

Stig Geving

# Beregningsprogrammer for fuktteknisk analyse av bygningkonstruksjoner

BYGGFORSK  
Norges byggforsk-  
ningsinstitutt

NTNU  
Institutt for bygg-  
og anleggsteknikk

Stig Geving

# **Beregningsprogrammer for fuktteknisk analyse av bygningkonstruksjoner**

Prosjektrapport 226 – 1997

Prosjektrapport 226  
Stig Geving  
**Beregningsprogrammer for fuktteknisk  
analyse av bygningskonstruksjoner**

ISSN 0801-6461  
ISBN 82-536-0593-5  
100 eks. trykt av  
S. E. Thoresen as  
Resirkulert papir:  
omslag Cyclus 200 g  
innmat Fortuna 100 g

© Norges byggforskningsinstitutt 1997

Adr.: Forskningsveien 3B  
Postboks 123 Blindern  
0314 OSLO  
Tlf.: 22 96 55 00  
Faks: 22 69 94 38/salg: 22 96 55 08  
Trondheimsavdelingen  
adr.: Høgskoleringen 7  
7034 TRONDHEIM  
Tlf.: 73 59 33 90  
Faks: 22 59 33 80

**Emneord:**

Fukttransport  
Beregningsprogram  
Bygningskonstruksjoner  
Materialegenskaper  
Klimadata

## FORORD

Denne rapporten omhandler arbeid som er gjennomført i det strategiske teknologiprogrammet «Fukt i bygningsmaterialer og konstruksjoner». Programmet gjennomføres i perioden 1993 – 1997 i et samarbeid mellom Norges byggforskninginstitutt (Byggforsk) og Institutt for bygg- og anleggsteknikk, Norges Teknisk Naturvitenskapelige Universitet (NTNU). Programmet er i hovedsak finansiert av Norges forskningsråd, med tillegg av egeninnsats og investeringsmidler fra de utførende institusjonene.

Programmet er organisert i følgende prosjekter:

0. Generelt prosjektarbeid og ledelse
1. Litteraturundersøkelse
2. Fuktmekanikk
3. Beregningsprogrammer
4. Materialelegenskaper
5. Verifisering
6. Dr.ing.-studier
7. Internasjonalt samarbeid

Arbeidet i denne rapporten er utført i prosjekt 3 «Beregningsprogrammer».

Trondheim, oktober 1997

Stig Geving



## INNHold

FORORD	3
SYMBOLLISTE	5
1 INNLEDNING	6
2 FUKTBREGNINGSPROGRAMMER (HAM-MODELLER)	8
2.1 Generelt	8
2.2 Klassifisering av HAM-modeller	9
3 PRESENTASJON AV FEM KOMMERSIELLE FUKTBREGNINGS-PROGRAMMER	12
4 SYSTEMATISK METODE FOR FUKTTEKNISK ANALYSE VHA. BREGNINGSPROGRAMMER	22
4.1 Generelt	22
4.2 Beskrivelse av metoden	23
5 REFERANSER	28
VEDLEGG	
1: Generelle krav til praktiske fuktbergningsprogrammer. Hentet fra (Geving, 1997)	31
2: Eksempel på bruk av systematisk metode for fuktteknisk analyse vha. bergningsprogrammer som beskrevet i kapittel 4. Hentet fra (Geving, 1997)	35

## SYMBOLLISTE

$C_a$	Volumetrisk varmekapasitet for luft	$J/m^3K$
$c_p$	Spesifikk varmekapasitet for fuktig materiale	$J/kgK$
$D_T$	Termisk fuktdiffusivitet	$m^2/Ks$
$D_u, D_\phi$	Fuktdiffusivitet	$m^2/s, kg/ms$
$g$	Vanndampfluks	$kg/m^2s$
$H$	Entalpi av det fuktige materialet	$J/m^3$
$h_v$	Masse spesifikk entalpi	$J/kg$
$K$	Hydraulisk konduktivitet	$kg/Pams$
$k_T$	Termisk fuktdiffusivitet	$kg/msK$
$k_w$	Fuktdiffusivitet	$m^2/s$
$P_{suc}$	Kapillært undertrykk	Pa
$p_{sat}$	Metningstrykk til vanndamp	Pa
$p_v$	Vanndamptrykk	Pa
$T$	Temperatur	K
$T_{ref}$	Tilfeldig referansnivå for temperatur	K
$t$	Tid	s
$u$	Fuktinnhold pr. masseenh	$kg/kg$
$v$	Vanndampkonsentrasjon (kg vann pr. $m^3$ luft)	$kg/m^3$
$v_{ref}$	Tilfeldig referansenivå for vanndampkonsentrasjon	$kg/m^3$
$w$	Fuktinnhold pr. volumenhet	$kg/m^3$
$q_a$	Luftstrøm	$m^3_{air}/m^2s$
$x$	en-dimensjonal romkoordinat	m
$\delta_p, \delta_v$	Vanndamppermeabilitet	$kg/Pams, m^2/s$
$\phi$	Relativ luftfuktighet	—
$\lambda$	Termisk konduktivitet	$W/mK$
$\rho$	Densitet	$kg/m^3$
$\psi$	Kirchoffs strømningspotensial	$kg/ms$

## 1 INNLEDNING

Fuktskader har lenge vært ansett som én av hovedårsakene til nedbrytning av ytterkonstruksjoner i bygninger. For ytterkonstruksjoner er det anslått at ca. 75 – 90 % av alle skader er forårsaket av fukt (Trechsel, 1994). Av de skadene som Norges byggforskningsinstitutt behandler, er omtrent 3/4 vann- og fuktskader. Varmeisolasjonsevnen kan også bli betraktelig nedsatt pga. fukt i bygningsmaterialene. I de senere årene har man også innsett at mugg og andre organismer som trives i bygninger og konstruksjoner med for mye fukt, kan utgjøre en helserisiko (Singh, 1993).

Tidligere ble bygningskomponenter og konstruksjoner utviklet gjennom tradisjon og generasjoner med erfaring. I dag blir imidlertid altfor ofte nye materialer og konstruksjonsløsninger introdusert på markedet uten en grundig analyse og vurdering av deres fukttekniske ytelse. Slike analyser kan utføres gjennom forsøk i felt eller laboratorium og gjennom modellering og beregninger av de tidsavhengige HAM-prosessene (HAM = 'combined heat, air and moisture transfer'). Laboratorie- og feltforsøk er dessverre dyre og tar lang tid å gjennomføre pga. den langsomme fukttransporten. Eksperimentelle undersøkelser kan bare dekke enkelte av aspektene når det gjelder den fukttekniske ytelsen til en bygningskonstruksjon. Ved å bruke passende beregningsmetoder kan slike forsøk reduseres og i noen tilfeller overflødiggjøres.

Til nå har det ikke vært vanlig praksis å gjøre fuktberegninger utover svært enkle stasjonære diffusjonsberegninger, av og til referert til som Glaser-metoden (Glaser, 1959). Denne metoden har dessverre mange alvorlige begrensninger som reduserer dens nytteverdi. Utviklingen av stadig kraftigere og billigere datamaskiner har gjort det praktisk mulig å gjennomføre kompliserte beregninger i et helt annet omfang enn før. De siste årene har derfor mange praktiske hygrotermiske beregningsmodeller blitt utviklet som kan brukes til å beregne den kombinerte varme- og fukttransporten i bygningskonstruksjoner. Disse modellene har varierende grad av kompleksitet, men de er typisk numeriske modeller som tar hensyn til fuktkapasiteten til materialene, og som løser den tidsavhengige koblede varme- og massetransport gjennom bygningskonstruksjonen.

HAM-modeller har mange forskjellige bruksområder for potensielle brukere som f.eks. konsulenter i bygningsfysikk, produsenter av bygningsmaterialer/komponenter og forskere. Noen eksempler er nevnt i det følgende:

- I designprosessen for nye bygninger kan HAM-beregninger brukes til å velge den beste løsningen rent fuktteknisk, og det kan kontrolleres om den fukttekniske ytelsen oppfyller standardkrav.
- Ved rehabilitering av eldre konstruksjoner er det ofte vanskelig og dyrt å tilfredstille kjente og sikre fukttekniske prinsipløsninger. HAM-modeller kan være til stor hjelp ved evaluering av mulige løsninger som avviker fra det kjente og sikre.
- Bruk av HAM-modeller kan være til hjelp for å forstå hva som har forårsaket en fuktskade, og hjelpe til med å finne en løsning på problemet.
- Under produksjonen av bygningen kan det være nyttig å beregne den nødvendige tiden for uttørking av byggfukt.
- HAM-modeller kan brukes for å studere fuktrelaterte problemer for nye typer bygningsmaterialer og konstruksjoner.

- HAM-modeller kan brukes i arbeid for å lage nasjonale anbefalinger mht. fuktrelaterte problemer og forskjellige typer bygninger og konstruksjonsløsninger.
- Felt- og laboratorieundersøkelser kan forklares ved å sammenligne med beregninger.
- HAM-modeller er et godt redskap for å få forståelse av bygningsfysiske fenomener.

I denne rapporten gis en generell diskusjon om HAM-beregningsverktøy (kap. 2). Fem forskjellige kommersielt tilgjengelige HAM-modeller presenteres kort (kap. 3). I tillegg presenteres en praktisk metode for fuktteknisk analyse av bygningkonstruksjoner vha. Beregningsverktøy (kap. 4). Det meste av kap. 2 og 4 er hentet direkte fra (Geving, 1997). Samme publisasjon gir en gjennomgang av de fleste aktuelle aspektene i forbindelse med fuktberegninger vha. HAM-modeller.

## 2 FUKTBREGNINGSPROGRAM (HAM-MODELLER)

### 2.1 Generelt

Teorien for kombinert varme- og massetransport i porøse materialer er beskrevet i mange forskjellige bøker og rapporter. I denne rapporten presenteres derimot ikke fysikken og matematikken bak denne teorien. For en introduksjon og grundig gjennomgang av teorien henvises leseren til publikasjoner som (Luikov, 1966; Krischer og Kast, 1978; Pedersen, 1989; Künzel, 1995).

Den tradisjonelle metoden for fuktteknisk analyse og design av ytterkonstruksjoner ble introdusert allerede på 50-tallet av Glaser (1959), vanligvis referert til som Glaser-metoden. Metoden er en-dimensjonal, stasjonær, inkluderer kun vandampdiffusjon og beregningene kan gjøres for hånd. Metoden er fremdeles i bruk, vanligvis i sin originale form, men også med noen forbedringer som f.eks. inkluderer kapillærtransport og lufttransport (Hens, 1996). Metoden har likevel svært mange alvorlige begrensninger som reduserer nytteverdien av den (Hens, 1996).

Den fundamentale teorien for kombinert varme og massetransport i porøse materialer ble introdusert av Philip og de Vries (1957) og Luikov (1966). De presenterte modeller for beregning av den totale fukttransporten (vandamp og væske) ved å bruke fuktinnhold og temperatur som drivkrefter. Beskrivelsen av fukttransporten var gitt ved følgende ligning.

