



**KTH Arkitektur
och samhällsbyggnad**

Fuktrelaterade risker vid lågenergikonstruktion i lättbetong

En studie av ett nyproducerat passivhus

Moisture related risks with aerated concrete in low energy constructions

A study of a newly produced passive house



Författare:	Erik Niklasson, Sebastian Jansson
Uppdragsgivare:	AK- Konsult Indoor Air AB
Handledare:	Anders Kumlin, AK- Konsult Indoor Air AB Jenny Andersson, KTH ABE
Examinator:	Per Roald, KTH ABE
Examensarbete:	15 högskolepoäng inom Byggt teknik och Design
Godkännandedatum:	2014-06-12
Serienr:	BD 2014;10

Sammanfattning

Trenden i byggbranschen är att efterfrågan på täta, energisnåla byggnader ökar. Passivhus och andra lågenergikonstruktioner blir vanligare och vanligare. Riskerna med att bygga in organiskt material som trä i dessa konstruktioner har fått branschen att börja titta på alternativa material. Lättbetong är ett material som både har bärande och isolerande egenskaper. Dessutom är det inte organiskt vilket gör det okänsligt för mikrobiell påväxt. Det som är intressant med lättbetong, ur fuktsynpunkt, är att materialet levereras från tillverkare med en stor mängd byggfukt.

Våren 2014 färdigställde Bollnäs Bostäder passivhus- projektet Sundsbro i Bollnäs, där lättbetong ingår i utfackningsväggarna. Sett inifrån består väggen av ett tunt lager kc-puts, lättbetong, cellplast, mineralull, kc-baserad grovputs och ytputs.

I detta arbete användes projektet i Bollnäs som referensobjekt och en risk- och känslighetsanalys av väggkonstruktionen utfördes. Arbetet utreder risken för fuktrelaterade problem med väggen vid de extra uttorkningsinsatser som vidtogs i referensobjektet och vid normala uttorkningsbetingelser. Vidare utreds vilka parametrar som är viktiga för väggens fuktfunktion och vad man behöver tänka på när man projekterar och bygger i lättbetong.

Arbetet har genomförts i samarbete med AK-Konsult Indoor Air AB och deras senior konsult Anders Kumlin. Fuktberäkningsprogrammet WUFI Pro 5.3 har använts för simuleringar. Beräkningarna gjordes endimensionellt på väggkonstruktionen.

Resultaten med den ökade uttorkning som utfördes i referensobjektet visar inget högre fukttinnehåll längst ut i väggen på grund av byggfukt från lättbetongen som vandrar utåt. Farhågan var att så skulle kunna ske och att det skulle kunna leda till mögelproblem. Däremot visar resultaten att byggfukt från putsen kan fukta upp mineralullen. Det finns dock inga kända skadefall av detta slag och därför dras ändå slutsatsen att konstruktionen är riskfri. Tack vare en förutseende fukt-projektering och väl utförd uttorkning eliminerades risken för mögel. Hade inte dessa åtgärder vidtagits så visar resultaten att en liten mängd byggfukt hade kunnat vandra utåt och kondensera i mineralullen under första vintern. Då hade det funnits risk för mikrobiell påväxt. Detta visar att det är av största vikt att utföra en noggrann fuktprojektering vid byggnation av välisolerade hus i allmänhet och i synnerhet när lättbetong används. Lyckligtvis gjordes detta på ett bra sätt i referensprojektet.

Känslighetsanalysen visar att isoleringens diffusionstäthet är avgörande för hur stor del av byggfukten som kan vandra utåt och därmed hur stor risken för problem blir. Lägre täthet ger större risk och högre täthet reducerar risken. Resultaten visar också att det är viktigt att inte montera täta skikt på insidan för tidigt. Den allmänna rekommendationen från leverantör är att lättbetongen skall torkas till 15 % fuktkvot på 50 millimeters djup innan målning och tapetsering på insida vägg får ske. Studien visar att detta är ett för högt fukttillstånd om det skikt som appliceras på insida vägg är tätt. Lättbetongen bör torkas till 5 % på 50 millimeters djup innan helt täta skikt kan monteras utan mögelrisk.

Nyckelord: Passivhus, WUFI, lättbetong, byggfukt, fukttransport, enstegstätad, energiförbrukning, fuktkvot, fukt, inbyggnadsfukthalt, fasad, lågenergihus, mögel, mögelrisk, mikrobiell påväxt

Abstract

The trend in the construction industry is that the demand for tight, energy-saving buildings is rising. Passive houses and low energy constructions are becoming more and more common. The risk with using organic material in this type of constructions has made the industry look at alternative materials. Aerated concrete is a material that has both load-bearing and insulating properties. In addition to that it is not organic, which makes it insensitive to microbial growth. What is interesting with aerated concrete, from a moisture point of view, is that the material is delivered from the producer with a large amount of construction moisture.

In the spring of 2014, the passive-house project Sundsbro in Bollnäs with aerated concrete in the wall construction, was finished by Bollnäs Bostäder.

In this study the project in Bollnäs was used as reference object and a risk- and sensitivity analysis was made. The study examines the risk of moisture related problems with the wall construction during normal dehydration conditions and after the increased dehydration efforts that were taken in the reference project. The study also examines which parameters are important for the moisture function of the wall construction and what you need to think about when you project and build with aerated concrete.

The job has been done in cooperation with AK-Konsult Indoor Air AB and their senior consultant Anders Kumlin. The moisture calculation program WUFI Pro 5.3 has been used for simulations.

The results with the increased dehydration that was used in the reference project show no increased moisture content in the outer parts of the construction due to construction moisture from the concrete that wanders outwards. The concern was that so could happen and that it would lead to mould problems. However the results show that construction moisture from the exterior plaster can moisten the mineral wool. There are no known damage cases of this sort and therefore the conclusion is that the construction is free of risk. Thanks to a foreseeing moisture projection and a well performed dehydration the risk of mould was eliminated. If these measures would not have been taken, the results show that a small amount of construction moisture could have wandered outwards and condensed inside the mineral wool during the first winter. Then there would have been a risk of microbial growth. This shows that it is very important to carry out a detailed moisture projection when constructing well insulated houses in general and when using aerated concrete in particular. Fortunately this was properly done in the reference project.

The sensitivity analysis shows that the diffusion resistance of the insulation decides how much of the construction moisture that can wander outwards and consequently the size of the problem risk. Results also show that it is crucial not to apply sealing layers on the inside of the wall too early. The general recommendation from the supplier is that the aerated concrete should be dried to 15 % moisture ratio on 50 millimeter depth before painting and paper hanging on the interior surface of the wall can be done. The study shows that the concrete still is too damp at that stage if the layer applied on the inside of the wall is impermeable. The concrete should be dried down to 5 % moisture ratio before sealing layers can be applied without mould risk.

Keywords: Passive house, WUFI, aerated concrete, construction moisture, moisture transport, energy consumption, EIFS, moisture, facade, moisture ratio, built-in moisture ratio, energy saving house, mould, risk of mould, microbial growth

Förord

Detta arbete är ett examensarbete skrivet inom ramen för Högskoleingenjör-utbildningen Byggt teknik och design, 180hp, vid Kungliga Tekniska högskolan, KTH i Haninge. Arbetet har utförts i samarbete med AK-Konsult Indoor Air AB.

Initiativet till arbetet togs av Anders Kumlin på AK-Konsult. Anders var vår handledare på företaget. Handledare på skolan var Jenny Andersson och examinator var Per Roald som är avdelningschef på Avdelningen för Byggt teknik och design på institutionen för Byggt vetenskap på KTH.

Vi vill tacka Anders Kumlin och Jenny Andersson för hjälp och vägledning med arbetet. Vi vill också tacka AK-Konsult för att vi fick sitta på kontoret och alla deras medarbetare för att de fått oss att känna oss välkomna och svarat på våra frågor. Vi tackar även Lars-Olof Åkerlind (AK-Konsult), Ulf Linde (Bollnäs Bostäder), Bo Nitz (Weber), Johan Wall (Ängabyggen), Jan Lambertsson (H+H) för att de har gett oss viktig information och tagit sig tid att svara på våra frågor.

Handen 2014-05-26

Sebastian Jansson & Erik Niklasson

Termer

Absorption – När en vätska, energiform eller gas tränger in i och upptas av ett annat ämne. I detta fall fukt som upptas av ett material. [15]

Byggfukt – Är den vattenmängd som måste avges från materialet för att det skall hamna i jämvikt med omgivningen. [3]

Densitet - Är ett mått på ett materials massa per kubikmeter. Skrymdensitet beskriver materialets massa per kubikmeter i normaltillstånd. Kompaktdensitet är förhållandet mellan materialets massa och dess kompakta volym (den totala volymen minus porvolymen). Torrdensitet är materialets massa per kubikmeter när allt fysiskt vatten har torkats ut. [3]

Desorption – I detta fall fukt som avges från ett material. [3]

Diffusion – Strävan hos gaser att utjämna koncentrationsskillnader. Innebär i fallet vattenånga att vatten transporteras från en högre ånghalt till en lägre. [3]

Diffusionsmotståndsfaktor – Betecknas μ och kallas ofta μ -värde. Ett värde på ett materials motstånd mot diffusion av vattenånga. Dimensionslös. [3]

Fuktkonvektion – Innebär att vattenånga transporteras med hjälp av ett luftflöde. [3]

Fuktkvot – Är vikten av fukten i materialet i förhållande till vikten torrt material. Betecknas u och uttrycks i procent. [4]

Fuktmotstånd – Betecknas Z . Anger ett materials motstånd mot fukttransport via diffusion och kapillär sugning vid ett visst tillstånd. Enheten är [s/m] [7]

Fuktproduktion – Fukt som avdunstar från de aktiviteter som förekommer inomhus och tas upp i inomhusluften. [3]

Hygroskopiskt område – Den del av uppfuktningsprocessen då fukt kan tas upp direkt från luften. RF i materialet är 0-98%. [3]

Kapillärtransport – Fukt som transporteras i materialets porsystem i vätskeform. [3]

Mikrobiell påväxt – Mikroorganismer som lever på en byggnad. Inkluderar inte bara mögel utan även bakterier och jästsvampar. [8]

Mättnadsånghalt – Mängden vattenånga som luften maximalt kan innehålla vid en viss temperatur. [4]

Mögel - Samlingsnamn för mikrosvampar. Används ibland som samlingsnamn för alla mikroorganismer som kan angripa en byggnad. [8]

Porositet – Förhållandet mellan ett materials porvolym och den totala volymen. Uttrycks i procent. [3]

Relativ fuktighet – Förhållandet mellan hur mycket vattenånga luften innehåller och hur mycket vattenånga luften maximalt kan innehålla vid den aktuella temperaturen. [4]

S_d-värde – Ett sätt att beskriva ett materials ånggenomgångsmotstånd. Anger vad ett materials ånggenomgångsmotstånd motsvarar i meter stillastående luft. [4]

Slagregn- Regn som rör sig i horisontell riktning och därmed kan träffa vertikala byggnadsytor. [3]

Specifik värmekapacitet – Ett mått på ett ämnes förmåga att lagra termisk energi, hur värmetrögt det är. Anges i [J/kgK] [10]

Stationära förhållanden – Innebär att förutsättningarna inte ändras med tiden. Motsatsen är icke stationära förhållanden. [3]

U-värde - Värmegenomgångskoefficient som beskriver den värmeförlust som sker genom en konstruktion vid en viss temperaturdifferens mellan konstruktionens in- och utsida. Utrycks i enheten [W/m²K]. [10]

Värmeledningsförmåga – Även kallat λ -värde. Är ett värde på hur bra ett material leder värme. Enheten är [W/mK] [10]

Innehållsförteckning

Fuktrelaterade risker vid lågenergikonstruktion i lättbetong	I
Sammanfattning	III
Abstract	V
Förord	VIII
Termer	X
1. Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Målformulering	2
1.3 Avgränsningar	2
1.4 Lösningstrategier	3
1.5 Faktainsamling	4
2. Nulägesbeskrivning	5
3. Teoretisk referensram	6
3.1 Fuktteori	6
3.2 Beräkning av fukt	13
3.3 Mikroorganismer i byggnader	15
3.4 Värme	17
3.5 Lättbetong	20
3.6 WUFI Pro 5.3	22
3.7 WUFI-Bio 3.1	29
4. Genomförande	30
4.1 Uppbyggnad av väggen i WUFI:	30
4.2 Skeden och inställningar:	32
4.3 Modifikationer:	33
4.4 Simulering av verkligt fall med extra uttorkning	35
5. Resultat och Analys	36
5.1 Simulering av väggen vid normal uttorkning:	36
5.2 Diffusionstätare ytterputs:	39
5.3 Bara mineralull på utsidan om lättbetongen:	40
5.4 Tätare cellplast och bara cellplast	42
5.5 Tätskikt på insidan:	43
5.6 Maximal solinstrålning:	45

5.7 Mer byggfukt:	45
5.8 Verkligt fall med extra uttorkning	45
6. Slutsatser och rekommendationer	47
7. Referenser	49

1. Inledning

1.1 Bakgrund

Trenden i byggbranschen går mot tätare, mer energisnåla byggnader. Ett koncept som blir mer och mer vanligt är passivhus. I Sverige var det *Forum för energieffektiva byggnader* (FEBY) som utvecklade kriterierna för passivhus. Ansvaret har nu tagits över av *Sveriges centrum för nollenergihus*. Kraven är olika för olika byggnader och klimat men ett riktvärde är att byggnaden maximalt får ha 15 W värmeförluster per kvadratmeter, vid 21°C innetemperatur och dimensionerande utetemperatur (DVUT). [1]

För att uppnå dessa värden krävs mycket isolering och hög täthet. Många passivhus byggs med träreglar som isoleringsbärare men även andra material har testats. Våren 2014 färdigställdes passivhusprojektet Sundsbro av Bollnäs Bostäder i Bollnäs. Där används lättbetong som isolerings-bärare. Väggkonstruktionen består, sett utifrån, av kc-baserad tunnputs på 120 mineralull, 180 cellplast och 200 lättbetong och en kc-baserad puts på insidan. Mellan fasadputs och mineralull finns ingen luftspalt. Det är således en enstegstätad fasad.



Bild 1.1. Passivhuset Sundsbro i Bollnäs vid invigningen. Bilden är tagen av Magnus Hansson på Sveriges Radio.

Lättbetong är intressant ur fuktsynpunkt eftersom det innehåller stora mängder byggfukt vid leverans. Fördelen är att materialet, till skillnad från träreglar, är oorganiskt och därmed okänsligt för mikrobiell tillväxt. Vid höga fukttillstånd kan man dock få mögelproblem med alla material. Byggfukten kan även ställa till andra problem. Om lättbetongen fuktar upp konstruktionen kan isoleringsvärdet reduceras med högre energiförbrukning än beräknat som följd. Man måste dessutom vara säker på att lättbetongen är tillräckligt torr innan man applicerar täta skikt och vägglistor. Görs det för tidigt riskeras mögel på baksidan.

I detta arbete användes projektet i Bollnäs som referensobjekt och en risk- och känslighetsanalys av väggkonstruktionen utfördes. Arbetet utreder risken för fuktrelaterade problem med väggen vid de extra uttorkningsinsatser som vidtogs i referensobjektet och vid normala uttorkningsbetingelser. Vidare utreds vilka parametrar som är viktiga för väggens fuktfunktion och vad man behöver tänka på när man projekterar och bygger i lättbetong.

Arbetet har utförts i samarbete med AK-Konsult Indoor Air AB och Anders Kumlin som är senior konsult på företaget. Anders Kumlin har i det aktuella projektet utfört beräkningar som legat till grund för hur långt lättbetongen har torkats. Rekommendationen från honom var att lättbetongen skulle torkas till 90 % RF på 150 millimeters djup innan första vintern. Detta genomfördes med hjälp av luftavfuktare och hög inomhustemperatur och kontrollerades via fuktmätningar.

1.2 Målformulering

Målet med studien är att få fram resultat som indikerar om man kan få fuktproblem med den aktuella konstruktionen vid den forcerade uttorkning som genomfördes i referensprojektet och vid mer normala uttorkningsförhållanden. Vidare skall studien klargöra vilka parametrar som är viktiga att ta hänsyn till vid projektering och uppbyggnad av denna typ av konstruktion. Slutsatsen skall innehålla förslag på alternativa lösningar för att undvika problem och diskussion om lättbetong i lågenergibyggnader i allmänhet. Resultaten kan sedan vara av nytta för byggherren i det aktuella projektet och för branschen i stort inför kommande passivhus- och lågenergiprojekt med lättbetong.

1.3 Avgränsningar

Studien är avgränsad till endimensionella beräkningar på väggkonstruktionen i referensobjektet. I verkligheten kan fukt transporteras i alla riktningar, men vid endimensionella beräkningar kan man bara ta hänsyn till fuktvandringar i en riktning. I studien är det horisontell fuktvandring som har beaktats. Det finns tvådimensionella beräkningsprogram men tiden det hade tagit att lära sig samt utföra beräkningarna i två dimensioner fanns inte. Eftersom väggen består av homogena skikt är endimensionella beräkningar en acceptabel förenkling.

Hänsyn har inte kunnat tas till fogar mellan lättbetongblock och cellplastelement. Det ger resultaten en större osäkerhet men gör dem inte irrelevanta. Hänsyn har heller inte tagits till fönster och köldbryggor. De kan variera med projekt och utförande och är inte relevanta när man ser på själva vägguppbyggnadens fuktfunktion.

1.4 Lösningsmetoder

Fuktberäkningsprogrammet WUFI Pro 5.3 har använts som simuleringsverktyg och insticksmodulen WUFI-Bio 3.1 har använts för att analysera vissa av resultaten.

Samtal och mailkonversationer har haft med byggherre, entreprenörer och leverantörer av material till referensobjektet. Utifrån dessa samtal har tidsuppgifter och materialdata insamlats. Denna information har legat till grund för simuleringarna i WUFI.

Samtal med Anders Kumlin och andra anställda på AK-Konsult om arbetet har skett kontinuerligt. Kontinuerlig kontakt har också haft med Jenny Andersson på KTH Haninge.

Med hjälp av WUFI har väggens fuktutveckling simulerats. I en simulering undersöktes väggens fuktutveckling vid ett antaget "normalt" uttorkningsklimat. Då antogs att byggnaden började värmas när huset gjordes tätt och att inomhustemperaturen låg på 20°C. Vad som är normalt uttorkningsklimat kan naturligtvis variera men i rapporten refereras till detta antagande som normal uttorkning.

Med utgångspunkt i den simuleringen har sedan inbyggnadsfukthalt, fasadens täthet, cellplastens täthet och fasadens orientering varierats och ett tätskikt har applicerats på insida vägg för att se vilka parametrar som är viktiga att ta hänsyn till för att undvika fuktproblem.

I referensobjektet forcerades torkningen med högre temperatur och avfuktare. En simulering har gjorts där fuktutvecklingen i referensväggen efter torkning undersöktes. Att modifikationerna av konstruktionen inte gjordes med utgångspunkt i denna simulering beror på att effekterna blir tydligare i simuleringen med normal uttorkning.

En svaghet med metoden är att det endast är horisontell fuktvandring som behandlas. Fukt kan vandra i alla riktningar och även om huvuddelen av fukttransporten i väggen sker horisontellt så blir metoden begränsad. En svaghet i WUFI är att klimatdata som finns i programmet inte tar hänsyn till extremt väder som kan uppstå i verkligheten. En extremt kall vinter ökar drivkraften för fuktvandring utåt.

Styrkan med WUFI är att programmet kan ta hänsyn till icke stationära förhållanden. Det gör att både ett varierande utomhus- och inomhusklimat kan simuleras. Fördelen med beräkningar i en dimension är att de går fort att utföra och att man under en begränsad tid hinner undersöka många olika fall.

Det finns naturligtvis fler saker som kunde ha undersökts i studien. Exempel är olika klimat, fler konstruktioner, olika inbyggnadsfuktkvot, inläckage och så vidare. Mer fokus kunde också ha lagts på att undersöka byggfuktens påverkan på energiförbrukningen.

