fungerar 10 mm avjämning som en god fuktbuffert för limfukten – något som inte fugerade hos den täta betongen. Simuleringarna kommer att försöka utnyttja även frånvaro av omfördelning i den täta betongen och se om det går att avjämna och mattlägga utan att uppfylla det klassiska uttorkningskravet på ekvivalent djup.

5.1 OPC från uttorkningsprofil

Simulering av betong med OPC nedan utgår från betong uttorkad till 85% RF på ekvivalent djup i enlighet med uttorkningsresultaten från kapitel 2.1. Avjämning sker direkt och mattläggning efter 7 dygn.

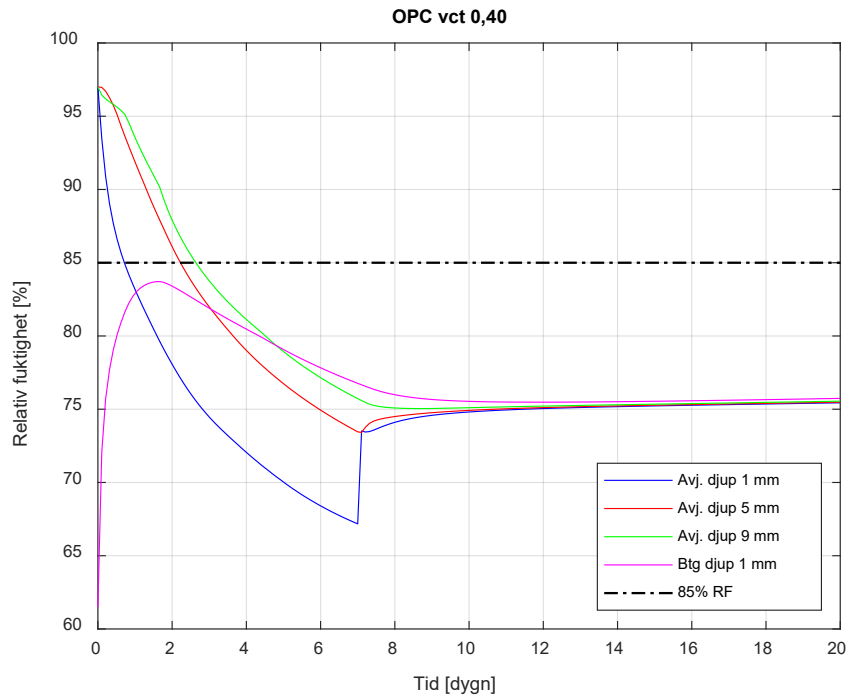


Fig. 27 Initial omfördelning efter avjämning ($t=0d$) och vattenbaserad limning av ytskikt ($t=7d$) på betong med OPC vct 0,40 uttorkad till 85% RF på ekvivalent djup i enlighet med Fig. 2.

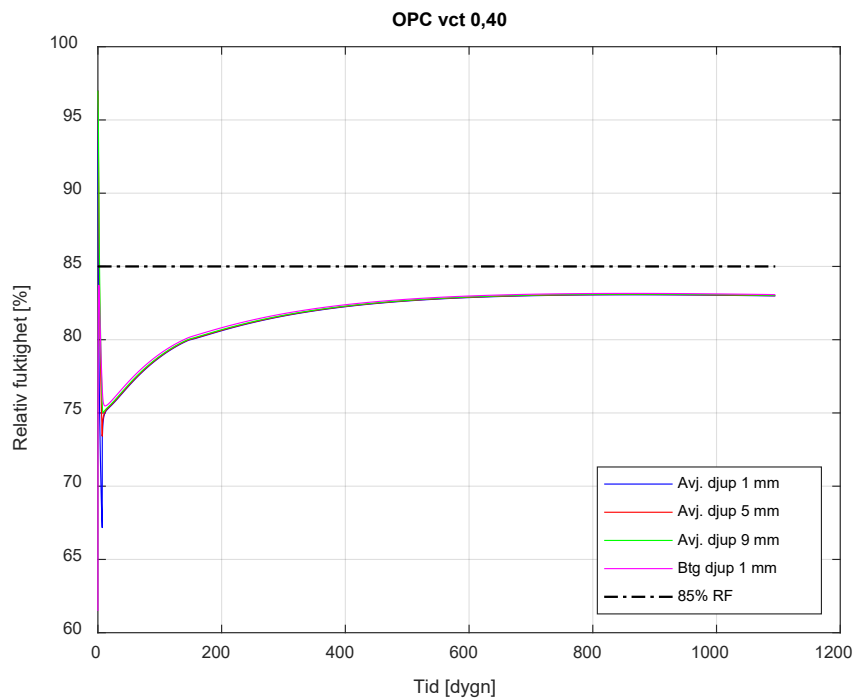


Fig. 28 Långsiktig omfördelning efter avjämning ($t=0d$) och vattenbaserad limning av ytskikt ($t=7d$) på betong med OPC vct 0,40 uttorkad till 85% RF på ekvivalent djup i enlighet med Fig. 2.

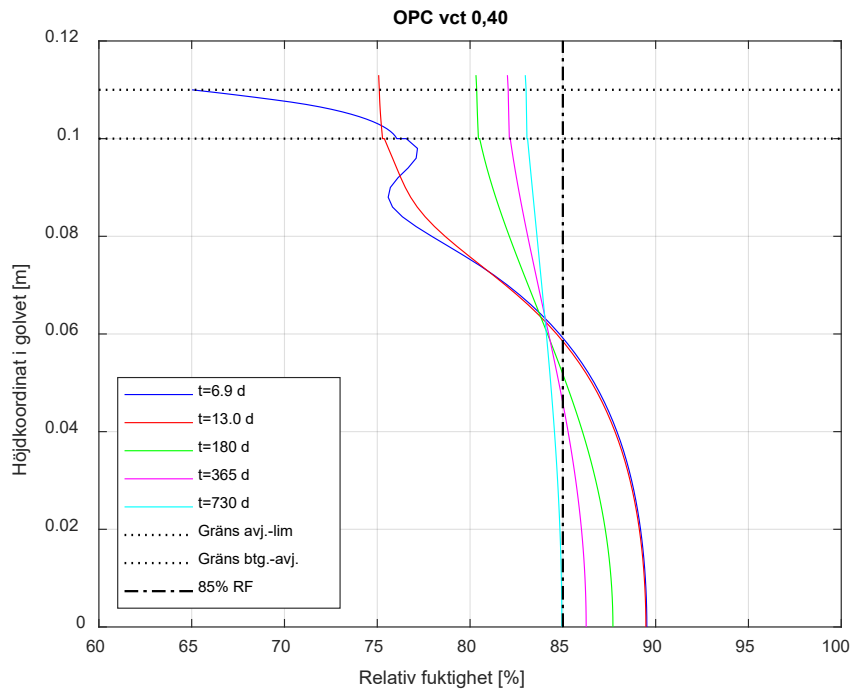


Fig. 29 Fuktprofil i betong med OPC vct 0,40 vid omfördelning efter avjämning ($t=0d$) och vattenbaserad limning av ytskikt ($t=7d$).

5.2 Modern tät betong

Observera att här används som startvärde 95% RF i hela konstruktionen. Betongen får sedan torka ensidigt mot luft med 60% RF i 20 dagar. Detta skapar en liten uttorkningsprofil men den når inte djupt under ytan. Därefter avjämnas den och avjämningsen för torka mot luft i 2 veckor, vilket ger en god uttorkning i avjämningskiktet. Betongen uppfyller således inte de krav man normalt ställer på den inför avjämning eller mattläggning.

Denna kombination ser ut att fungera. En betong som inte släpper ifrån sig mycket vatten ihop med en väl uttorkad avjämning har inga problem med limfukt eller ytskikt. Betongens översta del och avjämningsen kommer maximalt upp i 80% RF efter mattläggningen.

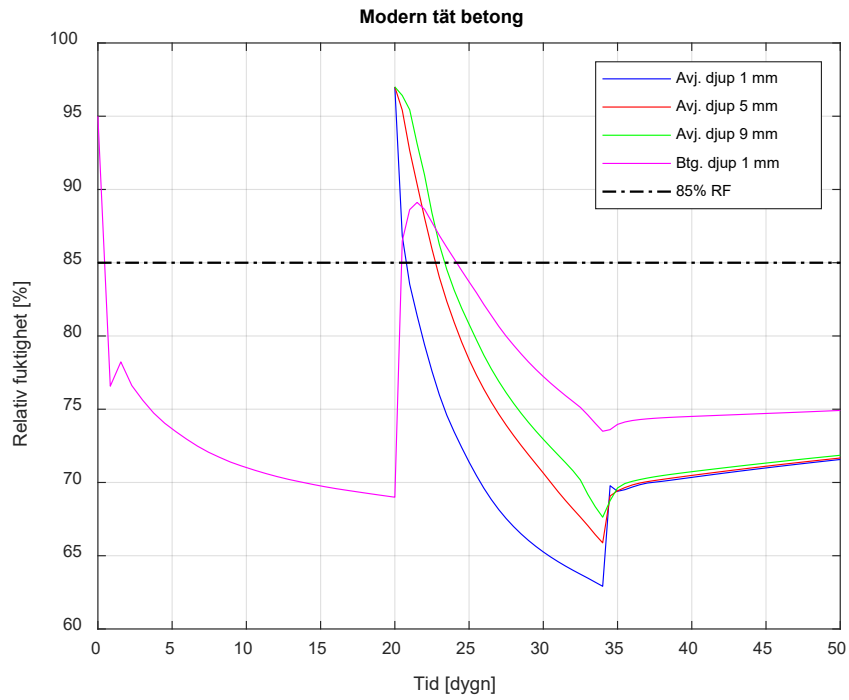


Fig. 30 Initial omfördelning efter uttorkning mot luft från 95% RF, därefter avjämning (t=20d) och vattenbaserad limning av ytskikt (t=34d) på modern tät betong.

