

LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA
FuktCentrum vid Lunds universitet

Avd. Byggnadsmaterial

**FUKTPÅVERKAN PÅ MATERIAL,
KRITISKA FUKTNIVÅER**

- en informationskrift

Lars-Olof Nilsson

ISSN: 0348-7911 TVBM

Lunds Tekniska Högskola
FuktCentrum vid Lunds universitet,
avd Byggnadsmaterial
Box 118

221 00 LUND

Tel: 046-2227415
Fax: 046-2224427

www.byggnadsmaterial.lth.se

Innehåll

1	Bakgrund, inriktning, begränsningar	4
1.1	Bakgrund	4
1.2	Inriktning	4
1.3	Begränsningar	4
1.4	Skriftens uppläggning	5
1.5	Tillkännagivanden	5
2	Materialgrupper – översikt	6
2.1	Träbaserade material	6
2.2	Cementbaserade material	6
2.3	Metaller	7
2.4	Keramer	7
2.5	Polymerer	7
2.6	Andra mineraliska material	7
3	Fukt i material, allmänt	8
3.1	Fukt i material – väsentliga samband	8
3.2	Fuktens roll vid materialpåverkan	11
3.3	Fuktpåverkan – definitioner	12
3.4	Kritisk fuktnivå – acceptabel fuktnivå	13
3.5	Problemställning vid fuktdimensionering	15
4	Fuktrörelser, deformationer	18
4.1	Fri krympning/svällning allmänt	18
4.2	Fri krympning/svällning hos träbaserade material	20
4.3	Fri krympning hos cementbaserade material	22
4.4	Exempel på fri svällning/krympning av andra material	23
4.5	Krökning p g a fuktgradient och fuktprofiler	24
4.6	Krypning	27

5	Mekaniska egenskaper	29
5.1	Hållfasthet	29
5.2	Styvhet (E-modul)	31
6	Termiska egenskaper	32
6.1	Värmekapacitet	32
6.2	Värmekonduktivitet	32
7	Fuktegenskaper	36
7.1	Fuktbindning/fuktkapacitet	36
7.2	Fukttransportegenskaper	38
8	Transportprocesser	42
8.1	Gastransport	42
8.2	Jontransport, transport av lösta ämnen	44
9	Kemiska och elektrokemiska reaktioner, metallkorrosion	48
9.1	Cementhydratation	48
9.2	Karbonatisering	49
9.3	Alkali-proteinreaktioner	49
9.4	Alkali-ballastreaktioner	50
9.5	Ettringitbildning	51
9.6	Metallkorrosion	51
10	Armeringskorrosion	53
10.1	Initiering i kloridfri miljö	53
10.2	Initiering i kloridmiljö	54
10.3	Propagering av armeringskorrosion	55
10.4	Livslängd p g a armeringskorrosion	56
11	Fysikaliskt angrepp, frost	57
12	Påväxt av mögel och bakterier	59
12.1	Fuktpåverkan på svampväxt, allmänt	59
12.2	Fuktkrav för synligt mögel på invändiga ytor	61
12.3	Fuktkrav för sporbildning	63
12.4	Fuktkrav för avgivning av toxiska ämnen	64
13	Rötsvampangrepp	66
14	Emissioner	67

14.1	Primära emissioner (egenemissioner)	67
14.2	Sekundära emissioner	69
15	Index	71
16	Referenser	73

1 Bakgrund, inriktning, begränsningar

1.1 Bakgrund

Fukt påverkar många materialegenskaper och hur material fungerar i olika avseenden. Fukt medverkar ofta till nedbrytning av material och till uppkomst av sekundära emissioner. Fukt är ibland den helt avgörande parametern. De kritiska gränserna när förändringar på grund av fukt är i många fall relativt väl kända.

FuktCentrum, och dess föregångare Fuktgruppen, har gett ut en mängd informationsskrifter allmänt om fukt, om materialegenskaper och fuktmätning, om fukt i olika byggnadsdelar och om fuktdimensionering. En skrift har saknats om kritiska fuktnivåer och om hur fukt påverkar olika material. Denna skrift syftar till att fylla en del av detta tomrum.

1.2 Inriktning

Skriften ger en översikt över på vilka olika sätt fukt medverkar i förändringar av material, materialegenskaper och materials beteende. Den beskriver också, baserat på litteraturuppgifter, hur stor inverkan är av fukt och var de kritiska nivåerna ligger, dvs. den försöker kvantifiera påverkan på material.

1.3 Begränsningar

Fuktpåverkan beskrivs som en lokal effekt i en punkt i ett material eller på en materialyta. Hur fukt påverkar en produkt eller materialkombination som utsätts för en viss fördelning av fukten behandlas inte. Detta skulle kräva exakt kännedom om hur fukten är fördelad i varje enskilt fall och därmed en fuktmekanisk analys baserad på geometri, materialegenskaper, omgivande klimat och fukthistorien. Sådana analyser är inte syftet med denna skrift; för detta hänvisas till övriga informationsskrifter om fuktmekanik, byggnadsdelar och fuktdimensionering.

1.4 Skriftens uppläggnig

Fuktpåverkan beskrivs först på rena materialegenskaper och därefter på olika typer av processer som sker i material. Först behandlas renodlade processer och därefter alltmer komplicerade och kopplade processer där fuktens medverkan är mångfaldig.

1.5 Tillkännagivanden

Skriftens tillkomst har finansierats av SBUF. Ursprunglig insamling och genomgång av litteratur har utförts först av Mårten Janz och därefter av Björn Johannesson. Bidrag med litteratur, referenser och konstruktiva synpunkter har lämnats av ett flertal personer, bland andra Jesper Arfvidsson, Folke Björk, Peter Brander, Per Gunnar Burström, Sigurd Karlsson, Ingemar Samuelson, Per-Ingvar Sandberg och Anders Sjöberg. Ett stort tack riktas till finansär och bidragsgivare.

2 Materialgrupper – översikt

Grupper av material påverkas av fukt på olika sätt. En viss typ av fuktpåverkan är inte alls relevant för en grupp av material, medan en annan grupp av material kan vara extremt känsliga för denna fuktpåverkan. Det är följaktligen inte meningsfullt att redovisa alla typer av fuktpåverkan för alla materialgrupper. Nedan ges istället en genomgång av olika material och de viktigaste typerna av fuktpåverkan för just det materialet eller materialgruppen.

Materialen grupperas efter deras huvudsakliga beståndsdelar eftersom detta utgör den viktigaste parametern för konsekvensen av fuktpåverkan. Genomgången är bara översiktlig; för en fylligare information hänvisas till respektive avsnitt i senare kapitel. Indexuppställningen i sista kapitlet kan vara till hjälp för att hitta alla relevanta uppgifter för ett speciellt material.

2.1 Träbaserade material

Träbaserade material är ytterst fukt känsliga på många sätt. I första hand är det deras känslighet för biologiskt angrepp och deras fuktrörelser som ger en stor begränsning i deras användning i fuktiga miljöer. De angrips främst av svampar, också vid relativt låga fuktnivåer. Fuktrörelserna är både stora, jämfört med de flesta andra material, och fuktrörelserna är stora i hela fuktområdet, dvs. också vid mycket låga fuktnivåer.

2.2 Cementbaserade material

Cementbaserade material tål vatten bra och behöver faktiskt vatten för att härda ordentligt. Cementbaserade material är porösa och kan skadas av frost om porsystemet är för vattenmättat. Betong t ex, och en del fasadputsar, förses med ett särskilt luftporsystem som skall kunna ta hand om expansionen då vatten expanderar i samband med frysning.

Många nedbrytningsprocesser i cementbaserade material, eller hos ingjuten stålarmering, är kraftigt fuktberoende.

2.3 Metaller

Metallens känslighet för fukt visar sig främst i form av elektrokemisk korrosion. Denna fukt känslighet kräver att många metaller omsorgsfullt måste ytbehandlas för att tåla fuktpåverkan.

2.4 Keramer

Keramer är kemiskt okänsliga för vatten. De påverkas främst av frost, om vattenmättnadsgraden är extremt hög och bränningsgraden är låg. Vatten medverkar också i saltutfällningar och saltsprängning.

2.5 Polymerer

Många polymerer har betydande fuktrörelser. Fukt påverkar polymerers beständighet främst genom att möjliggöra transport av alkali från cementbaserade material som kombineras med polymerer.

2.6 Andra mineraliska material

Andra mineraliska material som lättbetong, puts- och murbruk, natursten etc. påverkas av fukt främst genom frostdbrytning i våta miljöer. En del av dem har också betydande fuktberoende rörelser.

3 Fukt i material, allmänt

Här ges en kort genomgång av väsentliga fuktbegrepp och var fukten finns i material av olika slag. En översikt ges också av vilken principiell roll fukten spelar i olika typer av förändringsprocesser. Slutligen definieras begreppet ”fuktpåverkan”.

3.1 Fukt i material – väsentliga samband

Grundläggande för alla fuktbedömningar är sorptionskurvan för ett material, dvs. sambandet mellan hur mycket fukt ett material innehåller och hur fuktigt materialet är. Sorptionskurvan visar också och är en följd av, åtminstone i viss utsträckning, hur och var fukten är bunden i ett material. En översikt av detta ges nedan.

3.1.1 Fuktbegrepp och samband

Hur mycket fukt ett material innehåller kan anges på flera sätt. De i Sverige vanligaste är:

- fukthalt w [kg/m^3],
- fuktkvot u [vikt-%],
- mättnadsgrad S [-]

Hur ”fuktigt” ett material är ett mått på vilket tillstånd fukten har i ett material. Fukttillståndet anges med:

- relativ fuktighet RF [%] i materialets porsystem
- vattenaktivitet a_w hos det fysikaliskt bundna vattnet i porsystemet
- porfuktighet RF [%], som är samma sak.

Fukttillståndet kan vara lågt även om relativa fuktigheten är hög, och tvärtom. Sambandet mellan dessa två storheter för ett material visas med materialets sorptionskurva eller jämviktsfuktkurva. Det principiella utseendet hos detta samband åskådliggörs i Figur 3.1.1.

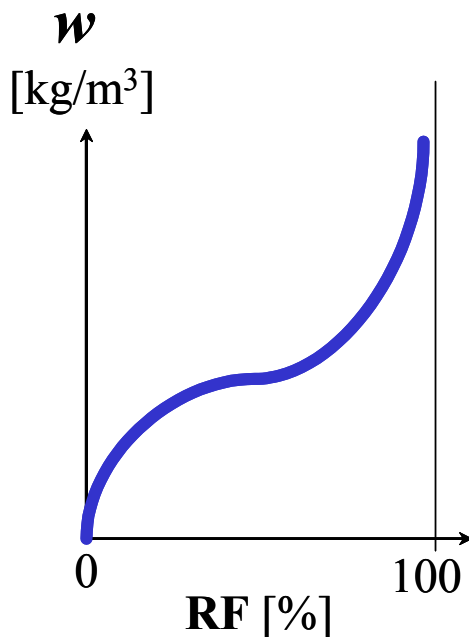
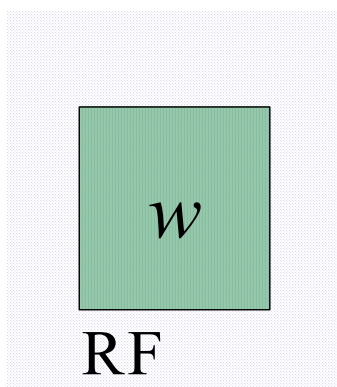


Fig. 3.1.1 Sambandet mellan relativ fuktighet RF och fukttinnehåll w : sorptionskurvan

Sorptionskurvan anger vilket fukttinnehåll w ett material kommer att ha när det står i jämvikt med luft som har en viss relativ luftfuktighet RF . Sorptionskurvan säger också vilken porfuktighet RF ett material har, om det har ett visst fukttinnehåll w . Sambandet gäller alltså i båda riktningarna, jfr Figur 3.1.2 och 3.1.3.

$RF \Rightarrow w$



$w \Rightarrow RF$

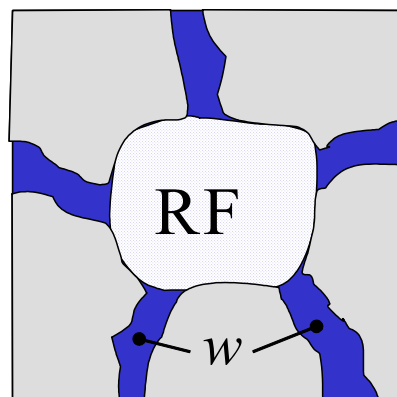


Fig. 3.1.2 Sambandet mellan relativ fuktighet RF och fukthalt w gäller i båda riktningar.

För ett visst material är följaktligen fukttinnehållet w och porfuktigheten RF starkt knutna till varandra. I en punkt i materialet måste båda ligga på

sorptionskurvan. Sorptionskurvan visar den lokala jämvikten i varje punkt i materialet, jfr figur 3.1.3.

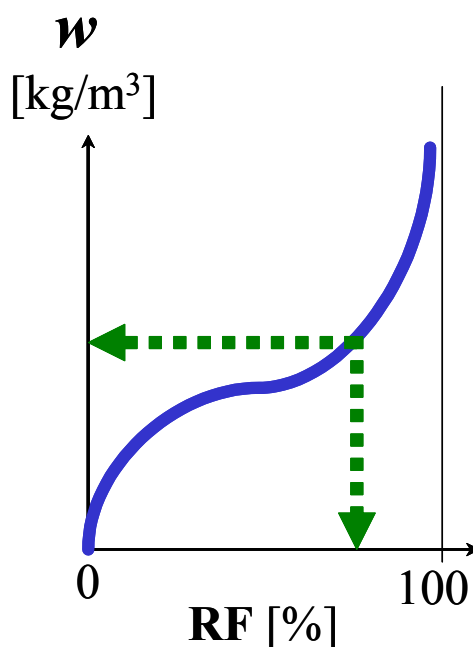


Fig. 3.1.3 Sambandet mellan RF och w: båda måste ligga på sorptionskurvan!

En exakt beskrivning fordrar att sorptionskurvan är noggrant kvantifierad. Avancerade tillämpningar kräver ibland att man tar hänsyn till hysteres, dvs. att sorptionskurvan ligger högre vid uttorkning än vid uppfuktning, och scanningkurvor, då uttorkning följs av uppfuktning eller omvänt.

3.1.2 Fuktens plats i material

Konsekvenserna av en fuktpåverkan på material bestäms mycket av hur och var fukten är bunden i materialet. Detta kan i viss utsträckning utläsas ur sorptionskurvan. Sorptionskurvan för ett material är en följd av materialets inre struktur, främst storleken och egenskaperna hos de inre ytorna, den ”specifika ytan”, och materialets porstorleksfördelning. Fuktbindningsegenskaperna hos ett material bestämmer därför dels hur mycket fukt det finns i ett material vid en viss fuktpåverkan men också var i materialets struktur denna fukt sitter bunden.

En principfigur ges i Figur 3.1.4. Vid låga RF är fukten bunden på de inre materialytorna, som ”adsorbat”, i allt tjockare lager ju högre RF är. I material med liten inre yta, grovporösa material som t ex keramiska material som tegel, är denna mängd fukt mycket liten. I cementbaserade material är däremot porsystemet mycket fint och den inre ytan är stor. I sådana material är mängden fukt som är bunden på inre ytor stor också vid låga RF och en stor andel av den totala mängden fukt vid högre RF. En del material har en stor inre yta utan att ha ett finporöst porsystem. Ett viktigt exempel är träbaserade material som knappast har några små porer alls, men där den inre ytan av molykylkedjorna

har en stark bindningsförmåga för vatten. I träbaserade material sitter fukten på dessa inre ytor i hela det hygroskopiska området, upp till nära 100 % RF.

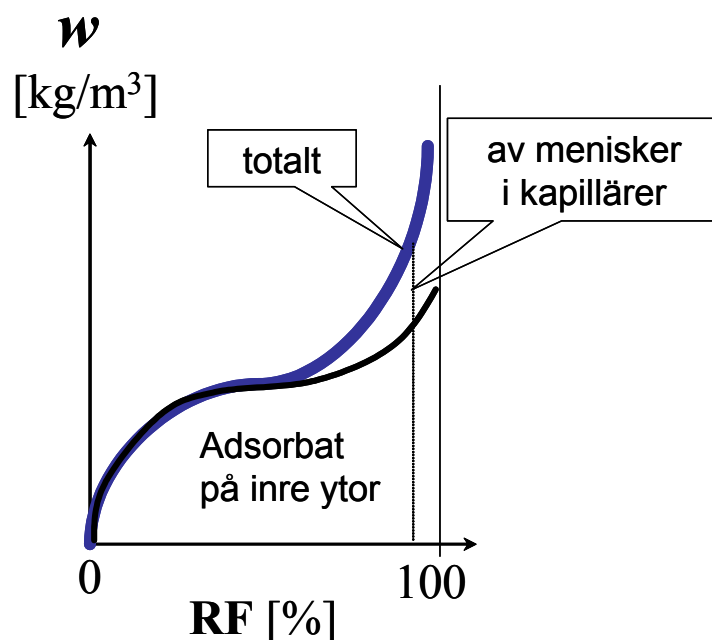


Fig. 3.1.4 Fukts plats i materialstrukturen vid olika RF

3.2 Fuktens roll vid materialpåverkan

Då material påverkas av fukt sker ofta förändringar av materialen. Dessa förändringar kan vara av olika slag. Olika förändringsprinciper är följande:

- FUKTRÖRELSER (svällning, krympning, sprickor, välvning, kantresning, blåsor)
- NEDBRYTNING (förstörelse av material: förtvålning, frost, röta, korrosion, etc.)
- EGENSKAPSÄNDRING (förändring av materialegenskaper och därmed materialets funktion, t ex värmekonduktivitet eller hållfasthet)
- MISSFÄRGNING/UTSEENDEFEL (saltutfällningar på t ex betongytor, puts och murverk, fuktfläckar, synlig mögelpåväxt)
- LUKT & EMISSIONER (“mögel”, “ammoniak”, “oktanol”, formaldehyd, VOCar, MVOC, etc.)

Vid fuktrörelser förändras oftast inte materialets inre struktur utan förändringen är främst synlig som en makroskopisk, yttre dimensionsförändring. En förändring i form av nedbrytning, där fukt medverkar, kan innebära att materialets inre struktur förstörs i stor eller liten grad. En ”nedbrytning”, p g a

fukt, kan också innebära en större eller mindre förändring av någon väsentlig materialegenskap som radikalt förändrar materialets funktion, utan att materialstrukturen nödvändigtvis förändras. Missfärgning och utseendedefekter kan vara en följd av fuktpåverkan utan någon mätbar förändring av materialstrukturen eller någon egenskap. Lukt och avgivning av ämnen från material är en vanlig följd av fuktpåverkan på många material, i en del av utan att materialets övriga funktion eller struktur förändras. I en del fall sker dock en emissionsavgivning som en följd av att något material, eller komponent i ett material, bryts ner.

Vattnets möjliga funktionssätt vid fuktpåverkan är flera och olika i olika förändringsprocesser. I vissa fall spelar vattnet olika roller i olika delar av en förändringsprocess. Vattnets principiella roller kan vara en eller flera av följande:

- Ett ”delmaterial” med annorlunda egenskaper
- Lösningemedel, för reaktanter och joner
- Transportmedium
- Expansionsmedel
- En vätska med större eller mindre porvattenundertryck

Beroende på vilken funktion fukten har i en förändringsprocess kan konsekvenserna, och de kritiska fuktnivåerna, av fuktpåverkan att vara helt olika. Vid mätning av effekterna av fuktpåverkan, och vid tolkning av mätresultat, bör därför fuktens principiella roll analyseras i detalj. En generalisering av en förändring p g a fukt, och av uppmätta kritiska fuktnivåer, från en enstaka undersökning för en materialkvalitet måste därför göras med viss försiktighet.

3.3 Fuktpåverkan – definitioner

Ett material påverkas av fukt som regel genom att materialet är relativt torrt och blir uppfuktat. Uppfuktningen kan ske från omgivande luft eller från ett intilliggande, fuktigare material. I båda fallen blir materialets yta först fuktig medan materialets inre delar kan vara relativt torra under lång tid efter det att ytan påverkats av fukt. Fuktpåverkan kan då ge förändringar på materialytan eller i materialets ytskikt.

Längre tids fuktpåverkan förändrar fuktfördelningen, så att de inre delarna av materialet blir allt fuktigare, tills ett jämviktstillstånd uppnås. Hur detta ser ut beror på omgivningsvillkoren på materialets andra ytor, dvs. fukt- och temperaturförhållanden och eventuella ytskikt på materialet. Materialet behöver alltså inte bli ”jämnfuktigt” efter lång tids fuktpåverkan. En icke-konstant fuktfördelning, en ”fuktprofil” kan ge en fuktpåverkan av helt annat slag än en jämn fuktfördelning.

I vissa fall består fuktpåverkan av att materialet påverkas av inbyggd fukt i materialet, normalt från tillverkningen. Vanliga exempel är fukt från

blandningsvattnet i betong och bruk och vatten från ånghärdningen av lättbetong. Denna fuktpåverkan sker normalt i hela materialvolymen från början och ändras med tiden så att ytorna och ytskikten först blir torrare, efter hand som materialet torkar. Under torkningen uppstår då ”fuktprofiler” i materialet, som är en annan typ av fuktpåverkan.

”Fuktpåverkan” på ett material kan därför vara av två principiellt olika slag:

1. Lokal fuktnivå ger lokal påverkan
2. Fördelning av fukt ger påverkan på materialskikt/produkt/komponent

Lokal fuktnivå i en punkt i ett material är en fuktpåverkan som påverkar materialet i just denna punkt. Denna påverkan kan naturligtvis få konsekvenser för andra delar av materialet, men den ursprungliga fuktpåverkan kommer från en liten del av materialet.

Vilka konsekvenserna blir av en fuktpåverkan i form av en fuktfördelning (en ”fuktprofil”) i ett, eller flera, materialskikt beror inte bara på fuktnivån och fuktfördelningen utan också på andra egenskaper hos materialet eller materialkombinationen.

3.4 Kritisk fuktnivå – acceptabel fuktnivå

För att en förändring av materialet skall ske, på grund av en fuktpåverkan, krävs som regel att en kritisk fuktnivå överskrids, dvs. att fuktpåverkan blir större än en viss nivå. Hur förändringen beror av fuktpåverkans storlek är principiellt olika för olika typer av förändringar. Några exempel på hur fuktnivån påverkar förändringar p g a fukt åskådliggörs i Figur 3.4.1.

Ett exempel ges i Figur 3.4.2, för ren fuktpåverkan på linoleummatta¹. Under 90 % RF blir det inga förändringar alls av fuktpåverkan; styvheten är opåverkad av fukt. Efter fuktpåverkan vid RF över 90 % blir mattan avsevärt styvare; en ”kritisk RF” (RF_{krit}) kan då definieras och kvantifieras till ca 90 % RF. Det bör observeras att exemplet bara gäller förändring av styvheten! Andra förändringar p g a fukt kan naturligtvis också ske om linoleummattor utsätts för fuktpåverkan och den kritiska gränsen för när sådana förändringar sker kan naturligtvis vara annorlunda. Att styvheten förändras radikalt vid fuktpåverkan över 90 % RF indikerar dock att något väsentligt sker i materialet och att dessa förändringsprocesser också kan ge upphov till andra förändringar.

