Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Vandfordampning i svømmehaller

Hyldgård, Carl-Erik

Publication date:
1982

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

Link to publication from Aalborg University

Citation for published version (APA):
Hyldgård, C-E. (1982). *Vandfordampning i svømmehaller*. Institut for Bygningsteknik, Aalborg Universitet. Aalborg Universitetscenter. Instituttet for Bygningsteknik. Report Nr. R8211

General rights
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy
If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

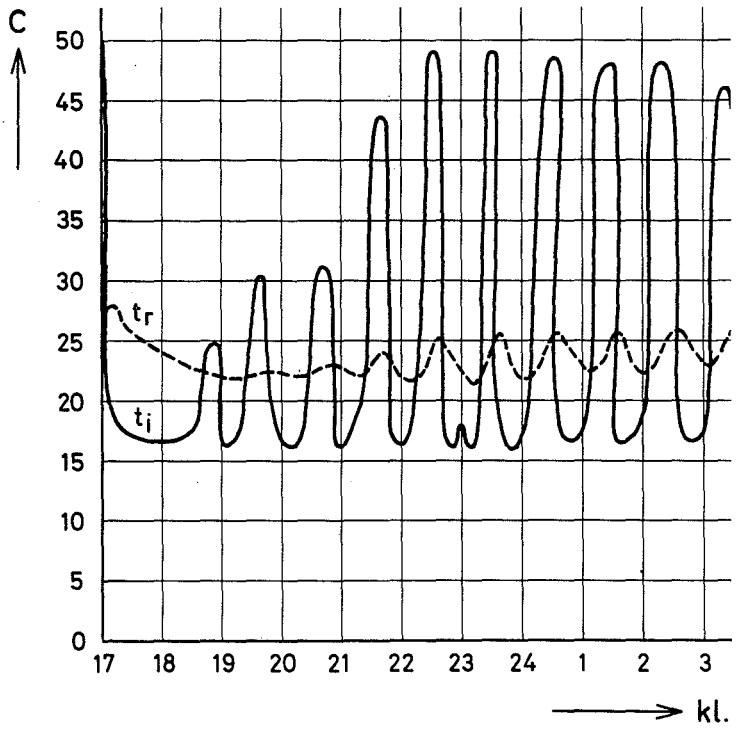
Downloaded from vbn.aau.dk on: April 20, 2024

INSTITUTTET FOR BYGNINGSTEKNIK

INSTITUTE OF BUILDING TECHNOLOGY AND STRUCTURAL ENGINEERING

AALBORG UNIVERSITETSCENTER · AUC · AALBORG · DANMARK

VANDFORDAMPNING I SVØMMEHALLER



CARL ERIK HYLDGÅRD

JULI 1978, REVIDERET 1980 OG 1982

ISSN 0105-7421 RAPPORT NR. 8211

Indholdsfortegnelse

		Side
1.	Indledning	1
2.	Model	2
2.1.	Beskrivelse af rummodel	2
2.2.	Regulering af rumtemperatur	3
2.3.	Regulering af relativ luftfugtighed	4
2.4.	Regulering af vandtemperatur	5
2.5.	Regulering af lufthastighed	6
3.	Måleteknik og målefejl	6
3.1.	Måling af rumtemperatur	6
3.2.	Måling af relativ fugtighed	9
3.3.	Måling af vandtemperatur	15
3.4.	Måling af lufthastigheder ved vandoverfladen	15
3.5.	Måling af fordampet vandmængde	21
4.	Måleresultater for model	23
4.1.	Diagrammer for vandfordampning	23
4.2.	Sammenligning med tidligere resultater	27
4.3.	Bølger	29
5.	Fuldskalamålinger	29
5.1.	"Haraldslund" i Aalborg	29
5.2.	Sofiendalsskolens svømmehal, Aalborg	32
5.3.	Års svømmehal	32
5.4.	De badendes vandfordampning	38
6.	Varmetilførsel til bassinvandet	39
6.1.	Måleresultater for model	39
6.2.	Fuldskalamålinger	41
6.3.	Konklusion	42
7.	Konsekvenser af resultaterne	44
7.1.	Projektering af nye svømmehaller	44
7.2.	Eksisterende svømmehaller	47
8.	Kritik og konklusion	48
	Litteratur	49
9.	Tillæg 1	50
9.1.	Fordampningens størrelse	50
9.2.	Belysning og solindfald	50
9.3.	Ventilationsluftmængder	52
9.4.	Bassinvandets cirkulation	53
9.5.	Førstegangsopvarmning	53
9.6.	Konklusion	55
10.	Tillæg 2, genoptræningsbade	56
10.1.	Beskrivelse af model	56
10.2.	Vandfordampning	56
10.3.	Tilført effekt til vandet	56
10.4.	Konklusion	61

1. Indledning

I mange år har projekterende ingeniører ved beregning af vandfordampning i svømmehaller anvendt den empiriske formel:

1.1 $$W = (25+19 \cdot v)(x_m - x_r)$$

hvor: W = vandfordampningen i g/m^2h,

v = lufthastigheden ved vandoverfladen i m/s,

x_m = vandindholdet i mættet luft ved vandets temperatur i g/kg og

x_r = rumluftens vandindhold i g/kg.

Uoverensstemmelser

I faglitteratur inden for området vandfordampning findes der andre formler, der stort set er opbygget efter samme princip, eller der angives diagrammer som resultat af målinger. Imidlertid synes der ikke at være udført målinger, der direkte tager sigte på vandfordampning i svømmehaller, hvor der normalt er tale om lufttemperaturer, der ligger lidt højere end vandtemperaturen. Anvender man alligevel de forskellige kilder til beregning af vandfordampningen i svømmehaller, vil fordampningstal for de samme rumtilstande afvige fra hinanden med en faktor noget større end 2, hvilket i høj grad kunne tilskynde til en nærmere undersøgelse.

Mistanke

I foråret 1976 foretog en gruppe studerende ved Aalborg Universitetscenter klimamålinger i svømmehallen "Haraldslund" i Aalborg. I denne forbindelse blev den relative fugtighed i indblæsnings- og udsugningsluften målt, vandfordampningen beregnedes efter formel 1.1, vandbalancen blev opstillet, og viste - en kolossal ubalance. Der blev søgt og fundet målefejl, men ingen så store, at balancen kunne bringes blot nogenlunde til at stemme.

Starten

Inden for området Klima- og installationsteknik ved Instituttet for Bygningsteknik, Aalborg Universitetscenter gennemførtes da i efteråret 1976 afgangsprojektet "Fordampning fra svømmebassiner". Ved instituttet var der næsten alt nødvendigt udstyr til et sådant projekt, og der var bestilt klimamåleudstyr, blandt andet en datalogger, der i høj grad ville kunne gavne projektet. Selvom dette eksamensprojekt som forventet efterlod en række uløste regulerings- og måletekniske vanskeligheder, så tydede resultatet alligevel på, at alle hidtil kendte formler og diagrammer gav alt for store fordampningstal.

Målet

Forskningsprojektet "Vandfordampning i svømmehaller" blev derfor med velvilje fra instituttet samt fra AUC's forskningsråd påbegyndt i februar 1977. Den første rapport forelå i 1978. I 1980 blev tillæg 1, afsnit 9 tilføjet og i 1982 tilføjedes afsnit 10, der omhandler genoptræningsbade. Ved den sidste revision i 1982 er figurerne 24.1, 24.2 og 24.3 gjort mere letlæselige, men der er ikke ændret ved værdierne.

Aalborg i juli 1982.

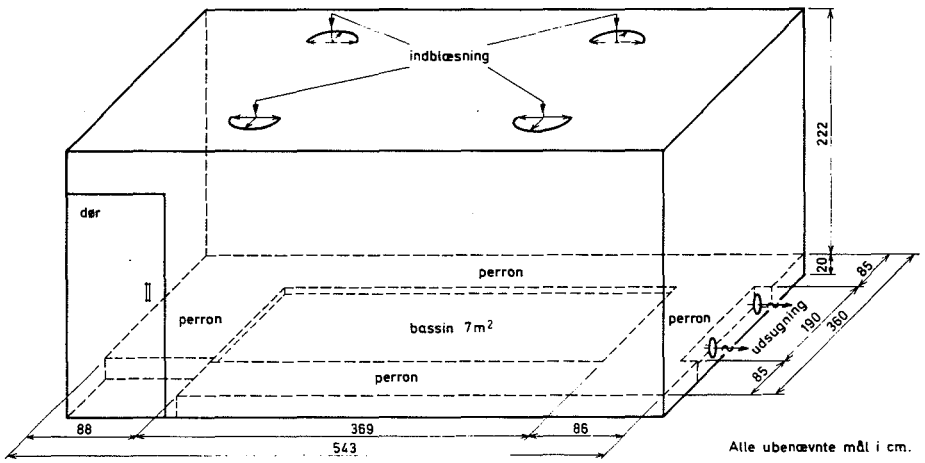
Carl Erik Hyldgård

2. Model

Det kunne synes nærliggende at iværksætte målinger af vandfordampning i en eksisterende svømmehal med affugtningsanlæg. Men mange forhold umuliggør dette. Mens svømmehallen var i brug kunne der ikke måles på grund af de badendes indflydelse. Lufttemperaturer, vandtemperaturer og luftfugtigheder kunne ikke varieres frit, og desuden ville lufthastigheden ved vandoverfladen sandsynligvis ikke kunne varieres tilstrækkeligt med det eksisterende ventilationsanlæg. Alt dette kombineret med regulerings- og måletekniske problemer pegede på en løsning med grundlæggende målinger i en mindre svømmehalsmodel suppleret med målinger i eksisterende svømmehaller.

2.1. Beskrivelse af rummodel

På figur 2.1 ses en skitse over den anvendte rummodel. Rummets oprindelige indvendige mål er LxBxH = 5,43 m x 3,60 m x 2,22 m. Vandbassinet er fremstillet ved hjælp af en 20 cm høj rektangulær ramme af halvtømmer, hvorover der er lagt en 0,15 mm plastfolie. Udenom bassinet er lagt spånplader i 20 cm højde, således at der dannes et kunstigt gulv (perroner) rundt om bassinet. Da døren åbner indad, er der ikke hævet gulv lige indenfor denne. Ligeledes måtte der være en lille udskæring indenfor de lavtsiddende udsugningsventiler.

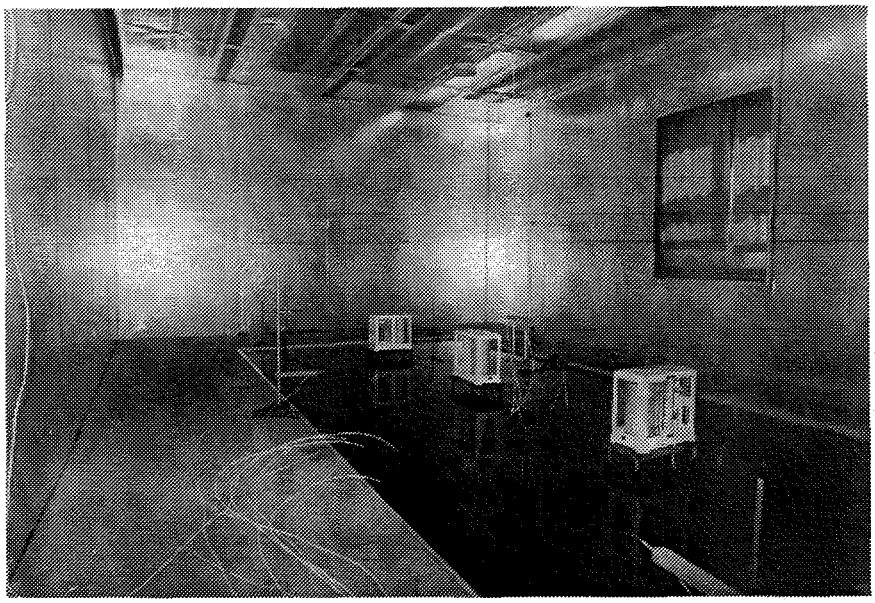


Figur 2.1. Rummodel med "svømmebassin"

På billedet figur 3.1 ses rummodellen indvendig. Vægge og loft består af et rammesystem af stålprofiler. På den indvendige side af rammesystemet er der spændt 20 mm Rocklitplader, der igen er beklædt med alukraft. I den ene endevæg og ligedes i den ene sidevæg er der indsat en termorude. I loftet er der indlagt tre rækker glasplader dels beregnet til almenbelysning af rummet, dels til projektørbelysning for fotografering af røgforsøg. På loftets underside er der klæbet 4 stk. elvarmetapeter på hver 400 W.

I loftet er ligeledes anbragt 4 stk. anemostater fabrikat SF type CTPB-1. Anemostaterne kan drejes og spaltehøjden reguleres. Fire anemostater er mere end nok til dette rum, men i tilførselskanalerne er

Figur 3.1.
Rummodellens indblæsning og udsugning

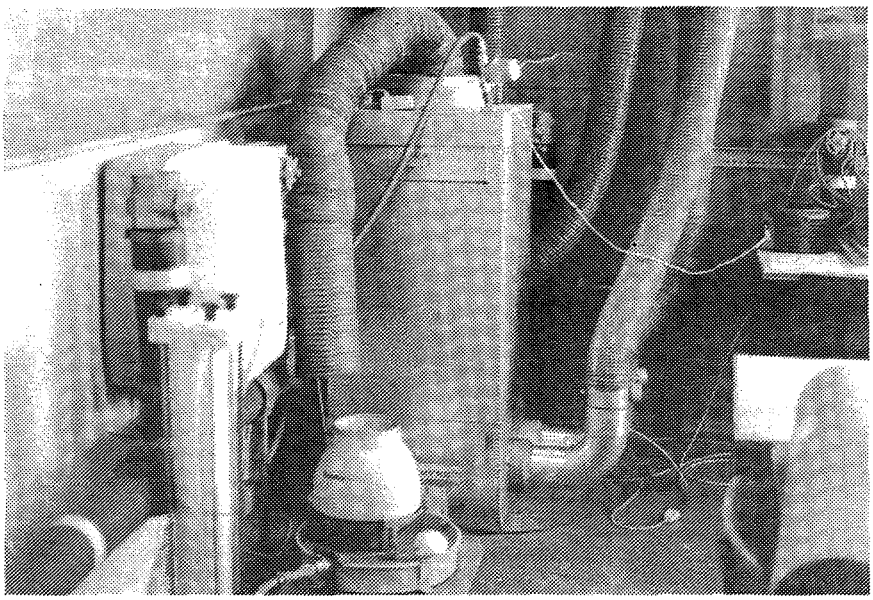


der indsat spjæld, så et vilkårligt antal af anemostaterne kan anvendes. To af de fire anemostater ses på billedet figur 3.1, og herpå ses ligeledes udskæringen i det hævede gulv for udsugningsåbningerne.

2.2. Regulering af rumtemperatur

Indblæsningsaggregatet indeholder en varmeflade, der forsynes med varmt vand fra en elektrisk vandvarmer. Vandmængden reguleres af en Danfoss termostatventil, hvis føler er anbragt på væggen i rummet 20 cm over perronhøjde.

