

HYGRODIODE

HYGRODIODE ANVENDT SOM DAMPBREMSE TIL FLADE TAGE MED
KOLDT ELLER VARMT DÆK

HYGRODIODE VAPOUR RETARDER FOR COLD AND WARM DECK
FLAT ROOF

VAGN KORSGAARD
CARSTEN RODE PEDERSEN



MEDDELELSE NR. 217 FEBRUAR 1991
LABORATORIET FOR VARMEISOLERING
DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE

HYGRODIODEN ANVENDT SOM DAMPBREMSE TIL FLADE TAGE MED KOLDT ELLER VARMT DÆK

Vagn Korsgaard
Carsten Rode Pedersen

Laboratoriet for Varmeisolering
Danmarks Tekniske Højskole

Marts 1991

FORORD

Nærværende rapport sammenfatter resultaterne af målinger og beregninger på kolde og varme flade tage med en ny type dampbremse - Hygrodioden. Dampbremsen er udviklet, så den tillader udtørring af sådanne tagkonstruktioner samtidig med at den ved sin dampbremsende effekt forhindrer ny opfugtning. Herved forhindres nedbrydning af konstruktionerne samtidig med at tørre konstruktioner sikrer maksimale varmeisolerende egenskaber.

Projektet har været finansieret under Energiministeriets energiforskningsprogrammer EFP-85 og EFP-87. Projektet har derudover været støttet af A/S Jens Villadsens Fabriker og Tåsinge Træ A/S.

Hygrodioden og forsøgsresultater med den som dampbremse har været omtalt i flere inden- og udenlandske artikler og papers. Disse, der er medtaget i litteraturlisten, supplerer de i rapporten præsenterede resultater.

INDHOLDSFORTEGNELSE

FORORD	i
INDHOLDSFORTEGNELSE	ii
RESUMÉ	iii
SUMMARY	iv
1. INDLEDNING	1
1.1 Formål	1
1.2 Baggrund	1
2. HYGRODIODEN	3
3. FUGTTRANSPORTPARAMETRE FOR HYGRODIODEN	5
3.1 Måling af tør vanddampmodstand	5
3.1.1 Aluminiumsbakker som kopper	5
3.1.2 Store kopper af aluminiumsplade	5
3.2 Måling af udtørringsevne	6
3.2.1 Udtørring ved vægevirkning	7
3.2.2 Hygrodiodens dræningskapacitet	7
3.3 Måling af luftgennemgangstal	8
4. MÅLINGER I FORSØGSHUS	10
4.1 Beskrivelse af forsøgshus	10
4.2 Forsøgsresultater	15
4.2.1 Temperaturmålinger	15
4.2.2 Fugtmålinger	18
4.2.3 EDB-simuleringer af fugtforløbene	23
5. MÅLINGER PÅ VIRKELIGE TAGE	24
5.1 Bygning 116, Danmarks Tekniske Højskole	24
5.1.1 Problemstilling	24
5.1.2 Forsøgsresultater	26
5.2 Andre Byggerier	29
6. KONKLUSION	31
LITTERATUR	33

RESUMÉ

Der er i projektet foretaget forsøg med en ny type dampbremse, Hygrodiodemembranen, der med fordel kan anvendes i stedet for en sædvanlig polyethylenfolie i de fleste konstruktioner af flade tage. Hygrodioden er udformet, så den uden synderlig modstand lader vand på væskeform passere igennem, mens den stadig har en ganske god dampbremsende effekt - Z -værdien er $75-100 \text{ GPa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s/kg}$ (150-200 PAM). Herved opnås, at sommerkondens, der optræder mellem dampbremsen og isoleringen, kan blive ledt ud af konstruktionen. Der kan således udtørres op til 120 g/m^2 pr. dag. I vintersæsonen er der tørt på det sted i konstruktionen, hvor Hygrodioden ligger, og derfor ydes en væsentlig modstand mod optrængen af fugt fra indeluften.

Med en Hygrodiode som dampbremse er eventuel fugt i et taghulrum ikke længere indespærret mellem to tætte membraner, tagdækningen og dampbremsen, som i traditionelt opbyggede flade tage, og det er derfor ikke nødvendigt at ventilere taghulrummet gennem udluftningsåbninger og taghætter. Herved er muligheden for konvektiv opstrømning af fugtig luft til taghulrummet udelukket.

I rapporten beskrives målinger af Hygrodiodens basale egenskaber: Dampdiffusionsmodstand, udtørringsevne og luftgennemtrængelighed.

Endvidere beskrives, hvordan Hygrodioden dels har været anvendt på Danmarks Tekniske Højskole som dampbremse i små tagfelter i et forsøgshus over såvel et fugtigt rum som over et rum, med typisk boligklima. Dels har den været anvendt i forbindelse med en renovering af et af højskolens flade tage over en auditoriebygning. Forsøgene dækkede såvel uventilerede, kolde som varme tage med typiske kombinationer af byggematerialer. I alle tilfælde blev det vist, at vand, der var tilført for at illudere byggefugt, kunne tørres ud gennem Hygrodiodemembranen, og at kritisk genopfugtning om vinteren forhindredes af membranens dampbremsende egenskaber.

SUMMARY

The project deals with experimental investigation of a new kind of vapour retarder, the Hygrodiode membrane, which may be used instead of a polyethylene vapour retarder in most flat roof constructions. The Hygrodiode is designed so as to let liquid water pass through easily while it still retains a good vapour retarding effect - the vapour resistance is $75-100 \text{ GPa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s/kg}$ ($150-200 \text{ SI-PAM}$). This way it is achieved that condensate formed between the insulation and the vapour retarder under summer conditions will be led out of the construction. Up to 120 g/m^2 per day may be dried out this way. As the Hygrodiode is located below the insulation it will be dry during the heating season and it will therefore provide a substantial resistance against the migration by diffusion of moisture into the roof.

With a Hygrodiode as vapour retarder excessive moisture in the cavity of a roof will no longer be trapped between two impermeable layers as is the case in a conventional flat roof - the roof membrane and the vapour retarder. It is therefore not necessary to ventilate the roof cavity through vents in the eaves and in the roof surface. This also means that moisture migration by convection of moist indoor air into the roof system is practically eliminated.

The report describes measurements of the basic properties of the Hygrodiode: Water vapour resistance, drying capacity and air permeance.

Further, the Hygrodiode has been tested at the Technical University of Denmark used as vapour retarder in small roof sections of a test hut over a humid room as well as over a room which was maintained at typical dwelling conditions for the indoor climate. It was also tested when used as vapour retarder in the renovation of a flat roof over one of the buildings of the university. These tests of the Hygrodiode included cold as well as warm deck roof constructions with different typical combinations of construction materials. In all of the tests it was shown that water that was added deliberately when the roofs were assembled, as if it were construction moisture, was able to dry out through the Hygrodiode membrane, and that the vapour resistance of the membrane prevented critical re-moistening of the materials during the winter.

1. INDLEDNING

1.1 Formål

Projektets formål har været at afprøve Hygrodiodemembranens egenskaber og virkemåde i flade tagkonstruktioner af den kolde og den varme type. Dette belyses dels ved laboratorieforsøg, der giver membranens basale transportparametre som resultat. Dels prøves Hygrodioden i tagelementer over et forsøgshus i det fri, hvor elementernes overfladetemperaturer og fugtindhold kan følges nøje. Endelig er fugtforløbene fulgt under anvendelsen af Hygrodioden som dampbremse ved renovering af taget over en eksisterende bygning.

1.2 Baggrund

Erfaringer har vist, at der i mange flade tage er sket kraftige ophobninger af fugt, således at isoleringsevnen er væsentligt forringet, og at indgående konstruktionsdele er udsatte for en betydelig nedbrydningsfare. Råd eller svampedannelse i træ og korrosion af dele af stål (dæk og mekaniske befæstigelses) forudsætter tilstedeværelse af fugt for at kunne forløbe. Fugten kan være tilstede fra byggeriets færdiggørelse som byggefugt, eller kan komme ind i taget ved diffusion og konvektion fra indeluften. Endeligt kan regnvand trænge ind, hvis tagdækningen ikke er tæt. Betingelserne for at sådan fugt kan komme ud af taget har hidtil ikke været gode, da fugten i reglen har været indespærret mellem to tætte membraner, nemlig tagdækningen og dampbremsen.

Indtil for få år siden var det en udbredt opfattelse blandt byggeteknikere, at fugtophobning i kolde tage kunne undgås ved at anbringe en dampbremse af plastfolie eller lignende under isoleringslaget og udlufte hulrummet over isoleringen til det fri. Erfaringen har imidlertid vist, at det ikke i praksis er muligt at udføre dampbremsen tilstrækkelig lufttæt. Når dette ikke er muligt, forværrer udluftningsåbninger og taghætter forholdene, idet de forøger opstrømningen af fugtig luft i tagkonstruktionen på grund af skorstensvirkningen og det vindfremkaldte undertryk på tagets overside. En stor del af fugten i denne luft vil kondensere, når den når den kolde side af isoleringen.

På trods af at metoden med at ventilere taghulrummet er angivet i bygningsreglementet, BR 82, som en anvendelig forholdsregel mod skadelig fugtophobning i tage, der delvist består af træ, har mange eksempler fra praksis vist at det ovennævnte skadesbillede med opstrømning af fugtig rumluft let kan finde sted. Dette har eksempelvis været tilfældet med tagene fra gårdhusbebyggelsen i Albertslund (Korsgaard et al., 1984).

Opstrømning af rumluft vil kunne undgås ved ikke at etablere udluftningsåbninger ved tagudhænget eller hætter i tagfladen, idet man ved at have en helt lufttæt tagbelægning undgår lufttryksforskelle over dampbremsen. Når Bygningsreglementet trods denne kendsgerning anbefaler ventilationsåbninger i taget, skyldes det

frygten for at have fugt indelukket mellem to næsten damptætte lag, idet eventuel byggefugt eller fugt fra utætheder i paplaget vanskeligt kan tørre ud og derfor vil virke nedbrydende på tagkonstruktionen.

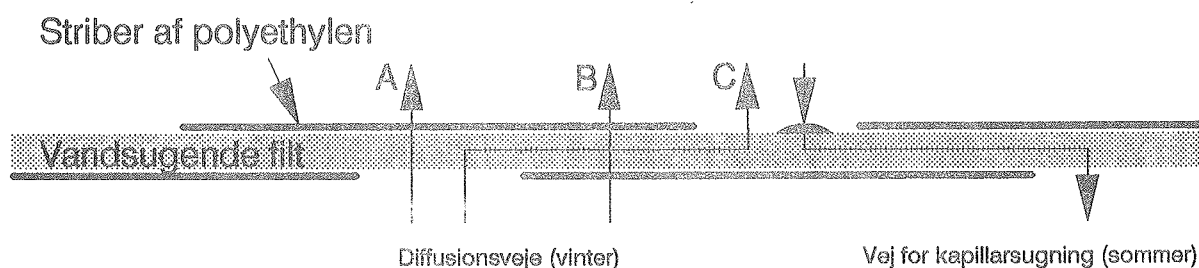
Ideen i Hygrodiodemembranen, der skal erstatte den sædvanlige dampbremse, er, at den skal udføres rimeligt luft- og diffusions-tæt, men muliggøre, at frit vand kan transporteres igennem membranen. Membranens funktion er således, at den fugt, som i løbet af en vinter trænger op i tagkonstruktionen og af solen i sommermånederne drives ned og kondenserer som frit vand på den relativt kolde membrans overside, transporteres igennem til undersiden, hvorfra den kan fordampe ned i det underliggende rum. Herved bliver det muligt at undlade udluftningsåbninger og taghætter, således at selve tagfladens lufttæthed udnyttes.

Varme tage har i reglen ikke så store problemer som de kolde med opstrømning af luft indefra. Dels udføres disse tage ikke med egentlige ventilationshætter, da der ikke er træ tilstede i taghulrummet, dels vil det varme dæk, hvis det udføres af beton eller letbeton med tætte fuger, i sig selv forhindre luftopstrømning over størstedelen af arealet. En vis konvektiv fugtopstrømning kan dog stadig opstå på grund af utætte samlinger, hvor ovenlys og installationer gennembryder dækket, da tagmembranen i reglen er forsynet med mindre trykudligningshætter. Også i disse tage kan Hygrodioden anvendes som dampbremse udlagt på den varme side af isoleringen. Dels vil den begrænse den diffusive opstrømning af fugt nedefra, dels vil den opstrømmede fugt kunne udtørres nedadtil, hvor den i første omgang afgives til dækket.

2. HYGRODIODEN

Den basale idé i Hygrodiodemembranen er, at den skal yde en høj modstand mod transport af vanddamp samtidig med at kondenseret fugt let skal kunne transporteres igennem.

Membranen består af et tyndt lag af vandsugende filt (80 g/m^2), hvorpå der på begge sider ligger striber af polyethylenfolie (40 g/m^2). Disse striber er placeret forskudt i forhold til hinanden, således at de overlapper hinanden på et stykke. Filtet er således eksponeret på begge sider af membranen mellem plaststriberne, men de eksponerede områder ligger aldrig lige over hinanden. Figur 1 viser et tværsnit af Hygrodiodemembranen, hvor tykkelsen er meget overdrevet.



Figur 1 Tværsnit af hygrodiodemembranen. De vigtigste transportveje er indtegnet for henholdsvis dampdiffusion og kapillær transport.

Diffusion af vanddamp gennem membranen kan overvejende ske på tre måder som vist på figuren. Vanddampen kan passere igennem membranen ved diffusion gennem filtet og et lag plaststribes (A) eller gennem filtet og to lag plast (B). Endvidere kan dampen gennemtrænge membranen ved en tværgående transport i den tynde kanal af filt (C) uden at skulle igennem nogen af plaststriberne. Sekundære transportveje (ikke indtegnet) går på langs gennem en del af filtet og gennembryder en af plastfolierne i det område, hvor der er overlap. Den resulterende diffusionsmodstand af membranen viser sig at være af samme størrelse som en tynd ($0,05 \text{ mm}$), ideel polyethylenfolie.

Når der optræder kondens på membranen, vil den del, der kondenserer på den ubeskyttede filt, hurtigt blive opsuget af membranen. Kondensatet fordeler sig i hele filtet og dermed også i det område, der er eksponeret nedadtil. Der vil herefter ske en fordampning fra undersiden, eller fugten vil blive midlertidigt absorberet i det underliggende materiale og langsomt blive frigivet til det underliggende rum. En væsentlig del af den fugt, der kondenserer på membranens overside vil i første omgang samles på plaststriberne. Herfra må kondensatet enten transporteres sideværts i isoleringens nederste fibre eller i spalten mellem isolering og membran, eller det må igennem en cyklus med genfordampning og transport op i de overliggende materialer. Ved næste

dags kondensation på Hygrodiodemembranen vil atter en del af kondensatet kunne nå den ubeskyttede filt.

Ved at justere på filttykkelsen, bredden af plaststribernes overlap, bredden af det område, hvor filten er ubeskyttet, samt ved at ændre på plaststribernes diffusionsmodstand kan man opnå en ønsket diffusionsmodstand af Hygrodiodemembranen. Korsgaard (1987) viser resultatet af en teoretisk udregning af hvilke diffusionsmodstande, der kan opnås ved forskellige sådanne variationer.