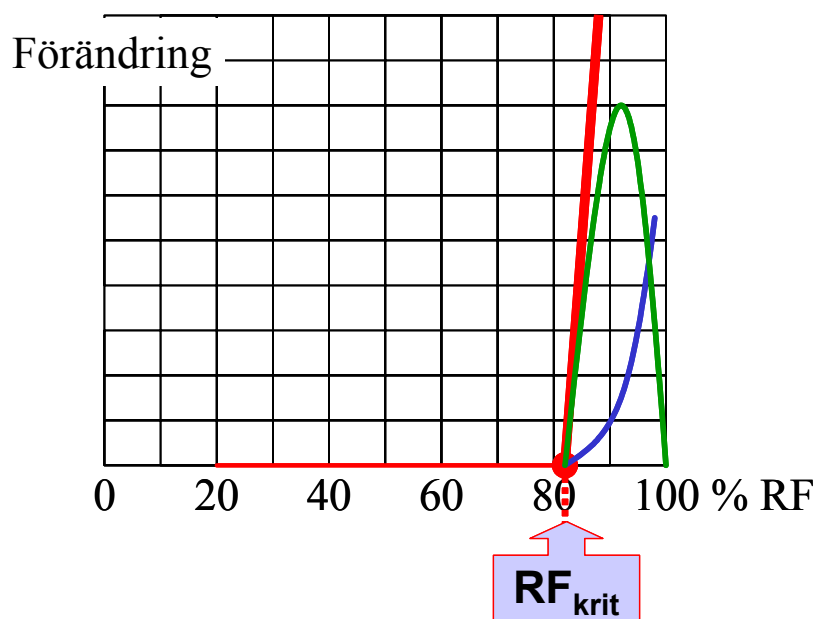


Fig. 3.4.1 Några principiella samband mellan fuktpåverkan (relativ fuktighet RF) och förändringar p g a fukt

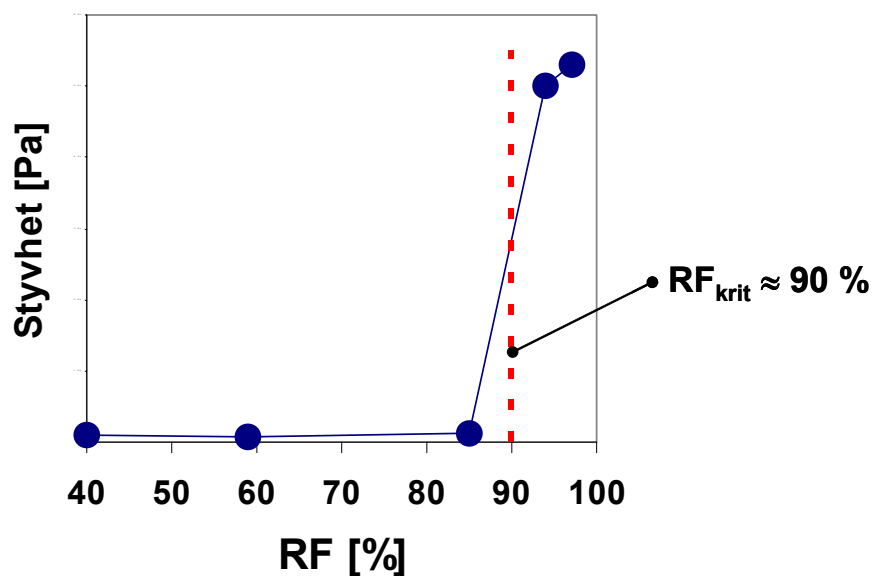


Fig. 3.4.2 Förändringen av styvheten hos linoleummatta efter fuktpåverkan vid olika fuktnivåer¹.

För vissa typer av förändringar sker förändringen mera gradvis, utan någon lätt identifierbar kritisk gräns, se Figur 3.4.3. För att då kunna definiera en kritisk eller acceptabel gräns, måste en viss acceptabel grad av förändring definieras. Exemplet kan gälla rörelser p g a fukt, som sällan har en skarp gräns vid en viss fuktnivå utan där rörelsens storlek kontinuerligt ändras på storleken av fuktpåverkan.

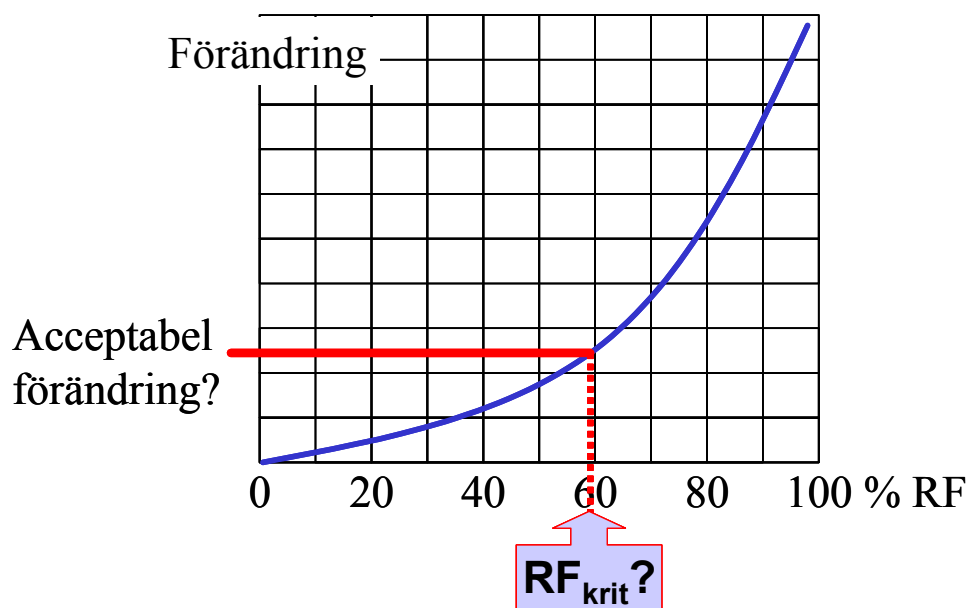


Fig. 3.4.3 Gradvis förändring på grund av allt större fuktpåverkan, exempelvis rörelser p g a fukt

3.5 Problemställning vid fuktdimensionering

”Fuktdimensionering” innebär traditionellt att välja material och utformning av en byggnadsdel med hänsyn till fuktpåverkan så att icke önskvärda förändringar undviks. I sin enklaste form kan problemställningen beskrivas med en enkel olikhet:

$$RF_{AKT} < RF_{KRIT}$$

RF_{AKT} (hur fuktigt blir/är det?)

RF_{KRIT} (hur mycket tål materialen?).

Ovanstående olikhet innebär att villkoret i en fuktdimensionering kan uppfyllas antingen genom att välja material och utformning så att känsliga material blir tillräckligt torra (har/får lägre RF_{akt}) eller genom att välja material som är mindre fuktkänsliga (har större RF_{krit}).

För att en fuktdimensionering skall vara meningsfull krävs att kunskapen om de kritiska fuktnivåerna är någorlunda känd. Kunskapen om gränserna kommer

dock alltid att vara mer eller mindre osäkra. Eftersom möjligheten att förutsäga vilken fuktpåverkan som kommer att uppstå också är behäftad med osäkerheter, kommer framtida fuktdimensionering att ibland göras med probabilistiska metoder, dvs. metoder som tar hänsyn till osäkerheterna, jfr Figur 3.5.1.

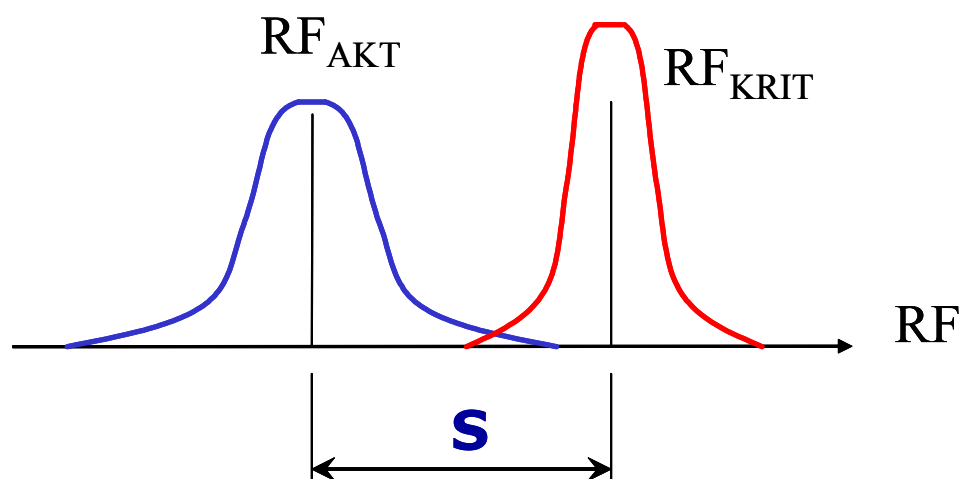


Fig. 3.5.1 Problemställning vid probabilistisk fuktdimensionering, där hänsyn tas till osäkerheter i storleken hos fuktpåverkan och de kritiska gränserna.

Lösningen är naturligtvis att införa någon grad av säkerhetsmarginaler, t ex S i figuren. Hur stor denna skall vara måste avgöras från fall till fall där hänsyn tas till dels osäkerheternas storlek och dels till hur allvarliga konsekvenserna blir av en fuktförändring.

I många fall med bristande beständighet har fukt ett avgörande inflytande på hur fort en nedbrytning sker eller om den sker överhuvudtaget. Vid livslängdsdimensionering kan man välja mellan två principiella alternativ: 1) undvika att nedbrytning sker alls eller 2) kontrollera hastigheten i nedbrytningsförloppet. Dessa båda alternativ åskådliggörs i Figur 3.5.2.

Fuktdimensionering kan normalt sägas vara en livslängdsdimensionering av den första typen. Genom att kontrollera fuktnivån i förhållande till den kritiska nivån för att nedbrytning skall kunna ske, med viss säkerhetsmarginal, säkerställer man att den möjliga typen av nedbrytning inte påbörjas överhuvudtaget. Teoretiskt kan man tänka sig, i speciella fall, att man tillåter att fuktnivån överskrider den kritiska, men att man väljer en lösning där man kan kontrollera hastigheten i nedbrytningsförloppet.

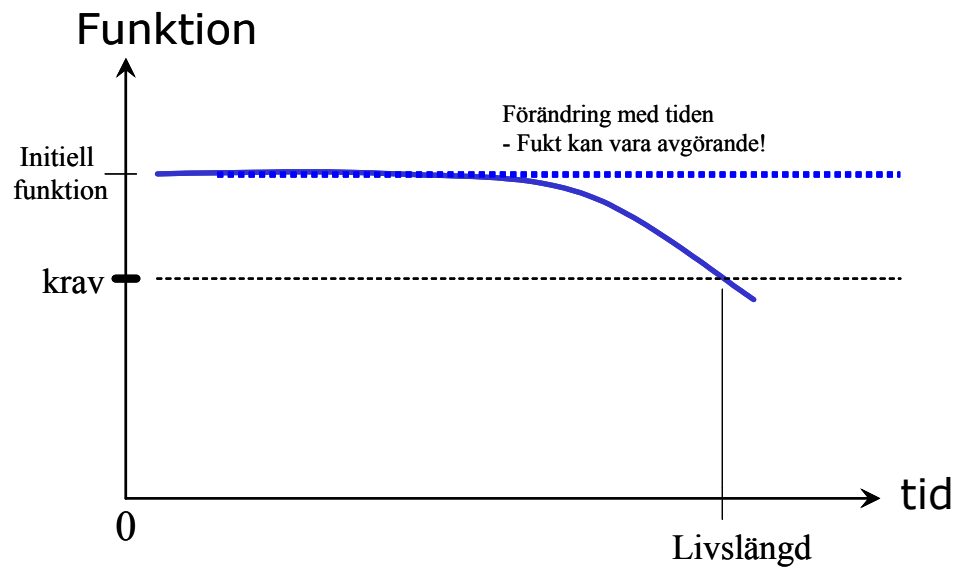


Fig. 3.5.2 Fuktens principiella roll i olika förändringsförlopp under ett materials livslängd

4 Fuktrörelser, deformationer

Fuktrörelser sker när ett material avger fukt eller tar upp fukt, vilket ger upphov till krympning respektive svällning. Deformationer under mekanisk belastning påverkas av fuktnivån och fuktändringar, se avsnittet om krypning.

4.1 Fri krympning/svällning allmänt

Mekanismerna bakom fuktrörelser är flera. Vilken mekanism som är viktigast är dels beroende av vilket material det är fråga om och dels vilket fuktområde rörelserna sker inom². Vissa fuktrörelser, och då främst vid höga RF i finporösa material, är en följd av att vatteninnehållet i kapillärporerna ändras vid uttorkning eller uppfuktning. Undertrycket i porvattnet förändras radikalt vid RF-ändringar och meniskerna intar nya lägen då fuktinnehållet ändras. Porvattenundertrycket i den vattenfyllda delen av materialet ”drar ihop” materialet vilket ger upphov till deformationer. På samma sätt kan ytspänningen i stora sammanhängande partier av ett materials inre yta ”dra ihop” materialet vid fuktavgång. Det adsorberade vattnet på inre materialytor som inte gränsar till större porer, upptar en viss volym som naturligtvis förändras då fuktinnehållet förändras, varvid fuktrörelser uppkommer. Dessa rörelser kan, dels av geometriska skäl och dels därför att dessa inre ytor är bundna till varandra, vara delvis förhindrade varvid ändringar i mängd adsorbat ger upphov till en ”tryckändring”, ett ”disjoining pressure”², åtminstone vid lite högre RF.

”Fri” svällning/krympning är fuktrörelser utan hinder och utan fuktgradienter. Detta är egentligen ett teoretiskt begrepp som kan ifrågasättas, därför att inga fuktrörelser är helt fria! Även om ett material är mekaniskt helt frikopplat från omgivningen uppstår hinder för fuktrörelser när fuktförhållandena i materialet ändras. Vissa delar av materialet ändrar fuktnivån tidigare än andra och får därför ”fria fuktrörelser” tidigare vilket ger upphov till rörelseskillnader och därmed spänningsskillnader. Effekten borde vara större ju större skillnaden är i fuktnivå mellan materialtes olika delar. Mätning av ”fria” fuktrörelser borde därför göras med små och långsamma ändringar av fuktnivån i materialet. Uppgifter i litteraturen om ”fria” fuktrörelser måste behandlas med viss försiktighet av denna anledning.

På samma sätt bör man ifrågasätta korttidsmätningar av ”fria fuktrörelser”. Eftersom man ofta använder provkroppar av relativt stor dimension vid mätning av fuktrörelser, hinner man inte alltid att uppnå fullständig fuktjämvikt med omgivningen. De fria fuktrörelserna har därför inte alltid kunnat ske fullt ut under mätningen.

För de flesta hygroskopiska material, dvs. material som innehåller fukt vid relativa fuktigheter under ca 98 % RF, är de ”fria” fuktrörelserna relativt linjärt beroende av fukttinnehållet. Torkar dubbelt så mycket fukt bort, krymper materialet dubbelt så mycket. Detta empiriska samband gör det möjligt att bedöma hur den fria svällningen och krympningen sker då RF ändras, se Figur 4.1.1, helt enkelt genom att översätta fukthaltsändringar till RF-ändringar med hjälp av sorptionskurvan. α_f är den maximala krympningen/svällningen, i m/m, från vattenmättnad till helt torrt material.

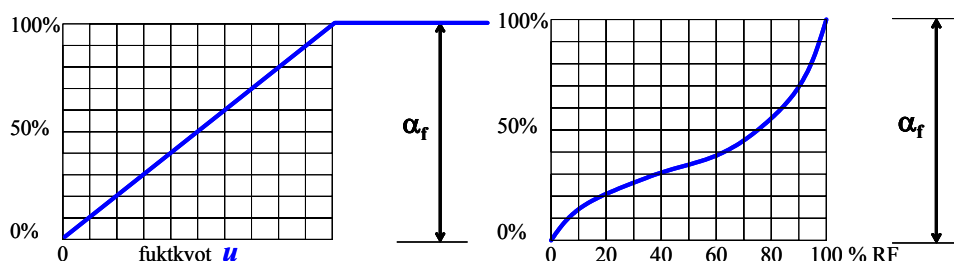


Fig. 4.1.1 Krympning/svällning som principiell funktion av RF för många hygroskopiska material

Fuktrörelserna vid en viss RF-ändring är störst vid höga RF, över 80-90 % RF. Krympningen är också stor vid RF-ändringar vid låga RF, under 20 % RF, som t ex ofta uppkommer i mekaniskt, väl ventilerade byggnader under kalla vintrar då uteluften är mycket torr.

Om krympningen/svällningen sker i bara en del av hela fuktintervallet, från vattenmättnad till fullständig torrhet, kan man utnyttja sorptionskurvan för att uppskatta hur stor andel av den totala fuktrörelsen α_f som då kan ske, jfr Figur 4.1.2.

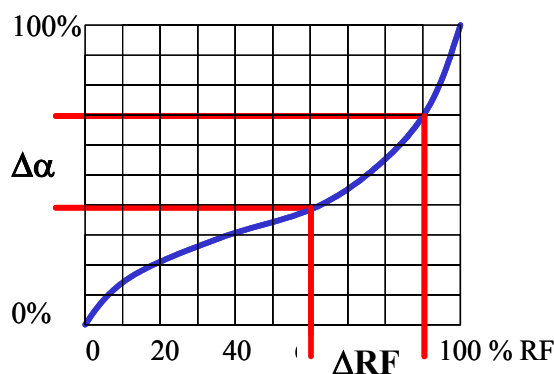


Fig. 4.1.2 Krympning/svällning $\Delta\alpha$ i en begränsad del av fuktintervallet 0-100 % RF material

Denna allmänna beskrivning av ”fri krympning” nyanseras nedan för några

materialgrupper där fuktrörelser är särskilt viktiga.

4.2 Fri krympning/svällning hos träbaserade material

Träbaserade material har inga egentliga små porer. Så gott som all fukt vid RF lägre än 100 % är bunden mellan cellulosa-, hemicellulosa och ligninmolekylerna i cellväggarna. De stora cellhålrummen, ”lumen”, innehåller då inget vatten. Fuktkvoten då alla sådana inre ytor upptagit sin maximala mängd vatten, men de stora cellhålrummen är tomma, kallas ”fibernätnadspunkten” u_f . Fibernätnadspunkten är ca 30 vikt-%; något högre för björk och bok, något lägre för ek, alm och ask³. Vid fuktkvoter högre än fibernätnadspunkten sker inga fuktrörelser, eftersom meniskerna i de stora cellhålrummen har liten krökning och därför inte kan ge upphov till särskilt stora porvattenundertryck.

De fria fuktrörelserna $\Delta\alpha$ hos träbaserade material kan beskrivas som i det närmaste helt linjärt beroende av fuktkvoten u vid fuktkvoter under fibernätnadspunkten³:

$$\Delta\alpha = \frac{\Delta u}{u_f} \alpha_f \quad [4.2.1]$$

där α_f är maximala fuktrörelsen, dvs. från fibernätnad till fullständigt torrt material. α_f är naturligtvis olika för olika träbaserade material och för många är den högst olika i olika riktningar, jämför exemplet i Figur 4.2.1. Rörelsen är störst i tangentiell riktning, dvs. parallellt med årsringarna, och ca 20 gånger mindre i fiberriktningen.

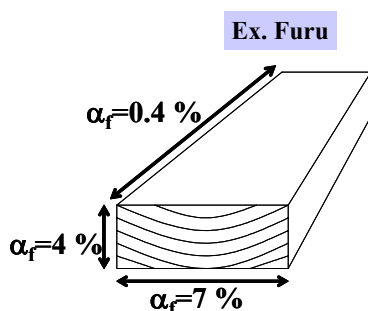


Fig. 4.2.1 Exempel på maximal krympning/svällning α_f för furu

Fuktrörelserna hos trä är extremt stora. De maximala rörelserna i tangentiell led kan vara över 10 % (för bok) medan de är minst ca 5 % för de träslag som har minst rörelser (t ex teak och mahogny).

För många träprodukter anges fuktrörelserna i ett mindre fuktintervall än mellan 0 och u_f , ofta mellan två RF-nivåer. α_f kan då uppskattas från ekvation [4.2.1] och figur 4.1.2.

Eftersom fuktrörelserna är mycket olika i olika riktningar kommer ett stycke trä att deformeras olika beroende på hur det är utsågat ur en trästam. En klassisk

bild som visar detta principiellt återges i figur 4.2.2. där det tydligt framgår att krympningen i tangentiell riktning är störst och vilken effekt det har.

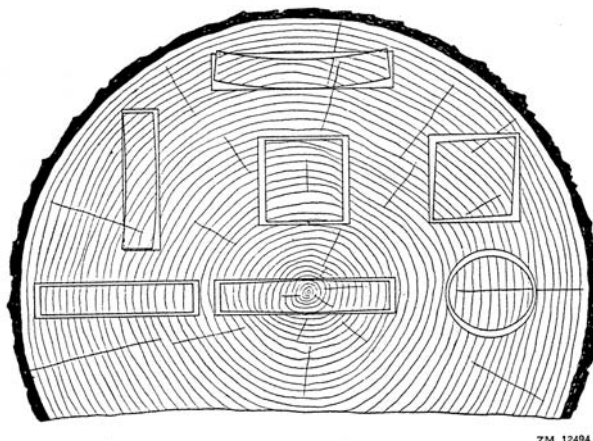


Fig. 4.2.2 Exempel på deformation hos virkesdelar beroende på hur de är utsågade, Wood Handbook (1955)⁴

Trästycken får ofta en distorsion i tre dimensioner i samband med uttorkning, se figur 4.2.3. Vilken typ av distorsion man får bestäms av skillnad i virkesegenskaper både i längsled och tvärlid. Avgörande är bland annat avståndet till märgen och de stora skillnader i krympningsegenskaper träfibren då har. Växtvridenhet är en annan viktig parameter som kraftigt påverkar hurdana virkesdeformationer man kan få i samband med uttorkning.

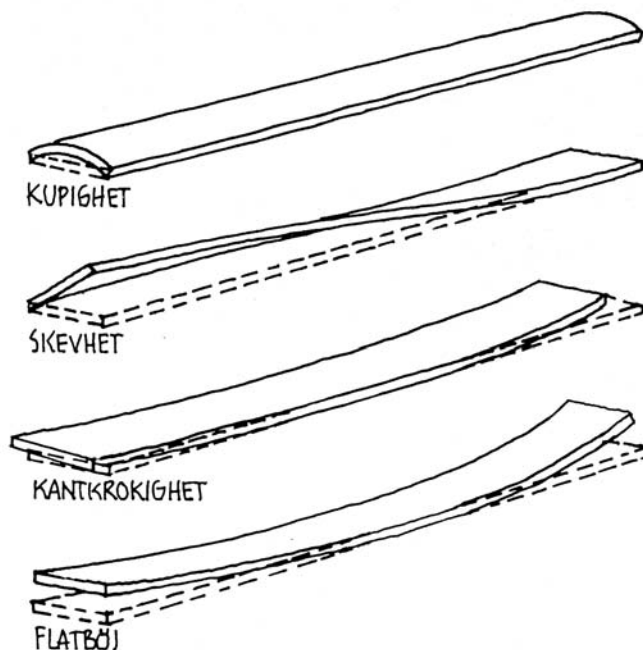


Fig. 4.2.3 De olika typerna av distorsion hos en planka vid uttorkning, beroende på virkesegenskaper i tre dimensioner

4.3 Fri krympning hos cementbaserade material

Cementbaserade material har två typer av ”porer”. ”Gelporer” bildas inuti reaktionsprodukten av cement + vatten, cementgelen. Den innehåller adsorberat vatten i hela fuktområdet och gelen krymper när detta adsorbat torkar ut ur gelen. ”Kapillärporer” är utrymmet mellan cementkornen som inte fyllts med reaktionsprodukter. De är mycket större än gelporerna och innehåller fukt bara vid RF över ca 45 %. Vattnet är bundet med kapillärkrafter som ger stora porvattenundertryck när fukten i kapillärporerna successivt torkar bort. Porvattenundertrycket ”drar ihop” materialet så att det krymper, mer och mer ju mer vatten som torkar bort och ju större vattenundertrycket blir.

Andelen gelporer och kapillärporer i cementbaserade material avgörs av materialsammansättningen, främst genom vattencementtalet vct och materialets ålder.

Figur 4.3.1 ger en principiell bild av krympning och svällning hos ett cementbaserat material.