Figur 3.2.
Indblæsningsaggregat med indbygget varmeflade og "udvendig" befugter



Indblæsningsaggregatet ses på figur 3.2, og her ses også de fi-

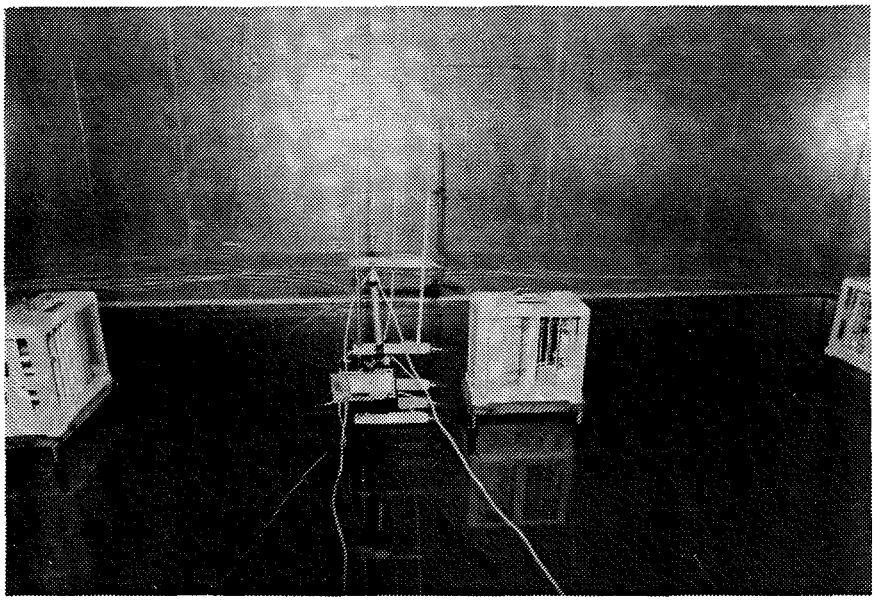
re fleksible slanger, der fører luften til anemostaterne i loftet.

Med dette temperaturreguleringssystem er det muligt at holde en rumtemperatur indenfor et område på $\pm$ 0,3 C, når de ydre påvirkninger ikke varierer for meget som f.eks. i løbet af en nat. Da der ikke er nogen køleflade i indblæsningsaggregatet, virker reguleringen naturligvis kun når temperaturen uden for klimakammeret, d.v.s. i laboratoriet, er lavere end rumtemperaturen.

2.3. Regulering af relativ luftfugtighed

At fastholde en relativ luftfugtighed i rummet med tilfredsstillende snæver tolerance voldte i begyndelsen en del besvær. Det viste sig nemlig, at de mindste befugtere, der kunne fås, var alt for store til et rum med et rumvolumen på 47 m^3. Når befugtningen var for kraftig, steg den relative fugtighed så hurtigt, at hygrostaten ikke kunne nå at stoppe befugtningen, før rummets relative fugtighed var blevet alt for høj.

På billedet figur 3.2 ses en interimistisk opstilling til regulering af den relative fugtighed. Friskluften til indblæsningsaggregatet tages fra selve laboratoriet via en fleksibel slange. Denne slanges munding er anbragt et passende stykke over en almindelig forstøvningsbefugter. For at der ikke skal afsættes kalk på alle overflader, forsynes befugteren med afsaltet vand via en svømmerventil.



Figur 4.1. Målestativ med hygrostat og termoelementer

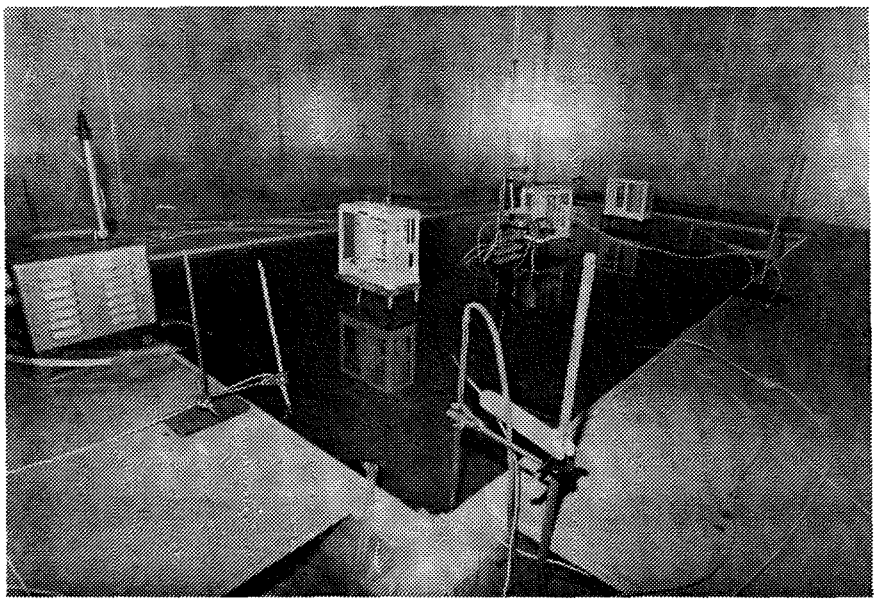
På billedet figur 4.1 ses hygrostaten anbragt 20 cm over vandoverfladen på et fotostativ, der står i midten af bassinet.

Hygrostaten starter og stopper befugteren efter behov. Da en stor del af vanddampen fra forstøvningsbefugteren afgives ved siden af indsugningen til laboratoriet uden om klimarummet, opnås passende langsomme op- og nedture for rumluftens fugtighed under henholdsvis gangtid og standtid for befugteren, hvorved hygrostaten kan nå at reagere, inden udsvingene er blevet for store.

Kobling mellem reguleringssystemerne

Det viste sig, at der kunne opstå en uheldig kobling mellem temperaturreguleringssystemet og fugtighedsreguleringssystemet. Når befugteren startede, faldt indblæsningstemperaturen på grund af befugtningen. Dette medførte naturligvis et fald i rumtemperaturen med stigende relativ luftfugtighed som en direkte følge. Herved stoppede hygrostaten efter nogen tid befugteren, rumtermostaten reagerede på den lave lufttemperatur, indblæsningstemperaturen steg, så lufttemperaturen nu blev alt for høj o.s.v. Udsvingene i rumtemperatur og relativ fugtighed blev meget store, hvilket måtte undgås ved at gøre det ene reguleringssystem relativt hurtigere end det andet. Det viste sig tilstrækkeligt blot at fjerne dækslet fra hygrostaten. Med dette system kan rumluftens fugtighed holdes på den ønskede værdi $\pm$ 2% RF og rumlufttemperaturen som beskrevet i afsnit 2.2 på ønsket værdi $\pm$ 0,3 C, hvilket må være tilfredsstillende for dette projekt.

2.4. Regulering af vandtemperatur



Figur 5.1.
Udsnit af rummodel set fra døren

Vandtemperaturen reguleres af en Philips Cyclotherm. Denne pumpe, der ses helt til venstre på figur 5.1, suger via en slange vand ind fra bassinet til en beholder, der indeholder elektriske varmelegemer på 800 W, et kontakttermometer og en kølespiral. Fra beholderen pumpes vandet gennem en slange ud i bassinet, hvorved vandet heri sættes i en langsom rotation. Kontakttermometret slutter og afbryder strømmen til varmeelementerne, således at den ønskede vandtemperatur opnås. Når lufttemperaturen er høj og fordampningen fra overfladen lille, skal bassinvandet køles. Dette gøres ved at sende en tilstrækkelig konstant strøm af kølevand gennem kølespiralen, hvorefter kontakttermometret og varmelegemerne sørger for opvarmning til den ønskede temperatur.

Med dette reguleringssystem kan vandtemperaturen, når først ligevægt i rumtemperatur og fugtighed er opnået, holdes indenfor målenøjagtigheden på de anvendte termometre, d.v.s. 0,1 C, hvilket er fuldt ud tilstrækkeligt til formålet.

Luftens hastighed hen over vandoverfladen kan varieres på flere måder. Ventilationsluftmængden kan varieres, idet indblæsnings- og udsugningsventilator forsynes med strøm fra en frekvensomformer. Derudover kan som før omtalt indblæsningsanemostaterne i loftet varieres i spaltehøjde, og f.eks. kan spjældene for to af dem lukkes, når højere hastighed skal opnås.

2.5. Regulering af lufthastighed

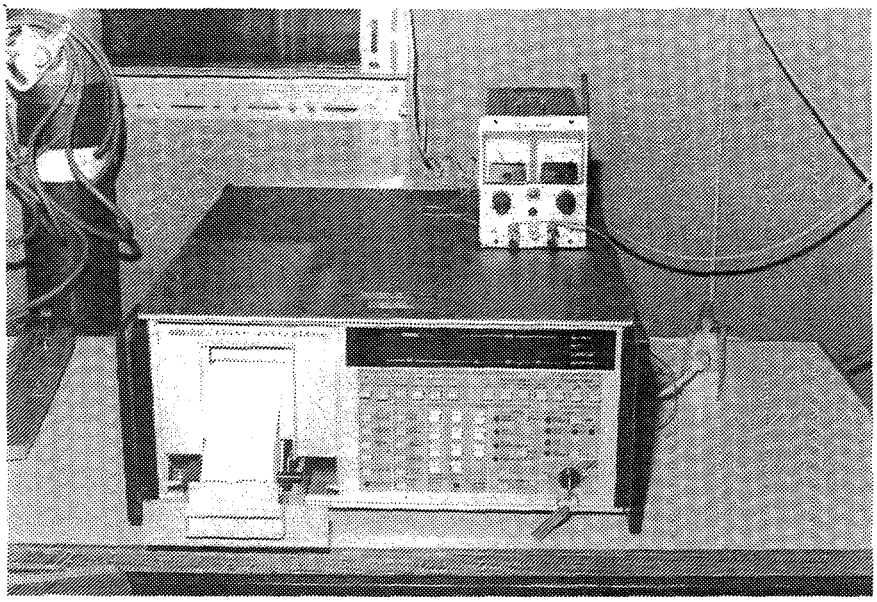
Med dette indblæsningssystem er det naturligvis ikke muligt at holde samme lufthastighed overalt ved vandoverfladen, ligesom hastigheden ethvert sted varierer med tiden. Sådanne variationer vil være endnu større i større rum og altså også i store svømmehaller. Men her er lufthastighederne ved vandoverfladen gjort så ensartede som muligt for at få pålidelige resultater til anvendelse for svømmehaller med forskellige indblæsningsmetoder og lufthastigheder.

Især i starten af dette projekt undergik måleteknikken hyppige ændringer. I begyndelsen var nemlig resultaternes indbyrdes overensstemmelse ringe, men efterhånden som reguleringsteknikken og måleteknikken blev forfinet, opnåedes bedre overensstemmelse. Hele denne udvikling skal ikke beskrives her, da dette ville føre for vidt. I stedet skal i det følgende beskrives den måleteknik, der blev fundet anvendelig.

3. Måleteknik og målefejl

Rumtemperaturerne måles med Chromel-Alumel ISA type K termoelementer og en datalogger. Fra fabrikken er oplyst, at dataloggerens opløsningsevne = $\pm$ 0,1 C og systemnøjagtigheden over 90 dage = $\pm$ 0,5 C. Men ved jævnlig kontrol af alle målepunkter i vand og med Assmannpsykrometer viste det sig, at når blot korroderede loddepunkter blev udskiftet, var der en konsekvent målefejl på 0 ved 32 C stigende til -0,3 C ved 24 C. Korrigeres der for denne målefejl, kan der derfor opnås en målenøjagtighed på $\pm$ 0,1 C.

3.1. Måling af rumtemperatur



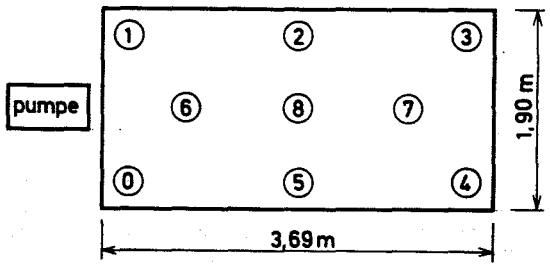
Figur 6.1.
Datalogger

På figur 6.1 ses den anvendte datalogger, fabrikat Fluke. Ovenpå dataloggeren står en strømforsyningsenhed, der leverer konstant spænding til en fugtighedsmåler, som var til midlertidig afprøvning.

Placering af målepunkter

Til måling af rumtemperaturer er der ialt 13 målepunkter anbragt i positioner som vist på følgende figur.

Figur 7.1. Målepunkternes placering



På figur 7.1 er målepunkterne markeret med 0 og positionerne er forsynet med numre. I positionerne 0-7 er termoelementerne anbragt i 20 cm højde over vandoverfladen. I position 8 er anbragt målepunkter i højderne 1, 5, 10, 20, 40 og 170 cm over vandoverfladen.

På figur 5.1 ses nogle af målepunkterne. Målepunkterne 0-5 er anbragt ved hjælp af laboratoriestativer, 6 og 7 på de søjlebårne måleøer, der bærer termohygrograferne, og målepunkterne i position 8 som nævnt på et fotostativ.