Membranen er ikke en diode i den forstand, at den er opbygget uens på de to sider, og derved ikke lader transporten den ene vej foregå på samme vis som transporten den anden vej. Når Hygrodioden indbygges, er det ligegyldigt hvad vej, den vendes. Diodevirkningen fremkommer ved membranens funktion, når den indbygges på den varme side af isoleringen. Den opadrettede transport, der foregår, når tagoverfladen er koldere end rumluftens dugpunkt - det vil sige om vinteren og på kolde sommernætter - vil ske ved langsom diffusion, da membranen er tør under disse betingelser. Transporten er nedadrettet på gode sommerdage, hvor fugten i taghulrummet vil kondensere på membranen, og hvor der derfor er mulighed for en hurtig, udtørrende transport ved kapillarledning.

Selvom membranen skal være våd for at have sin gunstige udtørrende effekt i en tagkonstruktion, er det altså en situation, der kun optræder forholdsvis få timer om året - og kun indtil taget er udtørret. I almindelighed skulle der altså ikke på Hygrodiodens overside være betingelser tilstede for de nedbrydende mekanismer, der følger af forhøjede fugtindhold. Visse skadesbilleder kan være karakteriseret af konstant høje fugtindhold i taget - eksempelvis hvis der er hul i tagmembranen. Dette vil signaleres ved at der efterhånden optræder fugtskjolder på loftsbeklædningen nedenfor det skadede område. Den situation må være at foretrække, fremfor at vandet bliver opsamlet over en længere årrække på en plastdampbremse med nedbrydning af isoleringen og isoleringsevnen til følge. Sådant fugt viser sig gerne ved at det drypper fra loftet, men da kan skaden have stået på længe, og dryppene kan forekomme et helt andet sted end der, hvor utætheden er.

Hygrodioden er, mens dette projekt har forløbet, blevet kommercielt tilgængelig, idet den markedsføres af A/S Jens Villadsens Fabriker. I denne version af Hygrodioden er plaststriberne af polyethylen ca. 18 cm brede og ligger med et overlap på ca. 6 cm. Derved bliver de ubelagte striber af filten også ca. 6 cm brede. Filten, der består af polypropylen og rådbehandlede cellulosefibre har en tykkelse på ca. 0,3 mm. Det er denne og en tidligere version, hvor filten udelukkende bestod af polypropylen, der har indgået i de forsøg, der beskrives i de følgende afsnit.

3. FUGTTTRANSPORTPARAMETRE FOR HYGRODIODEN

I dette afsnit beskrives resultatet af laboratorieforsøg, der har haft til formål at finde Hygrodiodes basale transportparametre. Disse udgøres af en vanddampmodstand, henholdsvis når membranen er tør og våd, samt af en udtørringsevne og et luftgennemgangstal.

3.1 Måling af tør vanddampmodstand

Materialers vanddampmodstand bestemmes i reglen ved kopforsøg. En "kop" er en lille flad beholder, hvori der hældes et tørremiddel, en mættet saltopløsning eller vand. Materialet lægges på koppen som låg med en god forsegling, og det hele sættes i et klimakammer eller i et rum med en konstant temperatur og relativ fugtighed. Når der bruges et tørremiddel optager koppen fugt ved diffusion gennem materialet, mens den vil afgive fugt, hvis der var benyttet rent vand. Forskellige saltopløsninger er i ligevægt med forskellige relative fugtigheder, således at transporten af vanddamp enten vil være rettet ud eller ind gennem materialet. Ved jævnlige veje koppen og sammenholde vægtændringerne pr. tid og prøveareal med damptryksforskellen, kan materialets vanddampmodstand bestemmes.

I reglen er sådanne kopper ikke meget større end ca. 10 cm i diameter. Det vil ikke være muligt med sådanne kopper at bestemme en korrekt dampmodstand af Hygrodiodes, da den ikke er et homogent materiale. Man vil således ikke kunne få målt betydningen af den sideværts transport i filtlaget på rigtig vis. Til disse forsøg er der derfor dels anvendt bakker af aluminiumsfolie, der måler ca. 25x31 cm, dels store kopper af aluminiumsplade med målene 50x100 cm. Med foliekopperne er det muligt at tilpasse et prøvestykke af Hygrodiodes således, at der bliver en ubelagt filtstribe på den ene side af prøven og to på den anden.

3.1.1 Aluminiumsbakker som kopper

Seks prøvestykker af Hygrodiodes blev udklippet på forskellig måde og tilpasset til "kopperne". Som tørremiddel blev der anvendt silicagel, og kopperne var anbragt i et klimakammer ved 21°C og 90% RF. Vægtændringerne blev målt over 25 døgn. På denne tid optog kopperne 3-4 gram fugt, der blev registreret på en vægt med en nøjagtighed på 0,01 gram. Den fundne dampmodstand eller Z-værdi var i gennemsnit 82 $\text{GPa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s/kg}$, svarende til 171 PAM ($\text{mmHg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h/g}$). Den højeste og den laveste værdi var på henholdsvis 66 og 99 $\text{GPa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s/kg}$.

3.1.2 Store kopper af aluminiumsplade

Disse "kopper" blev anvendt i et kælderlokale, der holdt en rimelig konstant temperatur og relativ fugtighed. Som tørremiddel blev der benyttet silicagel. Over 505 timer (i april/maj 1989) var den gennemsnitlige temperatur i kælderlokalet 20°C og

den relative fugtighed var 32%. Der blev testet to bakker, der i perioden optog henholdsvis 11,7 og 14,4 gram fugt. Regnes med en relativ fugtighed over tørremidlet på 5% fås dampmodstande af Hygrodiioderne på henholdsvis 49 og 40 $\text{GPa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}/\text{kg}$ (102 og 83 PAM).

Disse tal ligger væsentligt under værdierne opnået med de mindre bakker. Forsøget blev derfor gentaget to efterfølgende gange. Første gang blev der af tre forskellige prøvestykker fundet dampmodstande på 75, 77 og 89 $\text{GPa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}/\text{kg}$ - altså noget højere end det tidligere fundne. Dette forsøg foregik i samme kælderlokale i juli 1989. I den anden gentagelse af forsøget (i oktober/-november 1990) blev to kopper sat op i et rum, der konstant var befugt til 60% RF. Der blev nu fundet dampmodstande på 41 og 51 $\text{GPa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}/\text{kg}$ - som i det første forsøg.

Sideløbende med den sidste gentagelse af forsøget blev der i samme rum opstillet to prøver af Hygrodiioden, der var foldet som konvolutter med målet 1x1 m og tapet rundt langs kanterne. Konvolutternes sider var holdt fra hinanden indefra med et par kryds af aluminium. Der blev hældt silicagel i bunden af konvolutterne og de blev sat på højkant på gulvet som en slags alternative "kopper". Herved opnåedes dampmodstande på henholdsvis 95 og 122 $\text{GPa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}/\text{kg}$ - det vil sige mindst lige så godt som med kopforsøgene i de mindre kopper.

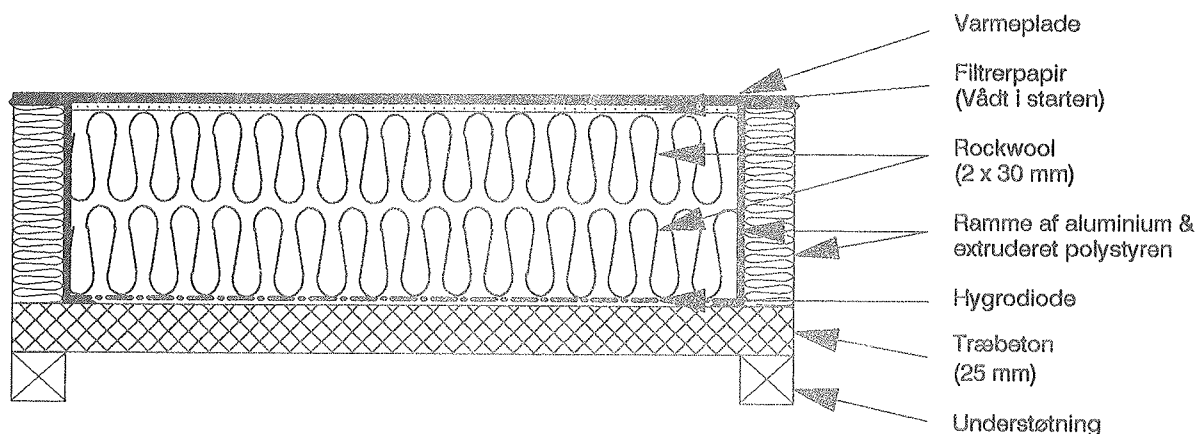
Det har således ikke været muligt nøjagtigt at fastslå Hygrodiiodens tørre dampmodstand. Værdien vil formodentligt ligge op mod 100 $\text{GPa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}/\text{kg}$, da der principielt altid vil blive målt for lave værdier, hvis der er fejl ved randforseglingen - hvad der formodentligt har været i nogle af de beskrevne forsøg. Uanset hvor i intervallet modstanden ligger, er den imidlertid tilstrækkelig stor til at forhindre en kritisk opfugtning af en konstruktion over vintersæsonen. Kombineret med membranens evne til om sommeren at udtørre eventuelt overskydende fugt må det konkluderes, at Hygrodiiodens dampbremsende evne er tilstrækkelig. Der forestår imidlertid endnu et arbejde med at forklare de opnåede divergenser i diffusionsforsøgene.

Endeligt skal det nævnes, at Statsprøveanstalten i en prøvning efter ASTM metode C96 mellem 0 og 50% RF har bestemt Hygrodiiodens diffusionsmodstand til 110 $\text{GPa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}/\text{kg}$ (Statens Byggeforskningsinstitut, 1990).

3.2 Måling af udtørringsevne

Til at måle Hygrodiiodens udtørringsevne blev der fremstillet nogle små rammer, hvori man i laboratoriet kunne simulere forholdene i et fladt tag under sommerbetingelser, hvor der optræder kondens på membranen.

Forsøgsrammernes opbygning fremgår af figur 2. En aluminiumsramme, der udvendigt er isoleret med ekstruderet polystyren udgør de damptætte sider i det simulerede tag. Rammens indvendige mål er 32x59 cm. Hygrodiioden er monteret til den nederste ombukning af aluminiumspladen. Herpå blev der lagt 60 mm Rockwool og et



Figur 2 Tværsnit af testramme til måling af Hygrodiodes udtørningspotentialer.

lag filtrepapir. Filtrepapiret startede med at være vådt for at simulere en tilstand med kondensfugt under tagmembranen. Som afslutning var der henover rammen og filtrepapiret monteret en aluminiumsplade med en varmemefolie. Hele dette system var en selvstændig enhed, der blev sat løst ovenpå en 25 mm plade af træbeton, der illuderede loftsbeklædning. Derved var det muligt at veje denne enhed og bestemme ændringerne i fugtindhold.

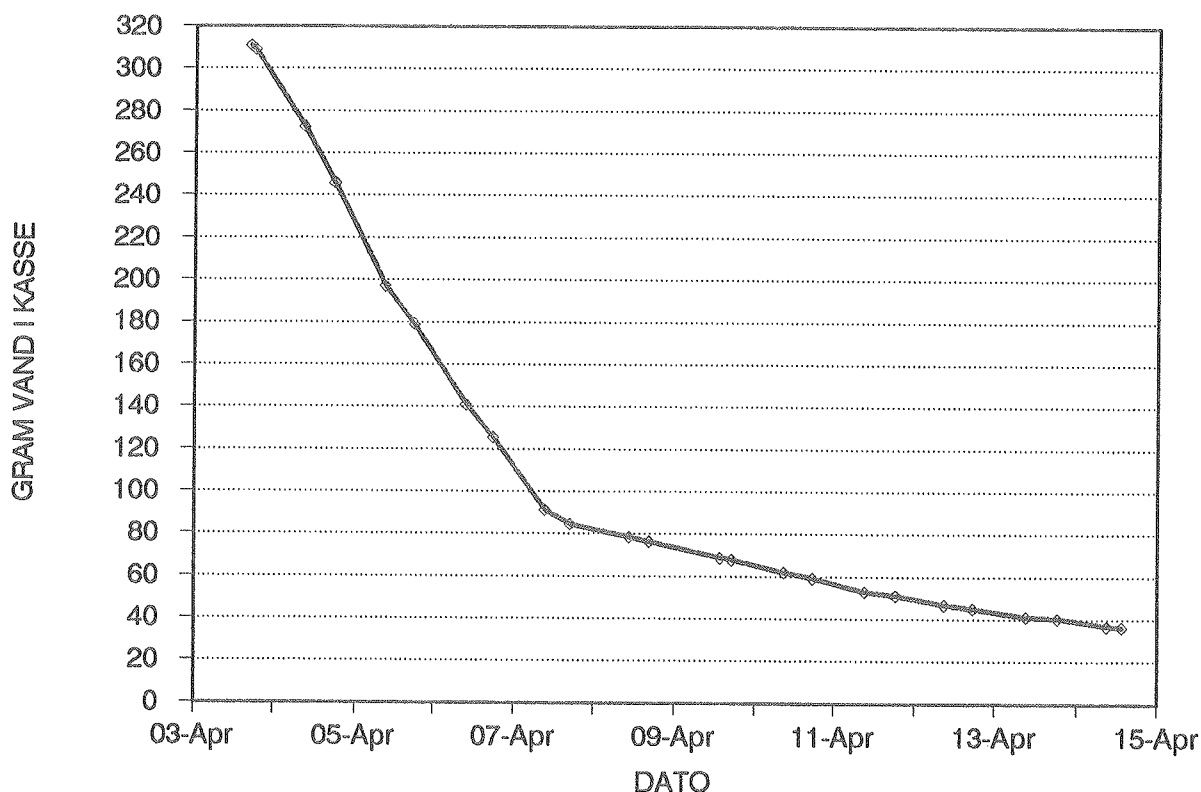
3.2.1 Udtørring ved vægevirkning

Der blev tilsat omtrent 300 gram vand til filtrepapiret, svarende til $1,6 \text{ kg/m}^2$, og tilført effekt til varmepladen, så den havde en konstant temperatur på 50°C . Den tilsatte fugtmængde fordampede fra filtrepapiret, migrerede gennem isoleringen og kondenserede på Hygrodioden. Udtørringen foregik derefter over ca. en halvanden uges tid som vist på figur 3. De første tre-fire dage er der en betydelig mængde kondens på membranen, og udtørringsraten er her bestemt til $13,3 \text{ g/m}^2\text{h}$. Det vil således kræve 75 timer med konstant nedadrettede gradienter at udtørre 1 kg fugt pr. kvadratmeter tag. Dette svarer til omtrent 10 sommerdage med godt solindfald.

Ved at sammenholde den fundne udtørringsrate med de drivende potentialers størrelse findes en effektiv "diffusionsmodstand" af Hygrodioden på ca. $2 \text{ GPa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s/kg}$ (4 PAM), når den er våd. Der er altså en betydelig forskel i Hygrodiodes fugtbremsende effekt fra dens våde til dens tørre tilstand.

3.2.2 Hygrodiodes dræningskapacitet

De samme rammer blev benyttet uden isoleringsmateriale, filtrepapir og varmeplade og uden at være understøttet af træbetonen til at undersøge Hygrodiodes dræningskapacitet. Der blev hældt vand i rammen, så Hygrodioden var helt dækket med op til 10 mm vand. Et kar blev sat op under opstillingen til at opsamle den



Figur 3 Udtørningsforløbet med konstant høj "tagtemperatur" i forsøgsrammen.

