

4. Bygningsfysik

4.1 Fugtlære

Af civilingeniør Ph.D. Carsten Rode.

Der vil altid være en vis mængde fugt til stede i materialerne i en bygningskonstruktion og i den omgivende luft.

Hvis fugtniveauet bliver for højt, giver det risiko for alvorlige skader på konstruktionerne.

Det kan undgås ved at udføre konstruktionerne korrekt, så muligheden for fugtindtrængning begrænses. Desuden må der tages højde for, at fugt, der trods alt kommer ind, må kunne slippe ud igen, inden det giver anledning til problemer.

I dette kapitel beskrives, hvordan fugt er tilstede i luft og i materialer, og de vigtigste mekanismer til at transportere fugten bliver forklaret. I afsnittet fugtakkumulering i konstruktioner gives flere anvisninger på praktiske forholdsregler, der bør iagttages for at undgå skadelig fugtophobning. Endelig gennemgås nogle metoder til at regne på fugtforholdene i konstruktioner.

Vanddamp i luft

På kolde genstande, der befinder sig i varme, fugtige omgivelser, vil der let kunne dannes kondens på overfladen. Det vil være uheldigt, hvis en sådan genstand er en vinterkold tagdækning, der på undersiden er kommet i kontakt med den varme og fugtholdige luft fra indeklimaet. I dette afsnit redegøres derfor for hvor meget vanddamp, der kan være i luften under forskellige betingelser, så risikoen for kondensdannelse kan vurderes.

Luften i vores omgivelser er en blanding af forskellige luftarter – først og fremmest kvælstof og ilt. Luften indeholder også en vis mængde vanddamp, men denne andel kan være meget varierende og afhænger af hvilken tilførsel af vanddamp til luften, der finder sted, og hvor hurtigt luften opblandes med luft fra andre omgivelser.

Mættet fugtig luft

Der er en grænse for hvor meget vanddamp luften kan indeholde, og denne grænse er stærkt afhængig af luftens temperatur. Ved 20 °C kan luften højst indeholde 17,3 gram vanddamp per kubikmeter. Ved 10 °C er grænsen 9,4 g/m³, og ved 0 °C bare 4,8 g/m³. Luft, der ikke kan indeholde mere vanddamp, siges at være mættet. Hvis der tilføres mere vanddamp, vil en tilsvarende mængde vand kondensere som tåge eller som dråber på de vægge, der afgrænser luften. Den krumme linie for 100% i figur 4.1 viser indholdet af vanddamp i mættet luft som funktion af temperaturen.

Tabel 8 i kapitel 11 viser indholdet af mættet vanddamp ved forskellige temperaturer.

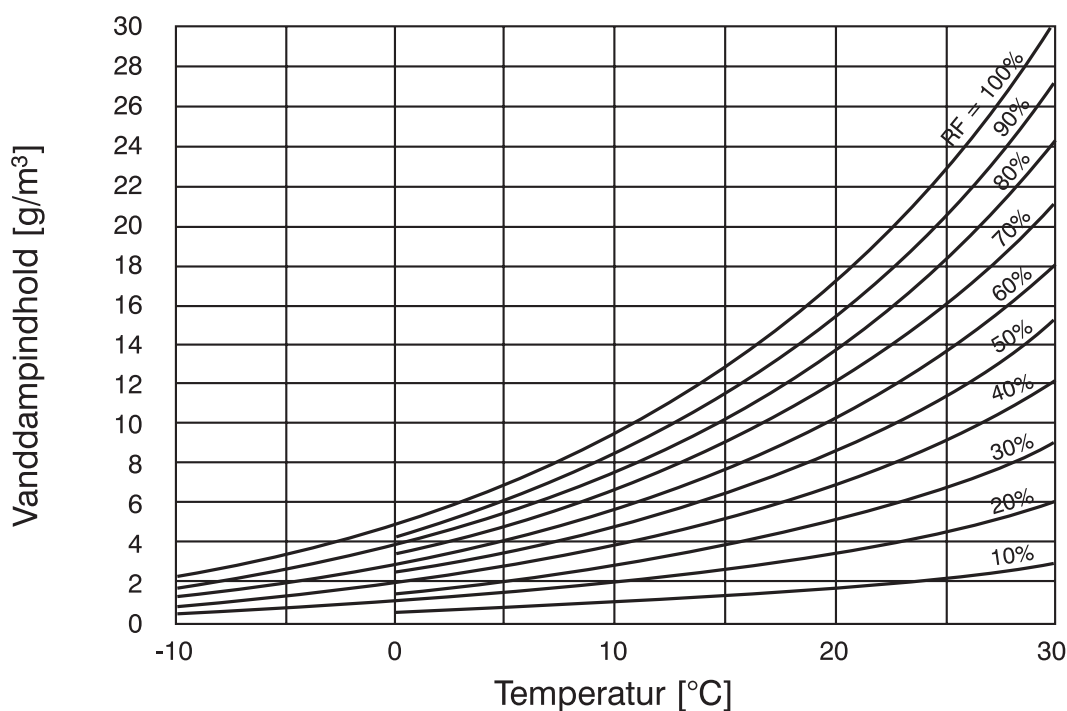


Fig. 4.1. Vanddampdiagrammet viser sammenhængen mellem luftens temperatur, vanddampindhold og relativ fugtighed. Luften er mættet med vanddamp ved 100% RF.

Relativ fugtighed og vanddampdiagrammet

Luften i omgivelserne er normalt ikke mættet, så det aktuelle vanddampindhold er som regel mindre end mætningsværdien.

Luftens relative fugtighed (forkortes RF) defineres som det aktuelle vanddampindhold i forhold til vanddampindholdet, hvis der var mætning ved samme temperatur. Den relative fugtighed angives i procent, og kan ikke overstige 100%.

Eksempel:

Luften i et rum er 20 °C og har et vanddampindhold på 6,9 g/m³. Da luften ved denne temperatur har et mætningsdampindhold på 17,3 g/m³, er den relative fugtighed:

$$(6,9 \text{ g/m}^3 : 17,3 \text{ g/m}^3) \times 100\% = 40\%$$

Hvis vanddampindholdet optegnes som funktion af temperaturen for en række forskellige relative fugtigheder, får man et diagram som det, der vises i figur 4.1. I dette såkaldte vanddampdiagram står hver enkelt krum kurve for en bestemt relativ fugtighed, hvor kurven for 100% er mætningskurven.

I det følgende vil der blive vist nogle praktiske eksempler på brug af diagrammet.

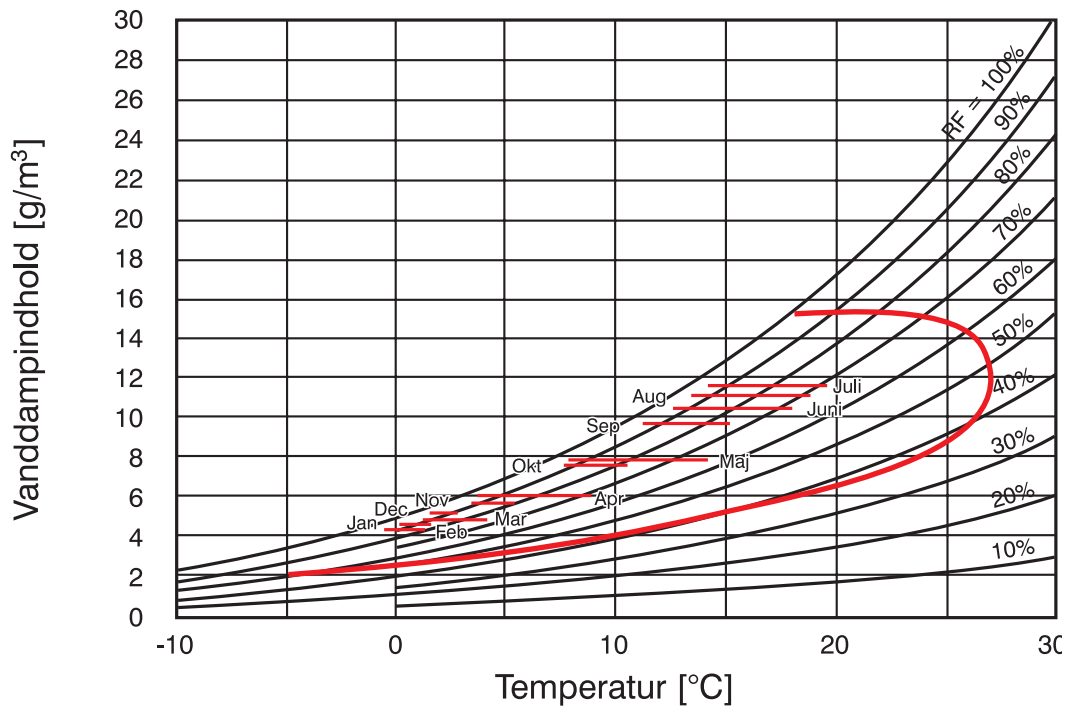
Fugtforholdene ude og inde

I Danmark har den udendørs luft som regel en høj relativ fugtighed. Ved regn og tåge, kommer den relative fugtighed op på 100%. I øvrigt varierer luftens relative fugtighed med årstiden og tidspunktet på døgnet.

Den udendørs relative fugtighed er højest om vinteren - typisk omkring 90%, og falder sjældent til meget under 80%. På grund af temperaturen ligger udeluftens vanddampindhold alligevel kun på 4-5 g/m³ i de kolde måneder. Om sommeren ligger den relative fugtighed i gennemsnit på 70% til 80%, med variationer mellem ca. 50% og 100%. På grund af det varme vejr er vanddampindholdet højere om sommeren, hvor det varierer omkring 10-12 g/m³. Disse intervaller illustreres af vanddampdiagrammet i figur 4.2.

Luften i en bygning kan betragtes som udeluft, der er blevet opvarmet, når den kommer ind i bygningen. Ved opvarmningen falder den relative fugtighed, da mætningsdampindholdet bliver højere.

I de fleste bygninger foregår der aktiviteter, der tilfører vanddamp til luften. For en bolig med en familie på to voksne og to børn kan der regnes med, at der ved transpiration, badning, tøjvask og -tørring, rengøring, madlavning, etc. tilføres omkring 10 kg vanddamp til luften pr. døgn. Der er dog nogen variation i dette tal fra husstand til husstand. I erhvervsbygninger og institutioner må fugttilførslen



Figur 4.2. Udeluftens tilstand varierer gennem året indenfor den kraftigt optrukne bue i vanddampdiagrammet. Gennemsnitlige døgnvariationer for temperaturen og den relative fugtighed er markeret for hver måned med vandrette streger. Efter SBI-anvisning 178.

bestemmes i hvert enkelt tilfælde ud fra aktivitetens art.

For at beregne hvor meget fugttilførslen forøger indelufts vanddampindhold i forhold til udeluftens, må man fordele den afgivne fugtmængde pr. tid på den luftmængde, der i løbet af samme tid udskiftes i bygningen.

Hvis man kender rumfanget af luft i bygningen og luftskiftet pr. time, kan man beregne det indendørs vanddampindhold som en tilvækst til det udendørs:

$$c_i = c_u + (1000 \times G : (24 \times n \times V))$$

Hvor:

c_u og c_i er vanddampindholdet af tilført udeluft og afkastet indeluft [g/m^3]

G er fugttilførslen til luften [$\text{kg}/\text{døgn}$]

n er luftskiftet [antal gange pr. h]

V er rumfanget af luft i bygningen [m^3]

Forøgelsen er $c_i - c_u$.

