

Appendix III - Lerjord förblir hus, fuktmekanik

1	Synlig fukt	3
1.2	Fukt utifrån	3
1.2.1	”Stövlar	4
1.2.2	... och hatt”	4
1.3	Vikten av noggrann detaljutformning	5
1.3.1	Lärdomar att dra från ett fuktskadat experimenthus	7
1.4	Renovering av mackelerade hus med fuktskador	8
2	Osynlig fukt	10
2.1	Transportmekanismer för vattenånga	10
2.1.1	Diffusion	10
2.1.2	Konvektion	11
2.2	Ånghalt och relativ fuktighet	11
3	En fallstudie med jämförande beräkningar mellan några hygroskopiska material	13
3.1	Jämviktskurvan	13
3.1.1	Fuktkapacitans	14
3.2	Kan rumsventilation reduceras om väggytorna består av hygroskopiska material?	16
3.2.1	Fall 1	16
3.3.2	Fall 2	18
3.2.3	Slutsatser	19
3.3	Beräkningsformler för fallstudien	19
	Referenser	21
	Fotnoter	21

Appendix III - Lerjord förblir hus, fuktmeکانیک

För byggnader där lerjord på något sätt ingår i konstruktionen gäller samma grundregler som för byggnader av konventionella byggmaterial, nämligen att vatten i flytande form är dess värsta fiende. Här finns en paradox eftersom lerbundna material anses ha bättre förmåga att buffra fukt i ångfas än flera andra byggmaterial. Fukt kommer här att ges en närmare betraktelse eftersom detta är en byggnadsfysikalisk parameter som lätt ignoreras. Hur en konstruktion ska dimensioneras för att bära aktuella laster ställer sällan till med några problem, inte heller hur mycket isolering som behövs för att energiförbrukningen ska bli låg, men hur fukt uppträder i en byggnad förbises ofta. Eftersom lerjord är ett känsligt material när det utsätts för vatten, är det viktigt att känna till något om hur vattenånga i luft och byggmaterial beter sig.

1 Synlig fukt

Vatten finns överallt i vår omgivning och återfinns i fast, flytande och i gasform. En byggnad står alltid i kontakt med vatten i dess olika former. Konstruktionen måste därför utformas så att fukten inte ställer till med några problem. Den mest påtagliga formen, som är lättast att göra något åt, är

den som syns som fritt vatten. När det regnar är det lätt att inse hur ett tak ska vara utformat för att vattnet så snabbt som möjligt ska rinna bort. Vi vet också att vatten som leds in i en byggnad genom rör och slangar på något sätt måste ledas ut. Fukt som uppträder i gasformens osynliga skepnad, som vattenånga, är däremot mycket besvärligare att komma till rätta med.

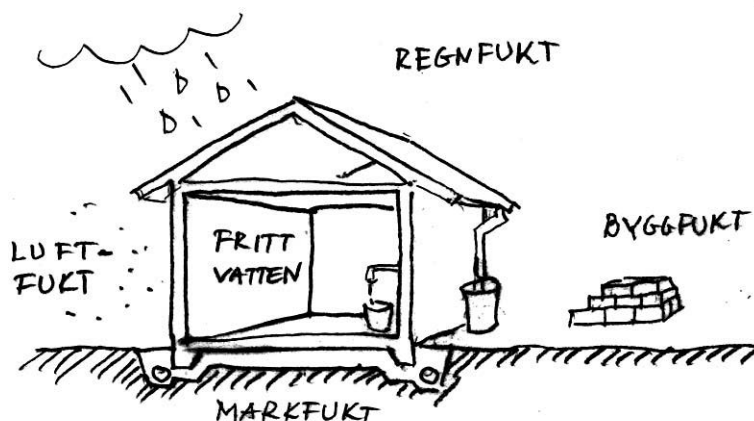


Fig 1. Fukten angriper en byggnad från både ut- och insida, men leder aldrig till några skador så länge vi vet hur vi ska handskas med den.

1.2 Fukt utifrån

Ett talesätt som flitigt används om lerjords-hus är att de behöver "stor hatt och höga

stövlar" för att stå emot vädrets makter. Med detta menas ordentliga takuthäng och hög sockel av annat material, exempelvis betong eller natursten.

1.2.1 ”Stövlar...

Den fukt som kommer utifrån, och som byggnaden måste skyddas från, är den som kan komma i direktkontakt med konstruktionen en längre tid, exempelvis markfukt. Den består av ånga som finns i jordens porsystem och dess relativa fuktighet anges till 100 %. I byggmaterial som står i kontakt med jord uppstår snart kapillärkondensation som gör att fukten faller ut som vatten i materialets porsystem. Vatten börjar då sugas in i materialet genom kapillär sugning, vars hastighet och stighöjd är beroende av kapillärens diameter. Då sugningen sker långsamt kan stighöjden bli mycket hög. Om vattnet ansamlas och inte kan vädras bort, kan omfattande fuktskador uppstå efter så lång tid som 5 – 10 år. Detta fenomen förhindras genom god dränering vid grundläggningen och genom fuktspärrar som placeras så att vattenånga inte kan sugas in i konstruktionen. En hög sockel av beständigt material ger ett bra skydd för sådant vatten som vid häftiga skyfall kan stänka upp från marken och skada väggen. Det kan även behövas ett stryktåligt material där väggen lätt kan bli utsatt för yttre våld, exempelvis i form av sparkar och påkörning. Att ge byggnader en ordentlig sockelhöjd är klokt inte bara för lerjordshus, utan för alla typer av byggnader.



Fig 2. En ekonomibyggnad från förra sekelskiftet som inte har någon sockel utan står direkt på grundmuren. Regnvatten har stänkt upp mot väggen och orsakat omfattande erosionsskador.



Fig 3. Nyuppförd byggnad i södra England. De mackelerade väggarna har en väl tilltagen naturstensockel. Här finns också en fuktspärr mellan sockel och väggmur och taket har ett rejält utsprång.

Många engelska mackelerade hus har fått svåra skador sedan nutida material, såsom putser innehållande cement samt diffusionstäta färger, använts vid renoveringar istället för traditionell kalkputs och kalkstrykning. Då de äldre byggnaderna inte har någon fuktspärr mellan mur och sockel stiger markfukt kapillärt i murfogarna och ansamlas i mötet med lermuren. Stängs fukten inne mellan skikt med större ånggenomgångsmotstånd blir leran slutligen plastisk och instabil genom sitt stora vatteninnehåll. Muren riskerar då att glida av sockeln. Hur ett fuktskadat mackelerat hus i England renoveras beskrivs på sid 8.

1.2.2 ... och hatt”

Påståendet att lerjordshus regnar bort genom att det löses upp av vatten, är direkt missvisande. Vad som händer är att det

eroderar. Vid regn och blåst blir stora delar av den yttre konstruktionen blöt, men torkar snart ut igen. En stampad eller mackelerad mur utan avtäckning kommer i vårt klimat snart att skadas genom vattnets eroderande verkan i kombination med den sprängverkan vattnet får då det fryser. För att erhålla lång livslängd för en mur eller vägg av ostabiliserad lerjord bör den ha ett väl utformat tak, samt putsas eller strykas med kalk och hållas fri från vegetation. Klängande växter med rötter, exempelvis murgröna, kan leda in vatten i väggen på ett skadligt sätt.