1.5 Faktainsamling

Fakta och illustrationer har inhämtats från relevanta böcker och artiklar. Dessa finns refererade till under kapitel 9, Referenser. De böcker som har refererats mest till är *Fukthandboken, praktik och teori* och *Tillämpad byggnadsfysik*. Böcker har varit kurslitteratur från utbildningen, lånats från biblioteket på KTH Haninge eller funnits tillgängliga på AK-Konsults kontor. Artiklar har hittats på internetsidor. Inspiration har hämtats från andra examensarbeten inom området som hämtats på Digitala Vetenskapliga Arkivet, DIVA.

Information kring referensobjektet har inhämtats genom mail- och telefonkontakt med byggherre, entreprenörer och underentreprenörer i projektet. Det handlar om vilka byggnadsmaterial som har använts i projektet, vid vilka tider olika delar i konstruktionen färdigställdes, materialdata till simuleringarna i WUFI etc.

Personer som har kontaktats för information om projektet och dess material:

- ~ Johan Wall – Ängabyggen AB
- ~ Ulf Linde – Byggherre
- ~ Jan Lambertsson – H+H (Leverantör av lättbetong)
- ~ Bo Nitz – Weber (Leverantör av fasadsystem)

2. Nulägesbeskrivning

AK-Konsult Indoor Air AB är ett av Sveriges ledande konsultföretag inom fukt- och inomhusmiljöproblem. De är specialiserade på skadeutredningar, projektering och mätuppdrag för att skapa en bättre inomhusmiljö för fastighetsägare. Företaget grundades 1990 av Anders Kumlin. Sedan 2012 ägs AK-Konsult av Polygon Sverige AB.

Vid skadeutredningar tar AK-Konsult fram orsakssamband och föreslår åtgärder. Vid fuktprojekteringsuppdrag genomför man ritningsgranskning och fuktdimensioneringar. Fuktprojekteringen kan exempelvis påverka val av byggmaterial, konstruktionsval och utförandemetod.

Alla inomhusmiljöproblem är inte fuktrelaterade. AK-Konsult hanterar också miljöfarliga ämnen som asbest, kvicksilver, PCB, radon och bly i befintliga konstruktioner. Även här lägger man fram åtgärdsförslag för att komma till rätta med problemen. [2]

Arbetet har till stor del utförts på AK-Konsults kontor i Spånga. Det har alltid funnits någon anställd att fråga vid behov. Dagar som innehållit seminarier, föreläsningar eller möten med handledare på skolan har arbetet utförts i skolan. Halvdagar och klämdagar har arbetet utförts i skolan.

3. Teoretisk referensram

3.1 Fuktteori

Allmänt om fukt

Fukt är vatten i sina tre olika faser: Ångfas, flytande fas och fast fas. Med andra ord; vattenånga, vatten och is. Fukt i rätt mängd på rätt plats är nödvändigt och inte ett problem. Det är när man får fukt i stora mängder på "fel" ställe som det kan medföra skador. Kombinationen värme och fukt kan ge katastrofala följder i form av emissioner och mögel. Problem som kan uppstå är bland annat:

- Nedbrytning av byggnadsmaterial
- Hälsorisk i form av elak lukt av mögel och emissioner från material.
- Ökat energibehov
- Försämrade hållfasthet för byggnadsmaterialet
- Fuktbetingade rörelser

Olika fuktkällor som kan orsaka problem i en konstruktion:

- Nederbörd (inklusive snö och is)
- Luftfukt
- Byggfukt
- Markvatten
- Läckage från installationer

[3]

Fukt i luft

Luftens innehåll av vattenånga anges vanligtvis i gram per kubikmeter, benämns som *ånghalt* och betecknas v . Luftens förmåga att ta upp och behålla vattnet är inte oändlig utan är direkt beroende av temperaturen. Ju varmare luften är, desto mer vatten kan den innehålla. Luftens *mättnadsånghalt* är den maximala mängden vattenånga som luften kan innehålla vid en viss temperatur. Den betecknas v_s . Förhållandet mellan hur mycket vatten luften innehåller och hur mycket den kan innehålla vid den aktuella temperaturen kallas *relativ fuktighet* och betecknas RF . Det uttrycks som:

$$RF = v/v_s(T)$$

Vill man ha RF i procent multiplicerar man med 100 %.

När mängden vatten i luften når mättnadsånghalten för den aktuella temperaturen, det vill säga när RF når 100 %, kommer den bli tvungen att avge vatten. Det sker som dimma och kondens på ytor. När det sker på växter och gräs kallas det för dagg. [3]

Den relativa fuktigheten utomhus varierar under året. På sommaren ligger medelfuktigheten på runt 70 % och under vinterhalvåret runt 85 %. Det varierar med runt 10 procentenheter över landet med högst luftfuktighet i Skåne och lägst i inre Norrland. Notera att eftersom temperaturen är högre under sommaren blir luftens ånghalt högre på sommaren trots att den relativa fuktigheten är lägre.[3]

Fukt i material

Vatten i byggnadsmaterial kan bindas både kemiskt och fysikaliskt i mer eller mindre mängder. Kemiskt bundet vatten är så hårt bundet att man bortser från det när man gör fuktberäkningar. Det som vi normalt betecknar som fukt är det fysikaliskt bundna vattnet. Definitionen av fysikaliskt bundet vatten är det vatten som förångas vid uppvärmning till 105 °C.[3]

Mängden fukt i ett material anges med *fukthalten* (w) [kg/m³] eller fuktkvoten (u) [kg/kg]. Fukthalten uttrycks som:

$$w = u \cdot \rho$$

$$\rho = \text{materialets densitet i det nuvarande tillståndet, kallat skrymdensitet [kg/m}^3\text{]}$$

Fuktkvoten blir då:

$$u = w / \rho$$

Vill man ha fuktkvoten i procent multiplicerar man med 100 %. [4]

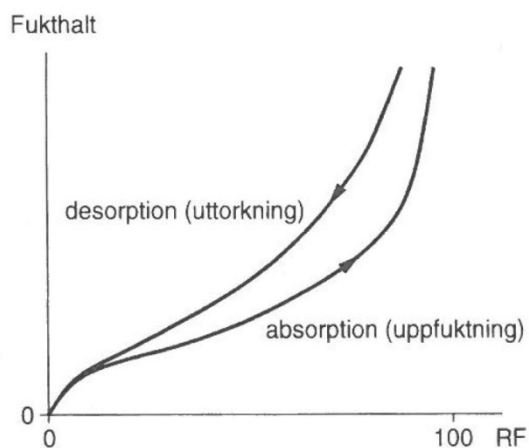
Vilka egenskaper ett byggnadsmaterial har i fukthänseende avgörs av materialets porositet, porstorleksfördelning, struktur och dess kemiska uppbyggnad. Luften i porerna försöker ställa sig i jämvikt med den omgivande luften, vilket leder till fukttransport tills materialet står i jämvikt med omgivningen.

Hur *hygroskopiskt* ett material är berättar hur mycket fukt det kan ta upp direkt från luften. Vid en viss RF hos den omgivande luften binds en viss mängd fukt i materialets porer. Fukt binds genom *adsorption* och *kapillärkondensation*. Den mängd fukt som kan tas upp direkt från luften kallas "det hygroskopiska området". [3]

Sorptionskurvan

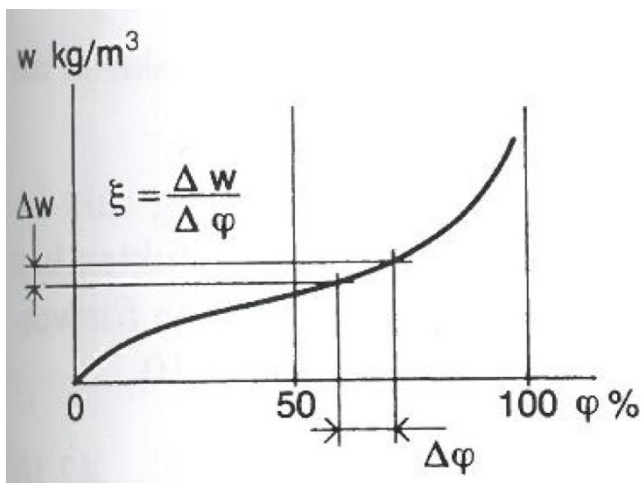
Sorptionskurvan visar sambandet mellan omgivande lufts relativa fuktighet och materialets fukthalt (w). Kurvan är specifik för varje material och varje temperatur. Temperaturberoendet är dock inte så starkt. Oftast brukar man använda kurvan för 20°C även vid andra temperaturer.

Sorptionskurvan ser olika ut beroende på om materialet fuktas upp eller torkas ut. En förklaring är att om materialet är fyllt av vatten från början så finns det vatten i håligheter som inte skulle fyllas upp vid uppfuktning. I ett sorptionsdiagram visas ofta både absorptionskurvan och desorptionskurvan. Se *figur 3.1*. [3]



Figur 3.1. Exempel på sorptionsdiagram som visar sorptionskurvor för både uttorkning och uppfuktning av samma material .[3]

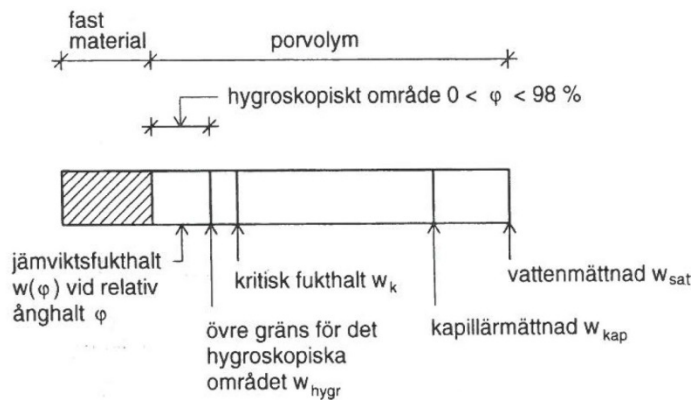
Fuktkapacitet ($\Delta w / \Delta RF$) [kg/m^3] för ett material är förmågan att, vid det aktuella fukttillståndet, ta upp eller ge ifrån sig fukt. Fuktkapaciteten motsvarar lutningen på sorptionskurvan. Den kan således fås ur sorptionsdiagrammet genom att tangenten för kurvan tas fram vid önskad RF och fuktkvot och att lutningen på den beräknas. Se figur 3.2.



Figur 3.2. Fuktkapacitet fås ur sorptionsdiagrammet.[3]

Kritisk fukthalt, w_k , är den fukthalt i materialet då fukttransporten i materialet går från att domineras av ångtransport till att domineras av vätsketransport. Det har då bildats ett sammanhängande porvattensystem som kan transportera fukt i vätskefas. Den kritiska fukthalten ligger för de flesta material utanför det hygroskopiska området.

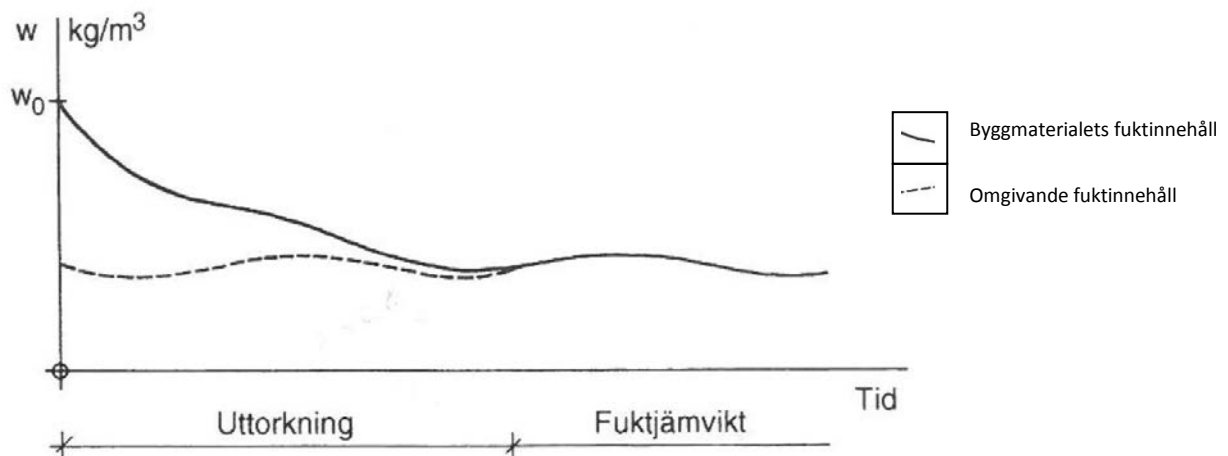
Vid kontakt med fritt vatten under en lång tid kommer materialet uppnå *kapillärmättnad*. Då kan materialet inte suga åt sig mer vatten på naturlig väg. Vid kapillärmättnad finns fortfarande lite luft i porerna. Vill man uppnå fullständig vattenmättnad måste luften drivas ur porerna med hjälp av vakuumbehandling eller upprepade kokning. Se figur 3.3 [3]



Figur 3.3. Fukt i material. Figuren visar hur olika begrepp som används i samband med fukt i material förhåller sig till varandra.[3]

Byggfukt

Byggfukt kan definieras som mängden vatten som måste avges för att materialet ska komma i fuktjämvikt med sin omgivning. Byggfukt är överskottsfukt i materialet som kommer från tillverkning, lagring, transport och byggnation. Omgivningens tillstånd varierar dock vilket innebär att mängden byggfukt inte kan definieras exakt. Se *figur 3.4*. Fukthalten (w) vid jämvikt kan fås ur sorptionskurvan.



Figur 3.4. Diagrammet visar uttorkning till fuktjämvikt.[3]

När materialet är nyproducerat har det en viss fukthalt som ofta är mycket högre än jämviktsfukthalten. Sedan kan materialet fuktas upp ytterligare om det utsätts för regn eller ligger på marken och suger fukt kapillärt. Om materialet däremot skyddas mot ytterligare fuktbelastning så hinner det torka en del innan det byggs in. [3]

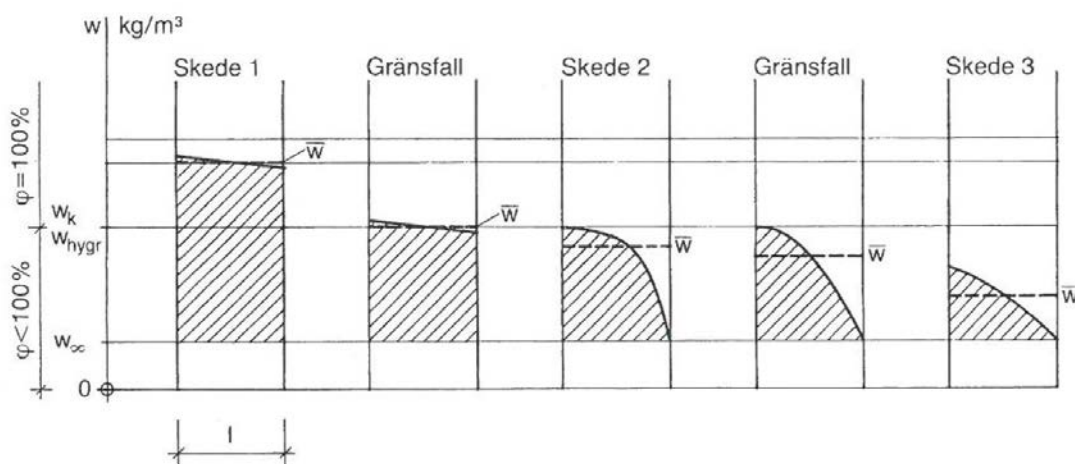
Uttorkning av byggfukt

Uttorkningen av byggnadsmaterial styrs av fukthalten i materialet, den omgivande luftens relativa fuktighet samt dess temperatur. En hög temperatur, en låg relativ fuktighet i omgivande luft och en luftrörelse längst ytan på materialet man vill torka är det optimala sättet att torka ut byggfukten.

Uttorkning är en komplicerad process då material ofta fuktas upp av nederbörd och markfukt innan de byggs in. Solinstrålning höjer temperaturen och skapar uttorkning. I värsta fall kan solinstrålning driva fukt åt "fel håll".

Man brukar dela in uttorkningen i 3 skeden. Det första skedet gäller så länge fukten avdunstar från fri vattenyta. För det krävs att fukttransporten till ytan är stor. För vanlig betong sker detta bara under en kort period medan lättbetong, som har högre kapillärsugande förmåga, torkar i skede ett under en längre tid. Torkningen är störst i det första skedet. [3]

Under det andra och tredje skedet börjar en fuktfront gradvis dra sig tillbaka i materialet. Fukten måste därmed transporteras längre väg för att kunna avges, flödesmotståndet ökar och torkhastigheten avtar. Skede två karakteriseras av att ytan är torr men att ånghalten är lika med mättnadsånghalten någonstans i tvärsnittet. Skede 3 inträder när all transport i vätskefas upphör. Skede 2 och 3 kräver mer energi för att torka ut samma mängd som i skede 1. Se figur 3.5.



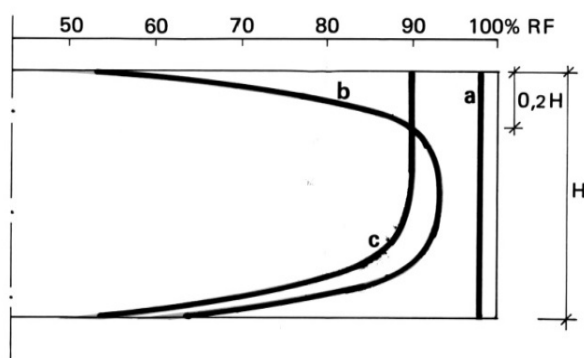
Figur 3.5. De tre olika uttorkningsskedena. Det randiga området är fukttinnehållet och svarta strecket visar fuktprofilen vid ensidig uttorkning. [3]

Torkningen brukar vara mest effektiv på vintern eftersom man då har en låg relativ fuktighet inomhus. Det räcker alltså att värma byggnaden och ventilerar för att få till en effektiv torkning. På sommaren behöver man inte värma tilluften men eftersom luften inomhus har högre relativ fuktighet blir uttorkningen sämre. [5]

Avfuktare kan användas vid alla årstider. För att få luften att fälla ut kondens måste den kylas och när den har avfuktats måste den värmas igen för att skapa ett bra torkklimat. Om man inte vill ventilerat bygget med kall utomhusluft på vintern kan man torka med enbart avfuktare utan ventilation. [3]

Mätdjup

Vid uttorkning av ett betongelement sker uttorkningen först vid ytan medan mitten av betongelementet fortfarande har ett högt fukttillstånd. När ett tätt lager appliceras på betongens yta sker en omfördelning och utjämning av fukten i betongen. Principen för detta visas i *figur 3.6*. Här råder dubbelsidig uttorkning före golvläggning, vilket betyder att betongen har möjlighet att torka ut åt två



Figur 3.6. Dubbelsidig uttorkning.

a = fuktprofil före uttorkning

b = fuktprofil under uttorkning

c = fuktprofil efter golvläggning och fullständig omfördelning av fukt

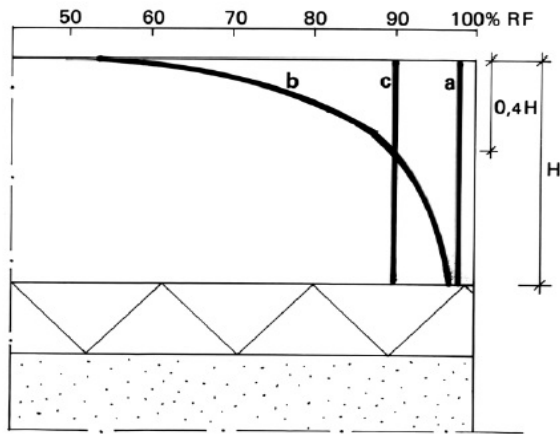
H = plattans tjocklek

(RBK 2010 flik 2)

håll. [6]

Relativa fuktigheten, RF på ett visst "ekvivalent djup" från ytan ($0.2 H$ i figur 3.6.) motsvarar den relativa fuktighet som kommer att uppstå i ytan efter att man har applicerat ett tätskikt på materialets yta och efter att fukten har omfördelat sig. Ekvivalenta djupet varierar med hänsyn till hur tätt det applicerade ytskiktet är och om betongen torkas ut enkelsidigt eller dubbelsidigt. Det farligaste fallet fås om tätskiktet är helt tätt och är det fall som används för att bestämma mätdjupet vid fuktmätning. Andra kriterier som måste beaktas är att temperaturen över materialet måste vara konstant. Om det är stora variationer i temperatur kan det ge stora mätfel. Efter en vattenskada vid renovering av en gammal byggnad måste fuktprofilen bestämmas innan mätdjup kan tas fram.[6]

Ensidig uttorkning innebär att materialet bara har möjlighet att torka åt ett håll. Det ger en annorlunda fuktprofil och man får ett annat ekvivalent mätdjup ($0.4H$ i figur 3.8.). Fukten vid ytan på elementet behöver torka ut mera för att få samma relativa fuktighet som vid tvåsidig uttorkning. Principen för detta visas i *figur 3.7*. [6]



Figur 3.7. enkelsidig
uttorkning av en betongplatta
på isolering. (RBK 2010 flik 2)

Fukttransport

Fukttransport sker i ångfas eller vätskefas. I ångfas sker transporten genom diffusion och konvektion.