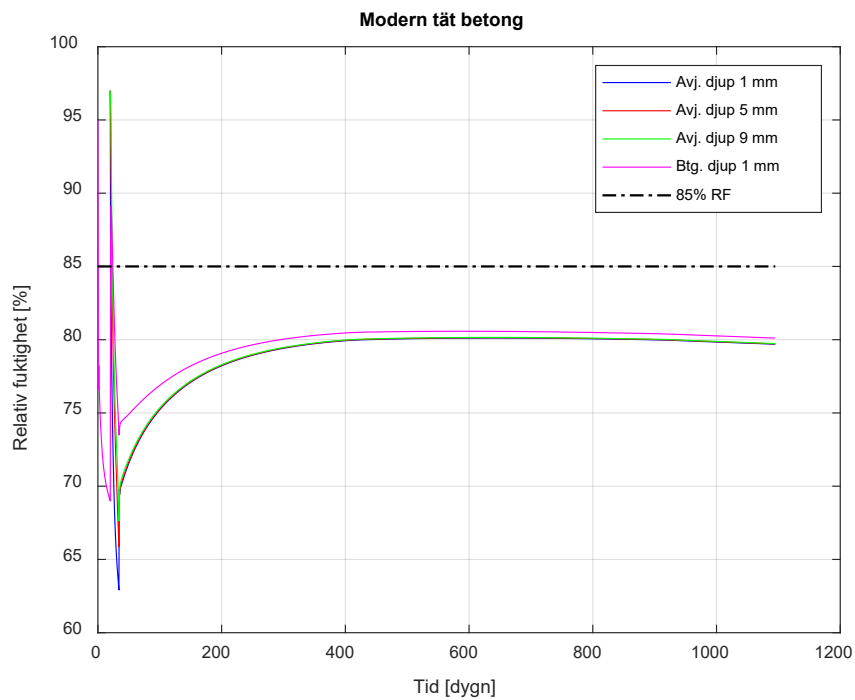


Fig. 31 Långsiktig omfördelning efter uttorkning mot luft från 95% RF, därefter avjämning (t=20d) och vattenbaserad limning av ytskikt (t=34d) på modern tät betong.

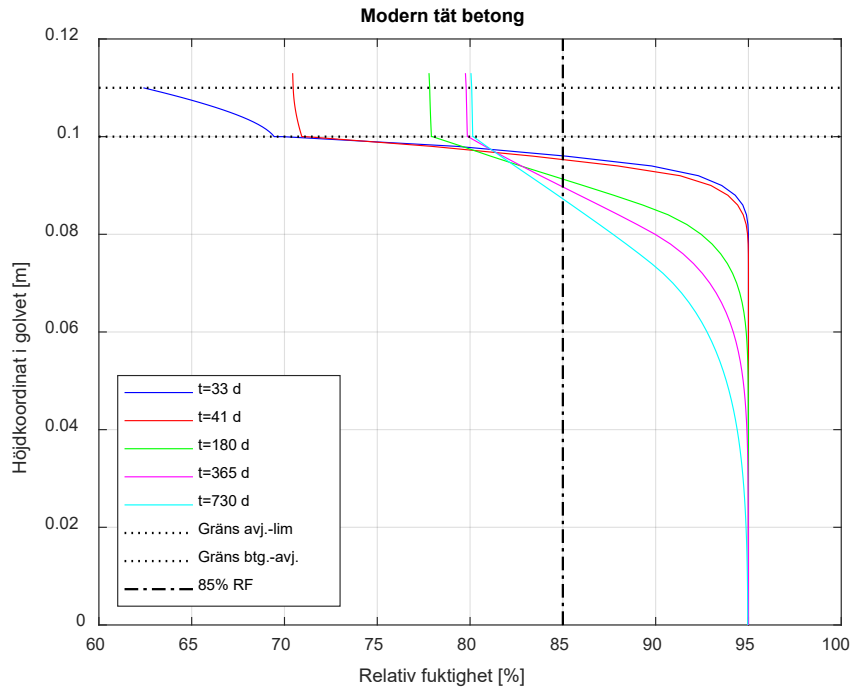


Fig. 32 Fuktprofil i modern tät betong vid omfördelning efter uttorkning mot luft, därefter avjämning ($t=20d$) och vattenbaserad limning av ytskikt ($t=34d$).

5.3 Betong med Basement

Observera att här används som startvärde 95% RF i hela konstruktionen för bägge vattencementtalen. Betongen får sedan torka ensidigt mot luft med 60% RF i 20 dagar. Detta skapar en liten uttorkningsprofil men den når inte djupt under ytan. Därefter avjämnas den och avjämningsprofilen för torka mot luft i 2 veckor, vilket ger en god uttorkning i avjämningskiktet. Betongen uppfyller således inte de krav man normalt ställer på den inför avjämning eller mattläggning.

Denna kombination ser också ut att fungera för betong med Basement så som den gjorde för modern tät betong. Observera att här utgår bägge vattencementtalen från samma förutsättningar. Diagrammen visar att max RF i avjämnings- och betongyta blir högre för vct 0,55 än för 0,40, vilket är väntat med tanke på skillnad i täthet. 85% RF överskrids inte i avjämnings- eller betongyta för något av fallen.

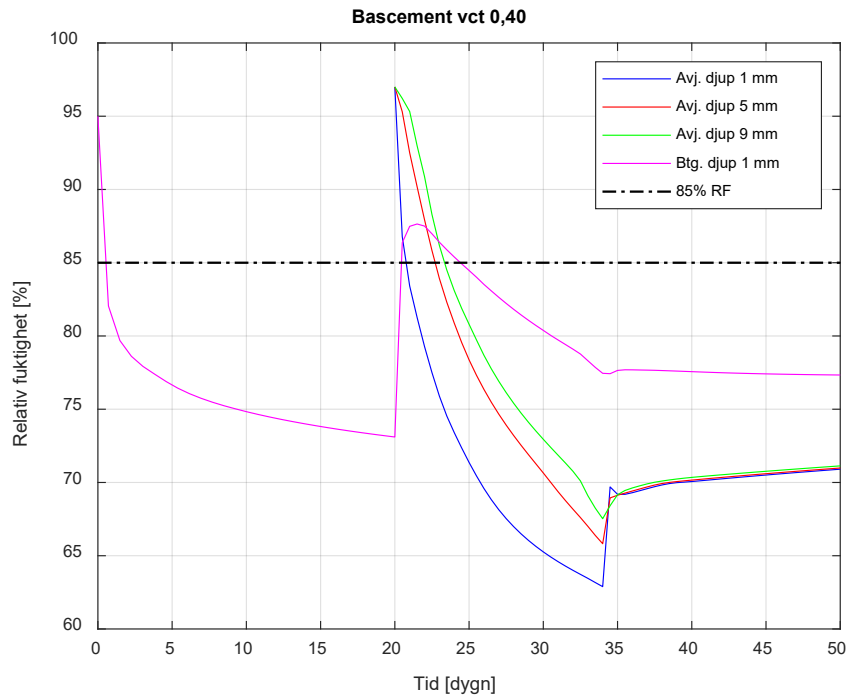


Fig. 33 Initial omfördelning efter uttorkning mot luft från 95% RF, därefter avjämning (t=20d) och vattenbaserad limning av ytskikt (t=34d) på betong med Bascement vct 0,40.

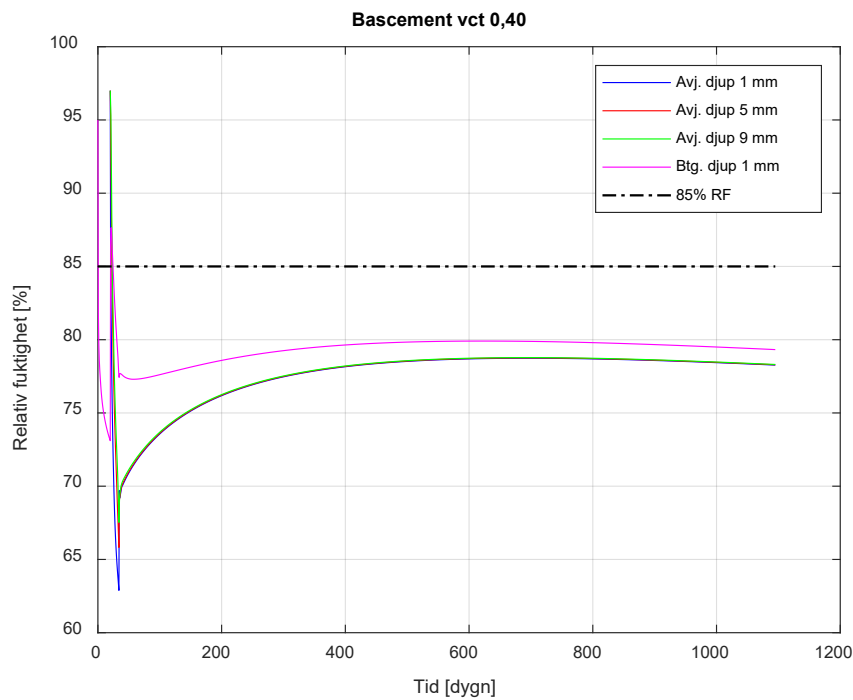


Fig. 34 Långsiktig omfördelning efter uttorkning mot luft från 95% RF, därefter avjämning (t=20d) och vattenbaserad limning av ytskikt (t=34d) på betong med Bascement vct 0,40.

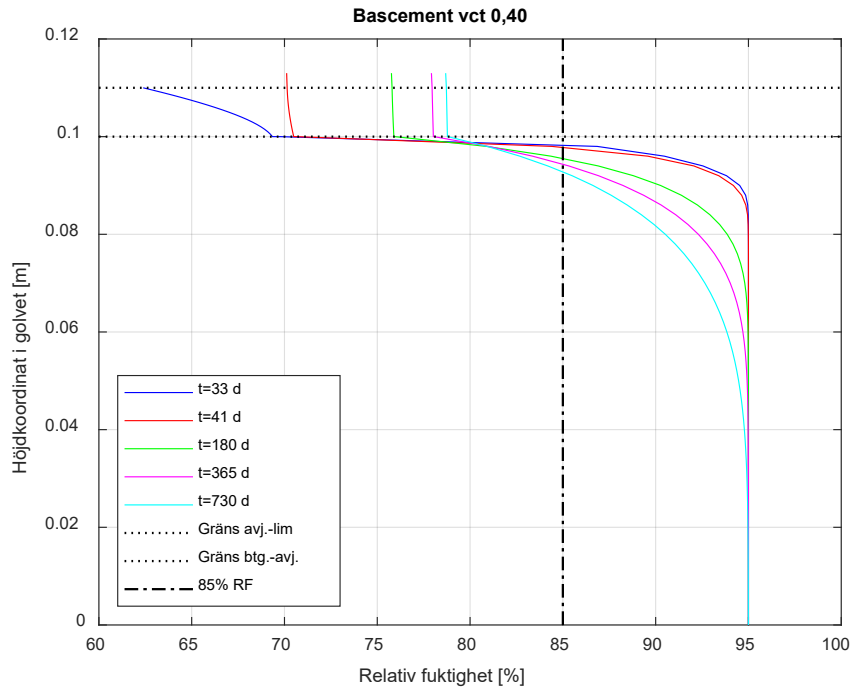


Fig. 35 Fuktprofil i betong med Basement vct 0,40 vid omfördelning efter uttorkning mot luft, därefter avjämning (t=20d) och vattenbaserad limning av ytskikt (t=34d).