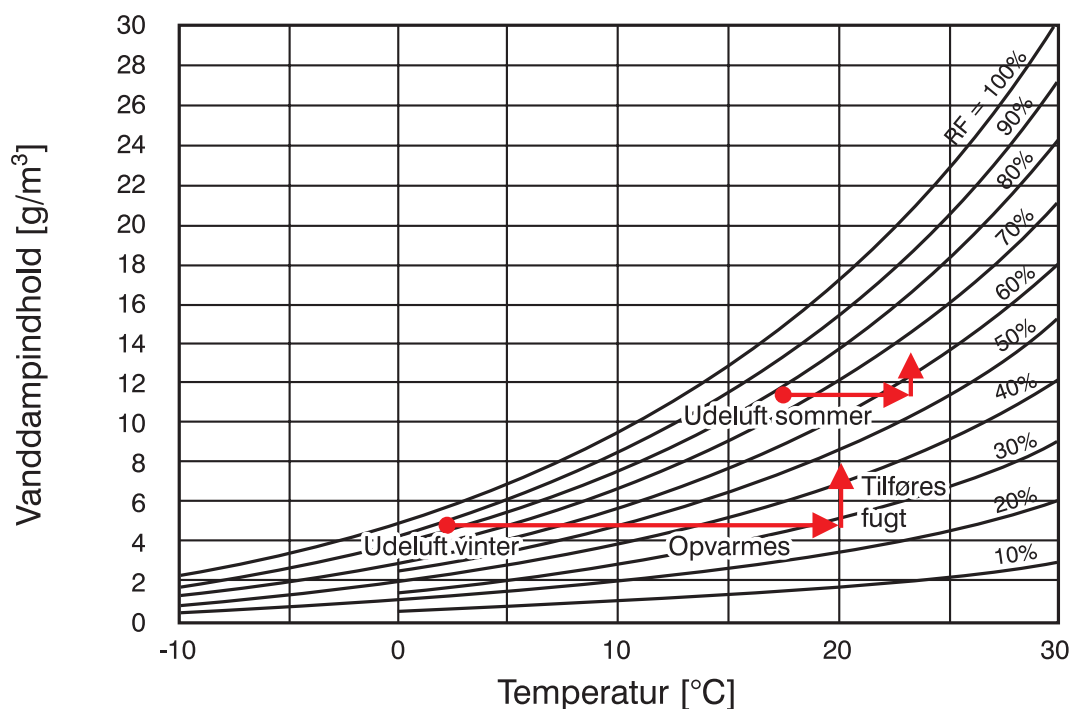
Af beregningsudtrykket ser man, at jo større luftskiftet er, jo lavere bliver den indendørs fugtighed. For at undgå for meget fugt i boliger og andre bygninger med løbende fugttilskud skal der derfor luftes godt ud, og indeklimaets fugttilførsel må begrænses. Det er en af grundene til, at bygningsreglementet foreskriver, at luftskiftet i beboelsesrum ikke må komme under 0,5 gange i timen.

Eksempel:

I en bolig, hvor luften har et rumfang på 250 m³, og luftskiftet er på en halv gang i timen, frigives 10 kg vanddamp pr. døgn (420 g/h). Dette giver anledning til en forøgelse af det indendørs vanddampindhold på:

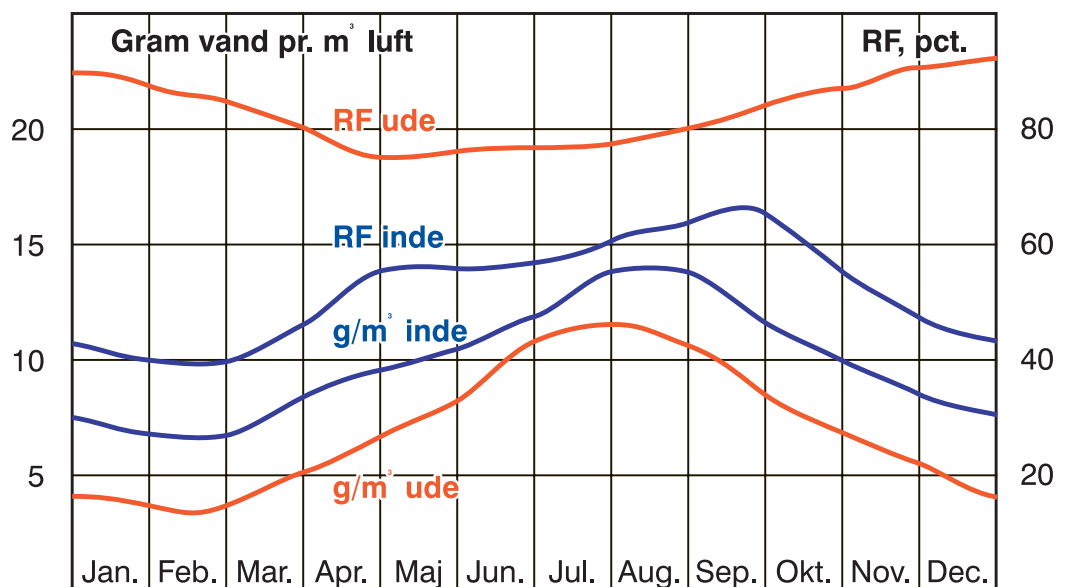
$$420 \text{ g/h} : (0,5 \text{ h}^{-1} \times 250 \text{ m}^3) = 3,4 \text{ g/m}^3$$

Luftens tilstand, når den først varmes op og derefter befugtes, er vist i vanddampdiagrammet figur 4.3 for en vinter- og en sommer-situation.



Figur 4.3. Den indendørs lufts tilstand kan bestemmes som tilstanden for udeluft, der opvarmes og befugtes.

I en bolig er vanddampindholdet normalt 3 til 4 g/m³ højere end i udeluften det meste af året. Denne forskel er dog lidt mindre om sommeren, hvor der luftes mere ud. Typiske forløb af vanddampindhold og relativ fugtighed ude og indendørs i boliger er vist i figur 4.4. Bemærk hvorledes vanddampindholdet ude og inde følges ad med en næsten konstant forskel (ca. 3 g/m³). Bemærk også, at hvor den udendørs relative fugtighed er højest om vinteren, fordi det er koldt, så er den i indeklimaet højest om sommeren.



Figur 4.4. Typisk variation over året af vanddampindhold og relativ fugtighed i den udendørs luft og i luften i en bolig. Efter SBI-anvisning 178.

I kontorer er fugttilførslen noget mindre end i boliger, fordi aktiviteterne i reglen ikke giver anledning til så stor tilførsel af vanddamp til luften. Omvendt kan der være bygninger, der rummer fugtafgivende produktion, eller fx svømmehaller, hvor fugttilførslen er væsentligt højere end for boliger. Endelig kan der forekomme bygninger, hvor indeklimaet reguleres ved be- eller affugtning for at holde en fastsat fugtighed.

Damptryk, dugpunktstemperatur og absolut vanddampindhold

Damptryk

Vanddampindholdet er ikke den eneste størrelse, der benyttes til at angive indholdet af vanddamp i luft. Det er også almindeligt at anvende vanddamps partialtryk (eller bare "damptrykket"). Trykket i atmosfæren fremkommer ved, at hver luftart udøver sit eget partialtryk, således at atmosfæretrykket er summen af partialtrykkene for de forskellige luftarter. Det normale atmosfæretryk er omkring 101.300 Pa (760 mmHg), hvoraf vanddamps partialtryk i et almindeligt indeklima bidrager med ca. 1%. For vanddamp kan sammenhængen mellem partialtryk og vanddampindhold skrives som:

$$p = 461,5 \times (\theta + 273) \times c$$

Hvor:

p er vanddamps partialtryk [Pa]

θ er temperaturen [$^{\circ}\text{C}$]

c er vanddampindholdet [kg/m^3]

Tabel 8 i kapitel 11 viser partialtrykket for mættet vanddamp ved en række forskellige temperaturer.

Vanddampdiagrammet kan også optegnes med damptrykket i stedet for vanddampindholdet op ad y-aksen. Den relative fugtighed defineres på samme måde som med udgangspunkt i vanddampindholdet: $RF =$ luftens aktuelle damptryk i forhold til mætningsdamptrykket ved den temperatur, luften har. Denne form af vanddampdiagrammet er vist i tabel 9, kapitel 11.

Dugpunktstemperaturen

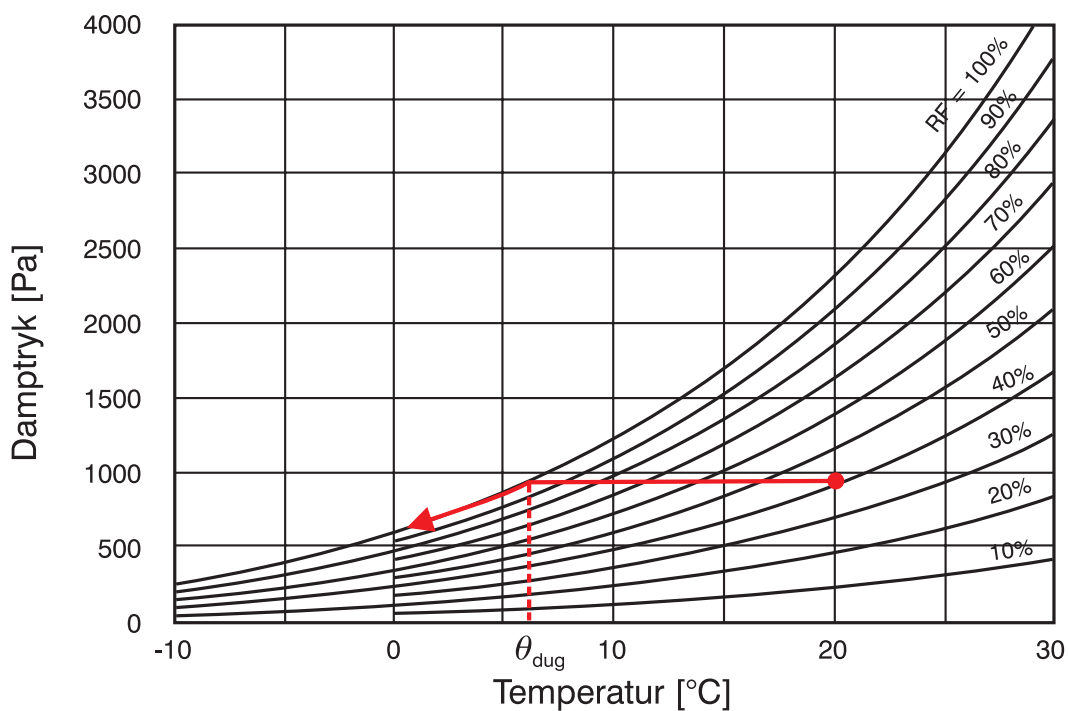
Når fugtholdig luft køles ned fra en given temperatur uden tilførsel eller fjernelse af fugt fra luften, vil vanddampdiagrammet vise, at den relative fugtighed stiger. Damptrykket ændres nemlig ikke ved afkølingen, idet luftens sammensætning er uændret. Figur 4.5 viser, hvordan afkølingsforløbet ser ud i vanddampdiagrammet. Ved en bestemt temperatur bliver den relative fugtighed 100%. Fortsættes afkølingen yderligere, kan luften ikke længere holde det samme

damptryk. Der vil da udfældes kondens som fine vanddråber i luften (tåge) eller som dug på tilgrænsende overflader, og damptrykket falder. Den temperatur, hvor kondensdannelsen starter, betegnes dugpunktstemperaturen.

Eksempel:

Luft, der til start er 20 °C og har en relativ fugtighed på 40%, køles ned. Mætningsdamptrykket ved 20 °C er 2338 Pa, så det aktuelle damptryk er 40% heraf: 935 Pa. Dette er mætningsdamptrykket ved 6,0 °C, der derfor er luftens dugpunktstemperatur - eller bare "dugpunktet".

Dugpunktstemperaturen kan opfattes som endnu en måde at udtrykke luftens fugtighed på - høj fugtighed i luften giver et højt dugpunkt.



Figur 4.5. Dugpunktstemperaturen bestemmes som den temperatur, hvor luftens konstante damptryk under afkøling skærer den krumme kurve for 100% RF i vanddampdiagrammet.