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_w \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( k_T \frac{\partial T}{\partial x} \right)$$

Senere, og fram til i dag, er en mengde forskjellige formuleringer for fukttransporten gitt av forskjellige forfattere, ofte ved bruk av forskjellige drivkrefter. Salonvaara og Karagiozis (1994) brukte fuktinnhold og damptrykk, Pedersen (1990) brukte damptrykk og kapillært undertrykk, Künzel (1995) brukte temperatur og relativ fuktighet og Matsumoto m.fl. (1994) brukte temperatur og kjemisk potensial. En diskusjon omkring noen av de forskjellige modellene relatert til deres valg av drivkrefter er gitt i (Künzel, 1995; Hens, 1996).

Valget av drivkrefter for fukttransport kan være svært viktig for den generelle brukbarheten og nøyaktigheten av matematiske modeller og beregningsprogrammer som er utviklet fra disse modellene. Noen argumenter som kan brukes til fordel for et spesielt sett med drivkrefter er (Hens, 1996): i) Drivkraften bør være en målbar enhet, ii) Drivkraften bør være en virkelig drivkraft i fysisk henseende, iii) Variasjonen i drivkraften bør være stor for det fuktintervallet som undersøkes, iv) Materialparametre bør være jevne funksjoner av de drivkreftene som er brukt og v) Det kan være fordelaktig å skille mellom vandamptransport og væsketransport.

I dag finnes det internasjonalt en mengde forskjellige beregningsverktøy for fuktteknisk analyse av bygningskonstruksjoner. En oversikt over 37 eksisterende beregningsmodeller er gitt i (Hens, 1996). Disse modellene har varierende grad av kompleksitet, men de er typisk nume-

riske modeller som tar hensyn til fuktkapasiteten til materialene, og som løser den transiente koblede varme- og massetransporten gjennom bygningskonstruksjonen. De mest avanserte forskningsverktøyene kan simulere de koblede prosessene for vandampdiffusjon, kapillær væsketransport, vandamptransport pga. luftkonveksjon og varmetransport ved konduksjon, stråling, latent varme- og entalpitransport i to dimensjoner. De kan dessuten ta hensyn til spesielle grensebetingelser som regn, solstråling og vindtrykk. De kommersielt tilgjengelige HAM-modellene som er blitt utviklet til å kjøre på PC, er derimot vanligvis mer forenklede modeller, typisk en-dimensjonale verktøy som ikke inkluderer lufttransport.

Et viktig aspekt når det gjelder disse beregningsmodellene er hvor godt de kan etterligne virkeligheten. En side av dette er om modellen tar hensyn til de relevante prosessene. Hvis den analyserte konstruksjonen er følsom for luftkonveksjon, kan f.eks. en-dimensjonale modeller som kun inkluderer diffusive prosesser, gi helt gale resultater. Et annet aspekt er om nøyaktigheten til modellene er godt verifisert. Verifiseringsprosessen kan utføres på tre måter (Hens, 1996): 1) Analytisk verifisering – kontroll mot kjente løsninger, 2) Sammenligning med andre kjente modeller og 3) Kontroll mot eksperimentelle målinger. Et omfattende verifiseringsarbeid er presentert i (Hens, 1996b) for flere forskjellige HAM-modeller, konstruksjonstyper og klima. De generelle konklusjonene fra dette arbeidet var:

1. Enkle stasjonære modeller (f.eks. Glaser-modellen) har en svært begrenset evne som designverktøy.
2. Forenklede og (nesten) komplette modeller kan gi et korrekt bilde av den forventede varme-, luft- og fuktresponsen, i det minste rent kvalitativt. Dette er selvfølgelig bare korrekt dersom alle relevante transportformer er inkludert, korrekte initialbetingelser er brukt, materialenes varme- og fuktkapasitet er tatt hensyn til, og entalpitransport og latent varme er inkludert.
3. Noen av de effektene som er viktige når de inntreffer, ble identifisert som lufteksfiltrasjon, initial fuktinnhold, latent varme og slagregn.
4. Store forskjeller ble funnet mellom de numeriske verdiene oppnådd med forskjellige HAM-modeller med samme kompleksitetsnivå. Grunnene til dette var mange: i) forenkling av materialparametre, ii) forskjellig «oversetting» av grensebetingelser og iii) forskjellig bruk av geometriske data.

## **2.2 Klassifisering av HAM-modeller**

En viktig oppgave i prosessen for en fuktteknisk analyse er å velge en HAM-modell som kan beregne varme- og fuktresponsen for den aktuelle konstruksjonen på den best mulige måten. Alternativt bør HAM-modellens begrensninger mht. beregningsresultatene for det aktuelle beregningsproblemet kunne identifiseres. En praktisk måte å gjøre dette på er å klassifisere HAM-modellene i henhold til deres kompleksitet, hvilke fysiske mekanismer som er inkludert, måten grensebetingelser eller materialparametre er implementert etc.

Hens (1996) skiller mellom tre typer HAM-modeller i forbindelse med deres **overordnede kompleksitet**:

1. **Enkle beregningsverktøy** som tar utgangspunkt i ingeniørens synspunkt: beregninger skal være enkle nok til å kunne utføres for hånd, vha. et regneark eller et lite program. Fysikk, matematikk og grensebetingelser er maksimalt forenklet (eksempel: Glaser-metoden).
2. **Forenklete modeller** prøver å beskrive HAM-transporten så nært som mulig opp til (nesten) komplette modeller. På den annen side er materialparametre og grensebetingelser forenklet så mye som mulig uten at det går for mye ut over nøyaktigheten.
3. **(Nesten) komplette modeller** prøver å beskrive HAM-transporten på den mest korrekte måten mht. den fysikken og termodynamikken som er involvert. Slike modeller er derfor hovedsakelig forskningsverktøy.

Klassifisering mht. overordnet kompleksitet gir en god indikasjon på kompleksiteten av fysikken og matematikken som er involvert. Et klassifiseringssystem som skal være til hjelp ved valg av modell og identifisering av modellens begrensninger, må være mer detaljert. Et mulig klassifiseringssystem er vist i tabell 2.2. Det må bemerkes at også andre klassifiseringskategorier og grupper enn de som er vist i tabellen, kan være viktige. I vedlegg 1 er listet opp en del generelle krav som bør stilles til HAM-beregningsprogram

Tabell 2.2

Klassifiseringssystem for HAM-modeller (Geving, 1997)

Klassifiseringskategori	Klassifiseringsgrupper
<b>Overordnet kompleksitet</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Enkelt beregningsverktøy</li> <li>2. Forenklet modell</li> <li>3. (Nesten) komplett modell</li> </ol>
<b>Generalitet</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Svært spesifikk, utviklet for å brukes på et klart definert problem</li> <li>2. Spesifikk, kan brukes for en eller noen få konstruksjoner</li> <li>3. Forholdsvis generell, kan brukes for alle konstruksjonstyper uten ventilerte hulrom</li> <li>4. Generell, kan brukes for ventilerte og uventilerte konstruksjoner</li> </ol>
<b>Transportmekanismer</b>	
• Fukttransport	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Vanddampdiffusjon</li> <li>2. Vanddampdiffusjon + kapillærsuging</li> <li>3. Vanddampdiffusjon + lufttransport</li> <li>4. Vanddampdiffusjon + kapillærsuging + lufttransport</li> </ol>
• Varmetransport	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Varmekonduksjon</li> <li>2. Varmekonduksjon + latent varme</li> <li>3. Varmekonduksjon + latent varme + entalpi (lufttransport)</li> <li>4. Varmekonduksjon + stråling i hulrom</li> <li>5. Varmekonduksjon + latent varme + entalpi (lufttransport) + stråling i hulrom</li> </ol>
<b>Materialparametre</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Konstante transport og kapasitive parametre</li> <li>2. Noen transport- og kapasitive parametre er forenklete funksjoner av fuktinnhold (eller RF)</li> <li>3. Noen transport- og kapasitive parametre er forenklete funksjoner av fuktinnhold (eller RF), noen også forenklete funksjoner av temperatur</li> <li>4. Alle transport- og kapasitive parametre er fulle funksjoner av fuktinnhold (eller RF)</li> <li>5. Alle transport og kapasitive parametre er fulle funksjoner av fuktinnhold (eller RF), noen også fulle funksjoner av temperatur</li> </ol>



## Uteklima

- Klimafaktorer inkludert \*
  1. Temperatur, RF
  2. Temperatur, RF, solstråling
  3. Temperatur, RF, solstråling, langbølget avstråling
  4. Temperatur, RF, solstråling, langbølget avstråling, vind (effekt på overflatekoeffisienter)
  5. Temperatur, RF, solstråling, langbølget avstråling, vind (effekt på overflatekoeffisienter og lokalt lufttrykk), lufttrykk
  6. Temperatur, RF, solstråling, langbølget avstråling, vind (effekt på overflatekoeffisienter, lokalt lufttrykk og slagregn), lufttrykk, regn
  
- Type klimafil
  1. Noen klimaparametre gis som en "total" effekt på den aktuelle bygningsoverflaten, som f.eks. strålingseffekter gitt direkte som den totale strålingen på den aktuelle flaten. Denne fremgangsmåten betyr at brukeren må beregne eller estimere disse verdiene selv, ut fra tilgjengelige klimadata.
  2. Kun virkelige meteorologiske parametre er brukt, dvs. modellen inkluderer alle nødvendige algoritmer for å transformere disse parametrene til varme-, fukt- og trykkbelastninger på en gitt flate.
  
- Evne til å inkludere lokaleffekter \*\*
  1. Ingen
  2. Skyggeeffekt av lokalt terreng og omkringliggende objekter på solstråling og langbølget avstråling
  3. Effekt av lokalt terreng og omkringliggende objekter på vindhastighet
  4. Variasjoner i belastning på bygningsoverflaten, f.eks. fordeling av slagregn som funksjon av bygningshøyde
  5. Muligheter til å ta hensyn til overordnede forskjeller mellom klimastasjonen (dvs. klimafilen) og den aktuelle lokaliteten

## Inneklima

- Type parametre \* \*\*
  1. Temperatur, RF
  2. Temperatur, forskjell i vanddampkonsentrasjon mellom inne- og uteluft
  3. Temperatur, RF, lufttrykk
  4. Temperatur, forskjell i vanddampkonsentrasjon mellom inne- og uteluft, lufttrykk
  
- Evne til å inkludere lokaleffekter \*\*
  1. Ingen
  2. Vertikale variasjoner, f.eks. lufttemperaturgradienter og skorsteinseffekt
  3. Effekt på overflatekoeffisienter, f.eks. effekt av hjørne og møbler
  
- Modellering av innendørs RF \*\*
  1. Konstant verdi over året, gitt direkte i pre-prosessoren eller input-filen
  2. Periodevis konstant verdi (f.eks. månedlig), gitt direkte i pre-prosessor eller input-fil
  3. Innendørs klimafil
  4. Beregnet som forenklet timevis funksjon av uteklima, ventilasjonsrate og fuktproduksjon
  5. Beregnet som timevis funksjon av uteklima, ventilasjonsrate (mekanisk ventilasjon og infiltrasjon), fuktproduksjon, absorpsjon/desorpsjon på hygroskopiske overflater og kondensering/fordampning på overflater

## Geometri

- Dimensjonalitet
  1. 1-D
  2. 2-D
  3. 3-D
  
- Typer konstruksjonsformer
  1. Rektangulære former
  2. Stegvis rektangulær
  3. Trapesformer
  4. Sirkulære former
  5. Vilkårlig form (dvs. finite element method)

\* Parametre kan også oppgis i andre enheter, f.eks. RF kan gis som damptrykk eller duggpunkt.