Fig 4. Under takutsprånget har väggen klarat sig bättre än nedanför, där den utsätts för vatten och vind. Bilden är tagen i England fyra år efter det att byggnaden uppfördes.



Fig 6. Detta lerputsade hus med konstruktion av lastbärande halmbalar har ingen sockel och fasaden har dragits ända ner i marknivå. En kombination av sättningskador och avsaknad av sockel har givit detta förödande resultat. Ett skyddande lager av kalkputs räcker inte för att förhindra skador från uppstänkande vatten. Notera dock att väggen är i gott skick under takutsprånget.

1.3 Vikten av noggrann detaljutformning

De känsligaste partierna i en byggnad finns vid möten mellan olika material eller mate-



Fig 5. I denna mackelerade vägg har murens armerande halmstrån förmultnat och banat väg för bin som gräver gångar och trivs i dessa väggar.

rialsammansättningar samt i utskjutande partier. Vattenånga och vatten i flytande form betar sig på olika sätt och vad som händer i möten mellan olika material måste analyseras i varje enskilt fall. I en lerstens-

vägg som murats med lerbruk suger bruket mer kapillärt än stenen, som istället har en högre kapacitet att lagra fukt i ångfas.

Vatten i rinnande form följer tyngdlagen, medan vatten i ångfas följer allmänna gaslagen och diffunderar i den riktning där partialgasttrycket är lägst. Vilka problem det senare kan orsaka beskrivs nedan. Ordet ånga kan lätt misstolkas då vi i dagligt tal syftar till synliga vattendroppar i form av dimbildning. I denna text avses vattnets gasfas/ångfas som är osynlig för blotta ögat.

Om glipor uppstår mellan olika konstruktionsdelar, exempelvis mellan vägg och fönsterkarm, ökar risken för att vatten kan komma in i konstruktionen genom regn eller kondensation. Vid detaljlösningar med fönster- och dörrkarmar i fasadliv finns det även risk för kapillär sugning genom springor i väderutsatta lägen. Förutom risken för frostsprängningar vid temperaturer som pendlar kring noll grader ger ökad fukthalt också ökad risk för angrepp från svamp och mögel. Detaljutformningen kring fönster, dörrar och andra byggnadsdelar, som skiljer sig från den släta väggkonstruktionen, måste därför studeras noga i projekteringskedet.



Fig 7. Här har vinkeln i fönsteröppningens överdel tydligen varit ogynnsam och vatten som runnit in i konstruktionen har frusit och sprängt sönder putsen.



Fig 8. Denna fönsteröppning har utformats med en överdel som har en vinkel som fungerar som en droppnäsa vilket i viss mån hindrar att vatten kommer in i konstruktionen. Notera även fuktspärren i murens nedre tredjedel.



Fig 9. Det är viktigt att studera de byggnadsdetaljer som är mest utsatta för vädrets påverkan. Här har hörnen i det burspråksliknande ventilationsutsläppet skadats då täckning och avvattning inte varit tillräckligt väl genomtänkta - stuprör saknas.

1.3.1 *Lärdomar att dra från ett fuktskadat experimenthus*

Sommaren 1992 uppfördes ett mindre hus med isolering av lerhalmsblock vid Mauritzbergs slott, på Vikbolandet utanför Norrköping. Byggnaden var en del av ett planerat golf- och fritidscentrum vars utformning hade ingått i en arkitektävling. Det vinnande förslaget var ritat av den norske arkitekten Sverre Fehn som fick vidarebearbeta sin idé till fritidshus. En prototyp av detta skulle uppföras som ett temporärt modellhus för marknadsföringsändamål under en begränsad tid. Huset ritades med ett pelar-balksystem i trä, i moduler om 2 m, med lecablock som isolerande murverk i väggarna.



Fig 10. Prototypen som blev ett experimenthus med ekologiska byggmaterial vid Mauritzbergs slott.

Eftersom byggnaden endast skulle finnas för påseende under några månader väcktes tanken om att uppföra det som ett experimenthus av lerhalmsblock. Detta kom att utföras under ledning av professor Bengt Lundsten vid Tekniska högskolan i Helsingfors. Experimentet utgick från att byggnadens moderna arkitekturspråk inte skulle påverkas av de ekologiskt valda byggmaterialen. Provhuset revs aldrig och det tillfälliga bygglovets permanentades, men några fler byggnader uppfördes inte.

Då huset byggdes tillverkades 600 lerhalmsblock, i formatet 540 x 270 x 190 mm, av arkitektstudenter och andra intresserade från Sverige och utlandet.

Hela projektet, från blocktillverkning till putsning, utfördes på den korta tiden av 8 sommarveckor. Enligt principen om fallande ånggenomgångsmotstånd inifrån och ut putsades innerväggarna med kalkbruk och ytterväggarna med lerbruk, vilket är det motsatta förhållandet mot vad som gäller för traditionellt byggda lerjordshus. På murpartierna, av stampad jord, provades vattenglas som stabiliserande tillsats.

Delar av putsen började flagna redan efter ett år. Värst utsatta var de stampade väggarna som saknade avtäckning. Huset putsades om och målades med kalkfärg och stampmurarna avtäcktes med plåt. Byggnaden har nu lappats och lagats i flera omgångar utan att ha blivit bra. Den ansvarige för projektet tror att putsen fungerade dåligt eftersom den dels användes på underlag som var utförda i olika tekniker och dels på att flera personer utan erfarenhet från putsning utförde arbetet.



Fig 11. Vattenavrinningen fungerar inte tillfredsställande med denna lösning. Stänk från stupröret blåser mot väggen som riskerar att frysa sönder vid minusgrader.

Byggnaden har inga takutsprång och en mycket låg sockel. Vid en okulär granskning framgår det tydligt att en högre sockel hade varit nödvändig. Ordentliga takutsprång gör att väggen blir mindre utsatt för regn eftersom lika mycket vatten då inte

träffar fasaden. De misstag som begåtts vid Mauritzbergs slott behöver inte göras om på andra byggnader, varken när det gäller väggar med lerjord i konstruktionen eller när de är byggda med konventionella byggmaterial.



Fig 12. Från denna bild finns mycket att lära. Här möter två byggtekniker varandra. Den vänstra väggen består av lerhalsblock murade i lerbruk, den högra av en stampvägg. I skarven mellan de båda teknikerna rör sig materialen och sprickor uppstår. Muravkröningen leder vattnet rakt in i hörnan med lerhalm vilket fått till följd att putsen fryser loss, trots att ett armerande nät har spänts upp vid en av de många ilagningarna som måst göras under årens lopp.

1.4 Renovering av mackelerade hus med fuktskador

De vanligaste orsakerna till att mackelerade hus behöver renoveras är att underhållet inte varit tillräckligt, skett på fel sätt eller att huset byggts om.