Det absolutte vanddampindhold

Især indenfor ventilationsteknikken benyttes også luftens absolutte vanddampindhold, x , der udtrykker massen af vanddamp i luft i forhold

til massen af tør luft. Der gælder følgende sammenhæng mellem x og partialtrykket for vanddamp:

$$x = 0,622 \times p : (P_{\text{atm}} - p)$$

Hvor P_{atm} er luftens totaltryk (atmosfæretrykket) [Pa]

Sammenhængen mellem det absolutte vanddampindhold, x , og vanddampindholdet per rumfang, c [kg/m³], kan skrives:

$$x = c \cdot \rho$$

Hvor ρ er den tørre lufts massefylde [kg/m³]

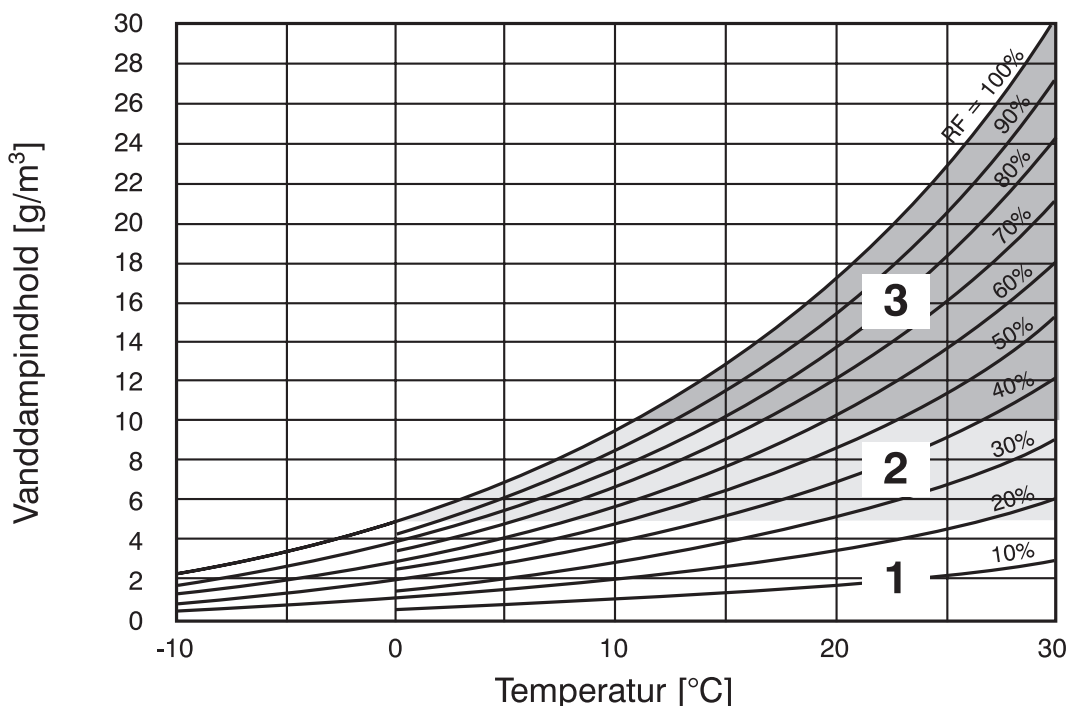
Rumklimaklasser

Fugtigheden af indeluften i en bygning afhænger altså ganske meget af bygningens anvendelse og dens ventilationsforhold. For at kunne vurdere risikoen for, at der forekommer fugtskader i konstruktionerne, er det relevant at sammenligne indeluftens dugpunktstemperatur med den temperatur, de udvendige bygningsdele får om vinteren.

Vanddampdiagrammet benyttes til at foretage en klassifikation af indeklimaet. Se figur 4.6. Rumklimaklasserne giver mulighed for på en simpel måde at udtrykke hvilken risiko, et givet indeklima giver, for at der kan forekomme skader i de omgivende konstruktioner. Ved beskrivelsen af en bygningskonstruktion kan man specificere hvilke rumklimaer, konstruktionen er egnet til.

Rumklimaklasse 1 karakteriseres ved, at det indendørs vanddampindhold ikke overstiger 5 g/m³ i vinterhalvåret. Det vil sige, at dugpunktstemperaturen er under ca. 1 °C. Kun bygningsdele, der befinder sig omkring eller under frysepunktet, er udsatte for kondensrisiko, hvis de kommer i berøring med denne luft. Rumklimaklasse 1 finder man i rum uden nogen væsentlig fugttilførsel, fx tørre lagerhaller eller sportshaller uden tilskuere.

Rumklimaklasse 2 dækker området med vanddampindhold fra 5 til 10 g/m³ i vinterhalvåret, det vil sige med en dugpunktstemperatur mellem 1 °C og 11 °C. Der er risiko for kondensdannelse på bygningsdele, der er koldere end 11 °C, hvis den indendørs luft kommer i kontakt med disse bygningsdele, og rumklimaet hører til i denne klimaklasses



Figur 4.6. Definition af rumklimaklasser ud fra vanddampdiagrammet. Klassifikationen gælder for et rums indeklime i vinterhalvåret.

fugtige ende. De fleste opholdsrum ligger i rumklimaklasse 2. Beboelsesrum befinder sig som regel i klassens høje halvdel, medens kontorer, institutions- og industrilokaler uden væsentlig fugtafgivelse gerne ligger i midten eller i den lave ende.

Rumklimaklasse 3 dækker over alle indeklimeer med et vanddampindhold højere end 10 g/m^3 i vinterhalvåret, det vil sige med en dugpunktstemperatur over 11 °C . Fugt fra luften i disse rum kan kondensere selv på bygningsdele, der er varmere end 11 °C , hvilket indebærer stor risiko for, at de omgivende konstruktioner udsættes for skadelig fugtpåvirkning. Der må derfor udvises særlig betænkssomhed og omhu ved udformningen af konstruktioner, der kommer i forbindelse med dette rumklima. Et sådant klima finder man for eksempel i svømmehaller, bade- og omklædningsrum, trykkerier, spinderier eller andre steder, hvor der finder en stor dampafgivelse sted, eller hvor man af hensyn til produktionen befugter luften. Risikoen for utilsigtet forbindelse mellem indeluften og kolde bygningsdele forøges væsentligt ved anvendelse af overtryksventilation, der kan blæse luft ud gennem utætheder i konstruktionen.

Fugt i materialer

Porestruktur og evne til at optage fugt

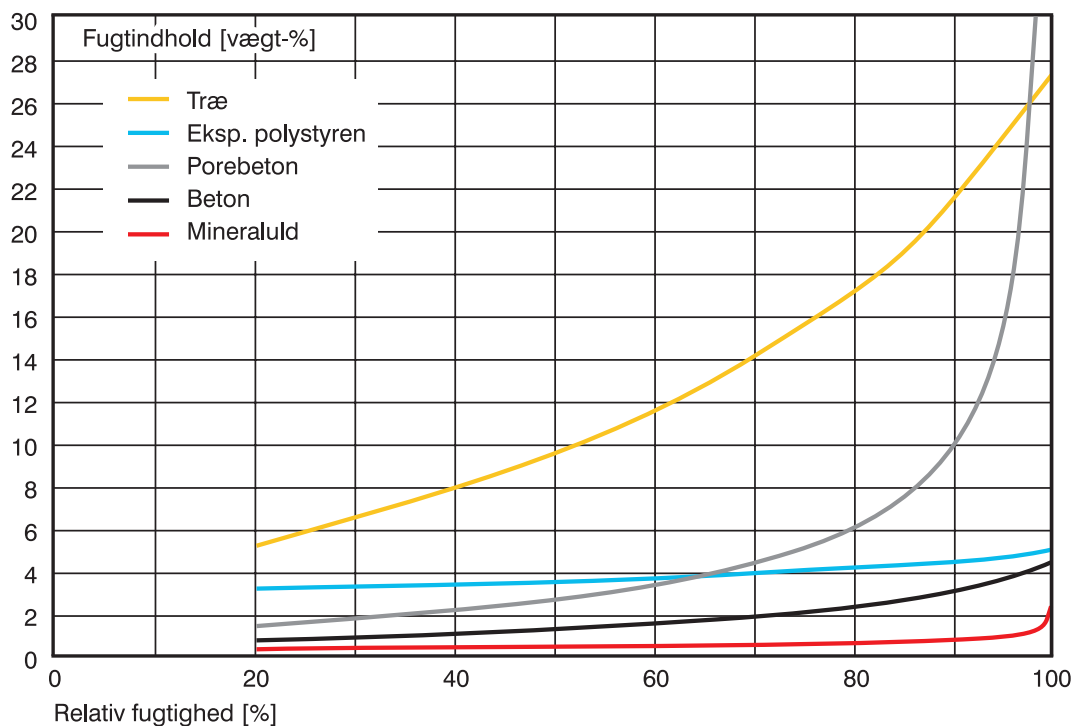
Visse materialer, såsom glas og metal, er helt massive og ude af stand til at optage fugt. Skumplast et eksempel på et materiale, der, selvom det er meget porøst, kun langsomt optager fugt, hvilket skyldes, at porerne er lukkede.

De fleste andre byggematerialer indeholder derimod et fint forgrenet, åbent poresystem, der kan have betydelig fugtoptagelse fra luften udenfor materialet. Det indvendige overfladeareal kan være enormt. Vanddampen sætter sig let i lag af få molekylers tykkelse på de indvendige overflader (adsorption), og de mikroskopiske porer kan også tiltrække fugt, når de er delvist fyldt med vand (kapillarkondensation). Desuden kan der forekomme osmotisk binding af vand, hvis der er salte tilstede, og endelig kan vand i visse materialer være kemisk bundet. Alle fugtbindingsmekanismer kan finde sted uden at materialet forekommer vådt på ydersiden. På trods af de tynde lag og snævre porediametre, er det samlede overfladeareal og porevolumen så stort, at fugtoptagelsen bliver målbar. Porøse materialer, der har denne egenskab til at akkumulere fugt, kaldes hygroskopiske.

Træ er et eksempel på et meget hygroskopisk materiale, der ligesom andre organiske materialer kan optage betydelige fugtmængder fra luften. Beton er i nogen grad hygroskopisk, medens tegl, gips og mineraluld er eksempler på materialer, der, selvom de er hygroskopiske, har en sådan struktur, at deres fugtoptag fra luften normalt er lille.

Fugtindhold og sorptionskurve

Mængden af hygroskopisk fugt i et materiale bestemmes af den relative fugtighed i luften, der omgiver materialet. Denne sammenhæng beskrives ved materialernes sorptionskurver, som vist i figur 4.7 for træ, beton, porebeton, ekspanderet polystyren og mineraluld.



Figur 4.7. Sorptionskurver for et udvalg af almindelige byggematerialer. Organiske materialer, som træ, hører til de mest hygroskopiske.

Fugtmængden i et materiale angives normalt som fugtindholdet, der er vægten af bundet vand i materialet i forhold til materialets tørre vægt [kg/kg eller vægt-%]. Fugtindholdet angives dog også nogle gange som massen af vand i materialet i forhold til materialets volumen [kg/m³]. Fugtindholdet i enheden kg/m³ findes ud fra værdien i kg/kg ved at gange med materialets tørre massefylde.

Fugtindholdet for et materiale kan bestemmes ved først at veje det, som det forefindes, derefter tørre det helt ud, og veje det igen. Forskellen mellem resultatet af de to vejninger er massen af vand, der var i materialet, mens anden vejning giver den tørre vægt. Udtørringen kan for de fleste materialers vedkommende finde sted i en ovn ved 105 °C. Der findes også en lang række, primært elektriske, målemetoder til at bestemme et materiales fugtindhold på under praktiske forhold. En gennemgang af disse findes fx i SBI-anvisning 170.

Omsætning mellem grænseværdier for fugtbestandighed

Sorptionskurven kan blandt andet bruges til at omsætte mellem forskellige angivelser af hvilken fugtbelastning, et materiale må udsættes for. Det er fx almindeligt anerkendt, at træ, for at undgå risikoen for rådskader, ikke må have et fugtindhold højere end 20 vægt-%, når

temperaturen er over 5 °C (15 vægt-% for tidligere svampeinficeret træ). Ved hjælp af sorptionskurven ses dette at svare til, at træet ikke gennem længere tid må placeres i omgivelser, der har en højere relativ fugtighed end 85% (72% for tidligere inficeret træ).

Fugtkapacitet

Sorptionskurven kan også bruges til at udtrykke et materiales fugtkapacitet.

Eksempel:

Et stykke træ med en tørvægt på 1 kg flyttes fra omgivelser med 50% RF til 60% RF. Sorptionskurven viser, at træets fugtindhold skal ændres fra 10 til 12 vægt-%, før det er kommet i ligevægt. Det skal altså optage 20 g vand fra den omgivende luft. Dette kan ikke ske momentant, men vil - afhængigt af træets dimensioner - tage nogen tid.

Træ har i forhold til de fleste andre byggematerialer en stor fugtkapacitet. Dets gode evne til at optage vand ses af den højt beliggende sorptionskurve.

Skadelig fugtpåvirkning af materialer

Også andre materialer end træ nedbrydes ved fugtpåvirkning. Her gives blot nogle eksempler. Der henvises til speciallitteraturen, til BYG-ERFA bladene og til producentanvisninger med hensyn til aktuelle grænseværdier for de konkret forekommende tilfælde.