\*\* For denne kategorien kan flere av klassifiseringsgruppene gjelde samtidig.



### **3 PRESENTASJON AV FEM KOMMERSIELLE FUKTBREGNINGS-PROGRAM**

I dette kapitlet presenteres kort fem kommersielt tilgjengelige HAM-programmer: JAM-2, MATCH, MOIST, WUFI og 1D-HAM. Programmene er delvis klassifisert etter klassifiseringsystemet vist i tabell 2.2. I tillegg er det gitt en del praktiske opplysninger for den som ønsker å anskaffe programmet, samt en del kommentarer som går på brukervennlighet m.m. De fleste av programmene har vært brukt ved Byggforsk og IBA over en periode på flere år.

<b>Modell:</b>	JAM-2
<b>Utviklingsår:</b>	1989
<b>Modell/programutvikler:</b>	Jesper Arvidsson. Byggnadsfysik, Lunds Tekniska Högskola, Box 118, S-221 00 Lund, Sverige, tlf. +46-46107385, fax. +46-46104535
<b>Utgiver:</b>	Som ovenfor
<b>Pris (pr. desember 1993):</b>	2000,- SEK
<b>Beskrivelse av modell:</b>	Arvidsson, J. 1994. <i>Isoterma fuktförlopp i porösa material. Beräkning och utvärdering av mätdata. Rapport TVBH-1007.</i> Byggnadsfysik, Lunds Tekniska Högskola
<b>Krav til maskinvare:</b>	PC-program under MS-DOS
<b>Overordnet kompleksitet:</b>	Forenklet modell
<b>Generalitet:</b>	Spesifikk, kan brukes for én eller noen få typer konstruksjoner
<b>Transportmekanismer:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fuktransport</li> <li>• Varmetransport</li> </ul>	<p>Vanndampdiffusjon + kapillærsuging</p> <p>Ingen, dvs. regner med isoterme forhold</p>
<b>Materialparametre:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Type parametre</li> <li>• Fuktavhengighet</li> </ul>	<p>Sorpsjonsisoterm, Kirchoff-potensialet som funksjon av fuktinnhold (se Arvidsson, 1994)</p> <p>Alle transport- og kapasitive egenskaper er fulle funksjoner av fuktinnholdet</p>
<b>Grensebetingelser:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Typer</li> <li>• Evne til å inkludere lokaleffekter</li> <li>• Modellering av grensebetingelser</li> </ul>	<p>RF eller fuktflux (<math>\text{kg}_{\text{vann}}/\text{m}^2\text{s}</math>)</p> <p>Kan variere grensebetingelsene for alle rander, og gi flere forskjellige grensebetingelser langs en enkelt rand</p> <p>Kan gis som konstant verdi over beregningsperioden, stegvis konstant eller som en periodisk variasjon (sinusfunksjon)</p>
<b>Geometri:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dimensjonalitet</li> <li>• Typer konstruksjonsformer</li> </ul>	<p>2-D</p> <p>Stegvis rektangulær</p>
<b>Basis ligning for fukttransport:</b>	
$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2}$	
der $\psi$ er Kirchoffs strømningspotensial gitt ved:	
$\psi = \int_{\varphi_{REF}}^{\varphi} D_{\varphi}(\varphi) d\varphi$	
der $\varphi$ kan være hvilken som helst av variablene $\phi$ (RF), $v$ (vanndampkonsentrasjon), $P_{\text{suc}}$ (kapillært undertrykk) og $w$ (fuktinnhold).	
<b>Kommentarer:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Siden programmet kun regner for isoterme forhold, er programmet ikke egnet til beregninger for ytterkonstruksjoner (skillekonstruksjon mellom inne og ute). Programmet egner seg derfor best til konstruksjoner eller konstruksjonsdetaljer som befinner seg innendørs eller utendørs med tilnærmet like temperaturforhold ved alle rander. Det egner seg også best for tilfeller der den relative fuktigheten ved de enkelte rendene er enkel å anslå.</li> <li>• Programmet er relativt brukervennlig</li> <li>• Bruken av Kirchoffspotensialet i den numeriske beregningen er uvanlig. Ved innlegging av egne materialparametre basert på mer standard transportkoeffisienter (f.eks. damppermeabilitet og fuktdiffusivitet) må disse "oversettes" til Kirchoffspotensialet, noe som ikke er helt enkelt.</li> </ul>	

<b>Modell:</b>	<b>MATCH (v. 1.5)</b>
<b>Utviklingsår:</b>	1990
<b>Modell/programutvikler:</b>	C. Rode, Department of Buildings and Energy, Building 118, Technical University of Denmark, DK-2800 Lyngby
<b>Utgiver:</b>	Bygge- og Miljøteknik ApS, Skodsborgvej 48 A, DK-2830 Virum, Danmark, tlf. +45-45834422, fax. +45-45851175
<b>Pris (pr. august 1997):</b>	15 000,- DKK
<b>Beskrivelse av modell:</b>	Pedersen, C.R. 1990. <i>Combined heat and moisture transfer in building constructions</i> . Dr.-avhandling. Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark.
<b>Krav til maskinvare:</b>	PC-program under MS-DOS
<b>Overordnet kompleksitet:</b>	Forenklet modell
<b>Generalitet:</b>	Forholdsvis generell, kan brukes for alle konstruksjonstyper uten ventilerte hulrom
<b>Transportmekanismer:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fukktransport</li> <li>• Varmetransport</li> </ul>	Vanndampdiffusjon + kapillærsuging Varmekonduksjon + latent varme
<b>Materialparametre:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Type parametre</li> <li>• Fuktavhengighet</li> </ul>	Densitet, spesifikk varmekapasitet, termisk konduktivitet, damppermeabilitet, sorpsjonskurve (inkl. hysteres), hydraulisk konduktivitet, suctionkurve (inkl. hysteres) Alle transport- og kapasitive egenskaper er fulle funksjoner av RF
<b>Uteklima:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Type parametre</li> <li>• Type klimafil</li> <li>• Evne til å inkludere lokaleffekter</li> </ul>	Temperatur, duggpunktstemperatur, solstråling (global-, diffus- og normalstråling), langbølget avstråling (estimeres, inngår ikke i klimafilen), vindhastighet (effekt på overflatekoeffisienter). Kun virkelige meteorologiske parametre brukes (timesverdier). Forenklet klimafil med temperatur og RF inne og ute kan også brukes (timesverdier) Avskjerming av solstråling fra omkringliggende terreng og bygninger.
<b>Inneklima:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Type parametre</li> <li>• Evne til å inkludere lokaleffekter</li> <li>• Modellering av innendørs RF</li> </ul>	Temperatur, RF eller forskjell i vanndampkonsentrasjon mellom inne- og uteluft (fuktilskudd) Ingen Konstante månedlige verdier eller forenklet kombinert (inne og ute) klimafil for temperatur og RF på timebasis
<b>Geometri:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dimensjonalitet</li> <li>• Typer konstruksjonsformer</li> </ul>	1-D Rektangulære former
<b>Basis ligninger:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fukktransport</li> </ul>	$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \delta_p \frac{\partial p_v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial P_{suc}}{\partial x} \right)$

- Varmetransport

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \Delta h_v \frac{\partial}{\partial x} \left( \delta_p \frac{\partial p_v}{\partial x} \right)$$

**Kommentarer:**

- MATCH er ett av de mest brukte fuktbergningsprogrammene i Europa
- Programmet er meget brukervennlig
- Programpakken består av en preprosessor, hovedprogram og en postprosessor for produksjon av grafer.
- Programmet er verifisert ved sammenligninger mellom målinger og beregninger for mange forskjellige konstruksjoner og forhold
- Programmet er opprinnelig utviklet for beregninger av flate kompakte tak
- Det er inkludert en materialdatabase med de mest vanlige bygningsmaterialene
- Modellen inkluderer visse ekstramuligheter som ikke er ferdigtestet og derfor ikke beskrevet i manualen (informasjon fås kun ved henvendelse til programutvikler), bl.a.:
  - \* Simulering av ventilert kledning
  - \* 1-D luftgjennomstrømning
  - \* Fuktkilde til et materiallag
- Framtidsplaner (pr. 27.08.97) for MATCH er:
  - \* Windows-versjon forventes å være klar i løpet av 1998.
  - \* Slagregn vil trolig bli innarbeidet i MATCH i løpet av 1998.
  - \* Det ble laget en forstudie til en 2-D versjon for noen år siden, men det er pr. dags dato ingen planer om å igangsette utviklingsarbeidet
- Det er utviklet en forenklet versjon av programmet, kalt MiniMatch, som spesielt henvender seg til rådgivende ingeniørers daglige bruk. Denne versjonen koster 7 500,- DKK.

<b>Modell:</b>	<b>MOIST</b>
<b>Utviklingsår:</b>	1993
<b>Modell/programutvikler:</b>	D.M. Burch og W.C.Thomas. Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899, USA
<b>Utgiver:</b>	Som ovenfor
<b>Pris (pr. 13.08.97):</b>	Gratis
<b>Beskrivelse av modell:</b>	Burch, D.M og W.C. Thomas. 1991. <i>An analysis of moisture accumulation in a wood frame wall subjected to winter climate. Report NISTIR 4674.</i> Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, USA
<b>Krav til maskinvare:</b>	PC-program under MS-DOS
<b>Overordnet kompleksitet:</b>	Forenklet modell
<b>Generalitet:</b>	Generell, kan brukes for ventilerte og uventilerte konstruksjoner
<b>Transportmekanismer:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fuktransport</li> <li>• Varmetransport</li> </ul>	Vanndampdiffusjon + kapillærsuging + lufttransport (delvis)* Varmekonduksjon + latent varme + lufttransport (delvis)*
<b>Materialparametre:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Type parametre</li> <li>• Fuktavhengighet</li> </ul>	Densitet, porøsitet, spesifikk varmekapasitet, termisk konduktivitet, damppermeabilitet, sorpsjonskurve, fuktpermeabilitet Noen transport- og kapasitive parametre er fulle funksjoner av RF
<b>Uteklima:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Type parametre</li> <li>• Type klimafil</li> <li>• Evne til å inkludere lokaleffekter</li> </ul>	Temperatur, duggpunktstemperatur, solstråling (global), vindhastighet, vindretning, lufttrykk Kun virkelige meteorologiske parametre brukes. Timesverdier. Ingen
<b>Inneklima:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Type parametre</li> <li>• Evne til å inkludere lokaleffekter</li> <li>• Modellering av innendørs RF</li> </ul>	Temperatur og RF Ingen Konstant verdi over året, gitt direkte i program. Alternativt kan det beregnes som en timevis funksjon av uteklima, ventilasjonsrate (mekanisk ventilasjon og infiltrasjon), fuktproduksjon og absorpsjon/desorpsjon på hygroskopiske overflater.
<b>Geometri:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dimensjonalitet</li> <li>• Typer konstruksjonsformer</li> </ul>	1-D Rektangulære former
<b>Basis ligninger:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fuktransport</li> </ul>	$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_u \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( D_r \frac{\partial T}{\partial x} \right)$

- Varmetransport

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right)$$

Transport av latent varme er inkludert i grensebetingelsene.