Vid felaktigt underhåll med putser och/eller färger som inte släpper ut fukt ur byggnadskonstruktionen är det i första hand den nedre delen av lerjordsmuren som drabbas. I många fall leder detta till att dessa partier måste bytas ut mot torrt material. Då används, liksom även till större hål, utfyll-

nader och igensättning av dörr- och fönsteröppningar, förtillverkade block av lera, sand och halm. Blocken muras med lerbruk, alternativt kalkbruk. Kevin McCabe, som sedan 1984 arbetat med renoveringar av mackelerade byggnader i södra England, brukar återanvända de delar av väggen som byts ut. Han siktar då den torra lermassan, tillsätter sand och i vissa fall även släckt kalk beroende på om väggen ska putsas eller inte.

Till mackelerade hus kan lermassa inte användas till att fylla igen större håligheter. Då lermassan vid denna teknik oftast är fet

krymper den vid torkningen vilket medför att sprickor lätt kan uppstå vid ilagningen. Risken är stor för vatteninträngning i de uppkomna sprickorna vilket kan orsaka nya skador, eller rent av till att lagningen faller ur. Ett annat skäl till att inte använda lermassa är dess långa uttorkningstid vilket gör att det dröjer länge innan väggen kan bära den tyngd den från början varit dimensionerad för. Med torra murblock torkar väggen fortare och kan snabbare ta laster.



Fig 13. Delar av detta engelska mackelerade hus i Payhembury, är 300 år gamla och en bärande yttervägg som fuktskadats har lagats med block. Lägga märke till ventilationshål i väggen där en större mängd lerbruk har lagts in. Grundmuren kan ha olika höjd och består här av natursten som går ända upp till fönsterbröstningen.

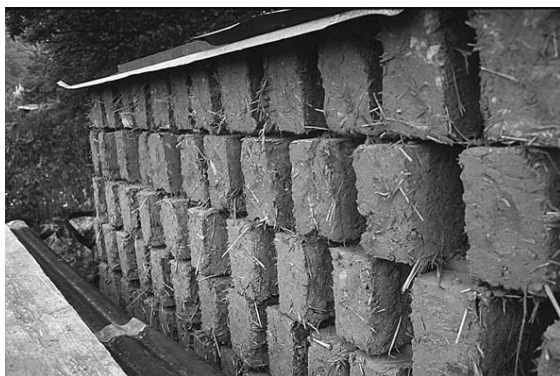


Fig 14. Lerblocken luftorkas i 4 veckor innan de kan användas.



Fig 14. Kevin McCabe demonstrerar hur han tillverkar ler-block som han sedan använder till renoveringsarbeten. I den manuella blockpressen kan han framställa 100 block per dag. Varje block väger cirka 25 kg.

2 Osynlig fukt

En byggnad som används utsätts hela tiden för tillskott av fukt i inomhusluften. En vuxen person i vila avger normalt omkring 40 - 50 g vatten i gasform per timme genom andning och hud, vilket späds på av aktiviteter såsom dusch, tvätt och matlagning¹. Finns gröna växter i bostaden avger även dessa fukt.

Eftersom nutida människor i vårt klimat vistas inomhus större delen av sitt liv, siffror som anges är 80 - 90 %, har detta medfört att kraven på innemiljön ökar. Vad som är en bra inomhusmiljö varierar mellan olika personer. Förutom mätbara värden som temperatur, luftrörelser, ljud- och ljusförhållanden, luftfuktighet och luftkvalitet tillkommer också faktorer som är svåra att mäta och som i många fall beror på den enskilde individens livssituation.² De flesta människor har svårt att känna den relativa fuktigheten och klagomål på torr luft brukar bero på att luften är för varm eller förorenad.³

Variationerna av mängden vatten i luft är små. Skillnaden under året rör sig kring 20 g/m³ luft, vilket motsvarar en dryg matsked vätska som löses upp i 1 000 l luft. Vi vet att olika material beter sig på olika sätt beroende på den fukt de omges av. Ett känt exempel är trä som rör sig på ett märkbart sätt, 2 - 3 % på bredden, under årets klimatväxlingar på grund av fuktens inverkan⁴. Ytskikt och dess beskaffenhet är det som först reagerar på svängningarna i luftfuktigheten. Hos människan är ytskikten hud och slemhinnor. Vintertid kan vi märka att den hud som exponeras mot luften lätt blir torr och narig då inomhusluftens relativa fuktighet blir låg. Även slemhinnorna kan ändra karaktär vilket gör oss mer mottagliga för virusinfektioner i luftvägarna. Ett annat fenomen som inträffar vid låg fuktighet i inomhusluften är att det kan ”slå gnistor” om oss genom urladdning av statisk elektricitet.

2.1 Transportmekanismer för vattenånga

Luften kan bära olika mängd fukt beroende på vilken temperatur som råder. Luft är därför en viktig överföringsmekanism för vattenånga och transporten kan ske genom *diffusion* och *konvektion*.

2.1.1 Diffusion

Vid diffusion strävar det vatten som befinner sig i gasform mot utjämning. Hög koncentration, det vill säga hög ånghalt, av vattenmolekyler ger ett högt partialtryck som sjunker om den blandas med gas med lägre koncentration.

De flesta material har en porstruktur som står i förbindelse med omgivande luft. Fuktig luft diffunderar ut och in i dessa porer med skillnaden i ånghalt som drivkraft. Temperaturen spelar ingen roll, trots att man generellt talar om att diffusionen sker mot den kalla sidan i en yttervägg. Detta beror på att den varma inneluften i regel är fuktigare än uteluften.⁵ Om fukt vandrar utåt i en vägg faller den ut som vatten om mätnadsvärdet överskrids. Sker detta i ett område där temperaturen kan understiga 0°C finns det risk för sprickbildning när vattnet fryser till is och expanderar.

Hur snabbt fukten diffunderar beror på uppbyggnaden av porsystem i olika material. Om fuktbelastningen upphör stannar diffusionen av och vänder om när den pådrivande ånghalten sjunkit tillräckligt mycket. Värmetransport sker enligt samma princip, men här är det materialets värmeledande förmåga som bestämmer hastigheten. Följande vardagliga experiment kan visa hur värmetransport fungerar i praktiken:

Tre lika stora ägg med samma temperatur läggs i varsin bägare med lika mycket kallt vatten. Vatten kokas upp i en kastrull och de tre äggen sänks ned i detta. Efter två

minuter plockas ett ägg upp och läggs tillbaka i en av bågarna med kallt vatten för att avbryta uppvärmningsprocessen. Tre minuter senare tas det andra ägget upp och läggs tillbaka i sin ursprungliga bågare och efter ytterligare fem minuter görs samma sak med det tredje. När tvåminutersägget har legat tio minuter i sin bågare hålls vattnet av och ägget delas mitt itu. Samma sak görs med de två övriga äggen när de avkylts tio minuter var. Tvåminutersägget visar sig nu ha en rinnande gula, femminutersägget en kladdig och tio-minutersäggets gula är homogen och fast.

När de varma äggen lades i kallt vatten avstannade det värmefflöde som leddes/trycktes in i ägget och den tillförda värmen återvände i det avkylande vattnet i bågaren, som i sin tur värmdes upp. För fukttransport sker samma sak när fuktbelastningen avbryts, skillnaden är bara att fuktutbyte i materialporer är en mycket långsammare process än växling av värme i ledande material.

2.1.2 Konvektion

Luftrörelser som uppstår genom tryckskillnader betecknas konvektion. Tryckskillnader i byggnader uppstår på grund av vind, fläktsystem och termisk drivkraft, så kallad skorstensverkan.