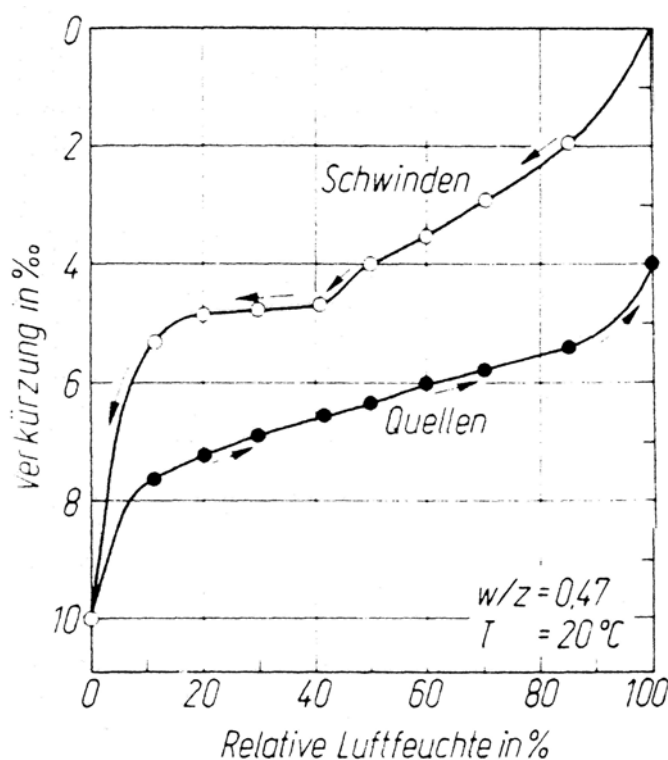


Fig. 4.3.1 Principbild över krympning och svällning hos ett cementbaserat material

Av figuren framgår främst två saker. Krympningskurvan påminner mycket om sorptionskurvan för ett cementbaserat material, dvs. krympningen är nära proportionell mot fukthaltsminskningen, som påpekats i figur 4.1.1. Av figuren framgår också att krympningen inte är reversibel om materialet torkar under 11 % RF; ett cementbaserat material som torkar mycket får en bestående krympning. Det är främst gelen som krymper irreversibelt, vid mycket låga RF.

4.4 Exempel på fri svällning/krympning av andra material

Många material krymper när de torkar, medan andra knappast krymper alls. För många material är krympningen kopplad till uttorkning av en stor mängd adsorbat ur ett finporöst porsystem eller från adsorptionsplatser på ”knippen” av materialmolekyler. En del material har också en stor krympning kopplad till uttorkning av kapillärkondenserat vatten ur ett porsystem med porer upp till ca 500Å. Material med huvuddelen av poreerna betydligt större än så, krymper inte när fukten torkar ur de poreerna.

Exempel på material som inte krymper är många keramiska material. De har som regel ett stort porsystem och kan innehålla mycket fukt, men vid uttorkning blir krympningen obetydlig. Porsystemet är så grovporöst att stora porvattenundertryck bara kan uppstå i en mycket liten del av porsystemet. Mängden adsorbat är försumbar.

Högtrycksånghärdad gasbetong, s k lättbetong, krymper däremot kraftigt vid uttorkning, både vid höga RF och vid låga, se figur 4.4.1.

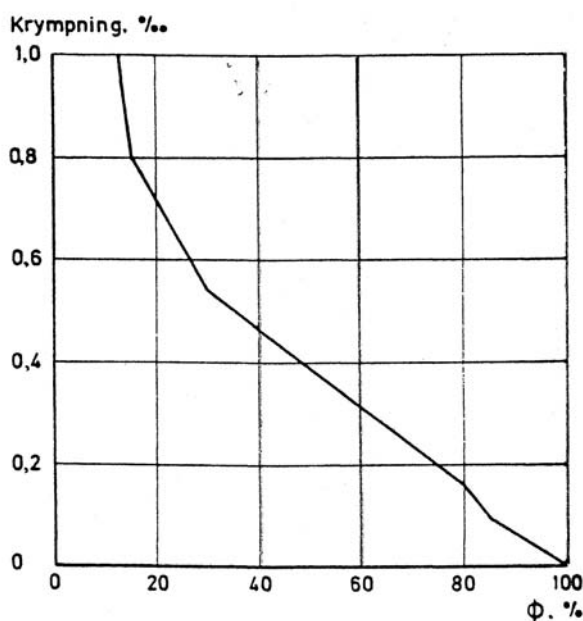


Fig. 4.4.1 Krympning hos högtrycksånghärdad gasbetong (”lätต์betong”) vid uttorkning till jämvikt med olika RF

Lätต์betong har två helt olika porsystem, som gradvis töms på vatten vid uttorkning, i hela RF-området.

Många polymerer sväller vid uppfuktning. Ett exempel för PVC-mattor visas i figur 4.4.2.

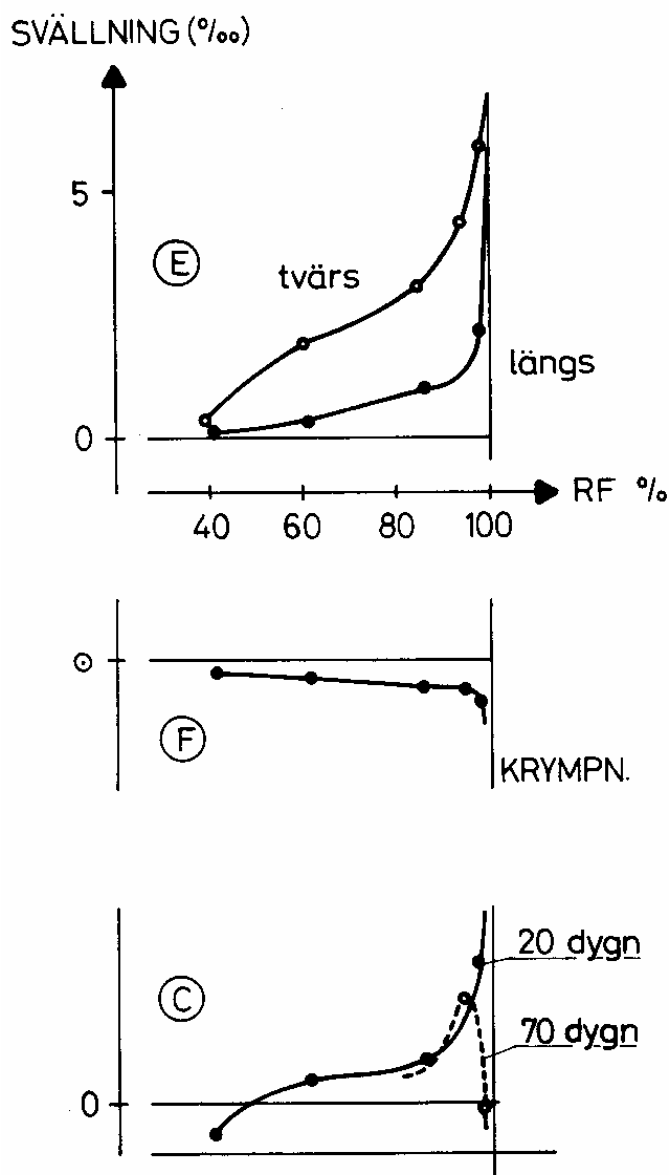


Fig. 4.4.2 Svällning hos tre PVC-mattor vid uppfuktning från rumsklimat till jämvikt med olika RF

Svällningen hos matta C och E är proportionell mot fukthaltsökningen. Matta F, och matta C efter en viss tid, krymper däremot vid uppfuktning! I dessa två fall beror det på att mjukgörare avgår ur mattorna vid uppfuktning. Mjukgöraravgången ger en krympning som dominerar över en svällning p g a fuktupptagning. Mjukgöraravgången, och därmed krympningen, blir större ju högre RF är.

4.5 Krökning p g a fuktgradient och fuktprofiler

Ett homogent material som påverkas av fukt på så sätt att det uppstår en fuktgradient genom materialet kommer att krökas. Beroende på utgångsläget sker samtidigt en krympning eller svällning. Om fuktfördelningen är krökt

uppstår dragspänningar i de yttre delarna, som kan ge ytsprickor. Krökning i kombination med egenvikt kan ge dragspänningar och sprickrisk i ovansidan. Förloppet åskådliggörs principiellt i figur 4.5.1.

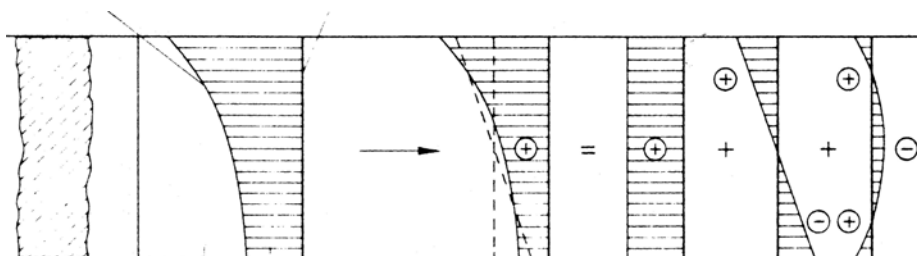


Fig. 4.5.1 Fuktfordelning (till vänster) och resulterande spänningsfordelningar (till höger) vid krympning förorsakad av en osymmetrisk uttorkning

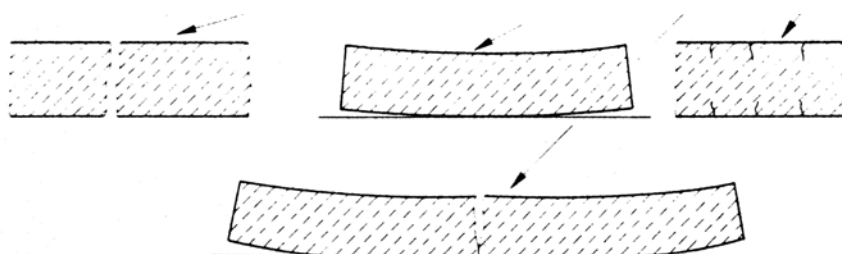


Fig. 4.5.2 Möjliga konsekvenser av krympning förorsakad av en osymmetrisk uttorkning

Ett aktuellt exempel på krökning p g a fuktgradient visas i figur 4.5.2. En golvbeläggning av ett träbaserat material som läggs på ett underlag med golvvärme får en stor temperaturgradient. Temperaturfördelningen från inneluften, förbi övergångsmotståndet vid träytan och ner genom trägolvet ger upphov till en RF-fördelning enligt figuren så att hela trägolvet blir betydligt torrare än inneluften och så att trägolvet blir betydligt torrare än den övre. Risken är följaktligen stor att trägolvet krymper i sin helhet och att det krymper mer i underkant än i ovankant, dvs. att det kommer att bukta uppåt.

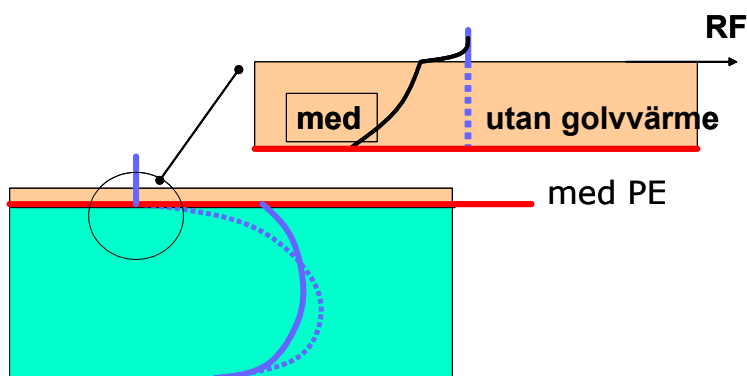


Fig. 4.5.3 Förväntad RF-fördelning i ett träbaserat material som lagts på ett golv med golvvärme, med fuktspärr emellan

Risken för att trägolv skall bukta upp på detta sätt är naturligtvis större för massiva, tjocka golvbrädor. Det finns dock olika sätt att välja och kombinera virkesbitar så att denna risk minskar.

Fuktprofiler ger naturligtvis upphov till spänningar på grund av att krympningen i de torraste delarna, eller svällningen i de fuktigaste, förhindras av övriga delar av materialet. Ett typexempel visas i figur 4.5.4.

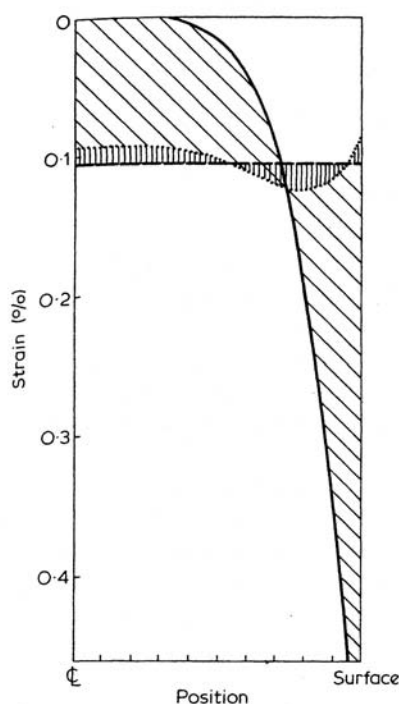


Fig. 4.5.4 Krympningsrörelser vid dubbelsidig uttorkning; endast högra hälften av materialet visas.

Den heldragna kurvan visar den fria krympning som materialet skulle få om varje skikt vore fritt rörligt utan hinder, ”tvång”, från övriga delar. På grund av tvånget måste materialets hela tvärsnitt krympa likformigt, enligt den punktstreckade linjen. Det innebär att de yttersta delarna får stora dragspänningar och en viss relaxation p g a krypning. De innersta delarna får tryckspänningar och en viss minskning av krympning p g a krypning. Den kvarstående töjningen visas som en kurva med prickar och vertikala linjer. En ”fri krympning” inkluderar alltså mycket komplicerade förlopp på olika djup i ett material som torkar och krymper!

Ensidig uttorkning, eller uppfuktning, ger en töjnings- och spänningsbild som liknar den i figur 4.5.4. Spänningarna då ger naturligtvis upphov till en krökning av materialet. Om spänningarna är stora kan plastiska, ej återgående, deformationer uppstå och krökningen blir då permanent. Den kvarstår alltså även efter att fukten utjämnats och fuktgradienter och fuktprofiler försvunnit.

Ett exempel på detta är kantresning hos golvspånskivor på grund av fukt i mattlimmet, se figur 4.5.5.

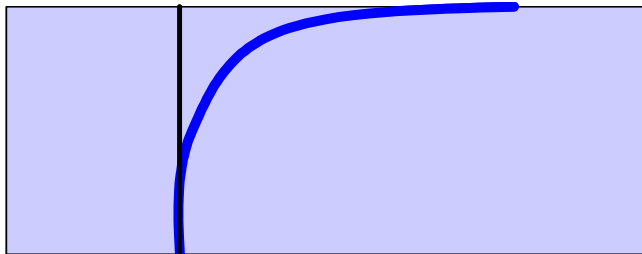


Fig. 4.5.5 Approximativ fuktfördelning efter att en golvspånskiva uppfuktats av fukten i ett mattlim

Enbart fukttilförseln från ett vattenbaserat mattlim kan ge upphov till en permanent krökning⁵. Figur 4.5.5 visar fuktfördelning efter applicering av en PVC-matta med ett vattenbaserat lim. Fukten från limmet tränger ner en bit i golvspånskivan och skulle ha gett en stor svällning av det översta skiktet om det kunde röra sig fritt. Hela spånskivan kröker sig uppåt, men tryckspänningarna i det översta skiktet är så stora att det uppstår plastiska deformationer. När fukten utjämnats kvarstår de plastiska deformationerna i övre delen, vilket resulterar i att den övre delen av skivan dras ihop och kröker skivan på andra hållet. Slutresultatet blir en kvarstående kantresning!

4.6 Krypning

Krypning får inte förväxlas med krympning, som är något helt annat och som är fuktberoende på ett helt annat sätt. Krympning är en typ av fuktrörelse som uppkommer då ett material torkar, dvs. då fukt lämnar materialet. Krypning däremot är en deformation som uppkommer under långvarig, mekanisk belastning och ökar mest just efter pålastning men som kan fortsätta under mycket lång tid. Vid vilken fuktnivå krypningen sker och om fuktförhållandena varierar under belastningen har stor inverkan på hur stor krypningen blir och hur snabbt den sker.

Data för krypning under fuktpåverkan finns framförallt för trä- och cementbaserade material. Effekten av fuktpåverkan påminner starkt om varandra för olika material. Därför visas här bara principfigurer, som kan anses vara representativa för flera olika material, även om absolutvärdena skiljer sig. Figur 4.6.1 visar skillnaden mellan grundkrypning och uttorkningskrypning. Figur 4.6.2 visar tidsförloppet.

Krypningen är större ju fuktigare materialet är, dvs. om en långvarig belastning ligger på ett material eller en konstruktion är omgivande klimat avgörande för hur stor krypdeformationen blir.

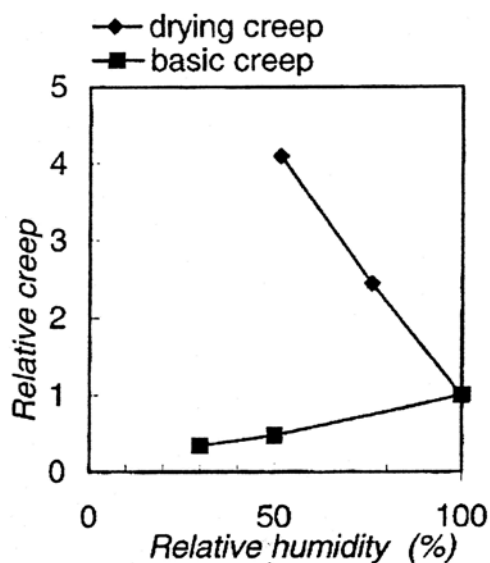


Fig. 4.6.1 Krypdeformationer hos cementbaserade material vid krypning vid jämvikt med olika RF ("basic creep") respektive krypning vid uttorkning i klimat med olika RF.

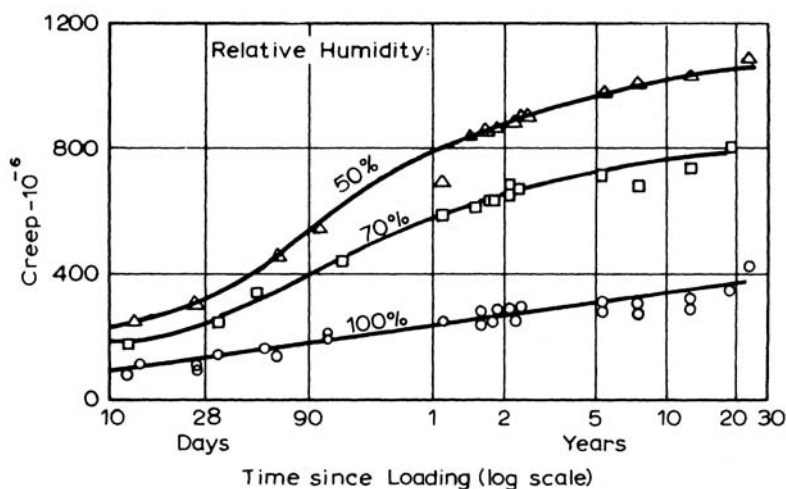


Fig. 4.6.2 Krypdeformationer hos cementbaserade material vid uttorkning i klimat med några olika RF.

Om materialet är fuktigt då det belastas och torkar ut samtidigt som belastningen ligger på kommer krypdeformationen att bli mycket större och större ju kraftigare uttorkningen är. Figur 4.6.1 och 4.6.2 indikerar en faktor 2-4 i krypdeformation om ett material torkar i 50-70 % RF jämfört med om det inte alls torkar under belastningen. Fuktpåverkan under belastning har uppenbarligen mycket stor betydelse för långtidsdeformationer.

5 Mekaniska egenskaper

Mekaniska egenskaper hos många material är mer eller mindre fuktberoende. Detta gäller främst hållfasthet och styvhet. Krypning, dvs. tidsberoende deformationer under belastning, är kraftigt fuktberoende. Detta behandlades i föregående kapitel.

5.1 Hållfasthet

Hållfastheten hos en del material påverkas kraftigt av fuktnivån i materialet. Ett viktigt exempel på detta är träbaserade material, vars hållfasthet sjunker i stort sett linjärt med fuktkvoten, upp till fibermättnadspunkten. Ytterligare fuktkvotsökning, över fibermättnadspunkten, påverkar inte hållfastheten. Fuktkvotberoendet för olika typer av hållfasthet visas i figur 5.1.1.

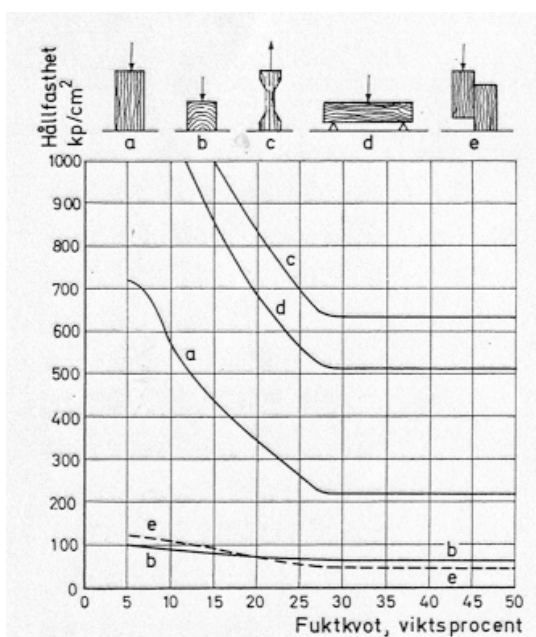


Fig. 5.1.1 Fuktkvotberoendet hos olika typer av hållfasthet, och i olika riktningar, hos massivt trä⁶

Hållfastheten så som den mäts vid en provning påverkas också tydligt av klimatvariationer och de fuktprofiler som dessa ger upphov till i ett material. Ett par exempel visas i figur 5.1.2 och 5.1.3.

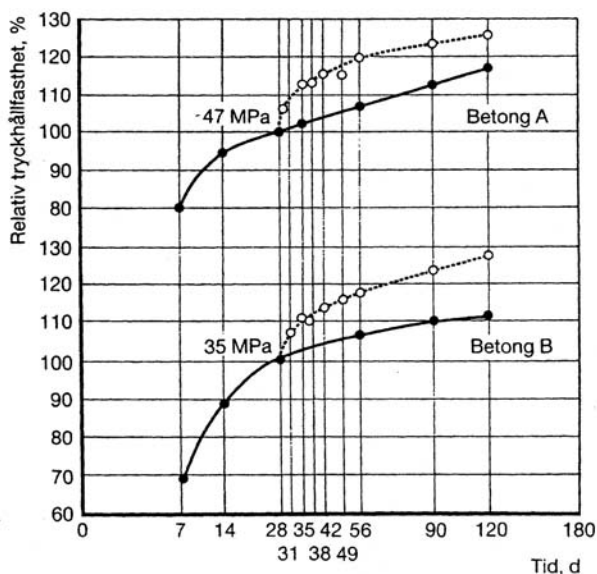


Fig. 5.1.2 Tryckhållfasthetens utveckling med tiden för två betonger efter vattenlagring i 28 dygn, vid fortsatt vattenlagring respektive uttorkning⁷.

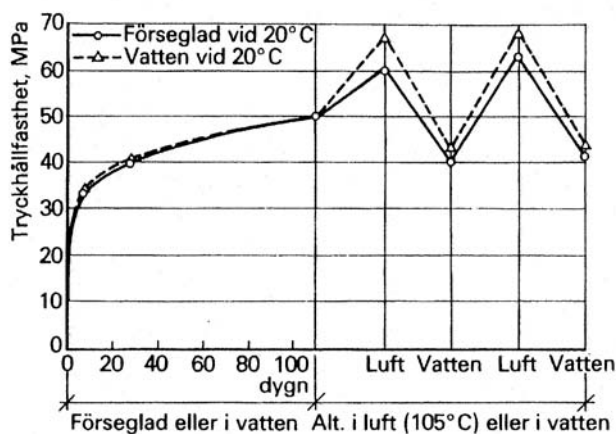


Fig. 5.1.3 Tryckhållfasthetens utveckling med tiden för en betong som först vattenlagrats respektive membranhärdats i 110 dygn, och sedan omväxlande vattenlagrats och torkats.