**Kommentarer:**

- MOIST er det mest brukte fuktbergningsprogrammet i USA og er fritt tilgjengelig for alle brukere.
- DOS-versjonen er relativt tungvint å bruke.
- Fremtidsplaner (pr. 13.08.97) for MOIST er:
  - \* Window-versjon med forenklet brukergrensesnitt ventes å bli ferdig snart.
  - \* Utgiver har planer om å utvikle en 2-D versjon.
- \* Lufftransporten som programmet kan ta hensyn til, er en brukerdefinert luftlekkasje, enten fra ute-luft eller inneluft, til en spesifisert del av konstruksjonen.

<b>Modell:</b>	<b>WUFI</b>
<b>Utviklingsår:</b>	1994
<b>Modell/programutvikler:</b>	H.M. Künzel, Fraunhofer Institut für Bauphysic, P.O.Box 1152, D-83601 Holzkirchen, Germany, tlf. +49 (0)8024 6430, fax. +49 (0)8024 64366
<b>Utgiver:</b>	Som ovenfor
<b>Pris (pr. 1997):</b>	9 500,- DM
<b>Beskrivelse av modell:</b>	Künzel, H.M. 1995. <i>Simultaneous heat and moisture transport in building components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters.</i> IRB Verlag, Stuttgart, Germany.
<b>Krav til maskinvare:</b>	PC-program under MS-DOS og Windows
<b>Overordnet kompleksitet:</b>	Forenklet modell
<b>Generalitet:</b>	Forholdsvis generell, kan brukes for alle konstruksjonstyper uten ventilerte hulrom
<b>Transportmekanismer:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fukttransport</li> <li>• Varmetransport</li> </ul>	Vanndampdiffusjon + kapillærsuging Varmekonduksjon + latent varme
<b>Materialparametre:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Type parametre</li> <li>• Fuktavhengighet</li> </ul>	Densitet, porøsitet, spesifikk varmekapasitet, termisk konduktivitet, damppermeabilitet, sorpsjonskurve (inkl. overhygroskopisk område), fuktdiffusivitet Alle transport- og kapasitive egenskaper er fulle funksjoner av RF
<b>Uteklima:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Type parametre</li> <li>• Type klimafil</li> <li>• Evne til å inkludere lokaleffekter</li> </ul>	Temperatur, RF, solstråling, regn Solstråling og regn kan oppgis som total energi- og regnmengde som treffer den aktuelle overflaten. Felles fil for inne- og uteklima. Klimafilen kan også genereres automatisk fra TRY-klimafil (dvs. diffus- og direkte solstråling, langbølget avstråling, vindhastighet og -retning, horisontal nedbør og fasadeorientering behøves også). Timesverdier, ev. større tidsintervaller. Ingen
<b>Inneklima:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Type parametre</li> <li>• Evne til å inkludere lokaleffekter</li> <li>• Modellering av innendørs RF</li> </ul>	Temperatur og RF Ingen Oppgis som konstant verdi over året, eller temperatur og RF gis som sinusfunksjon over året. Deretter genereres timevis verdier som blir en del av klimafilen.
<b>Geometri:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dimensjonalitet</li> <li>• Typen konstruksjonsformer</li> </ul>	1-D Rektangulære former
<b>Basis ligninger:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fukttransport</li> </ul>	$\frac{dw}{d\phi} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \delta \frac{\partial p_{at}}{\partial x} \right)$

- Varmetransport

$$\frac{dH}{dT} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + h_v \frac{\partial}{\partial x} \left( \delta_p \frac{\partial \phi_{p, sat}}{\partial x} \right)$$

**Kommentarer:**

- DOS-versjonen er tyskspråklig (begrenset engelsk hjelp-funksjon).
- Windows-versjonen finnes både i tysk og engelsk versjon.
- Programmet har en omfattende hjelp-funksjon.
- DOS-versjonen er tungvint å bruke.
- Det er inkludert en materialdatabase med de mest vanlige bygningsmaterialene, spesielt omfattende for murmaterialer. Det er enkelt å legge inn egne materialdata.
- Brukeren kan definere hvilke grafer og rapporter som skal genereres.
- Fremtidsplaner (pr. 13.08.97) for WUFI er:
  - \* å lage en 2-D versjon med et forenklet brukergrensesnitt, hovedsaklig beregnet for forskningsformål
  - \* å lage en «forenklet» 1-D utgave som lettere kan brukes av «gjennomsnittsbrukeren» (f.eks. bygningstekniske konsulenter og arkitekter)



<b>Modell:</b>	<b>1D-HAM</b>
<b>Utviklingsår:</b>	1993
<b>Modell/programutvikler:</b>	Carl-Eric Hagentoft, Byggnadsfysik, Chalmers Tekniska Högskolan, S-412 96 Göteborg, tlf. +46-317721989
<b>Utgiver:</b>	Som ovenfor
<b>Pris (pr. 1993):</b>	500,- SEK
<b>Beskrivelse av modell:</b>	Hagentoft, C-E. 1992. <i>Simplified analysis of combined heat, moisture and air transport for one-dimensional cases. Working report T1-S-92/04. IEA/Annex 24.</i> Dept. of Building Physics, Lund, Sverige, Rapport TVBH-7146.
<b>Krav til maskinvare:</b>	PC-program under MS-DOS
<b>Overordnet kompleksitet:</b>	Forenklet modell
<b>Generalitet:</b>	Forholdsvis generell, kan brukes for alle konstruksjonstyper uten ventilerte hulrom
<b>Transportmekanismer:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fukttransport</li> <li>• Varmetransport</li> </ul>	Vandampdiffusjon + lufttransport Varmekonduksjon + entalpi-transport (lufttransport)
<b>Materialparametre:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Type parametre</li> <li>• Fuktavhengighet</li> </ul>	Volumetrisk varmekapasitet, termisk konduktivitet, damp-permeabilitet, forenklet sorpsjonskurve Konstante transport og kapasitive parametre
<b>Uteklima:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Type parametre</li> <li>• Type klimafil</li> <li>• Evne til å inkludere lokaleffekter</li> </ul>	Temperatur, vandampinnhold i lufta, solstråling, forskjell i totaltrykk over konstruksjonen Solstråling oppgis direkte som total energi som treffer den aktuelle flaten. Felles fil for inne- og uteklima. Timesverdier eller selvvalgt større tidsintervall Ingen
<b>Inneklima:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Type parametre</li> <li>• Evne til å inkludere lokaleffekter</li> <li>• Modellering av innendørs RF</li> </ul>	Temperatur, vandampinnhold i lufta, stråling Ingen Timesverdier eller selvvalgt større tidsintervall som oppgis direkte i felles fil for inne- og uteklima
<b>Geometri:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dimensjonalitet</li> <li>• Typer konstruksjonsformer</li> </ul>	1-D Rektangulære former
<b>Basis ligninger:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fukttransport</li> </ul> Fukttransporten gjennom et homogent lag er gitt ved:	
$g = \delta_v \frac{\partial v}{\partial x} - q_a (v - v_{ref})$	
Analytiske løsninger for koblingen (dvs. konduktansene) mellom beregningsnodene for en gitt luftstrøm er brukt.	

- Varmetransport  
Varmetransporten gjennom et homogent lag er gitt ved:

$$q = \lambda \frac{\partial T}{\partial x} - q_a C_a (T - T_{ref})$$

Analytiske løsninger for koblingen (dvs. konduktansene) mellom beregningsnodene for en gitt luftstrøm er brukt.

#### Kommentarer:

- Input til programmet gis direkte i en input-fil, dvs. programmet er ikke spesielt brukervennlig.
- Den enkle input-filen gjør at programmet er egnet til Monte-Carlo beregninger, dvs. automatisk generering av mange input-filer hvor input-parametrene gis en statistisk variasjon.
- Det faktumet at inne- og uteklime gis i felles fil, betyr at ny klimafil må lages for hvert enkelt beregningstilfelle med nytt inneklime.
- Det faktumet at solstråling i klimafilen må gis som total energi som treffer den aktuelle flaten, betyr at:
  - \* brukeren selv må beregne total energi ut fra global- og diffus stråling, samt helning og orientering av flaten
  - \* ny klimafil må lages for hver ny orientering og helning av konstruksjonen.
- Bruk av konstante materialparametre (spesielt for damppermeabilitet) kan for visse konstruksjoner og materialer innebære en risiko for gale resultater.
- Programmet mangler en materialdatabase.
- Den manglende brukervennligheten innebærer at programmet er mest egnet til forskningsøyemed.
- Fremtidsplaner (pr. 18.08.97) for 1D-HAM er :
  - \* Ved Chalmers Tekniska Högskolan (CTH) vil snart en Windows-versjon som tar hensyn til slagregn, være tilgjengelig. Dette programmet vil trolig være mye mer brukervennlig enn DOS-versjonen.
  - \* I forbindelse med et doktorgradsarbeide ved CTH vil en 2-D Windows-versjon med koblet varme-, fukt- og luftstrømning utvikles. Dette forventes å være tilgjengelig i løpet av 1998.

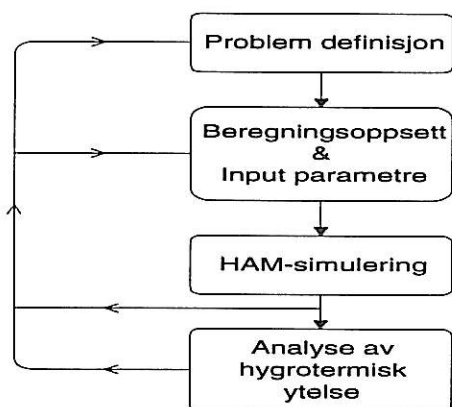
## 4 SYSTEMATISK METODE FOR FUKKTEKNISK ANALYSE VHA. BEREGNINGSPROGRAMMER

### 4.1 Generelt

Fuktteknisk analyse ved hjelp av HAM-modeller kan være et vanskelig felt. I dette kapitlet presenteres derfor en generell metode for hvordan HAM-modeller kan brukes på en systematisk måte i en fuktteknisk analyse av bygningskonstruksjoner. Mange av input-dataene til modellene er ofte usikre og vanskelige å definere helt korrekt, som f.eks. ute- og inneklimate, materialparametre og fuktinnholdet i starten. I tillegg er det mange andre valg og beslutninger som tas i prosessen for en fuktteknisk analyse som innvirker på nøyaktigheten og påliteligheten av resultatene. Det gjelder f.eks. statistisk fremgangsmåte, valg av beregningsverktøy, hvilke «case» som skal simuleres, betingelser for skade/nedbrytning og metoder for evaluering av risiko for at fuktskader skal oppstå. En systematisk fremgangsmåte for disse aspektene og problemene vil være en måte å forbedre påliteligheten av en fuktteknisk analyse vha. HAM-modeller.