Diffusion sker eftersom gasmolekyler vill fördela sig jämt i blandningen. Denna strävan hos vattenånga gör att koncentrationsskillnaden reduceras mellan material och omgivande luft.

Koncentrationsutjämning går mycket långsammare i material än i luft.

Fuktkonvektion innebär att vatten transporteras med luftströmmar. Drivkraften är skillnader i lufttryck. Exempelvis kan fuktkonvektion ske in i en vägg om det råder tryckskillnad mellan insida och utsida vägg och det finns otätheter i konstruktionen. Hur stora mängder luft som passerar otätheten beror på tryckskillnaden men redan vid 2000 Pa sker stora fuktförflyttningar i små håll.

Vattenövertyck och kapillärsugning är de två viktigaste drivkrafterna vid transport i vätskefas. För att de två transportsätten ska fungera krävs att materialet är i kontakt med fritt vatten. För att det ska kunna bli en kapillärsugande effekt behövs ett sammanhängande porsystem och att fukthalten i materialet är över den kritiska fukthalten. De mindre porerna har störst påverkan på den kapillärsugande effekten. [3]

3.2 Beräkning av fukt

Ett materials förmåga att transportera fukt i ångfas beskrivs av begreppet *ånggenomsläpplighet* (δ) [m^2/s]. Ånggenomsläppligheten uttrycks som:

$$\delta = D/\mu$$

$$D = \text{Transportkoefficient som vid } 20^\circ\text{C är } 25 \cdot 10^{-6} [\text{m}^2/\text{s}]$$

$$\mu = \text{diffusionsmotståndsfaktor [-]}$$

Man måste också ta hänsyn till ett materials kapillära sugförmåga om man ska få en korrekt bild av hur mycket fukt ett material kan transportera vid ett visst tillstånd. Den kapillära sugförmågan ökar generellt med högre fuktkvoter. Därför har man på senare år börjat använda sig av begreppet *fukttransportkoefficient* (δ) [m^2/s]. Det är ett värde som både tar hänsyn till kapillärsugning och diffusion.

På samma sätt har *ånggenomgångsmotstånd* (Z) [s/m] ersatts av *fuktmotstånd* (Z) [s/m]. [7]
Fukttransportkoefficienten och fuktmotståndet är inte konstanta utan beror av materialets relativa fuktighet. Fuktmotståndet definieras som:

$$Z = d/\delta$$

$$d = \text{skiktets tjocklek [d]}$$

Vid stationära förhållanden kan fuktflödet (g) [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$] genom ett materialskikt uttryckas som:

$$g = (v_1 - v_2) / Z$$

$$v_1 \text{ \& } v_2 = \text{ånghalterna på båda sidor om materialet.}$$

Om materialet har flera skikt adderas deras Z -värde, $Z_A + Z_B$ osv.

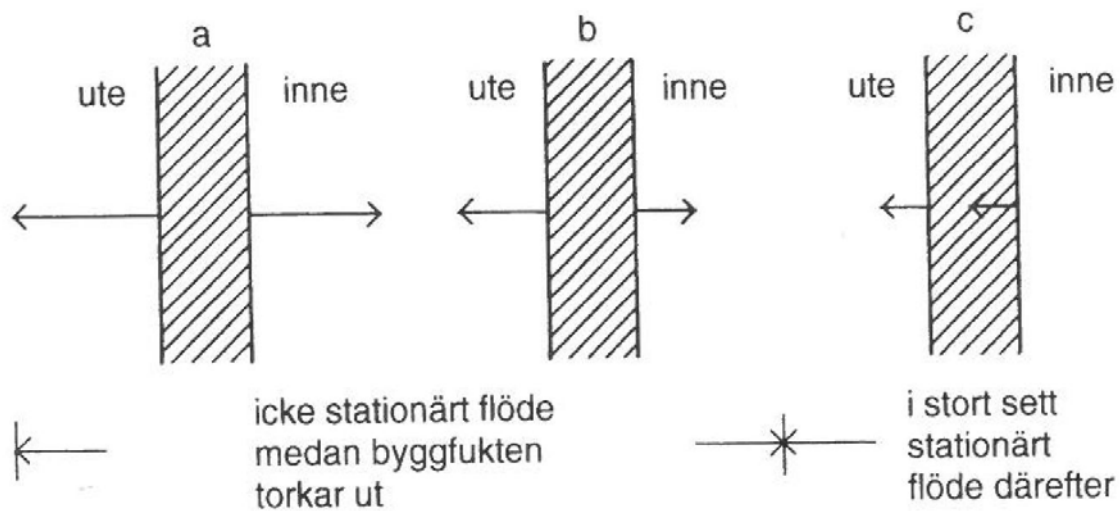
Fuktfördelning över konstruktioner med flera skikt, vid stationära förhållanden kan uttryckas med hjälp av fuktflödesekvationen:

$$g = (v_1 - v) / Z = (v_1 - v_2) / (Z_A + Z_B)$$

Vilket gör att man kan få ut ånghalten (v) mellan två skikt:

$$v = v_1 - ((Z_A / (Z_A + Z_B))(v_1 - v_2) \quad [4]$$

För icke stationära beräkningar måste man ta hänsyn till att fuktflödet i materialet ändras med tiden. Verkligheten är aldrig helt stationär men om förhållandena är någorlunda stabila kan man förenkla och räkna med stationärt flöde. En situation när man måste ta hänsyn till icke stationärt flöde är uttorkning av byggfukt. [3]



Figur 3.8. Stationärt och icke stationärt flöde.[3]

3.3 Mikroorganismer i byggnader

De mikroorganismer som kan växa på byggnadsmaterial är mögelsvampar, bakterier och jästsvampar. Mögelsvampar står för den största delen av angreppen och därför används mögel ibland som ett samlingsnamn för all mikrobiell påväxt på byggnadsmaterial.

Mögelsvampar sprider sig genom att de bildar sporer som sprids i luften. När sporen gror växer hyfer ut. Hyferna bildar med tiden ett nätverk som kallas mycel. I ett mycel bildas specialiserade strukturer som avger nya sporer. Sporer finns överallt i luften och på material men för att de skall kunna gro krävs speciella förhållanden.

Bakterier är encelliga och förökar sig genom celledelning. Jästsvampar knoppar av celler som bildar separata svampar efter hand som den växer. [8]

Förutsättningar för tillväxt

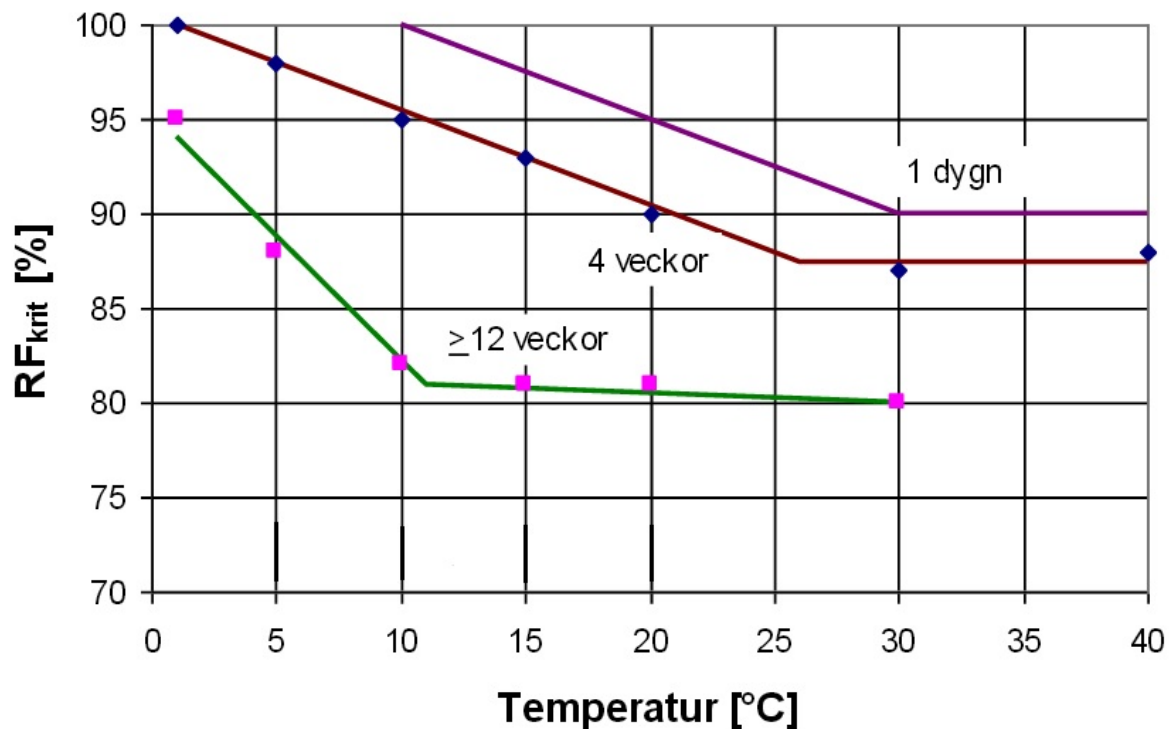
De faktorer som påverkar tillväxten av mikroorganismer är fukt, temperatur, pH, syretillgång och hur länge förutsättningarna varar. Mögelsvampar behöver också någon form av organiskt material att ta näring ifrån. Rätt pH och syretillgång finns i stort sett alltid i byggnader. Temperaturen inomhus är gynnsam för tillväxt, men i de yttre delarna av en konstruktion kan det vara för kallt för påväxt på vintern. [8]

Material som själva består av organiska material är mest utsatta men även andra material kan mögla. Det finns nästan alltid smuts, damm eller pollen som kan ge svampen näring. Det som oftast är avgörande för om påväxt sker är mängden fukt. Den lägsta fuktnivå som angrepp kan ske vid på ett specifikt material kallas kritiskt fukttillstånd. Se *tabell 3.1* [9]. Ett trämaterials kritiska fukttillstånd kan höjas genom tryckimpregnering eller genom tillsättning av fungicider (svampgift). Detta görs inte på trämaterial som skall användas inomhus på grund av hälsoriskerna det skulle medföra.

Tabell 3.1. Kritiskt fukttillstånd för olika materialgrupper. [9]

Materialgrupp	Kritiskt fukttillstånd (% RF)
Smutsade material	75-80
Trä och träbaserade material	75-80
Gipsskivor med papp	80-85
Mineralullsisolering	90-95
Cellplastisolering	90-95
Betong	90-95

Tiden är också en viktig faktor. Tiden från att rätt förutsättningar ges till att sporen gror kallas latenstid. *Figur 3.9* visar sambandet mellan RF, temperatur och tid för mögelpåväxt på trä. Om tillförseln av fukt stoppas innan påväxt stannar mögelutvecklingen. Mögel som redan bildats kan dock skapa problem även om tillväxten stoppats. Även om utvecklingen stoppas är materialet mer känsligt för mögelpåväxt om förutsättningarna återskapas.



Figur 3.9. Visar sambandet mellan kritisk RF, temperatur och tid för trämaterial. Bilden är kursmaterial från kursen HS1020 *Skademekanismer av fukt* med Anders Kumlin. I kursmaterialet hänvisas informationen i bilden till Viitanen (1996) och L-O Nilsson.

Olika arter av svampar och bakterier har olika kritiska fukttillstånd och latenstider. Kritiska fukttillstånd och latenstider för material är baserade på när de första svamparna och bakterierna börjar växa till. Högre fukttillstånd och längre exponeringstid gör att fler arter kan växa.

Effekter av mögel

Mögel orsakar både dålig lukt och hälsoproblem för de som vistas i angripna byggnader under lång tid. Mögel påverkar inte byggnadens hållfasthet som rötsvamp gör. Hälsoproblem kan orsakas både av direkt inandning av sporer och av de kemiska gaser som svamparna avger. Det är dessa gaser som i vissa fall luktar illa. Hälsoproblem som kopplas till mögel är allergiska reaktioner som rinnande näsa, kliande ögon och hosta. Även mer diffusa irritationssymptom som huvudvärk och extrem trötthet kan orsakas av mögel. [8]

3.4 Värme

Värmetransport i konstruktioner sker genom ledning, strålning eller konvektion. Transporten sker från delar med högre temperatur till delar med lägre temperatur. [10]

Värmeledning:

I homogena material sker värmeöverföringen helt genom ledning. I porösa material sker transporten även på andra sätt. Hur stor värmeledningen genom ett homogent material är beror på materialets värmekonduktivitet (λ) [W/mK], temperaturskillnaden över materialet (ΔT) [K] och materialets tjocklek i värmeströmmens riktning (d) [m]. För porösa material brukar man använda sig av ett så kallat *beräkningsvärde för värmekonduktivitet* (λ_{ber}) [W/mK], som tar hänsyn till bidragen från strålning och konvektion. Materialets värmeledningsförmåga är inte konstant utan beror av materialets fukttinnehåll och dess temperatur. Beroendet är dock ganska litet vid de temperaturer som är aktuella i byggnadstekniska sammanhang. Därför är det vanligt att man bortser från detta.

Vid stationära, endimensionella förhållanden beräknas värmeflödestätheten (q) [W/m²] enligt:

$$q = \lambda (\Delta T / d)$$

Flerdimensionella, icke stationära beräkningar är mycket mer komplicerade och görs ofta med hjälp av datorer.

Ett materials värmemotstånd (R) [m²K/W] definieras som:

$$R = d / \lambda$$

För att få det totala värmemotståndet i en flerskiktsskonstruktion summerar man R -värdena för samtliga skikt. Dessutom måste man lägga till ett värmeövergångsmotstånd för de ytor som är i kontakt med luft. För ytor som vetter mot inomhusförhållanden brukar man använda $R_{\text{si}} = 0,13$ [m²K/W] och för ytor som vetter mot utomhusförhållanden används $R_{\text{se}} = 0,04$ [m²K/W].

Värmegenomgångskoefficienten, det så kallade U -värdet (U) [W/m²K] definieras som inversen av värmemotståndet:

$$U = 1 / R$$

Värmeflödet (Q) [W] via ledning fås av genom att multiplicera U -värdet, temperaturskillnaden över materialet eller byggnadsdelen och den aktuella ytan:

$$Q = U \cdot \Delta T \cdot A$$

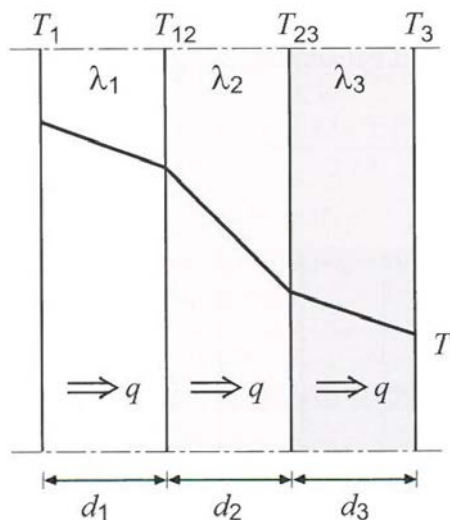
I en flerskiktsskonstruktion med olika värmemotstånd fördelar sig temperaturen i proportion till hur stort värmemotstånd respektive skikt har. Temperaturen på avståndet x från konstruktionens in- eller utsida fås av formeln. se figur 3.10 [10]

$$T_x = T \pm (R_x / R_{\text{tot}}) \cdot \Delta T$$

T = Temperaturen ute eller inne beroende på vilket håll man räknar ifrån

R_x = värmemotståndet för skikten till gränssytan på avståndet x

R_{tot} = Det totala värmemotståndet för konstruktionsdelen.



Figur 3.10 Temperaturfördelning och värmeflöde.[3]

Strålning

När två ytor har olika temperatur sker ett strålningsutbyte mellan dem. Summan av detta utbyte blir att den varmare ytan kyls av och den kallare ytan värms upp. Strålningsutbytet mellan ytor består av långvågig strålning, till skillnad från solstrålningen som är kortvågig.

Ytor som har ett strålningsutbyte med den kalla natthimlen kyls av. Om ytans temperatur sjunker under luftens daggpunkt bildas kondens eller frost. Det är förklaringen till att det ibland blir frost på bilens framruta men inte på dess sidorutor.

Strålning som träffar ett materials yta absorberas, reflekteras och transmittas i olika mängd beroende på ytans beskaffenhet. Fönsterglas, till exempel, transmittar solljus men inte värme-strålning. Det är det som gör att ett växthus kan fungera.[10]

Värmestrålningen (q) [W/m^2] från ett material uttrycks som:

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

ε = ytans emittans [-]

$\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} [\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4]$ (Stefan- Boltzmann's konstant)

T = temperaturen i Kelvin [K]

Konvektion

Konvektion av värme innebär att värme överförs från en del av en konstruktion eller ett material till en annan med hjälp av ett strömmande medium, t.ex. luft. Om luft rörelsen har naturliga orsaker brukar man tala om *naturlig konvektion* eller *egenkonvektion*. Om luft rörelsen drivs av en fläkt talar man istället om *påtvungad konvektion*.

Större delen av den värme som avges från en radiator sprids i rummet via konvektion. Luft strömmar förbi radiatoren, värms upp och sprider sig sedan i rummet.

Värme flödet (Q) [W] via konvektion beräknas med formeln:

$$Q = c \cdot \rho \cdot \Delta T \cdot q$$

c = luftens specifika värmekapacitet [Ws/kgK]

ρ = luftens densitet [kg/m^3]

ΔT = temperaturdifferensen [K]

q = luftflödet [m^3/s]

Luft rörelser drivs av skillnader i lufttryck. Luft vandrar från högre tryck till lägre. Skillnader i lufttryck i en byggnad skapas av:

- Skillnader i lufttemperatur – *termisk drivkraft*
- Vind som skapar övertryck och undertryck – *vindtryck som drivkraft*
- Fläktar i ventilationssystem – *mekanisk drivkraft*

Om drivkraften för luft rörelser påverkas av flera olika faktorer samtidigt är det summan av deltrycken som blir avgörande för luft rörelsen. [10]

3.5 Lättbetong

Benämningen lättbetong kan syfta på flera olika typer av material: Lättballastbetong, skumbetong eller autoklaverad lättbetong, även kallad gasbetong. Eftersom den sistnämnda typen är överlägset vanligast har det blivit kutym att bara säga lättbetong när man talar om autoklaverad lättbetong. Denna praxis har använts i det här arbetet.