Uttorkning före en hållfasthetsprovning ger dragspänningar i de yttre delarna och tryckspänningar i de inre. Det innebär att böjdraghållfastheten blir mindre hos en provkropp som torkat eftersom det redan finns dragspänningar före provningen i den mest ansträngda delen av materialet. Tryckprovning av en betongprovkropp påverkas omvänt av uttorkning. Ett tryckbrott hos en betongprovkropp sker på grund av stora dragspänningar inne i provkroppen.

Uttorkning före provningen ger inre tryckspänningar som ökar hållfastheten hos provkroppen.

5.2 Styvhet (E-modul)

På samma sätt som hållfastheten påverkas elasticitetsmodulen hos många material av fuktnivån. Styvheten minskar med fukthalten, ofta så att den minskar linjärt med fukthalten. Detta gäller t ex för träbaserade material, upp till fibermättnadspunkten. Ett exempel visas i figur 5.2.1, där som ”komplians”, dvs. inversen till E-modulen.

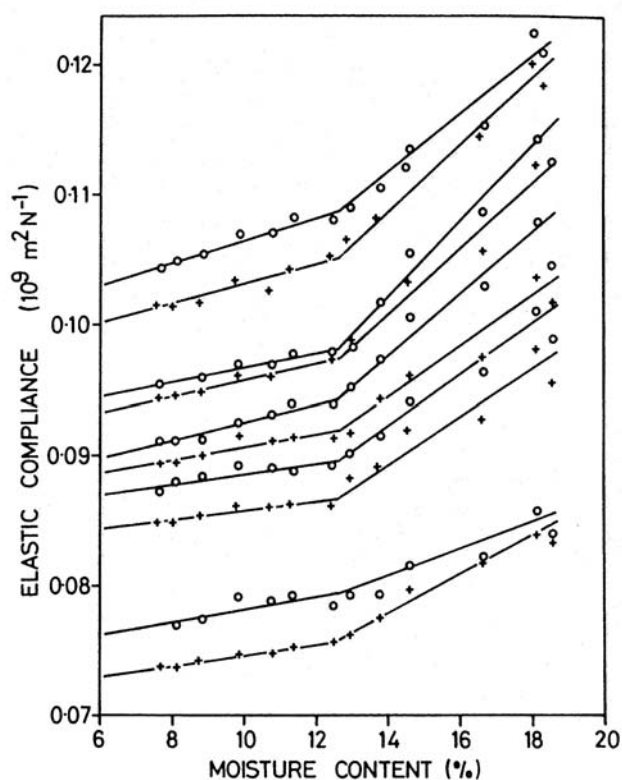


Fig. 5.2.1 Ett exempel på kompliansens fuktberoende för trä⁸

6 Termiska egenskaper

Ett materials termiska beteende avgörs i huvudsak av två materialegenskaper, värmekonduktiviteten, som beskriver hur lätt energi kan transporteras genom materialet, och värmekapaciteten som beskriver materialets förmåga att lagra energi per grads temperaturhöjning.

Tillsammans bildar dessa två egenskaper värmediffusiviteten, som är ett mått på hur snabbt ett material ändrar sin temperatur.

Båda dessa termiska egenskaper är fuktberoende för många material; för en del värmeisoleringsmaterial kraftigt fuktberoende!

6.1 Värmekapacitet

Värmekapacitet är en ”additiv” egenskap, dvs. den beror bara på mängden av olika komponenter i materialet och deras respektive egenskaper och inte på materialets struktur eller komponenternas orientering. Dubbelt så mycket av en komponent fördubblar bidraget till materialets värmekapacitet från denna komponent. Inverkan av fukt är därför enkel att bedöma. Värmekapaciteten ökar linjärt med fukthalten och absolutvärdet är helt enkelt fukthalten [kg/m^3] multiplicerad med värmekapaciteten hos vatten [J/m^3].

6.2 Värmekonduktivitet

Värmekonduktivitetens fuktberoende är något mera komplicerad. Vatten leder värme bättre än de flesta byggnadsmaterial och den rena värmeledningsförmågan ökar ungefär linjärt med fukthalten. Ett par exempel visas i figur 6.2.1-6.2.3 för trä med olika densiteter, cellplastisolering respektive några olika betongkvaliteter.

För trä och betong kan ökningen av värmekonduktiviteten vara upp till 50 % i realistiska fuktområden! Figur 6.2.2 visar att en fukthaltsökning hos en cellplastisolering med ca 40 kg/m^3 försämrar värmeisoleringsförmågan med ca 15 %. En fukthaltsökning med ca 40 kg/m^3 i en cellplastisolering är inte särskilt mycket; mindre än 5 % av porsystemet har fyllts med vatten. Isoleringens funktion har däremot kraftigt försämrats!

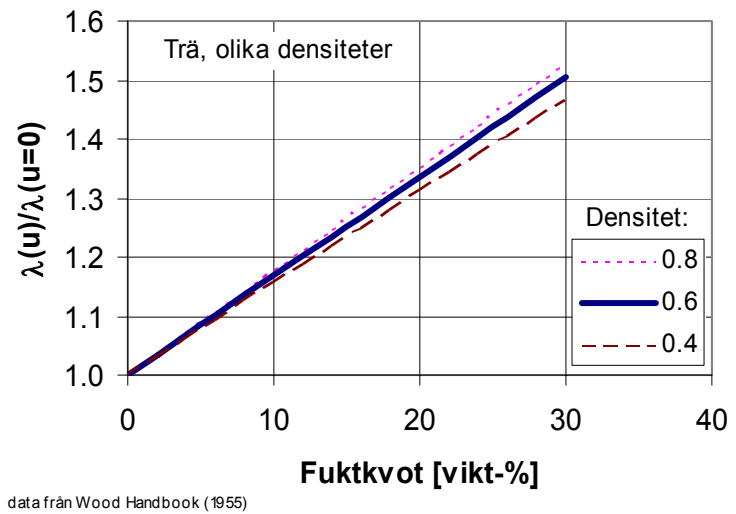


Fig. 6.2.1 Inverkan av fukt på värmekonduktiviteten hos trä med olika densiteter. Data från Wood Handbook (1955)

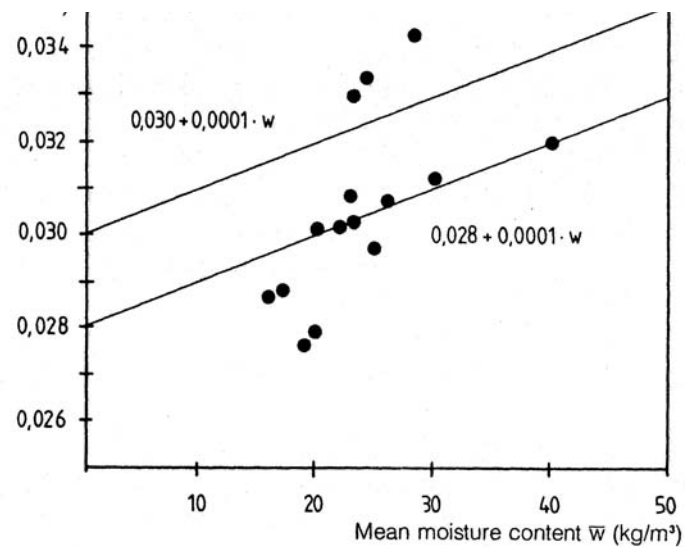


Fig. 6.2.2 Inverkan av fukt på värmekonduktiviteten hos cellplastisolering, Sandberg (1986)⁹

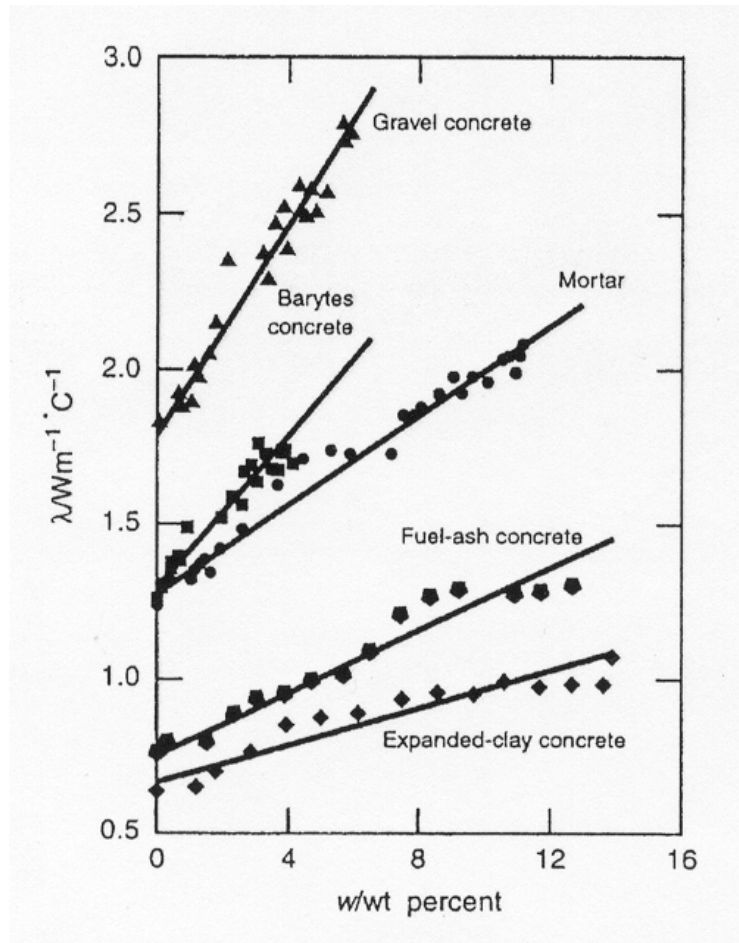


Fig. 6.2.3 Inverkan av fukt på värmekonduktiviteten hos olika typer av betong, Morabito (1989)¹⁰.

Värmekonduktivitetens fuktberoende är dock komplicerad för många material och inte bara en följd av att materialet innehåller en viss andel vatten som har större värmeledningsförmåga än det torra materialet, se figur 6.2.4.

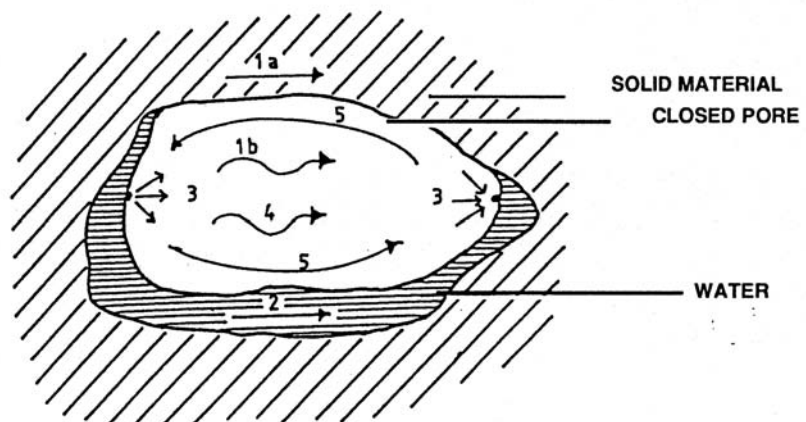


Fig. 6.2.4 Principiell inverkan av fukt på värmekonduktiviteten hos porösa material

Vid en mätning av värmekonduktiviteten hos ett fuktigt material, och i ett fuktigt material som utsätts för en temperaturgradient, sker flera processer samtidigt som påverkar energiflödet. Vatten (2) leder värme bättre än det fasta materialet (1a) men sämre än luft (1b) i de luftfyllda delarna av porsystemet sker energiöverföringen som strålning (4), konvektion (5) och avdunstning/kondensation (3). Dessa senare effekter blir dominerande i mycket porösa och permeabla värmeisoleringsmaterial som t ex mineralull, figur 6.2.5.

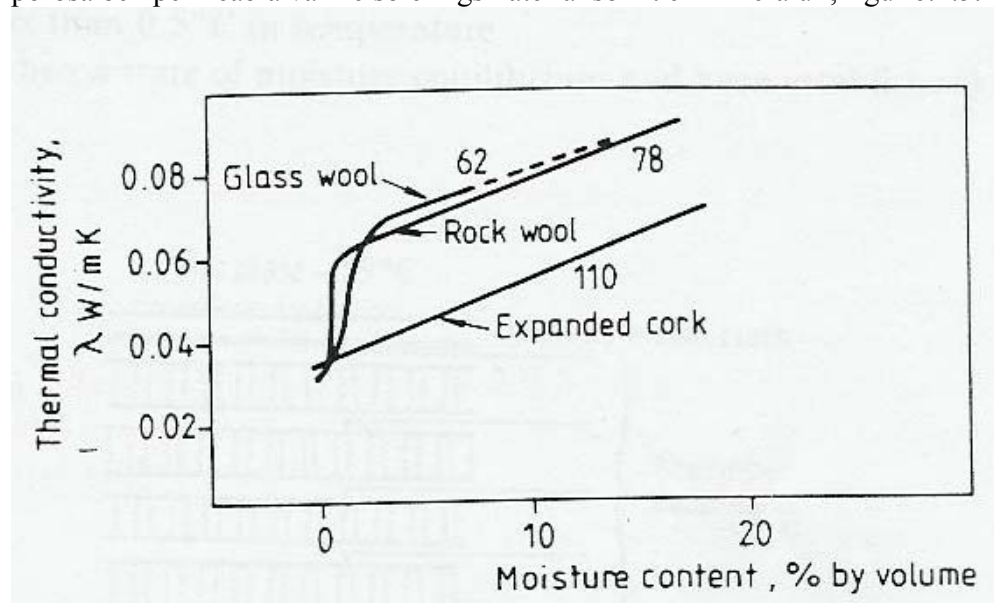


Fig. 6.2.5 Inverkan av fukt på värmekonduktiviteten hos mineralullsisolering, Sandberg (1987)¹¹

Vid en mycket liten fukthaltsökning stiger den uppmätta värmekonduktiviteten kraftigt. Detta beror då i huvudsak på den fukttransport som uppkommer på grund av temperaturgradienten och inte på att värmekonduktiviteten är fuktberoende.

7 Fuktegenskaper

Fuktmekaniska egenskaper hos material påverkas i högsta grad av fukt. De är sällan några konstanter utan beror på fuktillståndet; fuktinnehållet eller relativa fuktigheten.

De fuktmekaniska egenskaperna är främst fuktbindningsegenskaper och fuktkapacitet respektive fukttransportegenskaper av olika slag.

7.1 Fuktbindning/fuktkapacitet

Ett materials fuktbindningsegenskaper ges av sorptionskurvan, se Figur 2.1.1. Ett exempel på ett tydligt fuktberoende visas i Figur 7.1.1, för olika betonger med vattenhalter på 160-180 l/m³.

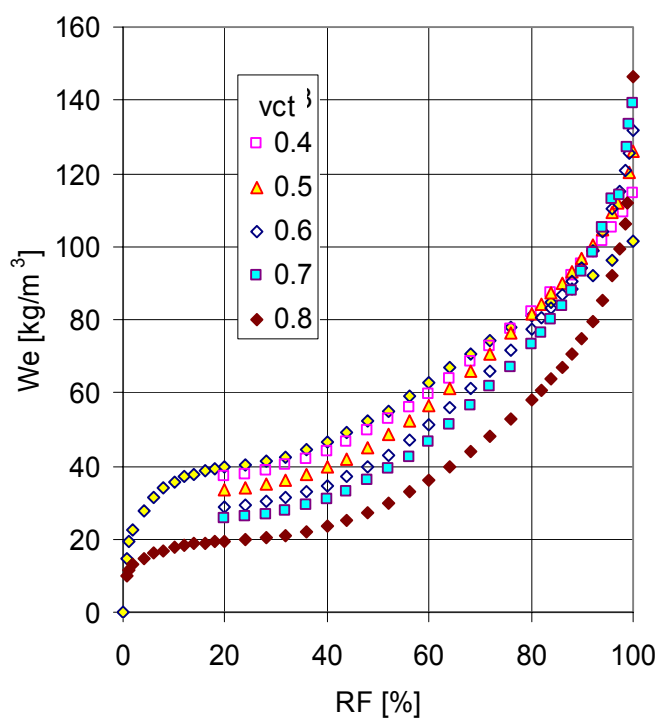


Fig. 7.1.1 Sorptionskurvan, sambandet mellan relativ fuktighet RF och fukthalt w , för cementbaserade material, beräknade ur data från Nilsson (1980)

Fukttinnehållet i ett material ökar med ökande relativ fuktighet på ett karakteristiskt sätt för varje material. Som regel följer sambandet en ”omvänd S-kurva”, med snabbt stigande fukttinnehåll vid låga och höga RF men en relativt flack kurva i intervallet $10\% < RF < 80\%$. Sambandet är en följd av materialets porsystem, särskilt den inre, specifika ytan och porernas volym i olika storleksområden.

Sorptionskurvans lutning kallas fuktkapacitet. Den anger materialets förmåga att binda fukt då fukttillståndet ändras och anges t ex i kg/m^3 per % RF-ändring. Den omvända S-formen hos sorptionskurvan gör att fuktkapaciteten är kraftigt fuktberoende, men stor fuktkapacitet vid låga respektive höga RF men liten fuktkapacitet i mellanområdet.

Ett exempel på fuktkapacitetens fuktberoende visas i Figur 7.1.2, för olika betonger med vattenhalter på 160-180 l/m^3 .

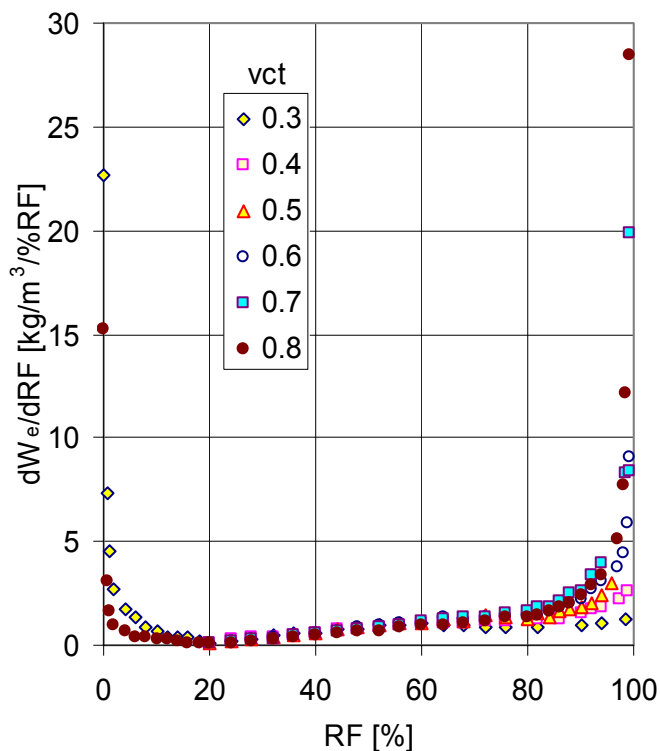


Fig. 7.1.2 Fuktkapaciteten, lutningen hos sorptionskurvan, för betong, beräknade ur Figur 7.1.2

7.2 Fukttransportegenskaper

Fukttransportförmågan hos porösa material är kraftigt beroende av hur fuktiga de är. Ren ångdiffusion i luftfyllda delar av porsystemet påverkas knappast alls av fuktnivån även om transportvägarna för ånga teoretiskt blir mindre ju fuktigare materialet blir. Andra effekter döljer som regel en sådan tänkbar effekt.

Den klassiska bilden av ökande fukttransport med ökande fuktinnehåll är att större och större del av porsystemet blir vätskefyllt då fukthalten ökar. Transportvägarna för vätsketransport blir då fler och fler och större och större, vilket resulterar i större och större fukttransportförmåga. Den övre gränsen motsvarar ren vätskepermeabilitet då hela porsystemet är vätskefyllt.

Transport av adsorberad fukt blir också lättare och lättare ju fuktigare materialet är. Detta är särskilt tydligt i träbaserade material där det bara finns adsorberad fukt, inne i cellväggarna i träfibrerna, så länge fuktinnehållet är lägre än fibermåtnadspunkten. Trots att det inte sker någon vätsketransport ökar fukttransportförmågan kraftigt med ökande fuktinnehåll eller RF.

Fuktberoendet hos fukttransportförmågan hos olika material beror följaktligen på hur stor andel av fukttransporten som sker som ångdiffusion, transport av adsorberad fukt respektive vätsketransport. Här ges några exempel för ett antal mineraliska material.

7.2.1 Fukttransportkoefficienten

Fukttransportförmågan beskrivs i Sverige normalt med "fukttransportkoefficienten" δ , också kallad "ångpermeabilitet", eftersom den beskriver den totala fukttransporten med ånghalten som drivande potential.

Ett typexempel på fukttransportförmågans fuktberoende visas i figur 7.2.1-7.2.2 för olika betongkvaliteter. Skillnaden mellan de båda figurerna är bara skalan på vertikalaxeln.

För betong med vct 0.8 är fukttransportkoefficienten flera tiopotenser större vid höga RF än vid låga. Sådan betong är normal "husbyggnadsbetong". Vid RF över 80 % ökar mängden transportvägar för vätsketransport kraftigt ju högre RF är. För betong med låga vct, ner mot 0.4, sker knappast någon vätsketransport alls, ens vid mycket höga RF. Transporten av adsorberat vatten är några få gånger större vid höga RF jämfört med vid låga RF. Sådan betong används i anläggningskonstruktioner i svårare miljöer, men också som "självtorkande betong" i bjälklag.

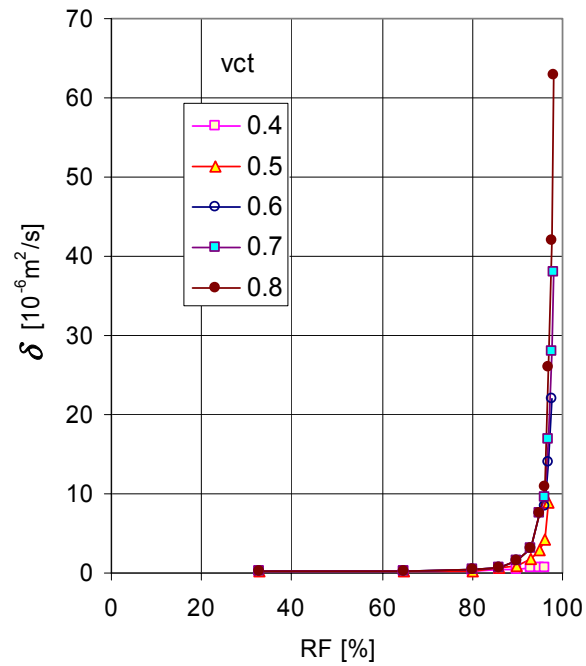


Fig. 7.2.1 Fuktransportkoefficienten för välhärdad betong med olika vattencementtal. Data från Hedenblad (1993)¹²

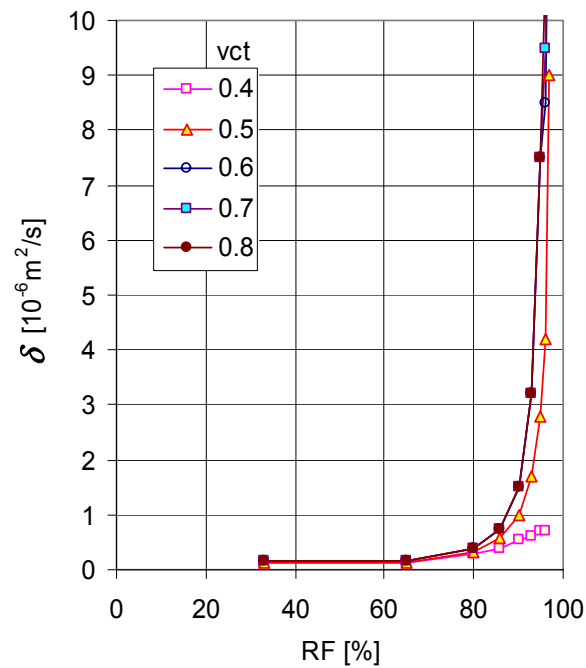


Fig. 7.2.2 Fuktransportkoefficienten i figur 7.2.1 med större skala på vertikalaxeln

7.2.2 Fuktdiffusiviteten

Ett alternativt sätt att beskriva fukttransportförmågan är fuktdiffusiviteten, som är fukttransportkoefficienten med fukthalten som drivande potential.