Metoden som beskrives i dette kapitlet, er hentet fra (Geving, 1997). Metoden inneholder fire forskjellige nivå, som vist i figur 4.1. En oversikt over de forskjellige oppgavene som inngår i de fire nivåene, er gitt i tabell 4.1.

Metoden som er beskrevet er ment å være en generell metode, dvs. at den kan brukes for svært forskjellige formål som f.eks. design av nye konstruksjoner på en bestemt lokalitet eller evaluering av eksperimentelle målinger vha. beregningsverktøy. Dette medfører at noen av oppgavene og deloppgavene for komponentene i metoden kan være unødvendige å utføre. Metoden kan brukes som en sjekklister; dvs. at brukeren selv må avgjøre hvilke komponenter og oppgaver som skal gis ekstra oppmerksomhet. Men på den annen siden vil det å gå gjennom hver enkelt av oppgavene trolig gi resultatene ekstra nøyaktighet og pålitelighet. Rekkefølgen av de forskjellige oppgavene inkludert i denne metoden vil i praksis variere. Rekkefølgen gitt i tabell 4.1 er bare ment som et forslag.



Figur 4.1

Komponenter som inngår i systematisk metode for fuktteknisk analyse vha. HAM-modeller

Tabell 4.1

Oversikt over de forskjellige oppgavene som inngår i de fire hovednivåene i den systematiske metoden for fuktteknisk analyse vha. HAM-modellen

KOMPONENTER	OPPGAVER
Nivå 1: Problem definisjon	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Målsetning</li> <li>2. Konstruksjon</li> <li>3. Fuktkilder</li> <li>4. Mekanismer for varme- og fukttransport</li> <li>5. Mulige fuktproblemer (nedbrytning etc.)</li> <li>6. Tid og kostnader som kan brukes</li> <li>7. Nødvendig nøyaktighet</li> </ol>
Nivå 2: Beregningsoppsett og input-parametre	<p>A. Beregningsoppsett</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Typen ytelseskontroller</li> <li>2. Statistisk fremgangsmåte</li> <li>3. Valg av beregningsverktøy</li> <li>4. Foreløpig beregning</li> <li>5. Typen "case" som skal beregnes</li> </ol> <p>B. Input-parametre</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Uteklima</li> <li>2. Inneklima</li> <li>3. Materialparametre</li> <li>4. Startbetingelser</li> <li>5. Andre input-data</li> </ol>
Nivå 3: HAM-simulering	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Forberedelser/formatering av input-data</li> <li>2. Simulering</li> <li>3. Kontroll/forberedelse av output-data</li> </ol>
Nivå 4: Analyse av hygrotermisk ytelse	<p>A. Analyse av hygrotermiske forhold</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Nøyaktighet og pålitelighet av beregningsresultater</li> <li>2. Årsaker til hygrotermiske forhold</li> <li>3. Mulig variasjon i resultatet</li> </ol> <p>B. Evaluering av ytelse</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Finn ytelsesverdier</li> <li>2. Evaluer ytelsen</li> <li>3. Nye «case»</li> </ol>

## 4.2 Beskrivelse av metoden

I det følgende er de forskjellige komponentene og oppgavene vist i tabell 4.1, kort kommentert. For en mer inngående beskrivelse av metoden henvises til (Geving, 1997). I vedlegg 2 vises et eksempel på bruk av metoden. Eksemplet er hentet direkte fra (Geving, 1997).

### Nivå 1 – Problem definisjon

Dette nivået inkluderer definisjonen av basisinformasjon som er nødvendig for å gjøre en effektiv fuktteknisk analyse. En grundig problemdefinisjon vil spare tid og problemer for de senere nivåene.

1. Målsetning. Definisjon av målsetning(e) for den fukttekniske analysen. Hvis f.eks. målsetningen med å gjøre en HAM-beregning kun er å få litt generell forståelse for den fuktmessige oppførselen til en bestemt konstruksjon, vil krav og størrelsesorden til analysearbeidet være vesentlig mindre enn hvis målsetningen er å utforme nasjonale anbefalinger for en type konstruksjon.

2. Konstruksjon. Beskrivelse av: a) *konstruksjonens geometri* b) *typer materialer som er brukt* og c) *mulige ikke-idealiteter (f.eks. pga. dårlig arbeidsutførelse) som kan influere på HAM-oppførselen til konstruksjonen*. I tidlig design-arbeid ønsker man kanskje å sammenligne forskjellige konstruksjoner, mens man i evalueringsarbeid ønsker å kontrollere en klart definert konstruksjon.
3. Fuktkilder. Identifisering av de viktigste fuktkildene. Fuktkildene som normal vil influere på konstruksjonen i løpet av levetiden er *regn, utendørs luftfuktighet, innendørs luftfuktighet* og *fukt i grunnen*. Andre fuktkilder som kan opptre sporadisk (eller aldri) i løpet av levetiden, er *byggfukt* og *vannlekkasjer*.
4. Mekanismer for varme- og fukttransport. Identifisering av de viktigste mekanismene for varme- og fukttransport for den aktuelle konstruksjonen; f.eks. *vanndampdiffusjon, kapillærsuging, lufttransport, vannstrømning pga. tyngdekraft, varmekonduksjon, langbølget stråling, latent varme og entalpi-transport*.
5. Mulige fuktproblemer (nedbryning etc.) i) Identifiser mulige fuktrelaterte problemer for den aktuelle konstruksjonen og ii) Bestem hvilke problemer som skal undersøkes i denne analysen.
6. Tid og kostnader som kan brukes. Dette er kanskje de mest begrensende faktorene i forbindelse med fukttekniske analyser, med innvirkning på blant annet antall «case» som kan regnes, statistisk fremgangsmåte og hvor grundig input-parametrene blir valgt.
7. Nødvendig nøyaktighet. i) Anslå den overordnede nøyaktigheten som behøves (høy, midt, lav) basert på «Oppgave 1 – Målsetning» og ii) Anslå nøyaktigheten som behøves for den fysiske modelleringen, dvs. kan noen mekanismer forenkles eller kuttes ut?

## Nivå 2 – Beregningsoppsett og input-parametre

### A. BEREGNINGSOPPSETT

1. Typer ytelseskontroller. i) Samle tilgjengelig informasjon om ytelsesverdier og ytelseskriterier (kritiske verdier) for fuktskade som skal brukes, og ii) Bestem hvilken type ytelseskontroll som skal utføres.
2. Statistisk fremgangsmåte. Denne oppgaven inkluderer valg mellom a) *deterministisk analyse* eller b) *probabilistisk (stokastisk) analyse*. Hvis en probabilistisk analyse blir valgt, vil dette innvirke meget på definisjonen av input-parametre og valg av beregningsverktøy. Konseptet med probabilistisk HAM-analyse er kort presentert i Vedlegg 2.
3. Valg av beregningsverktøy. En systematisk fremgangsmåte for å velge den mest passende beregningsmodellen kan benyttes. Klassifiseringsmetoden presentert i kap. 2.2 kan brukes

til å definere begrensningene til en beregningsmodell, og kan også brukes til å definere kravspesifikasjoner for en modell som skal brukes for å løse et spesielt problem.

4. Foreløpig beregning. Det kan være en fordel å utføre noen foreløpige beregninger så tidlig som mulig i analysen. Dette kan gi en grov forståelse av fysikken som er involvert og hvilke input-parametre som virker viktige.
5. Typer «case» som skal beregnes. i) List opp alle faktorer (f.eks. material parametre og uteklima) som kan ha en signifikant effekt på fuktforholdene i konstruksjonen og ii) Bestem hvilke «case» som skal beregnes. Man er vanligvis interessert i å begrense antall beregnings-«case», og deloppgave ii) bør derfor gis en del oppmerksomhet.

## B. INPUT-PARAMETRE

1. Uteklima. i) Analyser problemet; hvilken type klimadata behøves? ii) Undersøk hvilke klimadata som er tilgjengelig iii) Velg klimadata og iv) Velg tidsperiode som skal simuleres. I deloppgave i) avklares det hvilke krav problemet stiller til klimadata, f.eks. for en design-situasjon er det viktig at klimadata representerer en mer kritisk fuktbelastning enn det midlere klimaet. Klimadata spesialutvalgt for fuktberegninger for 12 norske steder finnes på elektronisk format i (Geving og Torgersen, 1997). Vanligvis ønsker man å beregne minst et helt år. For å inkludere en hel sesong med fuktopptak i konstruksjonen, foretrekkes det vanligvis å starte simuleringen i starten av fyringssesongen (september eller oktober). For enkelte konstruksjoner kan det være nødvendig å beregne mange år.
2. Inneklima. i) Vurder innvirkning og betydning av de forskjellige inneklimafaktorene (f.eks. temperatur, RF, strålingstemperatur, lufttrykk, fuktproduksjon, ventilasjon, infiltrasjon og brukermønstre), ii) Samle tilgjengelig informasjon om inneklima for den typen problem som skal analyseres og iii) Velg de nødvendige inneklima-parametrene.
3. Materialparametre. i) List opp de materialparametrene som beregningsprogrammet behøver og deres avhengighet av fuktinnholdet, ii) Vurder betydning av de forskjellige materialparametrene for det aktuelle problemet, iii) Samle tilgjengelige og nødvendige materialparametre (f.eks. fra litteratur) og iv) Velg de nødvendige materialparametrene. Deloppgave ii) Impliserer bruk av informasjon fra generelle studier av materialparametres betydning, som f.eks. i (Geving, 1997), eller ved å gjennomføre mindre parameterstudier.
4. Startbetingelser. Fuktinnholdet i starten defineres vanligvis ut fra to fremgangsmåter: a) «normalt» fuktnivå for den tiden av året beregningen starter og b) byggfukt.
5. Andre input-data og definisjoner. Denne oppgaven inkluderer alle andre input-data og definisjoner som ikke er definert tidligere, som f.eks. valg av numerisk gitter og overflate-motstander.



### Nivå 3 – HAM-simulering

1. Forberedelser/formatering av input-data. i) Produser input-data med nødvendig format og ii) Sjekk alle input-parametre for formateringsfeil.
2. Simulering. i) Inntasting av input-data i beregningsprogram, ii) Sjekk alle input-data for tastefeil og iii) Kjør simulering.
3. Kontroll/forberedelse av output-data. i) Sjekk for åpenbare feil i resultatene ii) Definer nye/ekstra beregninger som behøves iii) Gi output-data det nødvendige formatet og iv) List opp begrensninger og forenklinger som er forbundet med beregningene.