- Stål, der ikke er korrosionsbeskyttet, ruste, når det udsættes for luft med høj relativ fugtighed.
- Beton og tegl tåler i sig selv at blive helt vandmættede. Et højt fugtindhold kombineret med frost giver imidlertid risiko for frostsprængninger. Tilstedeværelsen af fugt er også en del af forudsætningen for, at en række andre skadesmekanismer kan forløbe: korrosion af armering, alkali-kisel reaktioner i beton samt transport og krystallisering af salte, der er skadelige for armering eller for de overfladenære lag.
- Højt fugtindhold i underlaget kan give risiko for afskalning af puds eller maling. I disse tilfælde vil overfladebehandlingens egne mekaniske og fugtmæssige egenskaber som regel være en del af årsagen.
- Materialer ændrer dimension, når fugtindholdet ændres. Dette

er særligt tydeligt for træ, hvor man også må tage hensyn til de krumninger og sprækkedannelser, der kan optræde.

- Visse limsamlinger, fx ved gulvbelægninger, tåler ikke høje fugtbelastninger.
- Også andre materialer end træ kan udsættes for biologisk nedbrydning eller aktivitet, når den relative fugtighed bliver for høj. Såfremt et sådant materiale er i kontakt med indeluften, kan det give anledning til et "dårligt" eller sundhedsskadeligt indeklima.
- Fugt i byggematerialer forringer deres isoleringsevne.

Fugtakkumulering i konstruktioner

Der kan være mange årsager til, at en konstruktion har et for højt fugtindhold. I det følgende gennemgås disse i følgende rækkefølge: konstruktive udformninger, byggefugt og fugttransport ved konvektion, vanddampdiffusion og kapillartransport. Endelig omtales fænomenet sommerkondens, og der gives en oversigt over muligheder ved valg af tagtype til træbaserede, flade tage.

Konstruktive forholdsregler

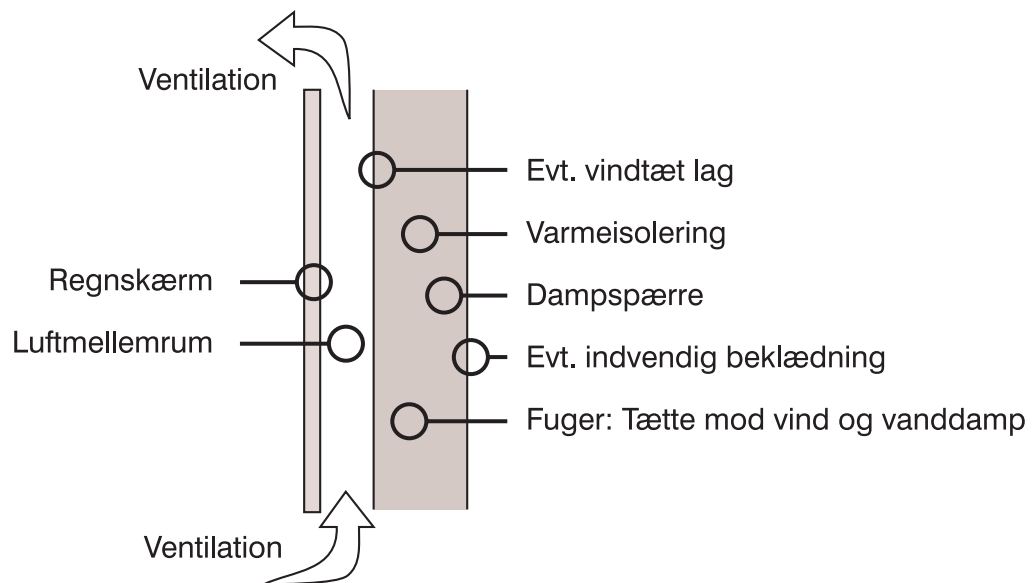
Først og fremmest skal man selvsagt undgå, at deciderede utætheder forekommer. Dette må sikres ved en korrekt håndværksmæssig udførelse og kontrol, og ved at bygningen vedligeholdes forskriftsmæssigt.

Nedenfor nævnes en række eksempler på konstruktive forholdsregler, der bør tages allerede når, en bygningskonstruktion udformes. Eksemplerne skal tjene til at vise en række områder, hvor man alene "ved at tænke sig om" kan begrænse risikoen for skadelig fugtpåvirkning. En mere konkret gennemgang af typiske bygningsdele finder man i SBI-anvisning 178.

- Tagdækningens inddækninger skal udføres forsvarligt. Se afsnittet om detailtegninger.
- Der skal tages forholdsregler for at undgå byggefugt i form af nedbør eller anden opfugtning under oplagring, transport, montage eller udførelse. Se i øvrigt det senere afsnit om byggefugt.
- Alle bygningsoverflader skal udføres med et fald på mindst 1:40

mod afløb. Visse udsatte steder skal hældningen være større, fx 1:8 for flader omkring vinduer, og 1:4 for vinduers bundglaslister.

- Nedbør falder så godt som aldrig lodret. Det medfører, at en bygnings facader må kunne modstå nogen direkte vandpåvirkning i form af slagregn. Dette kan imidlertid begrænses ved på alle måder at vise vand væk fra bygningskroppen. Glaslister, rammer, karme og bygningsfremspring skal derfor have fald væk fra bygningen og skal udføres med vandnæser, der forhindrer vandet i at løbe tilbage langs undersiden. Glaslister i vinduernes underside skal kun punktvist være i kontakt med vinduesfalsen, der igen ved fald må tillade vandet at søge udefter. Man bør tænke på, at der samles specielt meget vand på facaden under glatte, ikke sugende materialer, som fx vinduer, og i øvrigt at slagregns påvirkningen normalt er størst i de øverste, ydre hjørner af facaden.
- Træ, der vender mod vejrliget, skal så vidt muligt være sorteret, så det er det kernerigeste træ, der får den største belastning, og så marvsiden vender opad.
- Ved lodrette og skrå konstruktioner, og ved fuger i disse, anvendes så vidt muligt to-trinsprincippet for tætning mod vejrliget. Det vil sige, at der yderst er en regnskærm, der ikke må være vindtæt. Derefter et mellemrum, der er ventileret til det fri. Først den inderste tætning skal være lufttæt. Se i øvrigt figur 4.8. Princippet i denne form for tætning er, at der altid hersker samme lufttryk på inderside og yderside af den udvendige regnskærm. Dette forhindrer, at vinden kan presse nedbør gennem fuger og sprækker. Der bør etableres dræning i bunden af den ventilerede spalte, så vand, der alligevel måtte trænge ind, kan ledes bort. Lufttrykforskelle mellem ude og inde optages af vindtætningen i den indvendige del af konstruktionen, der sørger for, at konstruktionen som helhed er lufttæt. Vindtætte lag, der placeres på isoleringens yderside, skal være diffusionsåbne.



Figur 4.8. Princippet i to-trinstætningen. Når den yderste beklædning er godt ventileret, kan vinden dårligt presse fugt igennem. Væggen bagved sørger for tæthed i øvrigt. Efter SBI anvisning 178.

- Kuldebroer i form af gennemmuringer, gennemgående etageadskillelser eller gennemgående stolper/bjælker i en let konstruktion skal så vidt muligt undgås. Ifølge sagens natur forårsager de et forhøjet varmetab. De er imidlertid også årsag til, at de indvendige overflader bag kuldebroen bliver koldere end ellers. Det indebærer en risiko for at temperaturen på disse steder kommer under indeluftens dugpunkt, så der udfældes kondens. Selv når der ikke kommer kondens, vil luftens relative fugtighed være forøget i nærheden af kuldebroen, så der kan være en forøget risiko for skimmelvækst. Ved kuldebroer kan i øvrigt opstå støvfigurer, der dog overvejende er et æstetisk problem.
- Når skabe eller reoler placeres op ad en ydervæg kan luften bag møblet blive så kold, at der er risiko for skimmelvækst. Bortset fra fjernelse af møblet, er efterisolering af væggen en god foranstaltning mod dette problem. Tiltag, der reducerer rumluftens fugtighed, vil også hjælpe.
- Kondens på vinduer kan forekomme, hvis vinduet isolerer dårligt, og indeklimaet samtidig har en høj fugtighed om vinteren. En kombination af bedre vinduer, evt. som forsatsruder, bedre ventilation af boligen, og en mindre fugttilførsel vil kunne forbedre forholdene. I vinduer med koblede rammer eller med forsatsruder kan der også forekomme kondens på indersiden af det

udvendige glas. Dette forhindres ved at anvende tætningslister, så indtrængning af rumluft mellem vinduets glaslag forhindres, og ved samtidig at sikre en vis ventilation af hulrummet til det fri, fx ved boring af små huller foroven og forneden i rammen.

- Korrekt lufttætning og anvendelse af dampspærre er selvfølgelig vigtige konstruktive forholdsregler, der omtales mere udførligt i afsnittene om konvektion og diffusion.

Byggefugt

Mange nye byggematerialer indeholder fugt, der stammer fra deres naturlige oprindelse, fra produktionen, eller fra lagring og transport i byggeperioden. De to sidste årsager, der i mange tilfælde skyldes en alt for lemfældig afdækning af byggematerialerne, må naturligvis undgås. I andre tilfælde må materialerne først udtørres til et så lavt fugtindhold, at det er forsvarligt at indbygge dem i en konstruktion, eller det må sikres, at den videre udtørring kan finde sted på en sikker måde.

Figur 4.9 viser hvilket fugtindhold, der kan forventes af nye materialer, og et overslag over hvor meget, der skal udtørres, før endelig ligevægt er opnået.

Fugtindhold i vægt-%	I nyt byggeri	Bindes kemisk	Fugtindhold ved 50% RF	Byggefugt der skal udtørre
Beton	10	3	2	5
Porrebeton	15-25		3	12-22
Kalkmørtel	17	-2	1	18
KC-mørtel	17	1	2	14
Tegl	1		1	0
Murværk af tegl	7		1	6
Træ	10-30		10	0-20

Figur 4.9. Fugtindhold i nye materialer før og efter udtørring til indbygning i konstruktioner. Nevander og Elmarsson, 1994.

Materialer med et væsentligt indhold af byggefugt må ikke lukkes inde mellem tætte membraner. Da der endvidere kan være risiko for, at fugt på et senere tidspunkt trænger ind i konstruktionen, bør der være mulighed for, at overskydende fugt kan komme ud igen. Hygrodiode kan anvendes i de tilfælde, hvor man både ønsker en dampspærrende effekt om vinteren og en mulighed for udtørring af overskydende fugt under sommerforhold.

Udover at sikre tilladeligt små mængder byggefugt i materialerne hver især, må man ligeledes være opmærksom på, at fugten kan omfordele sig, efter at konstruktionen lukkes. Her må man vurdere, om der kan være risiko for, at byggefugten fra ét materiale, som der er meget af, fx beton, kan vandre over til et andet, fx træ, i et sådant omfang, at det kan forvolde skade.

Konvektion

Når en konstruktion er opført, kan fugten stadig i større eller mindre omfang transporteres ind i eller ud af den. Konvektion, det vil sige fugttransport ved medføring i gennemsvivende luft, er nok den fugttransportform, der betyder mest - når den ikke forhindres.

Den største risiko består i, at fugtholdig rumluft under vinterforhold gennemstrømmer konstruktionen, så den passerer konstruktionsdele, der er koldere end luftens dugpunkt. I så fald vil den overskydende fugt udfældes som kondens i de kolde områder. Dette kan tilføre så store fugtmængder, at konstruktionen i løbet af kort tid bliver alt for fugtig.

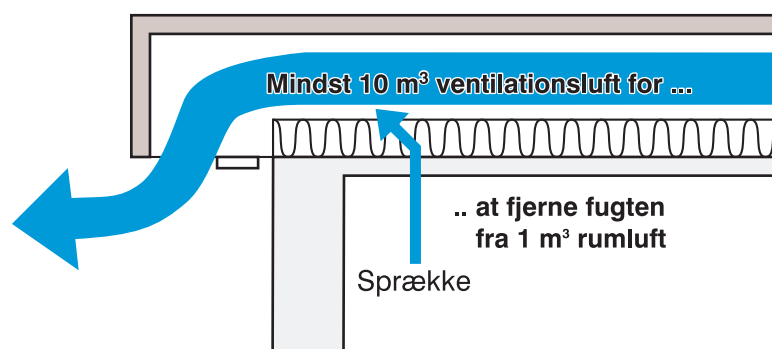
Det er derfor af største vigtighed at sikre konstruktionen mod gennemstrømmende luft ved at sørge for, at den er lufttæt. Faktisk betragter man i mange tilfælde dampspærrens vigtigste funktion som, at den også fungerer som luftspærre. Det forudsætter imidlertid, at dampspærren opsættes perfekt, ved at gøre overlæg mellem banerne lufttætte med tape eller svejsning, eller ved at have klemte overlæg. Tilstødninger til andre bygningsdele skal lufttættes tilsvarende.