Fuktdiffusiviteten beskriver hur snabbt ett materials fukthalt ändras vid ändring av omgivningsförhållandena.

Fuktdiffusiviteten fås genom division av fukttransportkoefficienten δ med fuktkapaciteten. Fuktberoendet blir därmed betydligt mindre eftersom en stor fukttransportkoefficient vid höga RF divideras med en stor fuktkapacitet. Ett exempel visas i figur 7.2.3.

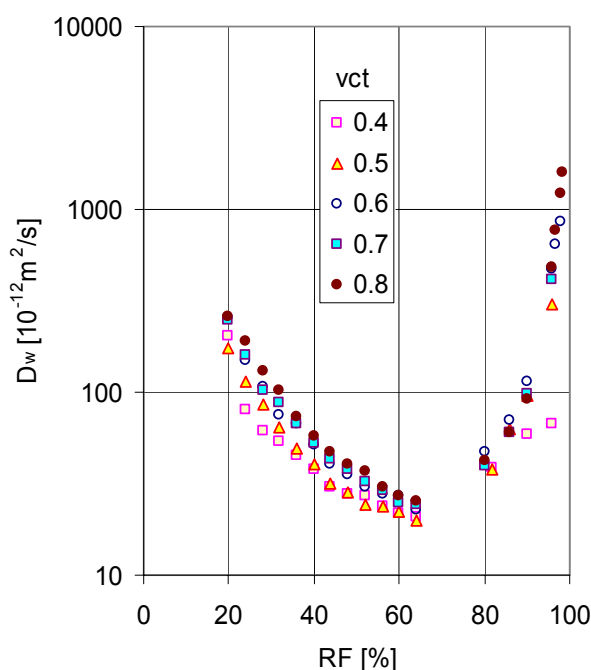


Fig. 7.2.3 Fuktdiffusiviteten för välhärdad betong med olika vattencementtal. Omräknad med data enligt figur 7.2.1 och 7.1.2

Fuktdiffusivitetens fuktberoende för betong skiljer sig främst åt vid höga RF, över 90 %, och skillnaden mellan höga och låga RF är knappast mer än en tiopotens.

Skillnaden är större för en del andra material, främst grovporösa material som keramer och lättbetong. Ett exempel visas i figur 7.2.4 för högtrycksånghärdad gasbetong.

Fuktberoendet hos fuktdiffusiviteten i figur 7.2.4 ser högst märkligt ut, med tre maxima och två minima. Detta är dock fullt normalt och en följd av fuktdiffusivitetens definition. Fuktkapaciteten för lättbetong har maxima respektive minima vid samma fukthalter och vid division av fukttransportkoefficienten med fuktkapaciteten uppkommer detta fuktberoende hos fuktdiffusiviteten hos lättbetong. Figur 7.2.4 har erhållits genom direkt

mätning av fuktdiffusiviteten i experiment med stationär fukttransport och visar resultat som stämmer precis med teorin.

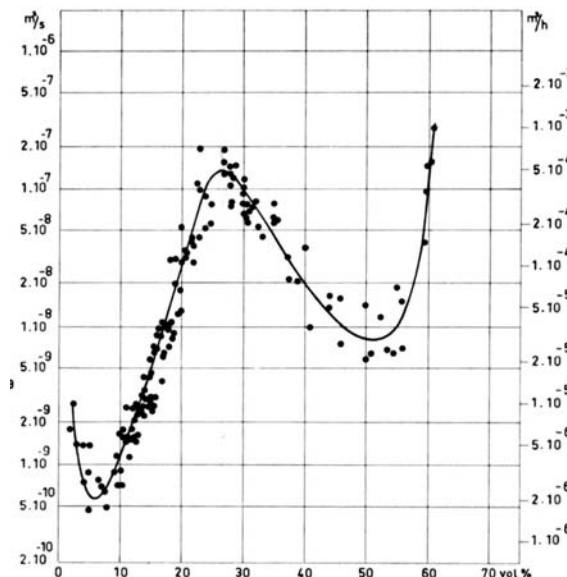


Fig. 7.2.4 Fuktdiffusivitetsens fuktberoende för autoklaverad gasbetong, van der Kooi (1971)¹³

7.2.3 Kapillärsugning

Kapillärsugning av fritt vatten in i ett material beskrivs normalt med ”kapillaritetstalet” eller sorptiviteten A . Den är kraftigt fuktberoende och naturligtvis lika med 0 om materialet är kapillärt mättat. Vid lägre och lägre ursprunglig fuktnivå är sorptiviteten större och större. Några exempel visas i figur 7.2.5.

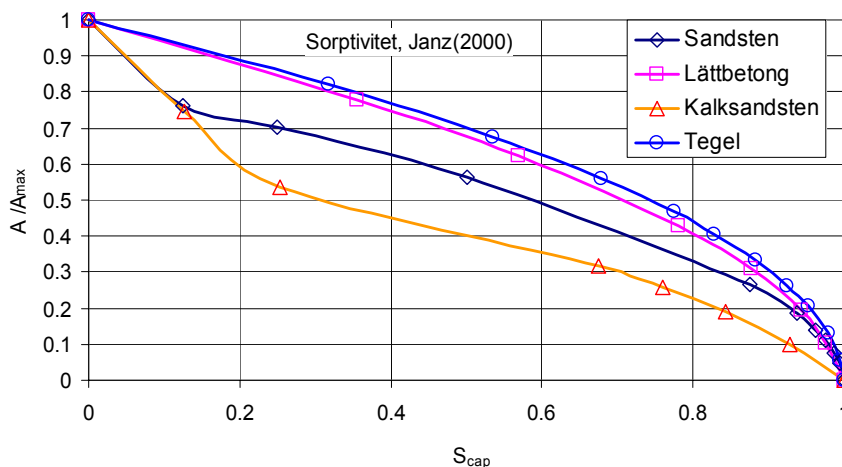


Fig. 7.2.5 Fuktderoendet hos kapillaritetstalet, sorptiviteten, för några mineraliska byggnadsmaterial som funktion av ursprunglig fuktnivå, uttryckt som kapillär mättnadsgrad S_{cap} . Data från Janz (2000)¹⁴

8 Transportprocesser

Flera transportprocesser i material påverkas kraftigt av fuktinnehållet i materialens porsystem. Exemplet är många: diffusion och permeation av gaser hindras av fukt; lösta ämnen kan bara flyttas i porsystemet om det finns tillräckligt många vattenfyllda porer som hänger samman.

Fuktberoendet hos själva transportprocesserna beskrivs kortfattat i detta kapitel. I senare kapitel sätts transportprocesserna, och deras fuktberoende, in i ett större sammanhang där de ofta är en avgörande del av ett nedbrytningsförlopp.

8.1 Gastransport

Diffusion (p g a koncentrationsskillnader) och permeation (p g a totaltrycksskillnader) av gaser hindras kraftigt om delar av porsystemet är blockerat av fukt som är hårt bundet av vattenmenisker i små porer. Inte ens stora gastryck kan flytta på fukten som är bunden i de minsta porerna.

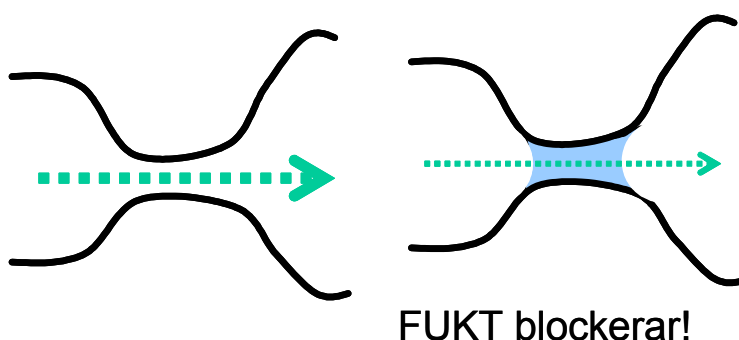


Fig. 8.1.1 Fuktberoendet hos gastransport i porösa material

8.1.1 Gasdiffusion

Transporterad mängd av ett ämne via diffusion är proportionell mot hur stor del av tvärsnittsytan som består av ”öppen porositet” och omvänt proportionell mot hur ”krångliga” diffusionsvägarna är. Diffusion av en gas sker flera tiopotenser lättare i luft än i vatten. Varje por som är fylld med vatten blir därför ett stort ”hinder” för gasdiffusion genom att den öppna porositeten minskar och därmed dels minskar tillgänglig tvärsnittsyta och dels ökar ”krångligheten”, tortuositeten.

Fuktberoendet hos gasdiffusion genom ett poröst material påverkas följaktligen av både fukttinnehållet och porsystemets utformning. Både porstorleksfördelningen och porstrukturen är viktiga. Vid en viss RF är alla porer mindre än en viss storlek fyllda med vatten genom adsorption och kapillärkondensation. Hur sedan övriga porer, som inte är fyllda, hänger ihop avgör hur stora kvarstående möjliga diffusionsvägar är. Detta kallas ”konnektiviteten”.

Det finns några få mätningar av fuktberoendet hos gasdiffusion, främst av Tuutti (1982)¹⁵. De gällde betong av olika sammansättning. Stor inverkan hade också härdningssättet, som kraftigt påverkar porstorleksfördelningen och porstrukturen i delarna närmast ytan. Med Tuuttis data som utgångspunkt har sedan ett antal forskare beskrivit fuktberoendet hos gasdiffusion med kurvor som i figur 8.1.2.

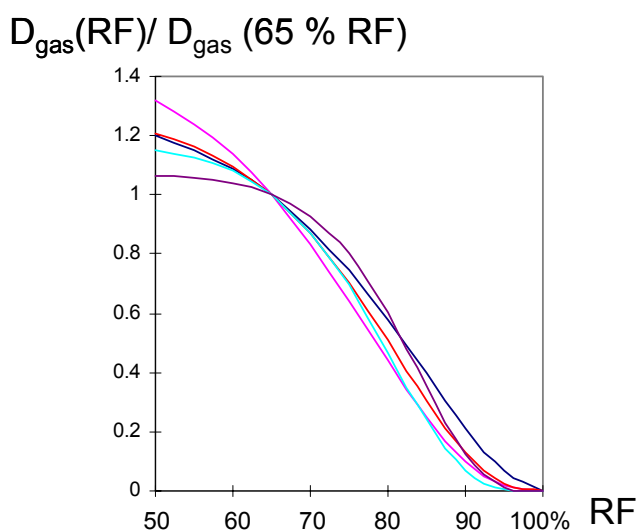


Fig. 8.1.2 Exempel på fuktberoendet hos gasdiffusion i porösa material, baserade på data från Tuutti (1982). Diffusionskoefficienten vid 65 % RF som utgångspunkt.

Gasdiffusionen blir nära noll vid 100 % RF, dvs. vattenmättat porsystem. Förloppet mellan 65 och 100 % RF, liksom under 65 % RF, är grova uppskattningar baserade på ett fåtal mätningar. För säkrare uppgifter fordras verkliga mätningar för aktuella material.

8.1.2 Gaspermeation

Gastransport på grund av gastrycksskillnader, gaspermeation, påverkas på ett liknande sätt av fukttinnehållet, men de stora porerna, och i vilken utsträckning de är fyllda med vatten, har större relativ betydelse än för gasdiffusion. Ett exempel visas i figur 8.1.3.

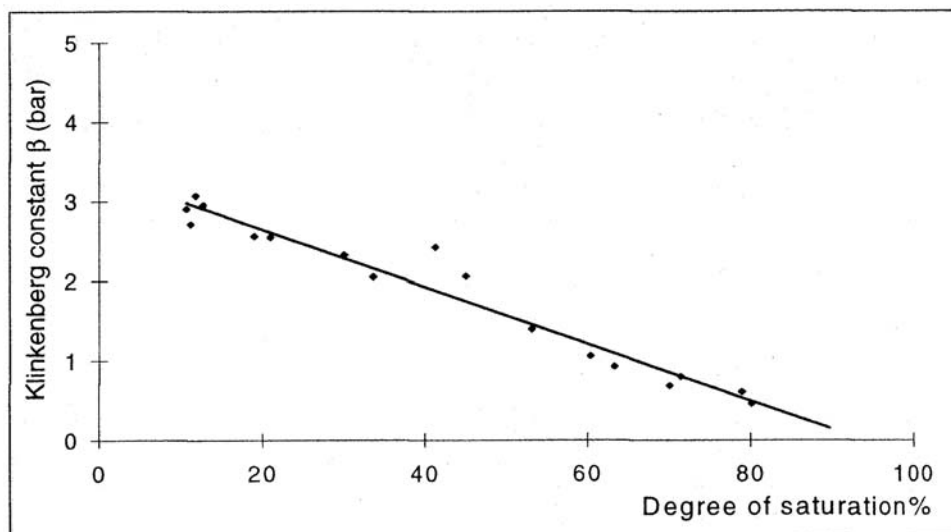


Fig. 8.1.3 Exempel på fuktberoendet hos gaspermeation i porösa material, här för en betong¹⁶

Vid 100 % RF är gaspermeationen nära noll, åtminstone i finporösa material där fukten inte kan "tryckas bort" ur porsystemet av rimliga gastryck. Exemplet i figur 8.1.3 indikerar ett fuktberoende som är nära linjärt mot vattenmättnadsgraden. På samma sätt som för gasdiffusion beror det på porstorleksfördelningen och porsystemets konnektivitet vid respektive fukthalt.

8.2 Jontransport, transport av lösta ämnen

Ämnen som är lösta i porvattnet kan bara transporteras i vätskefas, antingen som diffusion, på grund av koncentrationsskillnader, eller som konvektion, genom att porvätskan flyttar sig. I båda fallen fordras att materialet är så fuktigt att porsystemet innehåller kontinuerliga "vattenvägar" som möjliggör en transport. Det finns alltså en "kritisk" fuktnivå för transport av lösta ämnen. Vid lägre fuktnivå finns det inte någon transportväg alls och vid högre fuktnivå blir transportmöjligheterna större och större ju fuktigare materialet är.

Ett flertal försök har gjorts att mäta denna kritiska fuktnivå för transport av alkali^{1,17,44}, t ex fram till en betongyta som har belagts med en alkalikänslig beläggning eller fram till alkalireaktiva ballastkorn i betong. Hittills har dessa försök inte krönts med någon större framgång. Det är ytterst svårt att utföra sådana mätningar på ett relevant sätt.

Några få lyckade mätningar av jontransport vid olika fuktnivåer har gjorts, bland annat av Francy (1998)¹⁸, se figur 8.2.1, och Climent et al¹⁹, se figur 8.2.2. Den kritiska nivån för jontransport verkar ligga i området omkring 70 % RF, åtminstone för klorider och för de betongkvaliteter som Francy och Climent et al mätte på.

Konsekvensen av detta är att lösta ämnen bara kan förflyttas i material vid fuktnivåer över den "kritiska" för jontransport. Detta gäller både diffusion och

konvektion av lösta ämnen. Torkar materialet under den kritiska nivån i någon del av materialet, kan lösta ämnen inte passera denna punkt.

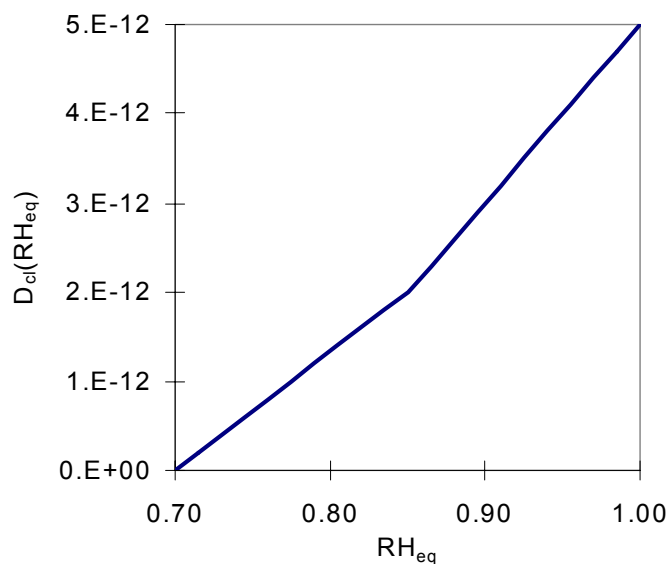


Fig. 8.2.1 Diffusionskoefficient för klorider i betong vid olika RF, efter Francy (1998)

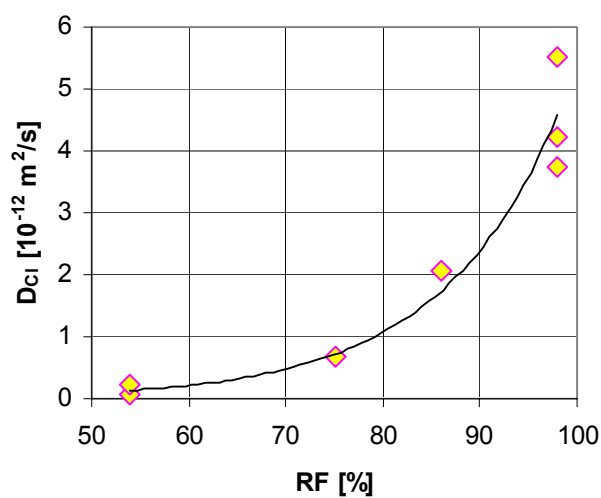


Fig. 8.2.2 Diffusionskoefficient för klorider i betong vid olika RF, efter Climent et al (2000)

Om fukttransport sker, men vid allt lägre fuktnivå, äger en ansamling av de lösta ämnena rum kring området där fuktnivån är strax över den kritiska. Ett exempel visas i figur 8.2.3.

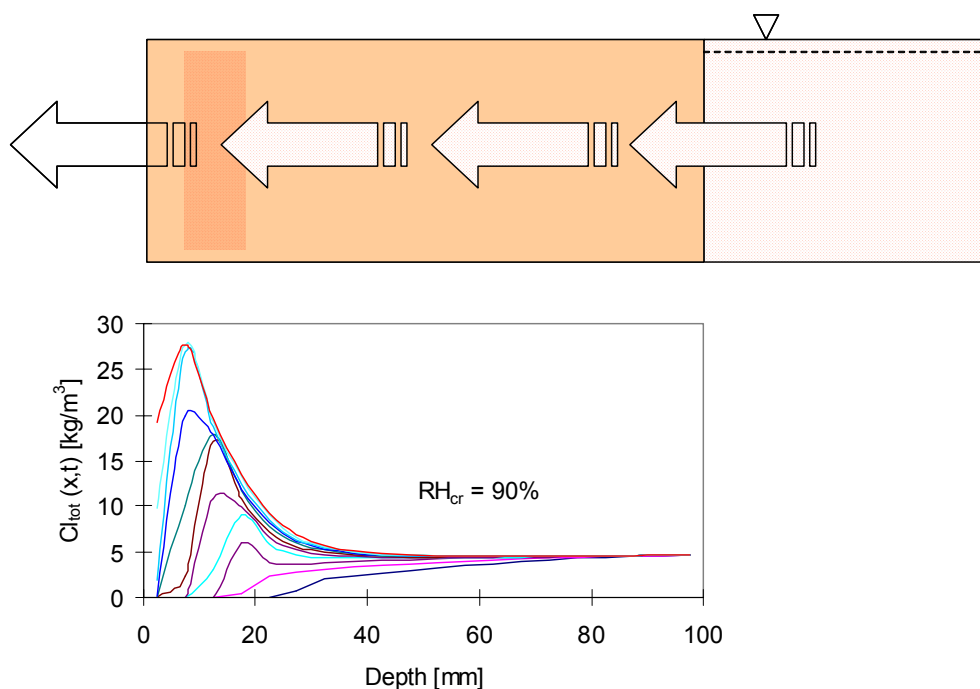


Fig. 8.2.3 Ansamling av lösta ämnen vid en "avdunstningsfront", där RF är 90 %, om en lösning av joner transporteras in från höger mot en torr yta till vänster, Nilsson (1997)²⁰.

Tillförsel av fukt gör att lösliga ämnen går i lösning och porvätskan får en viss koncentration av ämnena. Ämnena transporteras i, och med, porvätskan och vid en avdunstningszon ansamlas ämnena. Om en ny uppfuktning sker, från en yta, kan ämnena transporteras ytterligare djupare in, men en del kan också lakas ur materialet eftersom uppfuktningen ger en utspädning och en lägre koncentration nära ytan än djupare in. Ett exempel visas i figur 8.2.4.

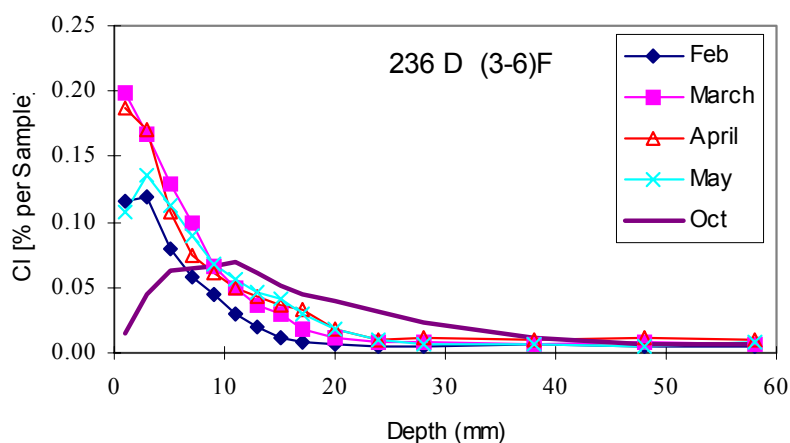


Fig. 8.2.4 Inträngning och urlakning av klorider ur betong. Fram till och med april har det varit kloridbelastning på ytan; därefter belastning av rent vatten, Nilsson et al (2000)²¹

Påverkan på materialytan av en kloridlösning har gett en inträngningsprofil, enligt figur 8.2.4. När sedan ytan får en påverkan av rent vatten lakas kloriderna närmast ytan ut, men en del kloriderna på större djup fortsätter att tränga längre in, genom konvektion och diffusion eftersom uppfuktningen höjer fuktnivån över den kritiska för jontransport.

9 Kemiska och elektrokemiska reaktioner, metallkorrosion

Många beständighetsfenomen och nedbrytningsprocesser innehåller en eller flera kemiska reaktioner som en viktig komponent. Att reaktanterna måste komma i kontakt med varandra kan ofta kräva att en transportprocess gör det möjligt. Fukten inverkar då ofta, på ett avgörande sätt, på om en kemisk reaktion kan ske eller ej genom att påverka dessa transportprocesser.

Många kemiska reaktioner kan bara ske om den ena eller båda reaktanterna finns i vattenlösning. Fukten i ett poröst material är inte fritt vatten utan är mer eller mindre hårt bundet till porväggarna, i porerna och inne mellan molekyler och i den finaste, inre materialstrukturen. Allt detta vatten kan inte fungera som lösningsmedel för en reaktant till en kemisk reaktion, men en stor del av det.

Här ges en översikt och ett antal viktiga exempel på fuktberoendet hos kemiska reaktioner i byggnadsmaterial.

9.1 Cementhydratation

Bindemedelsreaktionen i cementbaserade material kräver naturligtvis tillgång till vatten eftersom vatten är den ena reaktanten. Det måste dock finnas mer vatten än vad som behövs i själva reaktionen. Reaktionen kan bara fortsätta om porsystemet är tillräckligt fuktigt. Dels skall porvattnet kunna fungera som lösningsmedel och dels skall reaktionsprodukter kunna förflyttas. Mätningar visar att fuktberoendet är stort och att det ändras med åldern hos materialet, dvs. med reaktionsgraden.

Den kritiska nivån verkar ligga i området 75-85 % RF efter några dagar, se figur 9.1.1, men vid mycket tidig ålder ligger den kritiska fuktnivån högre. Om ett cementbaserat material får torka för tidigt kommer de kemiska reaktionerna att avstanna och materialets yttre del får inte avsedda egenskaper.