### Nivå 4 – Analyse av hygrotermisk ytelse

Delnivå A) *Analyse av hygrotermiske forhold* er en analyse av de tidsavhengige temperaturene og fuktforholdene i konstruksjonen. Delnivå B) *Evaluering av ytelse* er en analyse av konstruksjonens ytelse mht. bestandighet eller energiforbruk.

#### A. ANALYSE AV HYGROTERMISKE FORHOLD

1. Nøyaktighet og pålitelighet av beregningsresultater. Det er svært viktig at beregningsresultatene blir nøye analysert for å se om HAM-modellen gir en korrekt fremstilling av de impliserte fukt- og varmemekanismene som opptrer. Dette kan f.eks. gjøres ved å sammenligne forskjellige beregnede «case», sammenligne med beregninger vha. andre HAM-modeller eller sammenligne med målinger og dokumentert HAM-oppførsel for lignende konstruksjoner.
2. Årsaker til hygrotermiske forhold. Denne oppgaven er en analyse av de fysiske årsakene til de beregnede hygrotermiske forholdene i konstruksjonen. Målsetningen er å forklare de hygrotermiske forholdene (f.eks. temperatur, RF, fuktinnhold, varme- og fuktfluks) for forskjellige steder i konstruksjonen i løpet av beregningsperioden.
3. Mulig variasjon av resultatene. Målsetningen med denne oppgaven er å vurdere den mulige variasjonen som kan opptre i resultatene pga. statistisk variasjon av input-parametrene. Ved en deterministisk fremgangsmåte må dette estimeres, f.eks. vha. en parameterstudie.

#### B. EVALUERING AV YTELSE

For hver type ytelsesproblem som skal undersøkes (f.eks. muggvekst, råte, energiforbruk), bør følgende tre oppgaver utføres:

1. Finn ytelsesverdier. Ytelsesverdier (f.eks. beregnet RF i et kritisk materialsjikt) kan finnes eller beregnes ved å bruke beregningsresultatene. Hvis en probabilistisk fremgangsmåte (mange forskjellige kjøring hvor inputparametrene varieres for hver enkelt kjøring) er

valgt for analysen, må ytelsesverdiene finnes/beregnes for hver enkelt kjøring. Dermed kan man få en statistisk variasjon for ytelsesverdiene.

2. Evaluer ytelsen. Evaluering av ytelsen gjøres vanligvis vha. én av tre fremgangsmåter: a) *Sjekk om konstruksjonen er OK* b) *Beregn risiko for skade* og c) *Sammenlign med andre konstruksjoner eller «case»*. Fremgangsmåte a) er den deterministiske fremgangsmåten og kan implisere sammenligning av en ytelsesverdi med ett ytelseskriterium (kritisk verdi). Fremgangsmåte b) kan brukes hvis en probabilistisk fremgangsmåte er brukt i analysen. Fremgangsmåte c) er den vanlige måten når ytelseskriterier (kritiske verdier) ikke er tilgjengelige. I stedet kan en sammenligning og rangering av de forskjellige konstruksjonene og «case» gjøres.
3. Nye «case». Basert på resultatene av *Oppgave 2 – Evaluer ytelsen*, bestemmes det om nye «case» bør beregnes. Hvis nye «case» må beregnes, kan det være nødvendig å gå tilbake til Nivå 1 eller Nivå 2.



## 5 REFERANSER

- Geving, S. 1997. *Moisture design of building constructions. Hygrothermal analysis using simulation models*. Doktor-ingeniøravhandling 1997:61, Institutt for bygg- og anleggsteknikk, NTNU, Trondheim.
- Geving, S. og S. E. Torgersen. 1997. Klimadata for fuktberegninger. Referanseår for 12 steder i Norge og klimadata for konstruksjoner mot grunnen. Prosjektrapport 227, Norges byggforskningsinstitutt, Oslo.
- Glaser, H. 1959. Graphisches Verfahren zur Untersuchung von Diffusionsvorgänge. *Kältetechnik* Vol 10, pp 345–349.
- Hens, H. 1996. *Modelling. Final Report Task I*. International Energy Agency, Energy Conservation in Buildings and Community Systems, Annex 24 Heat, Air and Moisture Transport in New and Retrofitted Building Envelope Parts (HAMTIE). Laboratorium Bouwfysica, K.U.-Leuven, Belgium.
- Hens, H. 1996b. *Modelling. Addendum. Common exercises. Summary reports. Final Report Task I*. International Energy Agency, Energy Conservation in Buildings and Community Systems, Annex 24 Heat, Air and Moisture Transport in New and Retrofitted Building Envelope Parts (HAMTIE). Laboratorium Bouwfysica, K.U.-Leuven, Belgium.
- Krischer, O. and Kast, W. 1978. *The scientific principles of drying technology* (in German). Springer Verlag, Berlin, Germany.
- Künzel, H.M. 1995. *Simultaneous heat and moisture transport in building components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters*. IRB Verlag, Stuttgart, Germany.
- Luikov, A.V. 1966. *Heat and mass transfer in capillary porous bodies*, Pergamon Press, London, England.
- Matsumoto, M., Y. Gao and S. Hokoi. 1994. Simultaneous heat and moisture transfer during freezing-melting in building materials. In: *Proceedings CIB-W40 meeting*, 6–8 September, 1993, Budapest, Hungary, Publication 173, CIB.
- Pedersen, C.R. 1989. *Combined moisture and heat transfer in building constructions – Moisture physics* (in Danish). Report nr. 89–2, Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.
- Pedersen, C.R. 1990. *Combined heat and moisture transfer in building constructions*. Ph.D. Thesis 2nd Edition, Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.
- Philip, J. R. and D. R. De Vries. 1957. Moisture movement in porous media under temperature gradients. *Trans. Am. Geophysical Union*, Vol 38, pp 222–232.

Salonvaara, M. and A. Karagiozis. 1994. *Moisture transport in building envelopes using an approximate factorization solution method*. CDF Society of Canada, June 1–3, Toronto, Canada.

Singh, J. 1993. Biological contaminants in the built environment and their health implications. *Building Research and Information*, Vol 21, No 4, pp 216–224.

Trechsel, H.R. (editor) 1994. *Moisture control in buildings*. ASTM Manual series, MNL 18, Philadelphia, USA.



## VEDLEGG 1

*I det følgende er gitt et delkapittel (kapittel 2.3) hentet fra (Geving, 1997). Det bør bemerkes at eventuelle referanser og kapittelhenvisninger gjelder for den aktuelle publikasjonen, og ikke for denne prosjektrapporten.*

### 2.3 GENERAL REQUIREMENTS FOR PRACTICAL COMPUTER TOOLS

In this chapter some general considerations for practical and commercial available HAM-computer tools are discussed. Necessary and useful requirements that make the program easy and practical to use are listed. This chapter may be of help for developers of practical HAM-models that are going to be made commercially available. In addition it might give some additional help to the classification system introduced in Chapter 2.2 when choosing the best HAM-tool for a hygrothermal analysis. It should be noted that the conclusions of this sub-chapter is based on the authors practical experience with simulation work employing the one-dimensional HAM-models MATCH (Pedersen, 1990), 1D-HAM (Hagentoft, 1992) and WUFI (Künzel, 1995) and the two dimensional HAM-model LATENITE (Salonvaara and Karagiozis, 1994b). In Figure 2.3 an illustration of some important aspects for practical computer tools are shown.

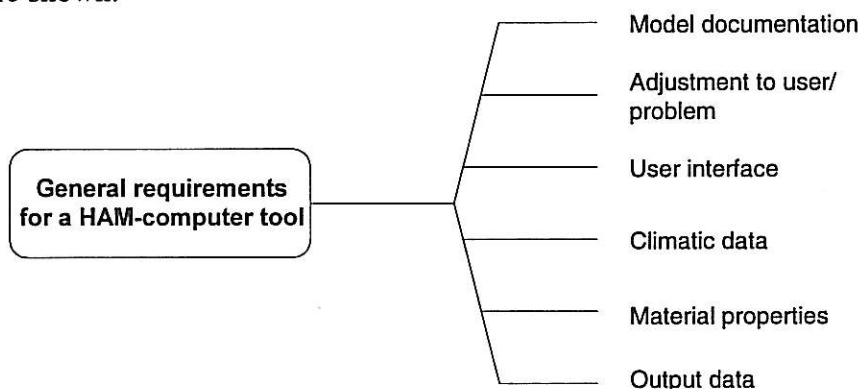


Figure 2.3 Some general requirements for a practical HAM-computer tool.

#### Model documentation

Whether a computer program can be successfully used by others than the author depends greatly on how well the model and program is documented. An important part of this documentation is the users manual. The users manual should as a minimum contain:

- instructions about installation and starting of the program
- limitations for application areas of the program
- description of input and output data
- description of the program structure
- description of the included databases
- description of files which the user can alter (e.g., material and climatic files)
- presentation of default values
- one or several calculation examples
- reference to verification work on the model

---

The users manual should also preferably include a short description of the physics and mathematics employed by the model, and/or give references to an available publications which contain such information. A good model description should include information about:

- purpose of the model (e.g., general or specific?)
- basic equations
- modelling of material properties (e.g., simplifications)
- modelling of boundary conditions (indoor and outdoor climate, surface coefficients)
- limitations and assumptions

In addition to the above mentioned information the user manual should if possible include references to information about:

- systematic methods for hygrothermal analysis using HAM-tools (e.g., see Chapter 10)
- probabilistic approach for hygrothermal analysis (e.g., see Chapter 3)
- general theory of combined heat, air and moisture transfer in building constructions
- general information about exterior climatic data (e.g., see Chapter 4) and the concept of selecting representative weather data for moisture calculations (e.g., see Chapter 5)
- input data such as material properties, indoor climate and surface coefficients (e.g., where to find measurement values and typical statistical distributions)
- concepts for performance values and criteria (e.g., see Chapter 8.2.2), and known performance criteria for various durability and energy aspects

#### **Adjustment to the user and type of problem**

In general, one should if possible avoid applying models which are more complicated than necessary for a particular problem. An advanced model will generally need more input parameters than a more simple one, thereby increasing the amount of time needed for the analysis and the risk for using wrong input data. The amount of input data should preferably be adjusted to the type of user the program is intended for; building designers would like to have little input data while the researcher might want to specify most of the current variables. The choice of mathematical and numerical solution should be chosen according to the wanted level of accuracy and speed of calculation. The building designer usually want fast answers and is therefore willing to accept a lower degree of accuracy, while the researcher wants an answer with a high degree of accuracy and is therefore willing to accept long simulation time.