Det kan være et problem, at andre håndværkere, fx el- eller vvs-installatører, senere kan få behov for at gennembryde dampspærren. Disse gennembrydninger skal tætnes, når arbejdet er tilendebragt, så der sikres mod luftgennemsvivning. Også samlinger af ventilations- og elrør skal tætnes omhyggeligt, hvis der er risiko for, at de kan forbinde indeluften med konstruktionens indre.

Ventilation med udeluft langs isoleringens yderside kan være en fordel, idet kold udeluft, der om vinteren kommer ind i konstruktionen vil have et lavt vanddampindhold og tillige opnå en lille opvarmning, så den kan bære mere fugt. Dermed er det i et vist omfang muligt at bortventilere evt. overskydende fugt.

Dette princip fungerer godt i ventilerede klimaskærme til ydervægge og skråtage med en hældning på mere end 1:12. I disse tilfælde sørger vinden og den termiske opdrift (skorstenseffekten) i luftspalten som regel for at ventilationen er tilstrækkelig. I vægge skal ventilationsspaltens tværsnitsareal være mindst 0,3% af væggens fladeareal, mens der i et ventileret skråtag skal være mindst 50 mm mellem undertag og isolering. Det forudsættes, at luftbevægelsen i spalten ikke begrænses af membraner, fx et undertag, der hænger ned og blokerer luftgennemgangen. Der må også sikres ordentlige, slagregnssikre passager for luftstrømmen omkring indløb og udløb - i skråtaget ved tagfod og kip.

I de flade tage er der ingen termisk opdrift til at hjælpe luften på vej, men kun forskelle i vindtryk over tagkanterne. Det ventilerede flade tag anbefales derfor kun, hvis husbredden ikke overstiger 10-12 m. Større husbredder kan ikke ventileres tilstrækkeligt med vindens trykforskel som drivende kraft. Ventilationen finder sted gennem åbninger ved tagkanterne i husets luv- og læsider og forløber i et hulrum hen over isoleringen. Ventilationsåbningernes samlede tværsnitsareal skal være mindst 0,2% af det bebyggede areal. Figur 4.10 illustrerer vigtigheden af, at tagrummet ventileres kraftigt, hvis ventilationen skal kunne udtørre overskydende fugt fra indtrængende rumluft.



Figur 4.10. Der skal meget udeluft til at optage den fugt, der måtte komme igennem fra indeklimaet, da luften i den ventilerede spalte er kold, og derfor ikke kan optage så meget ekstra fugt. Efter SBI-anvisning 178.

Der bør ikke anvendes ventilationshætter, der gennembryder tagfladen. Dette skyldes, at vinden som regel forårsager et sug henover tagfladen. Hvis dette sug gennem hætterne forplanter sig ned i konstruktionen, kan det medvirke til at trække den fugtige indendørs luft op i konstruktionen. Store tage, der ikke kan ventileres effektivt fra tagkant til tagkant, udformes i stedet som uventilerede tage. Det uventilerede tag giver yderligere sikkerhed mod konvektiv fugtindtrængning, ved at tagmembranen, når den ikke har nogen gennembrydninger, medvirker til at sikre tagets lufttæthed og dermed forhindrer opstrømmende rumluft.

Diffusion og kapillartransport

Disse transportformer spiller kun en nævneværdig rolle for det samlede billede, hvis det er udelukket, at konvektion ved gennemsvivning af fugtig luft gennem konstruktionen kan finde sted. I denne forbindelse skal det nævnes, at selv små huller efter søm gennem en membran, kan transportere mere fugt ved luftgennemsvivning end diffusion gennem en kvadratmeter af membranen.

Når en konstruktion er uventileret, må man nøje vurdere den årlige fugtbalance, som transporten ved diffusion og kapillarsugning giver anledning til. Herved skal det sikres, at den fugt, der kommer ind i konstruktionen om vinteren, også kan tørre ud igen om sommeren. Brug af Hygrodiode som dampspærre vil i mange tilfælde forbedre denne balance og endvidere give nogen mulighed for at bortdræne yderligere fugtansamlinger i konstruktionen.

Diffusion

Diffusion finder sted, når der eksisterer en forskel i damptryk mellem to luftvolumener, der bringes i kontakt med hinanden. Da molekylerne i luften hele tiden bevæger sig tilfældigt i alle retninger, vil forekommende forskelle i molekyltætheden hurtigt udjævnes.

Hvis et materiale adskiller de to luftblandinger, vil diffusionen stadig kunne finde sted gennem materialets poresystem, hvis det er et porøst materiale men også gennem fx homogene membranners molekylstruktur. Transporten vil altid være fra højt mod lavt damptryk. Ud fra Fick's lov kan man finde fugtstrømmen ved diffusion gennem et materiale med tykkelse s og damppermeabilitet δ_p , når

damptryksforskellen over materialet kendes:

$$g = \delta_p \times (\Delta p : s)$$

Hvor g er dampstrømstæthedden [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]

Man kan også beregne fugtstrømmen ved hjælp af materialets diffusionsmodstand, Z , der kan fastsættes som materialets tykkelse divideret med dets damppermeabilitet:

$$g = \Delta p : Z \text{ hvor } Z = s : \delta_p$$

Da damptrykket som regel er lavest på den kolde side af en konstruktion, betyder det, at transporten for det meste går fra det indendørs mod det udendørs klima. I visse tilfælde, fx ved frysehuse, uopvarmede bygninger eller i lande, hvor det udendørs klima kan være varmere og fugtigere end det indendørs, skal man være opmærksom på, at vanddampstrømmen kan gå fra de udendørs omgivelser mod indeklimaet.

For at undgå at fugten kan diffundere fra varme fugtige omgivelser til en konstruktions kolde dele, opsætter man en dampspærre på den varme side af isoleringen - i reglen en diffusionstæt membran. En dampspærre kan erstattes af et andet materiale eller overfladebehandling med stor diffusionsmodstand. Man må så sikre, at konstruktionen er mest diffusionsåben mod det kolde klima, så fugten ikke ophobes i konstruktionen.

I praksis har det vist sig, at hulmure af tegl eller betonsandwich-elementer kan udføres uden dampspærre, hvis de anvendte bindere er rustfaste. I disse konstruktioner kan formuren normalt optage den fugt, der kondenserer udenfor isoleringen, uden det giver anledning til problemer.

Visse dampspærrer, fx med alu-belægning, har en meget høj diffusionsmodstand. I normalt forekommende tilfælde vil det dog ikke i praksis være muligt at drage nytte af, eller endog at kunne regne med, en diffusionsmodstand (Z -værdi) på meget over $100 \text{ GPa} \times \text{m}^2 \times \text{s}/\text{kg}$. En Z -værdi på $100 \text{ GPa} \times \text{m}^2 \times \text{s}/\text{kg}$ giver tilstrækkelig diffusionstæthed til at sikre imod skadelig opfugtning i løbet af en vinter under normalt forekommende betingelser. Det afgørende er, om fugten kan slippe ud igen.

Det kan være en fordel - og normalt problemløst - at placere dampspærren op mod 1/3 ind i den samlede isoleringstykkelse regnet fra den varme side. Hvis det er gjort, kan evt. installationsarbejde udføres på den varme side af dampspærren uden at beskadige den.

I afsnittet om Beregningsmetoder vil det blive vist, hvordan man kan regne på vanddamprtransporten ved diffusion i sammensatte konstruktioner.

Kapillartransport

Kapillartransport er vandtransport, der finder sted i porøse materialers poresystem. Vandet transporteres fra områder af materialet med højt fugtindhold til områder, der ikke er så fugtige eller fra et eksternt reservoir, fx ved regnpåvirkning eller fra opstuvet vand, til et ikke vandmættet materiale.

Den kapillære transport er kun aktiv, når der er kontakt mellem væskefyldte porer i materialet. Derfor bliver kapillartransporten først rigtig af betydning for fugtindhold højere end ligevægtsfugtindholdet ved 90-95% RF.

I praksis har kapillartransporten størst betydning for at omfordele fugten i materialer som beton, tegl, træ, mørtel og letbeton. Kapillartransporten er fx medvirkende til, at fugt i nystøbte materialer relativt hurtigt transporteres til overfladen, hvorfra den kan fordampe. I isoleringsmaterialer kan man se bort fra kapillartransport ved de fugtindhold, der normalt forefindes. Når byggefugten er forsvundet, kan man regne med, at kapillartransporten kun finder sted i materialerne på den kolde side af isoleringen. Endvidere har kapillartransporten betydning for opstigning af grundfugt, der må forhindres ved konstruktive tiltag, fx terrænfald væk fra bygningen, dræn, kapillarbrydende lag og murpap.

Sommerkondens

Sommerkondens finder sted under forhold, hvor en konstruktions ydre dele på grund af solbeskinning er varmere end de indre. Under disse betingelser vil fugt, der fx gennem vinteren måtte være ophobet i de ydre dele, vandre mod indeklimaet. Da der på isoleringens indvendige side normalt vil være placeret en dampspærre, bliver fugten stoppet på dette sted og ophobes som kondens. Dette kan være skadeligt for træbaserede dele som fx træskelettet mellem isoleringen, hvis situationen optræder hyppigt eller i længerevarende

perioder. I tagkonstruktioner, der af andre grunde aldrig skal være helt vandrette, samler den ophobede fugt sig typisk i lavninger, og kan herfra dryppe gennem sømhuller eller utætte sammenføjninger ned til det indendørs.

Sommerkondens kan tillige opstå, selvom der ikke er ophobet store mængder i konstruktionens yderside gennem vinteren. Udvendigt murværk af tegl vil efter regnvejr indeholde betydelige mængder fugt. Hvis solen skinner på væggen kort tid efter regnens ophør, vil denne fugt drives indad. Dette kan føre til skader i de tilfælde, hvor muren har indvendig isolering monteret i et træskelet med en dampspærre nær indersiden. Der er da risiko for kondensation på dampspærrens yderside.

Uopvarmede eller kun periodisk opvarmede bygninger vil, alt andet lige, have større risiko for, at indadgående fugttransport optræder i de omgivende konstruktioner.

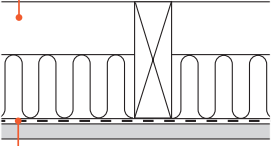
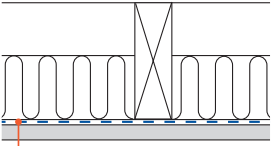
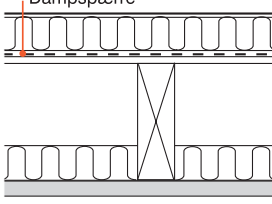
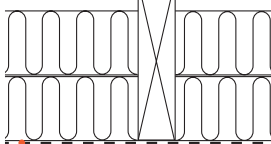
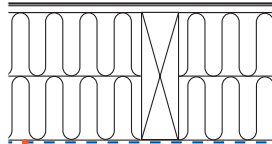
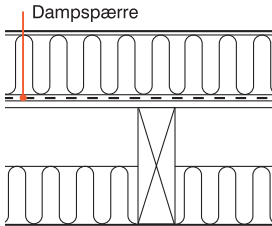
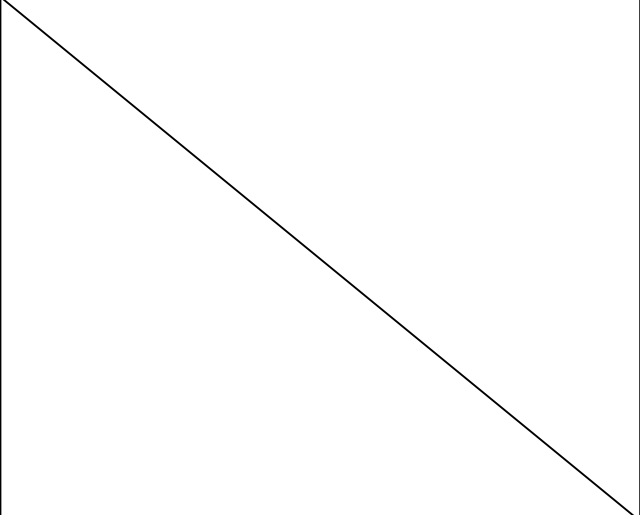
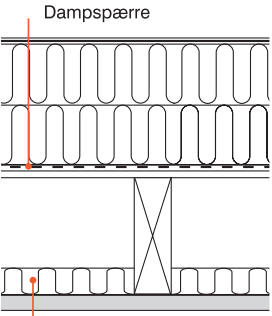
Hygrodiode dampspærren vil som regel kunne afhjælpe problemer med sommerkondens ved at tillade kondenseret fugt at passere i en jævn strøm, der bliver fordelt over membranens areal og således ikke giver anledning til skade.