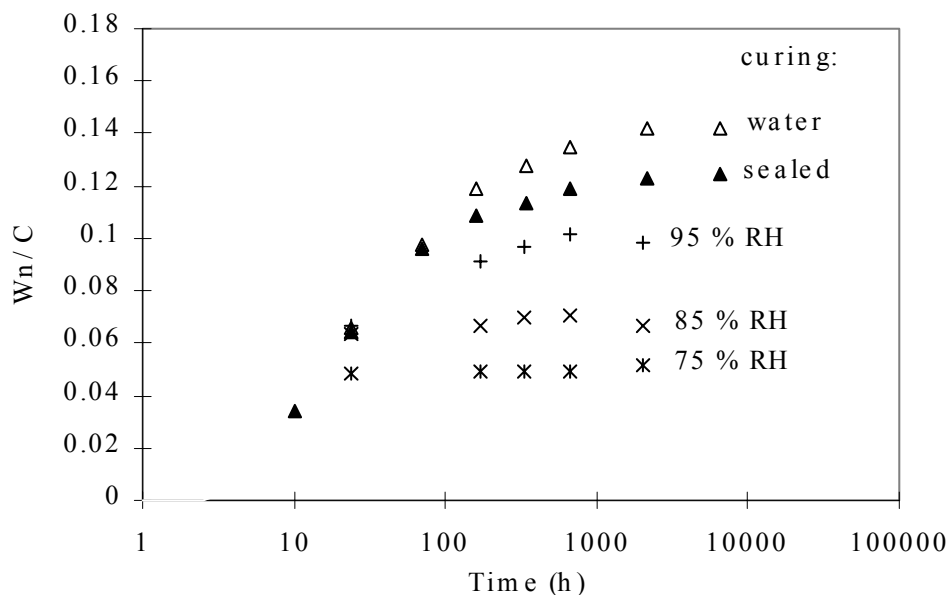


Fig. 9.1.1 Kemisk bindning av vatten i ett cementbaserat material vid olika relativa fuktigheter i materialet, Norling-Mjörnell (1997)²²

9.2 Karbonatisering

En viktig kemisk reaktion är ”karbonatisering”, en kemisk reaktion mellan luftens koldioxid och kalken, kalciumoxid CaO, i material med kalkhaltiga bindemedel, som t ex kalkbruk, kalkcementbruk och cementbaserade material. Reaktionen mellan gasen CO₂ och det fasta materialet CaO kan inte ske i torrt tillstånd. CaO måste finnas i lösning, dvs. i porlösningen. Det verkar som om en viss karbonatisering, dock mycket ofullständig kan ske även vid mycket låga RF²³, under 50 %!

Vid högre RF blir hastigheten i reaktionen starkt beroende av fuktberoendet hos diffusionen av koldioxid in till karbonatiseringsfronten, jämför figur 7.1.2. Karbonatiseringsreaktionen i ett kalkhaltigt material går alltså snabbast i ett relativt torrt material.

Reaktionen blir dock inte riktigt fullständig om RF i materialet är under 85 % RF²⁴. Detta visar sig i form av vita utfällningar, kalkutfällningar, på betongytor som utsätts för vatten innan ytan karbonatiserats i luft med RF högre än 85 %.

9.3 Alkali-proteinreaktioner

Flytspackel med kasein, som är ett protein som utnyttjades som flyttillsatsmedel, visade sig avge emissioner i form av ammoniak och aminer vid mycket låga relativa fuktigheter, redan vid ca 80 % RF, se figur 9.3.1.

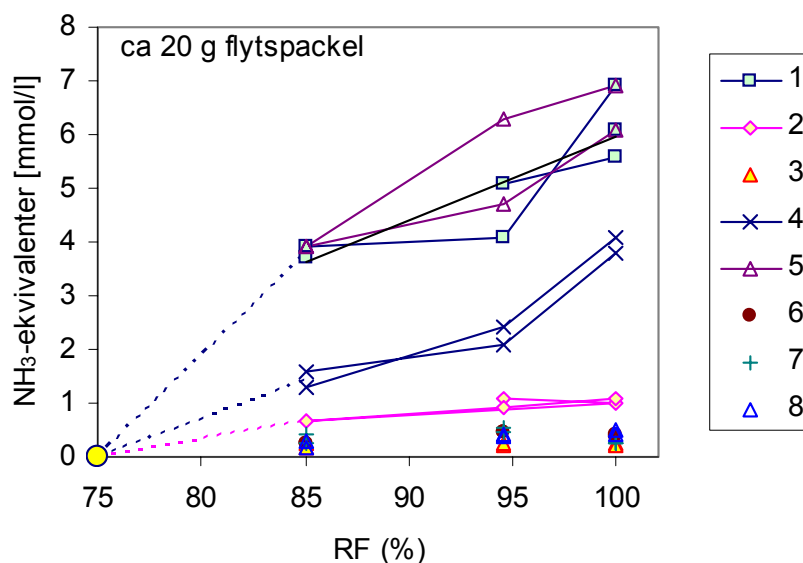


Fig. 9.3.1 Emissioner av ammoniak och aminer på grund av kemisk reaktion mellan alkali och protein (kasein) i åtta flytspackel och cementbruk, från omkring 1980, vid olika fuktpåverkan²⁵.

Kasein och alkali bör ha varit relativt jämnt fördelade i ett flytspackel och det har därför inte krävts långa transportvägar för att de två reaktanterna skulle kunna mötas och reagera med varandra. Fuktbberoendet borde därför mer vara en följd av villkoren för att reaktionen skall kunna ske över huvudtaget.

9.4 Alkali-ballastreaktioner

Kemiska reaktioner mellan alkali från cementet och reaktiva ballastkorn är radikalt annorlunda. Här fordras att alkali kan transporteras fram till respektive reaktivt ballastkorn och där reagera så att en alkalikiselsyragegel bildas. Denna gel, reaktionsprodukten, är hygroskopisk och drar till sig fukt från omgivningen av ballastkornet varvid gelen sväller. Blir gelen för fuktig kan den bli för lättflytande och penetrera omgivande porsystem. Om den är ”lagom” ”fuktig”, ger den istället upphov till en stor sprängkraft. Fuktbberoendet blir därför ytterst komplicerat, se figur 9.4.1!

Fuktbberoendet förklaras av fuktens olika roller för att en skada på grund av alkali-kiselsyrareaktioner skall kunna uppstå. Fukt fungerar som transportmedium för alkalier, som lösningsmedel och som expansionsmedium för gelen²⁶.

Skada

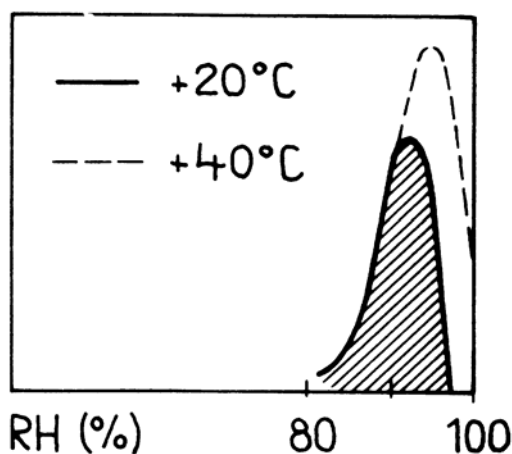
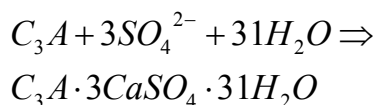


Fig. 9.4.1 Fuktberoendet hos uppkomsten av "pop-outs" på grund av alkali-kiselsyrareaktioner mellan alkali och reaktiv ballast i betong, Nilsson & Petersson (1983)

Det verkar finnas en kritisk gräns kring 85 % RF för att alkali skall kunna nå de reaktiva ballastkornen. Liknande resultat med en kritisk gräns på ca 85 % RF, har också uppmätts för expansion p g a alkaliballastreaktioner²⁷.

9.5 Ettringitbildning

Ettringitbildning i cementbaserade material kan uppkomma av olika orsaker. Sulfat i grund- och havsvatten kan tränga in och reagera med en av klinkerkomponenterna i cementet C_3A . Mycket hög härdningstemperatur under de första dygna kan ge upphov till "försenad ettringitbildning". Den kemiska reaktionen kan förenklat skrivas



Ettringiten har 31 molekyler vatten, dvs. reaktionsprodukten drar till sig vatten från omgivande betong. För att materialet skall kunna svälla, och därmed skadas på grund av ettringitbildningen, fordras tillförsel av extra vatten, utöver den fukt som redan finns i materialet. Det fordras alltså en extra fuktpåverkan för att skadorna skall bli allvarliga.

9.6 Metallkorrosion

Korrosion på ingjutet armeringsstål i betong behandlas i ett särskilt, senare avsnitt.

Elektrokemisk korrosion på en metallyta fordrar en elektrisk kontakt mellan anod och katod. Denna uppkommer inte på en torr yta, men tjockleken hos det adsorbat på en ytan som krävs är inte stor. Några molekyllager räcker, vilket

motsvarar mycket låga relativa fuktigheter, på en ren yta. RF omkring 50 % anges som fullt möjlig kritisk gräns för metallkorrosion, men hastigheten är då mycket låg²⁸. Vid ökning av fuktigheten ökar sedan korrosionshastigheten exponentiellt, se figur 9.6.1.

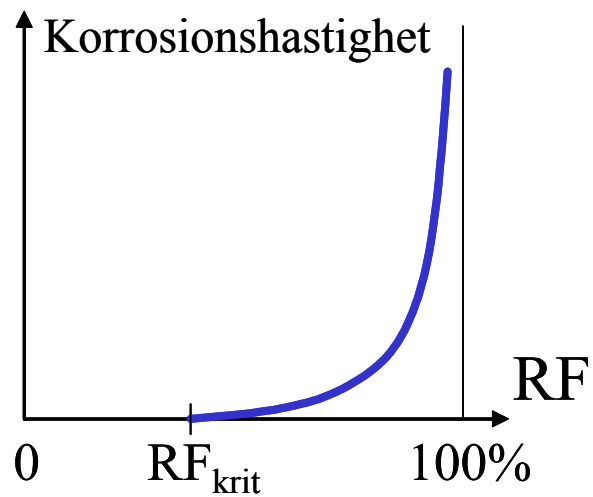


Fig. 9.6.1 Det principiella fuktberoendet hos metallkorrosion

10 Armeringskorrosion

Korrosion på stål ingjutet i betong är tydligt fuktberoende av flera olika skäl, varför detta tas upp i ett särskilt kapitel. Härvid behandlas korrosion som initierats av karbonatisering, dvs. i saltfri miljö, först och därefter beskrivs fuktberoendet hos korrosion som initieras av klorider. Korrosionsprocessen delas upp i sina två beståndsdelar: initiering, då ingen korrosion äger rum men koldioxid respektive klorider tränger in till stålet, och propagering, då korrosionen har kommit igång med viss hastighet.

10.1 Initiering i kloridfri miljö

I omgivningsmiljöer utan salter avgörs korrosion av ingjutet stål av karbonatiseringsprocessen. Fuktens inverkan åskådliggörs i figur 9.1.1.

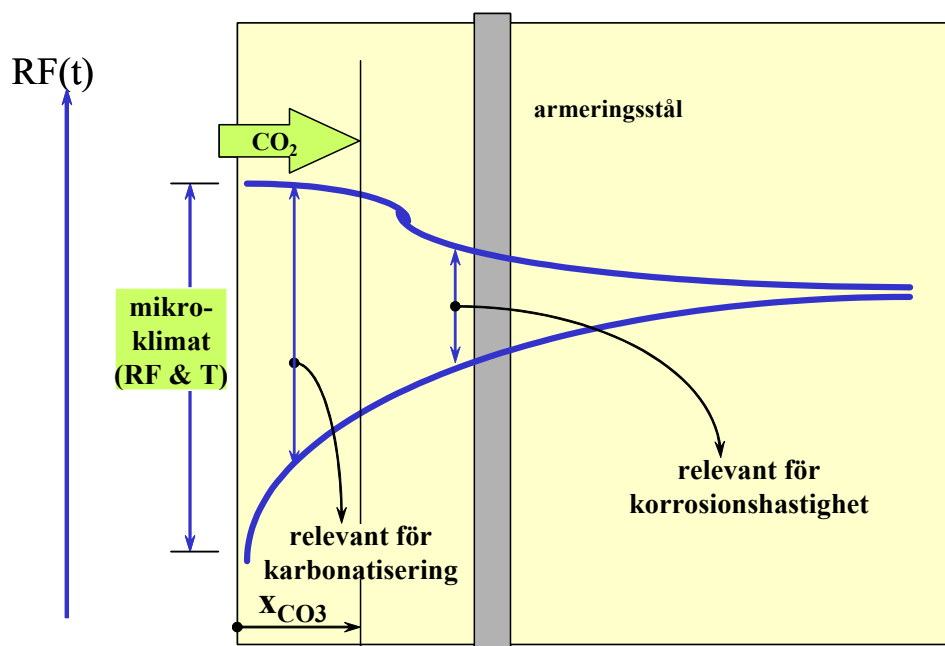


Fig. 9.1.1 Det principiella fuktberoendet hos de olika delarna av armeringskorrosion som initieras av karbonatisering.

Koldioxid i gasform diffunderar in genom den redan karbonatiserade delen av täcksiktet för armeringen och reagerar med karbonatiserbar kalk vid karbonatiseringsfronten. Diffusionen påverkas kraftigt av om den karbonatiserade delen är torr eller fuktig, jämför figur 8.1.2. Diffusionshastigheten avgörs följaktligen av fuktfördelningen i täcksiktet. Koldioxiden reagerar kemiskt med kalk vid karbonatiseringsfronten. Hur omfattande karbonatiseringsreaktionen blir beror på fuktnivån, jämför avsnitt 9.2. Hur snabbt karbonatiseringsfronten når in genom täcksiktet, fram till armeringsstålytan, är följaktligen till stor del en funktion av fuktnivån. I torr betong, som t ex skyddas mot regn, går processen avsevärt fortare än i samma betong som regnbelastas. Då karbonatiseringsfronten når fram till stålytan startar korrosionen; propageringsfasen har då inletts, se nedan.

10.2 Initiering i kloridmiljö

I marin miljö eller i tölsaltningsmiljö initieras armeringskorrosion av att klorider tränger in genom täcksiktet och höjer kloridkoncentrationen vid stålytan över en viss kritisk nivå, ”kloridtröskelvärdet”. Processen åskådliggörs i figur 9.2.1.

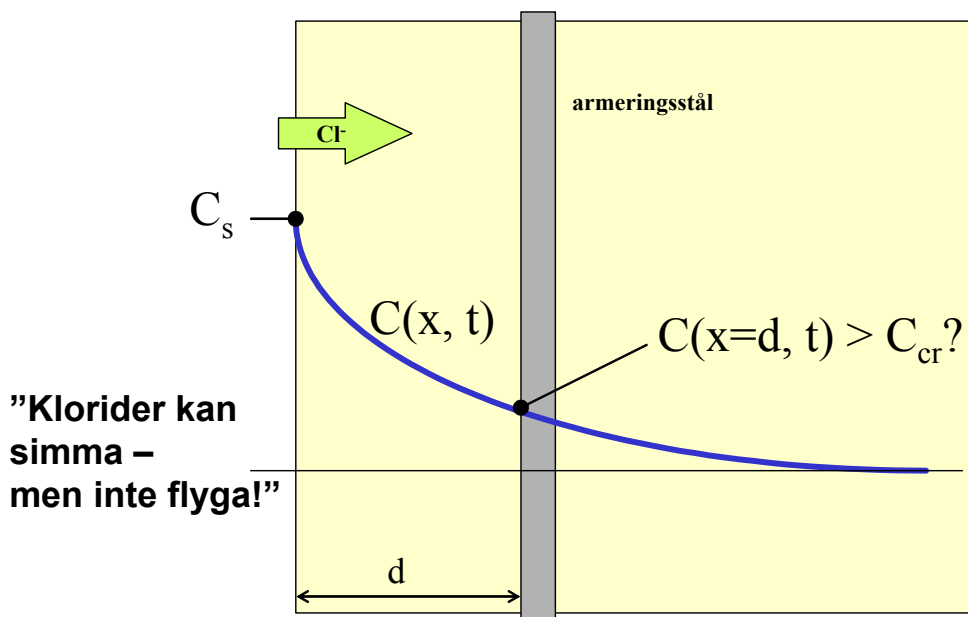


Fig. 9.2.1 Det principiella fuktberoendet hos de olika delarna av armeringskorrosion som initieras av kloridinträngning.

Kloridinträngningen förutsätter att porsystemet är åtminstone delvis fyllt med vatten, så att det finns kontinuerliga transportvägar för kloridjonerna, jämför avsnitt 7.2. Kloridtransporten är följaktligen starkt fuktberoende. Hur hög kloridkoncentration blir vid stålytan är därför fuktberoende.

Hur hög kloridkoncentrationen måste vara för att korrosion skall initieras, tröskelvärdet, är också fuktberoende, se figur 9.2.2. Riktigt fuktig betong och relativt torr betong förefaller kräva högre kloridhalter innan korrosionsprocessen sätter igång. Vid 80-95 % RF är tröskelvärdet som lägst.

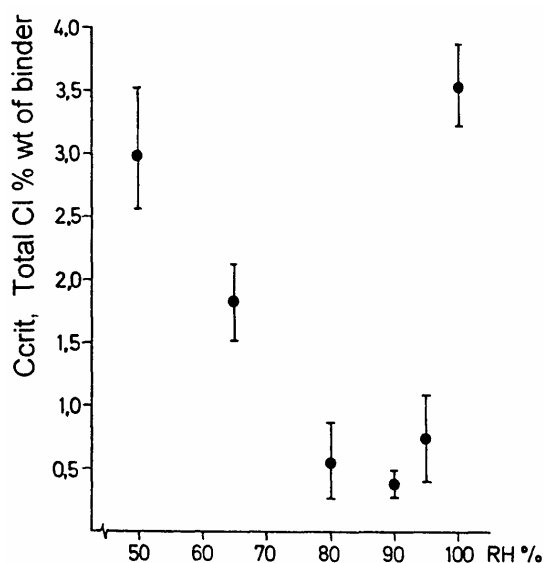


Fig. 9.2.2 Fuktberoendet hos kloridtröskelvärde för initiering av armeringskorrosion²⁹.

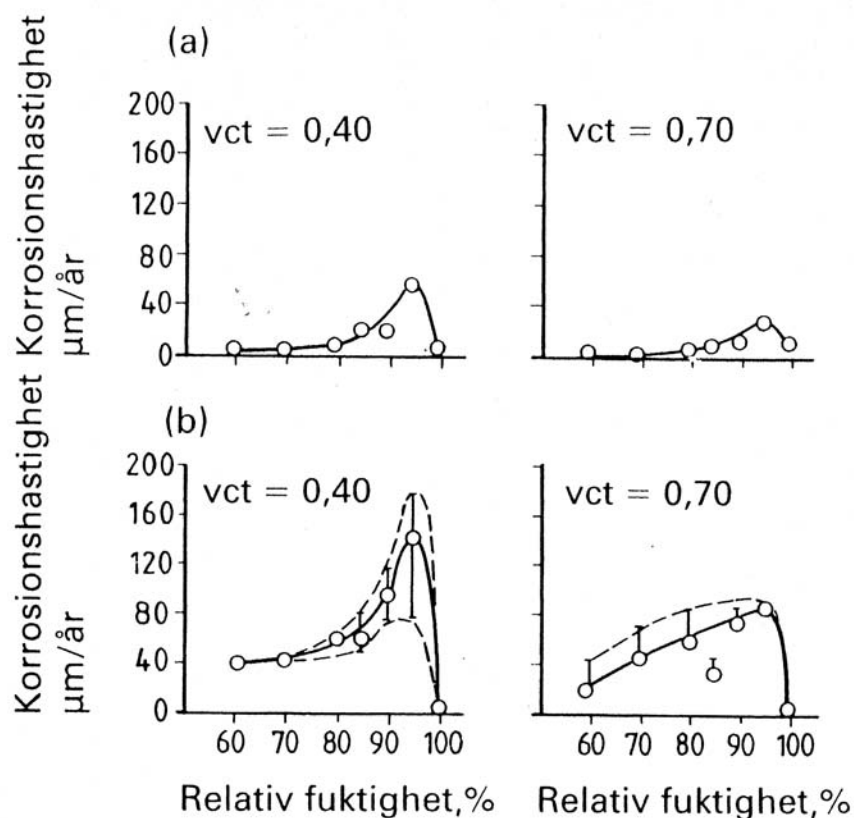
10.3 Propagering av armeringskorrosion

Korrosionsprocessen fordrar elektrisk kontakt mellan anod och katod på stålytan, dvs. om det är för torrt blir det ingen korrosion alls.

Korrosionsprocessen, som är en oxidation, fordrar tillgång till syre, dvs. syrgas måste kunna diffundera in till stålet. Om täcksiktet är vattenmättat går syrgasdiffusionen mycket långsamt vilket påverkar korrosionshastigheten.

Fuktberoendet hos propageringsprocessen visas i figur 9.3.1.

Korrosionshastigheten är mycket högre i kloridhaltig betong, men särskilt fuktberoendet är annorlunda. Maximal korrosionshastighet fås visserligen vid ungefär samma RF i båda fallen, strax över 90 % RF, men korrosionshastigheten är nära noll i karbonatiserad betong om RF är lägre än 70-80 %. Korrosion sker alltså inte i karbonatiserad inomhusbetong. Om betongen innehåller klorider, över tröskelvärde, sker korrosionen med hög hastighet även i rumsklimat!



Figur 9.3.1. Korrosionshastigheter vid olika RF i karbonatiserad (övre) betong respektive kloridhaltig (undre) betong³⁰.

10.4 Livslängd p g a armeringskorrosion

Livslängden hos en armerad betongkonstruktion är slut då korrosionen gått så långt att armeringstvärsnittet är för litet eller täcksiktet sprängts sönder i för stor omfattning. Livslängden avgörs alltså egentligen av den sammanlagda längden av initieringsfasen och propageringsfasen. Båda dessa är starkt fuktberoende, men på helt olika sätt.

Karbonatiseringen går snabbast i relativt torr betong, men då är det för torrt för att korrosion skall kunna ske, jämför figur 9.3.1. Armeringskorrosion kan därför uppkomma snabbast i ett litet fuktintervall där det är tillräckligt fuktigt för korrosionsprocessen men tillräckligt torrt för att koldioxiden skall kunna diffundera in genom täcksiktet. Detta lilla ”fönster” har sitt maximum i intervallet 85-95 %RF, Tuutti (1983).

I kloridhaltig miljö är fuktberoendet annorlunda. Kloridinträngningen går avsevärt fortare ju högre RF är. Detta bör medföra att kortast livslängd fås vid RF över 90-95 %.

11 Fysikaliskt angrepp, frost

Vatten ökar i volym cirka 9 % när det fryser. I ett material kan det då skada materialet om det inte finns utrymme för volymökningen. Beroende på materialets porstruktur och porstorleksfördelning är inte allt vatten frysbart. Man anger den del som kan frysa med vattenmättnadsgraden

$$S = \frac{w_f}{w_f + l} \quad [11.1.1]$$

där w_f är frysbart vatten och l är lufthalten. Nämnaren $w_f + l$ är tillgängligt utrymme för vattnets expansion. För att en volymökning på 9 % skall kunna rymmas krävs en vattenmättnadsgrad på maximalt $1/(1+0.09)=0.917$.

Allt tillgängligt utrymme är dock inte åtkomligt för vattnets expansion eftersom den luftfyllda delen av det tillgängliga utrymmet finns i större porer med ett visst avstånd emellan. När vattnet pressas undan vid expansionen i samband med frysning uppstår ett "hydrauliskt tryck" som kan spränga sönder materialet. Ju större avståndet är mellan de luftfyllda porerna, desto större blir detta tryck. Vattenmättnadsgraden måste därför vara mindre för att ett sådant material skall tåla frysning.

Gränsen för när vattenmängden är för stor kallas kritisk vattenmättnadsgrad S_{kr} . Principiellt ger den gränsen för skada p g a frysning enligt figur 11.1.1.