Systematiska tryckskillnader som uppstår till följd av att varm luft är lättare än kall luft, och därför stiger, kan jämföras med en varmluftsballong som bärs upp av ett övertryck. Detta skapas i det senare fallet genom att luften värms upp med en gaslåga. Genom molekylernas ökade rörelseutrymme utvidgas den varma luften, vilket medför att lufttrycket ökar. I öppningen nedtill är trycket lika stort som i den omgivande luften utanför ballongen. I en byggnad fungerar det på liknande sätt. Kall luft sugas in genom ventiler eller dörr- och fönsterspringor, värms upp och stiger och ger ett undertryck som suger in ännu mer

luft. I husets övre del blir det övertryck och konvektionen drar upp fuktig luft som diffunderar in i byggmaterial eller ut i vindsutrymmen. Fuktig luft ansamlas på övervåningen medan undervåningen torkar ut. I äldre hus med självdragsventilation kan denna tryckskillnad ses under kalla vinterdagar. I den nedre våningen kan fönstren vara helt genomsiktliga medan övervåningens har rimfrost. Övertrycket har lett till att fuktig luft förts upp på andra våningen och kondenserat mot glasrutornas insidor.⁶

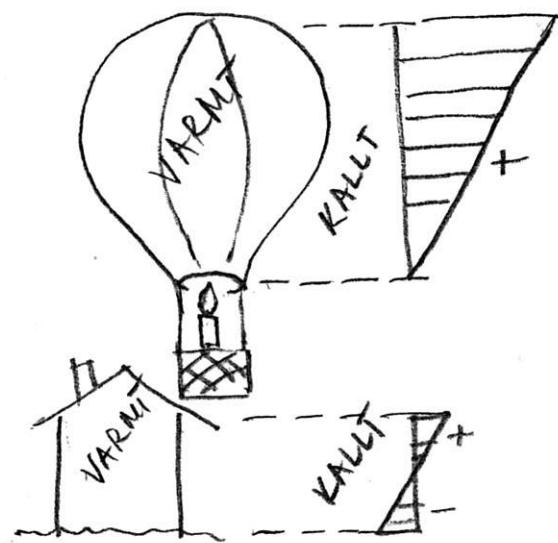


Fig 16. Tryckförhållandena är likartade i en byggnad och en varmluftsballong vilket har betydelse för konvektionens verkningar.

2.2 Ånghalt och relativ fuktighet

Vattenånga i luft anges som ånghalt, v , som beskriver hur många gram vatten som finns per kubikmeter luft. Mängden vatten som luften orkar bära är beroende av temperaturen. Den maximala kvantitet som luften kan hålla kallas dess mättnadsvärde. Den relativa fuktigheten, RF , är kvoten mellan aktuell ånghalt och mättnadsvärde, v_s , för den rådande temperaturen och anges i procent. $RF = v/v_s$. I juni är den relativa fuktigheten i Stockholmstrakten under dagen ungefär 65 % vilket innebär att 1 ku-

bikmeter luft innehåller cirka 11 gram vatten om temperaturen är +20°C (mättnadsvärdet är då 17,3 g/m³). Om temperaturen under natten går ner till +10°C överskrider mättnadsvärdet. Luften kan vid denna temperatur endast bära 9,4 g vattenångor och överskottet fälls ut som vatten, kondenserar, på de material som finns i närheten. Mer prosaiskt kallar vi detta för att daggen faller. Vintertid är RF i utomhusluft högre än under sommaren. I Stockholmstrakten innebär det cirka 85 %, vilket vid ±0°C

motsvarar 4 g vatten/m³. När kall utomhusluft genom ventilation tas in i en byggnad sjunker RF inomhus, men kompenseras delvis av att våra mänskliga aktiviteter genererar och tillför fukt.

Som redan nämnts är fuktens drivkraft skillnaden i luftens ånghalt som är oberoende av relativ fuktighet och temperatur. Med de värden som angivits i resonemanget ovan belyser följande räkneexempel detta:

$$v_i = v_u + \frac{G}{n \cdot v}$$

$$v_i = \text{ånghalt inne}$$

$$v_u = \text{ånghalt ute}$$

$$\frac{G}{n \cdot v} = \text{fukttillskott}$$

<p><u>Ånghalt ute</u> T = ±0°C RF = 85 % v = 0,85 · 4,86 = 4,08 g/m³</p>	<p><u>Ånghalt inne</u> T = 20°C v = 4,08 + 3 = 7,08 g/m³ Vid v = 7 g/m³, T = 20°C är RF enligt graf i Mollierdiagram 40 %</p>
--	--

$$T_u = \pm 0^\circ\text{C}$$

$$v_u = 4,08 \text{ g/m}^3$$

$$RF_u = 85 \%$$

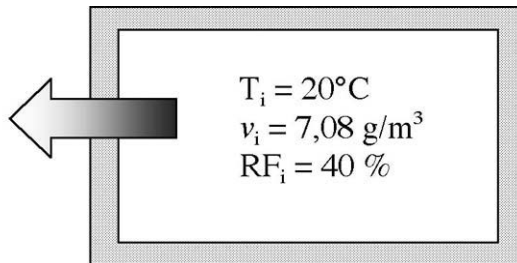


Fig 17. Fukttransportens drivkraft är skillnaden i ånghalt

Om fuktbelastning pågår tillräckligt länge under stationära förhållanden, det vill säga att temperaturen på ömse sidor inte ändras, kommer fukten från ena sidan att vandra genom hela väggen för att komma ut på den andra sidan. Detta händer sällan i praktiken eftersom utomhustemperaturen varierar över dygnet liksom fuktbelastningen inomhus.

3 **En fallstudie med jämförande beräkningar mellan några hygroskopiska material**⁷

Att mäta fukt och fuktvandring i material är svårt eftersom det inte finns några enkla metoder för detta. Istället får man arbeta med modeller, av vilka det finns många. En forskare vid KTH-Väg och Vatten, Ove Söderström, har kommit fram till att det finns närmare 80 olika teoribildningar som förklarar varför de olika materialspecifika sorptionskurvorna ser ut som de gör.

I debatten kring sjuka hus och inomhusklimat spelar fukt en viss roll. En del material har bättre fuktupptagande egenskaper än andra och kan därför vara av intresse för närmare studier. Lera anses ha god fuktbuffrande förmåga och med en fullskalestudie, som utfördes under hösten 2001, har jämförelser kunnat göras med några andra material med kända egenskaper. Resultatet från denna studie redovisas i avsnitt 3.2, *Kan rumsventilation reduceras om väggytorna består av hygroskopiska material?* där fuktdimensionering har beräknats utifrån ventilation och olika ytbeklädnad.

De parametrar som avgör olika materials fuktbuffrande förmåga är dess fuktkapacitans, som är beroende av den lagrande volymen, och tillgängligheten till denna, dvs dess ångpermeabilitet.