Temperaturgradienter

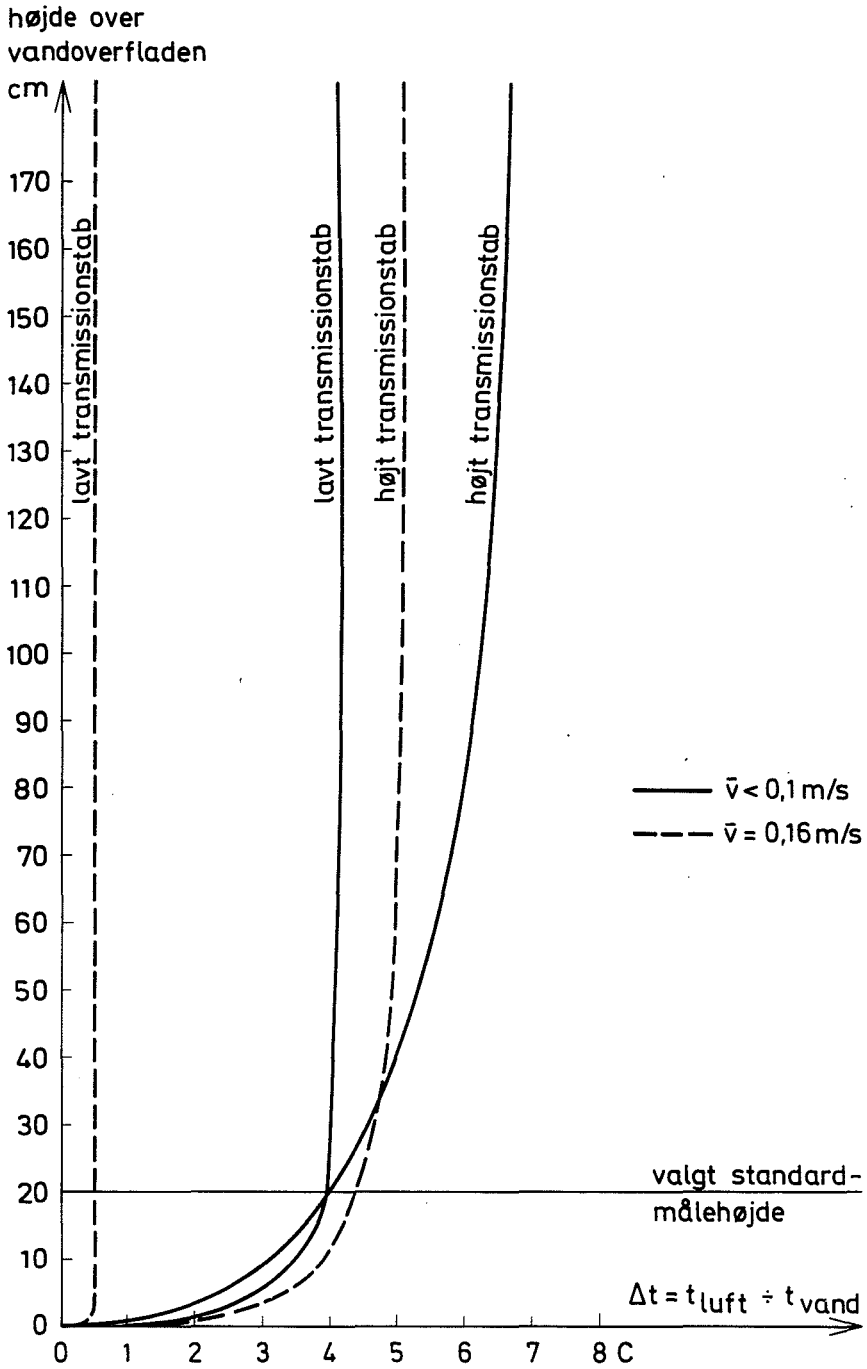
For at få et indtryk af vandets indflydelse på lufttemperaturen er nogle resultater af målingerne i forskellige højder i position 8 illustreret på figur 8.1.

Målingerne har vist, at vandtemperaturen indenfor området 24-28 C ikke har nogen betydning for temperaturgradienten, men at det alene er forskellen mellem luftens og vandets temperatur, der er afgørende. F.eks. giver en vandtemperatur på 24 C og en lufttemperatur målt i 20 cm højde på 28 C samme temperaturfordelingskurve som en vandtemperatur på 28 C og en lufttemperatur målt i 20 cm højde på 32 C.

Kurverne er optaget for indblæsning af varm luft, d.v.s. for transmissionstab ud af modellen. Når lufthastigheden ved vandoverfladen er lav nemlig < 0,05 m/s og luftskiftet = 3 h^{-1}, vil den varme luft, der blæses langsomt ind gennem loftanemostaterne, ikke kunne gennemskylle rummet, men skabe en "varmepude" i rummet, der er varm foroven og kold nederst. Det siger sig selv, at transmissionstabet under disse forhold får betydning for indblæsningstemperaturen og dermed for temperaturfordelingen, som det fremgår af figuren. Ved højere hastigheder ved vandoverfladen fås følgelig lavere temperaturgradienter.

Valg af målehøjde

Dels som følge af disse temperaturforhold, dels som følge af fugtighedsfordelingen, som der redegøres for i det følgende afsnit 3.2, vælges at måle lufttemperaturer i højden 20 cm over vandoverfladen. Som repræsentativ rumtemperatur for hver måleperiode tages da et gennemsnit af temperaturerne i 20 cm højde i positionerne 0-8.



Figur 8.1. Temperaturgradienter over vandoverfladen.
Lufthastighed 2 cm over vandoverfladen = v. Kurverne gælder for vandtemperaturer mellem 24 og 28 C.

Måleusikkerhed

Som før nævnt måles temperaturen i hver position på et givet tidspunkt med en nøjagtighed på $\pm$ 0,1 C. Men da hver måleperiode strækker sig over adskillige timer, varierer temperaturen i hvert målepunkt med tiden. Såfremt denne variation over måleperioden er over 0,6 C, kasseres målingen. Forskellen mellem højeste og laveste temperatur på et givet tidspunkt i de forskellige positioner er normalt $\leq$ 0,4 C. Udregnes standardafvigelsen for n = 288 målte temperaturer i 20 cm højde i en typisk måleperiode på 16 timer, hvor der måles hver halve time fås:

$$s_t = \sqrt{\frac{\Sigma(t-\bar{t})^2}{n-1}} = 0{,}21 \text{ C}$$

Det vil derfor nok være rimeligt at regne med en usikkerhed på den fundne middeltemperatur på $\pm$ 0,2 C. Som det senere vil fremgå af måleresultaterne, er dette en acceptabel usikkerhed inden for de rumtilstande, der bør herske i en svømmehal.

3.2. Måling af relativ fugtighed

Der skal ikke lægges skjul på, at ud af de fire parametre: lufttemperatur, luftfugtighed, lufthastighed og vandtemperatur volder måling af rumluftens relative fugtighed de største problemer. Det eneste tidligere kendte måleinstrument, der har vist sig pålideligt, må siges at være Assmann psykrometeret. Men da dette instrument jo måler øjebliksværdier, må rumluftens relative fugtighed måles af andre skrivende instrumenter. Af figur 5.1 fremgår, at der på øer i bassinet er anbragt tre termohygrografer, der løbende registrerer den relative fugtighed. De tre hygrografer er placeret, så de hver skal dække ca. en trediedel af vandoverfladen.

Fugtighedsgradienter

For at få et indtryk af, hvorledes den fordampede vandmængde fordeles i rummet, er den relative fugtighed målt i forskellige højder over vandoverfladen med Assmann psykrometer.

Af figur 10.1 fremgår, at den relative fugtighed tæt ved vandoverfladen = 100%, og at den aftager kraftigt indtil en højde af ca. 20 cm over vandoverfladen. Over denne højde aftager fugtigheden kun svagt.

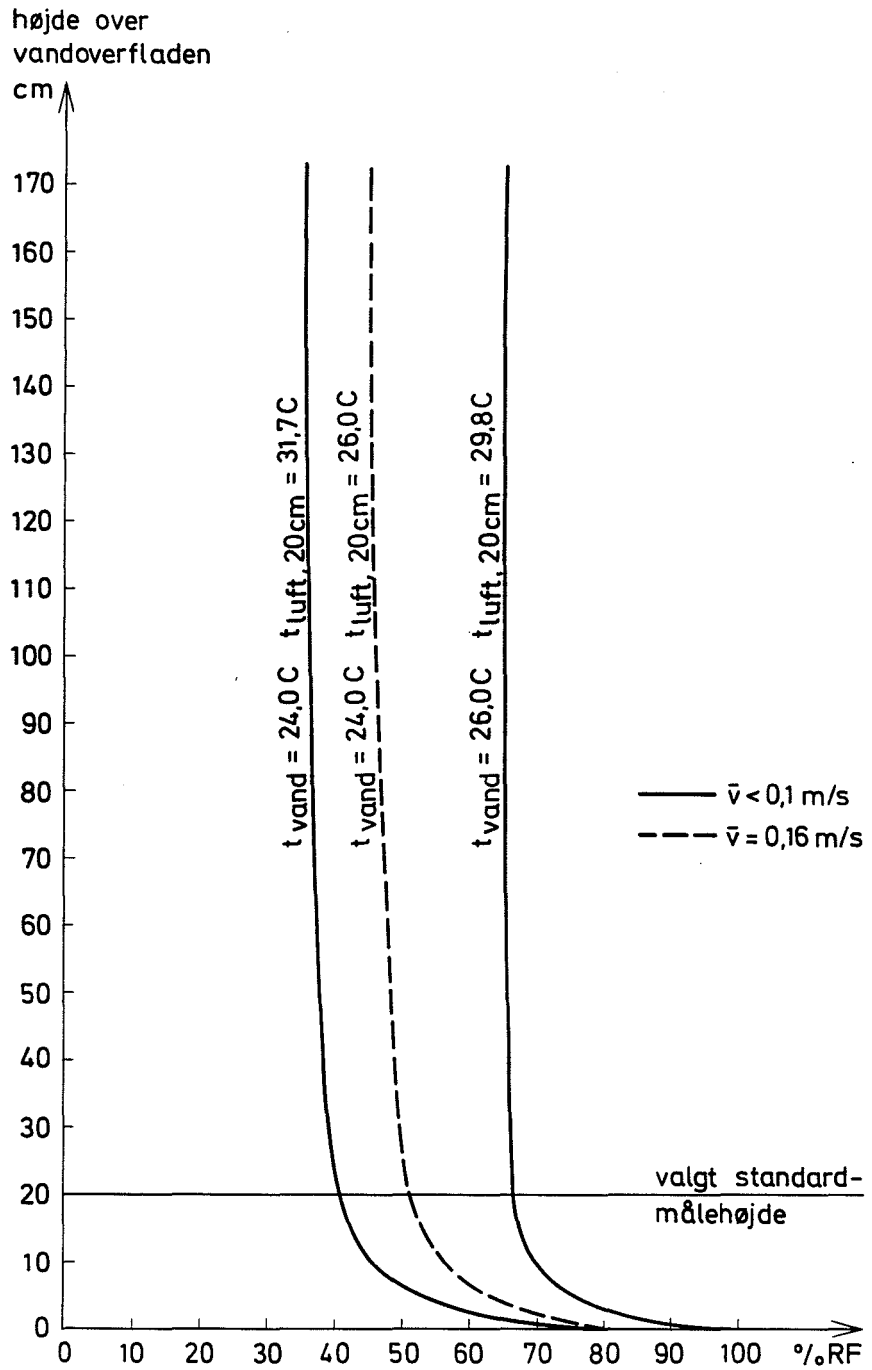
Valg af målehøjde

Som følge heraf vælges at måle den relative fugtighed 20 cm over vandoverfladen. De tidligere nævnte 3 termohygrografer placeret på de tre øer er anbragt i en sådan højde, at midten af hårstrengene er 20 cm over vandet. Men da hårstrengene er lodrette og ca. 10 cm lange, giver termohygrograferne selvsagt ikke nogen nøjagtig måling i 20 cm højde. Derfor anvendes hygrograferne kun til at iagttage forløbet af fugtighedsvariationen hen over overfladen over måleperioden, mens niveauet måles med Assmannpsykrometer ved måleperiodens slutning.

Måleusikkerhed

Ganske vist er målenøjagtigheden for Assmannpsykrometeret opgivet til $\pm$ 1% RF og intet tyder på, at denne nøjagtighed på instrumentet ikke kan holdes. Men på grund af en række problemer er det ikke muligt at opnå denne målenøjagtighed i svømmehalsmodellen.

For det første kommer der, når man åbner døren og går ind i rummet for at måle den relative fugtighed med Assmannpsykrometeret, et pust af kold udeluft ind, som bringer forstyrrelse i luften ved vandoverfladen. Man må derfor vente med at måle, indtil der igen er rolig balance i rummet.



Figur 10.1. Den relative luftfugtigheds variation med højden h over vandoverfladen. Lufthastighed 2 cm over vandoverfladen = v.

For det andet bringer den person, der skal måle, en del forstyrrelse af luftbevægelserne ved sin ånding og sine bevægelser. Det kræver en hel del øvelse og kendskab til luftbevægelser at gøre denne påvirkning mindst mulig. Den bedste måleteknik er at gøre Assmannpsykrometeret klar, hænge det op i et stativ og gå hen i et roligt hjørne langt fra psykrometeret. Der venter man i mindst 3 min., idet det varer så længe, inden psykrometeret har nået den endelige værdi. Så holder man vejret og går langsomt hen og aflæser hurtigt psykrometeret inden personbevægelserne fremkalder ændringer på termometervisningerne.

For det tredie er psykrometerets egen lille ventilator årsag til en del forstyrrelse af rumluften. Røgforsøg viser, at indsugningsåbningerne ikke påvirker luftbevægelserne nævneværdigt, når indsugningen placeres højere end ca. 5 cm over vandoverfladen. Under denne højde dannes der to "cykloner" fra vandoverfladen til indsugningsåbningerne, således at målehøjden ikke klart kan defineres. Afkastet fra psykrometerets indbyggede ventilator virker meget kraftigere på omgivelserne. Anbringes psykrometeret vandret f.eks. 20 cm over vandoverfladen, vil blæsten fra ventilatoren ramme overfladen og fuldstændig ændre luftbevægelser og fugtforhold. Men anbringes psykrometeret lodret, hvilket også er mest naturligt, vil afkastblæsten fortrinsvis forstyrre luftlagene højere oppe end målepunktet ved indsugningen, så at målingen bliver nogenlunde pålidelig.

For det fjerde er der på grund af rumluftens bevægelser forholdsvis hurtige lokale variationer i såvel temperatur som fugtighed. Disse hurtige variationer kan psykrometeret ikke følge helt med i, men de bevirker, at den aflæste relative fugtighed kan svinge i værste fald inden for et område på $\pm$ 4% RF. Nok skal man altså som før nævnt aflæse hurtigt, men samtidig skal man sikre sig, at der aflæses en middelværdi af de hurtige svingninger, og dette kan være vanskeligt.

Af ovennævnte grunde er det rimeligt at skønne en usikkerhed på den aflæste relative fugtighed på $\pm$ 5%. Da denne usikkerhed ikke er helt tilfredsstillende, må der tages forholdsvis mange målinger for med rimelig sikkerhed at kunne lægge en kurve i middelværdien. Da hver måleperiode incl. spildtid normalt varer et døgn, og mange målepunkter må kasseres på grund af for stor variation i blot en af de fire betydende parametre: lufttemperatur, luftfugtighed, lufthastighed og vandtemperatur, hvoraf styring af luftfugtigheden i rummodellen er absolut det vanskeligste, og da der blot ved fastholdelse af én lufthastighed og variation af de tre andre parametre er optaget 63 gældende målepunkter, må det være anskueliggjort, at målingerne tager en vis tid. Til gengæld skulle resultaterne være en hel del mere pålidelige end de tidligere kendte.

Alternativ fugtighedsmåling

Som nævnt ovenfor var den største vanskelighed og fejlkilde måling af den relative fugtighed. Derfor blev der gjort en stor indsats for at forbedre måleteknikken. En stor del af tiden anvendtes et Wallac EP 400 termohygrometer, hvis udgangssignal overførtes til en linieskriver. Idet instrumentet jo bygger på et ligevægtsprincip og hele tiden svinger om denne ligevægt, er tilslutningen til en linieskriver særdeles fordelagtig, idet man på linieskriveren let kan aflæse en middelværdi, hvorimod man ved direkte aflæsning af EP 400 risikerer

at aflæse maksimum eller minimum. Af erfaringer med EP 400 skal nævnes følgende:

For det første skal føleren afvaskes med destilleret vand og genbefugtes med LiCl ca. en gang om ugen selv under kontinuert drift.
For det andet er målingen påvirket af temperaturen, således at der ved højere temperaturer normalt måles for lave værdier.
For de tredie vokser fejlvisningen ved høje (> ca. 65% RF) og ved lave (< ca. 40% RF) relative fugtigheder.