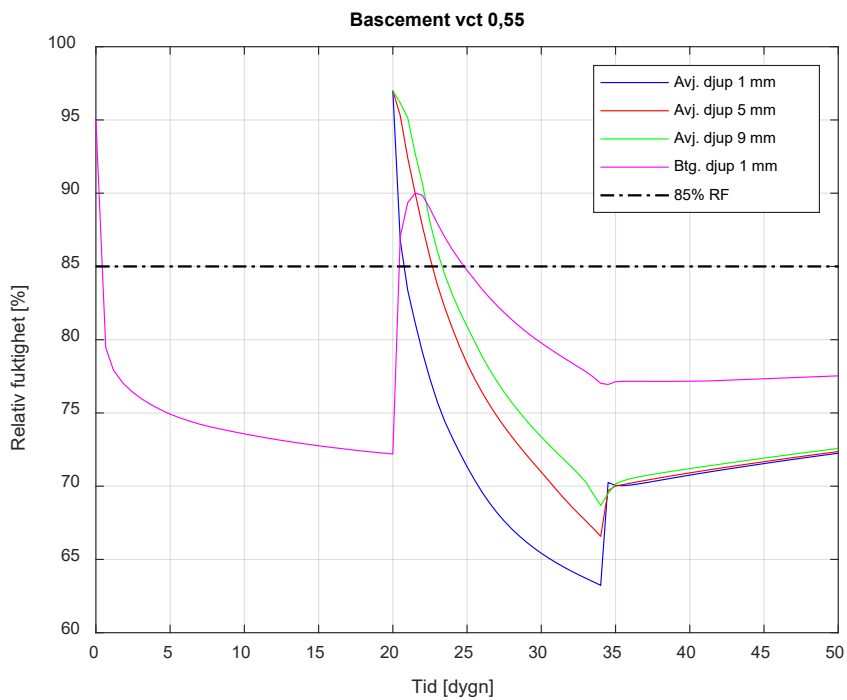


Fig. 36 Initial omfördelning efter uttorkning mot luft från 95% RF, därefter avjämning (t=20d) och vattenbaserad limning av ytskikt (t=34d) på betong med Basement vct 0,55.

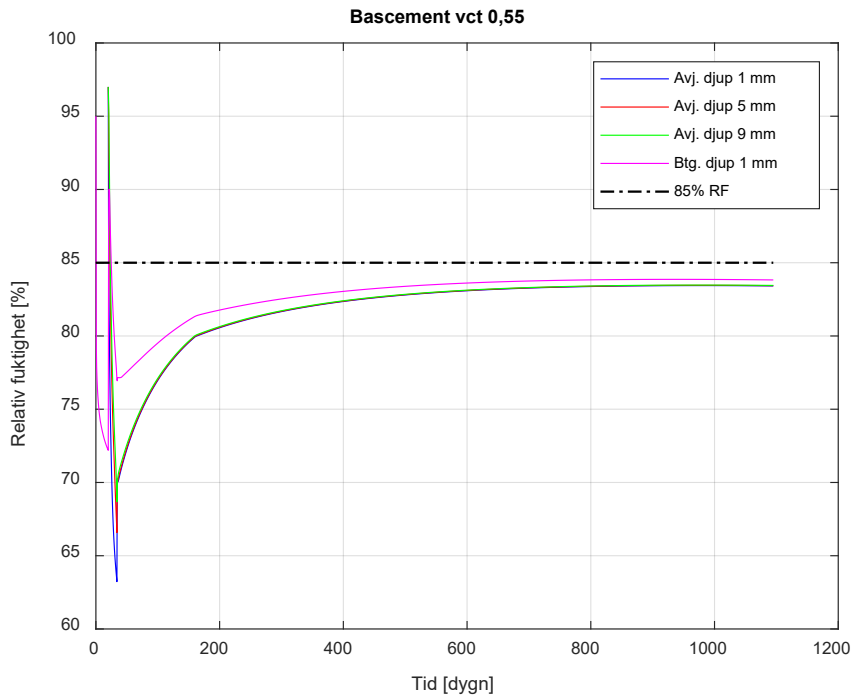


Fig. 37 Långsiktig omfördelning efter uttorkning mot luft från 95% RF, därefter avjämning (t=20d) och vattenbaserad limning av ytskikt (t=34d) på betong med Basement vct 0,55.

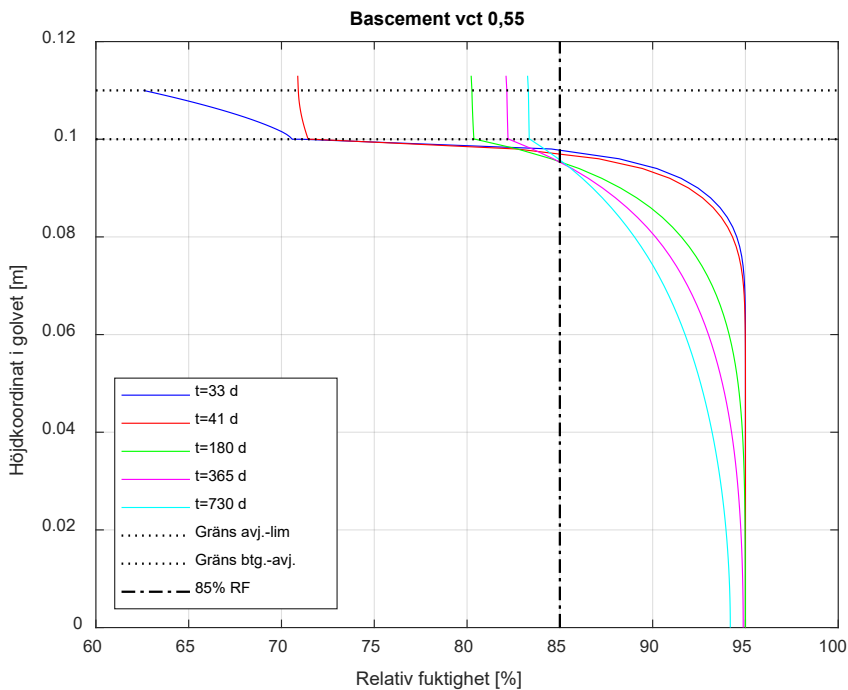


Fig. 38 Fuktprofil i betong med Basement vct 0,55 vid omfördelning efter uttorkning mot luft, därefter avjämning (t=20d) och vattenbaserad limning av ytskikt (t=34d).

5.4 OPC från 90% RF

Även här blir det frestande att kolla om samma metodik fungerar för OPC. Svaret på denna fråga är nej på samma sätt som i kapitel 4.4. Konstant startvärde för RF på 90 % har använts. Betongen har först fått torka mot luft 60 % RF i 20 dygn. Därefter avjämnas den och avjämnningen får torka mot luft i 2 veckor och sedan har ytskiktet lagts på. Då det är totalt sett för mycket vatten i betongen, trots avjämnings buffringsförmåga, kommer den klassiska omfördelningen att leda till ett RF på över 85 % i hela konstruktionen.

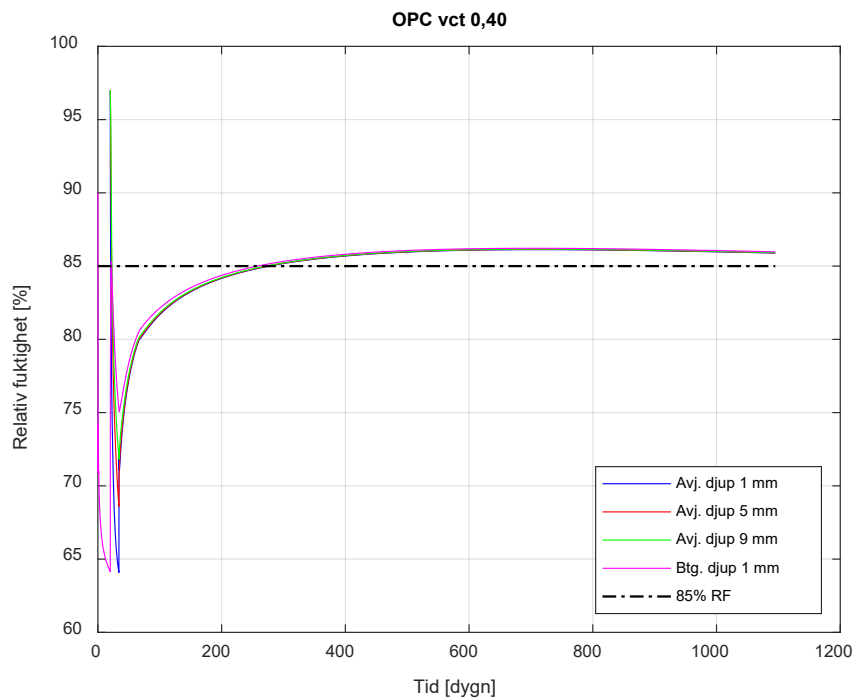


Fig. 39 Långsiktig omfördelning efter uttorkning mot luft från 90% RF, därefter avjämnning ($t=20d$) och vattenbaserad limning av ytskikt ($t=34d$) på betong med OPC vct 0,40.