Valg af tagtype til træbaserede, flade tage

Der er gennem de seneste tiår opnået en del erfaringer med udførelsen af flade tage som lette, træbaserede elementer - en økonomisk attraktiv og fleksibel løsning, der imidlertid kræver lidt mere omhu i udformningen og udførelsen. Udførelse af disse konstruktioner som præfabrikerede kassetter er en af de måder, man kan anvende for at sikre kontrollen med en væsentlig del af arbejdets udførelse.

Hjælp til valg af sådanne tagelementer kan findes på Træelementkontrollens hjemmeside: <http://tk-kontrol.teknologisk.dk/> Blandt de valg, der skal foretages, er, om konstruktionen skal være ventileret med udeluft og om isoleringens placering forhold til dækket. Til hjælp ved valg af sådanne konstruktioner er udarbejdet oversigten i figur 4.11:

Figur 4.11 Vejledning i valg af tagtype til lette, flade tage.

Rumklimaklasse	Ventilerede tage	Ikke ventilerede tage	
		Med indvendig isolering	Med udvendig isolering
<p>1</p> <p>Tørre lagerhaller Tør industri Sportshaller uden tilskuere</p> <p>Dugpunkt under 1 °C</p>	<p>Ventilation fra tagkant til tagkant/kip Mindst 40 mm luftmelletrum</p>  <p>Dampspærre med lufttætte samlinger/overlæg</p>	 <p>Hygrodiode</p>	 <p>Dampspærre</p>
<p>2</p> <p>Boliger Skoler Kontorer Butikker Institutioner Sportshaller med tilskuere Almindelig industri</p> <p>Dugpunkt under 11 °C</p>	<p>Ventilation fra tagkant til tagkant/kip Mindst 40 mm luftmelletrum</p>  <p>Dampspærre med lufttætte samlinger/overlæg</p>	 <p>Hygrodiode</p>	 <p>Dampspærre</p> <p>Pas på byggefugt!</p>
<p>3</p> <p>Svømmehaller Vaskerier Baderum Fugtig industri</p> <p>Dugpunkt over 11 °C</p>			 <p>Dampspærre</p> <p>Evt. isolering Skal beregnes</p>

Beregningsmetoder

De foregående afsnit har givet en generel indføring i fugtproblematikken, der giver grundlag for at vurdere hvilke forhold, der bør tages i agt, når en konstruktion skal udformes. I visse tilfælde ønsker man at beregne forholdene, og dette afsnit beskriver hvilke beregningsmetoder, der kan anvendes.

Dugpunktmetoden

Den mest simple vurdering, man kan gennemføre, er, at sammenholde dugpunktstemperaturer af luft, der omgiver en konstruktion, med de temperaturer, der forekommer i konstruktionens fugtfølsomme lag. Konstruktionen må forbedres, hvis lag, der er koldere end indeklimaets eller udeklimaets dugpunkt, er i fare for at modtage fugt fra disse omgivelser. En sådan forbedring kan bestå i at anvende membraner, der afskærer fugtens adgang, eller en ændring af isoleringsforholdene, så de kritiske dele bliver varmere.

Temperaturen af et kritisk lag i konstruktionen kan bestemmes som vist under temperaturfordeling i næste delafsnit. Hvis temperaturen er koldere end dugpunktet af luft, hvorfra fugt let kan trænge ind til det pågældende lag, er der risiko for kondensdannelse.

Men selv hvis kondens ikke skulle forekomme, kan den relative fugtighed omkring det fugtfølsomme lag blive for høj, fx over 85% hvis det kritiske lag er af træ. I så fald kan det ikke accepteres, at det omgivende miljø har et damptryk, der er højere end svarende til den kritiske relative fugtighed gange mætningsdamptrykket ved den temperatur, det fugtfølsomme lag har.

Eksempel:

Et eksisterende tag består udefra regnet af tagmembran, krydsfinér, isolering, dampspærre af ukendt tilstand og loftsbeklædning. Da dampspærren måske ikke er intakt, må man regne med at tagets indre er i fugtmæssig kontakt med indeluften, der er 20 °C og 50% RF - altså har et damptryk på $0,5 \times 2338 \text{ Pa} = 1169 \text{ Pa}$.

I en typisk vintersituation er krydsfinérens temperatur udregnet til at være 2 °C. Da træ ikke gennem længere tid må befinde sig ved en relativ fugtighed over 85% RF, må damptrykket ved krydsfinéren ikke overstige $0,85 \times p_{\text{mætning}}(2 \text{ °C}) = 0,85 \times 706 \text{ Pa} = 600 \text{ Pa}$. Krydsfinéren

er altså i fare, da indeluftens damptryk er væsentligt højere. Det vælges at beskytte krydsfinéren ved at efterisolere taget udefra, så træet kommer til at ligge varmere. Hvor meget skal krydsfinérens temperatur hæves til?

Hvis indeluftens damptryk lige akkurat skal svare til 85% RF ved krydsfinéren, skal krydsfinéren have den temperatur, hvor 85% af mætningsdamptrykket er lig med indeluftens damptryk. Altså:

$$p_{\text{mætning, træ}} = P_{\text{indeluft}} : RF_{\text{kritisk}} = 1169 : 0,85 = 1375 \text{ Pa}$$

Dette mætningsdamptryk opnås ved temperaturen 11,7 °C. Den udvendige isoleringstykkelse skal altså dimensioneres med henblik på at nå op på denne temperatur for krydsfinéren.

I mange tilfælde vil man imidlertid være interesseret i at beregne forholdene mere detaljeret for alle lag i konstruktionen.

Håndberegningsmetode - Glasers metode

I det følgende gennemgås en håndberegningsmetode, kaldet Glasers metode, for vanddampdiffusion. Glasers metode kan med fordel indlægges i regneark, så man let kan se resultatet med forskellige klimabetingelser eller konstruktionsvarianter. Der findes også færdige programmer, der kan gøre det samme.

Temperaturfordeling

Det er flere gange i det foregående fremhævet hvor stor en rolle, temperaturen spiller for fugtforholdene. Enhver beregning af fugtforholdene indledes derfor med at bestemme temperaturerne i konstruktionen.

Dette gøres ved forholdstalsregning, hvor temperaturfaldet over hvert enkelt materialelag står i samme forhold til det samlede temperaturfald over konstruktionen, som det pågældende lags isolans, R_m , gør til konstruktionens samlede isolans, ΣR . Temperaturfaldet, $\Delta\theta_m$, over lag m kan beregnes som:

$$\Delta\theta_m = (R_m : \Sigma R) \times (\theta_{\text{inde}} - \theta_{\text{ude}})$$

Isolansen over hvert enkelt lag beregnes som dets tykkelse divideret med dets varmeledningsevne. Design varmeledningsevnen som skal bruges til praktiske beregninger kan for en række materialer findes i Tabel 4 i kapitel 11.

Konstruktionens ind- og udvendige overflader er i god men trods alt noget begrænset termisk kontakt med luften i omgivelserne, så overfladetemperaturerne er forskellige fra lufttemperaturerne på de to sider. Der må derfor regnes med en overgangsisolans på hver side af konstruktionen. Overgangsisolansen kan sættes til $0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$ på den udvendige side af en konstruktion der vender mod det fri. På den indvendige side regnes med en værdi på $0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$, hvis varmemstrømmen maksimalt er 30° afvigende fra vandret (fx ydervægge), medens der regnes med $0,10 \text{ m}^2\text{K/W}$, hvis varmemstrømmen er opadgående (lofter) og $0,17 \text{ m}^2\text{K/W}$, hvis varmemstrømmen er nedadgående (gulve).

For konstruktioner mod jord medregnes jorden med en isolans som anført i tabel Tabel 4 i kapitel 11.

Isolansen for luftlag inde i konstruktionen skal ikke beregnes, men kan for ikke-ventilerede luftlag, som ikke har åbninger til det fri, findes direkte af tabeller afhængighed af luftlagets tykkelse og varmemstrømmens retning.

Såfremt et hulrum er ventileret til det fri gennem små åbninger, medregnes dette svagt ventilerede luftlag med en isolans, der er det halve af isolansen for et tilsvarende ikke-ventileret luftlag. Et svagt ventileret luftlag er et, hvor åbningerne til det fri for lodrett hulrum er mellem 5 og 15 cm^2 pr. m. vandret længde, eller for vandrette hulrum mellem 5 og 15 cm^2 pr. m^2 overfladeareal. Hvis åbningerne er mindre end disse mål, regnes hulrummet for ikke-ventileret. Til sådanne åbninger hører også udkradsede studsfiger i en formur. Isolansen af beklædning ud for et svagt ventileret luftlag kan medregnes op til en værdi på $0,15 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Hvis åbningerne er større end grænserne for et svagt ventileret hulrum, betragtes hulrummet som ventileret, og i så fald skal der for isolansen af hulrummet og samtlige lag mellem hulrummet og den udvendige overflade regnes med samme værdi som den indvendige overgangsisolans for den pågældende konstruktion.

Beregningen gennemføres på skemaform som vist i nedenstående eksempel (figur 4.12). Eksempelkonstruktionen er en tagkonstruktion, der udefra regnet består af tagdækning af tagpap, 185 mm isolering

af mineraluld (design varmeledningsevne $0,037 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), Hygrodiode, og et 100 mm betondæk. Den udendørs temperatur er $0 \text{ }^\circ\text{C}$, medens den indendørs er $21 \text{ }^\circ\text{C}$.

Først udfyldes skemaet med alle kendte data om materialetykkelser, varmeledningsevner, foruddefinerede isolanser og temperaturer i luften på hver side (markeret med fed skrift i skemaet). Så beregnes de resterende isolanser, og derefter temperaturfaldene over hvert enkelt lag. Til sidst bestemmes temperaturerne i laggrænserne. Temperaturfordelingen er optegnet i figur 4.15.

Materiale	Tykkelse m	Varme- ledningsevne $\text{W/m}\cdot\text{K}$	Isolans, R $\text{m}^2\text{K/W}$	Tempera- turfald $^\circ\text{C}$	Tempe- ratur $^\circ\text{C}$
Udv. overgang			0,04	0,2	0
Tagdækning	0,01	0,20	0,05	0,2	0,2
Mineraluld	0,185	0,037	4,74	20,0	0,4
Hygrodiode	~ 0	-	0	0,0	20,4
Beton	0,100	1,95	0,07	0,2	20,4
Indv. overgang			0,10	0,4	20,6
			$\Sigma R:$ 5,25	$\theta_{\text{inde}} - \theta_{\text{ude}}:$	21

Figur 4.12. Beregning af temperaturfordeling gennem en konstruktion.

Varmetabet gennem konstruktionen [W/m^2] kan beregnes som det samlede temperaturfald divideret med den samlede isolans.

Damptryksfordeling

Beregningen af damptryksforholdene i konstruktionen gennemføres efter samme mønster som for beregning af temperaturfordelingen. Dog skal det kontrolleres, at de beregnede damptryk i laggrænserne ikke bliver højere end de tilhørende mætningsdamptryk. Skemaet fra temperaturberegningen fortsættes derfor med nye kolonner i et efterfølgende skema. Som det første bestemmes ved tabelopslag hvilke mætningsdamptryk, der svarer til de tidligere beregnede temperaturer i laggrænserne.

Dernæst indsættes andre kendte fakta i skemaet: Materialernes damppermeabilitet eller diffusionsmodstand og omgivelsernes relative fugtighed. For materialer med veldefineret tykkelse tager man udgangspunkt i damppermeabiliteten, der er angivet i Tabel 2, kapitel 11.

Herefter beregnes diffusionsmodstanden, Z -værdien, som materialets tykkelse divideret med dets vanddamppermeabilitet. For membraner, overfladebehandlinger mv. kan man som regel finde diffusionsmodstanden direkte af Tabel 3, kapitel 11 eller på databladene i kapitel 7. Overgangsmodstandene for fugt er så små, at man i reglen kan se bort fra dem. Damptrykket i omgivelserne bestemmes ud fra de angivne relative fugtigheder og mætningsdamptrykket i omgivelserne.