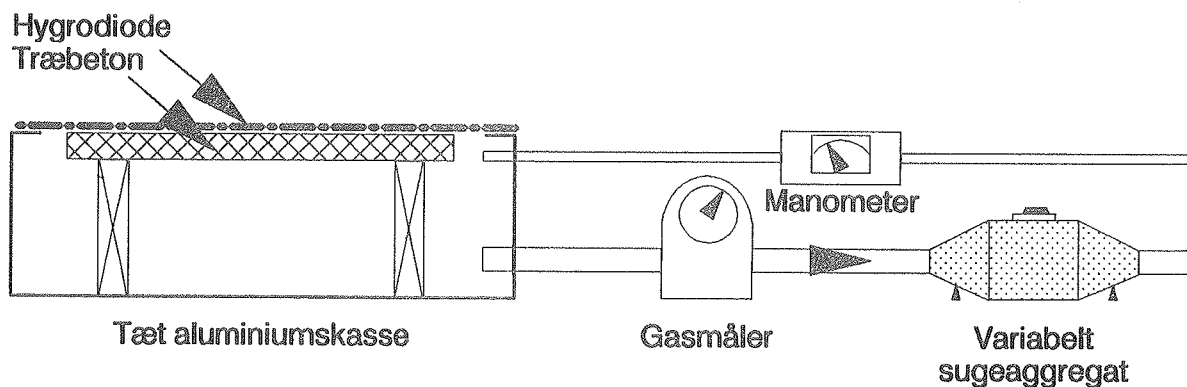
mængde væske, der dryppede igennem. Karret stod på en vægt, der blev aflæst jævnligt. Efter nogle minutter begyndte vandet at løbe igennem membranen og efter en halv time var dræningsraten konstant på $1200 \text{ g/m}^2\text{h}$. Selv et beskedent vandtryk giver altså en betydeligt større strøm af fugt gennem membranen end der kan opnås ved vægevirkningen alene.

Vandgennemgangen uden hydrostatisk tryk er målt ved kun at hælde så meget vand i rammen, at Hygrodioden blev gennemvåd. Rammen blev afdækket med plastfolie og anbragt på en tør plade af træbeton. Med jævne mellemrum blev rammen løftet af og vejet. Hygrodiogens udtørringsevne ved kapillær sugning (vægevirkning) blev således bestemt til cirka $40 \text{ g/m}^2\text{h}$.

3.3 Måling af luftgennemgangstal

En opstilling som vist i figur 4 blev benyttet til at finde luftgennemgangstallet for Hygrodioden. Hygrodioden var monteret som et tætsluttende låg på $60 \times 60 \text{ cm}$ på en i øvrigt tæt aluminiumskasse. For undgå nedbøjning var den understøttet over det meste af arealet af en plade af træbeton (der er et meget mere permeabelt materiale end Hygrodioden). Et variabelt sugeaggregat var tilsluttet via en gasmåler og parallelt hermed målte et manometer trykforskellen mellem kassens indre og det omgivende laboratorium. Der blev målt lineære sammenhænge mellem undertryk i kassen og luftstrømsrate gennem membranen, når sugeaggregatet blev justeret til at give undertryk på 10, 15, 20 og 25 mmVS.

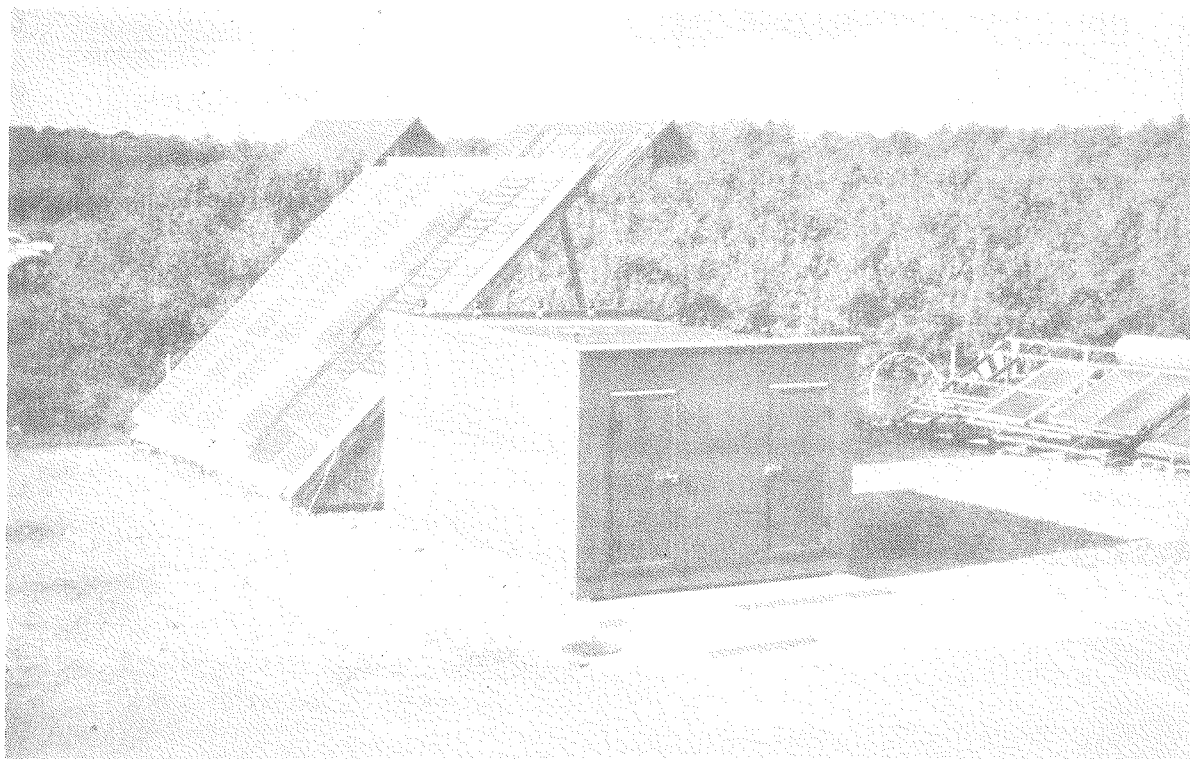
Der blev udført forsøg på i alt syv forskellige prøvestykker. Den gennemsnitlige permeans var $89 \text{ l}/(\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mmVS})$ med minimums- og maksimumsværdier på henholdsvis 74 og $100 \text{ l}/(\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mmVS})$. Ved division med luftens dynamiske viskositet ved 20°C og omregning til SI-enheder fås en specifik permeans på $4,5 \cdot 10^{-11} \text{ m}$.



Figur 4 Opstilling til bestemmelse af luftgennemtrængelighed af Hygrodiodemembranen.

4. MÅLINGER I FORSØGSHUS

For at teste Hygrodiødens virkemåde under mere realistiske forhold end i laboratoriet, blev der opført et forsøgshus på et udendørs forsøgsområde ved Danmarks Tekniske Højskole. Huset ses på fotografiet, figur 5. Dette afsnit vil dels beskrive husets opbygning og dets instrumentering samt vise resultater fra forsøgene.



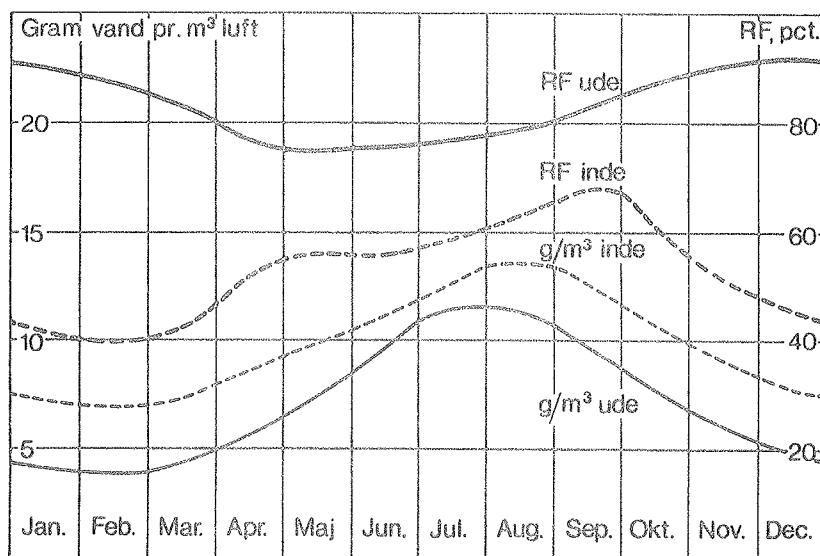
Figur 5 Udendørs forsøgshus til undersøgelse af Hygrodiødens funktion i en konstruktion, der udsættes for det danske klima.

4.1 Beskrivelse af forsøgshus

Forsøgshuset måler ca. 5 x 3,5 m og har en indvendig loftshøjde på ca. 2,1 m. Bygningen har den største udvendige dimension langs den øst-vestlige akse og er opdelt på langs i to separate rum. I det sydlige rum holdes en temperatur på mindst 20°C og rumluften befugtes til et fugtindhold, der nogenlunde svarer til almindeligt boligklima. I det nordlige rum holdes der ligeledes mindst 20°C, men her fastholdes den relative fugtighed på 60% året igennem. Dette svarer til rumklimaklasse 3 (dampkoncentration $> 10 \text{ g/m}^3$), og er altså ganske fugtigt. Om sommeren vil fugtigheden være omtrent den samme i de to rum.

Begge rum er forsynede med en termostatstyret el-radiator, der holder temperaturen mindst på de ønskede 20°C. Om sommeren kommer der imidlertid et vist varmetilskud til bygningen, når solen skinner på de udvendige flader. Dette forstærkes af, at måleudstyret med tilhørende PC er opsat i det sydlige rum, der derfor i perioder bliver op til cirka 30° varmt. Der er ikke etableret køling i nogen af rummene.

Befugtningen varetages af en forstøvningsbefugter i hvert rum. Disse styres af hygrostater. Der er således også her tale om en envejsregulering, da det ikke er muligt at fjerne fugt fra nogen af rummene. Fugtniveauet i rummet, hvor der simuleres boligklima, reguleres hver måned så den relative fugtighed er i overensstemmelse med månedsmiddelværdien af kurven figur 6, der er fra SBI-anvisning 139, 1984. Dette svarer over det meste af året til et fugttilskud til indeluften på cirka 3 g/m³ i forhold til udeluften. Der er ikke kompenseret for, at den virkelige indendørs temperatur om sommeren kan være nogle grader højere end forudsat i SBI-anvisningen. Diffusion af fugt gennem den gipsbeklædte træskeletvæg, der adskiller rummene, bevirker i praksis, at der ikke befugtes i rummet med boligklima i vintermånederne, mens der omvendt kun befugtes med beskudte mængder i rummet med fastholdt RF i sommermånederne.

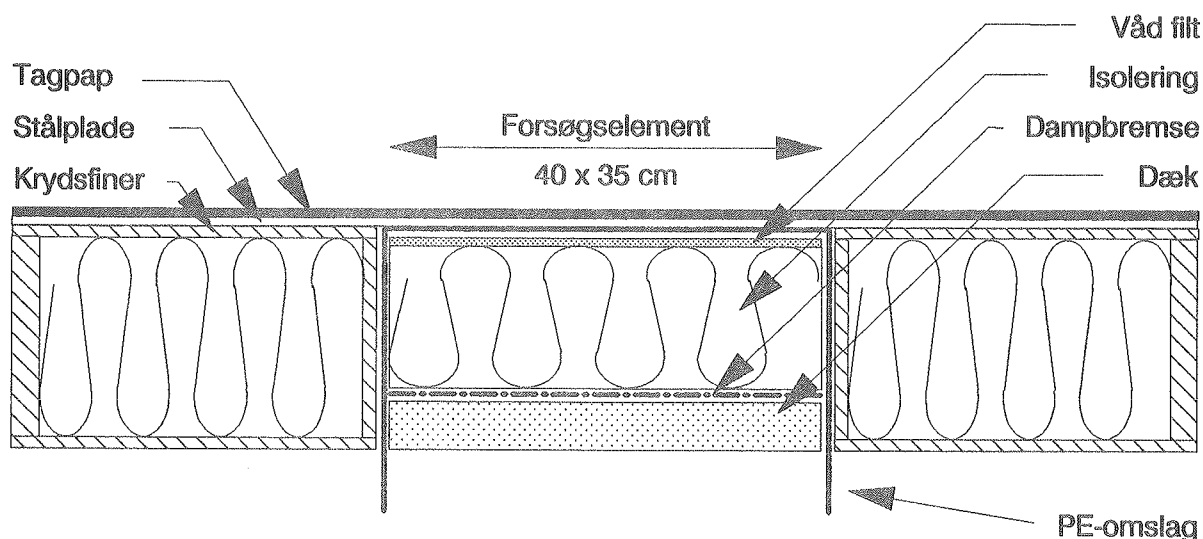


Figur 6 Typiske variationer af inden- og udendørs relative og absolutte fugtkoncentrationer ved normalt boligklima. Det er forudsat, at fugttilførslen indendørs medfører et vanddampindhold, som er 3 g/m³ højere inde end ude, dog ikke i sommermånederne, hvor der forudsættes en højere udluftning af boligen. Indetemperaturen er regnet til 23°C i juli og august, 22°C i juni og september og 20°C resten af året. Fra SBI-anvisning 139, 1984.

Der er opsat termohygrografer i begge rum til måling af den relative fugtighed og temperatur i cirka 1 meters højde. Tem-

peraturen under loftet måles endvidere på det dataopsamlingsudstyr, der omtales nedenfor.