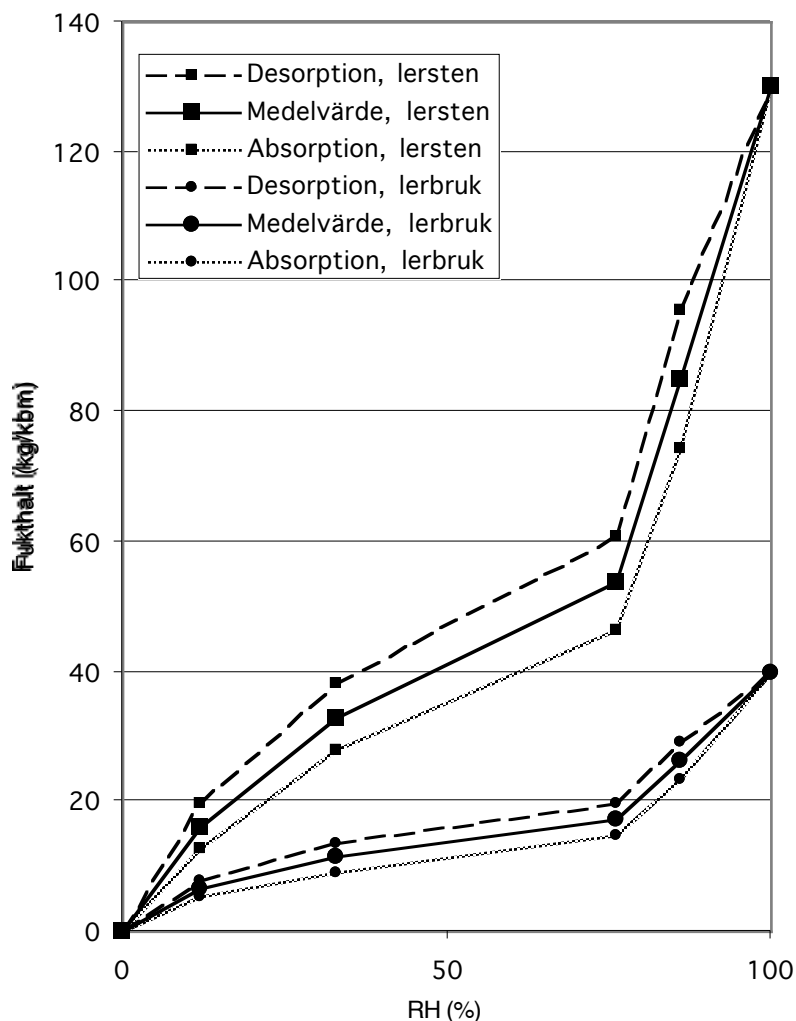
3.1 **Jämviktskurvan**

För att kunna göra beräkningar i byggmaterial med avseende på fukt krävs att man känner den materialberoende jämviktskurvan, även kallad sorptionsisoterm. Ur denna erhålls materialets fuktkapacitans som avläsas som lutningen hos sorptionsisotermen. Sorptionsisotermen är oberoende

av tiden och påverkas obetydligt av temperaturen. Arbetet med att ta fram jämviktskurvor är mycket tidskrävande och utförs i klimatkammare med konstant luftfuktighet. Materialproven som ska undersökas genomgår i första steget torkning respektive uppfuktning innan de monteras ovanpå skålar med mättade saltlösningar. Dessa saltlösningar ger olika specifika relativa fuktigheter. Proverna upptar, respektive avger vattenånga och processen pågår till dess jämvikt råder. Förändringarna mäts genom vägning och när provet inte längre ändrar vikt har jämvikt uppnåtts. Detta tar olika lång tid, från några veckor till flera månader, beroende på provets tjocklek.

Varje materialprov får två jämviktskurvor, en för uppfuktning och en för uttorkning. Vid framtagande av materialets fuktkapacitans spelar detta ingen större roll eftersom det är kurvans form, det vill säga lutning, som bestämmer dess värde. Den s-formade kurvan medför att fuktkapacitansen får olika värden mellan de olika intervallen av RF beroende på kurvans olika lutningar i grafen. Detta beror på att uppfuktningen/uttorkningen sker på skilda sätt vid olika RF i luften i det porsystem som finns i materialet där fuktransporten sker. Första fasen vid uppfuktning sker genom adsorption, vilket innebär att vattenmolekylerna genom starka attraktionskrafter adderas i ett enkelt lager till porernas väggar. Jämviktskurvan får då en stark lutning vilket framgår i figur 18 inom området RF 0 - 12. I nästa skede adderas flera vattenmolekyler och attraktionskrafterna avtar vilket kommer till uttryck i en utplaning av kurvan, området RF 33 - 76 % i figur 18. Slutligen blir de mindre porerna fyllda med vatten. Detta medför kapillär sugning och får till följd att kurvan stiger brant då fuktransporten sker i vatten- och ångfas samtidigt. I figur 18 framgår att vattentransporten ökar med stigande RF inom området 76 - 86 %.

Sorptionsisotermer för lersten och lerbruk



RF (%)	Desorption, lersten (kg/kbm)	Medelvärde, lersten (kg/kbm)	Absorption, lersten (kg/kbm)	Desorption, lerbruk (kg/kbm)	Medelvärde, lerbruk (kg/kbm)	Absorption, lerbruk (kg/kbm)
0	0	0	0	0	0	0
12	19,6	16,1	12,6	7,9	6,6	5,3
33	38,0	33,0	28,0	13,6	11,4	9,2
76	60,8	53,6	46,4	19,6	17,2	14,9
86	95,6	85,0	74,4	29,1	26,3	23,6
100	130,0	130,0	130,0	40,0	40,0	40,0

Fig 18. Sorptionsisotermer för lerstenar respektive lerbruk som tagits fram för att kunna bearbeta resultaten från provmätningar i ett fältförsök. De uppmätta värdena återfinns i tabellen.

3.1.1 Fuktkapacitans

Fuktkapacitans är ett uttryck som kan användas för materialets fuktlagringspotential. De erhållna värdena benämns effektiv fuktkapacitans och kan användas för att göra kvalitativa och kvantitativa analyser

på fuktbuffering. Under förutsättning att fukttinnehållet i luften är i jämvikt med materialets yta och gör harmoniska svängningar kan fuktutbytet vid ytan beräknas.

I figur 19 beskrivs den effektiva fuktkapacitansen som en funktion av perioden,

dvs en sinussvängning i tiden, för KC-
bruk, tegel, furu och lersten.

I fallet med en harmonisk svängning över
dygnet har lersten en effektiv fuktkapacitet
som motsvarar 18 m. Om fuktbelastningen
ger upphov till en svängning över dygnet
som motsvaras av $\pm 1 \text{ g/m}^3$, vilket motsva-
rar en förändring i RF på $\pm 6 \%$, är
mängden fukt som kan inlagras och avges

18 g/m^2 yta. Även om detta verkar lite
måste man hålla i minne att den expo-
nerade ytan i en byggnad är tämligen stor. I
avsnitt 3.2 redovisas beräknade exempel på
fuktbuffering med olika hygroskopiska
material där en finit differens beräknings-
modell har använts. Denna har prövats mot
uppmätta värden i fält och kalibrerats
gentemot dessa.