Historia

Autoklaverad lättbetong kallades först gasbetong och utvecklades i Sverige på 20-talet. Det första fabrikatet kallades för "Ytong" och fördelarna med det nya materialet var de goda isoleringsegenskaperna, den låga densiteten och att blocken var lätta att mura. En del lättbetong, så kallad "blåbetong", tillverkades av bränd kalk och alunskiffer. Den visade sig avge radon och slutade tillverkas på 70-talet.

Tillverkning

De största beståndsdelarna i autoklaverad lättbetong är kalk, cement och finmalt kiselsyrahaltigt material. Det sistnämnda kan vara kvartssand eller sandsten. Även gips ingår hos vissa tillverkare. I viktprocent är de ingående materialens fördelning ungefär: [11]

- Sand, 50-70 %
- Cement, 15-30 %
- Kalk, 15-30 %
- Gips, 3-7 %

Kalk och cement fungerar som bindemedel. Basråvarorna blandas med vatten till något som liknar välling i konsistensen. Sedan tillsätts aluminiumpulver och tillsatsmedel. Aluminiumpulvret är jäsningssmedel och tillsatserna ska förbättra den färdiga produktens egenskaper. [12]

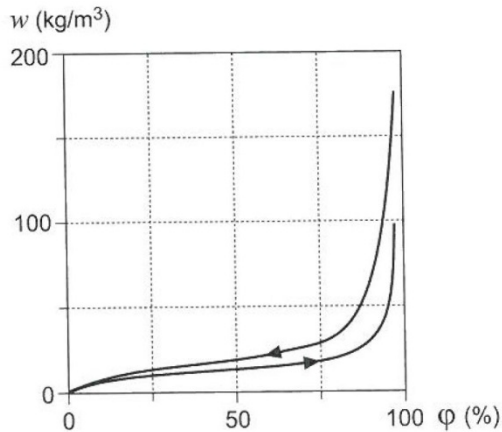
Massan hålls i formar, jäser och stelnar. Om elementen ska armeras appliceras stängerna i formen. Vid jäsningen avgår vätgas som bildar bubblor och gör materialet poröst. Vid lagom styvhet sågas elementen till rätt dimensioner med hjälp av ståltråd. Därefter härdas elementen i autoklaver i 10-12 timmar. Temperaturen brukar ligga runt 180°C och trycket 8-10 atm. [13] Vattenånga och högt tryck skapar kemiska processer som ger lättbetongen dess tryckhållfasthet och formstyvhet.

Efter autoklaveringen packas produkterna och levereras till lager eller direkt till byggplatserna. [12]

Materialegenskaper med hänsyn till värme och fukt

Hur mycket luft som kan passera genom lättbetongen genom konvektion är helt beroende av hur fogarna mellan elementen utförs. Själva lättbetongens luftgenomsläpplighet är försumbar. [12]

Fuktmotståndet och fukttransportkoefficienten är beroende av fukttinnehållet. Fukttransportkoefficienten är praktiskt taget konstant för låga relativa fuktigheter men när man närmar sig 100 % RF ökar den kraftigt. Lättbetong kan således transportera mycket mer vatten när materialet har högt vatteninnehåll. Detta kan ses i sorptionskurvan i *figur 3.11*. [3]



Figur 3.11. Sorptionskurva lättbetong.

Lättbetong levereras med en fuktkvot på runt 30-35 %. Det motsvarar ett fukttinnehåll på 150-200 kg/m³. Under byggskedet är det inte ovanligt att materialet dessutom utsätts för regn och fuktas upp ytterligare. Sedan ska materialet torkas tills det är i jämvikt med omgivningen. Det motsvarar en fuktkvot på 3-8%.

Densiteten för torr lättbetong är 400-600 kg/m³ [13]. Ju lägre densiteten är, desto bättre värmeisolerande förmåga har lättbetongen. Hållfastheten blir dock sämre med lägre densitet. Materialets värmekonduktivitet (λ) [W/mK] ligger runt 0,1-0,17. [3]

3.6 WUFI Pro 5.3

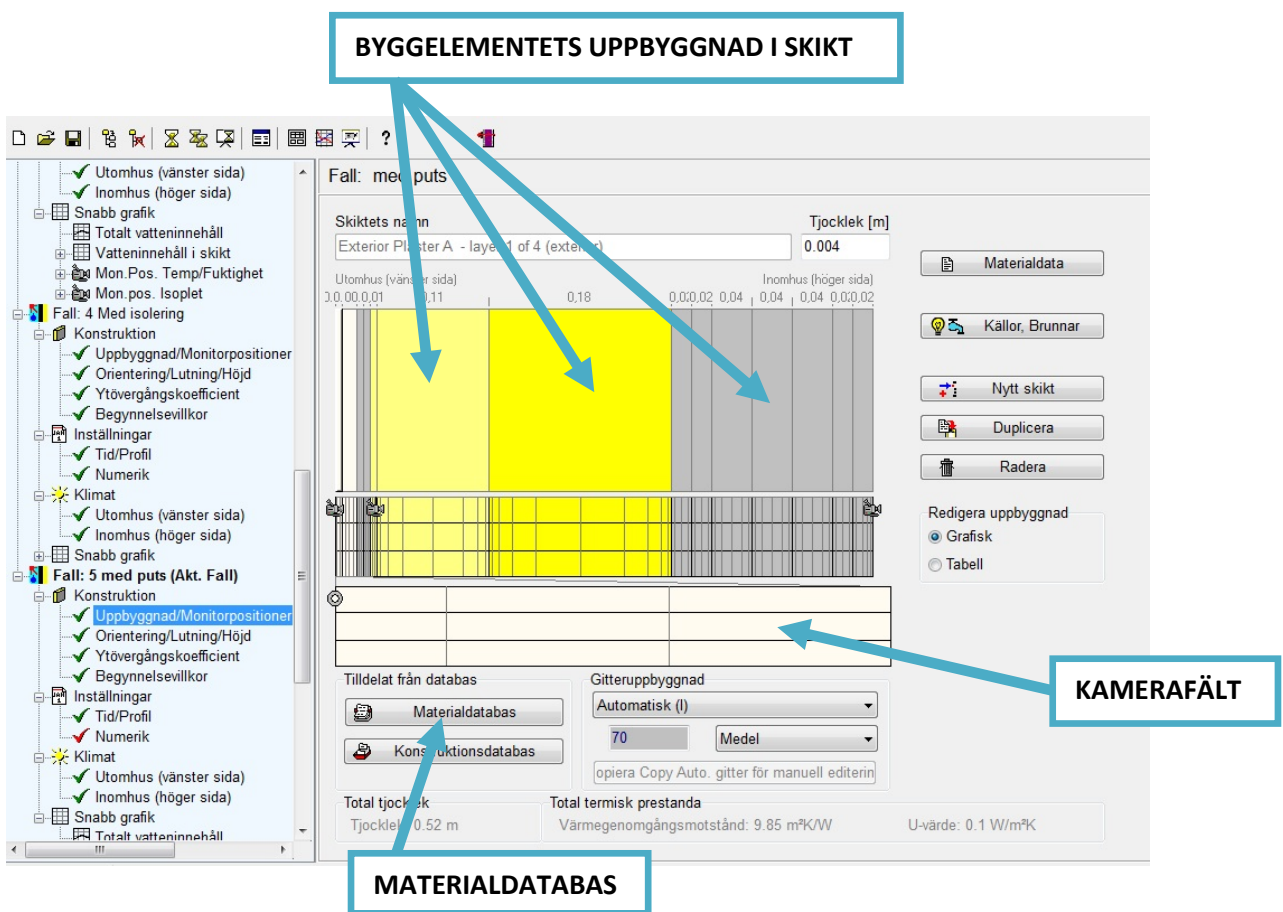
WUFI står för *Wärme und Feuchte instationär*, vilket är tyska och betyder ungefär "icke stationär värme och fukt". Det är ett menybaserat fuktberäkningsprogram som har utvecklats av *Fraunhofer Institute for Building Physics*. Programmet ger möjligheten till snabba, realistiska fuktberäkningar vid föränderliga förhållanden. WUFI finns i både en endimensionell version och en tvådimensionell version. I 2D kan man ta hänsyn till inhomogena materialskikt och konstruktionsdetaljer som stålpelare och fönster. [14]

När en WUFI-beräkning ska genomföras kommer man först till fliken *Projekt* där man kan skriva in projektuppgifter om det är ett verkligt projekt man jobbar med. Sedan startas automatiskt ett "fall 1" som blir det aktuella fallet man vill undersöka. Det finns möjlighet att döpa fallet och lägga till så många fall man behöver.

Under "fallfliken" skapas 3 underflikar som benämns *konstruktion*, *inställningar* och *klimat* som i sin tur har underflikar. Under fliken konstruktion finns flikarna *Uppbyggnad/Monitorpositioner*, *Orientering/Lutning/Höjd*, *Ytövergångskoefficient* och *Begynnelsevillkor*.

Uppbyggnad/Monitorpositioner:

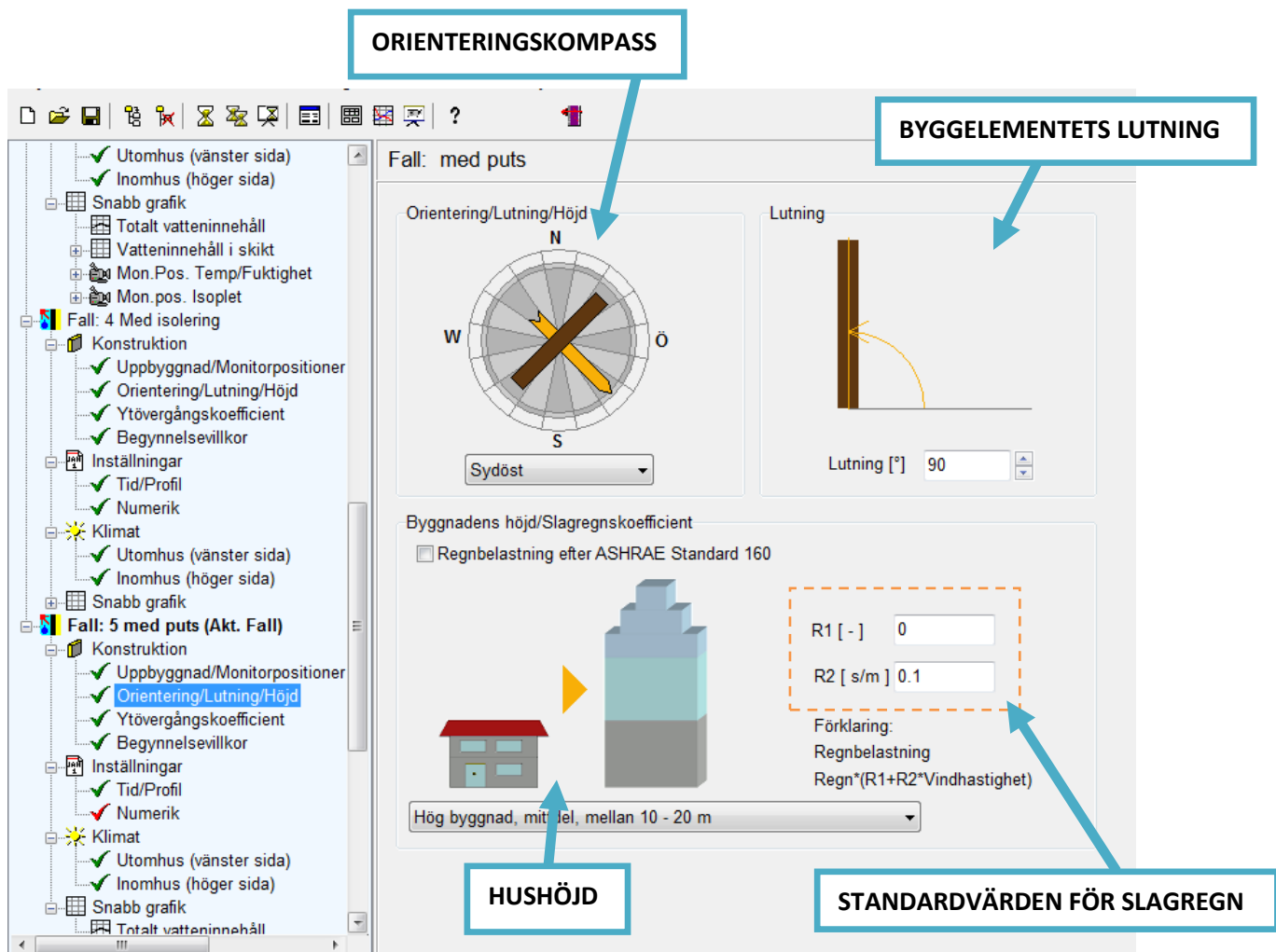
Under *Uppbyggnad/Monitorpositioner* specificerar man den aktuella konstruktionens delar i form av skikt. Man definierar skiktets tjocklek och ger skikten materialdata. Antingen skriver man in materialdata manuellt eller så väljer man material som finns inlagda i programmet. Man kan också ändra i de befintliga materialen. Under fliken finns också ett "kamerafält" där man kan välja att titta extra noga i en specifik del av konstruktionen. Där man sätter en "kamera" får man fram en graf som visar den relativa fuktigheten just där, under det tidsspänn beräkningen gäller för. Man får också en graf som visar daggpunkt och temperatur som en funktion av tiden. Se *figur 3.12*.



Figur 3.12. Fliken Uppbyggnad/Monitorpositionering.

Orientering/Lutning/Höjd:

Under fliken *Orientering/Lutning/Höjd* ställer man in elementets lutning, orientering, höjd och ingångsvärden för slagregn. En vägg har exempelvis 90 graders lutning medan platta på mark har 0 grader. Orienteringsriktning ställs in med hjälp av en kompassnål. Höjden på huset och orienteringen avgör hur mycket slagregn konstruktionen kommer att utsättas för. Programmet är förinställt med inställningar för slagregn men man kan även ställa in regnbelastningen manuellt. Se *figur 3.13*



Figur 3.13. Fliken *Orientering/Lutning/Höjd*.

Ytövergångskoefficient:

Under fliken *Ytövergångskoefficient* ställer man in elementets ytegenskaper. Man kan till exempel ge ytorna ett S_d -värde [m]. S_d -värdet är ett sätt att uttrycka ånggenomgångsmotstånd. Ett S_d -värde på 1 meter betyder att materialet har samma ånggenomgångsmotstånd som 1 meter stillastående luft.

Man kan också ställa in ytans värmemotstånd, om värmemotståndet skall vara vindberoende, ytans strålningsegenskaper och hur bra den absorberar regnvatten.

Begynnelsevillkor:

Under den sista fliken i konstruktionsdelen, *Begynnelsevillkor*, anger man hur mycket vatten de olika delarna i konstruktionen innehåller när simuleringen börjar. Antingen kan man använda ett typiskt värde för byggfukt eller skriva in exakt det värde man vill använda i simuleringen. Se *figur 3.14*.

VATTENINNEHÅLL I ELEMENTETS OLIKA SKIKT

Fall: med puts

Begynnelsefuktighet i byggnadsdel

☐ Medelvärde över byggnadsdel

☒ I varje skikt

☐ Läs från fil

Begynnelsefukt i byggnadsdel

☒ Medelvärde över byggnadsdel

☐ Läs från fil

Ange typiskt värde för byggfukt

Begynnelsefukt i byggnadsdel [°C] 20

Begynnelsefukthalt i olika skikt

Nr.	Material Skikt	Tjocklek [m]	Vatten innehåll [kg/m³]
1	Exterior Plaster A - layer 1 of 4 (exterior)	0.004	192.0
2	Exterior Plaster A - layer 3 of 4	0.014	160.0
3	Exterior Plaster A - layer 2 of 4	0.001	192.0
4	Exterior Plaster A - layer 4 of 4 (interior)	0.001	160.0
5	ISOVER INTEGRA AP Supra - 035	0.01	0.76
6	ISOVER INTEGRA AP Supra - 035	0.11	0.67
7	EPS (heat cond.: 0.04 W/mK - density: 30kg/m³)	0.18	2.39
8	Aerated Concrete (density: 400 kg/m³)	0.02	102.38
9	Aerated Concrete (density: 400 kg/m³)	0.02	100.64
10	Aerated Concrete (density: 400 kg/m³)	0.04	93.36
11	Aerated Concrete (density: 400 kg/m³)	0.04	75.81
12	Aerated Concrete (density: 400 kg/m³)	0.04	49.01

Figur 3.14. Fliken Begynnelsevillkor.

Tid/Profil och Numerik:

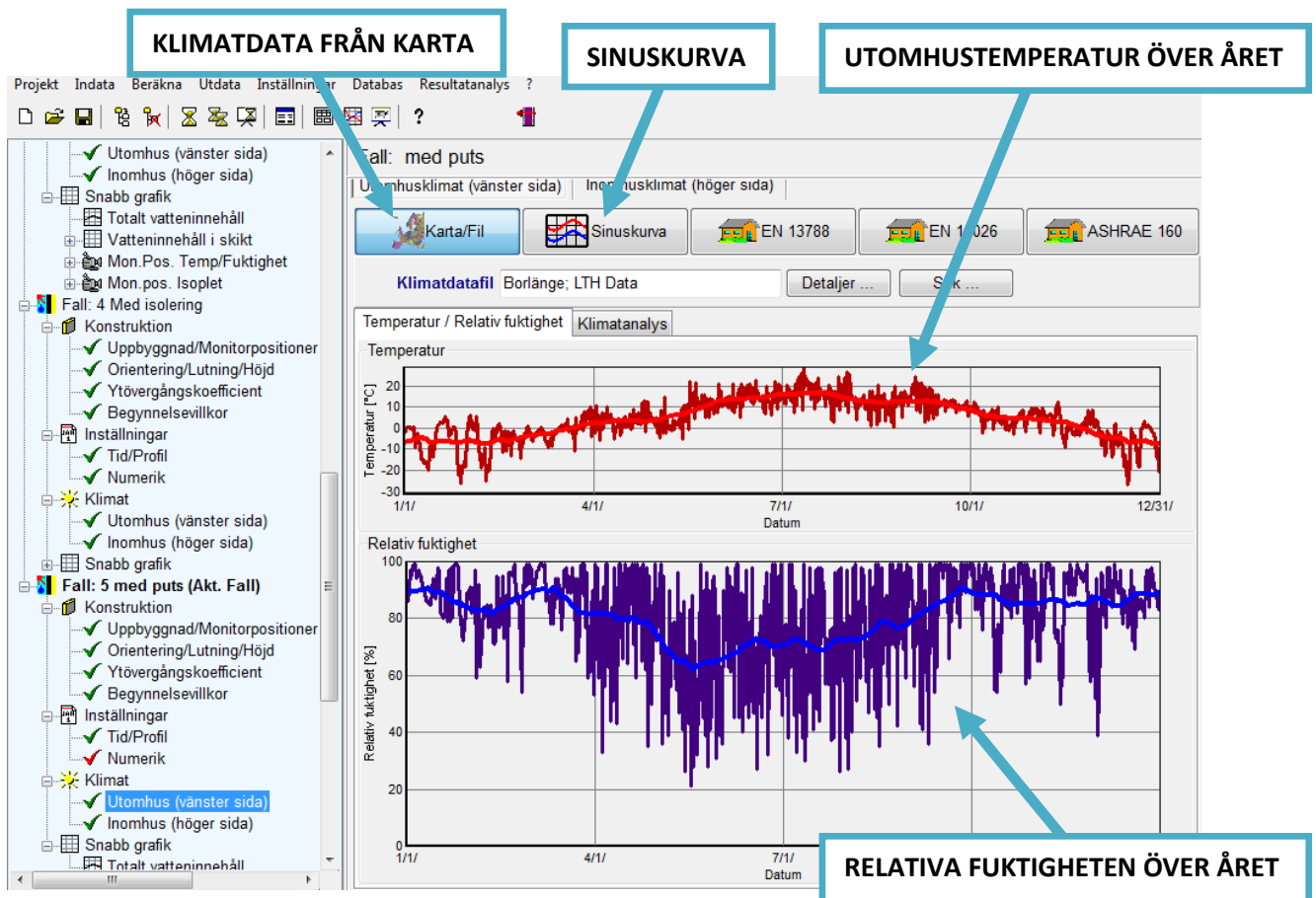
I kategorin *Inställningar* finns två flikar som heter *Tid/Profil* och *Numerik*.