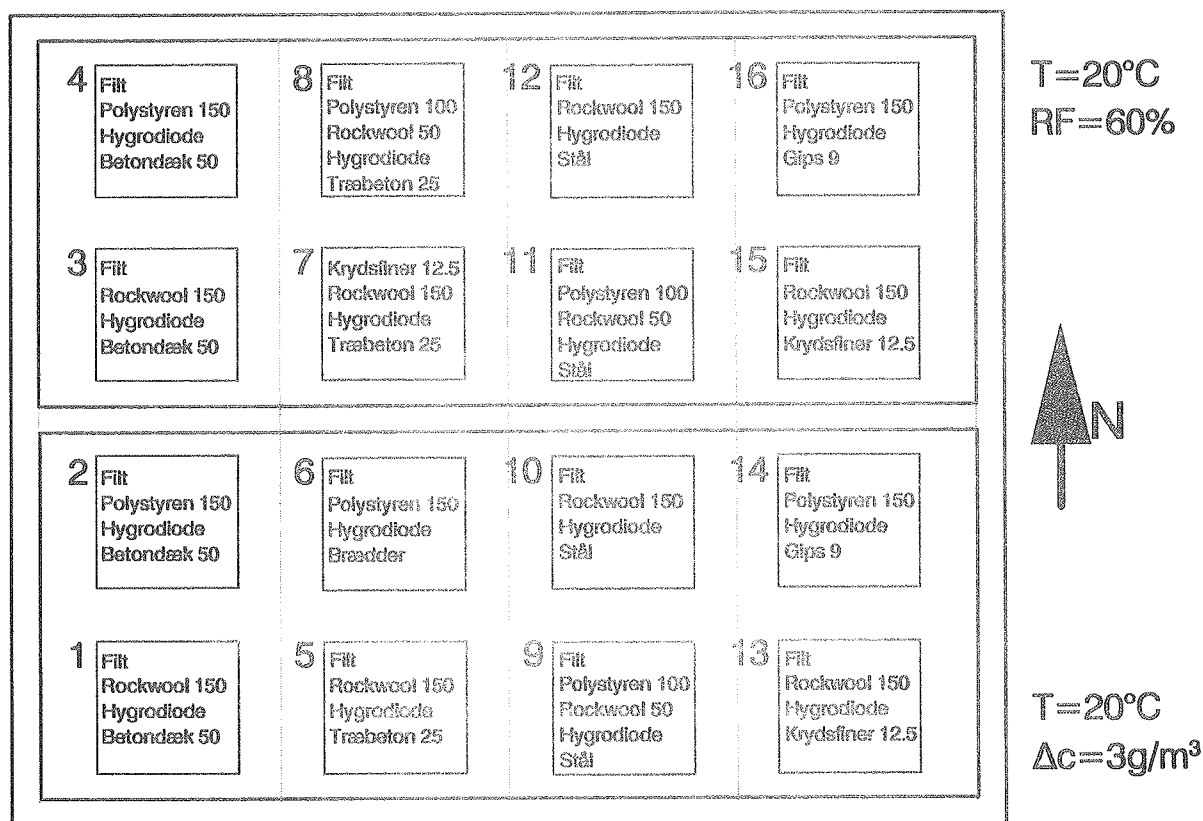
Loftet over bygningen består af fire fag af tagkassetter, der ligger i den nord-sydgående retning på tværs af bygningen. Taget har en hældning på 1:40 mod nord. I hver af kassetterne, der er fugt- og varmeisolerede på sædvanlig vis, er der udsparet fire huller på 35 x 40 cm. To af disse huller sidder over rummet med boligklima, mens de to andre sidder over rummet med konstant relativ fugtighed. I disse huller monteres de egentlige forsøgselementer med de forskellige materialer og dampbremsere. Et tværsnit af en tagkassette ses af figur 7. Over tagkassetts krydsfinersdæk ligger en stålplade, der optager lasten over udsparingerne til forsøgselementerne. Som afslutning er der anvendt skiferbestrøet tagpap.



Figur 7 Tværsnit gennem tagkassetten på et sted, hvor der er udsparet et hul til et forsøgselement.

Hvert forsøgselement er indbygget i en pose af 0,15 mm polyethylenfolie, der passer i udsparingen i tagkassetten. Herved opnås, at forsøgselementet er fugtmæssigt adskilt fra resten af tagkassetten, mens de termiske forhold stadig er nogenlunde endimensionale, da tagkassetten er isoleret omtrent som forsøgselementet. Posen er åben forneden, således at materialerne, der fyldes i forsøgselementet er eksponerede for klimaet i det underliggende rum. Der, hvor dampbremsen indlægges i posen, tapes den omhyggeligt til posens indvendige sider, så fugten forhindres i at diffundere udenom.

Formålet med at opbygge forsøgselementet i en plastpose er, at elementet let kan trækkes ud af tagkassetten, således at ændringer i fugtindholdet kan bestemmes ved vejning.



Figur 8 Fordeling af materialer i de enkelte forsøgselementer samt deres placering over de to rum. Tallene angiver materialetykkelse i mm. Filten var et ca. 1 mm tykt lag Fibertex, polystyrenen var expanderet, betonen var af en grov kvalitet (flisebeton), og endelig bestod ståldækket af korrugerede, perforerede plader. Målte middeldensiteter for Rockwool: 83 kg/m^3 og for polystyren: 18 kg/m^3 .

Forsøgselementerne er opbygget som typiske varmttagskonstruktioner med materialer, der illuderer det bærende dæk, under isoleringen og dampbremsen. En undtagelse er feltet, nr. 7, der har en krydsfinersplade som koldt dæk over isoleringen. Dette tagelement er placeret over rummet, der holder en konstant høj relativ fugtighed. I øvrigt er det tilstræbt, at elementopbygningen i de to rum er parvis ens, så samme type element findes over begge rum. Figur 8 viser de enkelte elementers sammensætning og deres lokalisering over hvert enkelt rum. Ved forsøgets start blev der benyttet en Hygrodiode som dampbremse i alle forsøgselementerne. Den anvendte Hygrodiode var den på forsøgenes starttidspunkt nyeste kommercielt tilgængelige, hvor den syntetiske filt bestod af polypropylen. Den 1. november 1988, det vil sige efter at forsøget havde stået på i trekvart år, blev Hygrodioden erstattet med en polyethylenfolie i felt nr. 12 samt i felt nr. 11 med en polyethylenfolie med ét cirkulært hul, $\varnothing=10$

mm, midt i. Disse elementer, der begge var placeret over det fugtige rum, blev anvendt til sammenligning med elementerne med Hygrodioder-dampbremsen.

Der blev målt temperaturer på stålpladens underside over hvert enkelt forsøgselement samt direkte på dampbremsen. Endvidere blev der målt temperaturer i rumluften i begge rum umiddelbart under taget, samt en udelufttemperatur. Endelig blev der som en orienterende måling registreret globalstråling af et solarimeter med samme hældning som tagfladen. Termoelementerne, der var af kobber-konstantan (Cu/Ko), samt solarimeteret blev aflæst af et udstyr omfattende et HP-3455A digitalt voltmeter og en HP-3495A scanner. Måleresultater blev opsamlet og HP instrumenterne styret via et GPIB (General Purpose Interface Bus) adapterkort, der sad som indstik i en IBM PS/2-30 personlig computer. Endvidere indgik en temperaturreferencebox med et indbygget Cu/Ko termoelement, der holdt 47,0°C. Målekanalerne blev scannet hvert 30' te sekund og hver halve time blev middelværdien af målingerne lagret på diskette. BASIC-måleprogrammet er en modificeret version af et program, der indgående er beskrevet af Jensen (1988).

Formålet med temperaturmålingerne har dels været at give en orientering om hvilke temperaturer, der har været drivende for transporten af vanddamp gennem forsøgselementerne. Dels er målingerne blevet benyttet som input til simuleringer af fugttilstanden i elementerne med beregningsprogrammet MATCH for koblet fugt- og varmetransport (Pedersen, 1990).

Målingerne har strakt sig fra februar 1988 til oktober 1989. Ved opsætningen af elementerne blev der ikke tilsat fugt. Forskellige forsøg med vigtigheden af en omhyggelig tætning omkring dampbremsen blev gjort i de første måneders forsøg. I den første måned, hvor der slet ingen tætning var, ophobedes der betydelige mængder fugt i tagelementerne - mere end der med rimelighed kunne tilskrives diffusion gennem dampbremsen. Tætningen blev derefter forbedret og først i maj blev der tilsat fugt til elementerne ved at filteren i oversiden af isoleringen i varmt-dæks konstruktionerne blev gennemvædet med vand. Krydsfineren fra konstruktionen med det kolde dæk blev ligeledes opfugtet ved at ligge neddyppet i et kar med vand i cirka en halv time. I gennemsnit blev der således tilført 57 gram vand (407 g/m²) til hvert af elementerne udover det, der allerede måttet være optaget tidligere eller være indeholdt hygroskopisk ved forsøgets start.

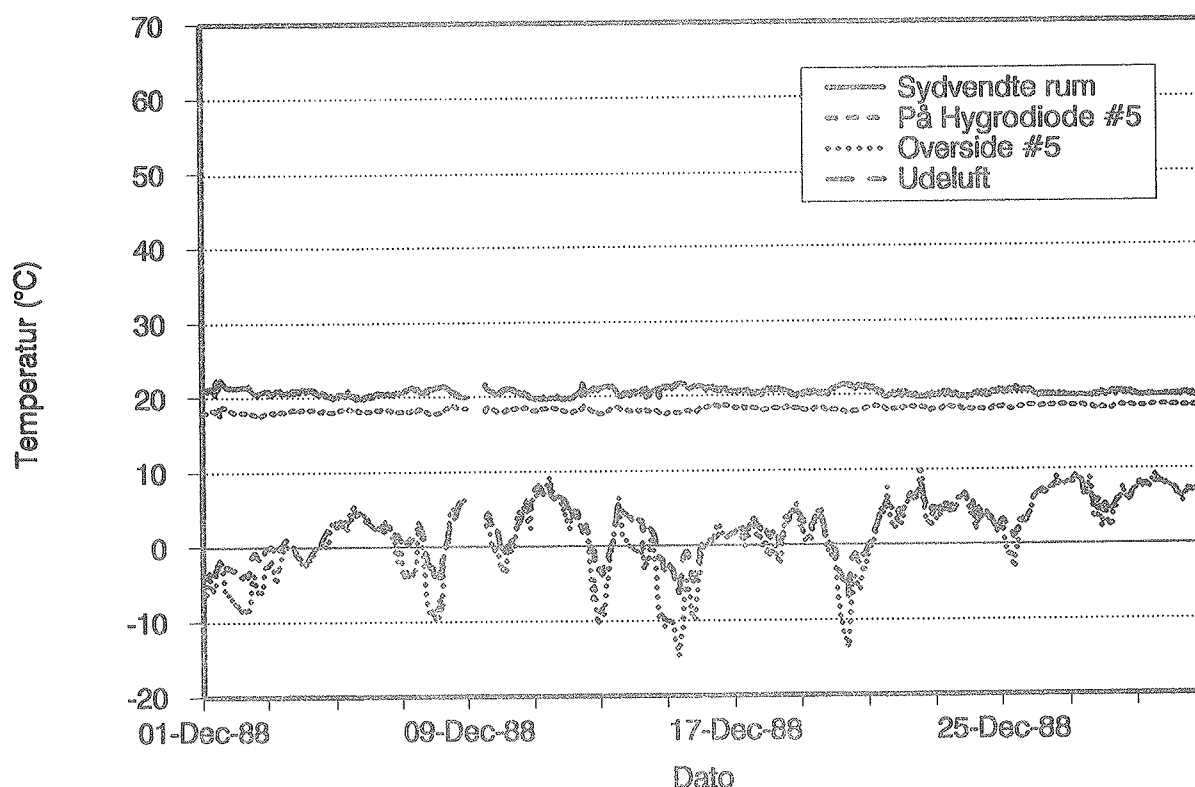
Poserne blev nedtaget og vejjet cirka hver måned. Ved disse vejninger indgik poserne med indhold, det vil sige isoleringsmaterialer og dampbremse, men ikke det underliggende dæk/loftsbeklædning. Ved vejningerne til og med den 4. januar 1989 blev alle materialerne udtaget af poserne og vejjet hver for sig. Dette krævede anvendelse af en tape til forseglingen mellem dampbremse og pose, der kunne tages af uden at ødelægge materialerne. For at opnå større sikkerhed for at denne tape sluttede tæt, blev den erstattet med en kraftigere type med bedre klæbeevne ved vejningen den 4. januar 1989. Felterne blev herefter ikke åbnet før forsøgets afslutning. Endeligt blev materialerne vejjet, ovntør-

ret ved 105°C og vejet igen ved forsøgets afslutning. Derved var det muligt at regne tilbage og bestemme tagelementernes absolutte fugtindhold gennem forsøget.

4.2 Forsøgsresultater

4.2.1 Temperaturmålinger

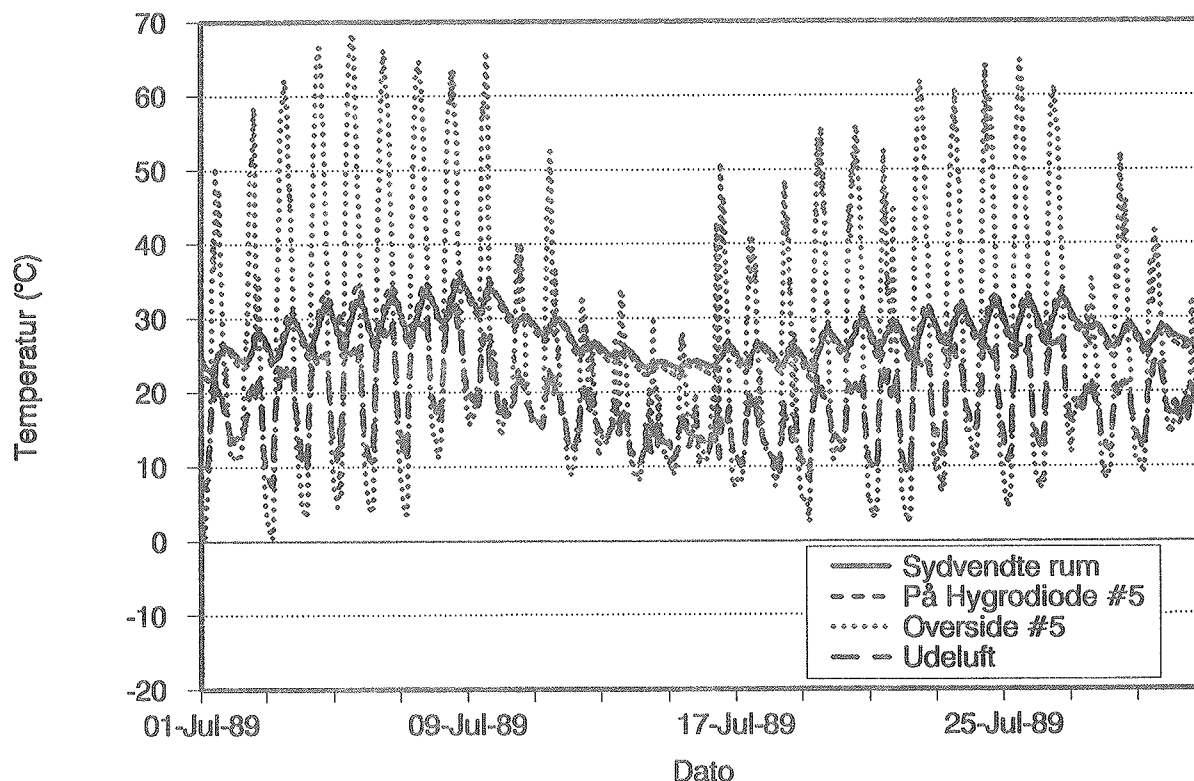
Der skal ikke her redegøres fuldstændigt for resultatet af temperaturmålingerne. I stedet vises nogle figurer, der dels illustrerer nogle typiske forløb i såvel en kold som en varm periode, dels vises en oversigt over temperaturrandbetingelserne over det meste af måleperioden for ét af felterne. Det udvalgte felt er nr. 5, der sidder over det sydlige rum, er isoleret med 150 mm Rockwool og har træbetondæk.



Figur 9 Temperaturer i det sydvendte rum, under og over isoleringen i et af felterne (nr. 5) samt i udeluften i december 1988, der var måleperiodens koldeste måned.