Ovenstående skal ikke opfattes således, at fejlvisningerne er så store, at instrumentet er uanvendeligt. Men i dette projekts temperatur og fugtighedsmåleområde kan usikkerheden ikke med EP 400 bringes ned til de tidligere angivne $\pm$ 5%.

Udvikling af en ny fugtighedsmåler

Derfor blev der i løbet af sommeren 1977 arbejdet på udvikling af en ny og bedre fugtighedsmåler. Da Assmann psykrometeret med måling af tør og våd temperatur har vist sig særdeles pålideligt også ved meget høje og meget lave fugtighedsgrader, var det nærliggende at anvende samme princip. Men strømpen skulle kontinuert holdes våd, og temperaturmålingerne skulle løbende registreres uden for målerummet.

Temperaturmåling

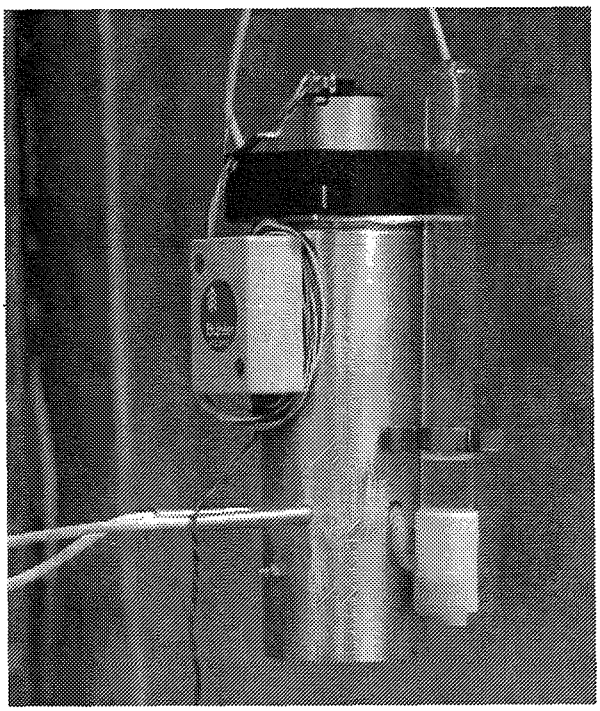
Det var nærliggende at anvende termoelementer og datalogger til temperaturregistreringen, da der som tidligere nævnt ved jævnlig kontrol og korrektion for fejlvisning kunne opnås en målenøjagtighed på $\pm$ 0,1 C, hvilket ville være særdeles fint.

Befugtning af den våde føler

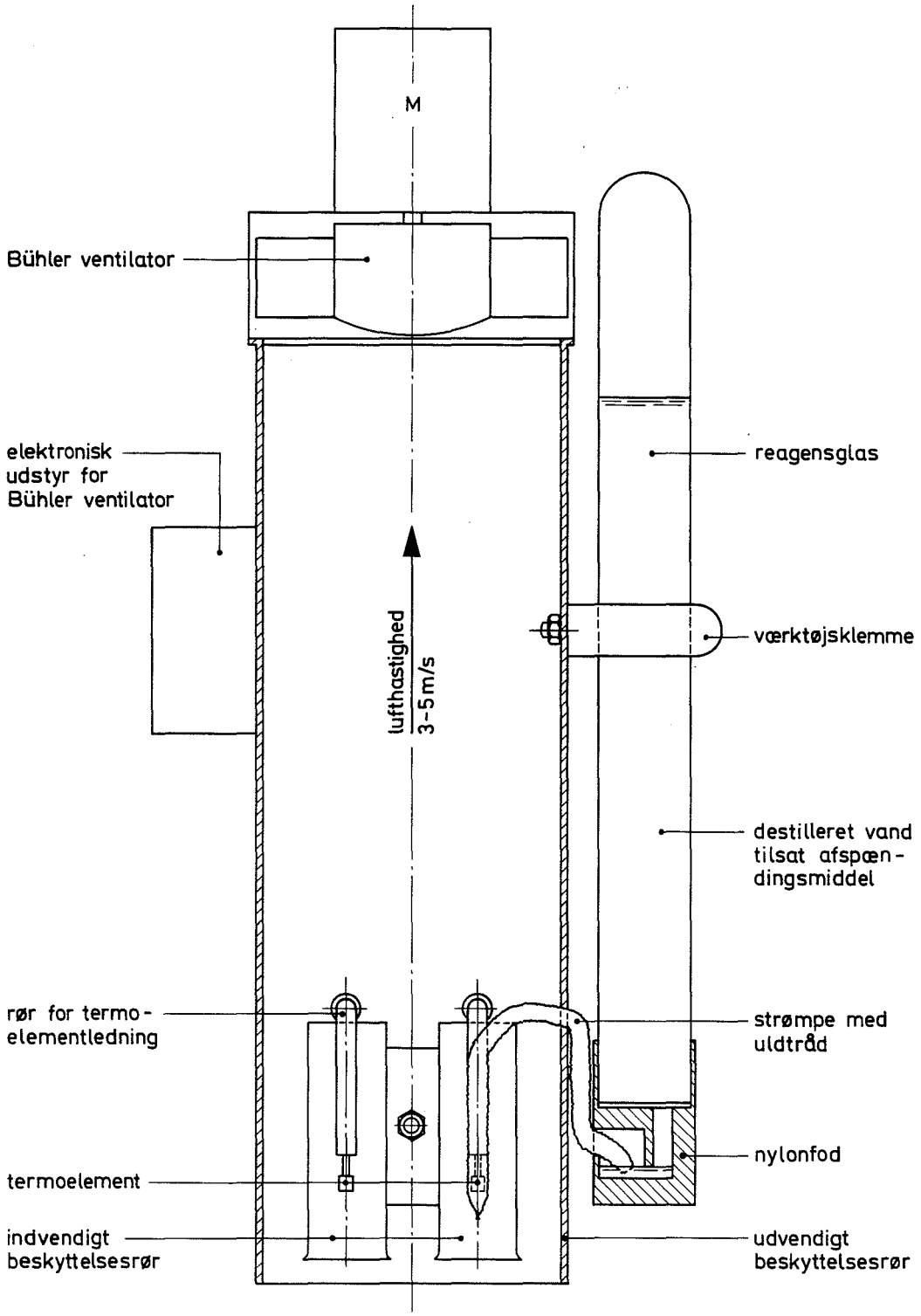
Den kontinuerte befugtning skulle vise sig at blive en meget vanskeligere sag. Mange forskellige strømper og befugtningssystemer blev afprøvet, men enten blev den våde føler ikke befugtet tilstrækkeligt, så den angav for høj temperatur, eller der blev tilført for meget vand, så strømpen dryppede, og derved viste føleren en temperatur, der var påvirket af den temperatur, som vandet havde i beholderen.

Løsningen

På billedet - figur 12.1 og på skitsen figur 13.1 ses resultatet af



Figur 12.1
Fugtighedsmåler


M
Bühler ventilator
elektronisk udstyr for Bühler ventilator
lufthastighed 3-5 m/s
reagensglas
værktøjsklemme
destilleret vand tilsat afspændingsmiddel
rør for termoelementledning
strømpe med uldtråd
nylonfod
termoelement
indvendigt beskyttelsesrør
udvendigt beskyttelsesrør

Figur 13.1.

bestræbelserne. Fugtighedsmåleren består af et udvendigt beskyttelsesrør, der øverst er tilsluttet en lille ventilator. Der er valgt en Bühler ventilator, der ikke har slæbekul og derfor er støjsvag. Ventilatorens omdrejningstal kan reguleres trinløst med en autotransformer 0-12 V. Til det ydre rør er fastspændt to indvendige beskyttelsesrør. Alle rørene er elektrogalvaniseret for at nedsætte strålingspåvirkninger. Gennem siden af det ydre beskyttelsesrør går to små føringsrør for termoelementledningerne, hvis loddepunkter sidder midt i hver sit rør. Omkring det ene loddepunkt er trukket en strømpe af nylonfletværk, termoelementledningen er ført ud gennem et hul i siden af strømpen, og denne går som vist til "selvvandingssystemet". For at give strømpen tilstrækkelig hygroskopisk sugeevne er der trukket en uldtråd gennem den, og uldtråden er ført helt ned forbi loddepunktet. Ved at forskyde reagensglasset op og ned i "værktøjsholderen" kan vandtilførslen forholdsvis let reguleres, så der ikke drypper vand fra strømpen.

Den sidste vanskelighed

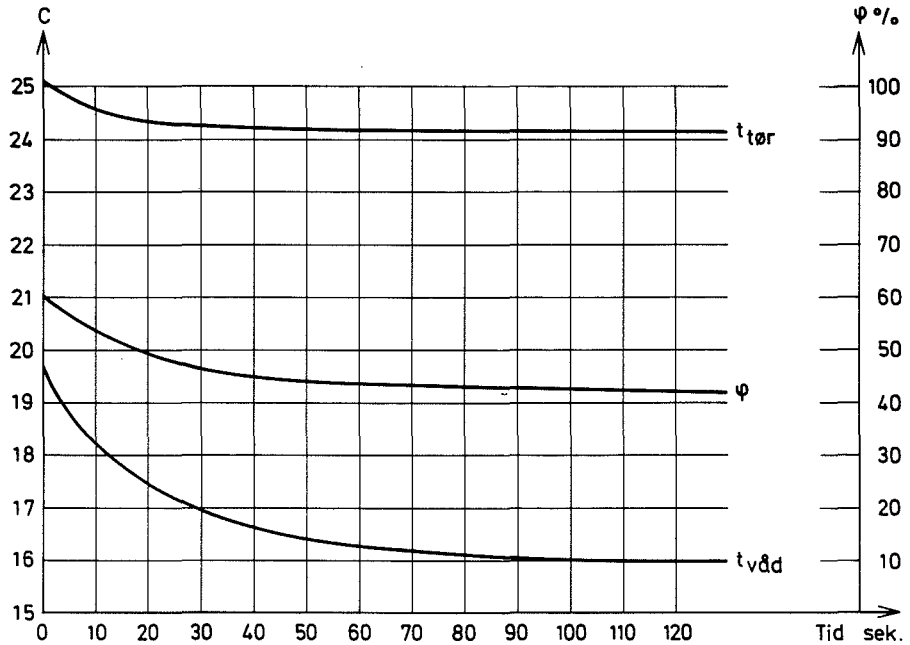
Det sidste problem med udvikling af måleren skal omtales nærmere. Det viste sig, hver gang en ny strømpe blev påsat, at den virkede fint ved det første glas vand. Men når glasset blev fyldt igen, ville strømpen ikke suge vandet op. Løsningen var tilsætning af afspændingsmiddel til vandet. Nogle få dråber pr. liter vand, af samme type som anvendes i opvaskemaskiner, for at opnå dråbefri tørring er tilstrækkeligt. Reagensglasset skal fyldes ca. en gang i døgnet afhængigt af luftfugtigheden.

Måleusikkerhed

Som tidligere nævnt kan temperaturerne ved korrektion for dataloggerens nulpunktskorrektionsfejl bestemmes med en nøjagtighed på $\pm$ 0,1 C. Ved anvendelse af et psykrometerdiagram vil den relative fugtighed herved kunne aflæses med en usikkerhed på $\pm$ 1% RF i det for indeklima mest aktuelle område. Denne usikkerhed er betydeligt mindre end den tidligere angivne på $\pm$ 5% RF. Efter ibrugtagning af måleren viste resultaterne da også meget større overensstemmelse.

Tidskonstant

Af figur 14.1 ses et indsvingningsforløb for den nye fugtighedsmåler optaget ved at udsætte måleren for et pludseligt fald i relativ fugtighed. Af kurverne fremgår, at tidskonstanten er ca. 20 sek., og at den endelige værdi nås i løbet af ca. 2 min. Pludselig stigning i den relative fugtighed giver samme indsvingningstider.



Figur 14.1.
Indsvingningsforløb

Konklusion vedrørende måling af relativ fugtighed

Til trods for, at den relative fugtighed med den nye fugtighedsmåler som nævnt foran kan måles med en nøjagtighed på ± 1% RF, vil det ikke være realistisk at skønne en mindre usikkerhed end de tidligere opgivne ± 5% RF. Det skal jo erindres, at fugtigheden varierer over tiden på grund af fugtighedsreguleringen, ligesom den varierer hen over overfladen. Erfaringerne viser snarere, at usikkerheden med det tidligere nævnte standardudstyr var over ± 5%. Alt i alt skønnes ± 5% som et gennemsnit for måleperioden at være realistisk.

3.3. Måling af vandtemperatur

Vandtemperaturer er normalt langt lettere at måle end lufttemperaturer, og dette gælder også her. Vandpumpen, der ses til venstre på figur 5.1, giver som beskrevet i afsnit 2.4 bassinvandet en langsom vandret rotation. Som følge heraf er vandtemperaturen tilnærmelsesvis ens overalt i bassinet naturligvis med undtagelse af den umiddelbare nærhed af afgangsstrømmen fra pumpen. Dette er kontrolleret med kvilsølvtermometer med 0,1 C inddeling.

Måleusikkerhed

Via termoelement og datalogger kontrolleres vandtemperaturen jævnligt gennem måleperioden. Da bassinvandet, der udgør ca. 1300 liter, har en temmelig stor varmekapacitet, vil der næsten altid være tale om en konstant stigning eller et konstant fald i vandtemperaturen over måleperioden. Med kviksølvtermometer, der er 0,1 C inddelt, måles vandtemperaturen derfor ved begyndelsen og ved slutningen af hver måleperiode. Middelværdien mellem de to værdier noteres som vandtemperatur, og da forskellen mellem begyndelses- og slutværdien sjældent overstiger 0,1 C, ligger nøjagtigheden på vandtemperaturerne inden for ± 0,1 C, hvilket er fuldt ud tilstrækkeligt.

Temperaturgradient i vandet

Noget andet er, at temperaturen i vandoverfladen ikke nødvendigvis er den samme som temperaturen målt længere nede i vandet. Det blev forsøgt at måle temperaturforskelle i vandet med termoelementer, men formentlig på grund af disses størrelse (ø ca 2 mm) kunne der ikke måles nogen nævneværdig temperaturgradient.