Under *Tid/Profil* Ställer man in tiden för simuleringen i timmar. Under fliken *Numerik* ställer man in beräkningstyp (fukttransport, värmetransport), hygrotermiska specialinställningar, numeriska parametrar, adaptiv tidsinställning och geometri.

Utomhus- och inomhusklimat:

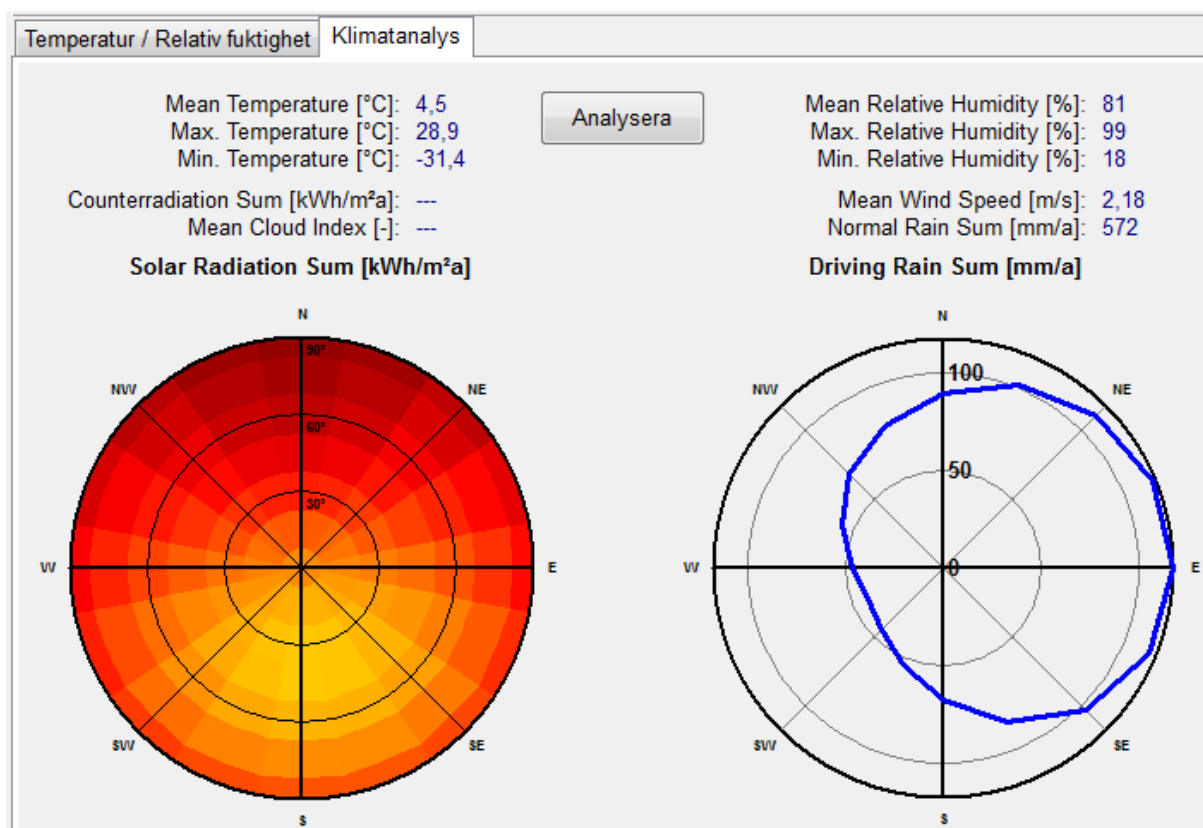
I kategorin *Klimat* finns två flikar en som behandlar utomhusklimat och en för inomhusklimat. Utomhusklimat kan väljas från en karta. I programmet finns mätdata från olika platser i Europa. Mätdata består av relativa fuktighetens och temperatures variationer över året på den aktuella platsen. Nederbörd baserat på verkliga mätningar ingår också i klimatet.

Vill man simulera utomhusklimat utan nederbörd kan man välja klimat baserat på en sinuskurva. Man anger då medeltemperatur och amplitud, samt den varmaste dagen på året. Man anger också medelvärdet för den relativa fuktigheten, amplituden och den dag på året då RF är som högst. Se *figur 3.15*.



Figur 3.15. Klimatinställningar utomhus.

Under *utomhusklimat* finns en flik som heter *klimatanalys*. Här analyseras klimatet för att se vilken riktning det mesta slagregnet och den mesta solinstrålningen kommer ifrån. Se *figur 3.16*.

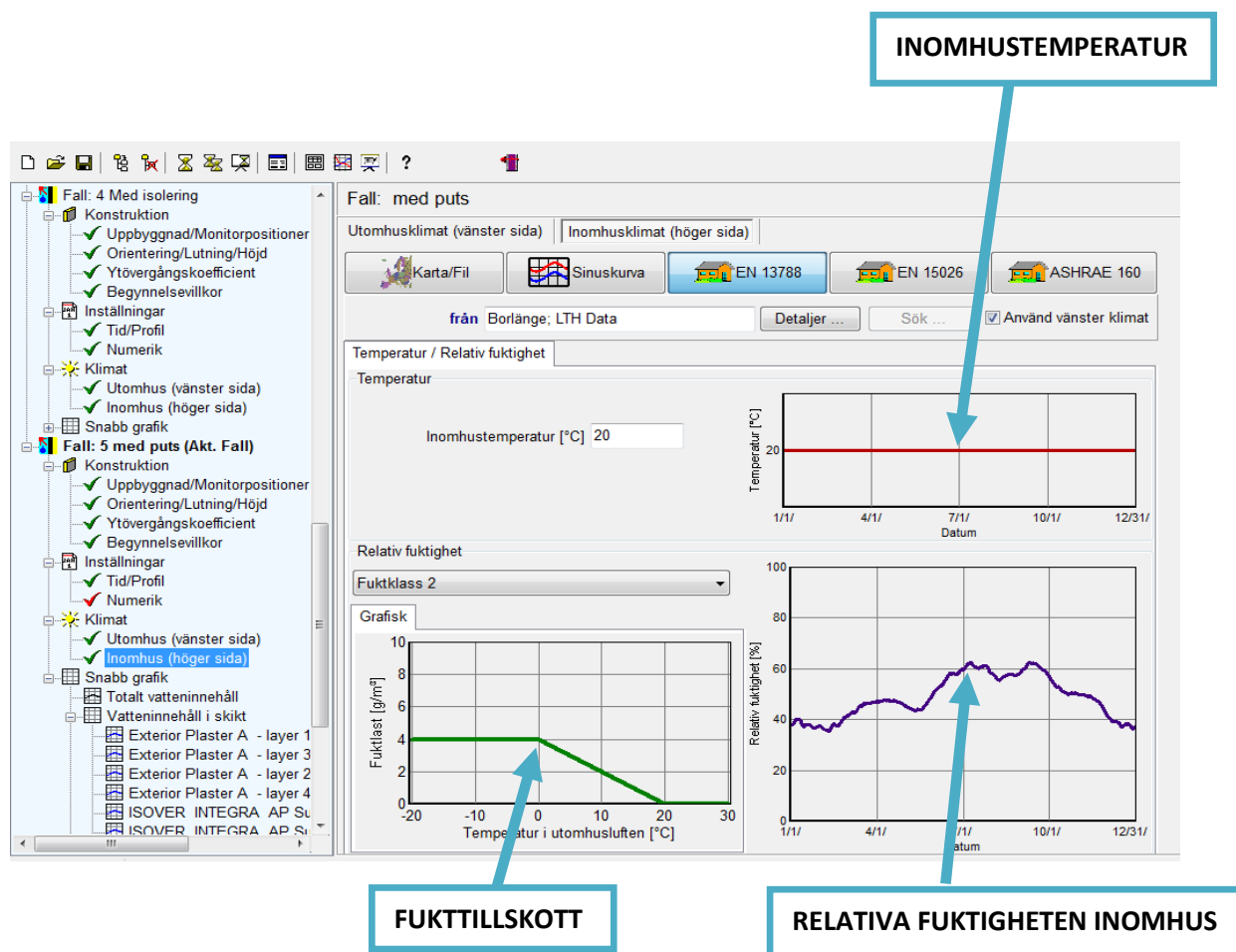


Figur 3.16. WUFI klimatanalys används för att hitta den riktning som ger den maximala solinstrålningen och det maximala slagregnet.

Under fliken *Inomhusklimat* (höger sida) väljer man klimatet på "höger sida" om konstruktionen, oftast ett inomhusklimat. Väljer man *EN 13788* får man en konstant inomhustemperatur under hela året, vilket i verkligheten skulle innebära värmning av inneluften på vintern och kylning på sommaren. I *EN 13788* kan man ställa in fuktklass, vilket påverkar RF inomhus och fuktlasten. Fuktklass är en klassning som indikerar hur mycket fukt som kommer att avges från människor och maskiner till inomhusluften. Fuktlasten avtar ju varmare det är ute. Det beror på att vi tenderar att öppna fönstren mer ju varmare det är och då reduceras fukttillskottet. Man kan också definiera ett inomhusklimat manuellt. Se *figur 3.17*.

Väljer man *EN 15026* så får man en inomhustemperatur som ligger på 20°C på vintern men som ökar något på sommaren. För en byggnad utan kylning är detta mer realistiskt än att inomhustemperaturen skulle vara konstant över året. I *EN 15026* kan man välja mellan normal och hög fuktbelastning.

Väljer man inomhusklimat *ASHRAE 160* kan man simulera att man har en klimatanläggning i byggnaden. Man kan välja vilken typ av anläggning, vilken fuktproduktion man vill ha i simuleringen och hur stor ventilation man har.



Figur 3.17. WUFI klimat inställningar inomhus.

3.7 WUFI-Bio 3.1

WUFI-Bio är en insticksmodul till WUFI. Den hjälper användaren att bedöma risken för mögel i den konstruktion man tittat på i WUFI. De indata som behövs i WUFI-Bio är initial RF i mögelsporerna, substratklass och klimatdata. Substrat är det underlag som den mikrobiella påväxten sker på, det vill säga vilket material man vill undersöka. Klimatdata exporteras direkt från WUFI- filen.

Resultaten visas som vatteninnehåll i sporen i förhållande till hur mycket vatten den behöver för att växa, mögelväxt och mögelindex. Mögelindex är en 6-gradig skala som används för att visa hur stor del av en yta som är täckt av mögel. 0 betyder ingen mögelväxt och 6 motsvarar 100 % av ytan täckt av mögelväxt.

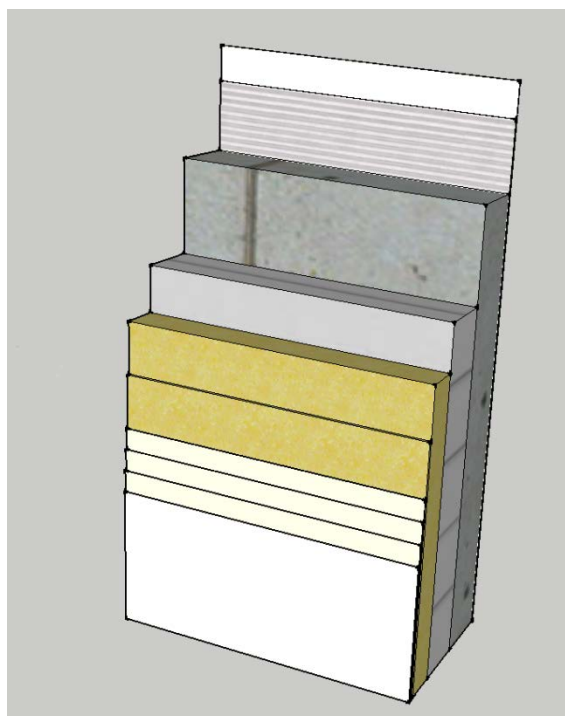
En "trafiksinal" visar rött, gult eller grönt beroende på resultatet. Grönt betyder att konstruktionen fungerar medan rött betyder risk för mögel. Gult är ett mellanläge. [15]

4. Genomförande

4.1 Uppbyggnad av väggen i WUFI:

Referensobjektet Sundsbro är precis färdigställt i Bollnäs. Vägguppgbyggnaden i referensobjektet sett inifrån:

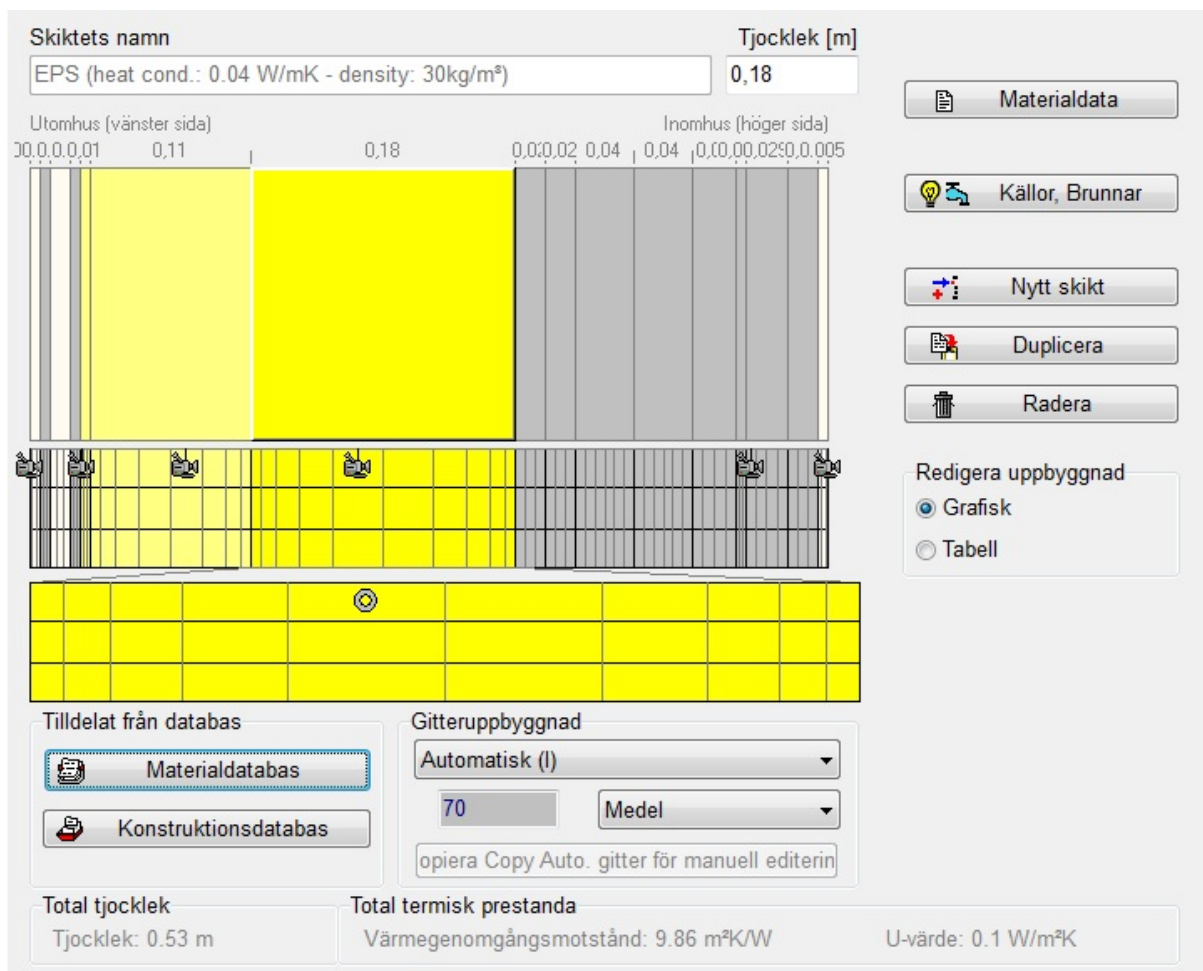
- KC-baserad tunnputs
- Lättbetong 200 mm, *H+H multiplattan 425*
- Expanderad cellplast 180 mm, *weber.therm 399 EPS SKIVA*
- Mineralull 120 mm, *weber.therm 398 MW- skiva*
- Puts 10 mm, *weber.therm 261 putsbruk EF*
- Ytputs, *primasil fasadfärg*



Figur 4.1. Väggens uppbyggnad sett utifrån. Bilden är gjord av Sebastian Jansson.

I WUFI användes material från de materialdatabaser som finns i programmet. De material som användes i WUFI var material som bedömdes ha liknande egenskaper som de verkliga materialen. I vissa fall har materialen som valdes i WUFI modifierats för att dess egenskaper mer ska likna egenskaperna som de material som finns i referensobjektet har.

Ytterputsens har tagits från IBP Fraunhofers materialdatabas i WUFI. Den kallas *Exterior Plaster A* och består av 4 lager som tillsammans har tjockleken 20 mm. Putsens diffusionsmotstånd modifierades och gavs de värden som putsen har i referensobjektet. Yttersta skiktet har diffusionsmotståndet 3 och övriga skikt 20. I referensobjektet är putsen ca 10 mm tjock. Därför minskades det tredje skiktets tjocklek från 14 till 4 mm. Begynnelsefukthalten i de tre innersta skikten sattes till 200 kg/m^3 eftersom det antogs vara ett normalt värde för puts.



Figur 4.2. Referensväggens uppbyggnad i WUFI.

Mineralullen delades in i två skikt. Ett tunt skikt längst ut för att kunna se den eventuella fukt som kondenserar mot insida puts och resten av mineralullen i det andra skiktet. Som material i WUFI valdes *ISOVER INTEGRA AP Supra – 035*. Cellplasten delades inte upp då det inte bedömdes som nödvändigt. I WUFI valdes materialet *EPS* med densiteten 15 kg/m^3 eftersom det materialet har samma diffusionsmotstånd som den cellplast som använts i referensobjektet.

Lättnbetongen delades upp i 8 skikt för att få en realistisk fuktprofil och för att kunna följa uttorkningen på olika djup i materialet. I WUFI användes *Aerated Concrete* med densiteten 400 kg/m^3 . Innerputsens simulerades som ett lager av materialet *Cement Lime Plaster*.

Murbruket mellan lättnbetongelementen och skarvar mellan isoleringselement tas inte hänsyn till i beräkningarna.

4.2 Skeden och inställningar:

Först simulerades referensväggen med vad som antogs vara normala uttorkningsförutsättningar. Det innebär att uppvärmning av huset började när tak och väggar hade kopplats ihop. Inomhusklimatet antogs till 20°C. I verkligheten torkades lättbetongen med luftavfuktare och högre temperatur. I kapitel 5.2 redovisas hur simuleringen av väggen med normal uttorkning gjordes. Hur simuleringen av fuktutvecklingen i det verkliga fallet gjordes redovisas i kapitel 5.3.

Fasadmontörens checklista för när respektive del blev färdig gjordes tillgänglig av Johan Wall på Ängabyggen. Dessa datum användes för att simulera väggens fuktutveckling från leverans av byggmaterial till färdig konstruktion. Sedan simulerades väggens fuktutveckling under de fem första åren.

Lättbetongen levereras som block som sedan muras upp. Blocken kommer till byggarbetsplatsen på inplastade pallar. På grund av inplastningen räknades inte med någon uttorkning eller uppfuktning innan uppmurningen.

För varje skikt som monteras förändras förutsättningen för fuktvandring. Därför delades simuleringen upp i fem olika skeden. Tidsuppgifterna är en uppskattning av hur länge ett genomsnittligt lättbetongblock befann sig i en viss situation. För en översikt av skedena i simulering med normal uttorkning, se *sida 8 i bilagor*.