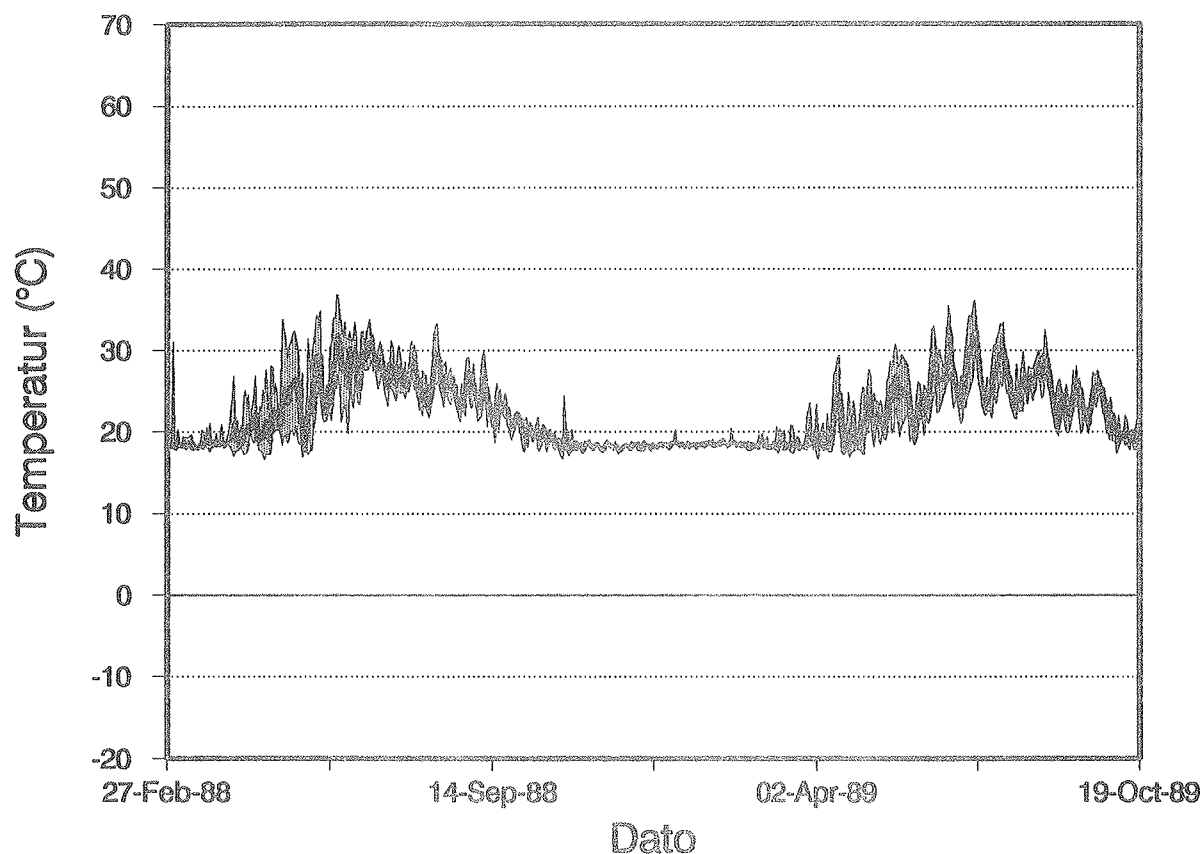
Figur 9 viser de målte temperaturer i det sydlige rum, hvor der holdes boligklima, sammen med Hygrodiodemembranens og stålpladens temperaturer for felt nr. 5, samt udeluftens temperatur. Den viste periode er de første 30 dage af december 1988 - den koldeste af de måneder, der er blevet målt. Det ses, hvordan temperaturen af indeluften er tæt på 20°C hele perioden. Hygrodioden

er kun adskilt fra indeluften af træbetonen, og temperaturfaldet herover er kun på et par grader. Udeluftens temperatur varierer 5-10°C omkring frysepunktet det meste af perioden. Stålbladen, der ligger lige under tagappen, er for det meste koldere end udeluften, da tagfladens udstråling tilsyneladende er mere væsentlig end det beskedne solindfald, der kan komme i december. Dette kan give et beskedent ekstra potentiale for opadgående fugtvandring om vinteren.



Figur 10 Temperaturer i det sydvendte rum, under og over isoleringen i et af felterne (nr. 5) samt i udeluften i juli 1989, der var en af måleperiodens varmeste måneder.

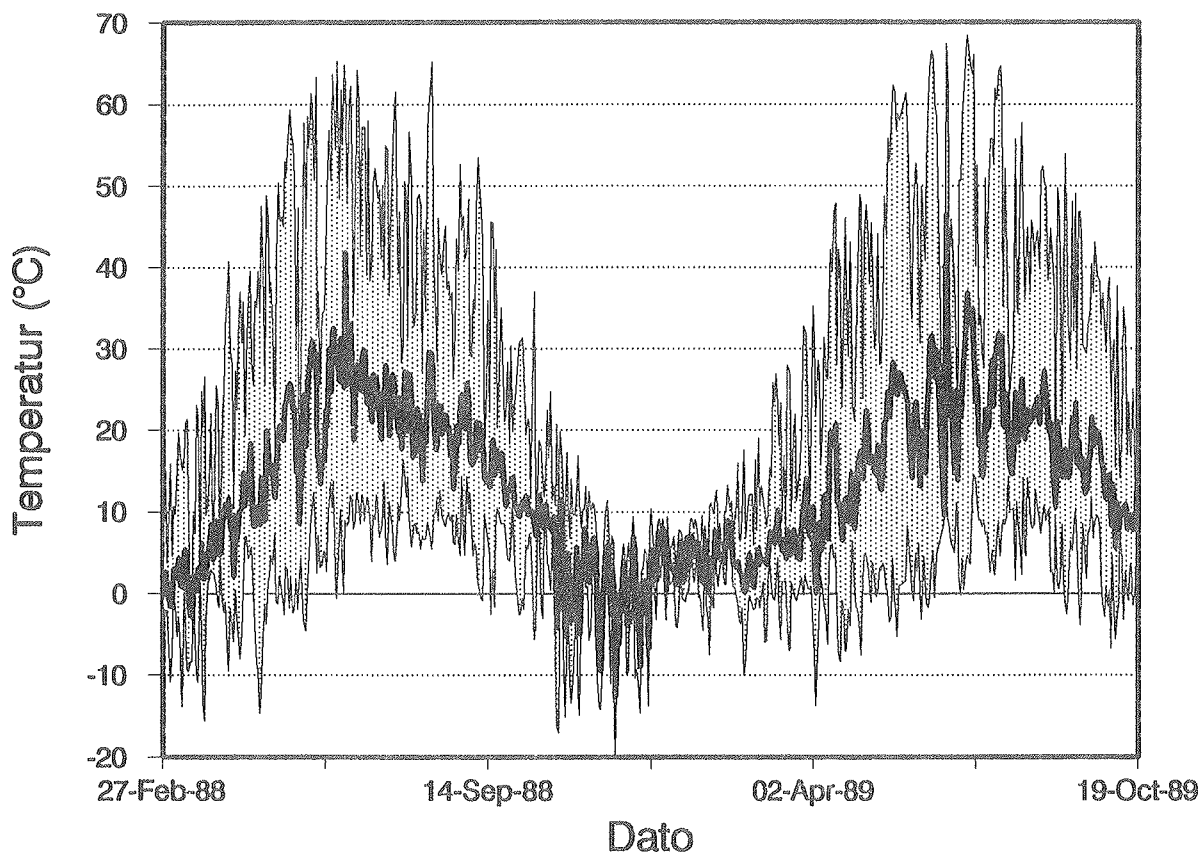
Figur 10 viser temperaturerne målt de samme steder som i figur 9 for juli måned 1989. Indeluftens temperatur kan ikke her holdes nede på 20°C, men varierer i stedet mellem cirka 23 og 33°C, afhængigt af hvilket tidspunkt på døgnet det er, og hvordan vejret har været i de foregående døgn. Disse overtemperaturer er omtrent halvt så høje i det nordvendte rum (ikke vist). Hygrodiodens temperatur varierer et par grader omkring indeluftens. Udeluftens temperatur afspejler, at sommeren 1989 var ganske "god". Kun sjældent kommer nattemperaturen under 10°C, mens dagtemperaturene ofte topper mellem 20 og 30°C. Da tagfladen er mørk, kommer stålbladens temperatur mange dage op over 60°C midt på dagen, når sollyset absorberes. En gråvejrperiode midt i måneden ses tydeligt. Tagfladens nattemperatur kan til gengæld godt komme noget under udeluftens (månedens minimum er



Figur 11 Daglige minimums-, maksimums-, og middelværdier gennem det meste af måleperioden for temperaturene på hygrodioden i felt nr. 5.

tæt på frysepunktet), da der sker en vis udstråling til rummet. Udstrålingen er navnlig stor i de klare døgne, hvor også indstrålingen om dagen er stor.

Figur 11 viser de daglige minimums-, middel- og maksimumstemperaturer for hele perioden på Hygrodioden i felt nr. 5. Figur 12 viser de tilsvarende temperaturer i oversiden af det samme tag-element. Ved at sammenholde de to figurer fremgår det, at oversiden af feltet gennem hele vinteren konstant er 15-20°C koldere end undersiden. Under disse betingelser kan der ske en opadrettet fugttransport, og der vil dannes kondens øverst i feltet. Fra april til september er der daglige spidstemperaturer af feltets overside, der overstiger Hygrodiodens temperatur. Midt på sommeren er tagoverfladens middeltemperatur omtrent ligesom Hygrodiodens. Da isoleringens underside således periodevis er det koldeste sted inde i felterne, vil fugten i disse perioder kondensere på Hygrodioden, og der er da mulighed for at der kan ske en udtørring. På grund af måtningsdamptrykkets nærmest eksponentielle stigning med temperaturen virker de høje tagtemperaturer særligt effektive med henblik på at tilvejebringe en nedadrettet damptryksgradient.

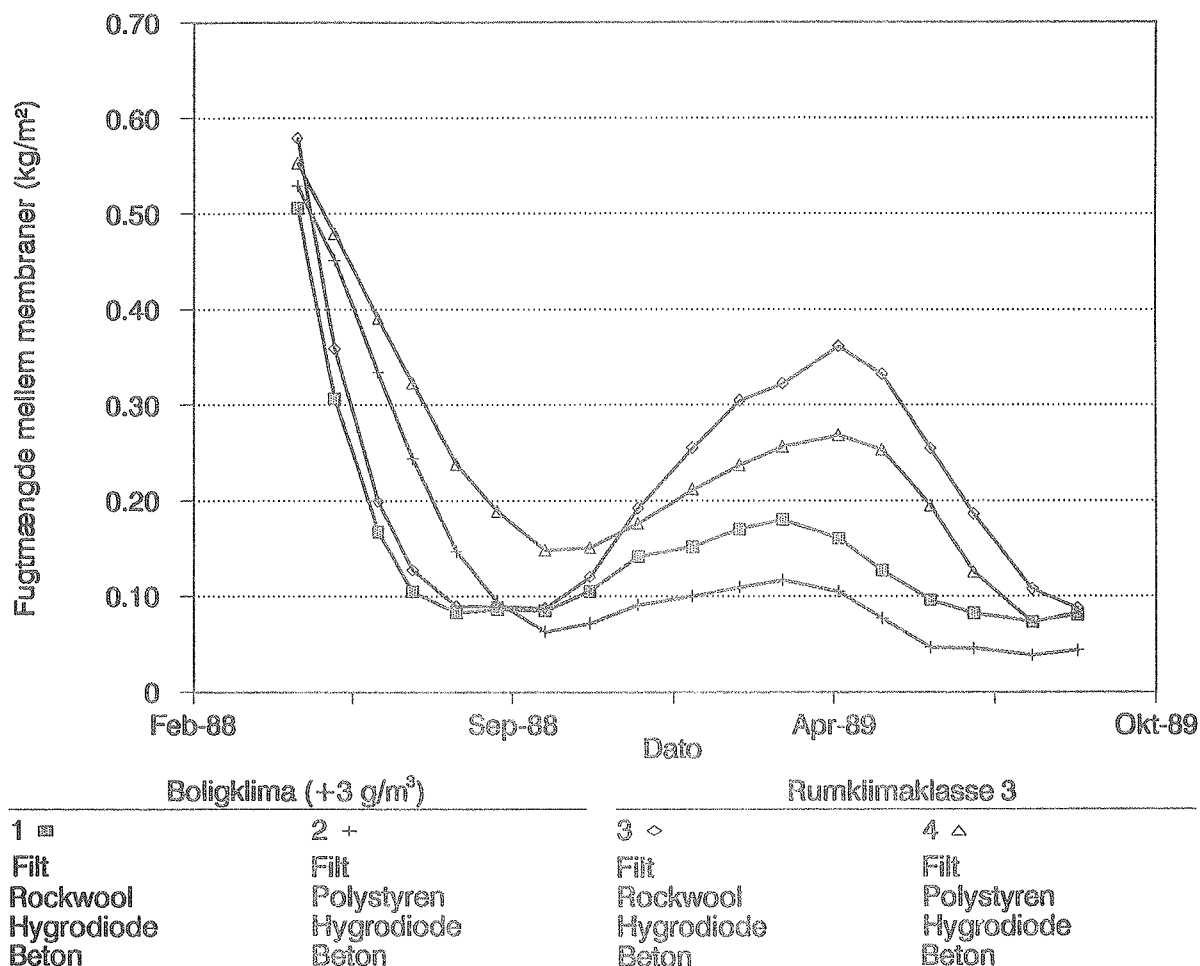


Figur 12 Daglige minimums-, maksimums-, og middelværdier gennem det meste af måleperioden for temperaturene i oversiden af felt nr. 5.