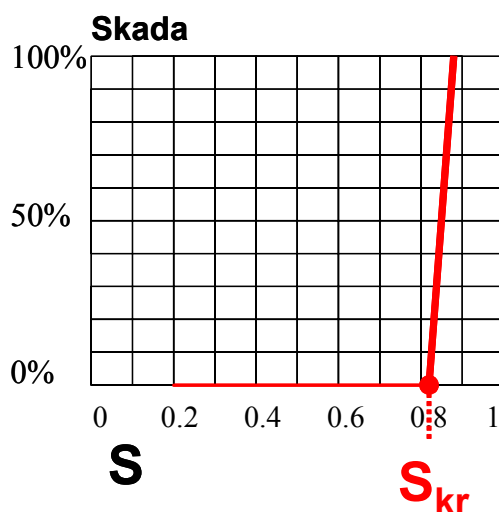


Fig. 11.1.1 Definition av kritisk vattenmättnadsgrad S_{kr} .

Överskrids vattenmättnadsgraden S_{kr} blir frysskadan stor, även vid en liten ökning av vattenmättnadsgraden. Ett exempel på mätning av förändringen vid ökning av vattenmättnadsgraden ges i figur 11.1.2.

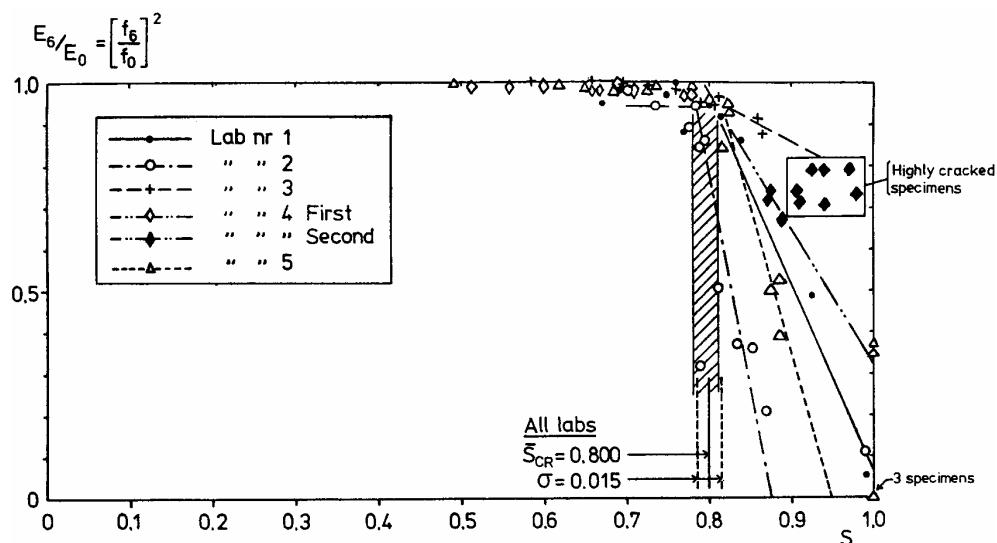


Fig. 11.1.2 Kvarvarande E -modul efter frysning som funktion av vattenmättnadsgrad. S_{kr} är mycket distinkt där skada uppkommer vid frysning³¹.

Den kritiska vattenmättnadsgraden med avseende på frost har uppmätts för en rad olika material och materialkvaliteter, Fagerlund (1977).

För frysning i samband med tösaltning, som ger ytavskalningar, är fuktens exakta roll mer oklar³².

12 Påväxt av mögel och bakterier

I detta kapitel visas först hur fukt principiellt påverkar svampar, utan hänsyn till om de specifika svamparna överhuvudtaget finns i byggnader eller på byggnadsmaterial. Därefter ges resultat som gäller sådana svampar som ibland förekommer i byggnader och på ytan av vanliga byggnadsmaterial.

12.1 Fuktpåverkan på svampväxt, allmänt

Svampar som kan växa vid låga fuktnivåer, under 85 % RF, kallas xerofila. Mekanismerna bakom och effekten av fuktpåverkan beskrivs t ex av Hocking³³. De klarar det genom att balansera omgivningens låga RF med att koncentrera lösningen (ofta av glycerol) inne i cellerna, så att fukttransport ut ur svampen förhindras. Ju lägre omgivningens RF är desto högre koncentration måste de åstadkomma i lösningen inne i cellerna. Det finns naturligtvis en gräns för hur hög denna koncentration kan få bli och därmed för hur låg RF de kan klara och ändå växa vidare.

Svampar kan växa vid mycket låga RF, men det behövs något högre RF för att de skall kunna bilda sporer. Skillnaden uppges av Hocking till mellan 2 och 9 % RF. Tillväxten har ett optimum, dvs. de växer sämre också vid mycket höga RF; varför vet man inte. Ett exempel visas i Figur 12.1.1.

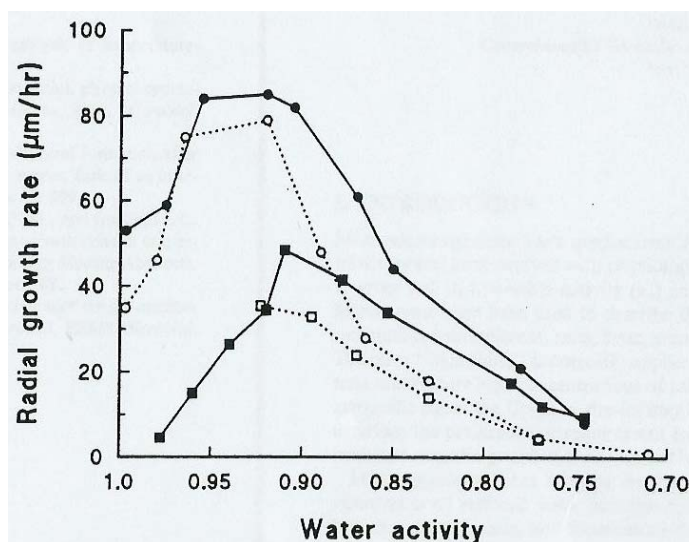


Fig. 12.1.1 Tillväxthastighet vid olika RF för två xerofila svampar, *Polypaecilum pisce* och *Basipetospora halophila*, vid +30°C, på ett substrat av natriumklorid respektive glykos/fruktos. Efter Hocking (1993)

Den lägsta RF som svampar och bakterier kan växa vid varierar oerhört mycket. Många av litteraturuppgifterna rör dock mikroorganismer som inte är aktuella i byggnader. Här ges ändå några exempel i Tabell 12.1 för att åskådliggöra den stora spännvidden i kritiska fuktillstånd för mikroorganismer av olika slag.

Tabell 12.1. Kritiska RF för tillväxt av några mikroorganismer; efter Hocking (1993)

Mikroorganism	RF _{krit} [%]
Bakterier, de flesta arter	90 - 97
Alger, de flesta arter	96
Marina bakterier	95
Halofila bakterier	75
Xerofila jästsvampar	62-83
Extremt xerofila svampar	61-72

Till exempel *Aspergillus* och *Penicillium*, som ofta förekommer i fuktskadade byggnader, är xerofila och kan växa vid låga RF. De är dock inte så extremt xerofila som anges i tabell 12.1.

Temperaturnivån spelar stor roll för vilken fuktnivå som är kritisk för svamppåväxt. I figur 12.1.2 visas ett principiellt exempel där inverkan av fukt och temperatur åskådliggörs, dels som groningstid och dels som tillväxthastighet.

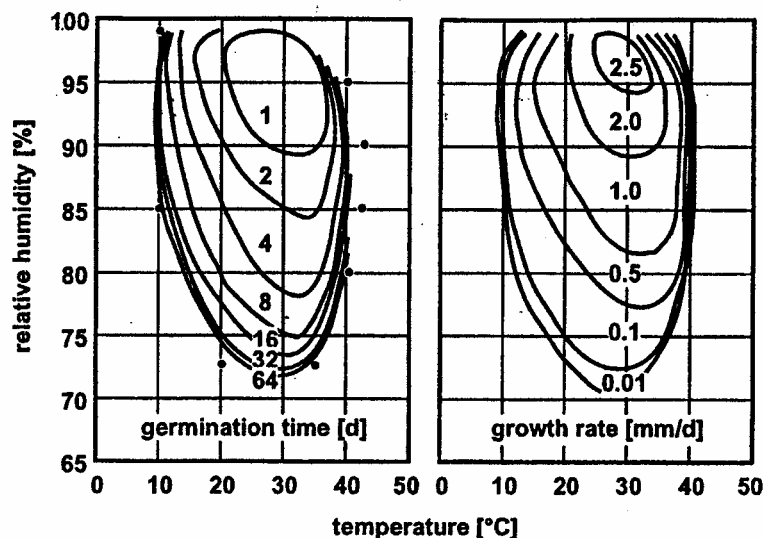


Fig. 12.1.2 Tillväxthastighet vid olika RF och T för *Aspergillus restrictus*, dels som groningstid [dygn] och dels som tillväxthastighet [mm/dygn], Smith and Hill (1982)³⁴.

En del mikroorganismer (lichens) som växer på utomhusytor har en förmåga att snabbt absorbera vatten t ex från regn, Richardson (1993)³⁵. Om de träffas av regnvatten kan de som regel bli vattenmättade inom trettio minuter, en del faktiskt inom fem minuter. De kan dock inte hålla kvar detta vatten om omgivningen torkar. En del kan också ta upp fukt från fuktig luft; 96-97 % nämns som ett erforderligt klimat, men då tar det mycket längre tid och de tar inte upp lika mycket vatten.

12.2 Fuktkrav för synligt mögel på invändiga ytor

Synlig svampväxt på invändiga ytor kräver normalt höga fuktnivåer, men det finns exempel på svampar med lägre fuktkrav. Det är dock skillnad på förekomst av svampväxt och synlig svampväxt, se också nästa avsnitt. Tillväxt av mögelsvamp på emulsionsmålat papper har studerats av Grant et al (1989)³⁶ i mikroskop. Deras resultat har sammanställts i Tabell 12.2.1 och Figur 12.2.1

Tabell 12.2.1 Minsta fuktkrav vid olika temperaturer för mögelsvampväxt på emulsionsmålat papper, Grant et al (1989)

Temperatur [°C]	RF _{krit} [%]			
	5	12	18	25
<i>Aspergillus versicolor</i>	89	87	79	79
<i>Cladosporium sphaerospermum</i>	89	93	92	90
<i>Penicillium brevicompactum</i>	87	87	80	81
<i>Penicillium chrysogenum</i>	89	87	85	84
<i>Ulocladium consotiale</i>	97	94	92	93
<i>Stachybotrys atra</i>	99	98	97	97

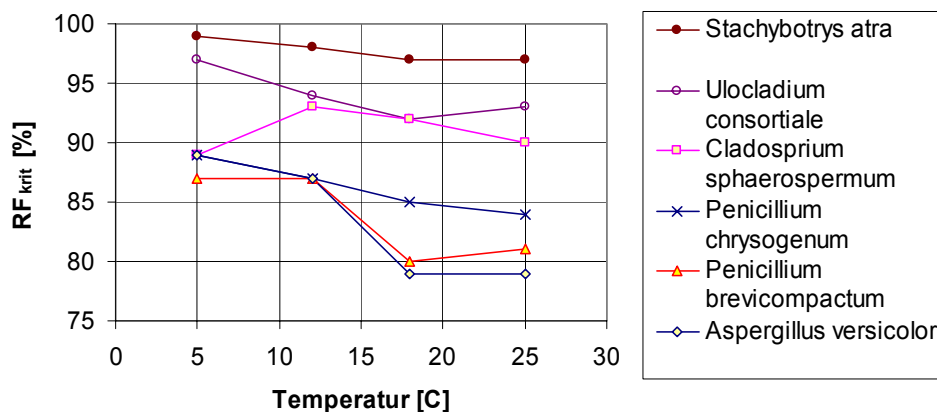


Fig. 12.2.1 Minsta fuktkrav vid olika temperaturer för mögelsvampväxt på emulsionsmålat papper, Grant et al (1989)

Nedsmutsning av ytan med kolhaltiga ämnen som kan ge extra näringstillförsel sänker fuktbehovet ett antal procentenheter, Grant et al (1989).

Nevander & Elmarsson³⁷ definierade en typ av ”risk” för mögelpåväxt, synlig i mikroskop, figur 12.2.2. Denna ”risk” är egentligen sannolikheten för att en virkesdel från ett svenskt sågverk skall vara smittad av mögelpåväxt under kedjan från skogen till brädgården. Risken är uppenbarligen starkt temperaturberoende vid samma fuktnivå.

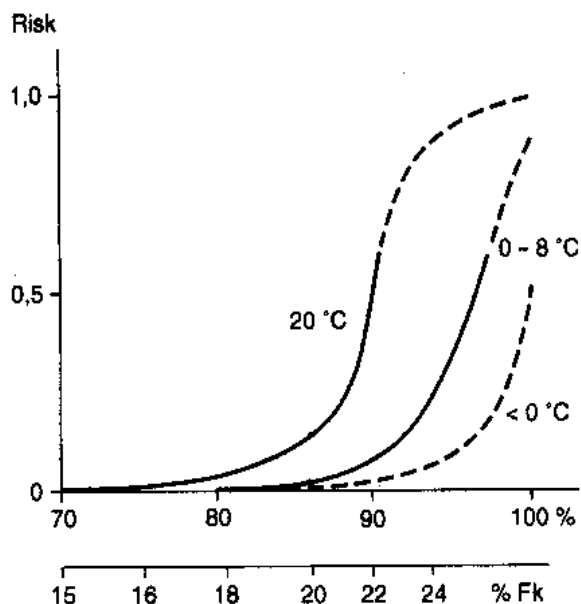


Fig. 12.2.2 ”Risken” för mögelsvampväxt på trä vid olika temperaturer och relativa fuktigheter, Nevander & Elmarsson (1994)

Viitanen (1996)³⁸ har studerat effekten av temperatur och fukt på uppkomsten av mögelpåväxt på trä, synlig med mikroskopi, figur 12.2.3. Han har också

inkluderat den viktiga effekten av fuktbelastningens varaktighet. Om fuktbelastningen är långvarig, tre månader eller mer, krävs minst 80 % RF vid temperaturer över +10°C. Högre fuktbelastning än så kan accepteras om varaktigheten är kortare än tre månader; vid en månads varaktighet kan RF upp till 87 % tolereras utan att svamppåväxt initieras. Temperaturgränsen för denna kortare varaktighet ligger enligt Viitanen över +20°C.

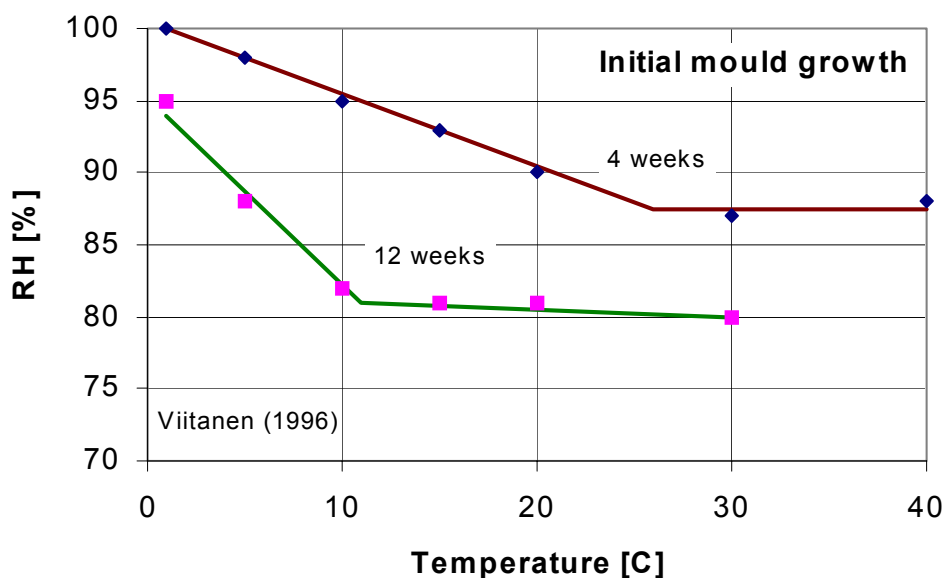


Fig. 12.2.3 Minsta fuktkrav vid olika temperaturer för mögelsvampväxt på trä, Viitanen (1996)

12.3 Fuktkrav för sporbildning

Mögelsvampar på invändiga ytor kan växa vid de låga RF som gavs i föregående avsnitt. För att denna mögelsvamp skall producera sporer krävs det dock högre fuktnivå, Grant et al (1989). De anger att *Phoma herbarum* kunde växa vid 91 och 93 % RF (vid +12° resp. +25°C), men att sporbildning sker först vid 98 % RF vid båda temperaturerna. Magan & Lacey (1984)³⁹ redovisar liknande observationer för många andra svampar. Eftersom det ofta är sporens mörka färg som gör att mögelpåväxten blir synlig är det denna högre fuktnivå som blir den kritiska för om en mögelpåväxt blir synlig för blotta ögat. Det är ju också denna gräns för sporbildning som avgör om ineluften får ett tillskott av sporer.

Viitanen (1996) har också studerat effekten av temperatur och fukt på uppkomsten av synlig mögelpåväxt på trä, figur 12.3.1, inkluderande effekten av fuktbelastningens varaktighet. Om fuktbelastningen är långvarig, tre månader eller mer, krävs minst 85 % RF vid temperaturer över +20°C för att för blotta ögat synlig mögelpåväxt skall uppkomma på trä. Högre fuktbelastning än så kan accepteras om varaktigheten är kortare än tre månader; vid en månads varaktighet kan RF upp till 92 % tolereras utan att svamppåväxt

initieras. Temperaturgränsen för denna kortare varaktighet ligger enligt Viitanen över +20°C.

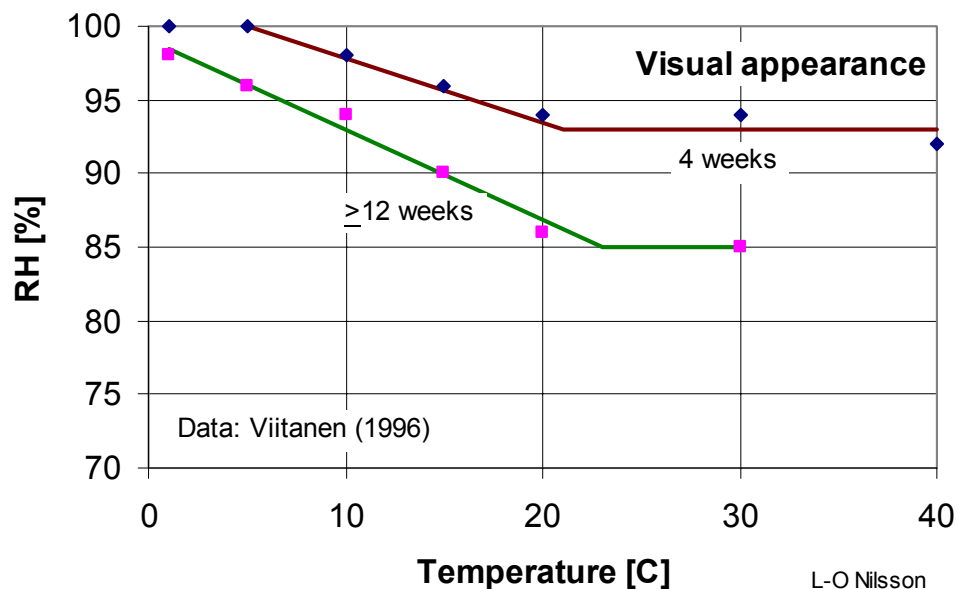


Fig. 12.3.1 Minsta fuktkrav vid olika temperaturer för synlig mögelsvampväxt på trä, Viitanen (1996)

12.4 Fuktkrav för avgivning av toxiska ämnen

Avgivning av giftiga ämnen (mykotoxiner) från svampväxt har högre kritiska fuktnivåer än ren svampväxt. Ett exempel visas i figur 12.4.1, Northolt & Bullerman⁴⁰.

Uppkomsten av t ex aflatoxin från *Aspergillus flavus* har en kritisk fuktnivå av ca 85 %RH vid +20-30°C. Andra svampgifter från andra svampar bildas först vid mycket höga RF.

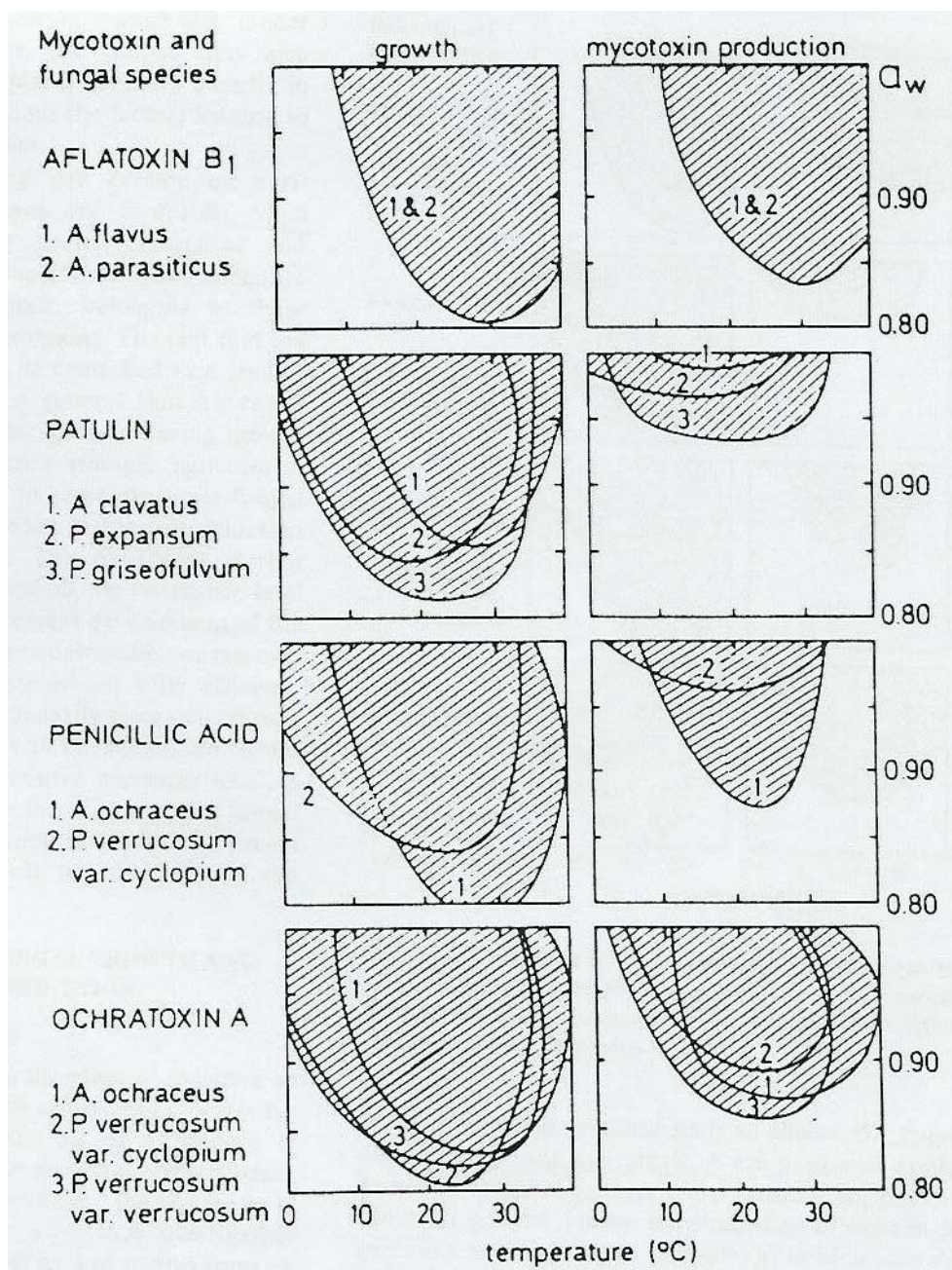


Fig. 12.4.1 Fukt- och temperaturkrav för tillväxt och mykotoxinproduktion för några mögelsvampar, Northolt & Bullerman.