#### **User interface and input data**

Below some preferences for the handling of user interface and input data are given:

- The program should have a pre-processor; editing input-files in text editors is both time consuming and includes a high risk for errors.
- If apparently wrong values are given the program should give feedback immediately.
- It should be possible to run batch-jobs.
- All input data should be explained in a help-function and/or manual
- The most usual values and variations of the different input parameters should be given in the help-function and/or in the manual.
- If possible some of the calculated results should be shown as graphics during simulation.
- It should be possible to interrupt the simulations, and preferably have the possibility to continue afterwards.

---

### **Outdoor climatic data**

Below some preferences for the handling of outdoor climatic data are given:

- It should be possible for the user to make his own climatic file, i.e., the climatic file must not be dependent of any specifications in the program code.
- Although a climatic file on hourly basis probably will be the standard case, it should be possible to make climatic files with other time intervals (e.g., daily, weekly or monthly averages). The effect of the diurnal variations of solar radiation should however be accounted for when average values are used (see Chapter 5.3)
- The climatic file should have a simple format, using only well known parameters in ordinary units. If other parameters (e.g., equivalent air temperature including the effect of solar radiation) are used it should be documented how these are calculated.
- It should preferably be possible to adjust the macro-climate represented by the climatic file (i.e., a weather station) to the real micro-climate at the building surface. This means taking into account overall climatic differences between the weather station and the considered place, the effect of surrounding terrain, topography, buildings and objects, and the local variations across the building envelope (e.g., rain distribution as a function of height).

### **Indoor climatic data**

Below some preferences for the handling of indoor climatic data are given:

- Indoor climatic data can be given in three different ways, of which preferably all three ways should be included as alternatives in a practical simulation tool:
  1. It should be possible to give the interior climate directly in the pre-processor as constants for a certain period of time, e.g., yearly or monthly average values.
  2. The program should include a (simple) model for simulating the indoor climate as a function of exterior climate, moisture generation, ventilation rate, etc. Results from Chapter 6.4 do however indicate that a detailed modelling of the indoor climate is not necessary for most types of HAM-simulations.
  3. It should be possible to give the indoor climate as an indoor climatic file (separated from the exterior climatic file), with any time interval (e.g., hourly values). In that way it is possible to simulate measured conditions.
- If indoor climate is given as constant it should be possible to chose between indoor air relative humidity or vapour concentration difference between the indoor and outdoor air.

### **Material properties**

Below some preferences for the handling of material properties are given:

- The program should include a material database with the most common building materials.
- It should be possible and easy to define new or change old materials in the database.
- Properties dependent of moisture content, RH or temperature (e.g., vapour permeability and sorption curves) should be given as a number of measurement points. In this way it is possible to chose whether constant values, simplified or full functions for the properties should be used.
- If the properties dependency of moisture content, RH and temperature are given as special functions, one should avoid using special curve fitting techniques to generate the

---

coefficients needed, unless the curve fitting program is distributed together with the main program.

### **Output data**

Below some preferences for the handling of the output data are given:

- A history of a particular simulation case should be generated automatically, i.e., a summary of the input definitions, boundary conditions and material parameters employed.
- The program should generate statistics of the outdoor and indoor climate that is used in the calculations (e.g., monthly and yearly averages).
- The simulation results should be saved in ASCII-files for an easy handling in spreadsheets.
- It should be possible for the user himself to choose what values to save as output data.
- It should be possible to save calculated values with any time interval (e.g., hourly, daily, weekly or monthly mean values).
- The following values should have the possibility to be calculated and saved in output files; relative humidity, moisture content (weight%, volume%,  $\text{kg/m}^2$ ,  $\text{kg/m}^3$ ), vapour pressure or concentration, temperature, heat and moisture fluxes, etc.
- It should be possible to save simulation results both for the whole construction, for single layers, materials or nodes and for the material interfaces.
- A post-processor for an easy generation of reports and graphics should be included.



## VEDLEGG 2

*I det følgende er gitt et delkapittel (kapittel 10.3) hentet fra (Geving, 1997). Det bør bemerkes at eventuelle referanser og kapittelhenvisninger gjelder for den aktuelle publikasjon, og ikke for denne prosjektrapporten.*

### 10.3 APPLICATION : EVALUATION OF A WOOD FRAME WALL WITHOUT VAPOUR RETARDER

*This section gives a description of a HAM-analysis from a paper presented in full in Part II of the thesis; "A systematic method for hygrothermal analysis of building constructions using computer models". For more information the interested reader is referred to that paper.*

In this section the method presented in Chapter 10.1 and 10.2 is applied on a practical problem. The analysis work is presented according to the four levels of the method. Some tasks of the various levels have been given a full description, while other tasks are only briefly presented or not at all.

#### 10.3.1 Problem definition

A vapour retarder typically has two functions in a building element. The first is to make the construction airtight so as to prevent moisture flow by water vapour convection, and the second is to reduce water vapour diffusion. In a cold climate such as in Norway it is accepted practice to use a vapour retarder at the inside of the building envelope. It has however been argued that, if the air-tightness of the construction is handled otherwise, a vapour barrier is not needed at all. The purpose of this analysis was therefore to evaluate the durability performance of a wood frame wall without a vapour retarder. The wall was assumed to be airtight. The wind barrier used was relatively vapour tight (i.e., plywood), thereby representing relatively severe conditions regarding condensation at the wind barrier.

The building was located in Oslo, Norway. The design of the considered wall construction is presented in Figure 10.2. In this study the hygrothermal condition of the plywood layer was investigated. The important moisture related performance problems that may occur for this construction is mould growth on the wooden surfaces or rot. The fact that rot occur at higher humidity levels than mould growth, imply that if mould is not occurring rot will not occur either. In this analysis the risk for mould growth on the plywood surface was therefore investigated. The moisture sources considered were indoor and outdoor air humidity. Driving rain was not considered to be of importance for the plywood layer.

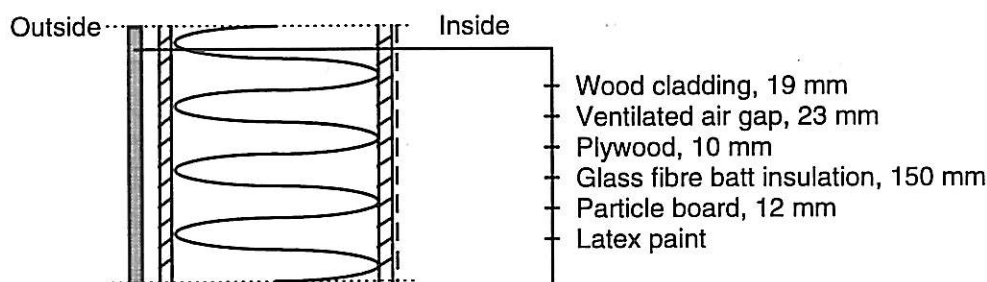


Figure 10.2 The constructional design of the considered wall



### 10.3.2 Simulation set-up and input parameters

#### Performance values and criteria

Using measurement results from (Viitanen, 1994), critical RH ( $RH_{cr}$ ) for mould growth on pine and spruce material were assessed as functions of exposure time and temperature (T), see Table 10.2. Outside the temperature range [0°C, 50°C] it was assumed that no mould growth can occur.

Table 10.2 Critical RH ( $RH_{cr}$ ) for mould growth on pine and spruce material as function of exposure time and temperature. See discussion in Chapter 8.2.3.

Exposure time	Temperature range		
	[0°C, 5°C)	[5°C, 15°C)	[15°C, 50°C)
2 weeks	98 %	94 %	89 %
4 weeks	96 %	92 %	87 %
12 weeks	88 %	81 %	80 %

The performance values for RH ( $RH_{p,i}$ ) and temperature ( $T_{p,i}$ ) were calculated on a weekly basis for each exposure time (2, 4 and 12 weeks) from the following formula:

$$RH_{p,i} = \frac{\sum_{j=i-n+1}^i RH_{week,j}}{n} \quad (10.1)$$

where  $RH_{week,j}$  is the average simulated value for RH of the inside plywood surface for week j, i is the week for which  $RH_{p,i}$  is calculated and n is the exposure time (n = 2, 4 or 12). The performance value for temperature for week i (used to determine  $RH_{cr}$ ) was calculated in a similar way.

#### Statistical approach

A probabilistic approach closely based on the theory and methodology of structural reliability was applied, as described in Chapter 3. The design procedure was worked out in such a way that the failure probability is restricted:

$$P_{f,T} = P\{R(t) - S(t) < 0\}_T < P_{target} \quad (3.13)$$

where  $P_{f,T}$  is the probability of failure of the structure within T,  $P_{target}$  is the accepted maximum value of the probability of failure and R(t) and S(t) are instantaneous physical values of the generalised resistance and the generalised load at the moment t. For this investigation the common measure of R and S was relative humidity, R was the critical relative humidity ( $RH_{cr}$ ) while S was the relative humidity of the inside plywood surface ( $RH_{p,i}$ ). The simulation period T was one year.  $P_{target}$  was chosen to be 10%. To find the distribution of the load S the Monte-Carlo simulation method was applied, see Chapter 3.2.3. For this investigation all uncertain input parameters and the load S were assumed to be normally distributed, and a number of 60 runs were used in this Monte-Carlo simulation

## Computer model

The program 1D-HAM (Hagentoft, 1993) was employed to calculate the hygrothermal conditions of the wall. The model solves the coupled transient heat and mass transfer in one dimension, taking the hygroscopicity of the materials into account. The program considers moisture transfer by vapour diffusion and convection and uses simplified material properties, e.g., constant transport coefficients. Although other more advanced programs were available, this program was used since it was the only one with an input file that easily could be manipulated for a Monte-Carlo simulation.

## Input data

Hourly weather data for 1991 from Oslo was selected for this design case, the selection of that particular year was made from the period 1975-1994 according to a method for finding representative weather data for moisture design calculations described in Chapter 5.2. The indoor air temperature was put like a constant value of 21 °C, while the air humidity difference between indoor and outdoor air was assumed to be normally distributed ( $\mu = 3.3 \text{ g/m}^3$  and  $\sigma = 1.0 \text{ g/m}^3$ ), based on measurements of indoor climate in single and multi family houses (Tolstoy, 1993).

Required material data for the simulations were the thermal conductivity  $\lambda$  (W/mK), the volumetric heat capacity  $C$  (J/m<sup>3</sup>K), the moisture diffusion coefficient  $\delta_v$  (m<sup>2</sup>/s) and the sorption isotherm  $w(\phi)$  (kg/m<sup>3</sup>). Here  $w$  (kg/m<sup>3</sup>) is the moisture content mass by volume, and  $\phi$  (%) is the relative humidity. Simplified sorption isotherms were used. A sorption curve was given by two straight lines between the points ( $\phi = 0, w = 0$ ), ( $\phi = \phi_1, w = w_1$ ) and ( $\phi = 100, w = w_2$ ). All uncertain material parameters were assumed to be normally distributed. Mean values and standard deviation for the material parameters used in the Monte-Carlo simulation are given in Table 10.3. The material data used as basis for the selection of mean values and standard deviation are mostly collected from the material database described in (Kumaran, 1996).