4.2.2 Fugtmålinger

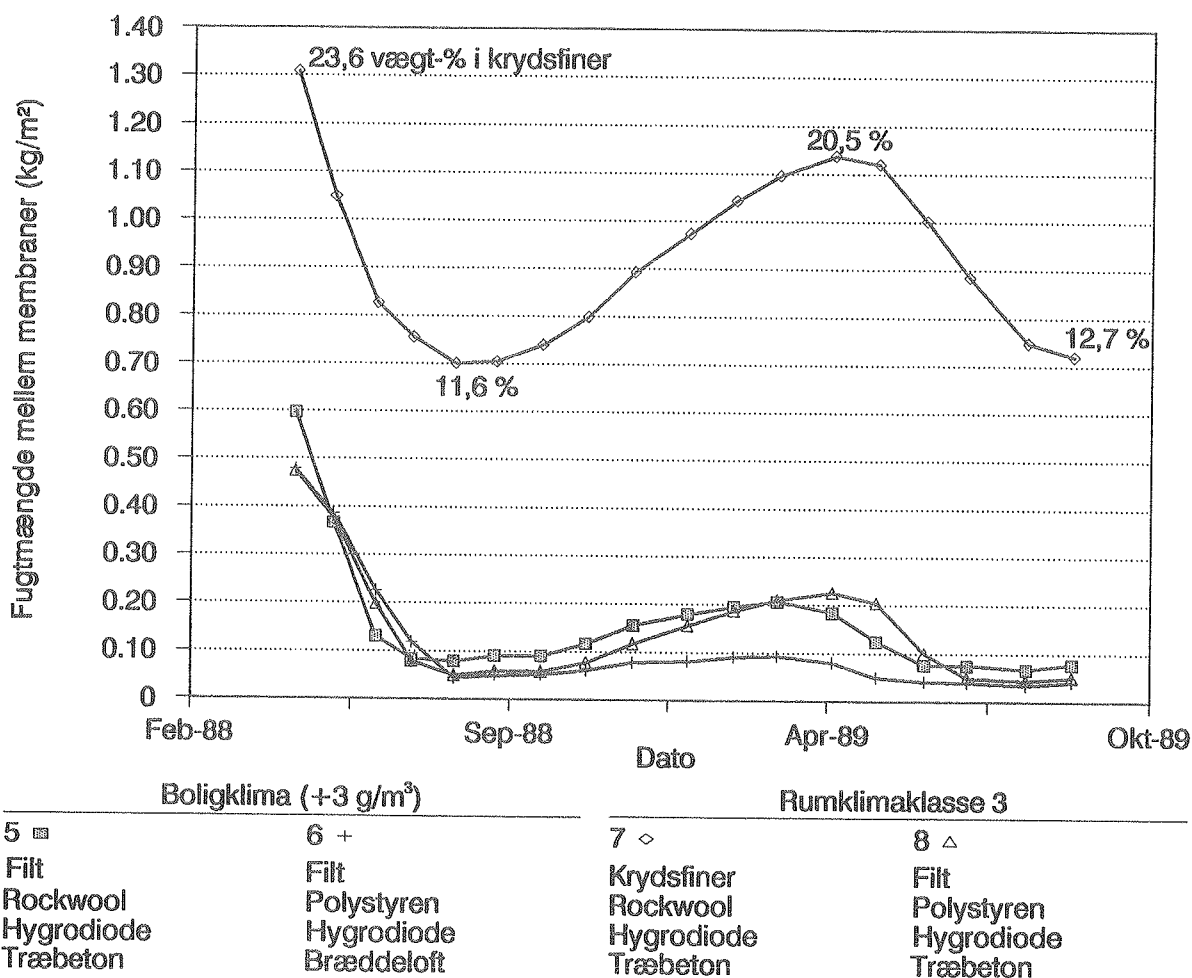
På de følgende figurer vises vejeresultaterne for grupper af fire elementer ad gangen. De fire elementer har siddet i samme tagkassette (to i hvert rum) og har i reglen samme type varmt dæk. Resultaterne fra før fugttilsætningen i maj 1988 vises ikke, da de betragtes som indledende prøveforsøg. Vejeresultaterne er blevet omregnet til absolutte fugtindhold som kg fugt pr. kvadratmeter tagareal for hvert af forsøgsfelterne.

Figur 13 viser resultaterne for konstruktionerne med betondæk. Den tilførte fugtmængde udtørres indenfor de første ca. 3 måneder i de to felter, der er mineraluldsisolerede. I de to felter, der er isolerede med polystyren går udtørringen noget langsommere, således at det tager 5-6 måneder for felt 2 at udtørres, mens felt 4 over det fugtigere rum stadig indeholder lidt af den tilsatte fugt sidst på efteråret. Der sker en vis opfugtning i løbet af den efterfølgende vinter. Opfugtningen er særligt stor for felt nr. 3, der er isoleret med mineraluld og sidder over det fugtige rum. Vinteropfugtningen er mindst for felt nr. 2, der har polystyrenisolering og sidder over rummet med boligklima. Anden sommer tørrer alle felter ud til kun at indeholde hygroskopisk fugt.



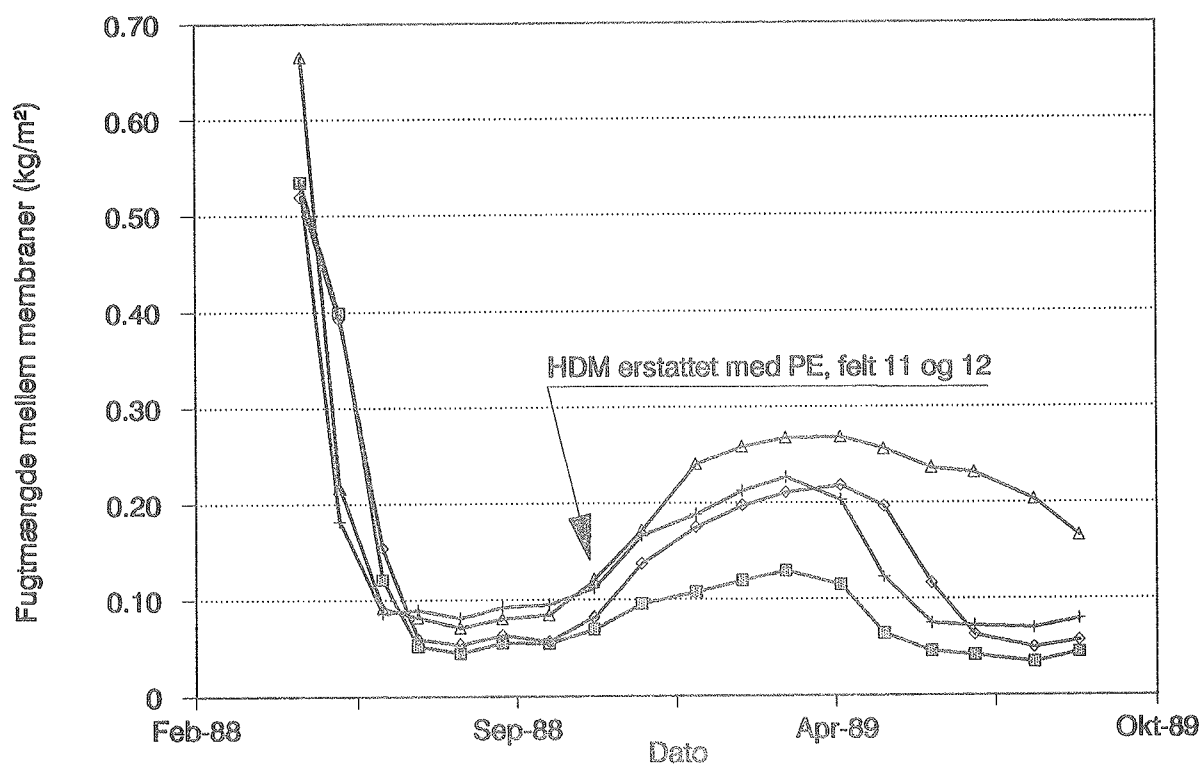
Figur 13 Udtørningsforløb for de fire tagfelter med betondæk.

Felterne nr. 5, 6 og 8, der ses af figur 14 opfører sig overvejende som felterne fra den foregående figur. De polystyrenisolerede felter udtørres dog lidt hurtigere, end da der var beton under Hygrodiode, og opnår derfor begge at udtørre helt første sommer. Skalaen på ordinataksen er ændret i denne figur for at give plads til resultaterne fra felt 7, der har et krydsfinersdæk. Krydsfineren indeholder en del hygroskopisk fugt, der i princippet ikke kan eller behøver tørres helt ud. Det afgørende er at få træfugtigheden under 20 vægt-%, der betragtes som faregrænsen for begyndende svampeangreb, når temperaturen samtidigt er større end 5°C. Krydsfinerens fugtighedsprocent er derfor også angivet i nogle af punkterne på kurven. Som det ses, tørrer krydsfineren ud på 3-4 måneder den første sommer. Til gengæld er opfugtningen ganske stor den efterfølgende vinter, så fugtindholdet kommer op omkring faregrænsen. Dette sker i en periode, hvor krydsfinerens temperatur stadig er forholdsvis lav. Den store genopfugtning skyldes dels at feltet er isoleret med mineraluld og er placeret over det fugtige rum, men også at træet absorberer fugten ved en lavere relativ fugtighed end 100%, hvorved der bliver en større damptryksforskel til at drive den opadrettede transport.



Figur 14 Udtørningsforløb for tre tagfelter med dæk/loftsbe-
klædning af træbeton og et med bræddedæk. Felt syv
har endvidere et "koldt" krydsfinersdæk på oversiden
af isoleringen.

Figur 15 omhandler fugtforløbene i felterne med perforeret stål-
dæk. Udtørningen den første sommer går meget hurtigt for felter-
ne med mineraluld, men også de to andre felter, der hver er
isoleret med både mineraluld og polystyren, tørrer ud inden for
et par måneder den første sommer. På figuren er det markeret
hvornår Hygrodioderne i felterne 11 og 12 blev erstattet med
henholdsvis en hullet og en hel polyethylen dampbremse. Til-
syneladende har der stadig været mulighed for fugtdiffusion ind
i felterne, da deres fugtindhold stiger en del de efterfølgende
to måneder. 4. januar 1989 forbedres tapen, der tætnet damp-
bremserne til plastposerne, og det har tilsyneladende en mærkbar
effekt - i det mindste på felt nr. 12. Det er derfor ikke umu-
ligt, at der i et vist omfang har været en utilsigtet diffusion
af fugt rundt om dampbremserne i hele 1988, såvel i disse to
felter som i de øvrige. I 1989 ses fugten i felt nr. 12 med en
ideel dampbremse at være ganske godt indespærret, mens selv det
ene hul, der er i dampbremsen i felt nr. 11, muliggør at fugten



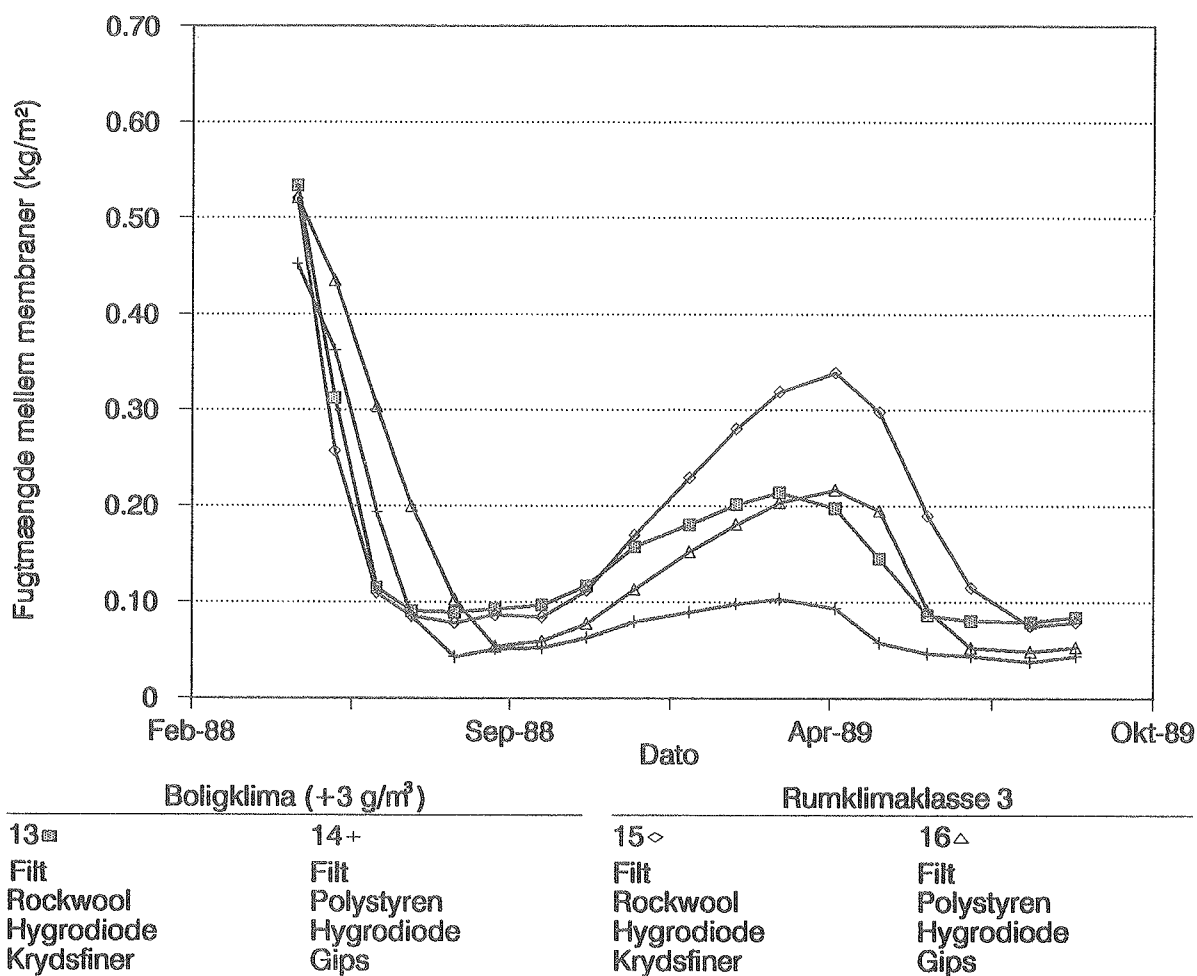
Boligklima (+3 g/m³)		Rumklimaklasse 3	
9 ■	10+	11◇	12△
Filt	Filt	Filt	Filt
Polystyren	Rockwool	Polystyren	Rockwool
Rockwool	Hygrodiode	Rockwool	HDM/PE
Hygrodiode	Perf. korr. stål	HDM/PE m. hul	Perf. korr. stål
Perf. korr. stål		Perf. korr. stål	

Figur 15 Udtørningsforløb for de fire tagfelter med dæk af perforerede, korrugerede stålplader. HDM = Hygrodiodemembran.

kan slippe både ind og ud. Utætte dampbremsere lader altså ikke blot fugt komme igennem ved konvektion, hvis der er lufttryksforskelle i konstruktionen, men som det ses her, hvor den konvektive transport ikke er mulig, forårsager huller og sprækker også en væsentlig forøgelse af den diffunderede mængde.

Figur 16 viser fugtforløbene i de sidste fire felter, der enten har gips eller krydsfiner under Hygrodioden. Tendenserne er de samme som for de foregående felter: Den tilsatte fugt tørrer ud den første sommer, men omtrent dobbelt så hurtigt, når der anvendes mineraluld, som hvis der anvendes polystyren. Vinteropfugtningen er størst over det fugtige rum, særligt når der isoleres med mineraluld.

Følgende konklusioner kan drages ud af forsøgene, omend det kan være usikkert om der eventuelt har været en utilsigtet diffusion af damp rundt om dampbremserne indtil tætningen blev forbedret i januar 1989:



Figur 16 Udtørningsforløb for tagfelter med gips eller krydsfiner som underlag for Hygrodioden.

- I modsætning til når der anvendes en tæt og ideal polyethylen dampbremse, giver Hygrodioden mulighed for at fugt i taghulrummet kan slippe ud. Der er udtørret op til 450 gram fugt pr. kvadratmeter tagareal på 23 dage mellem de første to vejninger efter fugttilsætningen (felt 12).
- Udtørringen går hurtigst, når der anvendes en damppermeabel isolering, eksempelvis mineraluld fremfor polystyren. Herved kondenserer der mest fugt på Hygrodioden i døgnet solskinstimer.
- Til gengæld sker vinteropfugtningen også hurtigst, når der anvendes mineraluldisolering. Polystyrenisoleringen har altså en vis dampbremsende effekt, også når gradienterne er opadrettede.
- Udtørringen sker bedst, når Hygrodiodens underlag er permeabelt. Den fugtmængde, der kommer gennem Hygrodioden kan umiddelbart diffundere gennem eksempelvis de perforerede

stålplader, mens den først midlertidigt må ophobes i dækket, når det er af beton.