Material	Ångpermeabilitet (m^2/s)	Fuktgradient	Referens
KC-bruk	$1,0 \cdot 10^{-6}$	11,6	Nevander och Elmarsson (1994)
Tegel	$4,5 \cdot 10^{-6}$	6,7	Nevander och Elmarsson (1994)
Trä, furu	$0,55 \cdot 10^{-6}$	113,6	Nevander och Elmarsson (1994)
Lersten	$3,8 \cdot 10^{-6}$	47,9	Lindberg och Akander (2002)

Tabell 1. Materialvärden som använts i de redovisade beräkningarna är medelvärden för respektive intervall i de angivna referenserna. Värdena för tegel och trä har stora variationer och kan i extremfall överlappa varandra. Vid beräkningarna har mättnadsvärdet för vattenånga vid $+18^\circ\text{C}$ använts ($15,5 \text{ g/m}^3$). Fuktgradienten motsvarar lineariserat värde för RF i intervallet 33 - 76 %.

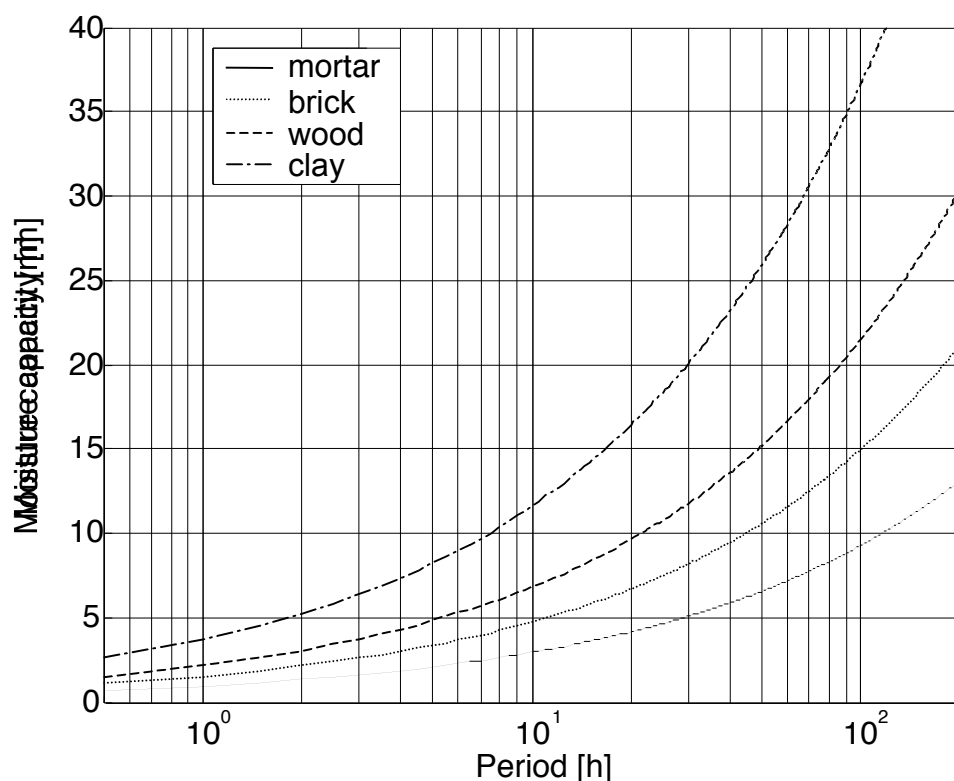


Fig 19. Effektiv fuktkapacitet för KC-bruk, tegel, trä och lersten (medelvärden inom intervall RF 33 - 76 %) som funktion av perioden. Luften fukthalt (i absoluta tal) är drivande kraft.

3.2 Kan rumsventilation reduceras om väggytorna består av hygroskopiska material?

Enligt Boverkets Byggregler, BBR, ska byggnader

”utformas så att luft-, ljus och vattenkvalitet, fukt och temperaturförhållanden samt hygienförhållanden blir tillfredsställande med hänsyn till allmänna hälso-krav”.⁸

Sanitetskraven medför att luften i en bostad måste bytas ut helt och hållet varannan timme. Luftväxlingen ska vara kontinuerlig i rum som används men kan reduceras när de är tomma. BBR säger att uteluft till bostäder i första hand ska tillföras rum eller del av rum för daglig samvaro och för sömn och vila. För att sanitetskraven ska uppfyllas rekommenderas därför att minsta tilluftsflöde ska vara 4 l/s per sovplats.

Genom att undersöka hur olika material uppför sig med avseende på fukt i ett normalstort sovrum när det används, och jämföra dessa värden med varandra går det att få en uppfattning om materialens fuktbufferande tendenser. Fallet med sovrum har valts som exempel eftersom det får en konstant och jämn fuktbelastning under en lång period då de sovande inte själva har möjlighet att påverka inomhusklimatet. Räkneexemplet baserar sig på mätningar som utförts i fullskaleförsök med avseende på väggar av murad lersten. De formler som använts som underlag för beräkningarna redovisas i avsnitt 3.3 *Beräkningsformler för fallstudien*.

Två personer sover mellan kl 22.00 och 06.00 i ett rum som är 3 x 4 x 2,5 m, dvs 30 m³ stort. Varje person avger 50 g vatten per timme. Beräkningar med en dynamisk modell utförs för väggmaterialen tegel, trä och lersten och jämförts med fuktvärden för ett helt tätt material som inte absor-

berar någon fukt. Materialtjockleken är 100 mm vilket medför att fukt under mätperioden inte hinner vandra genom väggen och falla ut på motstående sida. I exemplet med tegel och lersten beräknas mängden murbruk till 25 % av väggarean. Golv och tak består av icke fuktbufferande material, möblers inverkan på luftens ånghalt har inte beaktats. 4 m² har borträknats från väggarean motsvarande fönster och dörrar. Inomhustemperaturen är konstant +18°C. Enligt BBR ska luftflödet i fallstudien vara 1 omsättning/timme. (2 st x 4 l/s x 3 600 s / 30 000 l = 0,96) vilket är baserat på godtagbar luftkvalitet med avseende på fukt, koldioxid, lukt och emissioner.

Beräkningarna är utförda enligt följande förutsättningar:

- *Jämt luftflöde vid simulering med de olika materialen enligt BBR:s rekommendation. Temperaturen utomhus är +2°C och RF är 85 % (vilket motsvarar medelvärdet i Stockholmstrakten under vintern).*
- *Samma förutsättningar som i punkt 1 men med en högsta tillåtna ånghalt som motsvarar det framräknade värdet för det ångtäta rummet.*

3.2.1 Fall 1

Resultatet från fall 1 visas i nedanstående grafer. I figur 20 beskrivs hastigheten på fuktflödet in och ut genom väggytan. Flödet anges positivt då fukten vandrar in i väggen och negativt då väggytan avger fukt till rumsluften. Resultatet indikerar att lerstensväggen kan buffra den största mängden vattenånga. Beroende på materialets fuktlagrande egenskaper dämpas dessa under perioderna av uppfuktning och uttorkning, vilket medför att material med stor fuktkapacitet ger mindre utslag när fuktflödet förändras.