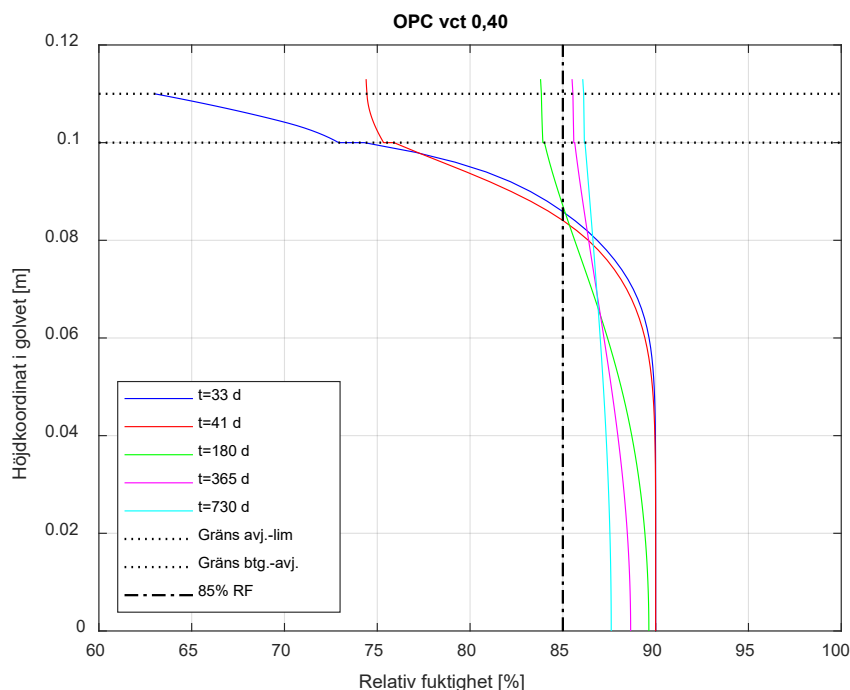


Fig. 40 Fuktprofil i betong med OPC vct 0,55 vid omfördelning efter uttorkning mot luft, därefter avjämning (t=20d) och vattenbaserad limning av ytskikt (t=34d).

5.5 Summering av vattenbaserad limning på avjämning

Simuleringarna ger en klar indikering att den låga fukttransportförmågan hos betong med mineraliska tillsatser borde gå att utnyttja konstruktivt i golvsystem. Då buffringsförmåga för limfukt är mycket låg måste avjämning med god fukttransport användas för att kompensera för denna brist. Däremot verkar uttorkningskravet på 85% RF på ekvivalent djup inte relevant då klassisk omfördelning efter mattläggning inte sker i den mycket täta betongen. Slutsatsen från simuleringarna blir att modern tät betong och betong med Basement borde kunna avjämnas relativt tidigt, utan att den uppfyller kravet på 85% RF på ekvivalent djup. Förutsatt att avjämnningen har god buffringsförmåga för fukt, är tjock nog och väl uttorkad bör vattenbaserad limning av ytskikt inte att leda till att avjämning och betong, som den kommer i kontakt med, överstiger en relativ fuktighet på 85% i de simulerade konstruktionerna.

6 Referenser

Nilsson 1980 – L.-O. Nilsson, *Betonghandboken*, fig. 14.3:5–6, 1980

Hedenblad 1993 – G. Hedenblad, *Moisture Permeability of Mature Concrete, Cement Mortar and Cement Paste*, TVBM-1014, Lund Institute of Technology 1993

Mualem 1974 – Y. Mualem, *A Conceptual Model of Hysteresis*, *Water Resources Research*, 10:514-520, 1974

Olsson m.fl. 2018 - N. Olsson, L.-O. Nilsson, M. Åhs, samt V. Baroghel-Bouny, *Moisture transport and sorption in cement based materials containing slag or silica fume*, Cement and Concrete Research, 2018

Saeidpour & Wadsö 2016 - M. Saeidpour, L. Wadsö, *Moisture diffusion coefficients of mortars in absorption and desorption*, Cement and Concrete Research, 2016

Resultat från mätförsök inom SBUF 13354

Detta dokument beskriver resultaten av utförda mätförsök inom SBUF 13354.

1 Försökens uppläggning

Då budgeten för försöksdelen var begränsad valde projektet en enkel uppställning som på kort tid kunde påvisa någon rimlighet i resonemangen om:

- den täta betongens buffringsförmåga för fukt
- den täta betongens förmåga att släppa ifrån sig vatten endast i begränsad omfattning

Som grundläggande försök valdes både

- direktlimning av ytskikt med vattenbaserat lim på väl uttorkad betong
- limning av ytskikt på avjämning som torkat väl på betong som inte uppfyllde uttorkningskrav

Mätningen omfattade följande moment:

- Mätning av RF i betong
- Mätning av RF i avjämning om sådan fanns
- Försök att rycka bort remsor av pålimmad matta
- Kontroll huruvida limmet/mattan luktar på undersidan efter avlägsnande

Som variation för direktlimning valdes betongens vattencementtal. Då tidigare gjutna plattor var tillgängliga med både vct 0,32 och 0,55 användes bägge.

Som variation för limning på avjämning valdes typ av ballast. Två nya plattor gjöts med vct 0,55 och natur- resp. krossballast.

2 Resultat

2.1 Vct 0,55 direktlimning

2.1.1 Material och förfarande

Tjocklek betong	160 mm
Material betong	Basement vct 0,55, naturballast
Lim	CascoProff Solid
Ytskikt	Tarkett IQ Optima
Gjutning	2017-05-22
Slipning	2018-04-17
Limning av ytskikt	2018-05-02

2.1.2 RF i betong

Dygn efter gjutning	Dygn efter limning	Mät punkt	[mm] Mät djup	Givartyp	Temp [°C]	Kal+korr RF [%]
323		P81	37	Vaisala HMP40S	19,6	76,1
323		P82	64	Vaisala HMP40S	19,6	82,7
323		P83	66	HumiGuard	19,6	84,6
323		P84	127	Vaisala HMP40S	19,6	86,1
385	40	P812	35	Vaisala HMP40S	21,9	77,9
385	40	P822	65	Vaisala HMP40S	21,9	82,8
385	40	P832	65	HumiGuard	22,1	83,2
385	40	P842	126	Vaisala HMP40S	21,9	84,6
462	117	P813	37	Vaisala HMP40S	22,4	80,2
462	117	P823	65	Vaisala HMP40S	22,4	83,5
462	117	P833	65	HumiGuard	22,3	83,8
462	117	P843	126	Vaisala HMP40S	22,3	85,1
Mätosäkerhet RF [± %]		(Mätosäkerheten ingår inte i ovanstående värden)				
Vaisala HMP4	2,4					
HumiGuard	2,7					

2.1.3 Avlägsnande av matta

Dygn efter limning	Använd kraft vid "mattryck"	Skick på limmet	Var erhöles brott	Lukt
2	Hårt, mattan satt fast	Torrt	Brott i limmet	Nej
7	Liten	Torrt	Mellan lim & betong	Lite
33	Mycket liten	Snustorrt	Mellan lim & betong	Lite
111	Liten	Torrt	Mellan lim & betong	Tydligt surt

2.2 Vct 0,32 direktlimning

2.2.1 Material och förfarande

Tjocklek betong	160 mm
Material betong	Bascement vct 0,32, naturballast
Lim	CascoProff Solid
Ytskikt	Tarkett IQ Optima
Gjutning	2017-09-28
Slipning	2018-04-17
Limning av ytskikt	2018-05-02

2.2.2 RF i betong

Dygn efter gjutning	Dygn efter limning	Mätpunkt	[mm] Mätdjup	Givartyp	Temp [°C]	Kal+korr RF [%]
194		B1	35	Vaisala HMP40S	19,5	82,1
194		B2	64	Vaisala HMP40S	19,6	81,9
194		B3	66	HumiGuard	19,4	(85,0)
194		B4	125	Vaisala HMP40S	19,6	82,6
256	40	B12	36	Vaisala HMP40S	21,8	79,8
256	40	B22	64	Vaisala HMP40S	21,8	80,7
256	40	B32	65	HumiGuard	21,7	81,0
256	40	B42	126	Vaisala HMP40S	21,8	81,4
333	117	B13	35	Vaisala HMP40S	22,3	79,4
333	117	B23	65	Vaisala HMP40S	22,3	80,1
333	117	B33	65	HumiGuard	22,4	81,6
333	117	B43	127	Vaisala HMP40S	22,2	80,8
Mätosäkerhet	RF [± %]	(Mätosäkerheten ingår inte i ovanstående värden)				
Vaisala HMP40S	2,4					
HumiGuard	2,7					

2.2.3 Avlägsnande av matta

Dagar efter limning	Använd kraft vid "mattryck"	Skick på limmet	Var erhöles brott	Lukt
2	Hårt, mattan satt fast	Aningen klubbigt	Brott i limmet	Nej
7	Liten	Aningen klubbigt	I limmet, kvar på btg och matta	Lite
33	Halvhårt	Snustorrt	I limmet	Mycket
111	Halvhårt	Aningen elastiskt	I limmet	Mycket

2.3 Vct 0,55 krossballast, limning på avjämning

2.3.1 Material och förfarande

Tjocklek betong	155 mm
Material betong	Bascement vct 0,55, krossballast
Tjocklek avjämning	Ca 17 mm
Material avjämning	Weberfloor 140 Nova
Lim	CascoProff Solid
Ytskikt	Tarkett IQ Optima
Gjutning	2018-02-23
Slipning och avjämning	2018-04-17
Limning av ytskikt	2018-05-02

2.3.2 RF i betong

Dygn efter gjutning	Dygn efter limning	Mät punkt	[mm] Mätdjup	Givartyp	Temp [°C]	Kal+korr RF [%]
46		C1	36	Vaisala HMP40S	19,3	94,6
46		C2	62	Vaisala HMP40S	19,4	96,1
46		C3	63	HumiGuard	19,2	(94,1)
46		C4	123	Vaisala HMP40S	19,5	96,6
108	40	C12	40	Vaisala HMP40S	21,7	92,7
108	40	C22	64	Vaisala HMP40S	21,7	94,3
108	40	C32	62	HumiGuard	21,8	(92,5)
108	40	C42	120	Vaisala HMP40S	21,8	95,6
185	117	C13	39	Vaisala HMP40S	22,3	92,4
185	117	C23	64	Vaisala HMP40S	22,4	93,4
185	117	C33	64	HumiGuard	22,4	(91,3)
185	117	C43	120	Vaisala HMP40S	22,3	93,5
Mätosäkerhet	RF [± %]	(Mätosäkerheten ingår inte i nedanstående värden)				
Vaisala HMP40	2,4					
HumiGuard	2,7					

2.3.3 RF i avjämning

Dygn efter avjämning	Dygn efter limning	Mätpunkt	[mm] Tjocklek	Temp [°C]	Kal+korr RF [%]
20	5	C/1-1	19	20,0	83,3
20	5	C/1-2	19	20,0	82,8
27	12	C/2-1	17	19,9	81,6
27	12	C/2-2	17	19,9	82,2
51	36	C/3-1	16	20,0	83,2
51	36	C/3-2	17	20,0	82,5
127	112	C/4-1	16	20,1	87,0
127	112	C/4-2	16	20,1	85,4
Mätosäkerhet ±1,8% (ingår inte i nedanstående värden)					