4.2.3 EDB-simuleringer af fugtforløbene

Sideløbende med Hygrodiodeprojektet har der ved Laboratoriet for Varmeisolering kørt et licentiatprojekt med emnet "Koblet fugt- og varmetransport i bygningskonstruktioner". En central del af dette licentiatarbejde har bestået i at udarbejde en beregningsmodel, MATCH, for den koblede fugt- og varmetransport. Modellen tager hensyn til materialegenes fugtoghobning og indeholder en detaljeret beskrivelse af den gensidige kobling mellem temperatur- og fugtforløbene. Herved repræsenterer den en betydelig forbedring i forhold til den sædvanlige, stationære Glaser's metode (Glaser, 1959) til beregning af fugtfordelingen i konstruktioner. Samtidig er MATCH den hidtil eneste beregningsmetode, hvor der er taget hensyn til diffusionsmodstandens bratte ændring, når Hygrodiode bliver våd. Hertil kræves en detaljeret, instationær beregning af forholdene på Hygrodiodes overflade for at kunne sige hvornår membranen virker som en permeabel henholdsvis en tæt dampbremse. Programmet, der kører på en sædvanlig PC, benytter enten referenceårets vejrdata som input eller aktuelle målinger af overfladetemperaturer. MATCH er beskrevet i detaljer i licentiatafhandlingen (Pedersen, 1990).

Et afsnit af licentiatafhandlingen omhandler fugtproblemer i flade tage, og et underafsnit beskriver Hygrodiodemembranen som en mulig løsning på de i praksis forekommende problemer. I afsnittet er nogle af de målte resultater fra figurerne ovenfor sammenholdt med tilsvarende beregninger med MATCH. Der opnås en tilfredsstillende overensstemmelse, når Hygrodiodes tørre dampmodstand nedjusteres noget (til omtrent $35 \text{ GPa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s/kg}$) samtidig med at den våde modstand opjusteres (til $8 \text{ GPa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s/kg}$) i forhold til estimatet fra afsnit 3.2.1. Disse justeringer, der svarer til et mindre gunstigt forhold mellem de tørre og våde transportparametre for Hygrodiode kan dels forklares med den mulige dårlige tætning omkring Hygrodiode i forsøgets første år, dels at den anvendte Hygrodiode var den tidligere version, hvor filteren bestod af rent polypropylen, der havde en tendens til nogle gange at blive vandskyende.

Andre simuleringer af flade tagkonstruktioner med Hygrodiode og andre dampbremsere er vist i samme afsnit såvel som i nogle af artiklerne, der nævnes i litteraturlisten. Til disse beregninger er der anvendt vejrdata fra det danske test referenceår, TRY.

5. MÅLINGER PÅ VIRKELIGE TAGE

Det er naturligvis afgørende, at Hygrodiødens egenskaber ikke kun kan eftervises ved målinger i laboratoriet og i mindre forsøgstagmoduler, som de i kapitel 4 nævnte, men at membranen også fungerer, når den er monteret i virkelige tage i felten. I dette kapitel vises og omtales eksempler på sådanne feltmålinger.

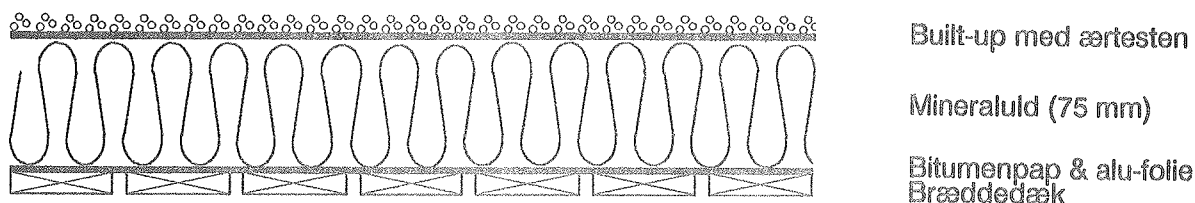
5.1 Bygning 116, Danmarks Tekniske Højskole

Anvendelsen af Hygrodiøden forudsætter, at den indbygges i konstruktionen på det sted, hvor den sædvanlige dampbremse skulle have ligget. Dette kan naturligvis let sikres i en nykonstruktion, hvor membranen enten indbygges på det rigtige sted i fabriksfremstillede tagkassetter eller let kan udlægges, når konstruktionen udføres på byggepladsen. Lidt sværere bliver det, når eksisterende tage skal renoveres, da man så er nødt til at adskille konstruktionen til det sted, hvor dampbremsen ligger eller skulle ligge. Da der findes mange fugtskadede flade tage på danske byggerier fra de sidste 20-30 års tid, hvor det var god latin at "klare" fugtproblemerne ved udluftning af taghulrummet, ligger der et stort anvendelsespotentiale for Hygrodiøden, hvis den også kan anvendes i forbindelse med tagrenovering. Korsgaard og Bunch-Nielsen (1990) nævner et eksempel på, at man har benyttet Hygrodiøden i en renovering af et koldt tag ved at fjerne loftsbeklædningen og den gamle dampbremse nedefra og sætte en Hygrodiøde op i stedet. I dette afsnit omtales en renoveringssag af et varmt tag på Danmarks Tekniske Højskole, hvor det har været nødvendigt at gribe ind fra tagets overside.

5.1.1 Problemstilling

Det oprindelige tag, der var beliggende over bygning 116 på Danmarks Tekniske Højskole i Lyngby er vist i tværsnit på figur 17. Bygningen, der indeholder auditorier og tegnestuer, er opført omkring 1970. Tagets samlede areal er ca. 5500 m². Det bærende dæk er af rupløjede brædder, hvorunder loftet er nedhængt (ikke vist). På dækket var der oprindeligt påsømmet et lag bitumenpap med alu-folie, der har udgjort et meget tæt dampbremsende lag. Herover var isoleringen udlagt, der bestod af 75 mm mineraluld, og der var afsluttet med 3 lags built-up med dækasfalt, hvori der var udlagt ærtesten.

Den tætte dampbremse har effektivt forhindret at eventuel fugt, der måtte være akkumuleret inde i taget kunne trænge ned om sommeren. Det må formodes, at der til gengæld heller ikke har været nogen væsentlig opadgående fugttransport om vinteren. Dampbremsens almene tæthed har imidlertid ikke forhindret at tagets uheldige fugtmæssige tilstand har vist sig ved dryp fra loftet enkelte steder, hvor vandet alligevel har fundet sig et hul i membranen. Man må således forestille sig, at en stor del af tagarealet har været gennemvådt, før det drypper ned i de underliggende rum. Ved en prøveudtagning af isolering fra et område af taget, der formodedes at være hårdt fugtbelastet var



Figur 17 Tværnsnit af taget over bygning 116 på DTH før reno-eringen.

isoleringens fugtindhold da også på 395 vægt-%. De udtagne prøvestykker var helt desintegrerede, og isoleringsværdien har naturligvis været væsentligt forringet.

Da dampbremsen som sagt må anses for at have været tæt, er fugten næppe kommet nedefra. Der vil enten være tale om fugt, der stammer helt fra byggefasen, eller om nedbør, der er kommet igennem utætheder i tagpappen.

Renoveringen, der blev udført på størstedelen af taget var af en traditionel karakter. Den bestod i at lokalisere de områder af isoleringen hvor fugtindholdet ansås for at være særligt højt. Her blev isoleringen udskiftet. De gamle ærtesten blev skrabet af, og ovenpå den gamle tagpap blev der lagt ny isolering af kileskåret, expanderet polystyren. Taget blev afsluttet med en EPDM-dug med søstensballast. Ved renoveringen blev den værste fugt fjernet, og den oprindelige isolering kom til at ligge varmere, hvilket alt andet lige vil give fugten et vist potentiale for at slippe ud, hvis der vel at mærke er nogle diffusionsveje. Den oprindelige isolering er imidlertid indespærret mellem to for damptransporten tætte membraner. Det samme gælder for den nye del af isoleringen. Både den tilbageblevne fugt og eventuel fugt, der måtte komme gennem utætheder i den nye tagdug, vil derfor ikke kunne finde veje at slippe ud af taget. Den udførte renovering repræsenterer altså ikke en principielt sundere konstruktion end den gamle.

Et ca. 100 kvadratmeter stort område af taget blev udvalgt til en alternativ renovering med Hygrodiolen. Her blev den gamle built-up og isolering kasseret og asfaltmembranen, der var sømmet på trædækkets overside, blev fjernet, for at Hygrodiolen kunne virke. Hygrodiolen blev lagt ud som dampbremse direkte på trædækket. Herpå kom der 150 mm mineraluld med tværstillede fibre og en trædefast mineraluldsplade på oversiden. Som tagafdækning blev der brugt samme EPDM-dug med ballast som på resten af taget. Mellem isoleringen og EPDM-dugen blev der lagt et lag fibertext. Inden taget blev lukket den 20. november 1987, blev fibertexten vædet med en haveslange, se figur 18. Der blev herved tilført ca. 1 kg vand pr. kvadratmeter, omend fordelingen nok har været noget uensartet.



Figur 18 Tilsætning af vand til den del af taget, der blev renoveret med en Hygrodiode som dampbremse.

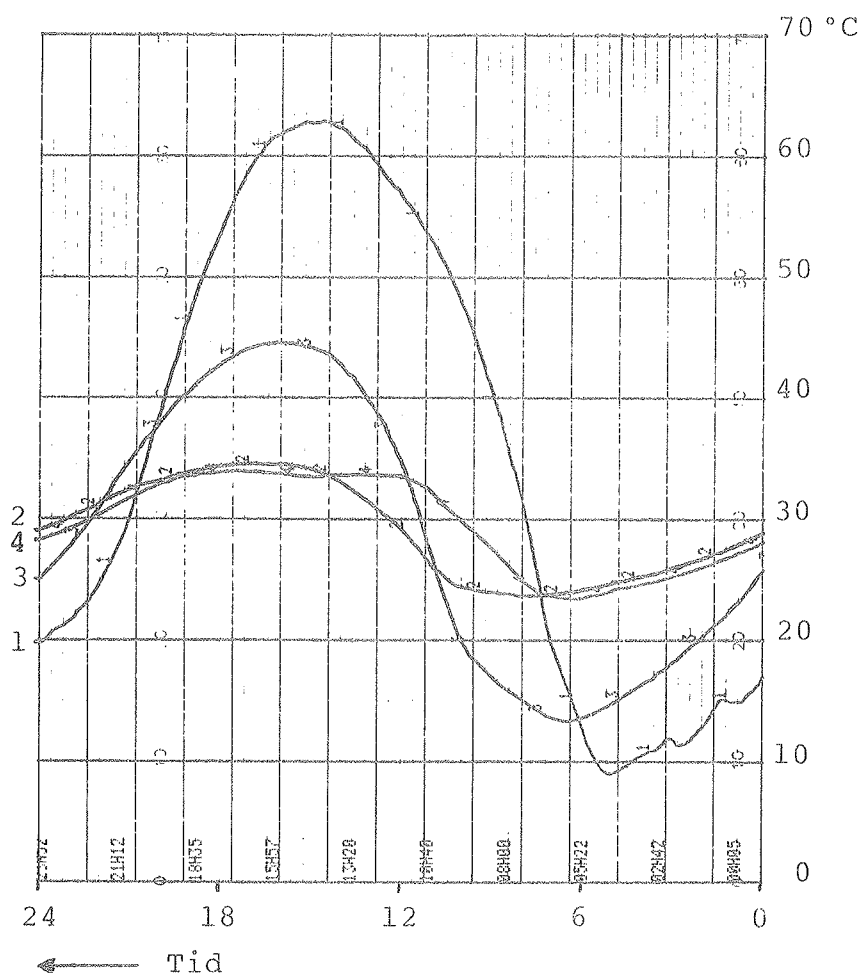
Der blev indbygget fugtmålerondeller fra firmaet Bygge- og Miljøteknik a/s både for oven og forneden to forskellige steder i isoleringen. Fugtmålerondellerne består af en krydsfinersskive med en tykkelse på 12,5 mm og en diameter på 5 cm. Den elektriske modstand mellem to søm, der er slået ind i skiven, kan ved hjælp af en kalibreringskurve omsættes til fugtindhold i træet. Rondellerne giver i reglen gode resultater i det hygroskopiske område, mens der ikke er nogen god opløsning af resultaterne når fugtindholdet kommer over fibermætning i træet. Her må man nøjes med at konstatere, at fugtindholdet ligger på et for højt, men ukendt niveau.

Det ene sted, hvor rondellerne var indbygget, blev ballasten på EPDM-dugen skubbet til side i et cirka 2 x 2 meter felt den 15. juli 1988, og dugen blev vasket af for stenstøv. Det andet målefelt var fortsat dækket af stenene og opnåede derfor kun mere moderate overtemperaturer om sommeren.

5.1.2 Forsøgsresultater

Fugtmålerondellerne er blevet aflæst ca. 1 gang ugentligt siden renoveringens udførelse. Der er således rådighed over knap 3 års måledata. Både sommeren 1988 og 1989 har der i perioder været tilsluttet en skriver til termoelementer, der var monteret på

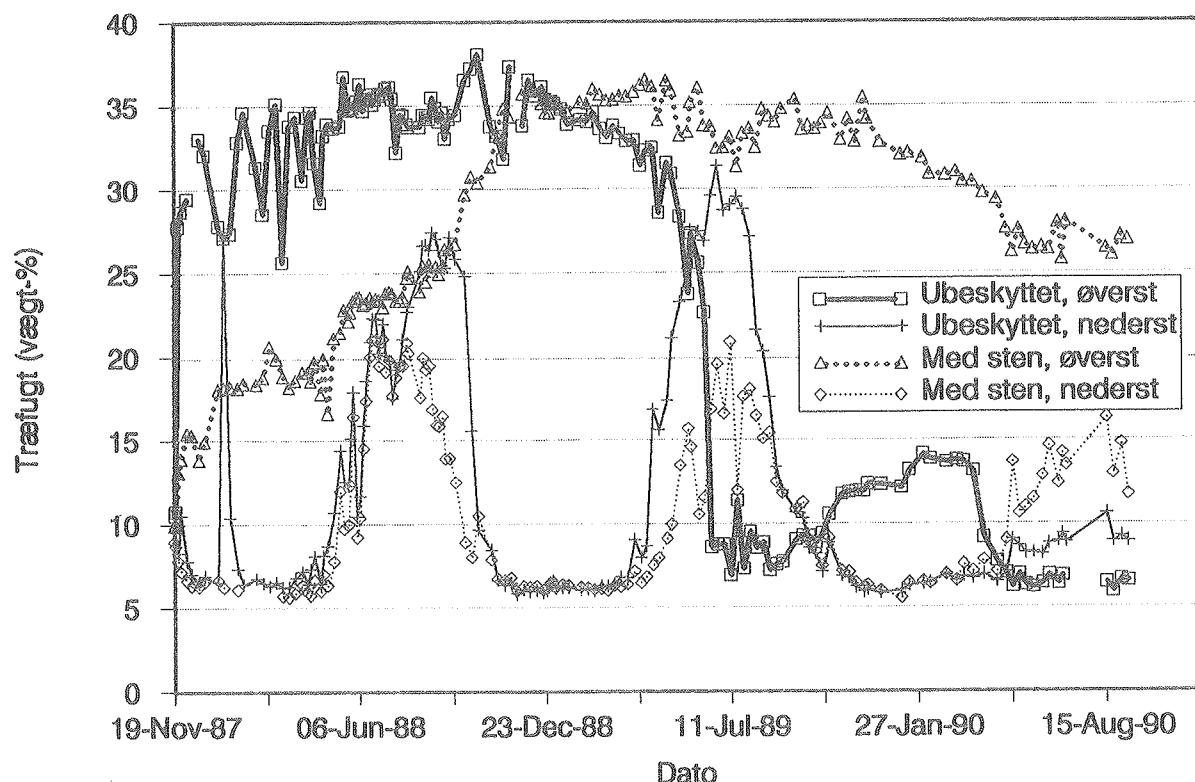
fugtrondellerne. Herved fås en idé om hvordan sommertemperaturerne har været med de to forskellige tagoverflader.