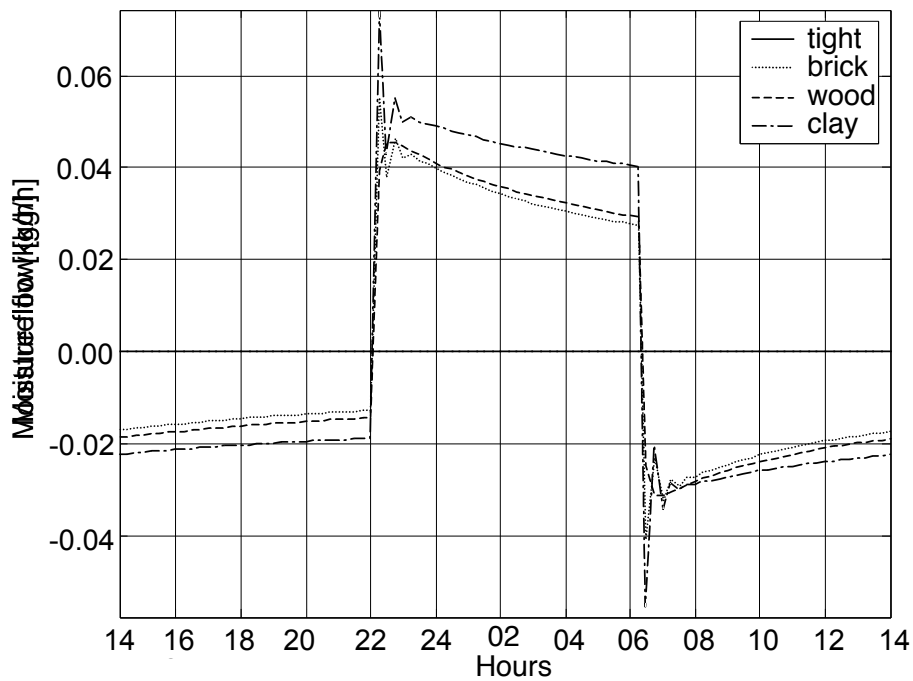


Fig 20. Fuktkflöden genom väggyta. Flödet från rumsluften genom väggytan har positivt tecken och får i motsatt riktning negativt tecken. Hacken i kurvorna för murverken är beräkningstekniska och beror på att två olika material (sten och bruk) exponeras mot rumsluften.

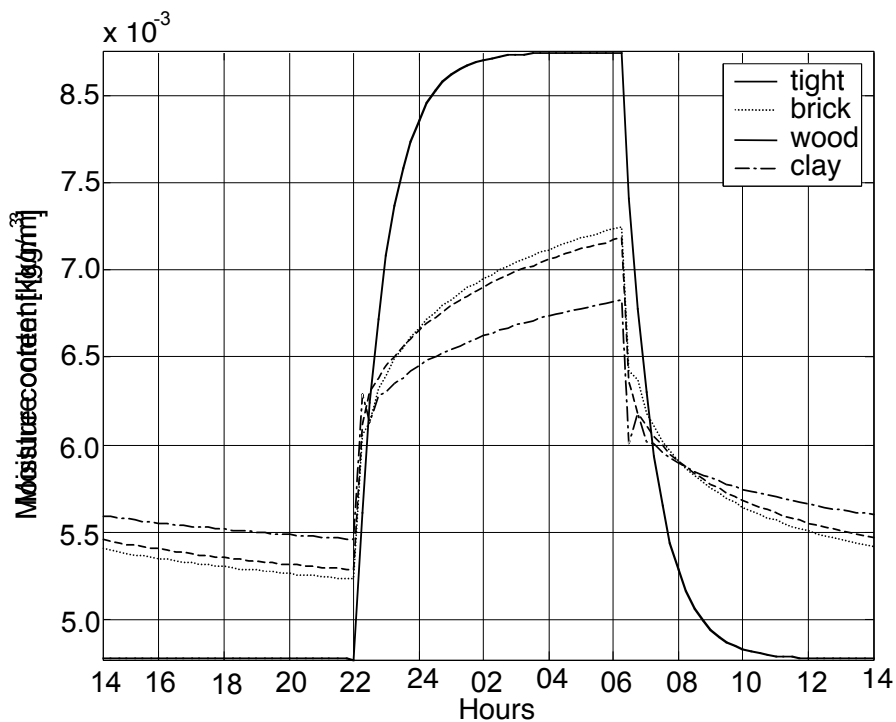


Fig 21. Fukthalten i rummets inomhusluft. Vid rumstemperaturen +18°C och luftflödet 4 l/s per person svänger RF i det täta rummet under dygnet mellan 31 och 57 % och med de fuktbufferande materialen mellan 36 och 46 %.

3.3.2 Fall 2

I fall 2 har syftet varit att reducera ventilationsflödet utan att RF stiger till oacceptabla nivåer. Den maximalt tillåtna nivån är de värden som det fukttäta rummet i förra exemplet erhöll. Resultatet visar i detta fall att ventilationsflödet kan minskas ungefär

till hälften och därmed minska den mängd energi som behövs för att driva fläkten i ventilationsanläggningen. Beräknad energivinst under drift visas i tabell 2. Även här, vilket illustreras i nedanstående figur, visar sig lerstensväggen ha den största förmågan att dämpa nivåerna på fuktigheten i rumsluften.

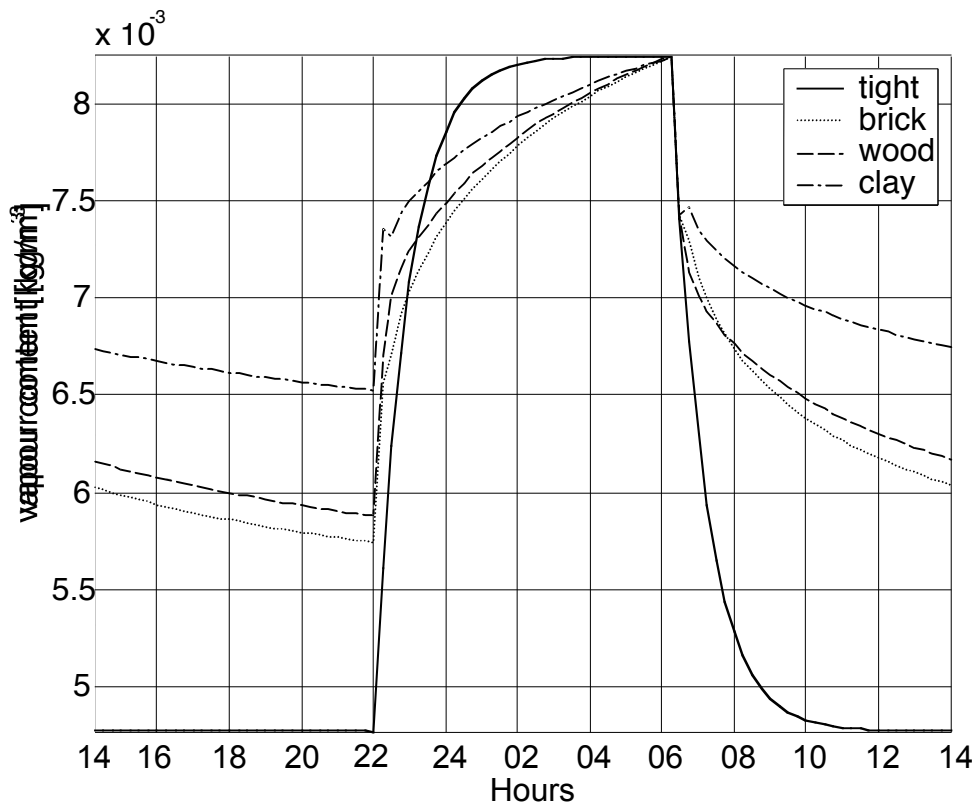


Fig 23. Fukttinhåll i rumsluften som funktion av tiden med ett maximalt tillåtet värde på luftens ånghalt. Värdena på RF i luften blir för den fukttäta väggen desamma som i förra exemplet, 31 och 57 %. I luften där väggmaterialet består av trä- och tegel blir RF som lägst 37 % och lerstensväggen lägsta värde blir 42 %.