I skede ett simulerades uppmurnning av lättbetongen utan regnskydd under 2,5 månader, från 5:e februari till 20:e april 2013. Klimatdata från Borlänge, som är den närmaste orten som finns i WUFI:s klimatdatabas, användes som utomhusklimat. På insidan valdes en sinuskurva som skall simulera utomhusklimat utan regn. Amplitud och medelvärde togs från klimatdata från Söderhamn i *Fukthandboken* [3]. Orientering valdes till den riktning som ger mest slagregn. Efter klimatanalys i WUFI valdes östlig riktning. Begynnelsefukthalten i lättbetongen sattes till 145 kg/m³ utifrån information från leverantörens hemsida. För alla indata, se bilagor. De fukttinnehåll i varje skikt som erhöles efter simulering i ett skede användes som begynnelsevillkor i nästa skede.

När uppmurningen var klar sattes väderskydd upp inför montering av isoleringsmaterial. I skede två simulerades därför ett utomhusklimat utan regn och solinstrålning på utsidan. Inomhus simulerades fortfarande ett utomhusklimat utan regn. Dessa förutsättningar simulerades från 21:e april till 1:a juni 2013. För alla indata se bilagor.

I skede tre hade isoleringen monterats. Detta skede antogs vara från 2:a juni till 2:a juli 2013. För alla indata se bilagor.

Nästa förändring var att puts applicerades på insida vägg och att byggnaden började värmas. Enligt uppgift från entreprenör var huset tätt den 2:a juli och började därefter värmas. Enligt leverantören skall lättbetongen torkas till 15 % fuktkvot på femtio millimeters djup innan något får sättas upp på insida vägg. I simuleringen nåddes den nivån i mitten av juni men antagandet att man ville ha huset tätt innan man applicerade puts på insidan gjordes. Skede 4 var alltså skedet från det att innerputs och värme kommit på till att ytterputsen var på plats. Som inneklimate valdes då 20°C och fuktklass 3. Betongbjälklag och lättbetongväggar antogs fukta upp inneluften, vilket motiverade en hög fuktklass. Fuktklass 3 innebär ett fukttillskott på 6 g/m³ vid utomhustemperatur under 0°C. Denna simulering kördes från den 3:e juli till den 1:a november. För alla indata, se bilagor.

Klimatskalet antas ha varit färdigt i november 2013 och då togs väderskyddet bort. I skede fem simuleras väggens fukttillstånd fem år framåt i tiden, från den 2:a november 2013 till den 2:a november 2018. I detta skede antogs fuktklass 2 inomhus. För alla indata, se bilagor.

4.3 Modifikationer:

I studien har ett antal modifikationer gjorts i simuleringen av referensobjektet vid normala uttorkningsförhållanden för att se vilken effekt det ger på konstruktionens fuktfunktion.

Det som har testats är:

- Bara mineralull
- Bara cellplast
- Tätare cellplast
- Ökad mängd byggfukt
- Minskad mängd byggfukt
- Tätare fasadputs
- Tätskikt på insida vägg
- Maximal solinstrålning

Justering av isoleringens diffusionsmotstånd:

Att byta cellplasten mot mineralull är att ta bort motståndet mot uttorkning utåt. Att öka cellplastens täthet ger motsatt effekt. Motståndet mot uttorkning utåt ökar. Simuleringen med bara mineralull är till för att visa vad som händer om man tar bort cellplasten helt. Två simuleringar med tätare cellplast har genomförts. I båda har EPS med densitet 30 kg/m³ använts som material i WUFI. I den ena har diffusionsmotståndet satts till 50 och i den andra till 100, att jämföras med 30 som det var i referensväggen. Två simuleringar där mineralullen byts ut mot cellplast med diffusionsmotstånd 30 och 100 har också gjorts.

Skede ett och skede två från referenskonstruktionen påverkades inte av att isoleringen modifierades. Simuleringarna började därför i skede 3. De nya resultaten i skede 3 blev ingångsvärden i skede 4 osv. För alla indata, se bilagor.

Mer byggfukt:

I referensobjektet har man använt sig av en lättbetong med låg densitet och förhållandevis lite byggfukt. Det finns lättbetong som innehåller mer fukt vid leverans och dessutom skulle materialet kunna fuktas upp under uppmurning om det regnar mycket vid just den tidpunkten. Därför har en simulering med mer byggfukt gjorts. I Simuleringen antogs att lättbetongen inte började torka förrän konstruktionen var färdig. Beräkningen började i skede 5 men istället för resultaten från skede 4 sattes begynnelsefukthalten i lättbetongen till 145 kg/m³. För alla indata, se bilagor.

Mindre byggfukt:

Lättbetongen skulle kunna torkas innan den byggs in. Flera simuleringar med ett lägre begynnelsevärde på fuktmängden i lättbetongen har gjorts. Resultaten skall visa vilken som är den maximala inbyggnadsfukthalt som kan användas utan risk för fuktproblem vid normala uttorkningsförhållanden. Simuleringarna har gjorts på samma sätt som simuleringen av referensväggen med normal uttorkning. Det enda som har varierats är begynnelsefukthalten i lättbetongen i skede 1. De begynnelsefukthalter som testats är 125 kg/m^3 , 105 kg/m^3 , 80 kg/m^3 och 55 kg/m^3 .

Tätare fasadputs:

Många av de enstegstätade fasader som har givit fuktproblem har haft en relativt tunn och tät puts som stänger inne fukt. Därför var det intressant att se vad som hände med väggens fuktfunktion med en tätare puts. Putsen på byggnaden i Hälsingland är tunn men genomsläpplig. Putsen modifierades genom att ändra dess diffusionsmotstånd från 20 till 1000, vilket motsvarar 1 meter stillastående luft. Det är ett normalt värde för akrylbaserad puts enligt WUFI. Simuleringen omfattade bara skede 5. För alla indata, se bilagor.

Tätskikt på insida vägg:

Enligt den allmänna rekommendationen från lättbetongleveratören skall man kunna måla och tapetsera vid 15 % fuktkvot på 50 millimeters djup, sett inifrån. Därför var det intressant att se vad som händer om det man sätter upp är diffusionstätt. När det står att man kan tapetsera och måla är det lätt att tro att det gäller alla typer av tapeter och färger. Även sådana som släpper igenom mycket lite fukt, till exempel vinyltapeter. Ett tätt skikt simulerades i WUFI med hjälp av en ångspärr. Den ångspärr som valdes i WUFI var *vapour barrier* ($sd=1500$).

Vid simulering noterades att sorptionskurvan för lättbetongen behövde justeras för att mer likna uttorkningskurvan i det verkliga materialet. Detta gjordes för simuleringen för tätskikt på insidan, men inte i övriga simuleringar eftersom små variationer i sorptionskurvan inte bedömdes ha någon stor effekt på dessa.

Eftersom lättbetongen ändrats kördes simuleringen från skede 1 och framåt. Vid 15 % fuktkvot på 50 millimeters djup applicerades först innerputs och en vecka senare ett tätskikt. För fullständiga uppgifter om tider och skeden, se bilagor.

Maximal solinstrålning:

Solinstrålning gör att det torkar snabbt på ytan, men driver också fukt inåt i konstruktionen. Därför kördes alla simuleringar ytterligare en gång med väggen orienterad i den riktning som gav den maximala solinstrålningen. Klimatanalys av det valda klimatet från Borlänge gjordes. Den riktning som gav störst solinstrålning var mot söder. För alla indata, se bilagor.

4.4 Simulering av verkligt fall med extra uttorkning

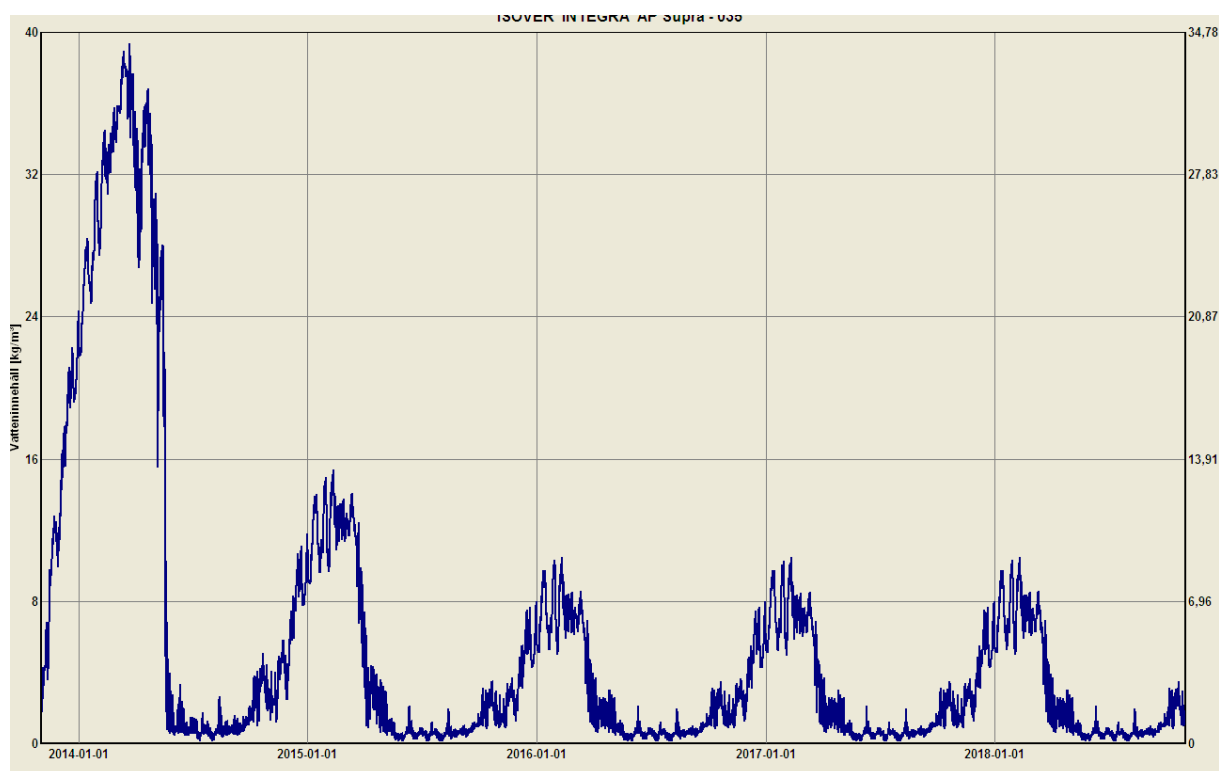
I det verkliga fallet följdes rådet att lättbetongen skulle torkas ned till 90 % RF på 150 millimeters djup innan den första vintern. Detta uppnåddes genom användning av luftavfuktare och hög inomhustemperatur. Som högst var inomhustemperaturen 27 °C enligt ansvarig för uttorkningen. I januari 2014 hade målet uppnåtts.

Simuleringen av referensväggens verkliga fuktutveckling kördes från den 1:a januari 2014 till den 1:a januari 2019. 90 % RF i lättbetongen motsvarar ett vatteninnehåll på ca 16 kg/m³. I simuleringen gavs alla lättbetongskikt detta som begynnelsevärde. Mineralullen och cellplasten fick realistiska ingångsvärden baserat de värden som har fåtts innan putsning vid tidigare simuleringar. Övriga inställningar var samma som i simuleringen av normal uttorkning. För alla indata, se bilagor.

5. Resultat och Analys

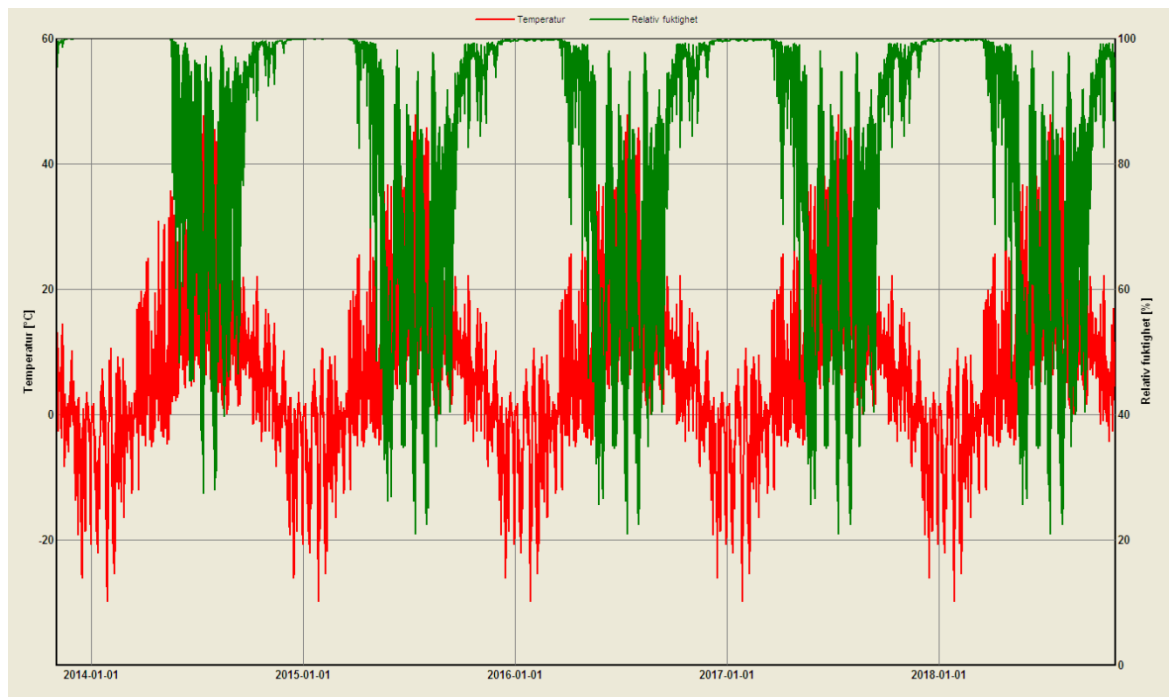
5.1 Simulering av väggen vid normal uttorkning:

I simuleringen av fuktutvecklingen i väggen vid antagen normal uttorkning tar det runt ett år innan lättbetongen står i jämvikt med omgivningen. Större delen av byggfukten torkar inåt och förs ut ur byggnaden via ventilationen. Men en del av byggfukten vandrar utåt i väggen under första vintern och kondenserar längst ut i mineralullen, på insidan av putsfasaden. Vatteninnehållet i det yttersta mineralullsskiktet når upp till 39 kg/m^3 . Eftersom skiktet är 1 cm tjockt så motsvarar det 3,9 dl vatten per kvadratmeter vägg, varav det mesta kommer att falla ut som kondens. Se *figur 5.1*.



Figur 5.1. Bilden visar fuktmängden [kg/m^3] som funktion av tiden i det yttersta skiktet av mineralullen vid normala uttorkningsförhållanden.

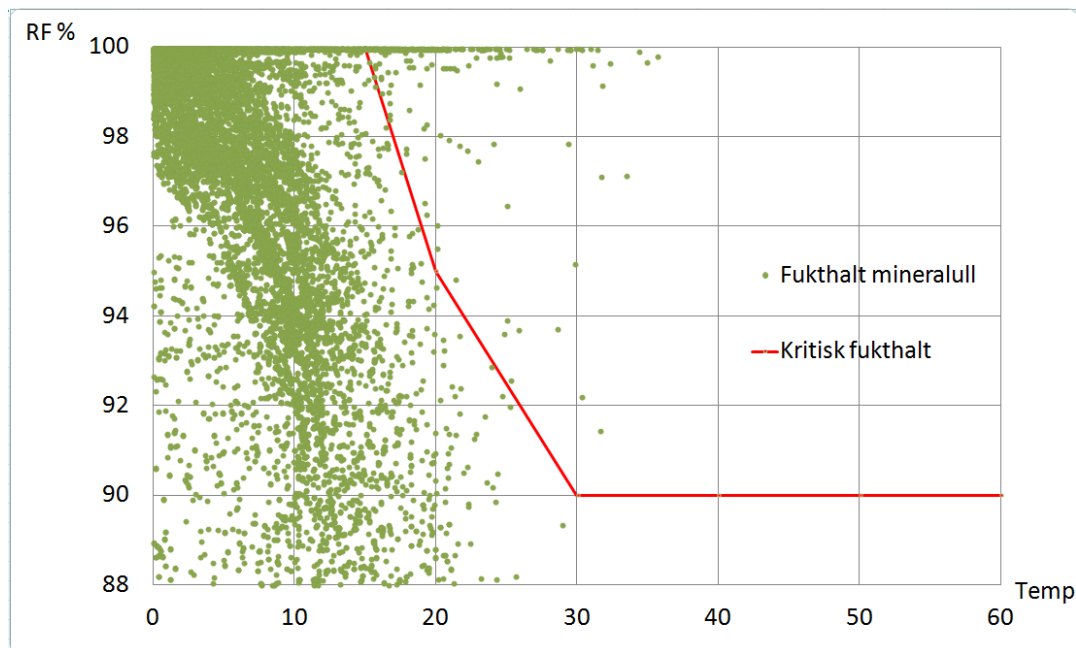
Den relativa fuktigheten längst ut i väggen ligger över 100 % de två första vintrarna, vilket innebär kondens, och nära 100 % även efter att jämvikt har uppnåtts. Den relativa fuktigheten i hela mineralullsskiktet når upp till 90 % varje vinter även efter att byggfukten är borta. Se *figur 5.2*.



Figur 5.2. Bilden visar den relativa fuktigheten över tid i grönt och temperaturen i °C i rött.

Mineralull är inte speciellt känsligt för mikrobiell tillväxt, men vid en relativ fuktighet över 90-95 % och en hög temperatur finns risk för tillväxt. Isopletdiagrammet i *figur 5.3* visar att förutsättningar för mikrobiell tillväxt finns under 227 timmar. Dessa timmar kommer inte i en följd men är koncentrerade till våren 2014 och 2015. Eftersom det tar en viss tid för mögelsporer att gro kan det inte med säkerhet sägas hur stor risken är i det här fallet. Det kan bara konstateras att en viss risk finns. Riskerna är förknippade med byggfukt från lättbetong och puts. Vid närmare analys upptäcktes att en större del av fukten än väntat kom från putsen. Eftersom inga kända fall finns där det konstaterats att byggfukt från putsen har orsakat problem kan det tyda på svårigheter med att simulera putsens fuktfunktion.

Vid jämvikt är risken för påväxt mycket liten. Materialen som byggs in har antagits vara rena. För smutsigt material är gränsen 75 % relativ fuktighet. Eventuell smuts i den här konstruktionen kommer att mögla.



Figur 5.3. Diagrammet visar RF och temperatur för varje timme av simuleringen i det yttersta mineralullsskiktet. Varje grön prick motsvarar 1 timme. Den röda linjen visar kritisk RF för mineralull vid olika temperaturer. Varje prick ovanför kurvan betyder en timme då mögel kan växa. 227 punkter ligger inom kritiskt område.

U-värdet ligger runt $0,1 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ vid jämvikt men är högre så länge byggfukt finns kvar i konstruktionen. Det höga fukttillståndet längst ut i väggen påverkar inte energiförbrukningen speciellt mycket. Det krävs stora mängder vatten i mineralullen för att den ska tappa sin isoleringsförmåga.

Frostsprängning kan ske när vatten i putsens fasadsystem fryser och ökar i volym. Om isens volym blir större än porsystemets volym sprängs materialet sönder. Risken för detta i referensobjektet bedöms vara mycket liten. Putsen har en porositet på 26 % och är ca 1 cm tjock vilket innebär att 2,6 liter vatten per kvadratmeter får plats i fasadens porsystem. Det skall jämföras med mängden kondens som är 3,9 dl per kvadratmeter. Om vatten rinner i väggen innan det fryser och samlas någonstans i konstruktionen skulle det kunna ge problem med buckling av fasaden. Risken bedöms vara mycket liten.