Figur 19 Målte temperaturer i oversiden af isoleringen uden (1) og med (3) ballast samt i undersiden af isoleringen de tilsvarende steder (henholdsvis (4) og (2)).

Figur 19 viser de målte temperaturer på en af de bedste sommerdage i 1989. I oversiden af isoleringen under den mørkegrå EPDM-dug bliver der op til 63° varmt, mens den tilsvarende maksimumstemperatur i den del af taget, der har en stenballast, bliver knap 45°C. Man ser i øvrigt, hvordan ballasten forsinker temperaturprofilets udbredelse med ca. en time. Nattemperaturen når ned omkring 10-15°C - koldest når der ikke er ballast. Temperaturen i undersiden af isoleringen varierer på den pågældende dag mellem 23°C sidst på natten og knap 35°C om dagen. Med stenballast er temperaturgradienterne lige meget op- som nedadrettede, mens der er overvægt af de nedadrettede gradienter, når dugen er ubeskyttet. Omregnes der ved hjælp af måtningsdamptrykskurven til damptryksgradienter, vil der i begge tilfælde være størst

potentiale for den nedadrettede fugttransport, omend dette navn-
ligt vil gøre sig gældende for det ubeskyttede tag.



Figur 20 Målte fugtindhold af rondellerne i over- og under-
siden af isoleringen både med og uden ballast på den
overliggende EPDM-dug.

Figur 20 viser forløbet af fugtindholdene i fugtrondellerne de fire målesteder. Rondellen i toppen af det ubeskyttede tag bliver fugtig med det samme efter tagets lukning. Fugtniveauet holder sig højt den første sommer og naturligvis også i den efterfølgende vinter. Først anden sommer tørrer fugten ud, og fugtindholdet holder sig så til gengæld på et sikkert lavt niveau resten af måletiden. Rondellen i bunden af isoleringen ligger tørt størstedelen af tiden. Kun om sommeren fugter den op, da den da modtager noget af fugten fra oversiden. Dette sommertilskud har været mindre i 1990, da der ikke har været nævneværdige fugtmængder i toppen. Årsagen til, at udtørringen først sker anden sommer, ligger dels i at ballasten ikke blev skovlet til side før godt hen på den første sommer, men skyldes måske især et ca. \varnothing =1 cm hul i EPDM-dugen, der blev opdaget mindre end en meter fra målestedet i september 1988. Dette hul må være opstået da ballasten blev skovlet ud på taget i forbindelse med reno-
veringen og kunne efterlade et spørgsmål om hvor mange lignende huller, der er rundt om på taget. Ved udtagning af prøvestykker af materialerne i taget omkring dette målested, ligeledes i september 1988, fandtes et samlet fugtindhold på ca. $1,6 \text{ kg/m}^2$, altså mindst lige så meget, som der blev tilført fra starten. Der blev ligeledes udtaget prøvestykker den 3. juli 1990. Her

blev isoleringens fugtindhold bestemt til mellem 1,1 og 2,5 vægt-%, svarende til et omtrentligt fugtindhold på 0,27 kg/m². Det må formodes, at der ved denne vejning kun var hygroskopisk fugt tilbage i taget.

Rondellen i toppen af isoleringen på det andet målested, hvor tagdugen er beskyttet, har opført sig lidt uforklarligt. Her steg aflæsningen ikke lige med det samme, efter at fugten var tilført, og taget lukket. Det aflæste fugtindhold i rondellen steg i stedet gradvist over det første års tid, men så har der hverken første eller anden sommer været tegn på en udtørring. Rondellen i bunden ligger også her tørt det meste af måleperioden, men modtager lidt fugt fra oversiden om sommeren - dog ikke så meget som der, hvor tagdugen er ubeskyttet. Det tyder altså på, at der med de lavere overfladetemperaturer ikke er store kræfter til at drive fugten ned i taget om sommeren og ej heller til at drive den ud igennem Hygrodioden. Det sidste lille års tid af måleperioden ser det ud som om, der er en faldende tendens for fugtindholdet i toppen af taget.

Ved prøveudtagningen fra denne del af taget i september 1988 fandtes et fugtindhold på 3,2 kg/m². Ved åbningen af taget i sommeren 1990 indeholdt prøvestykker af isoleringen mellem 1,4 og 2,5 vægt-% fugt svarende til et skønnet fugtindhold på 0,32 kg/m². Dette tagfelt må altså ligeledes være tæt på at være hygroskopisk tørt. De høje aflæsninger fra den øverste rondel i dette felt kan måske forklares ved, at rondellen udgør det eneste materiale i taget med væsentlig hygroskopisk kapacitet. Den smule fugt, der er i taghulrummet, vil derfor koncentreres i rondellen og blive der, til taget er tørret næsten helt ud.

Det har i disse forsøg været noget usikkert, om taget på grund af utætheder i EPDM-dugen har været tilført mere vand end tilført ved den bevidste vanding af taget, før det blev lukket. Det ser imidlertid ud til, at det målested, hvor EPDM-dugen er mørkegrå, da den ikke er beskyttet af sten, tørrer ud den første sommer efter at muligheden for utætheder af dugen indenfor måleområdet er blevet udelukket. Der er også tegn på en udtørring ved det andet målested, men her er taget tilsyneladende først blevet tørt i sommeren 1990 - to til tre somre efter fugten er tilsat. Det må altså forventes, at udtørringen forløber noget langsommere, når der ligger sten på taget, da de væsentligt reducerer de overtemperaturer, man kan opnå på solrige sommerdage. Alt andet lige, vil Hygrodioden altså have sin bedste udtørrende effekt, når tagoverfladen er ubeskyttet og mørk.

5.2 Andre byggerier

Financieret uden om nærværende projekt har der været flere tilfælde af praktiske anvendelser af Hygrodioden på tage i felten, hvor der er foretaget målinger for at eftervise membranens funktionsevne. Sådanne forsøg omtales i en artikel af Korsgaard og Bunch-Nielsen (1990), og resumeres her for at illustrere den praktiske anvendelighed af resultaterne fra nærværende projekt.

Det første af de i artiklen nævnte forsøg er foretaget over sommeren 1989 af P.F. Collet, det daværende Teknologisk Institut, Tåstrup. Der er foretaget fugtmålinger i tagkassetter, der blev anvendt over en fabriksdal. Kassetterne var tilført 5 l vand/m² tagflade og havde en Hygrodiode som dampbremse. Til trods for at tagfladen lå i skygge til kl. 13.00 hver dag, rapporteredes det, at den tilførte vandmængde var forsvundet over de 18 uger, som forsøget strakte sig over.

På Statens Byggeforskningsinstitut's (SBI) forsøgshus i Hørsholm har man målt på et fladt tag med varmt krydsfinersdæk over en vinter og to somre i perioden 1988/89. I forsøgene blev der dels undersøgt opbygninger helt uden dampbremse, nogle med polyethylenfolie og endelig nogle med Hygrodiode som dampbremse. Nogle sektioner af taget var isolerede med Rockwool, mens andre havde skumplast (PIR lagt ovenpå polystyren). Alle varianter var yderligere opdelt, således at en del af taget lå i skygge, mens en anden del var eksponeret for solen. Det blev fundet for begge typer isoleringsmateriale, at den tilførte fugtmængde i de tagsektioner, der var eksponerede for sol, tørrede ud, når Hygrodioden anvendtes som dampbremse.

Supplerende til artiklens oplysninger kan det her nævnes, at der på foranledning af Dansk Forening for Skadesforsikring, med forsøgstart i juli 1990, undersøges fugtforholdene i uventilerede tagkassetter over samme forsøgshus på SBI. Disse kassetter har enten dækket på den udvendige side af isoleringen eller er isolerede såvel over som under dækket. En udtørring fra disse kassetter forventes først at vise sig i løbet af sommeren 1991.

I førnævnte artikel omtales endvidere, at firmaet Bygge- og Miljøteknik a/s har anvendt Hygrodioden i renoveringen af fugtskadede tagkonstruktioner, som erstatning for plastdampbremsen. Målinger på disse byggerier pågår stadig.

6 KONKLUSION

Hygrodiodemembranen består af en filt af fungicid imprægnerede syntetiske og organiske fibre, der er pålagt striber af damptæt plast forskudt på filtens to sider. Herved haves et produkt, der alt i alt er ligeså damptæt som en tynd polyethylenfolie, og som derfor kan anvendes som dampbremse i eksempelvis konstruktioner af flade tage. Ved at udnytte filtens vandsugende evne er det endvidere muligt at udtørre eventuel overskydende fugt i en sådan konstruktion under forhold, hvor der optræder sommerkondens på membranen. Da fugten således ikke, som når en traditionel dampbremse anvendes, er spærret inde mellem to tætte lag, er det ikke længere nødvendigt at ventilere taghulrummet med udeluft, og derved er faren for en konvektiv tilførsel af fugt nedefra elimineret.

Der er foretaget målinger af Hygrodiodens basale fugttransportparametre. I den tørre tilstand yder Hygrodioden en dampdiffusionsmodstand på omkring $100 \text{ GPa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s/kg}$ (200 PAM). Dette svarer omtrentligt til modstanden af en 0,05 mm polyethylenfolie. Når Hygrodioden er våd, leder den fugten igennem i væskeform. I forsøg er modstanden mod denne transport fundet at kunne ækvivaleres med en dampdiffusionsmodstand på cirka $2 \text{ GPa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s/kg}$. Den våde, udtørrende transport kan derfor ske mindst en størrelsesorden hurtigere end den diffusionstransport, der vil opfugte et tag.

Med disse effektive transportmodstande er der foretaget talrige beregninger af fugtforholdene i kolde og varme, uventilerede tage, der har Hygrodioden som dampbremse. Sådanne beregninger viser, at Hygrodioden er i stand til ikke blot at udtørre den fugtmængde, der trænger ind i taget ved diffusion om vinteren, men yderligere at kunne udtørre typisk forekommende mængder byggefugt indenfor den første eller anden sommersæson af byggeriets levetid.

På Danmarks Tekniske Højskole har Hygrodioden dels været anvendt som dampbremse i små tagfelter over et forsøgshus, dels har den været anvendt i forbindelse med en renovering af et eksisterende varmt tag.

De små tagfelter befandt sig over et rum med boligklima (varierende fugtindhold over året) og over et andet rum, der holdt et konstant højt fugtindhold, svarende til rumklimaklasse 3. 15 af de i alt 16 tagfelter simulerede små varme tage, der havde forskellige materialer som dæk, og som enten var isolerede med mineraluld eller polystyren eller med kombinationer heraf. Et enkelt tagfelt havde et koldt krydsfinersdæk. Felterne kunne tages ned og vejes på en nøjagtig vægt, og forløbet af deres totale fugtindhold blev fulgt i halvandet år efter tilsætning af ca. 400 gram vand pr. kvadratmeter tagareal i maj måned det første år. Denne fugtmængde tørrede ud af elementerne indenfor ganske få sommermåneder. Den mindre genopfugtning i løbet af den efterfølgende vinter blev ligeledes tørret ud i løbet af de første måneder af den anden sommer.

Ved renoveringen af taget over en auditoriebygning på DTH, blev Hygrodioden lagt oven på det eksisterende bræddedæk. Herpå blev der lagt ny mineraluldsisolering, hvorpå der blev lagt en filt, der var vædet med cirka 1 kg vand pr. kvadratmeter. Fugtmålerondeller blev brugt til at følge fugtforløbene i toppen og bunden af isoleringen såvel et sted, hvor den afsluttende EPDM-dug var mørk og ubeskyttet som et sted, hvor den var beskyttet af en stenballast. Der sås ingen udtørring det første års tid, hvilket en inspektion af tagdugen gav forklaringen på - der blev fundet et hul i den. Anden sommer tørrede området under den mørke dug ud, mens der efter den tredje sommer er tegn på, at det samme er sket for området under stenballasten.

De forskellige forsøg og beregninger viser alle, at Hygrodioden er i stand til at udtørre byggefugt fra kolde og varme, uventilerede konstruktioner af flade tage. Den har yderligere en tilstrækkelig stor diffusionsmodstand, til at opfugtningen om vinteren ikke kan blive kritisk og ikke større end at denne fugt let forsvinder først på sommeren. Ved at sammenholde forsøgs- og beregningsresultater fra forskellige typer af tage kan der opstilles følgende betingelser for en optimal virkning af Hygrodioden:

- Tagfladen bør være mørk og fri for skygge, så der fås høje overtemperaturer om sommeren. Sådanne høje temperaturer og dermed damptryk medvirker til at drive fugten ned gennem isoleringen til kondensering på Hygrodioden.
- Isoleringen bør have en høj damppermeabilitet (mineraluld).
- Underlaget for Hygrodioden (dækket eller loftsbeklædningen) bør enten være permeabelt eller have gode evner til midlertidigt at kunne absorbere fugten.

LITTERATUR

- BR 82, "Bygningsreglementet 1982", Byggestyrelsen, 1982.
- Glaser, H., "Graphisches Verfahren zur Untersuchung von Diffusionsvorgängen", Kältetechnik, 11, heft 10, pp. 345-349, 1959.
- Jensen, S.Ø., "Måle og styresystem i et eksperimenthus med en tagrumssolfanger", Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole, rapport nr. 88-2, 1988.
- Korsgaard, V., Prebensen, K. & Bunch-Nielsen, T., "Ventilation af flade tage", COWiconsult, publ. nr. 472, 1984.
- Korsgaard, V., "Hygro Diode Membrane: A New Vapor Retarder", ASHRAE/DOE/BTECC Conference: "Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings III", Clearwater Beach, Florida, December 2-5, 1985.
- Korsgaard, V., "Hygro Dioden - en ny dampbremse", Byggeindustrien 6/7, 1987.
- Korsgaard, V. & Pedersen, C. R., "Transient Moisture Distribution in Flat Roofs with Hygro Diode Vapor Retarder", ASHRAE/DOE/BTECC/CIBSE Conference: "Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings IV", Orlando, Florida, December 4-7, 1989.
- Korsgaard, V. & Bunch-Nielsen, T., "Det kolde tag vil få en renæssance", Byggeindustrien 4, 1990.
- Pedersen, C.R., "Combined Heat and Moisture Transfer in Building Constructions", Licentiatafhandling, Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole, meddelelse 214, 1990.
- SBI-anvisning 139, "Bygningers fugtisolering", Statens Byggeforskningsinstitut, 1984.
- Statens Byggeforskningsinstitut, SBI-Agrement 90-9 for Icopal Hygrodiode, 1990.



Fabriksfremstilling af uventilerede lukkede træ-tagkassetter med Hygrodiode dampbremse.
Factory production of unventilated cold-deck roof cassette with Hygrodiode vapour retarder.



Varmt-tagskonstruktion med Hygrodiode dampbremse.
Warm-deck roof system with Hygrodiode vapour retarder.