Table 10.3 Data for materials used in the Monte-Carlo simulation, with mean values  $\mu$  and standard deviation  $\sigma$ , ( $\mu \pm \sigma$ ).

Material	$\lambda$	$C$	$\delta_v$	$\phi_1$	$w_1$	$w_2^{(1)}$
	(W/mK), $\mu \pm \sigma$	(MJ/m <sup>3</sup> K) $\mu \pm \sigma$	(10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s) $\mu \pm \sigma$	(%) $\mu \pm \sigma$	(kg/m <sup>3</sup> ) $\mu \pm \sigma$	(kg/m <sup>3</sup> ) $\mu$
Plywood <sup>(2)</sup>	0.13 ± 0.02	1.1 ± 0.19	0.87 ± 0.54	87.5 ± 5	120 ± 10	210
Glass fiber	0.039 ± 0.03	0.002 ± 0	19.5 ± 2.7	95 ± 0	0.41 ± 0.1	0.9
Particle board	0.10 ± 0	1.3 ± 0	0.59 ± 0.23	80 ± 0	80.5 ± 0	210

(1)  $w_2$  is given the same relative deviation from the mean as for  $w_1$ .

(2)  $\delta_v$  is not allowed to be chosen below  $3.63 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ .

The wood cladding and ventilated air gap was modelled as one equivalent material layer, with a thermal and vapour resistance of respectively ( $\mu = 0.06 \text{ m}^2\text{K/W}$ ,  $\sigma = 0.02 \text{ m}^2\text{K/W}$ ) and ( $\mu = 260 \text{ s/m}$ ,  $\sigma = 0$ ). The latex paint was included as an extra vapour resistance ( $Z_v$ ) in the interior surface vapour resistance of ( $\mu = 2.2 \cdot 10^4 \text{ s/m}$ ,  $\sigma = 1.1 \cdot 10^4 \text{ s/m}$ ).

---

Initial moisture conditions were chosen to be approximately equal to a relative humidity of 70%. The solar absorption factor was assumed to be normal distributed ( $\mu = 0.5$ ,  $\sigma = 0.15$ ). The thermal surface resistance for the outdoor and indoor surface were  $0.04 \text{ m}^2\text{K/W}$  and  $0.13 \text{ m}^2\text{K/W}$  respectively. The exterior moisture surface resistance was  $60 \text{ s/m}$ , while the interior surface resistance included the dominating resistance of the latex paint. The wall was oriented to the north and the simulation period was 52 weeks from 1. October to 30. September.

### 10.3.3 HAM-simulation

The tasks from this level of the method is not mentioned here, with an exception for the *limitations and simplifications* of the simulations; i) One-dimensional approximation to three-dimensional reality, i.e., studs and bottom/top-plates are not included and effect of internal convection was omitted, ii) Air leakages caused by non-idealities (workmanship effects) such as cracks, holes and air gaps were not included, iii) The ventilated air gap between exterior wood cladding and the plywood was modelled as a conductive layer, i.e., the vertical air flow was omitted, iv) Capillary moisture flow was not included, v) Effect of built-in-moisture was not considered, and vi) Constant material properties were used.

### 10.3.4 Analysis of hygrothermal performance

#### Results

The results of the Monte-Carlo simulation with 1D-HAM are presented in Figure 10.3. During the winter period it can be seen that the RH of the plywood surface is between 70% and 100%, i.e., there is a high risk for mould growth. To investigate the reliability of the results a similar construction was simulated with the one-dimensional HAM-model MATCH (Pedersen, 1990). As far as possible the same input parameters and climatic data were used, but instead of using the material parameters given in Table 10.3 the material data base of MATCH was used. The results of the MATCH-simulation is shown in Figure 10.4 together with the 1D-HAM results. As can be seen the results from the MATCH model is quite similar to the mean results from 1D-HAM. This indicates that the accuracy and reliability of the results from 1D-HAM are relatively good, at least when considering the accuracy of the model.

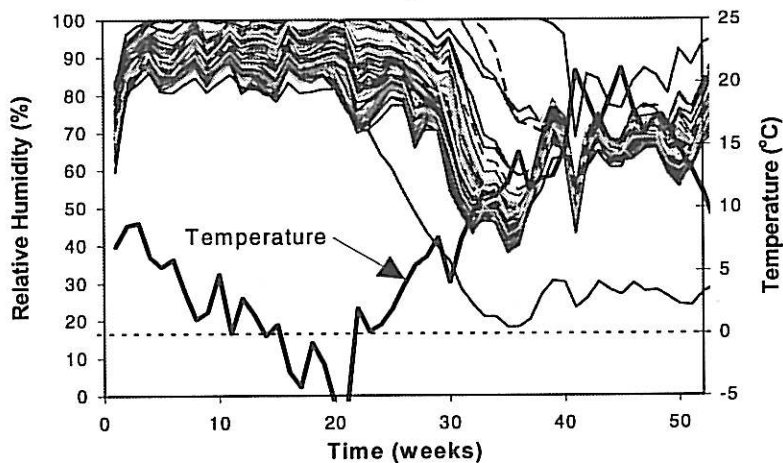


Figure 10.3 The results of the Monte-Carlo simulation (60 runs) with 1D-HAM. Weekly average RH and temperature of the inside plywood surface. For RH all 60 runs are shown, while temperature is given as the average of all runs.

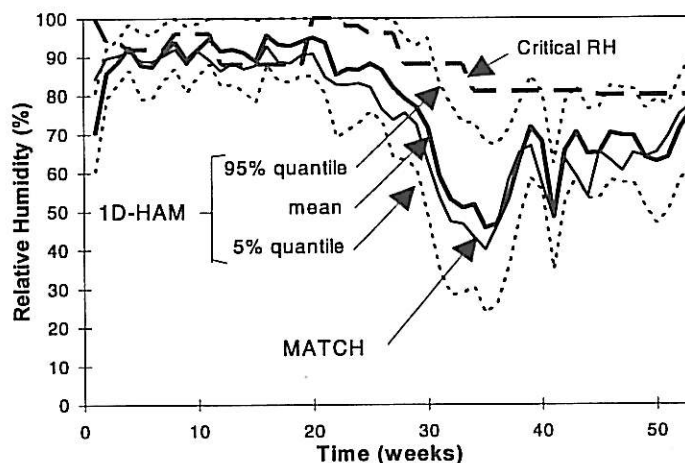


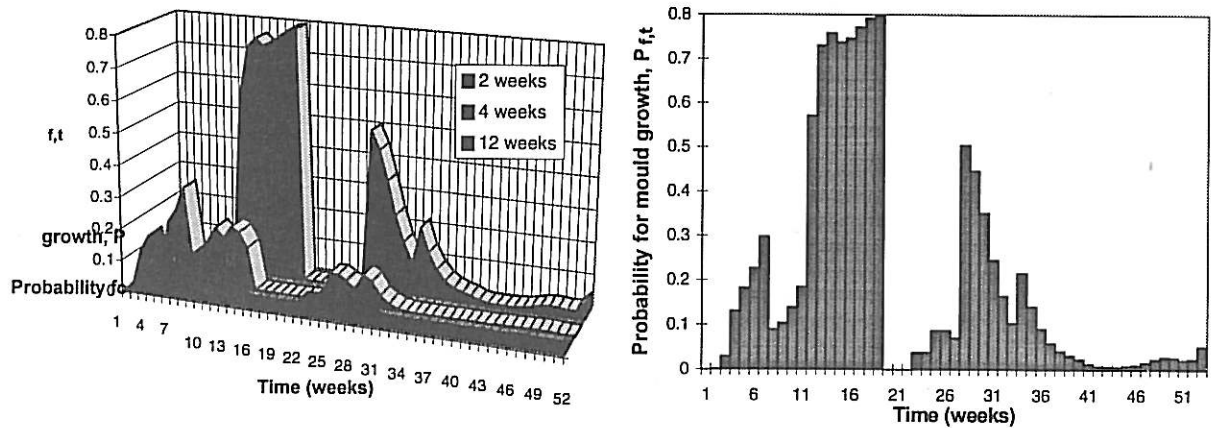
Figure 10.4 1D-HAM results (mean, 5 and 95 % quantile) and MATCH result plotted together with the minimum critical RH ( $RH_{cr}$ ) dependent of temperature and exposure time. Weekly average RH of the inside plywood surface.

### Evaluation of performance

In Figure 10.4 the minimum critical RH ( $RH_{cr}$ ) as a function of temperature and exposure time is plotted together with the calculated results of 1D-HAM and MATCH. As can be seen the critical RH is well below the mean calculated RH for a period between week 10 and 20, thereby indicating a risk for mould growth above 50%. The calculated probability for mould growth is presented in Figure 10.5 as function of time and exposure time. Figure 10.5a shows that the exposure time of 12 weeks is critical, giving a probability for mould growth of approximately 70 % prevailing for a period of 2 months.

To investigate the sensitivity of the various input parameters on the moisture conditions of the plywood layer the Spearman rank-correlation coefficient, e.g., see (Press et al., 1986), was calculated between the input parameters and the average RH of the surface of the plywood for the

period week #5-16. The calculated rank coefficients are given in Table 10.4. The input parameter influencing the most on the results was the vapour permeability of the plywood.



a. Probability for mould growth dependent of exposure time

b. Maximum probability for mould growth

Figure 10.5 Probability for mould growth on the inside plywood surface

Table 10.4 The Spearman rank-correlation coefficient  $r_s$  between input parameters and the average RH of the inside surface of the plywood for the period week #5-16.

Parameter	$r_s$	Parameter	$r_s$
Vapour permeability ( $\delta_v$ ) plywood	-0.85	Vapour permeability ( $\delta_v$ ) particle board	0.13
Moisture supply ( $\Delta v$ )	0.36	Solar absorption factor ( $\alpha$ )	0.11
Sorption curve coeff. ( $\phi_1$ ) plywood	0.31	Heat capacity (C) plywood	0.10
Thermal conductivity ( $\lambda$ ) plywood	0.28	Vapour permeability ( $\delta_v$ ) glass fiber	0.06
Thermal conductivity ( $\lambda$ ) glass fiber	-0.19	Sorption curve coeff. ( $w_1$ ) glass fiber	-0.04
Sorption curve coeff. ( $w_1$ ) plywood	0.18	Thermal conductivity ( $\lambda$ ) ventilated cladding	-0.01
Vapour resistance ( $Z_v$ ) paint	-0.16		

### Conclusions

The probability for mould growth is found to be approximately 70% for a period of eight weeks for a relatively severe outdoor climate. Since the accepted maximum value for probability for mould growth was chosen to be 10%, the considered wood frame wall construction can not be accepted. This indicate that a vapour barrier is needed for this type of construction, alternatively a more vapour open wind barrier might yield better moisture conditions.

In this section the systematic method for HAM-analysis using computer models, as described in section 10.1 and 10.2, was applied on a practical problem. The method was found to perform according to its intentions as described in section 10.1.