2.3.4 Avlägsnande av matta

Dagar efter limning	Använd kraft vid "mattryck"	Skick på limmet	Var erhöles brott	Lukt
2	Hårdast av alla "mattstrippar"	Aningen klabbigt	Mellan lim och matta	Nej
7	Mycket hårt	Aningen klabbigt	Mellan lim och matta	"Betongluktt"
33	Mycket hårt	Torrt	I limmet	Nej
111	Mycket hårt	Aningen elastiskt	I limmet, delvis i avjämningen	Möjligen svagt "surt"

2.4 Vct 0,55 naturballast, limning på avjämning

2.4.1 Material och förfarande

Tjocklek betong	160 mm
Material betong	Bascement vct 0,55, naturballast
Tjocklek avjämning	Ca 13 mm
Material avjämning	Weberfloor 140 Nova
Lim	CascoProff Solid
Ytskikt	Tarkett IQ Optima
Gjutning	2018-02-21
Slipning och avjämning	2018-04-17
Limning av ytskikt	2018-05-02

2.4.2 RF i betong

Dygn efter gjutning	Dygn efter limning	Mät punkt	[mm] Mätdjup	Givartyp	Temp [°C]	Kal+korr RF [%]
48		D1	36	Vaisala HMP40S	19,5	93,1
48		D2	65	Vaisala HMP40S	19,4	94,7
48		D3	65	HumiGuard	19,4	94,4
48		D4	125	Vaisala HMP40S	19,4	95,1
110	40	D12	36	Vaisala HMP40S	21,7	90,9
110	40	D22	67	Vaisala HMP40S	21,6	93,2
110	40	D32	65	HumiGuard	21,5	(92,1)
110	40	D42	126	Vaisala HMP40S	21,6	94,4
187	117	D13	35	Vaisala HMP40S	22,3	89,9
187	117	D23	66	Vaisala HMP40S	22,2	93,4
187	117	D33	64	HumiGuard	22,2	93,3
187	117	D43	125	Vaisala HMP40S	21,6	94,5
Mätosäkerhet	RF [± %]	(Mätosäkerheten ingår inte i nedanstående värden)				
Vaisala HMP40S	2,4					
HumiGuard	2,7					

2.4.3 RF i avjämning

Dygn efter avjämning	Dygn efter limning	Mätpunkt	[mm] Tjocklek	Temp [°C]	Kal+korr RF [%]
20	5	D/1-1	13	20,0	79,6
20	5	D/1-2	13	20,0	81,3
27	12	D/2-1	13	19,9	80,3
27	12	D/2-2	13	19,9	81,5
51	36	D/3-1	12	20,0	80,2
51	36	D/3-2	13	20,0	81,1
127	112	D/4-1	14	20,1	84,4
127	112	D/4-2	12	20,1	84,2
Mätosäkerhet ±1,8% (ingår inte i nedanstående värden)					

2.4.4 Avlägsnande av matta

Dagar efter limning	Använd kraft vid "mattryck"	Skick på limmet	Var erhöles brott	Lukt
2	Hårt	Aningen klubbigt	I limmet	Nej
7	Hårt	Aningen klubbigt	Mellan lim och matta	Nej
33	Mycket hårt	Torrt	I limmet	Nej
111	Halvhårt	Aningen elastiskt	I limmet, något i avjämningen	Möjligen svagt "surt"

3 Slutsatser

Följande mönster kunde observeras i mätresultaten:

- Vid direktlimning kunde ytskiktet ryckas loss påtagligt lättare än vid limning på avjämning efter viss tid.
- Vid direktlimning kunde sur/kemisk lukt noteras i växande styrka med tiden.
- Vid limning på avjämning förekom nästan ingen lukt alls, utom små indikationer vid sista testet 111 dagar efter limning.
- Högre RF i avjämning efter 2 veckors uttorkning än i simulering
- Vid sista mätningen av RF i avjämningen 111–112 dagar efter limning noterades höjning av värden.

Följande slutsatser har dragits av ovanstående:

- Skillnad i lukt samt vidhäftning av ytskikt indikerar större nedbrytning vid direktlimning på betong än vid limning på avjämning. Detta stämmer väl med slutsatser från simuleringar om den täta betongens bristande förmåga till buffring av limfukt.
- Högre RF-nivåer i avjämning jämfört med simulering samt påtaglig ökning av RF i sista mätningen antyder att betongen släpper ifrån sig mer fukt än i simuleringarna. Då avjämningen utfördes 2 månader och limning av ytskikt 2,5 månader efter gjutning konstateras att betongen med hög sannolikhet inte uppnått sin högsta täthet vid denna ålder och var helt enkelt för ung för denna tillämpning.

Finns det någon fördel med modern, tät betong?

Ja, samma som dess primära nackdel – tätheten. I de tidigare artiklarna, **Betongfunktion: Uttorkning** (Stelmarczyk m.fl. 2017a), **Självuttorkning av betong** (Stelmarczyk m.fl. 2017b) samt **Diffusionsuttorkning av betong samt annat fuktutbyte med dess omgivning** (Stelmarczyk m.fl. 2017c), gavs en generell bild av betongens uttorkning, dess olika delar samt principer för fuktomfördelning mellan betong och omgivande material. Olika mekanismer som bidrar till fukttillståndet i betong presenterades och förklarades samt en jämförelse gjordes hur dessa mekanismer fungerar i vad branschen betraktar som gammaldags betong, dvs. betong med relativt grovmald Ordinarie Portlandcement (OPC) som enda bindemedel och naturballast, resp. en modern, i regel mycket tätare betong med mineraliska tillsatsmaterial och krossballast. En rad grundläggande principiella slutsatser drogs. Nu är det dags att sätta kunskapen i tillämpning och studera hur en modern, tät betong fungerar i en rad typiska tillämpningar där fukttillstånd och fuktsamverkan med golvmaterial är av intresse. Vi kommer att presentera ett urval av resultat ur det pågående SBUF-projektet 13354 "Utredning av funktionell uttorkningsnivå hos betong med mineraliska tillsatsmaterial". Samtliga resultat baserar sig på simulering av fuktomfördelning vid 20° C med hänsyn tagen till hysteres i sorption hos de inblandade materialen. Denna artikel kommer att fokusera på hur den kraftigt ökade tätheten förändrar fuktsamspelet mellan materialen i tillämpning. Denna jämförelse kommer att ställa två typer av betong mot varandra:

- Gammaldags OPC-baserad betong
 - Relativt grovmald OPC som enda bindemedel, naturballast
 - Materialdata Nilsson 1994 (Betonghandboken) för vct 0,40 samt 0,55
- Modern, tät betong
 - OPC med mineraltillsatser (slagg, silikastoft eller flygaska), varierande malningsgrad hos klinkern anpassad till mineraltillsatsen i fråga, natur- eller krossballast
 - Materialdata inmätta vid Avdelningen för Byggnadsmaterial, LTH, hämtade från Saeidpour & Wadsö 2016, Olsson m.fl. 2018 samt Stelmarczyk m.fl. 2018 rörande betong med olika vattencementtal samt olika inblandningsgrad av slagg och silikastoft resp. en inblandningsgrad av flygaska

För den moderna betongen kommer vi inte att diskutera olika vattencementtal, inblandningsgrader av mineraltillsatser resp. ballastdetaljer. Anledningar till detta är att det finns många sätt att göra betongen väldigt mycket tätare än den gammaldags OPC-baserade. Det väsentliga är inte hur man åstadkommit den höga tätheten utan att betongen har en fukttansportförmåga som är en tiondel till en femtondel av fukttansportförmågan hos den OPC-baserade. Här nöjer vi oss med att använda materialdata för en betong som ses som representativ för denna princip och som inte heller tillhör de tätaste och mest extrema som behandlats i ovan nämnda källor.

Observera dock att all betong som levereras idag inte nödvändigtvis har den tätheten som betongen i simuleringarna nedan. Man kan få betong baserad på grovmald OPC som enda bindemedel – den kommer naturligtvis att uppföra sig huvudsakligen som den gammaldags betongen. Man kan även få betong som kombinerar en rad faktorer, bidragande till förtätningen, som kommer att resultera i en tätare betong än vad som redovisas nedan. Även inblandning av filler, finpartiklar i krossballasten samt olika hydratationsförlopp kan inverka på den uppnådda tätheten i varje enskilt fall.

I princip omöjligt att diffusionsuttorka

Som det redan presenterades i slutet av den föregående artikeln *Diffusionsuttorkning av betong samt annat fuktutbyte med dess omgivning* (Stelmarczyk m.fl. 2017c), har modern, tät betong en mycket lägre transportförmåga avseende fukt. Detta medför ökade tider för diffusionsuttorkning av konstruktioner. Ett exempel på detta visades redan i den förra artikeln. Här ger vi en sammanställning av tider för diffusionsuttorkning för en rad olika fall. I Tabell 1 redovisas resultat av simuleringar för en 100 mm tjock platta på mark.

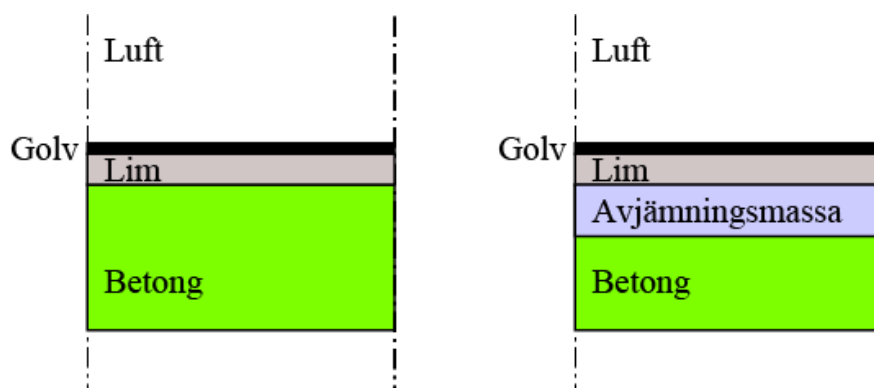
Betong	Självtorkad till	Torktid i luft med 40% RF	Torktid i luft med 60% RF
OPC vct 0,40	90% RF	129 dygn	168 dygn
OPC vct 0,55	95% RF	282 dygn	363 dygn
Modern tät	90% RF	562 dygn	647 dygn
Modern tät	95% RF	850 dygn	1024 dygn

Tabell 1 Tider för diffusionstorkning till 85% RF på ekvivalent mätdjup enligt RBK 2017 för en 100 mm tjock platta på mark. Enkelsidig uttorkning.