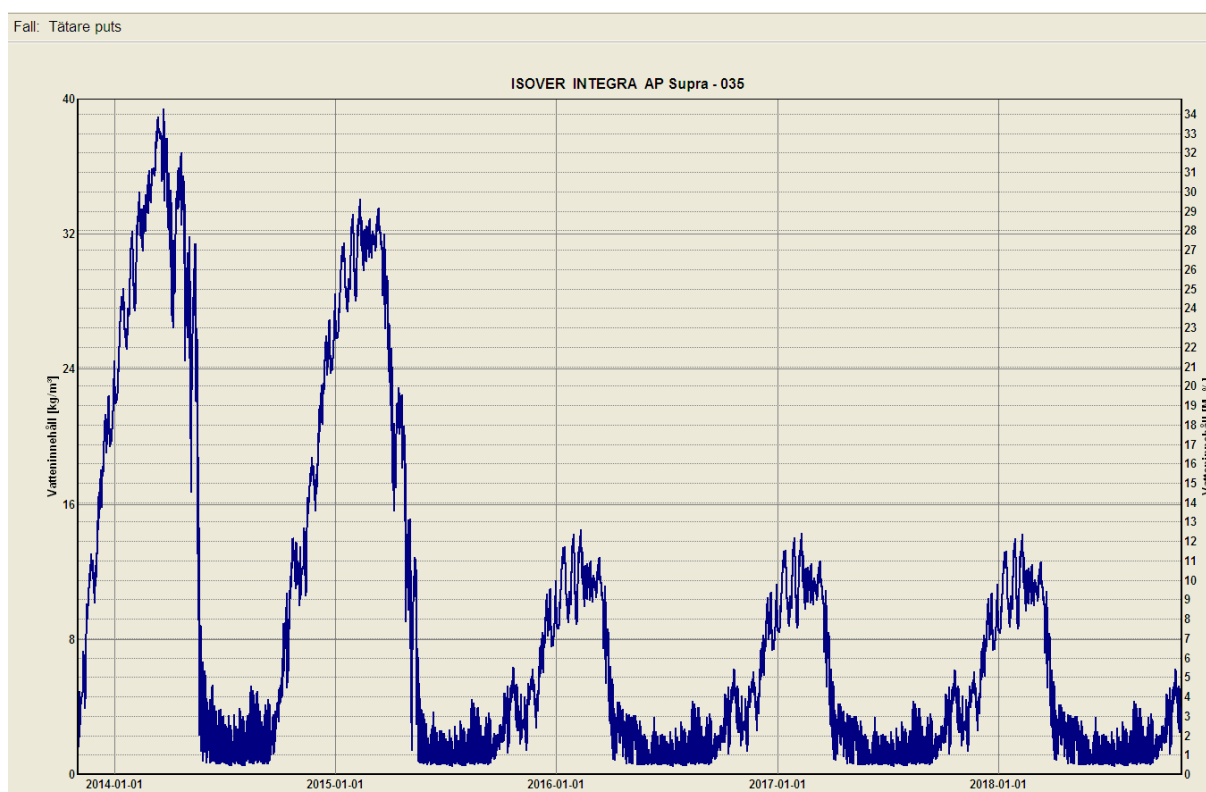
Otäta skarvar mellan cellplastelement kan ge en ökad fuktvandring utåt i konstruktionen. Detta har inte tagits hänsyn till i någon av simuleringarna.

Den största risken med konstruktionen vid de simulerade uttorkningsförutsättningarna bedöms vara mikrobiell påväxt i mineralullen. Putsen i simuleringen antogs vara väl applicerad och utan läckor. En redan riskabel konstruktion är naturligtvis extra känslig för ytterligare fukt från läckage.

5.2 Diffusionstätare ytterputs:

Med en tätare puts blir resultatet att den byggfukt som torkar utåt tar längre tid på sig att försvinna ur konstruktionen. Även under andra vintern fås ett fukttinnehåll längst ut i mineralullen på över 32 kg/m³ vilket motsvarar 3,2 dl vatten per kvadratmeter vägg. Se *figur 5.4*. Det kan jämföras med 15 kg/m³ under andra vintern med en genomsläppligare puts. Se *figur 5.1*. Om problem uppstod första vintern är risken mycket stor att det blir problem även andra vintern om man har en tätare puts.

Får man problem med inläckage är en tät puts en stor nackdel. Risken är att det läcker in vatten i en högre takt än det torkar ut. Då får man en vattenansamling i mineralullen som på sikt leder till fasadproblem, mögelpåväxt och en högre energiförbrukning. Inläckage behöver inte bero på sprickor i putsfasaden utan beror ofta på dåligt utförda anslutningar, till exempel vid fönster.

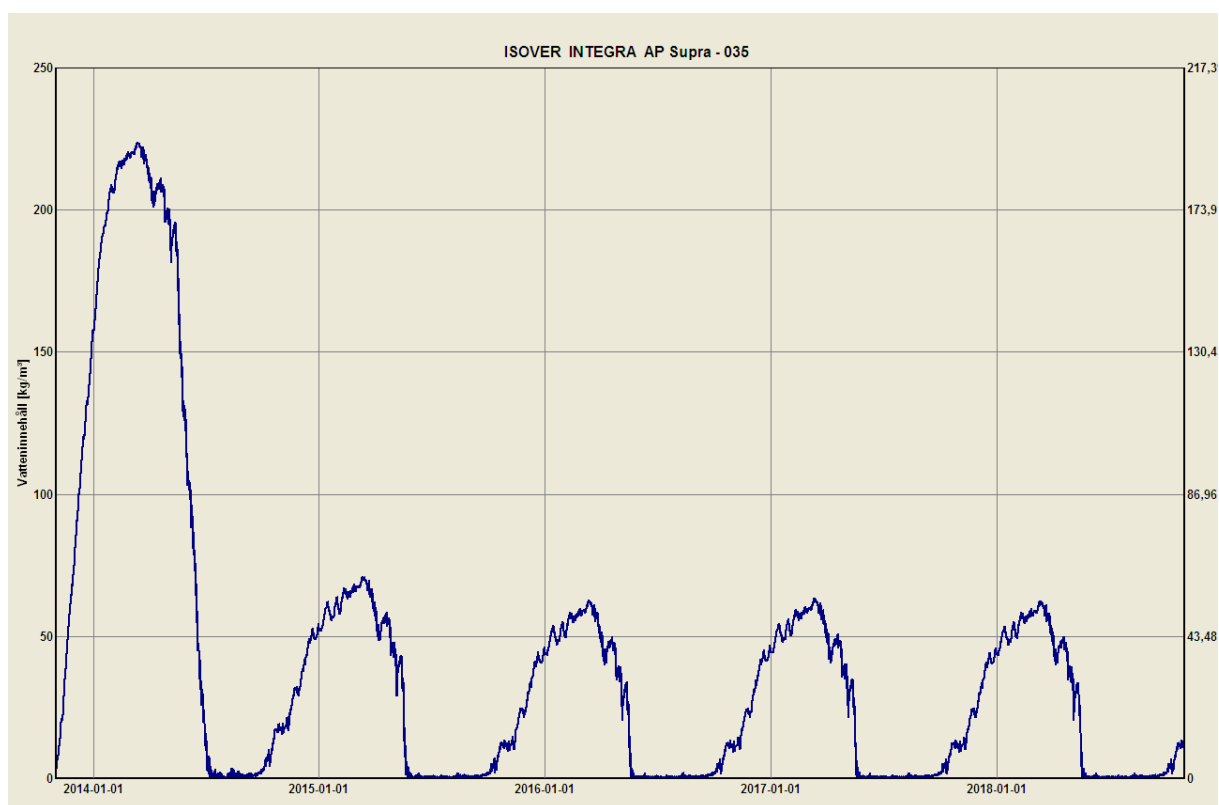


Figur 5.4 Bilden visar fuktmängden [kg/m³] i det yttersta skiktet av mineralullen under de fem första åren för simuleringen med tätare puts.

5.3 Bara mineralull på utsidan om lättbetongen:

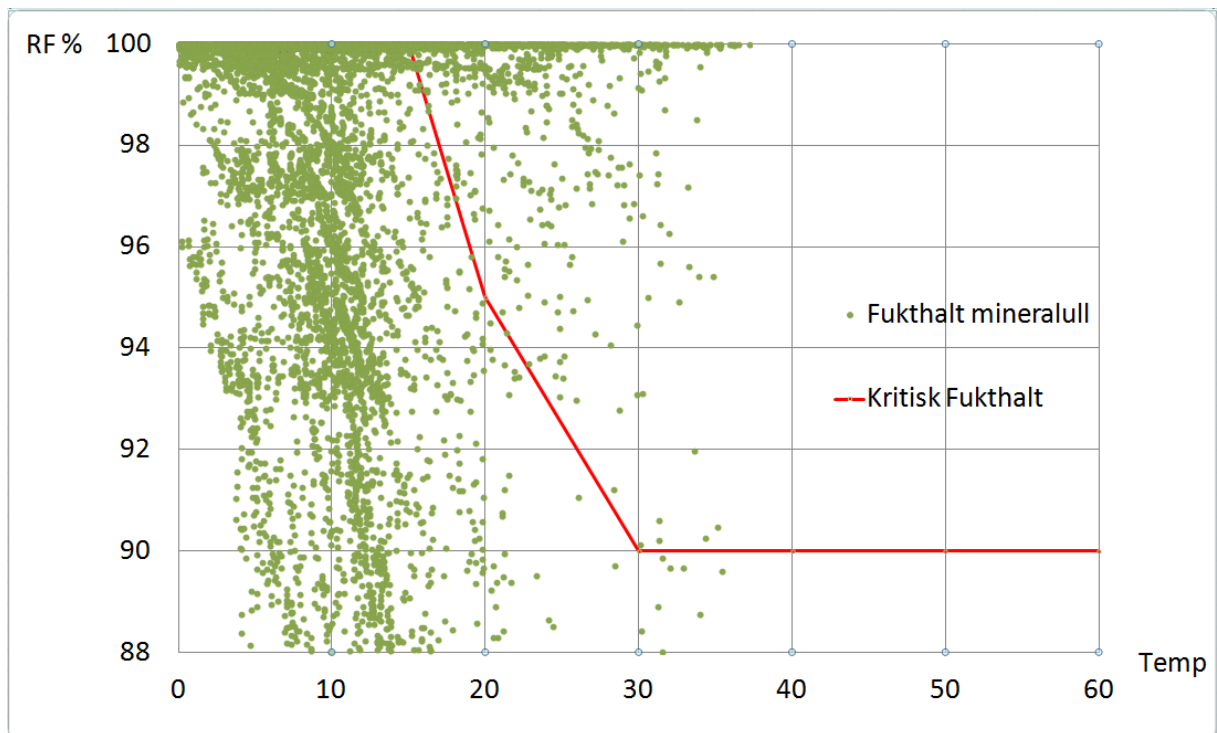
Om cellplasten byts mot mineralull så tas motståndet mot fuktvandring utåt i väggen bort. Den mineralull som användes i simuleringen har $\mu = 1$. En stor del av byggfukten torkar utåt under första vintern. I det yttersta skiktet av mineralullen fås ett vatteninnehåll på runt 225 kg/m^3 . Se figur 5.5. Det motsvarar 2,25 liter vatten per kvadratmeter vägg. Det är en ökning med 577 % jämfört med referensväggen. Större delen av fukten kommer att falla ut som kondens. Sannolikheten att det är minusgrader när detta sker är mycket hög. Således får man stora mängder vatten som fryser någonstans i de yttre delarna av fasaden. Risk finns för både buckling av fasaden och frostsprängning.

Även vid jämvikt visar simuleringen att stora mängder fukt vandrar utåt i väggen och kondenserar varje vinter. Fuktkällan är då inte byggfukten utan den fukt från inomhusluften som de boende avger från sina kroppar och sina aktiviteter.



Figur 5.5. Bilden visar fuktmängden [kg/m^3] i yttersta skiktet av mineralullen för simuleringen med bara mineralull.

Isopletdiagrammet för skiktet längst ut i mineralullen visar fler markeringar över kurvan än vad det gjorde innan modifikationen. Dessutom består risken för mögel även vid jämvikt. Se figur 5.6.



Figur 5.6. Diagramtypen förklaras under *figur 6.3*. I fallet med bara mineralull ligger 1425 punkter inom det kritiska området. Det innebär 1425 timmar då mögel kan växa. Det ska jämföras med 227 timmar innan modifikationen gjordes.

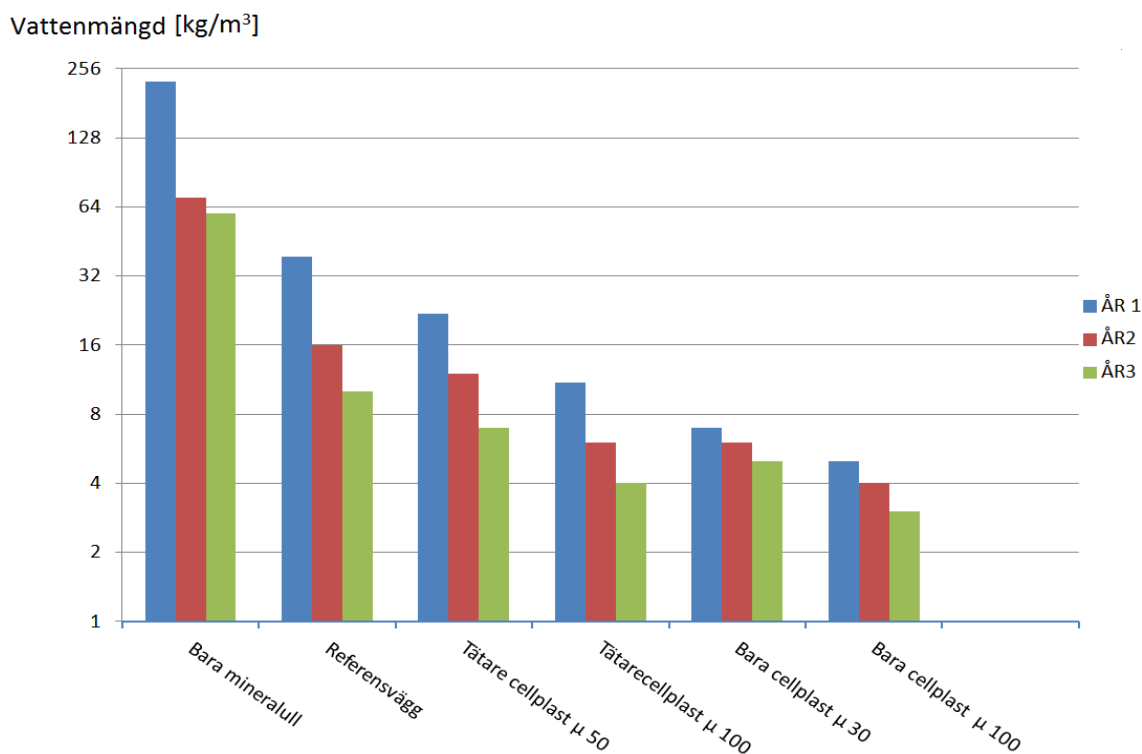
Den här modifikationen ger oacceptabla risker och visar att man kan få problem även om man bygger utan organiska material om man gör på fel sätt.

5.4 Tätare cellplast och bara cellplast

Med en tätare cellplast ökar motståndet mot uttorkning och annan fuktvandring utåt i väggen. Med en cellplast med 50 i diffusionsmotstånd blev vatteninnehållet längst ut i mineralullen 22 kg/m^3 första vintern. Med 100 i diffusionsmotstånd blev vatteninnehållet 12 kg/m^3 . Det ska jämföras med 39 kg/m^3 innan modifikationerna och 225 kg/m^3 med bara mineralull. I *figur 5.7* jämförs vatteninnehållet längst ut i väggen för de olika simuleringarna.

När mineralullen byttes till cellplast ökade motståndet ytterligare. Med cellplast med diffusionsmotstånd 30 blev fuktinnehållet längst ut i väggen 6 kg/m^3 under första vintern. Cellplast med diffusionsmotstånd 100 gav $4\text{--}5 \text{ kg/m}^3$.

Redan med en cellplast med 50 i motstånd minskar risken för mikrobiell påväxt avsevärt. Med cellplast med 100 i motstånd finns inga markeringar över kurvan i isopletdiagrammet. Då finns ingen risk för påväxt.



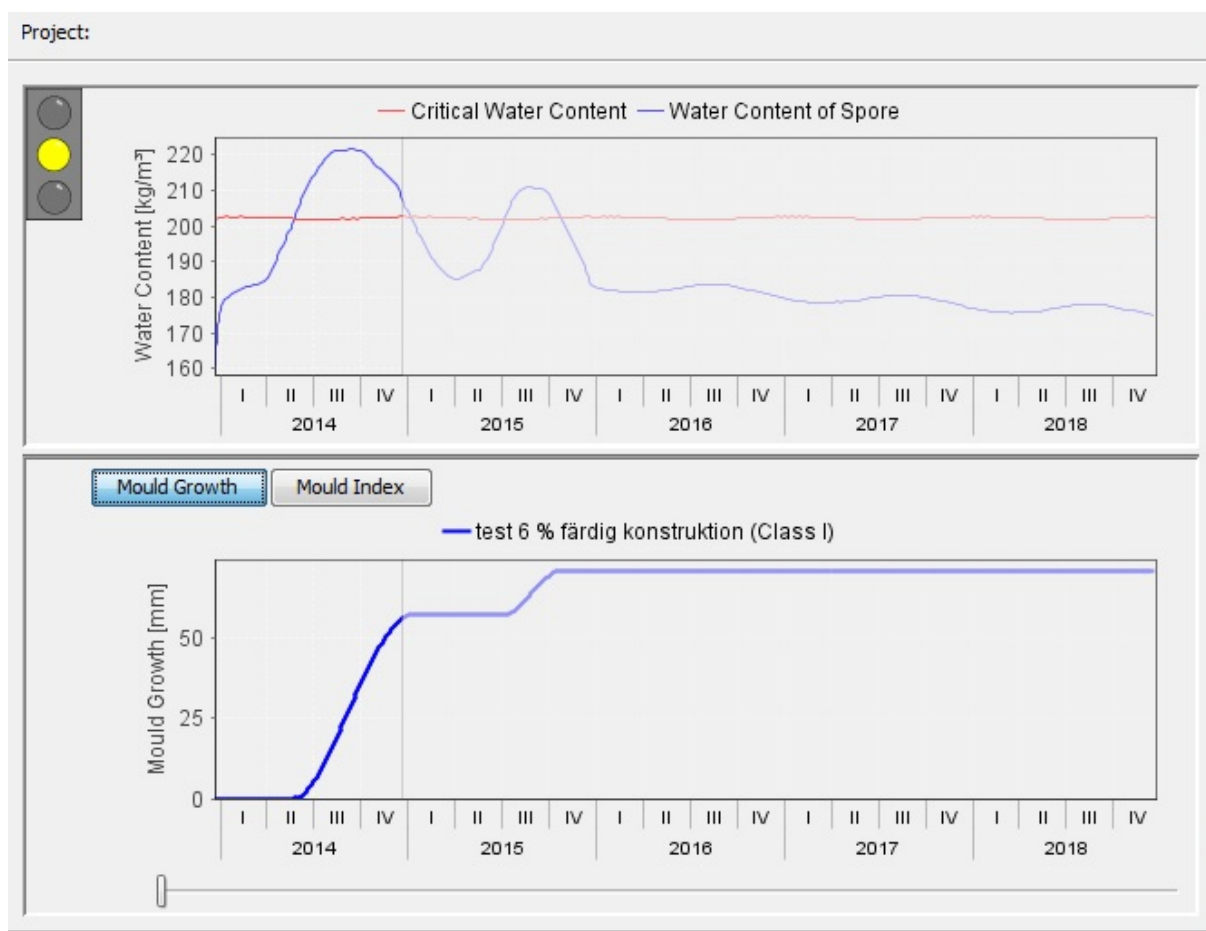
Figur 5.7. Bilden visar det maximala vatteninnehållet i det yttersta mineralullsskiktet under de tre första åren för de olika simuleringarna. Notera att vattenmängden anges i en logaritmisk skala.