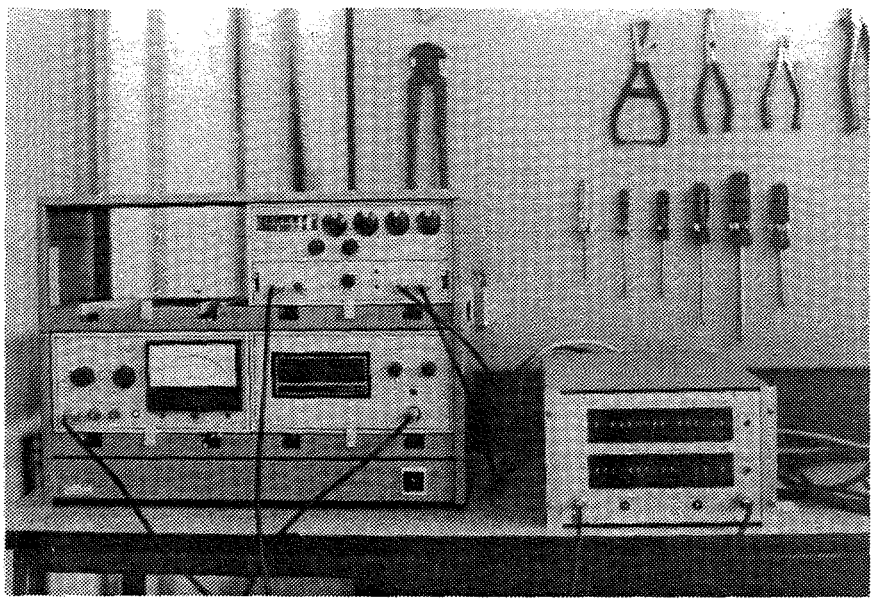
I stedet skal derfor henvises til Werner Häußlers [1] målinger af temperaturgradienter ved en vandoverflade. Dennes målinger er udført ved lufthastigheder på 1,6-2,3 m/s over overfladen, men viser alligevel meget ringe variation i vandtemperaturen, når luftens temperatur er ca. 3-4 C højere end vandets. Ved de meget lavere lufthastigheder, der findes i en svømmehal, vil vandets temperaturgradient være lavere, og i det praktiske område $t_{luft}-t_{vand}$ = 3-4 C vil gradienten være ≅ 0, hvilket stemmer med ovennævnte vanskeligheder med at måle nogen forskel.

I afsnit 6 vil der blive nærmere redegjort for varme- eller kuldetilførelsen til bassinvandet, der jo har en sammenhæng med vandets temperaturgradient.

3.4. Måling af lufthastigheder ved vandoverfladen

Til måling af lufthastigheder anvendes et Disa varmetrådsanemometerudstyr. Udstyret, der ses på figur 16.1, består af følgende 4 dele:

Temperaturkompensator model 55M14
Linearisator model 55M25
Digitalt DC voltmeter model 55D31
RMS voltmeter model 55D35



Figur 16.1.
Disa anemometer-udstyr 55M

Med dette udstyr er det muligt at måle lufthastigheder helt ned til 0 med rimelig nøjagtighed - hvis man har kalibreringsudstyr, der kan klare det. Et kalibreringsudstyr, der kan klare hastighedsområdet 0-0,20 m/s med blot nogenlunde nøjagtighed, findes så vidt det er oplyst ikke på markedet. Derfor har vi i instituttet selv fremstillet et kalibreringsudstyr, der kan frembringe lufthastigheder i området 0-20 m/s med en skønnet nøjagtighed (kontroludstyr findes ikke) på $\pm$ 3% af aflæsningen $\pm$ 0,01 m/s. Ved omhyggelig kalibrering kan denne nøjagtighed også opnås med anemometerudstyret inden for et begrænset hastighedsområde f.eks. 0-1 m/s, hvilket normalt vil dække hastigheder i opholdsrum.

Ud over en gennemsnitsværdi af lufthastigheden, der aflæses på DC voltmeteret, kan turbulensgraden, defineret som:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T e^2 dt}$$

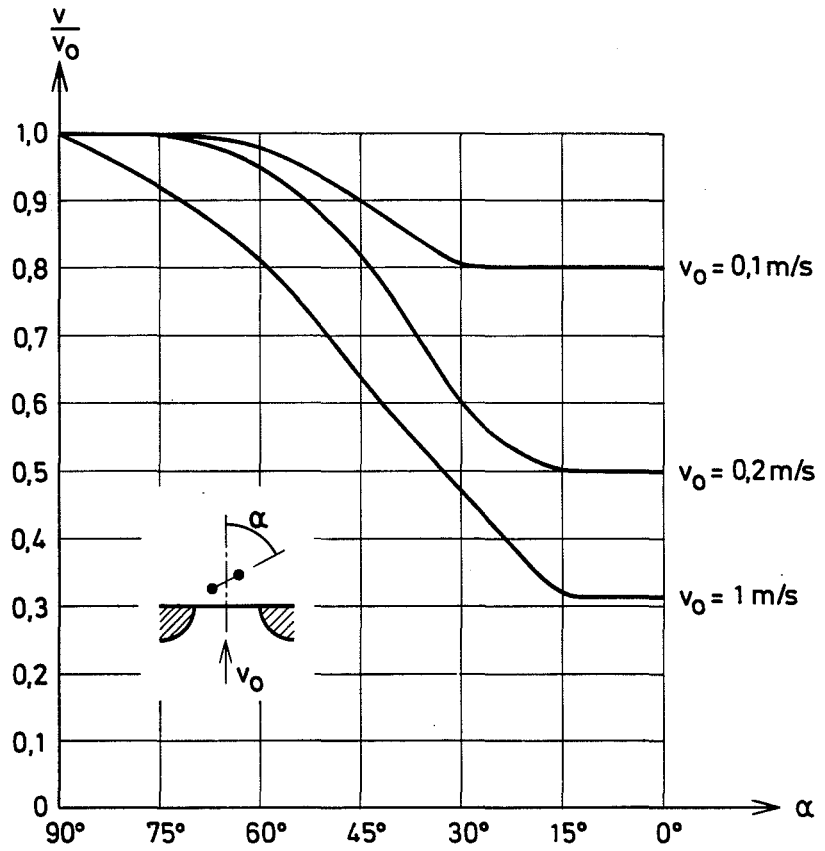
hvor e er øjebliksværdien og T integrationstiden, der kan indstilles, aflæses på RMS voltmeteret. (RMS = Root-Mean-Square). Alle svingningsformer i lufthastigheden med frekvenser op til 50 kHz bliver taget med i integrationen.

Valg af målehøjde

På grund af de velkendte tidsmæssige variationer af lufthastigheden i rum, har det ingen mening at måle hastighedsvariationen i forskellige højder over vandoverfladen. Ud fra kendskab til luftstrømninger langs en plan overflade må målehøjden ikke vælges alt for lille, idet grænselaget op til overfladen jo har hastigheder nær 0. Da anemometertråden er ca. 3 mm lang, og dens diameter kun er 0,005 mm, skal der ikke stor fysisk påvirkning til, før den ødelægges. Derfor vælges målehøjden til 2 cm over vandoverfladen, så at små bølger ikke når op til tråden. Desuden vides det med sikkerhed, at grænselaget er langt tyndere end 2 cm.

Orientering af måletråd

Et varmetrådsanemometer med kun en tråd påvirkes ens af alle strømninger vinkelret mod tråden. Men strømninger mere eller mindre på langs ad tråden afkøler denne mindre og giver derfor lavere anemometervisning. Da forskellige anemometre opfører sig forskelligt i denne henseende, skal her gengives nogle målte værdier for det benyttede Disa udstyr.

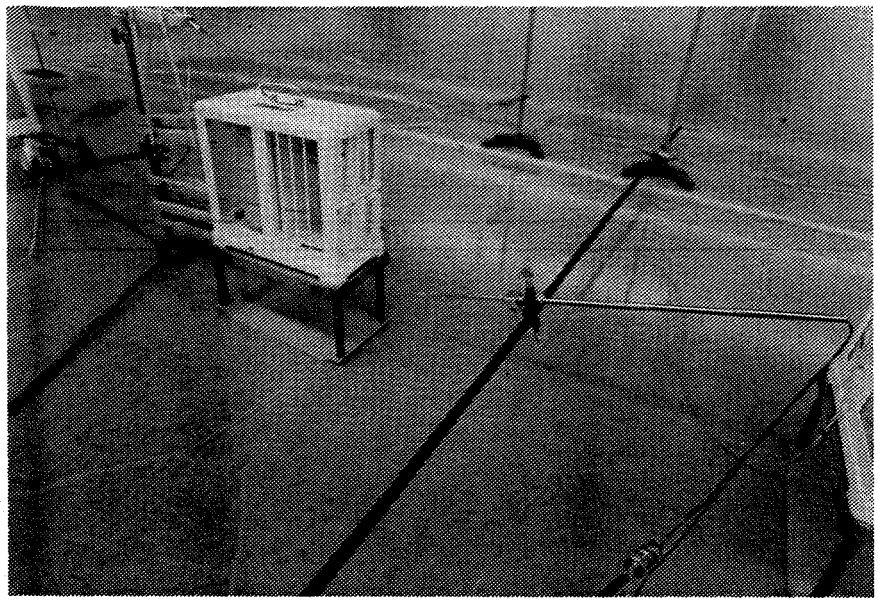


Figur 17.1. Disa varmetrådsanemometerudstyr 55M. Målt hastighed v i afhængighed af tilstrømningsvinklen α til varmetråden. Strømning lodret op.

Det fremgår af figuren, at tilstrømningsvinklens afvigelse fra 90° har mindst betydning ved de små hastigheder.

Det er især den vandrette luftbevægelse hen over overfladen, der har interesse, idet lodrette lokale luftbevægelser altid må medføre vandrette, mens det omvendte ikke behøver at være tilfældet ved kraftig ventilation. Derfor anbringes anemometertråden så vidt muligt lodret.

Som det fremgår af figur 18.1 sættes tråden af praktiske grunde ca. 15° fra lodret, hvilket ifølge figur 17.1 ikke giver ret store målefejl ved de aktuelle små hastigheder.

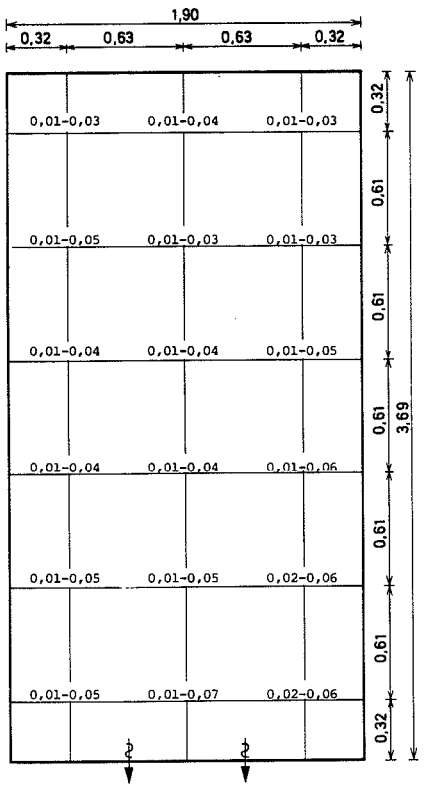


Figur 18.1.
Anbringelse af anemometerføler

På grund af hastighedsvariationerne hen over overfladen er det nødvendigt at måle i en del punkter. Som det fremgår af figur 18.2, er der lagt et tilnærmet kvadratnet ud over bassinet, således at hvert af de 18 knudepunkter repræsenterer nogenlunde lige store arealer.

Hastighedsmålingernes udførelse

Dato: 15.6.1977
Relativ luftfugtighed φ_L = 50%
Ventilationsluftmængde V_L = 140 m^3/h
Vandtemperatur t_v = 26,0 C
Lufttemperatur t_L = 32 C



Alle mål i m.

Figur 18.2.
Måling af lufthastigheder ved vandoverfladen (2 cm højde)
v_{middel} = 0,03 m/s

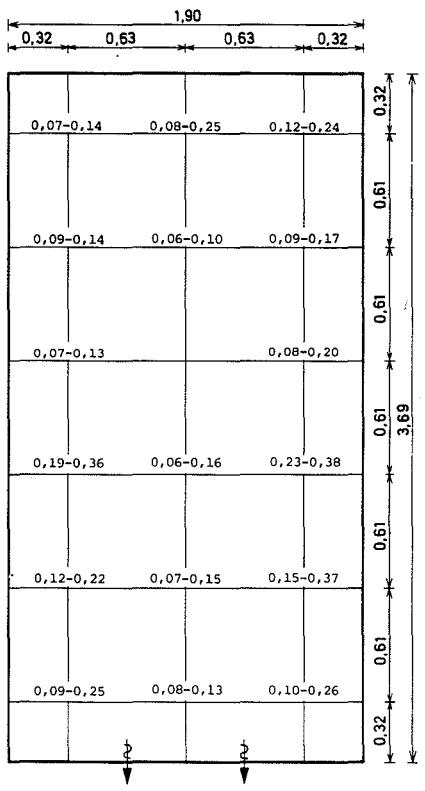
Ud for hvert knudepunkt er anført et variationsområde for hastigheden angivet i m/s. Det har nemlig vist sig under målingerne, at efter flytning til et nyt målepunkt går der nogen tid, inden det røre, personbevægelserne har skabt, er faldet til ro, hvilket ses på RMS voltmeteret, der viser turbulensgraden. Derefter er turbulensgraderne ubetydelige for integrationstider under 3 sekunder. Derimod viser middelværdien for v, der aflæses på DC voltmeteret, en langsom svingning, hvis yderpunkter er det nævnte variationsområde angivet på hastighedsdiagrammerne. Svingningstiden er af størrelsesorden 10-30 sekunder.

Relativ lufthastighed
$v < 0,1$ m/s

Som nævnt tidligere måler anemometerudstyret den aktuelle hastighed med en nøjagtighed på $\pm$ 0,01 m/s. Men som det fremgår af hastighedsmålingerne figur 18.2 varierer hastigheden hen over overfladen og derudover med tiden. Da laveste og højeste værdi er henholdsvis 0,01 og 0,07 m/s og middelværdien 0,03 m/s, må det være rimeligt at antage middelværdien 0,03 m/s som repræsentativ lufthastighed. Men da vandet roterer langsomt rundt i bassinet, har vandet absolutte hastigheder, der ligger mellem 0 og 0,04 m/s. Ved langsomme luftbevægelser skal denne hastighed adderes til de 0,03 m/s. Alt i alt vælges derfor at angive $\bar{v} < 0,1$ m/s for alle målinger med lavt luftskifte, hvorved der ikke er sagt mere, end der er dækning for, og desuden er der for praktisk brug næppe behov for differentiering under 0,1 m/s.

Relativ lufthastighed
$v > 0,1$ m/s

Større lufthastigheder er opnået ved at øge luftskiftet i rummet. Da der imidlertid omkring den 4/12-77 er foretaget en ændring af reguleringsudstyret for ventilatorerne, er der kørt med en ventilationsluftmængde på 450 m^3/h før 4/12-77 og 325 m^3/h efter denne dato. På figurerne 19.1 og 20.1 ses hastighedsmålinger henholdsvis den 15/8-77 og 15/12-77. Det fremgår af figurerne, at middelhastigheden er lidt lavere, nemlig 0,13 m/s ved det lille luftskifte end de 0,16 m/s ved det større luftskifte.



Alle mål i m.