Här bör observeras att självtorkning och diffusionsuttorkning i verkligheten pågår parallellt, åtminstone delvis. Trots det blir jämförelsen något skrämmande inför ett byggprojekt där en konstruktion med modern betong skall diffusionsuttorka. Torktider på flera år är helt enkelt inte hanterbara i verkligheten. Tiderna ovan gäller 100 mm tjocka konstruktioner och kommer att öka med ökande konstruktionstjocklek. **Den generella slutsatsen blir att modern tät betong i princip inte går att diffusionsuttorka på ekvivalent mätdjup enligt RBK 2017.**

Kan matta limmas direkt på betong?

En typisk tillämpning med hög känslighet för fukt är limning av ytskikt direkt på betong, se Figur 1 vänster.



Figur 1 Ytskikt limmat direkt på betong (vänster) och på avjämningsmassa på betong (höger).

Limmets fukt måste då relativt snabbt tas upp av underlaget eller diffundera ut genom ytskiktet så att limmet torkar och fäster ytskiktet på betongen. Samtidigt får den resulterande fuktnivån i underlaget under limmet inte vara för hög för då möjliggörs en alkalitransport som riskerar att orsaka nedbrytning av limskiktet genom hydrolys av limmets polymerer. Låt oss studera limmets förmåga att torka på olika underlag med betong som skiljer i täthet.

Här har vi valt att simulera ett relativt tätt ytskikt, Tarkett iQ Optima, med ett ånggenomgångsmotstånd på ca 2 960 000 s/m. Limfukten, som skall absorberas under denna simulering, ca 90g/m², gäller för ett flertal limmer på marknaden, t.ex. Casco Proff Universal eller Casco Proff Solid, applicerad med 3m²/l. Denna simulering utgår från att betongen torkats ut i enlighet med Tabell 1 innan mattan limmas.

Betong	Torktid för lim. Luft med 40% RF	Torktid för lim. Luft med 60% RF
OPC vct 0,40	2 dygn	2 dygn
OPC vct 0,55	1 dygn	1 dygn
Modern tät	89 dygn	150 dygn
Modern tät + 10mm avjämningsmassa	1 dygn	1 dygn

Tabell 2 Tider för uttorkning av vattenbaserat lim under Tarkett iQ Optima, lagt på betong uttorkad i enlighet med Tabell 1, utan och med Weberfloor 140 Nova som avjämningsmassa.

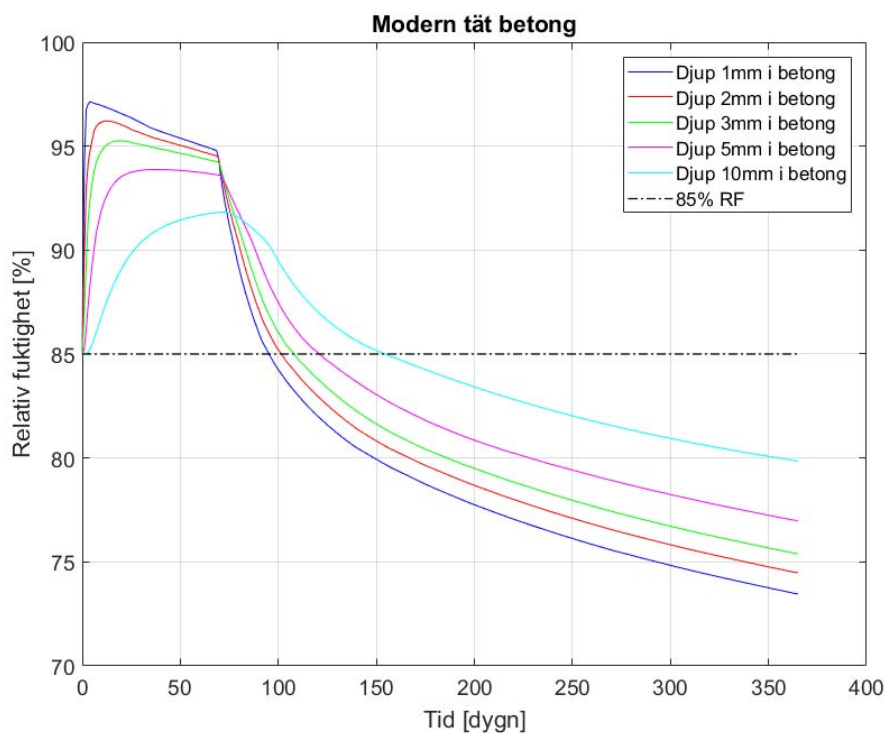
Vad som klart framgår är att modern, tät betong har stora svårigheter med att buffra upp limfukten. Eftersom betongen är så tät tvingas en ansenlig del av limfukten att diffundera genom ytskiktet. Hela denna process tar oacceptabelt lång tid och detta trots att vi i enlighet med Tabell 1 låtit den moderna betongen torka i upp till flera år innan mattan limmas. Att satsa på självuttorkning av betongen i stället för diffusionsuttorkning eller uttorkning till en lägre RF-nivå kommer inte att göra saken bättre, eftersom det är tätheten och inte fuktnivån som är utmaningen. Som en jämförelse har även en simulering utförts med modern, tät betong med ett lager avjämningsmassa. Denna har en relativt öppen porstruktur, dvs. god transport- och buffringsförmåga för fukt. Som framgår av resultaten kan avjämningsmassan hantera problemet med torktiden för limmet. Detta resultat var väntat eftersom vi genom detta lager av avjämningsmassa återställt transport- och buffringsförmågan i skiktet under limmet. Detta är förmågorna som den gammaldags, öppna betongen hade, men som den moderna, täta betongen saknar.

Hur är det med emissioner?

Effekterna av hög relativ fuktighet som möjliggör alkalitransport finns väl dokumenterade i litteraturen. Intressant nog finns även ett fall av mycket tät betong med direktlimmad matta att studera i Wengholt Johnsson 1995. I denna publikation undersöktes samband mellan fuktbelastning i betong, betongkvalitet och emissioner. Golvstycken av olika slags betong torkades till olika höga relativa fuktigheter varpå man limmade en matta på dem och mätte eventuella resulterande emissioner. Detta gjordes för att fastställa ett samband mellan RF på ekvivalent mätdjup och mängden emissioner. Den självtorkande betongen i jämförelsen var baserad på OPC med 5% tillsatt silikastoft, med ett vattenbindemedelstal (vbt) på 0,40. Betongen självtorkade till 85% RF varpå en PVC-matta limmades på betongytan och emissioner mättes vid 43, 116, 170 samt 233 dygn efter limning av matta. Denna försöksuppsättning resulterade i förhöjda emissioner – klar höjning vid 43 dygn, toppvärden vid 116 samt 170 dygn och vidare minskande vid 233 dygn. Den maximala nivån var dock inte lika hög som för emissioner uppmätta för ren OPC vct 0,66, alltså betong med en mycket öppen porstruktur, som torkats endast till 95% RF. Slutsatsen i publikationen var att förhöjda emissioner observerades för betongen med vbt 0,40 trots att betongen hade självtorkat till 85% RF. Förklaringen som angavs var den höga cementhalten som antogs resultera i högt pH. I slutsatsen nämndes inte att i samma publikation redovisas en mätning av alkalihalter på olika djup i de använda

betongerna, där den omnämnda självtorkande blandningen ligger bland de betonger som har lägst alkalihalt, vilket normalt även medför lägst pH.

Undersökningen i Wengholt Johnsson 1995 genomfördes utan att titta närmare på betongens varierande transport- och buffringsförmåga. Detta begränsar kraftigt möjligheten till analys av vad som egentligen händer i betongen samt de bakomliggande mekanismerna och förmågan att dra korrekta slutsatser. Låt oss titta en gång till på denna mätning, fast med ny kunskap om betongens fuktegenskaper. Den i Wengholt Johnsson 1995 använda, självtorkande betongens sammansättning är fullt jämförbar med några av materialen inmätta i Olsson m.fl. 2018 (OPC + 5%SF, vbt 0,38 resp. 0,53), vilket avslöjar att denna betong var i samma täthetsklass som den moderna, täta betong vi använder i simuleringar i denna artikel. Låt oss då simulera fallet med pålimmad PVC-matta (antagen ånggenomgångsmotstånd på 2 000 000 s/m), ett lim med ca 3/5 limfukt jämfört med simuleringar ovan, samt 40% RF i omgivande luft. Fokus här ligger inte längre på limmets torktid utan på relativ fuktighet i betongen omedelbart under limmet, se Figur 2.



Figur 2 Relativ fuktighet som funktion av tid i olika skikt i betongen under en pålimmad matta, simulering av självtorkande betong (OPC med 5% SF, vbt 0,40) från Wengholt Johnsson 1995.