13 Rötsvampangrepp

Rötsvampar kräver betydligt högre fuktnivåer än mögelsvampar för att växa. Normalt måste fuktkvoten vara över fibermättnadspunkten, dvs. ca 30 vikt-%. Den optimala fuktkvoten anges för brunröta till 30-70 % (*Coniophora puteana*) respektive 60 % (*Serpula lacrymans*), Viitanen (1994)⁴¹. Kritiska RF anges till 95-100 %, vilket måste betraktas med viss skepsis. Fuktkvoter över fibermättnadspunkten kräver RF mycket nära 100 %. I många klimatkammарstudier har sannolikt luftens RF varierat kraftigt, och därför också fuktkvoten i virkesprovkroppar, varför kritiska RF i intervallet 95-100 % inte kan användas med någon större tillförlitlighet.

Överhuvudtaget är bra studier av kritiska fuktkvoter för rötsvampväxt sällsynta. Ofta anges medelfuktkvoter i virkesstycken när svampväxten skett i en liten del av materialet. Detta ger då kraftiga underskattningar av de kritiska fuktkvoterna. Detta är sannolikt förklaringen till att fuktkvoter på 20 % ibland anges som kritisk gräns för rötsvampväxt.

En komplicerande faktor är naturligtvis att vissa rötsvampar, när de väl etablerats, kan hämta sitt vatten från källor längre bort än det material de växer på.

14 Emissioner

Avgivning av kemiska ämnen från material är ofta starkt fuktberoende. Sådana emissioner är av två slag: primära emissioner (egenemissioner av ursprungliga ämnen i materialet) respektive sekundära emissioner (avgivning av nya ämnen som bildats av någon kemisk reaktion).

14.1 Primära emissioner (egenemissioner)

Egenemissioner börjar avges direkt efter tillverkningen och har en avgivningshastighet som snabbt minskar med tiden, se figur 14.1.1.

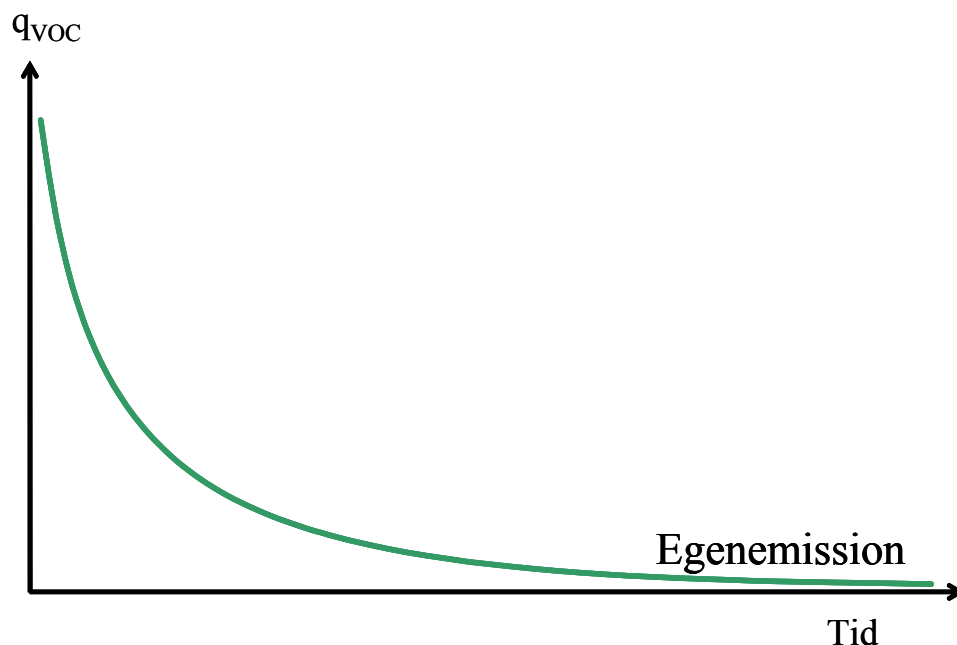


Fig. 14.1.1 Avgivningshastigheten för egenemissioner.

Studier av fuktberoendet hos avgivning av egenemissioner är dock sällsynta. Ett exempel på fuktberoendet hos avgivningen av egenemissioner visas i figur 14.1.2. Emissionshastigheten vid 70 % RF är betydligt större än vid 30 % RF, ca dubbelt så stor. Värden för högre fuktnivåer vore också intressanta, men då tillkommer också risken för emissioner från en eventuell mögelpåväxt.

Fig. 14.1.2 Avgivningshastigheten för egenemissioner av formaldehyd från spånskivor vid 30 respektive 70 % RF⁴²

I en studie av emissioner från luftfilter som dopats med olika flyktiga ämnen erhöles ibland en stor effekt av fuktpåverkan⁴³. Ökning av RF från 4-6 % RF till 70-80 % RF ökade avgivningen av hexanal, α -pinen och nonan med en faktor 5-36 medan etylbenzenavgivningen ökade ännu mer!

Egenemissioner från en kombination av mattlim och PVC-matta har uppmätts som en emissionsfaktor från materialytan³⁹ vid olika fuktnivåer på ett djup av 40 % av tjockleken hos betongplattan under. Resultaten redovisas i Figur 14.1.3, dels som summan av alla dekaner och dels som skillnaden mellan TVOC och nedbrytningsprodukterna butanol och 2-etylhexanol.

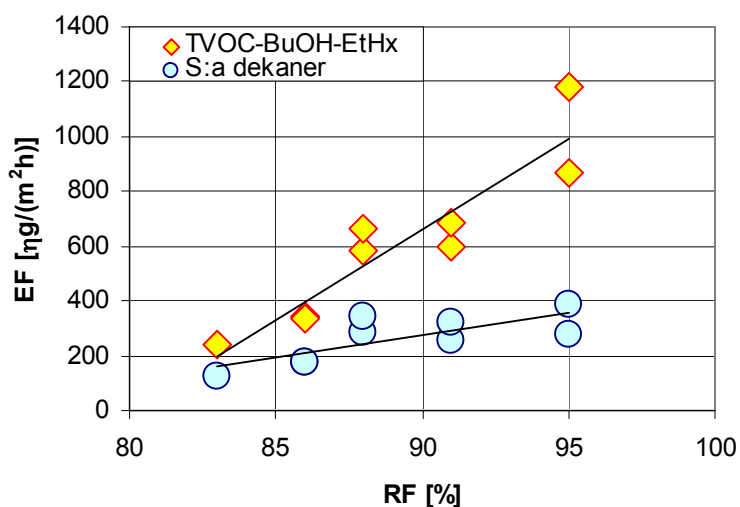


Fig. 14.1.3 Avgivningshastigheten för egenemissioner från en kombination av mattlim och PVC-matta, Wengholt Johnsson (1998)³⁹

14.2 Sekundära emissioner

Sekundära emissioner av kemiska ämnen som uppstår på grund av en kemisk reaktion uppkommer som regel först efter en viss tid och blir ofta av en helt annan storleksordning än de primära. Förloppet åskådliggörs principiellt i figur 14.2.1.

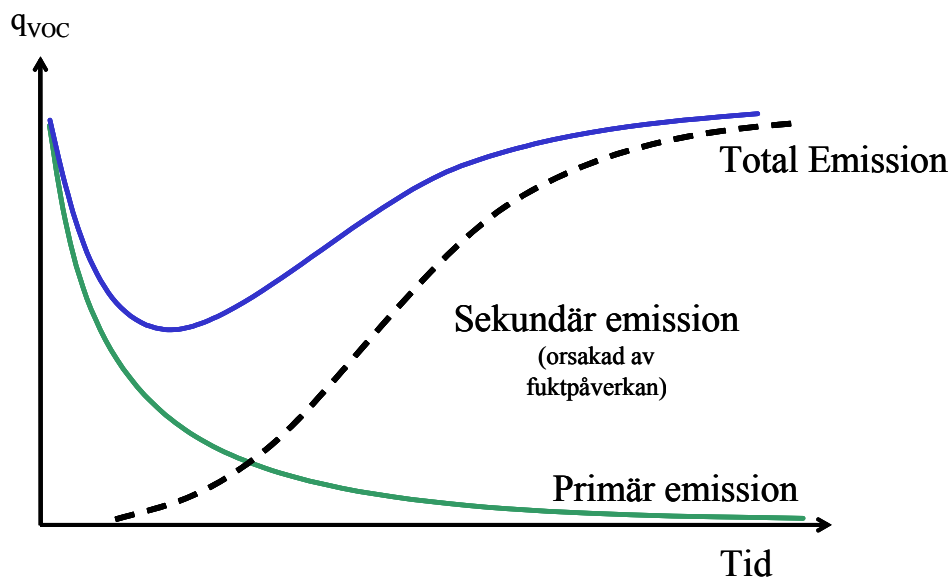


Fig. 14.2.1 Avgivningshastigheten för sekundära emissioner

Uppkomsten av sekundära emissioner i form av kemiska ämnen är som regel en följd av en kemisk reaktion mellan reaktanter som antingen fanns i materialet från början eller mellan en reaktant i materialet och en i ett angränsande material. Ofta är det en transportprocess som gör det möjligt för dessa reaktanter att mötas som är den kritiska faktorn. Fukt spelar ofta en avgörande roll för att sådana transportprocesser skall kunna äga rum. Den ena eller båda reaktanterna måste kunna diffundera i ett fuktigt porssystem. Den fuktnivå där detta börjar bli möjligt blir då den kritiska fuktnivån.

Ett bra, och vanligt, exempel på sekundära emissioner som är ordentligt studerat är avgivning av reaktionsprodukter från alkalisk nedbrytning av limmade PVC-mattor. De första mätningarna av den kritiska fuktnivån för den process som visas i figur 14.2.2.

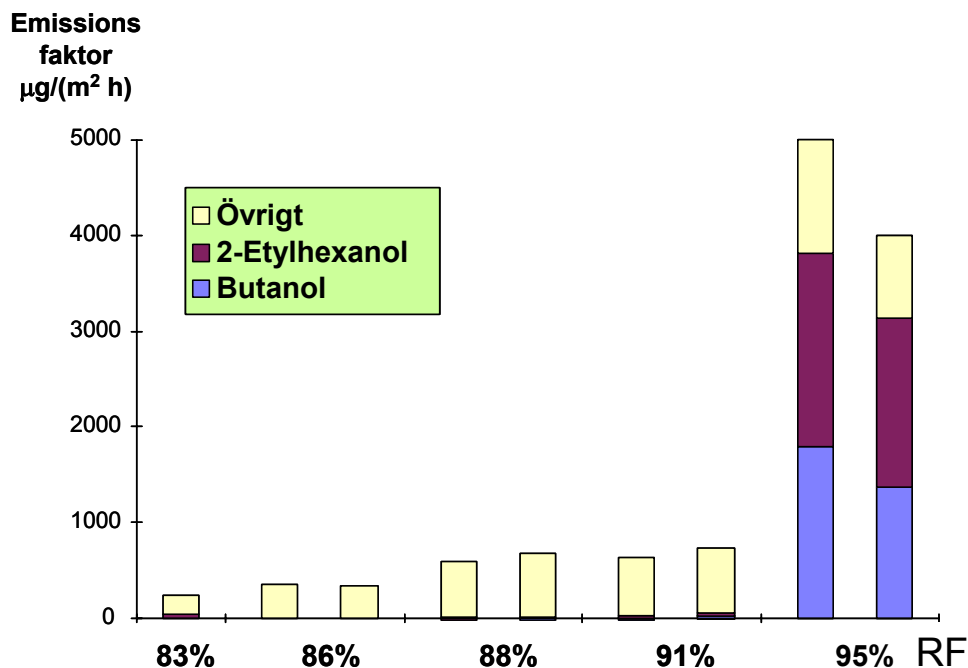


Fig. 14.2.2 Avgivningshastigheten för sekundära emissioner från alkalisk nedbrytning av materialkombinationen limmad PVC-matta på fuktigt, alkaliskt underlag av betong⁴⁴.

Under ca 90 % RF avges bara egenemissioner från matta och lim, jfr värdena i Figur 14.1.3. Över ca 90 % RF uppkommer också nedbrytningsprodukterna 2-etylhexanol och butanol. Liknande resultat har erhållits av Alexandersson (2004)⁴⁵.

Alkalisk nedbrytning av proteiner i äldre flytspackel visade sig ha en kritisk RF omkring 80 %, se figur 9.3.1. Studier av fuktberoendet hos andra typer av sekundära emissioner är tyvärr sällan förekommande.

15 Index

Fuktpåverkan på material sker ofta som ytterst komplicerade, sammansatta processer. Det kan därför vara svårt att hitta en viss typ av fuktpåverkan i skriften. Som hjälp ges här därför en förteckning över vissa nyckelord framför allt sådana som antingen inte har en egen rubrik eller som finns beskrivna på mer än ett ställe.

”kritisk RF”	13	gelporer	22
2-etylhexanol.....	70	golvvärme	25
aflatoxin	64	groningstid	60
alkali.....	44, 50	hydrauliskt tryck	57
Alkali.....	70	hysteres	10
amin.....	49	hållfasthet.....	29
ammoniak.....	49	invändiga ytor	63
armeringskorrosion	53	jontransport	44
Aspergillus	60	kantresning.....	27
bakterier	60	Kantresning.....	27
betong.....	32	kapillärporer.....	22
butanol.....	70	Kapillärsugning.....	41
cellplast	32	karbonatisering	49, 53
cementbaserade material	22, 27	kasein	49
cementbaserat material.....	22, 48	klorid.....	47, 54
diffusion	42	koldioxid	49
distorsion.....	21	Koldioxid	54
egenemissioner.....	67	konektivitet	43
ettringit.....	51	konvektion	44
fibermåtnadspunkten.....	20, 29, 31, 38, 66	korrosion	51
Flytspackel	49	korrosionshastighet.....	55
formaldehyd	68	kritisk fuktnivå.....	13
fuktdimensionering	15, 16	kritisk vattenmåtnadsgrad.....	57
fukthalt	8	krypning.....	18, 22
fuktkapacitet.....	37	krypning.....	26, 27
fuktkvot	8	Krökning	25
fuktpåverkan	12, 13	linoleummatta	13
fuktrörelser.....	18	livslängd.....	16, 56
fukttransport.....	38	lättbetong	23, 40
gasdiffusion.....	43	mattlim	68
gaspermeation	43	metallkorrosion	52
		mikroorganismer.....	60

mineralull	35	spånskiva.....	27
mjukgörare	24	spånskivor	68
Nedsmutsning	62	spänningar	26
papper.....	61	Stachybotrys	61
Penicillium	60	styvhet.....	29
permeation.....	42	stål.....	53
polymerer	23	svamp.....	59
porfuktighet.....	8	svällning.....	18
porstorleksfördelning	10	tortuositet	42
porvattenundertryck	23	toxiner	64
primära emissioner	67	träbaserade material	20
protein	49	trägolv.....	26
PVC-matta.....	68	varaktighet	63
PVC-mattor	23	vattenaktivitet	8
risk.....	62	vattencementtalet	22
rötsvamp.....	66	vattenmättnadsgrad	57
scanningkurvor.....	10	VOC.....	68
sekundära emissioner	69	värmediffusiviteten	32
<i>Serpula lacrymans</i>	66	värmekapacitet	32
sorptionskurvan.....	36	värmekonduktivitet	32
Sorptionskurvan	10	ytsprickor	25
sporer.....	59, 63		

16 Referenser

- ¹ Nilsson, L.-O. & Hedenblad, G. (1987) *Kritiska fukttillstånd för några byggnadsmaterial – Preliminär undersökning*. Rapport TVBM-3028, Byggnadsmaterial, LTH, Lund
- ² Mindess, S & Young, J. F. (1981) *Drying Shrinkage*, kapitel 18 i *Concrete*, Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs, New Jersey 07632, s. 486-490.
- ³ Burström, P. G. (2001) *Byggnadsmaterial – Uppbyggnad, tillverkning och egenskaper*. Studentlitteratur, Lund
- ⁴ Wood Handbook (1955). *Basic Information on Wood as a Material of Construction with Data for Its Use in Design and Specification*. Agriculture Handbook No. 72, U.S. Government Printing Office, Washington D.C.
- ⁵ Nilsson, L-O (1979) *Flytande golv på styrenplast. Skarvresning hos spånskivor*, rapport TVBM-7001, Byggnadsmaterial, LTH, Lund
- ⁶ Thunell, B. (1960) *Trä, dess byggnad och felaktigheter*. 2:a uppl. Byggstandardiseringen, Stockholm
- ⁷ Bonzel, J & Kadleček, V. (1970) *Einfluss der Nachbehandlung und des Feuchtigkeitszustands auf die Zugfestigkeit des Betons*. *Beton*, 1970(20):7, s. 303-309 och 1970(29):8, s. 351-357.
- ⁸ Hunt, D.G. & Shelton, C.F. (1987) *Progress in the analysis of creep in wood during concurrent moisture changes*. *Journal of Material Science* **22**, (1987) s. 313-320.
- ⁹ Sandberg, P-I (1986) *Moisture Content and Thermal Conductivity in Soil Insulation*, *Journal of Thermal Insulation*, Vol. 10, oktober 1986, s. 124-140
- ¹⁰ Morabito, P. (1989) *Measurement of the thermal properties of different concretes, High temperatures – High pressures* 21, s. 51-59.

-
- ¹¹ Sandberg, P-I (1989) *Thermal resistance of a wet mineral fiber insulation*, Thermal insulations: materials and systems. ASTM STP 922, F.J. Powell and S.L. Matthews (eds.), ASTM, Philadelphia 1987, s. 394-404.
- ¹² Hedenblad, G. (1993) *Water vapour permeability of cement based materials*, rapport TVBM-1014, Byggnadsmaterial, LTH, Lund
- ¹³ van der Kooi, J. (1971) *Moisture transport in cellular concrete roofs*, Uitgeverij Waltman, Delft
- ¹⁴ Janz, M. (2000) *Moisture transport and fixation in porous materials at high moisture levels*, rapport TVBM-1018, Byggnadsmaterial, LTH, Lund
- ¹⁵ Tuutti, K. (1982) *Corrosion of steel in concrete*, CBI Research Fo 4:82. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm.
- ¹⁶ Abbas A., Carcassés M. & Ollivier J. P. (1999) *Gas permeability of concrete in relation to its degree of saturation*. Materials and Structures, 1999, 32, s. 3–8.
- ¹⁷ Sjöberg, A. (1998) *Transportprocesser och reaktioner i belagda betonggolv - olika faktorerers inverkan på emission från golvkonstruktionen*. Licentiatuppsats P-98:13, Byggnadsmaterial, Chalmers, Göteborg
- ¹⁸ Francy, O. (1998) *Modélisation de la pénétration des ions chlorures dans les mortier partiellement saturés en eau*. These du doctorat, LMDC, Université Paul Sabatier, Toulouse
- ¹⁹ Climent, M. A., de Vera, G., López, J., Garcia, D. & Andrade, C. (2000), *Transport of chlorides through non-saturated concrete after an initial limited chloride supply*, 2nd International RILEM Workshop on Testing and Modelling the Chloride Ingress into Concrete, 11-12 September 2000, Paris, France
- ²⁰ Nilsson, L.-O. (1997) *A model for convection of chlorides*, kapitel 7 i Frederiksen, J. M., L.-O. Nilsson, P. Sandberg, E. Poulsen, Tang L. & A. Andersen, *A system for estimation of chloride ingress into concrete. Theoretical background*. HETEK. Vejdirektoratet, Köpenhamn, Report No 83 1997
- ²¹ Nilsson, L.-O., Andersen, A., Tang L. & Utgenannt, P. (2000) *Chloride ingress data from field exposure in a Swedish road environment*, 2nd International RILEM Workshop on Testing and Modelling the Chloride Ingress into Concrete, 11-12 September 2000, Paris, France
- ²² Norling-Mjörnell, K. (1997) *Moisture Conditions in High Performance Concrete*, publikation P:97.3, Inst f Byggnadsmaterial, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg

-
- ²³ Goodbrake, C.J., Young, J.F. & Berger, R.L. (1979) *Reaction of hydraulic calcium silicates with carbon dioxide and water*. Journal of American Ceramic Society, Vol 62, No 9-10, s. 488-.
- ²⁴ Samuelsson, P. (1977) *Kalkutfällningar på betongytor*, BFR-rapport R3:1977, Svensk Byggtjänst, Stockholm
- ²⁵ Nilsson, L.-O. (1984) *Fukt i flytspackel*, Fuktgruppen informerar 1984:1, Fuktgruppen vid LTH, Lund
- ²⁶ Nilsson, L.-O. & Peterson, O. (1983) *Alkali-silica reactions in Scania, Sweden. A moisture problem in concrete floors*. Rapport TVBM-3014, Byggnadsmaterial, LTH, Lund
- ²⁷ Lentzner, D. & Ludwig, U. (1978) *The alkali aggregate reaction with opaline sandstone from Schleswig-Holstein*. Proc. of IVth Int Conf on Effects of Alkalies in CemenConcrete, Purdue Univ., West Lafayette, Ind. Publ. No. CE-MAT-1-78
- ²⁸ Scott, D. A. (1990) *Bronze disease: a review of some chemical problems and the role of relative humidity*. JAIC 1990, Volume 29, Number 2, Article 7, s. 193-206.
- ²⁹ Pettersson, K. (1996), "*Service Life of Concrete Structures – In saline environment*", CBI Report 3:96, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm.
- ³⁰ Tuutti, K. (1982) *Corrosion of steel in concrete*, CBI Research Fo 4:82. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm.
- ³¹ Fagerlund, G. (1977) *The international cooperative test of the critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete*, *Materials and Structures*, Vol. 10, No. 58.
- ³² Lindmark, S. (1998) *Mechanisms of salt frost scaling of Portland cement-bound materials: studies and hypothesis*, rapport TVBM-1017, Byggnadsmaterial, LTH, Lund
- ³³ Hocking, A.D. (1993), *Responses of Xerophilic Fungi to Changes in Water Activity*, in *Stress Tolerance of Fungi*, Mycology Series Volume 10 (ed. D. H. Jennings)
- ³⁴ Smith, S. L. and Hill, S.T. (1982), *Influence of temperature and water activity on germination and growth of Aspergillus restrictus and A. Versicolor*, *Trans. Br. Mycol. Soc.* 79 (3).
- ³⁵ Richardson, D. H. S. (1993), *The Physiology of Drying and Rewetting in Lichens*, in *Stress Tolerance of Fungi*, Mycology Series Volume 10 (ed. D. H. Jennings)

-
- ³⁶ Grant, C., Hunter, C.A., Flannigan, B and Bravery, A.F. (1989). *The moisture requirements of moulds isolated from domestic dwellings*. Internat. Biodet. 25:259-284.
- ³⁷ Nevander, L. E. & Elmarsson, B. (1994) *Fukthandboken*, 2:a uppl., Svensk Byggtjänst, Stockholm
- ³⁸ Viitanen, H. (1996) *Factors affecting the development of mould and brown rot decay in wooden material and wooden structures. Effect of humidity, temperature and exposure time*. Doktorsavhandling, SLU, Uppsala
- ³⁹ Magan, N. & Lacey, J. (1984), *Effect of Temperature and pH on Water Relations of Field and Storage Fungi*. Transactions of the British Mycological Society **82**, s. 71-81.
- ⁴⁰ Northolt, M.D. & Bullerman, L. B. (1982) *Prevention of Mold Growth and Toxin Production through Control of Environmental Conditions*, Journal of Food Protection, Vol. 45, april 1982.
- ⁴¹ Viitanen, H. (1994) *Factors affecting the development of biodeterioration in wooden constructions*, Materials and Structures, 27, s. 483-493.
- ⁴² I. Andersen, G.R. Lundquist & L. Mølhav (1976): *The Effect of Air Humidity and Sulphur Dioxide on Formaldehyde Emission from a Construction Material (Clipboard)*. *Holzforschung und Holzwertung*, vol. 28, no. 5. pp. 120-121
- ⁴³ Hyttinen, M., Pasanen, P. & Kalliokoski, P. (2001) *Adsorption and desorption of selected VOCs in dust collected on air filters*, Atmospheric Environment 35 (2001) s. 5709–5716
- ⁴⁴ Wengholt Johnsson, H. (1995) *Kemiska emission från golv - effekt av olika betongkvaliteter och fuktbalans*. Publikation P:95.4, Inst f Byggnadsmaterial, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg
- ⁴⁵ Alexandersson, J. (2004) *Secondary emissions from alkali attack on adhesives and PVC floorings*, Byggnadsmaterial, LTH, rapport TVBM-3115