Väggmaterial	Luftomsättning/ timme (n)	Reduktion i luftflöde (%)
Fukttät	0,96	00,0
Tegelmur	0,60	37,2
Massivt trä	0,57	41,0
Lerstensmur	0,48	50,5

Tabell 2. Reduktion av ventilationsflöde per timme när högsta tillåtna fukthalt motsvaras av samma kvantitet som uppstår i det fukttäta rummet.

3.2.3 Slutsatser

Tunga konstruktionsmaterial som har god förmåga att buffra fukt och värme kan inte helt ersätta ventilationen nattetid, med avseende på fukt, då vi sover, men reducera behovet avsevärt. Dagtid är situationen annorlunda. Genom att då och då vädra med vidöppet fönster byts den förorenade luften snabbt ut. Tack vare materialets tröghet finns så pass mycket värme och fukt lagrad i väggarna att rumsluften snabbt återfår en komfortabel nivå. Detta bygger dock på ett stort individuellt kunnande och ansvars-

tagande som i dagens teknifierade och välregisserade samhälle kan vara svårt att uppnå.

De i fallstudierna teoretiskt framräknade värdena bestämmer inte generella lämplighetsnivåer för ventilationsflöden utan är endast baserade på att fukt inte ska överstiga kritiska värden allför lång tid. För att ge en bättre bild av luftkvalitet med avseende på fukt och föroreningar måste teoretiska beräkningsmodeller kompletteras med praktiska mätningar i fält.

3.3 Beräkningsformler för fallstudien

Mängden fukt, W , som inlagras och avges kan för en halvoändlig massa uppskattas till:

$$W = \sqrt{\frac{2 \cdot \delta_v}{\omega \cdot v_s(\theta)}} \cdot \left(\frac{dw}{d\varphi}\right) \cdot \hat{v} \quad (\text{kg/m}^2)$$

δ_v = materialets ångpermeabilitet (m^2/s)

$v_s(\theta)$ = luftens mätnadsvärde vid temperaturen θ (kg/m^3)

ω = vinkelhastighet som är $\frac{2 \cdot \pi}{\text{period}}$ (rad/s)

$\frac{dw}{d\varphi}$ = sorptionskurvas lutning (kg/m^3)

Luftens fuktinnehåll betecknas här \hat{v} och är svängningens amplitud. Den effektiva fuktkapaciteten, W , är termen under rottecknet. Ovanstående ekvation ger bäst överensstämmelse när materialparametrarna är konstanta, begränsningarna är harmoniska, under en period.

Grundekvationen för beräkningarna är:

$$g = -D_w \cdot \frac{dw}{dx} \quad (\text{kg/s} \cdot \text{m}^2) \quad (\text{I})$$

g = fuktflödet per kvadratmeter väggyta (kg/s)

D_w = fuktdiffusiviteten (m^2/s)

w = fukthalten i materialet (kg/m^3)

x = avståndet från materialets yta (m)

Fuktdiffusiviteten kan uttryckas enligt

$$D_w = \frac{\delta_v \cdot v_s(\theta)}{\frac{dw}{d\varphi}} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (\text{II})$$

δ_v = ångpermeabiliteten hos materialet,

$v_s(\theta)$ = luftens mättnadsånghalt vid temperaturen θ

$\frac{dw}{d\varphi}$ = materialets fuktkapacitans, lutning hos sorptionsisotermen.

Inträngningsdjupet blir för en svängning med en period som motsvarar vinkelfrekvensen ω följande

$$d_{in} = \sqrt{\frac{2 \cdot D_w}{\omega}} \quad (\text{m}) \quad (\text{III})$$

W = den mängd fukt som lagras i konstruktionen vid en fukthaltssvängning på ytan med amplituden w , motsvarar

$$W = d_{in} \cdot w \quad (\text{kg}/\text{m}^2) \quad (\text{IV})$$

Genom att transformera fukthaltsändringen till ändringen i ytans ånghalt, v , fås

$$W = d_{in} \cdot \frac{\frac{dw}{d\varphi}}{v_s(\theta)} \cdot v \quad (\text{kg}/\text{m}^2) \quad (\text{V})$$

Insättning av definitionen för inträngningsdjup ger ett värde på hur mycket fukt som kan lagras, räknat per kvadratmeter väggyta, givet amplituden på ytans ånghaltssvängning v , enligt

$$W = \sqrt{\frac{2 \cdot \delta_v}{\omega \cdot v_s(\theta)}} \cdot \left(\frac{dw}{d\varphi}\right) \cdot v \quad (\text{kg}/\text{m}^2) \quad (\text{VI})$$

Fuktkapaciteten (fuktlagringsförmågan), Ξ , ges av

$$\Xi = \sqrt{\frac{2 \cdot \delta_v}{\omega \cdot v_s(\theta)}} \cdot \left(\frac{dw}{d\varphi}\right) \quad (\text{m}) \quad (\text{VII})$$

Ekvationen gäller endast för processer där konstruktionen kan anses halv-
oändligt djupt ur fuktperspektivet, dvs att fuktsvängningarna är snabba i
förhållande till konstruktions tjocklek. Svängningarna förmår då inte penetrera
hela tjockleken.

Referenser

- Akander, Jan, 2001. Muntl + fuktberäkningar.
- Anderlind, Gunnar. 1995 (1991). *Fuktboken från Gullfiber*. Billesholm.
- Björk, Folke, 2001. Muntl.
- Boverket. 1998. *BBR 1999 - Boverkets byggregler, BFS 1993:57 med ändringar t o m BFS 1998:38*. Karlskrona.
- McCabe, Kevin, 2000. Muntl.
- Gudmundsson, Gunnar, 2001. *Byggnadsvård i praktiken, del II*. Gysinge.
- Kellner, Johnny; Stålbom, Göran. 2001. *Byggande och miljö*. Stockholm.
- Lindberg, E-R; Akander, J. 2001. *Power-optimized Ventilation Considering Moist-buffering of the Surface Layer of Clay*. 2002. Konferensrapport, Moderner Lehmabau 2002. Berlin.
- Nevander, Lars Erik; Elmarsson, Bengt. 1994. *Fukthandbok - praktik och teori*. Stockholm.

Fotnoter

-
- ¹ Nevander, L E; Elmarsson, B, 1994, s 277.
- ² Kellner, J; Stålbom, G, 2001, s 39.
- ³ ibid, s 63.
- ⁴ Gudmundsson, G, 2001, s 22.
- ⁵ Anderlind, G, 1995 (1991), s 30.
- ⁶ ibid, s 30 - 31.
- ⁷ Lindberg, E-R; Akander, J, 2001, (opubl).
- ⁸ Boverket, 1998, s 87.