Eftersom vi saknar exakta sorptionsdata för limmet, ser övergången mellan blött och torrt lim vid ca 70 dygn mer skarpt ut än vad den kommer att vara i praktiken. Däremot bör principen för fuktomfördelning samt den ungefärliga tidsaspekten stämma väl överens med verkligheten. Det vi ser, fram till ca 70 dygn, är limmets uttorkning. Limmet släpper ifrån sig sin fukt som delvis går ut genom mattan (ses inte i diagrammet) och delvis tas upp av betongen. Eftersom betongen har låg transportförmåga tar den upp fukten långsamt. Det byggs upp en stor gradient och vi ser att de översta millimetrarna i princip når upp till full fuktmättnad (100% RF är inte möjligt i betong då det finns joner lösta i porvätskan). Efter att limmet torkat ut vänder flödet och betongen börjar torka

genom den pålimmade mattan. När vi nu jämför denna bild med de uppmätta emissionerna kan följande slutsatser dras:

- **Limmet är i kontakt med betong med ett RF långt över 85% i nästan 100 dygn. Detta är fullt tillräckligt för att förklara förekomsten av emissioner.**
- **Eftersom fuktflödet går in i betongen under limmets torktid, kommer alkalitransporten att initialt vara begränsad, då den endast sker genom diffusion pga. skillnad i alkalikoncentration mellan betong och lim. När flödet vänder bör alkalitransporten öka och ske både genom diffusion och konvektion (jonerna transporteras av vattnet som flödar uppåt i betongen). Tar vi dessutom hänsyn till att det bör finnas en tidsmässig fördröjning mellan limmets nedbrytning och registrering av emissioner i luften ovanför golvet, sammanfaller fukt bilden väl med begränsade emissioner vid 43 dygn, två toppar vid 116 resp. 170 dygn och avtagande emissioner vid 233 dygn, dvs. det som registrerats.**
- **Eftersom den använda betongen innehåller en inblandning av silikastoft som reagerar med portlandit och reducerar betongens pH, vilket även framgår av undersökningar i publikationen i fråga, måste den publicerade slutsatsen om högt cementhalt och högt pH som orsak till registrerade emissioner anses vara felaktig.**
- **Tilläggs kan att Wengholt Johnsson 1995 även visar att då samma betong används med 5-10mm avjämningsmassa mellan betongytan och limmet reduceras emissionerna avsevärt.**
- **Emissioner från golv limmade direkt på betong med lågt vattencementtal samt mineraliska tillsatsmaterial förorsakas huvudsakligen av den ökade tätheten i betongen och dess konsekvenser för fuktverkan och inte pga. ett påstått förhöjt pH.**

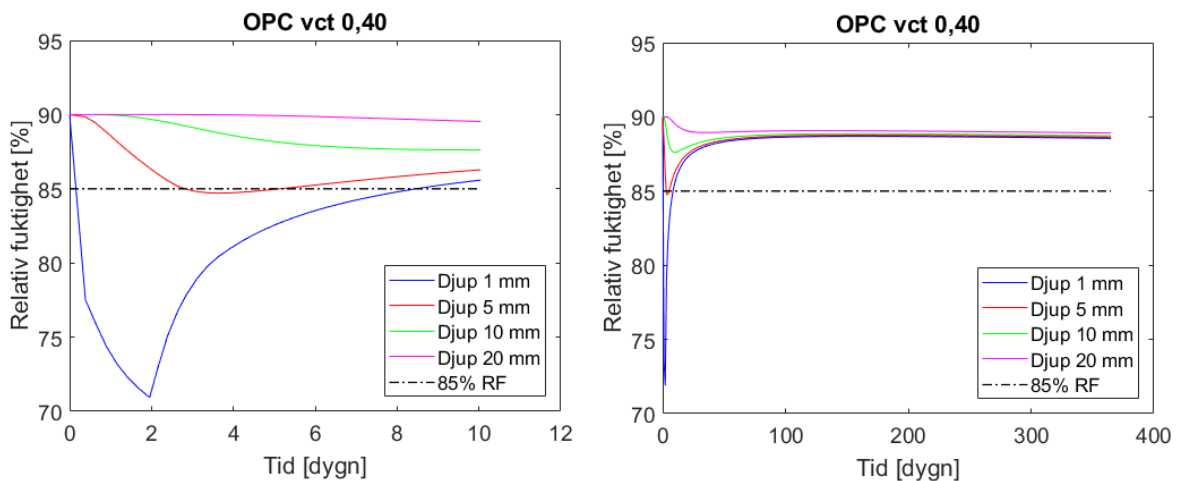
Att limma ytskikt direkt på modern, tät betong är alltså inte att rekommendera. Dels kommer det att resultera i orimliga torktider för limmet. Dels kan man räkna med alkalitransport pga. kraftig uppfuktning av betongens översta skikt, och resulterande nedbrytning av lim med eventuella tillhörande emissioner om man inte använder lågemissionslim.

Var hittar man fördelarna?

Inom den förhärskande arbetsmetodik som är framtagen för en betong med relativt öppen porstruktur är det svårt att se några fördelar med den moderna, täta betongen. Metodiken förutsätter öppenheten i prostrukturen och den resulterande möjligheten till diffusionstorkning inom rimlig tid samt buffringsförmågan vid t.ex. användning av vattenbaserat lim. För att hitta fördelarna måste man "tänka utanför boxen" och utforska nya arbetssätt konstruktivt. Våra simuleringar visar att det kan vara värt besväret.

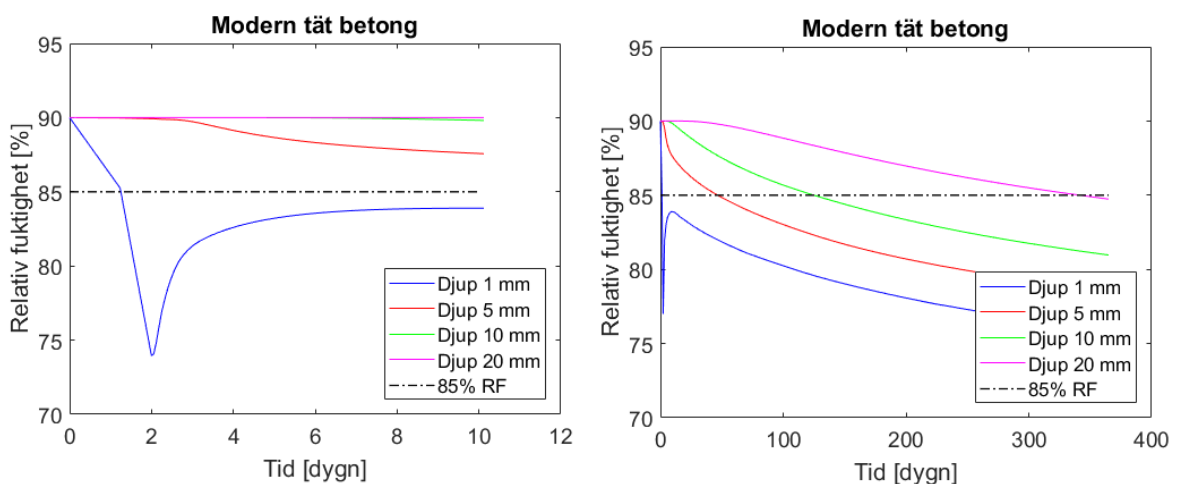
Det första exemplet på fördel i tillämpning kommer att hantera ett fall som inte blivit särskilt vanligt ännu – ytskikt som appliceras med lim som inte är vattenbaserat och som följaktligen inte behöver bli av med fukt. Även om just denna lösning inte används särskilt ofta är exemplet viktigt då det visar på vikten av att modern, tät betong släpper ifrån sig fukten väldigt sakta.

I detta fall simulerar vi ett relativt tätt ytskikt med samma ånggenomgångsmotstånd som Tarkett iQ Optima använd i tidigare simuleringar, som limmas direkt på betong. Vi antar en självuttorkning till 90% och därutöver får betongen diffusionstorka i 2 dygn mot luft med 40% RF, för att initiera en fuktgradient i själva ytan.



Figur 3 Relativ fuktighet som funktion av tid på olika djup i betong med OPC med vct 0,40 och ytskikt limmat med icke-vattenbaserat lim. Vänster de första 10 dygnen, höger de första 365 dygnen.

Limskiktet i detta fall behöver inte bli av med fukt eftersom limmet inte var vattenbaserat. Vad som däremot är intressant är att vi testar att limma mattan utan att ha uppnått 85% RF på ekvivalent mätdjup i betongen. För OPC-fallet i Figur 3 ser vi klart och tydligt att detta inte kommer att fungera. Vi får först en viss uttorkning någon millimeter in i betongen men så fort ytskiktet läggs på sker en kraftig omfördelning av fukt i betongen. Efter några dagar har hela betongtvärsnittet över 85% RF. Detta sker typiskt när betongen är relativt öppen och ytskiktet är mycket tätare. Ytskiktet blir då flaskhalsen i det totala fuktflödet. Fukten i betongen omfördelas till en jämnare profil och betongen torkar sedan långsamt genom ytskiktet.



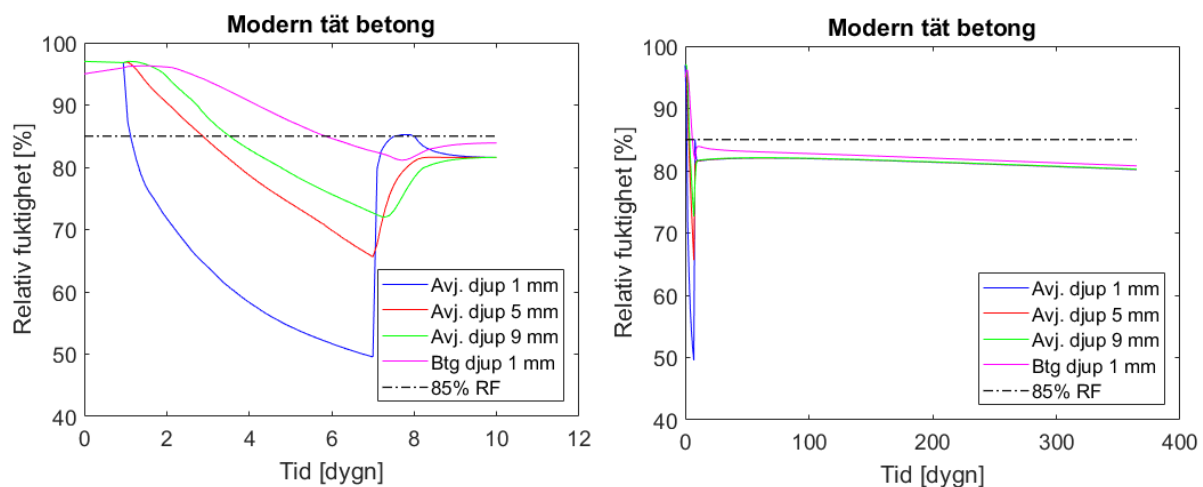
Figur 4 Relativ fuktighet som funktion av tid på olika djup i modern, tät betong med ytskikt limmat med icke-vattenbaserat lim. Vänster de första 10 dygnen, höger de första 365 dygnen.

När det gäller den moderna, täta betongen, se Figur 4, blir förhållandet annorlunda. Det sker en omfördelning efter påläggning av ytskikt men den blir mycket liten. Detta har att göra med att betongen är mycket tätare än ytskiktet. Betongen blir i detta fall flaskhalsen i det totala fuktflödet.