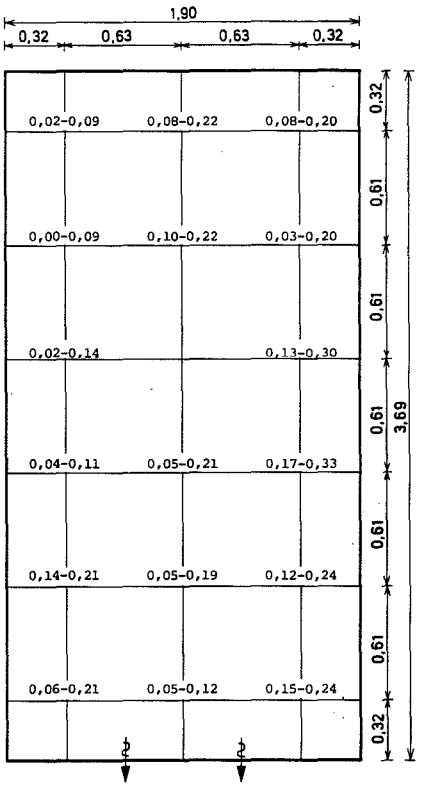
Figur 19.1.
Måling af lufthastigheder ved vandoverfladen (2 cm højde)
$\bar{v} = 0,16$ m/s

Dato: 15.8.1977

Relativ luftfugtighed	φ_L = 37%
Ventilationsluftmængde	V_L = 450 m^3/h
Vandtemperatur	t_v = 23,7 C
Lufttemperatur	t_L = 32,5 C
Indblæsningstemperatur	t_i = 41 C

Dato: 15.12.1977

Relativ luftfugtighed	φ_L	= 40%
Ventilationsluftmængde	V_L	= 325 m^3/h
Vandtemperatur	t_v	= 28,0 C
Lufttemperatur	t_L	= 31,0 C
Indblæsningstemperatur	t_i	= 34,5 C

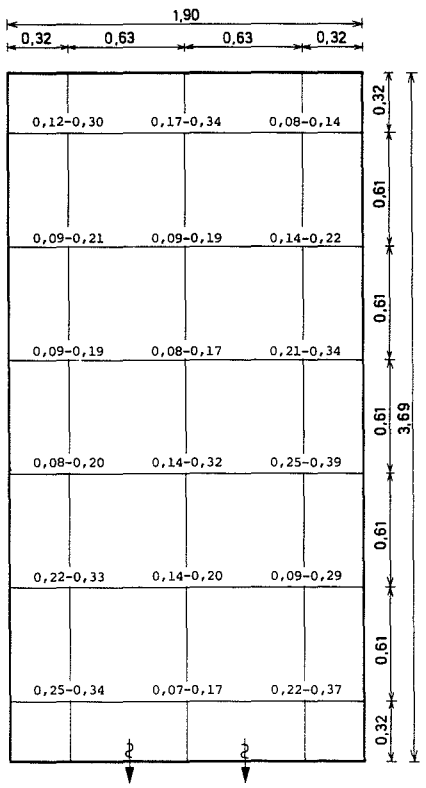


Figur 20.1.
Måling af lufthastigheder ved vandoverfladen
(2 cm højde)
$\bar{v}$ = 0,13 m/s

Imidlertid er der en anden faktor, der har væsentlig betydning for lufthastigheden. Er indblæsningstemperaturen væsentlig højere end rumtemperaturen, er tendensen til dannelse af "varmepude" stor, så lufthastighederne ved overfladen bliver relativt små. Indblæses der derimod med lavere temperaturer, bliver lufthastighederne ved overfladen større ved fastholdt ventilationsluftmængde. En sammenligning af figur 20.1 og figur 20.2 belyser dette forhold.

Dato: 27.1.1978

Relativ luftfugtighed	φ_L	= 70%
Ventilationsluftmængde	V_L	= 325 m^3/h
Vandtemperatur	t_v	= 24,0 C
Lufttemperatur	t_L	= 24,5 C
Indblæsningstemperatur	t_i	≅ 23,5 C



Figur 20.2.
Måling af lufthastigheder ved vandoverfladen
(2 cm højde)
$\bar{v}$ = 0,19 m/s

Under målingerne blev der sørget for altid at indblæse med overtemperatur, således at hastighedsbilledet på figur 20.2 ikke skulle forekomme. Alligevel fremkom en lille forskel i fordampningstallene på grund af hastighedsændringen den 4/12-77. Under indlæggelse af middelværdikurver er der taget hensyn hertil, og gennemsnitshastigheden er sat til $\bar{v}$ = 0,15 m/s. Men det skal bemærkes, at hastigheden er temmelig afgørende for fordampningen, sådan som en sammenligning af kurvesættene for fordampningen i afsnit 4 også viser.

3.5. Måling af fordampet vandmængde

Det ville være muligt at måle den fordampede vandmængde ved måling af relativ fugtighed i indblæsnings- og udsugningsluften samt måling af ventilationsluftmængden. Men måling af relativ fugtighed er som nævnt i afsnit 3.2 behæftet med ret stor usikkerhed, og da måling af luftmængden sker med måleblende med en usikkerhed på ca. $\pm$ 10%, ville produktet af disse to usikkerheder blive alt for stort, specielt naturligvis ved lave fordampningstal. Denne målemetode skal derfor kun benyttes i fuldskalasvømmehaller, hvor ingen anden metode er farbar.

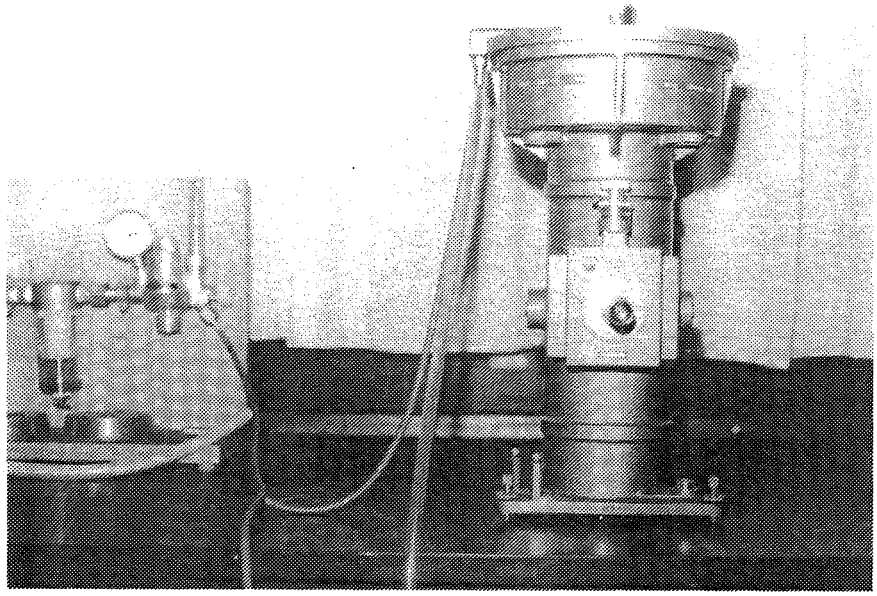
En anden metode ville være, at udsugningsluften blev affugtet inden den recirkuleredes 100%. Den vandmængde, der konstateredes i affugtningsanlægget, ville så direkte være et mål for vandfordampningen. Men ved denne metode ville luftmængder, der slipper ind eller ud af målerummet gennem revner og sprækker, give anledning til målefejl. Desuden ville temperatur- og fugtighedsreguleringen af rumluften sandsynligvis volde problemer. En sidste og afgørende ulempe ved denne metode var, at et egnet affugtningsanlæg ikke fandtes i instituttet.

Anvendt metode

Den anvendte metode blev derfor at måle vandstanden i bassinet ved måleperiodens start og at tilsætte vand til bassinet til samme vandstand ved måleperiodens slutning. Den tilsatte vandmængde vil da være = den fordampede vandmængde uanset eventuelle utætheder i rummets begrænsende flader, men naturligvis forudsat absolut tæthed af bassinet. Den nøjagtighed, der kunne opnås ved måling af vandstanden, blev bestemmende for den nødvendige længde af måleperioden. Skulle måleperioden hensigtsmæssigt strækkes over en nat på ca. 16 timer, ville en lille fordampet vandmængde som f.eks. 10 g/m^{2}h give en fordampet vandmængde på 160 g/m^2 svarende til en vandstandssænkning på 0,16 mm. For at opnå en tilfredsstillende nøjagtighed på f.eks. 6% skulle vandstanden altså måles med 0,01 mm nøjagtighed. Intet elektrisk måleudstyr kan klare en sådan opgave. Andre målemetoder blev afprøvet og måtte kasseres. En af disse var at anbringe et skråørsmanometer i niveau med overfladen og forbinde det direkte til bassinet, men prøvemålinger viste, at overfladespændingen i rørene var årsag til for store målefejl.

Den anvendte måleteknik fremgår af figur 5.1. I det bassinhjørne, der ligger i forgrunden af billedet, ses et laboratoriestativ, hvortil der er fastgjort et lodret glasrør. Dette glasrør er neddykket ganske lidt i vandet og forsynes med luft via en gummislange.

På figur 22.1 til venstre ses reduktionsventil m.m. for trykluftforsyning til glasrøret. Fra et T-stykke på luftforsyningsslangen fører en gummislange til mikromanometeret til højre, der således måler forsyningstrykket til glasrøret, når luften langsomt bobler frem. Fra mikromanometerets negative stuts fører et plastrør til rummodellen for at udkompensere små over- eller undertryk i rummet.



Figur 22.1.
Trykluftforsyning
og mikromanometer
for vandstandsmåling

Måleusikkerhed

Den angivne usikkerhed på mikromanometeret er $\pm$ 0,01 mm vandsøjle. Men da det anvendte måletryk er 7,5 mm til trods for, at rørets neddykning kun er 1-2 mm, må overfladespændingen i luftboblerne have stor indflydelse. For at få en pålidelig bestemmelse af måleusikkerheden er der gennemført en serie af prøvemålinger. Disse foregik således, at en laborant aftappede en tilfældig vandmængde fra bassinet, hvorefter undertegnede uden at kende denne vandmængde tilsatte vand, indtil vandstanden målt med det beskrevne udstyr var nået igen. Inden målingerne blev ventilationen stoppet, og rumluftens fugtighed fik lov at stige, indtil balance var nået, d.v.s. at vandfordampningen under målingerne - bortset fra utætheder - var $\cong$ 0. Ialt 40 sådanne målinger blev foretaget.

Aftappet ℓ	Påfyldt ℓ	Korrektion X ℓ	Aftappet ℓ	Påfyldt ℓ	Korrektion X ℓ
0,57	0,55	+ 0,02	1,02	1,10	- 0,08
1,84	1,90	- 0,06	1,54	1,60	- 0,06
1,10	1,10	0,00	2,01	2,00	+ 0,01
0,59	0,70	- 0,11	0,52	0,65	- 0,13
1,73	1,60	+ 0,13	0,81	0,85	- 0,04
0,59	0,60	- 0,01	0,62	0,55	+ 0,07
1,14	1,20	- 0,06	0,43	0,40	+ 0,03
1,01	1,00	+ 0,01	0,22	0,10	+ 0,12
0,51	0,50	+ 0,01	1,20	1,25	- 0,05
1,55	1,60	- 0,05	0,72	0,65	+ 0,07
0,69	0,70	- 0,01	0,92	1,00	- 0,08
2,00	2,00	0,00	0,92	1,00	- 0,08
0,64	0,50	+ 0,14	1,22	1,10	+ 0,12
0,36	0,50	- 0,14	1,22	1,30	- 0,08
1,36	1,30	+ 0,06	1,31	1,40	- 0,09
0,43	0,40	+ 0,03	0,39	0,35	+ 0,04
1,69	1,80	- 0,11	0,52	0,50	+ 0,02
0,83	0,80	+ 0,03	0,78	0,65	+ 0,13
0,29	0,30	- 0,01	0,81	0,90	- 0,09
1,30	1,35	- 0,05	1,03	1,10	- 0,07
Σ20,22	20,40	- 0,18	18,21	18,45	- 0,24

Figur 22.2.
Bestemmelse af usikkerhed på niveaumåling

Som det fremgår af tabellen, er der ialt tilsat mere vand, end der er aftappet. Middelværdien for denne målefejl er:

$$\bar{x} = \frac{-0,18-0,24}{40} = -0,01$$

Denne konsekvente fejl kan imidlertil have sin forklaring i, at der er sket en vis fordampning fra overfladen trods stoppet ventilation. Standardafvigelsen s_x på målefejl x bliver:

$$\underline{s_x} = \sqrt{\frac{\Sigma(x_i-\bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0,224}{39}} = \underline{0,076\ \ell}$$

der svarer til $\pm$ 0,01 mm på niveaumålingen.

Største afvigelse = $\pm$ 0,14 ℓ, der svarer til $\pm$ 0,02 på niveauet.

Denne prøvemåleserie godtgør med rimelig sandsynlighed, at den absolutte usikkerhed på den fordampede vandmængde er af størrelsesorden $\pm$ 0,14 ℓ ved den anvendte måleteknik. Ved små fordampningstal forlænges måleperioden ud over de tidligere nævnte ca. 16 h for at opnå tilstrækkelig relativ nøjagtighed. Således anvendes ofte en weekend på ca. 62 h, som for det laveste fordampningstal, der er målt, nemlig 5 g/m^{2}h, giver en relativ usikkerhed på aflæsningen på:

$$\frac{140\ g \cdot 100}{5\ g/m^2h \cdot 7\ m^2 \cdot 62\ h}\ \% = 6,5\%,$$

hvilket er tilfredsstillende.

4. Måleresultater for model

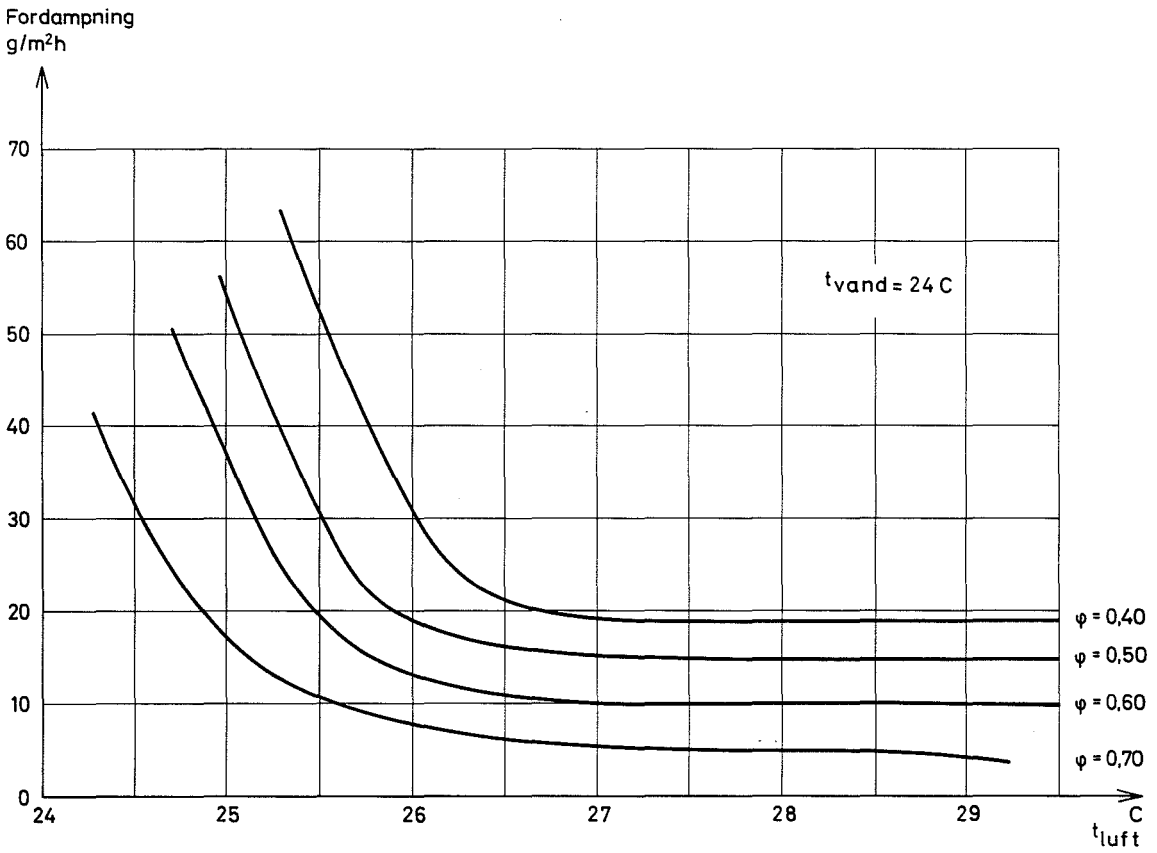
Da der ialt er foretaget ca. 200 målinger, ud over dem der er kasseret på grund af for stor variation i en eller flere af parametrene, og da der er foretaget en vægtning af måleresultaterne indbyrdes på grund af løbende forbedring af måleteknikken, skal måleresultaterne ikke direkte anføres her. I stedet er indlagt kurver, som præsenteres i afsnit 4.1.