Med bara cellplast finns ingen risk för att byggfukt eller fukt från inomhusluften fuktar upp yttre delar av väggen. Problemet med puts direkt på cellplast är att vatten som tar sig innanför fasaden kan rinna i skarvarna mellan cellplastelementen och samlas någonstans i konstruktionen. Erfarenheten säger att en sådan lösning kan ge problem.

5.5 Tätskikt på insidan:

Först simulerades att innerputs applicerades vid 15 % fuktkvot på 50 millimeters djup i lättbetongen. Detta skedde den 27:e juni 2013. En vecka senare lades ett tätskikt till på insida vägg. Under hösten omfördelades fukten i lättbetongen. Bakom tätskiktet blev den relativa fuktigheten 88-89 %. Efter 5 år hade RF gått ned till 82-83 %. Resultatet kördes i WUFI-Bio i substratclass 1. Resultatet visar en enorm mögelrisk. Mögelindex når upp till 6 under 2014 och börjar inte gå neråt förrän 2016.

En ny simulering gjordes med skillnaden att lättbetongen torkades till 8 % fuktkvot på samma djup som tidigare. Denna nivå nåddes den 15:e september 2013. Fukten omfördelades och RF nådde upp till 82 % innan den började gå nedåt. Efter 4-5 år hade RF gått ned till runt 75 %. WUFI-Bio visar fortfarande rött, vilket innebär en stor mögelrisk.

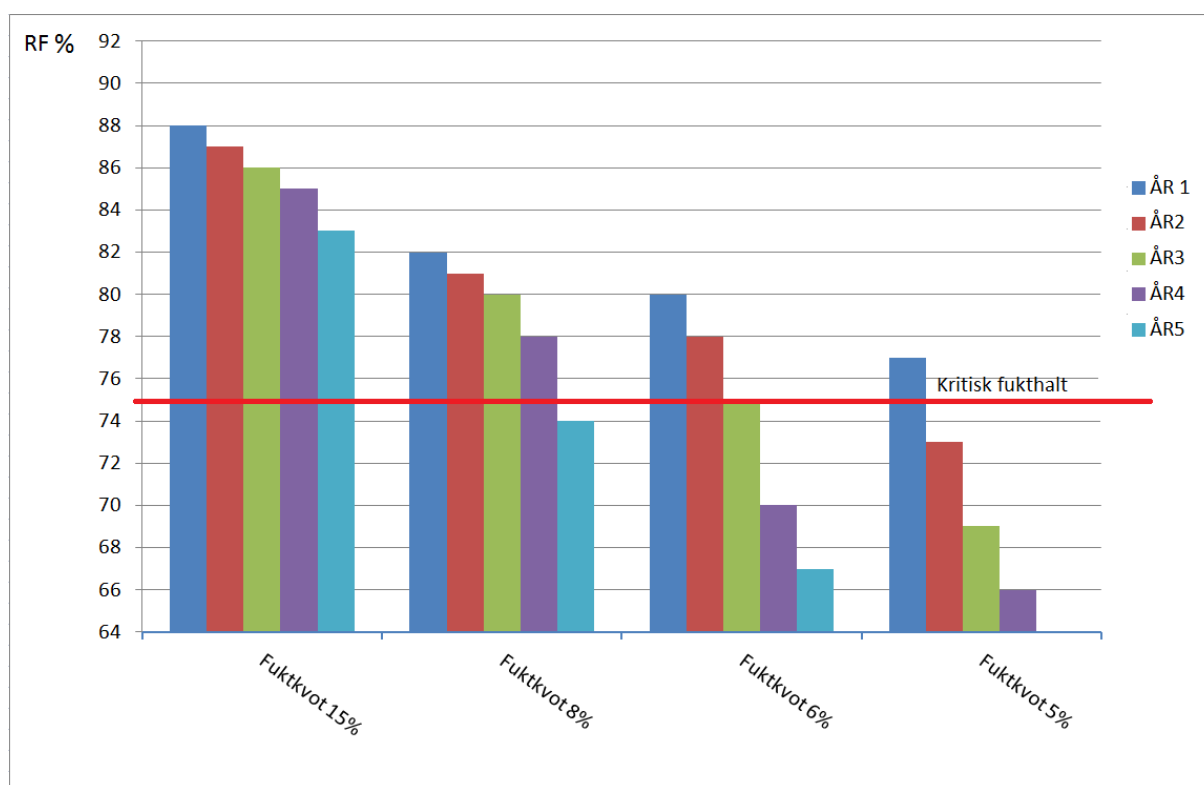


Figur 5.8. Resultaten från WUFI-Bio som visar "gult ljus". Det ska tolkas som att det är på gränsen om man kommer att få påväxt eller ej om man applicerar tätskikt vid 6 % fuktkvot på 50 millimeters djup.

Nästa nivå som testades var 6 % fuktkvot på samma djup. Nivån nåddes den 12:e december 2013. RF på insida tätskikt nådde runt 80 % innan den började avta. De två första somrarna låg RF över 75 %. Enligt WUFI-Bio var detta ett gränsfall. "Trafikljuset" visade gult vilket kan tolkas som att risk finns men det är inte säkert att man hinner få påväxt. Se *figur 5.8*.

Ytterligare en simulering genomfördes. I denna torkades lättbetongen till 5 % fuktkvot på samma djup innan innerputs och tätskikt applicerades. För detta krävdes uttorkning ända till den 11:e februari 2014. Framåt sommaren nådde RF upp till 77-78 % men enligt WUFI-Bio varade detta tillstånd för kort tid för påväxt. Således visades grönt ljus.

Resultatet blev alltså att man i denna konstruktion, vid dessa förutsättningar, måste torka lättbetong till 5 % fuktkvot på 50 millimeters djup innan man kan applicera ett tätskikt på insida vägg. Det tog runt ett år innan ett sådant tillstånd kunde uppnås. Sådant som normalt monteras på insida vägg som tavlor och lister är inte lika täta som en plastfolie och täcker inte hela väggen. Därför kan man troligtvis montera dem vid högre fukttillstånd utan mögelrisk. Vill man vara säker på när det kan ske behöver man genomföra tvådimensionella simuleringar. I *Figur 5.9* jämförs fukttillstånden bakom tätskikt i de olika simuleringarna.



Figur 5.9. Diagrammet visar en jämförelse av det fukttillstånd som erhöles bakom tätskikt i de olika simuleringarna.

5.6 Maximal solinstrålning:

Simuleringen i den riktning som gav maximal solinstrålning gav inga resultat som ändrar slutsatsen i något av fallen. I referensväggen gav maximal solinstrålning ett något högre fuktillstånd längst ut i väggen varje vinter vid jämvikt. Den kan förklaras med att solen skapar en hög ånghalt längst ut i väggen, vilket gör att en del fukt vandrar in i konstruktionen. På vintern vandrar sedan denna fukt tillbaka ut till väggens yttre delar. Skillnaden är dock så liten att det inte påverkar risken för mögel-påväxt eller ökar energiförbrukningen.

5.7 Mer byggfukt:

Med mer byggfukt blev fukttinnehållet längst ut i väggen under första vintern något större än vid ursprungssimuleringen. Skillnaden blev mer påtaglig andra året. Då blev fukttinnehållet mer än dubbelt så stort jämfört med innan modifikationen. Innan modifikationen var konstruktionen i jämvikt med omgivningen under tredje året. Med mer byggfukt är fukttinnehållet förhöjt längst ut i väggen även den tredje vintern.

Det högre fuktillståndet gav också en viss påverkan på U-värdet. Även andra och tredje vintern gav mer byggfukt ett högre U- värde än vid jämvikt.

Det kan konstateras att mer byggfukt tar längre tid att torka ut vilket ger en högre energiförbrukning under längre tid. Risken för mögelproblem ökar också en aning.

5.8 Maximal inbyggnadsfukthalt vid normala uttorkningsförhållanden

Rekommendationen från AK-Konsult var att torka lättbetongen till 90 % på 150 millimeters djup innan första vintern. Det motsvarar ett vatteninnehåll på runt 16 kg/m³ på det djupet.

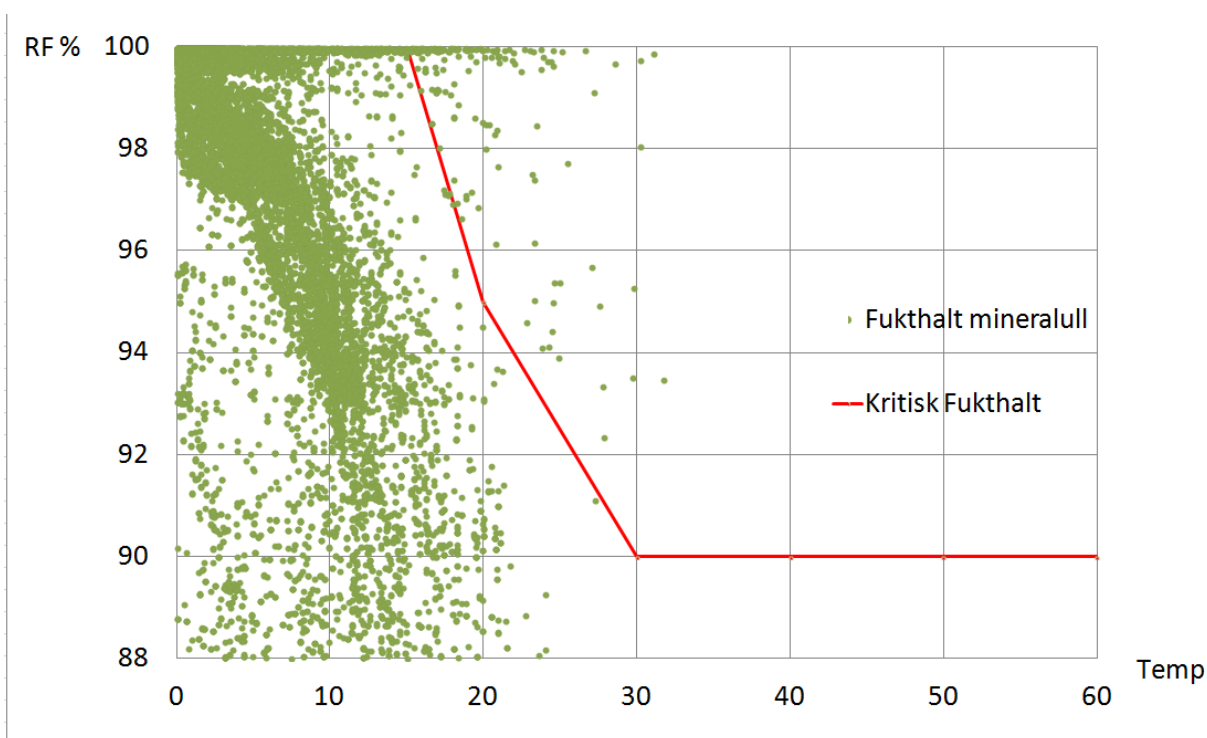
Simuleringen med 125 kg/m³ som inbyggnadsfukthalt ger ett vatteninnehåll på runt 40 kg/m³ vid putsning av utsidan. Det skulle leda till att en för stor mängd byggfukt kan torka utåt under vintern. Det är först när inbyggnadsfukthalten kommer ned till 55 kg/m³ som fukttinnehållet på 150 millimeters djup går under 16 kg/m³ innan putsning. Maximal inbyggnadsfukthalt vid normala uttorkningsförhållanden är alltså 55 kg/m³. Se *Tabell 5.1*. Hade lättbetongen levererats till projektet med den fukthalten hade inga speciella åtgärder behövs för att hantera byggfukt.

Tabell 5.1. Tabellen visar resultaten från simuleringarna med en lägre inbyggnadsfukthalt

Inbyggnadsfukthalt:	Fukthalt på 150 mm djup vid putsning:
125 kg/m ³	40 kg/m ³
105 kg/m ³	33 kg/m ³
80 kg/m ³	24 kg/m ³
55 kg/m ³	15 kg/m ³

5.9 Verkligt fall med extra uttorkning

I det verkliga projektet torkades lättbetongen till 90 % RF på 150 millimeters djup innan putsning. Simuleringen av fuktutvecklingen efter att detta uppnåddes visar fortfarande 171 punkter ovanför kurvan för kritisk fukthalt. Se *Figur 5.10*. Eftersom mängden byggfukt som torkade utåt i det här fallet var väldigt liten drogs slutsatsen att det är byggfukten i putsen som fuktar upp mineralullen. AK-Konsult har inga kända skadefall där byggfukt från putsen har orsakat fuktproblem. Resultatet tyder snarare på svårigheter att simulera putsen på ett korrekt sätt. Därför bedöms risken i det här fallet vara mycket liten.



Figur 5.10. Diagramtypen förklaras under *figur 6.3*. Figuren visar mögelrisken vid extra uttorkning. I detta fall finns ca 171 punkter inom det kritiska området. Det är en minskning med runt 25 % jämfört med normala uttorkningsförhållanden. Minskningen representerar den del av resultatet som beror på fukt från lättbetongen som torkar utåt.

6. Slutsatser och rekommendationer

Resultaten visar att den intensiva torkning som utfördes i referensprojektet i Bollnäs reducerade risken med konstruktionen till ett minimum. Den risk som ändå finns i resultaten beror på byggfukt från putsen. Med tanke på att det inte finns några kända skadefall som orsakats av byggfukt i putsen dras slutsatsen att väggen är riskfri. Genom god fuktprojektering och väl utförd torkning eliminerades risken för problem på grund av fuktvandring utåt i konstruktionen.

Hade en mer "normal" uttorkning utförts visar studien att fukt hade kunnat vandra utåt i väggen, kondensera och orsaka mögelrisk. Det är långt ifrån säkert att mögel hade börjat växa men med tanke på vad en mögelskada kostar att åtgärda så är det inte en risk som är värd att ta.

Studien visar att cellplastens diffusionstäthet är avgörande för hur mycket fukt som kan vandra utåt i väggen. Utan dess motstånd finns en risk för mikrobiell påväxt även när byggfukten är borta. Ju mer fukt som vandrar utåt, desto större blir riskerna och vice versa. En tätare cellplast hade varit ett alternativ till snabb, intensiv uttorkning. I framtida projekt kan det vara värt att undersöka vilket alternativ som är det billigaste och mest miljövänliga.

Att putsa direkt på cellplast fungerar bra i teorin, som visas i resultaten, men är riskabelt i praktiken. Vatten som kondenserar eller läcker in kan rinna i skarvarna mellan elementen och ge höga fukt-tillstånd längre in i väggen. Där är det varmare även på vintern och därmed större risk för mögel. Mineralullen leder inte eventuellt vatten vidare. Därför är det ändå rätt val att putsa på mineralull.

Ett annat sätt att eliminera risken för mögelpåväxt är att använda sig av en luftspalt bakom fasaden. Det skulle dock kräva genomgående stålreglar, vilket ger köldbryggor. För att uppnå samma isoleringskapacitet skulle tjockleken på väggarna behöva ökas något. Man kan också torka lättbetongen innan man bygger in den. Det kräver tid, energi och plats. Resultaten visar att om lättbetongen torkas ned till fuktkvoten 12,5 % innan uppmurning så skulle inga extra torkningsåtgärder behövas.

Montering av trälistor och tavlor på insida vägg får inte utföras innan man är säker på att lättbetongen är tillräckligt torr. Studien visar att den allmänna rekommendationen att lättbetongen skall torkas till 15 % fuktkvot på 50 millimeters djup innan målning och tapetsering på insida vägg inte fungerar om det som sätts upp är diffusionstätt. Lättbetongen bör torkas ned ända till 5 % fuktkvot på det djupet innan något mycket tätt och heltäckande kan monteras utan risk. Trälistor och mindre tavlor klarar sig sannolikt vid en högre fuktkvot. För att utreda det måste beräkningar göras i två dimensioner, vilket inte har gjorts i den här studien. Slutsatsen blir att man inte alltid kan lita på allmänna rekommendationer. De fungerar om det som sätts upp är genomsläppligt och uttorkning kan ske obehindrat åt två håll. I referenskonstruktionen stoppas uttorkningen utåt av cellplasten. Om det som sätts upp dessutom är diffusionstätt ger det hela andra förutsättningar för uttorkning.

Allmänt om byggnation i lättbetong kan konstateras att det kräver noggrann fuktprojektering och ett noggrant utförande. Detta gäller lågenergi- och passivhuskonstruktioner i synnerhet. Separat fuktprojektering utförd av experter är att rekommendera vid alla nya projekt med lättbetong. Gamla beprövade metoder från 60- och 70-talet är inte tillämpbara på moderna konstruktioner med högre energikrav. Det skall nämnas att det finns fuktrelaterade risker vid lågenergikonstruktion i alla material. Resultaten skall inte tolkas som att det finns större risker med lättbetong jämfört med andra material, men riskerna ser annorlunda ut och måste beaktas noggrant.

En frågeställning som kan vara intressant för framtida forskning är hur mycket energi som går åt vid tillverkning och uttorkning av lättbetong i förhållande till andra material. Att det går att bygga energisnåla byggnader i lättbetong utan fuktproblem kan konstateras. Men hur mycket energi har gått åt innan byggnaden är färdig? Finns det andra lösningar som är mer energieffektiva utan att risken för fuktproblem ökar?

7. Referenser

- [1] <http://www.passivhuscentrum.se/om-passivhus/det-har-ar-ett-passivhus>. 2014-01-08
Passivhuscentrum, Västra Götaland. 2014-04-07.
- [2] <http://www.akkonsult.com/om-ak>. AK-Konsult. 2014-03-28.
- [3] **Nevander, Lars Erik. Elmarsson, Bengt.**1994. *Fukthandboken, praktik och teori*. Andra utgåvan. Svenskt tryck AB: Stockholm. Kapitel 4, 5, 6 och 7.
- [4] **Nilsson, Lars-Olof.** *Rapport 1312, 2013 att räkna med fukt*. 2013-03-12. Moistenginst AB. 2014-04-01.
- [5] **Sandin Kenneth.** 2010. *Praktisk byggnadsfysik*. Första upplagan. Studentlitteratur AB, Lund.
- [6] <http://www.rbk.nu/UserFiles/old/pdf/manual%20ver%2051/Flik%202%20ver%2051.pdf>. 2012-11-22. RBK 2010 flik 2. 2014-04-07.
- [7] http://www.akkonsult.com/files/aktuellt_apr_2013.pdf. 2013-03-12.
- [8] **Johansson, Pernilla.** 2006. *Mikroorganismer i byggnader – En kunskapsöversikt*, SP Energiteknik, Rapport.
- [9] **Johansson, Pernilla. Samuelson, Ingemar. Ekstrand-Tobin, Annika. Mjörnell, Kristina. Sandberg, Per-Ingvar. Sikander, Eva.** 2005. *Kritiskt fukttillstånd för mikrobiell tillväxt på byggmaterial-kunskapssammanfattning*, SP Energiteknik, Rapport.
- [10] **Petersson, Bengt-Åke,** 2004, *Tillämpad Byggnadsfysik*, Andra upplagan, Studentlitteratur, Lund. Kapitel 7.2, 4.4.
- [11] www.hplush.se/sv/produktion, H+H. 2014-04-01.
- [12] **Dahl, Gösta.** 1993. *Lättbetonghandboken*. Upplaga. Kumla: Siporex AB.
- [13] **Burström, Per Gunnar.** 2007. *Byggnadsmaterial, Uppbyggnad, tillverkning och egenskaper*. Andra utgåvan. Studentlitteratur AB, Lund.
- [14] http://www.wufi.de/index_e.html. Fraunhofer IBP. 2013-03-22.
- [15] http://www.hoki.ibp.fraunhofer.de/wufi/wufibioinfo_e.html. Fraunhofer IBP. 2014-05-19.
- [16] <http://www.ne.se/absorption/107431>. Nationalencyklopedin. 2014-04-16.