Nu beregnes damptryksfordelingen gennem konstruktionen, idet den samlede damptryksforskel mellem ude og inde fordeles over hvert enkelt materialelag i forhold til dets andel i den samlede diffusionsmodstand:

$$\Delta p_m = Z_m : \Sigma Z \times (p_{\text{inde}} - p_{\text{ude}})$$

Beregningen er vist i skemaet, figur 4.13. Den relative fugtighed beregnes i sidste kolonne som forholdet mellem de beregnede damptryk og mætningsdamptrykkene ved de samme laggrænser. Hvis RF overalt er under 100%, vil der ikke forekomme kondens i konstruktionen under de anvendte betingelser. Man bør dog også kontrollere, at de fundne relative fugtigheder ikke kan give anledning til anden nedbrydning af materialerne.

Materiale	Mætningsdamptryk Pa	Damppermeabilitet $\text{mg/m} \times \text{s} \times \text{Pa}$	Diffusionsmodstand $\text{GPa} \times \text{m}^2 \times \text{s/kg}$	Damptryksfald Pa	Damptryk Pa	RF %
Udv. overgang	611			0	550	90
	618				550	89
Tagdækning			4000	669		
Mineraluld	627	0,067	3	0,5	1219	> 100
Hygrodiode	2392		100	17	1219	50
	2392				1236	52
Beton		0,002	50	8		
Indv. overgang	2428			0	1244	52
	2487				1244	50
SZ:			4153	$p_{\text{inde}} - p_{\text{ude}}$	694	

Figur 4.13. Beregning af damptryksfordeling før korrektion for mætning.

Korrigeret damptryksfordeling

Hvis der er laggrænser, hvor det beregnede damptryk overstiger mætningsværdien, må beregningen korrigeres, da dette ikke er fysisk muligt. Beregningen gentages med den ændrede forudsætning, at der forekommer kondens (RF = 100%) i den laggrænse, hvor damptrykket blev for højt ved den første beregning. Damptrykket i den kritiske laggrænse sættes altså lig med mætningsdamptrykket på dette sted. Der kan muligvis være tale om kondensation i mere end én laggrænse.

Derefter må damptryksfordelingen på hver side af kondensområdet bestemmes på ny. Det gøres ved at fordele damptryksforskellene fra kondensområdet ud til hver af konstruktionens omgivelser proportionalt med de involverede lags diffusionsmodstande på hver side af kondenspunktet. Beregningen er vist i skemaet, figur 4.14, hvor de tal, der kan føres videre over fra det gamle skema er vist med fed skrift. Den fede linie mellem tagdækning og mineraluld markerer den laggrænse, hvor der er kondens. Hjælpestørrelserne ΣZ_u og ΣZ_i står for den samlede diffusionsmodstand fra kondenspunktet til de udvendige omgivelser, henholdsvis til de indvendige omgivelser.

Materiale	Mætningsdamptryk Pa	Damppermeabilitet mg/m×s×Pa	Diffusionsmodstand GPa×m ² ×s/kg	Damptryksfald Pa	Damptryk Pa	RF %
Udv. overgang	611			0	550	90
Tagdækning	618		4000	79	550	89
Mineraluld	627	0,067	3	6	625	100
Hygrodiode	2392		100	407	636	27
Beton	2392	0,002	50	203	1042	44
Indv. overgang	2428			0	1244	51
	2487				1244	50
			SZu:	4000	$p_{\text{kond}} - p_{\text{ude}}$	75
			SZi:	5153	$p_{\text{inde}} - p_{\text{kond}}$	619

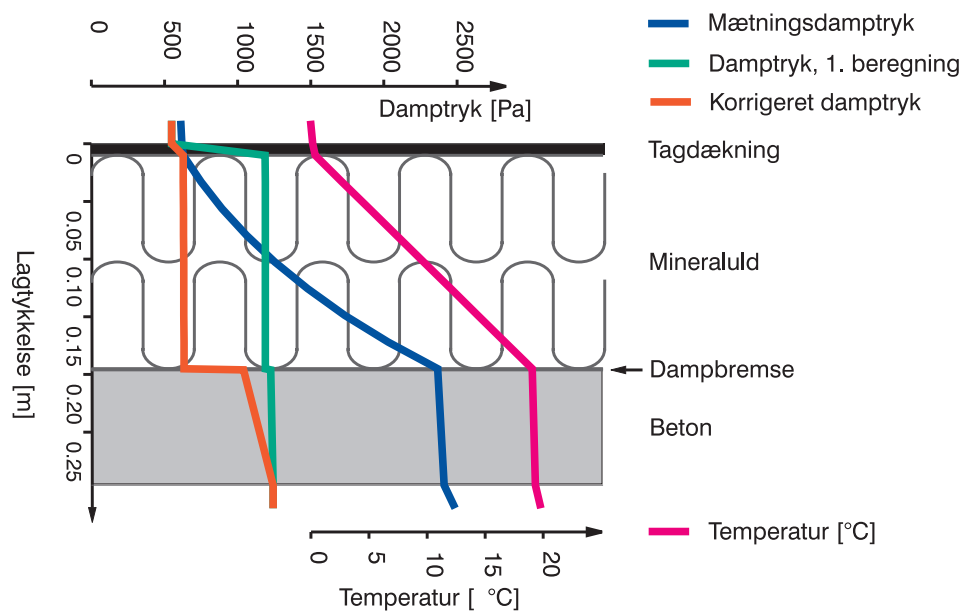
Figur 4.14. Beregning af damptryksfordeling efter korrektion for mætning. Kondenspunktet ligger mellem tagdækning og mineraluld.

Som det ses, bliver beregningen i det viste tilfælde ganske simpel fra kondenspunktet og udad, da kun laggrænsen på ydersiden af tagdækningen skal beregnes, og her er damptrykket det samme som udeluftens. Fra kondenspunktet og indad findes damptryksfordelingen ved egentlig beregning.

De fundne damptryksfordelinger før og efter korrektion er optegnet i figur 4.15.

Fugtstrømmen ind i konstruktionen kan beregnes som damptryksforskellen mellem indeklimaet og kondenspunktet divideret med ΣZ_i , og fugtstrømmen ud kan beregnes som damptryksforskellen mellem kondenspunktet og udeklimaet divideret med ΣZ_u .

I det viste eksempel fås en dampstrøm ind gennem beton, Hygrodiode og isolering på $4,1 \times 10^{-9}$ kg/m²s = 11 g/m²måned. Dampstrømmen ud gennem tagpappen bliver $1,9 \times 10^{-11}$ kg/m²s = 0,05 g/m²måned. Det vil i dette tilfælde sige, at det meste af det, der strømmer ind i konstruktionen forbliver som kondens under tagpappen, nemlig knap 11 g/m²måned.



Figur 4.15. Optegning af beregnede temperaturer, mætningsdamptryk og aktuelle damptryk gennem en konstruktion på sædvanlig måde, hvor materialerne afbildes ved deres tykkelse.

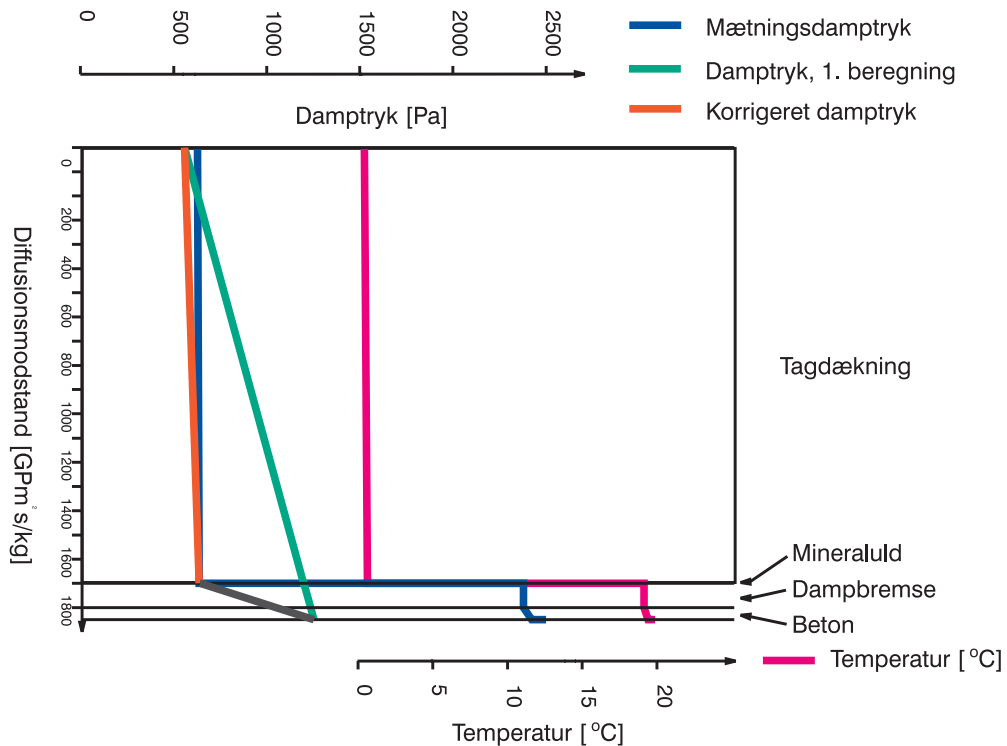
Grafisk løsning

Beregningen kan løses simplere med en grafisk optegning, som det er gjort i figur 4.16. Konstruktionen tegnes op i et koordinatsystem således, at lagenes diffusionsmodstand aftegnes som "lagtykkelse". I denne afbildning vil lag, der har en stor diffusionsmodstand fremstå tykke, selvom de i virkeligheden måske er ganske tynde, fx membraner. Omvendt vil et tykt men diffusionsåbent lag, som mineraluld, fremstå smalt, fordi det har en lille diffusionsmodstand.

Først indtegnes kurven for mætningsdamptrykket. Dernæst forbindes punkterne for de uden- og indendørs damptryk med en ret linie ("1. beregning"). Denne rette linie viser damptryksfordelingen, hvis der ikke forekommer kondens. Det gør der imidlertid, da damptrykskurven ligger over mætningskurven gennem en del af konstruktionen. Den korrekte løsning er i stedet den kortest mulige knækkede forbindelseslinie mellem de indendørs og de udendørs forhold, der højst lige tangerer, men ikke skærer, mætningskurven ("Korrigeret damptryk").

Betragtes aksens med diffusionsmodstanden som abscisse, og damptryksaksen som ordinat, vil hældningen af damptrykskurven i en sådan optegning være lig med dampstrømstætheden. En stejl kurve repræsenterer en relativt stor fugtstrøm, medens en flad kurve

repræsenterer en lille strøm. Der, hvor kurven knækker, strømmer mere fugt til end fra, så knækket er et udtryk for, at der sker kondensation.



Figur 4.16. Optegning af temperatur og damptryk i en afbildning der viser materialerne ved deres Z-værdi. I denne afbildning kan den aktuelle damptryksfordeling konstrueres geometrisk i stedet for at blive beregnet.

Beregning af udtørring

Når der efter vinterens opfugtning er ophobet fugt i en laggrænse, kan muligheden for at udtørre denne fugtmængde undersøges ved at bruge en lignende beregningsmetode som den, der lige er beskrevet for opfugtning (beregning i skema eller ved grafisk optegning). Den relative fugtighed i det våde lag sættes til 100%, og som klimabetingelser vælges typiske sommerforhold ude og inde (se næste delafsnit). Dette vil i reglen føre til damptryksfald fra det våde lag mod luften på begge sider af konstruktionen, så en udtørring kan finde sted. Der kan naturligvis ikke udtørre mere fugt, end der oprindeligt var til stede ved udtørningsperiodens begyndelse, så beregningsresultatet skal betragtes som en potentiel udtørring.

Beregningsforudsætninger vedrørende det omgivende klima

Glasers beregningsmetode gælder for stationære forhold. Det vil sige, at det forudsættes, at klimabetingelserne har været konstante så længe, at forholdene i konstruktionens lag har nået at indstille sig. I mange tilfælde kan det imidlertid tage flere måneder før en ligevægt indstiller sig specielt når tunge og tætte materialer er involveret. Klimabetingelserne må derfor vælges som egnede middelværdier for passende perioder.

For indeklimaet må der tages udgangspunkt i erfaringstal for temperatur- og fugtforhold med den anvendelse, bygningen er beregnet til. For eksisterende bygninger kan målinger af indeklimaet støtte en sådan vurdering. Luftkonditionerede bygninger har et kontrolleret klima, så her kan man bruge indstillingerne for temperatur og fugtighed. Man kan også skønne fugttilførslen i bygningen efter dens anvendelse, og så lade det indendørs vanddampindhold følge det udendørs med det tillæg, som fugttilførslen giver. Hvis ingen af disse muligheder foreligger, kan man benytte værdier for den rumklimaklasse, bygningens rum regnes at ligge i. Det vil i reglen være tilstrækkeligt at beskrive indeklimaets parametre ved månedsvise værdier.