4.1. Diagrammer for vandfordampning

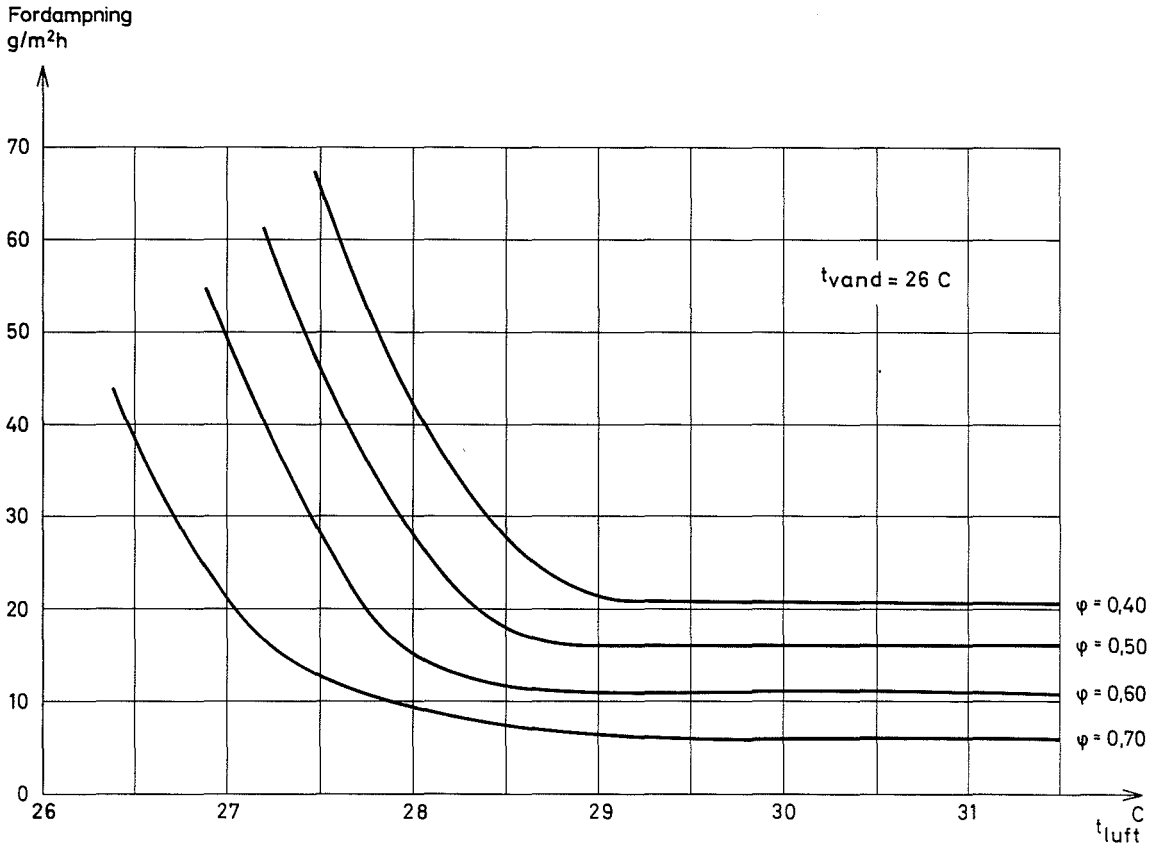
Mange forgæves forsøg er gjort på at sammenligne resultaterne med tidligere antagelser gående ud på, at den fordampede vandmængde stort set kun afhænger af partialdamptrykgradienten ved overfladen - eller af forskellen i vandindhold x, hvilket tilnærmelsesvis er det samme. Derimod har følgende parametre vist sig at have væsentlig betydning for fordampningen ved de undersøgte tilstande:

Lufthastigheden ved overfladen	v m/s
Luftens relative fugtighed	φ
Vandets temperatur	t_{vand}
Lufttemperatur - vandtemperatur	$t_{luft}-t_{vand}$

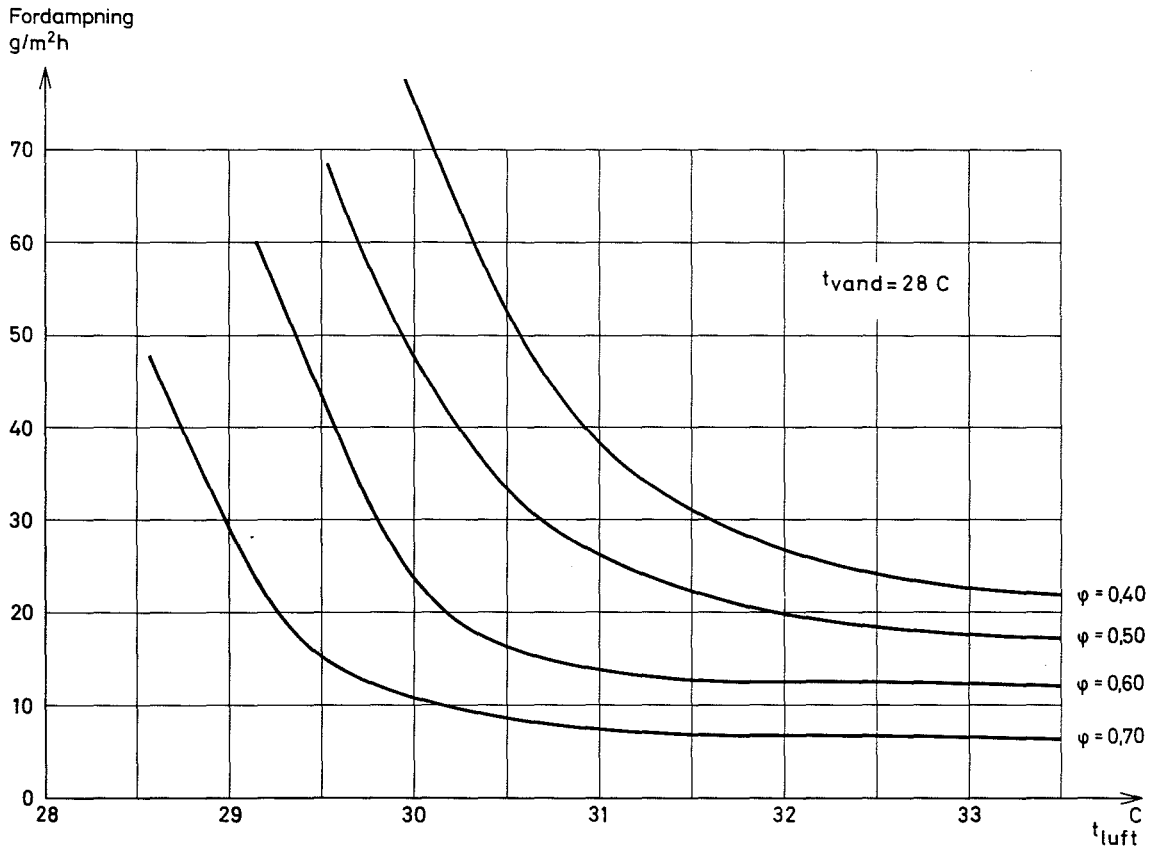
Måleresultaterne er angivet for gennemsnitlige lufthastigheder $\bar{v} < 0,1$ m/s i diagrammerne, figur 24.1, 24.2 og 25.1 for henholdsvis t_{vand} = 24, 26 og 28 C. I diagrammet, figur 25.2, er angivet vandfordampningen for en gennemsnitlig lufthastighed $\bar{v}$ = 0,15 m/s ved vandtemperaturerne t_{vand} = 24 og 28 C. I dette tilfælde kan der blot interpoleres for mellemliggende vandtemperaturer.



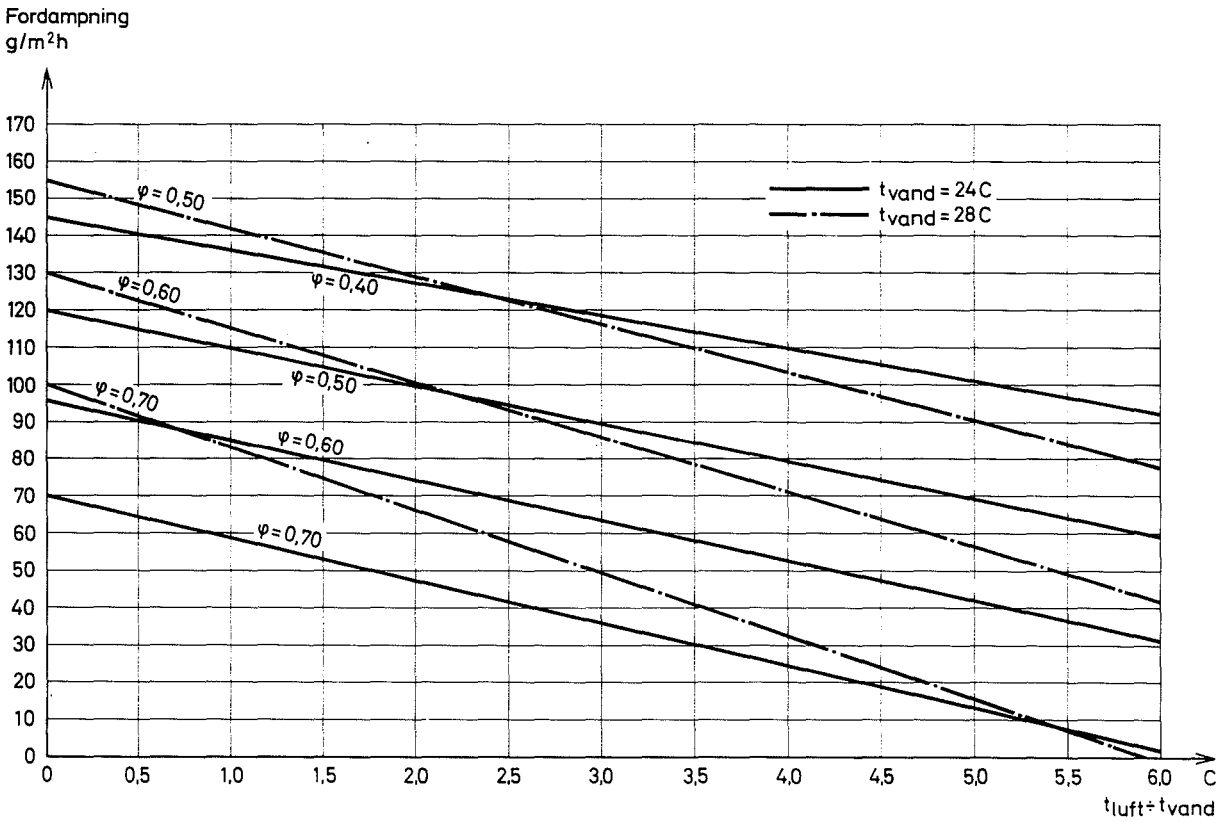
Figur 24.1: Fordampning fra en rolig vandoverflade. Luftens temperatur t_{luft} og relative fugtighed φ målt 20cm over vandoverfladen. Vandoverfladens temperatur t_{vand}=24 C. Luftens middelhastighed målt 2cm over vandoverfladen $\bar{v}$<0,1m/s. Advarsel: der kan interpoleres, men ikke ekstrapoleres i diagrammet!



Figur 24.2: Fordampning fra en rolig vandoverflade. Luftens temperatur t_{luft} og relative fugtighed φ målt 20cm over vandoverfladen. Vandoverfladens temperatur t_{vand}=26 C. Luftens middelhastighed målt 2cm over vandoverfladen $\bar{v}$<0,1m/s. Advarsel: der kan interpoleres, men ikke ekstrapoleres i diagrammet!



Figur 25.1: Fordampning fra en rolig vandoverflade. Luftens temperatur t_{luft} og relative fugtighed φ målt 20 cm over vandoverfladen. Vandoverfladens temperatur t_{vand} = 28 C. Luftens middelhastighed målt 2 cm over vandoverfladen $\bar{v}$ < 0,1 m/s. Advarsel: der kan interpoleres, men ikke ekstrapoleres i diagrammet!



Figur 25.2: Fordampning fra en rolig vandoverflade. Luftens temperatur t_{luft} og relative fugtighed φ målt 20 cm over vandoverfladen. Vandoverfladens temperatur = t_{vand}. Luftens middelhastighed $\bar{v}$ = 0,15 m/s målt 2 cm over vandoverfladen. Advarsel: der kan interpoleres, men ikke ekstrapoleres i diagrammet!

Lad det være sagt med eftertryk, at interpolation mellem de anførte værdier er tilladeligt, men at ekstrapolation er absolut utilstedeligt. Dette gælder alle parametre og især lufthastigheden.

Man frabedes ligeledes at forsøge at omsætte kurverne til formler og "glemme" at angive begrænsningsområder, således som det før er sket med de tidligere kendte formler for vandfordampning.

Årsag til de krumme kurver for $\bar{v} < 0{,}1$ m/s

Af diagrammerne fremgår, at fordampningskurverne er krumme for $\bar{v} < 0{,}1$ m/s, men rette linier for $\bar{v} = 0{,}15$ m/s. Forklaringen herpå må være følgende: For små tvungne lufthastigheder spiller frie, termiske strømninger ved vandoverfladen en rolle. Når lufttemperaturen er mere end ca. 3 C over vandtemperaturen, forløber alt roligt. I dette område er nemlig massefylden af de mættede dampe ved overfladen større end luftens massefylde højere oppe. Bestemmende størrelse for vandfordampningen er derfor her damptrykgradienten ved vandoverfladen. Lægges der røg på overfladen, vil man i dette temperaturområde se et tyndt lag tæt ved vandoverfladen, der ligger helt roligt. Blæser man på laget, forsvinder det straks. I virkeligheden ligger der altså et ret tyndt lag af mættet damp ved vandoverfladen. Ved rolige hastighedsforhold ved overfladen skal vanddampen passere dette lag, og hastigheden for dette forløb vil være bestemt af damptrykgradienten jævnfør figur 10.1.