Den huvudsakliga gradienten i betongens övre del kvarstår. Betongen kommer sedan långsamt att torka och den lilla mängden fukt som den släpper ifrån sig går snabbt ut genom ytskiktet. Omfördelningen i just detta exempel var liten nog för att inte driva upp den övre millimetern av betongen över 85% RF, vilket innebär att **betongen som limmet och ytskiktet kommer i kontakt med kommer att vara torrare än 85% RF. Om kravet på 85% RF kan tolkas lokalt och räcker för att förhindra alkalitransport borde man kunna lägga på ytskiktet mycket tidigare än vad man gör idag. Här kan man spara tid och pengar!**

Flytta uttorkningstid från betong till avjämning

Kan man utnyttja samma täthet i kombination med ytskikt och vattenbaserat lim? Ja, det går, men inte utan ett lager avjämningsmassa. Som vi tidigare visade i simulering av uttorkningstider för vattenbaserat lim, saknar den moderna, täta betongen den buffringsförmåga som utnyttjades i den gammaldags OPC-baserade betongen. Detta måste man kompensera för och avjämningsmassa med en öppen porstruktur gör det alldeles utmärkt. Samtidigt blir man nyfiken på hur fukt bilden ser ut om man lägger avjämningsmassan tidigare än idag, dvs. vid högre RF i betongen. Det är precis vad det sista presenterade fallet handlar om. Här simulerar vi 10mm avjämningsmassa Weberfloor 140 Nova som läggs på en betong som självtorkat till 95% RF. Avjämningsmassan får torka i 7 dagar mot omgivande luft med 40% RF. Därefter läggs Tarkett iQ Optima med vattenbaserat lim.



Figur 5 Relativ fuktighet som funktion av tid på olika djup i avjämningsmassa och betong med ytskikt limmat med vattenbaserat lim. Vänster de första 13 dygnen, höger de första 365 dygnen.

Den erhållna fukt bilden framgår av Figur 5. Först ser vi en snabb diffusionstorkning av avjämningsmassan. Det övre skiktet kommer ner till 50% RF och det närmast betongen till ca 70% RF. Vi ser även en liten uttorkning av betongens övre skikt genom den öppna avjämnningen. Vid 7 dygn läggs ytskiktet och limmet på. Limfukten tas upp i avjämningsmassan och efter omfördelning, några dygn senare, hamnar hela avjämnningen på ca 80% RF. Nu övergår hela golvsystemet till långsam uttorkning där återigen betongen är den tätaste delen och den fukt som den släpper ut går lätt igenom de andra skikten utan att ackumuleras någonstans. Varken limmet eller ytskiktet kommer i kontakt med betong eller avjämning som håller en högre RF än 85%. Den relativt öppna avjämningsmassan kan lätt buffra upp all limfukt utan att nå högt upp i relativ fuktighet och

separerar väl ytskiktet och limmet från den blöta betongen. **Observera att detta fall i verkligheten kan motsvara avjämnning direkt efter "tätt hus" och mattläggning en vecka senare. Detta skulle kunna bli en enorm besparing i tid och pengar!**

Vilka är de kritiska parametrarna?

Dagens uttorkningskrav och de undersökningar som dessa baserar sig på, bl.a. Wengholt Johnsson 1995, har kopplat en relativ fuktighet på ett visst djup i betongen till förekomsten av emissioner från nedbrytning av lim- och ytskikt. Detta har gjorts i form av en s.k. black-box-undersökning. Man har helt enkelt uppmätt samband mellan parametrarna utan att i detalj studera mekanismerna som binder samman fenomenologin. Resultatet fungerade så länge man använde material med samma egenskaper som i undersökningen. Materialen är idag annorlunda. De ställda klimatmålen har medfört en utveckling av material inom hela golvsystemet och vi har goda skäl att anta att denna hållbarhetsresa har bara börjat. För att hantera denna utmaning måste branschens syn på vad som är de kritiska parametrarna i ett golvsystem utvecklas.

Dagens limmer och ytskikt bryts ner på delvis annorlunda sätt än tidigare. Det förekommer klagomål på illamående kopplat till misstanke om nedbrytning i golv men där man samtidigt inte kan påvisa emissioner av de typiska gamla nedbrytningsprodukterna 1-butanol och 2-etylhexanol. Samtidigt har vi skäl att tro att samma fuktnivåer i den moderna, täta betongen inte medför samma alkalitransport som i den gamla. De ovanstående fallen, där den moderna betongens täthet utnyttjades, simulerar endast fukttillståndet. Hur det förhåller sig med alkalitransport går inte att säga med säkerhet med den kunskap som finns idag. Det finns god anledning till misstanke att alkalitransporten blir mycket begränsad. Eftersom den moderna, täta betongen har mycket låg förmåga att transportera fukt och det är just samma transportvägar som används för alkali, måste tätheten bidra till en begränsning av alkalitransporten. Samtidigt bygger fallen ovan på att det betongskikt som är i kontakt med anslutande material är relativt torrt, vilket ytterligare minskar möjligheten till ett alkaliflöde från betongen in i andra material. Eftersom det kommer att ske ett visst fuktflöde i betongen som långsamt kommer att torka över många år kommer en alkalitransport att ske, men skälen nämnda ovan pekar mot att den huvudsakligen kommer att omfördela jonerna i betongen och omfördelningen till anslutande material kommer att vara begränsad.

För att med säkerhet kunna rekommendera fungerande golvlösningar som utnyttjar den moderna betongens egenskaper krävs det mer forskning och metodutveckling. Det räcker inte med den gamla black-box-undersökningen, som i t.ex. Wengholt Johnsson 1995. Mäts endast sambandet mellan fuktnivå och emission i ett antal fall förblir branschen precis lika känslig mot en förändring i materialegenskaper som den är idag. Vad som krävs för att reda ut förutsättningarna för utnyttjande av den kontinuerliga utvecklingen av nya material är en djupare förståelse av de kritiska parametrarna bakom golvsystemens felfunktion och nedbrytning:

- **Hur sker nedbrytning i dagens lim och ytskikt. Vilka lokala parametrar som t.ex. fukthalt och pH styr nedbrytningsprocessen?**
- **Hur sprider sig nedbrytningsprodukterna vidare i golvmaterialen och i luften? Vilka emissioner handlar det om? Hur skall dessa mätas på ett repeterbart sätt och vilka gränsvärden är det som gäller?**

- Hur sker alkalitransport i modern, tät betong samt andra cementbaserade produkter, som t.ex. avjämningsmassor?
- Hur skall ovanstående kunskap kopplas ihop för att kunna prediktera och verifiera säkra golvlösningar?

Slutsatser

Modern, tät betong skiljer sig fundamentalt från den gammaldags OPC-baserade i sin samverkan med omgivande material. Med dagens arbetsmetodik i konstruktion och produktion resulterar det huvudsakligen i nackdelar:

- **Betongen går i princip inte att diffusionsuttorka.**
- **Betongen saknar buffringsförmåga för fukt, vilket i princip omöjliggör limning av ytskikt med vattenbaserade limmer direkt på betongen, även om man lyckas uppfylla gällande uttorkningskrav.**

Samtidigt ger dess täthet enorma möjligheter, förutsatt att man tänker konstruktivt utanför dagens metodik och uttorkningskrav:

- **Betongen släpper ifrån sig fukt så långsamt att fukten inte ackumuleras i anslutande material och att uppfuktande omfördelningar, typiska för betong med mer öppen porstruktur, inte äger rum eller är ytterst begränsade.**
- **Kombinationen av användning av avjämningsmassor för återställande av buffringsförmåga i golvsystemet med möjligheten att arbeta med en tät betong som endast yttorkat skulle kunna åtgärda dagens problem och snabba upp byggprocessen betydligt.**

För att säkerställa framtida fungerande golvlösningar och utnyttja den moderna betongens fördelar krävs dock en hel del forskning och utveckling av predikteringsverktyg, arbetsmetodik samt valideringsmetoder för både labbmiljö och fältbruk.

Mot bakgrund av just dessa utmaningar och möjligheter ter det sig oförståeligt att vissa materialtillverkare fortfarande anstränger sig att försöka övertyga branschen att det inte är någon större skillnad ur fuktsynvinkel mellan gammaldags OPC-baserad betong och den moderna, täta. Det är hög tid för branschens samtliga aktörer att erkänna verkligheten, ta tag i utmaningen och lära sig utnyttja de nya miljövänliga materialens förändrade egenskaper!

Referenser

Nilsson 1994 – L.-O. Nilsson, *Betonghandboken*, 1994, Kap. 14.3 samt kap 14.5

Olsson m.fl. 2018 – N. Olsson, L.-O. Nilsson, M. Åhs, samt V. Baroghel-Bouny, *Moisture transport and sorption in cement based materials containing slag or silica fume*, Cement and Concrete Research, 2018.

RBK 2017 – RBK, *Manual – Fuktmätning i betong*, version 6, kap 2.3

Saeidpour & Wadsö 2016 – M. Saeidpour, L. Wadsö, *Moisture diffusion coefficients of mortars in absorption and desorption*, Cement and Concrete Research, 2016

Stelmarczyk m.fl. 2017a – M. Stelmarczyk, P. Johansson, T. Rapp, H. Hedlund, F. Gränne, M. Gunnarsson, *Betongfunktion: Uttorkning*, www.sbuf.se/ppb 2017

Stelmarczyk m.fl. 2017b – M. Stelmarczyk, P. Johansson, T. Rapp, H. Hedlund, F. Gränne, M. Gunnarsson, *Självuttorkning av betong*, www.sbuf.se/ppb 2017

Stelmarczyk m.fl. 2017c – M. Stelmarczyk, T. Rapp, H. Hedlund, F. Gränne, M. Gunnarsson, *Diffusionsuttorkning av betong samt annat fuktutbyte med dess omgivning*, www.sbuf.se/ppb 2017

Stelmarczyk m.fl. 2018 – pågående inmätning av Bascementets egenskaper inom SBUF Projekt 13198 samt 13140

Wengholt Johnsson 1995 – H. Wengholt Johnsson, *Kemisk emission från golvsystem – effekt av olika betongkvalitet och fuktbelastning*, Chalmers Tekniska Högskola 1995,

Artikelförfattare

Civ.ing. Marcin Stelmarczyk, The Green Dragon Magic

Civ.ing. Ted Rapp, Sveriges Byggindustrier, Tekniskt sakkunnig RBK

Dr., Adj. Prof. Hans Hedlund, Skanska Sverige AB / SBUF, PPB Koordinator

Dr. Fredrik Gränne, NCC Sverige AB

Ing. Mattias Gunnarsson, Fuktsakkunnig, Peab Sverige AB