De udendørs forhold er vanskeligere, fordi de er meget mere variable, og fordi man må vælge, hvorvidt man ønsker at tage solens indflydelse i regning. Det vil som regel være på den sikre side at se bort fra solopvarmningen af de udvendige flader. Til gengæld kan man så næsten ikke vurdere potentialet for udtørring om sommeren eller risikoen for sommerkondens, hvor fugten drives mod dampspærren fra den udvendige side af konstruktionen.

På en vindstille, solrig sommerdag kan temperaturen af en mørk tagflade komme op på 60-70 °C. Omvendt kan udstråling til det kolde himmelrum i vindstille, klare perioder sænke den udvendige overfladetemperatur nogle grader under luftens.

På grund af damptrykkets særdeles kraftige og ulineære stigning med temperaturen er det endvidere sådan, at selv korte perioder med kraftig solbeskinning og deraf følgende høje udvendige overfladetemperaturer kan betyde ganske meget for udtørringen af en konstruktion. Det er derfor ikke ganske korrekt at benytte fx sæsonbestemte middelværdier af den udvendige temperatur, da det

overser denne effekt.

Mulighederne for at beskrive det udendørs klima kan derfor sammenfattes som følgende tre, der kan vælges i mellem:

1. På den sikre side mht. opfugtnings-/udtørningsbalancen:

Benyt halvårs eller måneds-middelværdier for den udendørs lufttemperatur og fugtighed.

2. Med hensyntagen til sol og udstråling (mere realistisk):

Benyt måneds-middelværdier for den udvendige overfladetemperatur, når der tages hensyn til ind- og udstrålingsforholdene. Benyt luftens faktiske middeldamptryk. Metoden kræver, at den absorberede solindstråling på en udvendig flade med den aktuelle solabsorptans, hældning og orientering kan bestemmes. Endvidere skal den langbølgede udstråling til himmelrum og andre synlige omgivelser vurderes.

Måned	$\theta_{\text{udendørs luft}}$ °C	$\theta_{\text{mørk, vandret ofl.}}$ °C	$p_{\text{udendørs luft}}$ Pa
Januar	-0,6	-0,6	563
Februar	-1,1	-0,4	532
Marts	2,6	4,0	685
April	6,6	9,9	805
Maj	10,6	15,3	988
Juni	15,7	22,5	1159
Juli	16,4	22,6	1374
August	16,7	20,0	1325
September	13,7	15,7	1337
Oktober	9,2	10,0	1029
November	5,0	4,7	805
December	1,7	1,0	635
Året	8,1	10,5	939

Figur 4.17. Måned- og årsgennemsnit for udeluftens temperatur, for den udvendige temperatur af en mørk, vandret bygningsoverflade og for det udendørs damptryk.

Figur 4.17 viser gennemsnittet for lufttemperaturen og den beregnede udvendige temperatur for en mørk, vandret bygningsoverflade for hver af månederne i det danske såkaldte test-referenceår (til beregning af bygningers termiske forhold). Endvidere er vist det gennemsnitlige udendørs damptryk.

3. Varighedsintervaller for temperatur:

Temp. $\pm 2,5$ $^{\circ}\text{C}$	Antal timer		Temp. $\pm 2,5$ $^{\circ}\text{C}$	Antal timer	
	Udeluft	Mørk, vandret overflade		Udeluft	Mørk, vandret overflade
- 20	0	10	25	133	468
- 15	4	59	30	7	306
- 10	99	106	35	0	185
- 5	435	459	40	0	139
0	1567	1514	45	0	71
5	2153	1972	50	0	32
10	1785	1588	55	0	21
15	1851	1126	60	0	3
20	726	699	65	0	2

Figur 4.18. Samlet årlig varighed af perioder med temperatur af udeluft og af en mørk, vandret bygningsoverflade indenfor 5 graders intervaller.

Der oprettes et antal temperaturintervaller af fx 5 graders størrelse, og årets timer grupperes efter sin udendørs temperatur, så hvert temperaturinterval er repræsenteret ved et timeantal for sin samlede varighed gennem året. Metoden kan anvendes på basis af såvel lufttemperaturen eller den udvendige overfladetemperatur. Temperaturgrupperne benyttes som beregningsintervaller, og kondens- og udtørningsmængder bestemmes med de varigheder, intervallerne har.

Fordelen er, at de forholdsvis få timer, hvor temperaturerne bliver meget høje, bliver repræsenteret. Der flyttes nemlig meget fugt i disse korte perioder. Beregningsresultatet bliver med hensyn til klimapåvirkningen meget realistisk, men dermed er der ingen sikkerhedsfaktor indbygget i beregningsmetoden. En ulempe er

det også, at intervallerne ikke kan knyttes til, hvornår på året de forekommer.

Denne måde at beskrive udeklimaet på fordrer en detaljeret metode til i første omgang at bestemme de udvendige overfladetemperaturer. Figur 4.18 viser varighederne for den udendørs lufttemperatur og for temperaturen af en mørk, vandret bygningsoverflade (baseret på det danske test-referenceår).

Beregningsmetodens begrænsninger

Den gennemgåede Glasers metode har en række begrænsninger, som indskrænker gyldigheden af de resultater, den giver.

- Metoden er stationær. Man beregner altså forholdene, som de vil være, når konstruktionen har været udsat for det samme klima i "uendelig lang tid". Mange konstruktioner vil være måneder om at nå en stationær ligevægt, og på den tid vil det omgivende klima have ændret sig væsentligt.
- De fleste materialer er hygroskopiske, så i virkeligheden kan den relative fugtighed omkring et materiale ikke ændres hurtigere, end fugten transporteres ind i eller ud af materialet. Dette forhold bliver slet ikke inddraget i beregningerne.
- Beregningsmetoden drejer sig kun om dampdiffusion. En eventuel fugttransport på væskeform (kapillartransport) eller ved konvektion bliver ikke taget i regning. Det kan også foranledige brugeren til at fokusere for meget på diffusionens betydning for en konstruktions fugtmæssige forhold. Som bruger skal man huske på, at diffusion måske ikke er den eneste transportmekanisme, og at diffusionsmodstande af dampspærrer på væsentligt over $100 \text{ GPa} \times \text{m}^2 \times \text{s}/\text{kg}$ sjældent er realistiske under praktiske forhold.
- Materialernes damppermeabilitet er regnet som konstanter (og angives som regel også som sådan i tabelværker). I virkeligheden er disse værdier noget afhængige af fugtindholdet, så et fugtigt materiale er mere diffusionsåbent end samme materiale i tør tilstand.
- Som nævnt i forrige delafsnit, er der ikke nogen entydig måde at bestemme hvilke forudsætninger vedrørende det omgivende klima, der skal anvendes i beregningerne.
- Metoden er 1-dimensional, hvor de fleste konstruktioner i virke-

ligheden har en 2- eller 3-dimensional opbygning. Man må altså skønne hvilket tværsnit gennem konstruktionen, det vil være mest hensigtsmæssigt at beregne.

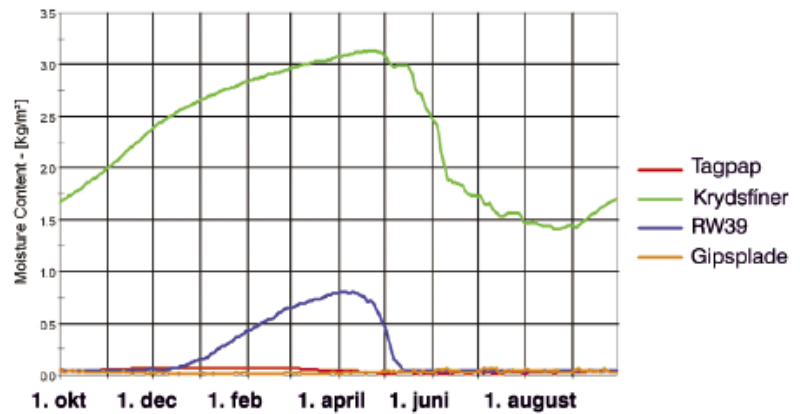
Detaljerede fugtberegninger

Det er i dag muligt at gennemføre beregninger, der tager hensyn til materialernes fugtkapacitet, og som inddrager fugttransport på væskeform og ved konvektion. Når man gennemfører sådanne beregninger benytter man typisk et stort antal beregningsintervaller af fx en times varighed. Dette muliggør, at man kan tage præcist hensyn til klimaets påvirkning af konstruktionen ude og inde.

Det er ikke realistisk af gennemføre den type beregninger i hånden. Det findes der dog efterhånden flere pc-programmer, der gør, herunder det danske MATCH-program. MATCH er et markedsført, 1-dimensionalt program til beregning af koblet fugt- og varmetransport. Programmet benytter detaljerede vejrdata fra et design-referenceår, og materialedata kommer fra et omfangsrigt materialebibliotek, der hører til programmet.

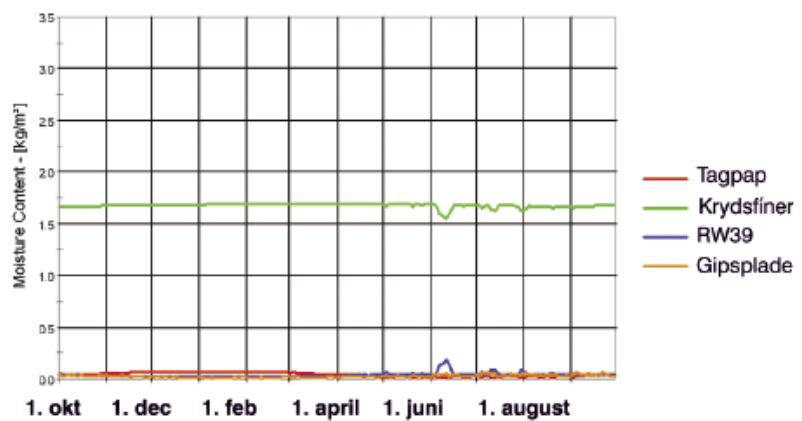
Figureerne 4.19-4.21 på næste side viser, hvordan det er muligt med MATCH-programmet at simulere detaljerede forløb for fugtindholdenes ændring over tid for de enkelte lag i en konstruktion. De viste beregninger gælder for et fladt tag med tagpap, krydsfinérsdæk, mineraluldsisolering og loftsbeklædning af gips. Taget er placeret over et normalt boligklima. De tre varianter viser mulighederne: Ingen dampspærre, traditionel dampspærre af polyethylen (PE-folie) eller dampspærre af Hygrodiode. For krydsfinérsdækket svarer et fugtindhold på 1 kg/m^2 til ca. 10 vægt-%

Fladt tag med tagpap, krydsfiner, mineraluld, (ingen dampspærre) og gips



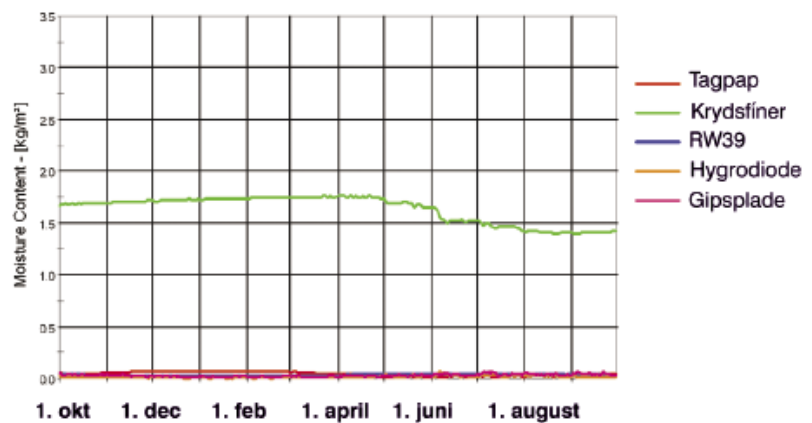
Figur 4.19
Fugtindholdets forløb [kg/m²]
gennem et år fra den 1. oktober
for nogle af lagene i en tagkon-
struktion, når der ikke er nogen
dampspærre.

Fladt tag med tagpap, krydsfiner, mineraluld, PE-folie og gips



Figur 4.20
Fugtindholdets udvikling, når der
anvendes en polyethylen-folie
som dampspærre.

Fladt tag med tagpap, krydsfiner, mineraluld, Hygrodiode og gips



Figur 4.21
Fugtindholdets udvikling, når
der anvendes Hygrodiode som
dampspærre.