Af tabeller for fugtig lufts massefylde fremgår, at når forskellen $t_{luft}-t_{vand}$ formindskes, bliver den mættede luft ved overfladen lettere end luften højere oppe. For eksempel er massefylden for mættede dampe ved t_v = 24 C ρ_m = 1,175 kg/m^3. Ved φ_r = 0,70 fås den samme massefylde ved t_{luft} = 25 C. Omskiftningspunktet ved φ_r = 0,70 er altså $\Delta t = t_{luft}-t_{vand}$ = 1 C. For φ_r = 0,40 fås tilsvarende et omskiftningspunkt ved t_{luft} = 26 C, altså ved Δt = 2 C. Når Δt bliver lavere end svarende til omskiftningspunktet bliver rumluftens massefylde større en ρ_m. I dette område vil derfor vanddampdiffusionen overlejres af termiske strømninger, der sker "hulter til bulter" således at forstå, at fordampningen på grund af rolige luftforhold får lov lokalt at opbygge et mindre lag af vanddamp, som derefter pludselig "bytter plads" med den oven over liggende luft. Netop dette fænomen kan forklare, at lufthastighedsmålingerne ved overfladen viste forholdsvis langsomme, store svingninger ud over den normale hurtigere turbulens.

At fordampningskurverne begynder at stige lidt før Δt = omskiftningspunktet kan let forklares ved de varierende forhold hen over overfladen, som vil udbrede omskiftningen til et større område.

I kurverne for $\bar{v} < 0{,}1$ m/s er lagt en skrå afskæringslinie til venstre i diagrammerne. Denne linie er lagt ca. på det sted, hvor det på grund af målinger skønnes, at lufthastigheden ved overfladen bliver større end 0,1 m/s. Selv om der kun er små tvungne strømninger til venstre for denne linie, vil de termiske strømninger her bringe $\bar{v}$ op over 0,1 m/s. I dette område benyttes i stedet figur 25.2.

$\bar{v} = 0{,}15$ m/s

Ved de større lufthastigheder er der ikke den samme virkning af de frie termiske strømninger. Målingerne viste ganske vist et svagt

knæk på kurverne, men det var så lille, at det skønnedes rigtigst at se bort fra det, da kurverne i øvrigt viste sig tilnærmelsesvis at være rette linier. Allerede ved disse moderate, tvungne lufthastigheder er således de frie termiske strømninger ved at være uden betydning. Dette harmonerer med andres måleresultater udført ved højere lufthastigheder, der også resulterer i rette linier.

Hastigheder i svømmehaller

I aktuelle svømmehaller vil det være vanskeligt at opnå lufthastigheder ved vandoverfladen, der gennemsnitligt er 0,15 m/s eller derover. Kun ved indblæsning med undertemperatur vil dette normalt være muligt. Men da de fleste svømmehaller så godt som hele året har et varmebehov, skal der normalt altid indblæses med overtemperatur. Kun i svømmehaller, der kører med vandtemperaturer over rumluftens temperatur, vil vandet kunne opvarme rummet så meget, at indblæsning med lave temperaturer kan forekomme. Men da $t_{luft}-t_{vand} < 0$ ikke dækkes af disse undersøgelser, er tilfældet ikke aktuelt her. I de svømmehaller, der er undersøgt i forbindelse med dette projekt, har lufthastigheden ved vandoverfladen, når der ikke fandtes badende i nærheden, og der indblæstes med overtemperatur, normalt været < 0,1 m/s. Vandfordampningskurverne for $\bar{v} < 0{,}1$ m/s skulle derfor normalt kunne anvendes for Δt ned til føromtalte afskæringslinie. For mindre Δt anvendes som sagt kurverne for $\bar{v} = 0{,}15$ m/s. Af afsnit 5 fremgår dog, at man ikke altid kan regne med, at $\bar{v} < 0{,}1$ m/s i praksis.

4.2. Sammenligning med tidligere resultater

Som før nævnt er fordampningsforløb tidligere undersøgt. Men fælles for disse undersøgelser er tilsyneladende målemetoden, der gik ud på at føre en luftstrøm hen over et mindre vandkar. Derfor har det ikke været muligt at undersøge fordampning ved lave lufthastigheder. Nogle forskere har undersøgt området 2-5 m/s, andre 0,5-4 m/s for blot at nævne et par yderpunkter. Ingen har med den anvendte målemetode kunnet undersøge lufthastigheder under 0,5 m/s.

En anden ting er, at de tidligere undersøgelser fortrinsvis er foregået med relativt høje vandtemperaturer, mens lufttemperaturen i mange tilfælde slet ikke er registreret. Alle disse undersøgelser kan derfor ikke dække forholdene i en svømmehal.

I figur 28.1 er vist en sammenligning mellem vore resultater ved $\bar{v} < 0{,}1$ m/s og den tidligere formentlig mest anvendte formel $w = (25+19 \cdot v)(x_m - x_\ell)$, hvor

v = lufthastigheden (m/s)

x_m = vandindholdet i mættet luft ved vandoverfladens temperatur (g/kg)

x_ℓ = vandindholdet i rumluften (g/kg)

w = vandfordampningen g/m^2h

Netop for denne formel har man glemt at anføre gyldighedsområde, skønt den er en sammensætning af måleresultater.

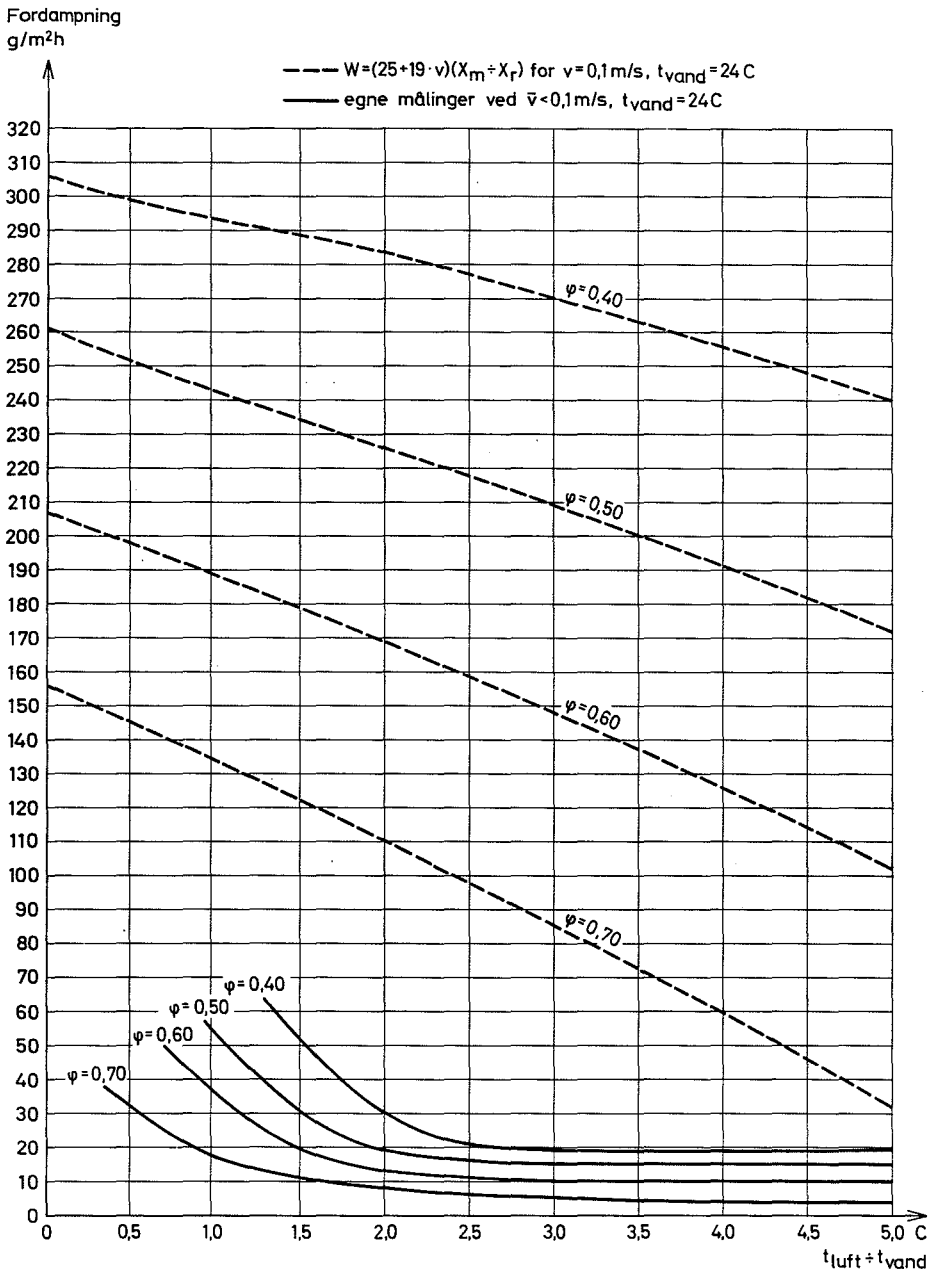
Resultaterne stammer fra Lurie og Michailoff, der undersøgte området:

$1 < v < 7{,}5$ m/s

$40 < t_{luft} < 222$ C

$10 < x_{luft} < 250$ g/kg

t_{vand} "op til 65 C"



Figur 28.1
Sammenligning med gammel formel

Desuden stammer måleresultaterne fra Thiesenhusen, der angiver gyldighedsområdet til:

$0,5 < v < 1,5$ m/s

$t_{luft} \simeq 20$ C

$\varphi_{\ell} \simeq 0,7$

$t_{vand} = 52\text{-}83,5$ C

Det turde hermed være godtgjort, at ovennævnte formel ikke kan benyttes for tilstanden i en svømmehal. Det fremgår da også klart af figur 28.1, hvor der er optegnet kurver på grundlag af formlen med hastigheden v = 0,1 m/s indsat. En sammenligning med vore målinger viser meget stor uoverensstemmelse, hvilket kun var

at forvente. Man har jo dog aldrig kunnet ekstrapolere måleresultater fra det turbulente område ned i det laminare.

Foruden de nævnte tidligere resultater er der mange andre, som ikke skal anføres her. Benyttes de for tilstandene i en svømmehal vil de give resultater, der afviger meget indbyrdes, men alle giver alt for høje fordampningstal. Kun når indblæsningstemperaturen er lavere end rumluftens temperatur og måske endog lavere end vandets temperatur, vil lufthastigheden ved overfladen kunne blive ret stor ved visse indblæsningsmåder, men næppe noget sted så høj som 0,5 m/s. Sådanne lufthastigheder i opholdszonen ville selvsagt også være uacceptable af hensyn til komfort.

4.3. Bølger

Det måtte forventes, at badendes plasken rundt i vandet vil forøge vandfordampningen. For at undersøge, om bølger alene - det vil sige bølger uden skumsprøjt - forøger fordampningen i forhold til en rolig vandoverflade, blev en lille bølgemaskine anbragt i et hjørne af modelbassinet. Maskinen kunne danne ca. 2 cm høje bølger over hele overfladen. Målingerne foregik således, at fordampningen uden bølger blev målt en nat, og den følgende nat måltes fordampningen med bølger og med samme indstilling af vandtemperatur, lufttemperatur, lufthastighed og luftfugtighed.

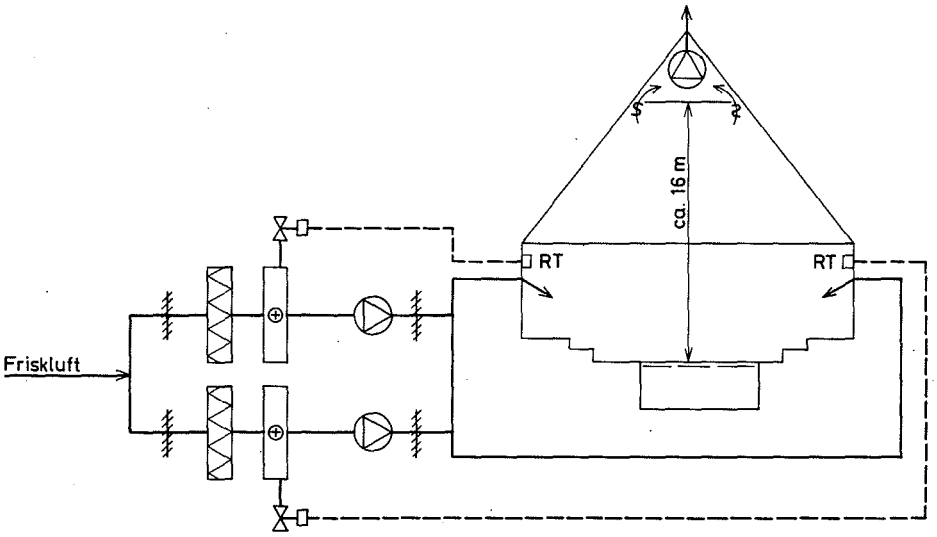
Det viste sig ganske uventet, at disse små bølger ikke forøgede vandfordampningen end ikke ved små lufthastigheder. Dette tyder på, at bølger ikke forstyrrer laget af mættet damp tæt ved overfladen. Blæses der røg mod overfladen, vil man se den blive liggende roligt på samme sted uanset bølger. Kun en ret kraftig blæst over overfladen forstyrrer dette lag, som det også var tilfældet ved en rolig vandoverflade. Badendes forøgelse af vandfordampningen skal således søges i forøgelsen af vandoverfladernes areal, dels på grund af våde badende, der opholder sig oven for bassinet, dels på grund af, at perronerne omkring bassinet bliver våde.

5. Fuldskalamålinger

Det var oprindeligt planlagt at udføre målinger i en række færdige svømmehaller, men der viste sig en del vanskeligheder ved udførelsen af disse målinger. Nogle svømmehaller kunne ikke anvendes, fordi måling af fugtighed i friskluftindtag og afkast ikke var praktisk gennemførlig. Andre måtte kasseres, fordi de af hensyn til handicapbadende kørte med vandtemperaturer over rumtemperaturen, hvilket modelmålingerne ikke har gjort. I det følgende redegøres for målingerne i tre svømmehaller, hvoraf kun den tredie, nemlig Års svømmehal, viste sig at give brugbare resultater. Når de to andre svømmehaller, hvori målinger er udført, tages med her, er årsagen den, at disse viste væsentlige ting i forbindelse med ventilation af svømmehaller.

5.1. "Haraldslund" i Aalborg

På figur 30.1 ses en principskitse af ventilationsanlægget i svømmehallen "Haraldslund". Svømmehallen indeholder et 12,5x25 m bassin med pyramideformet loft samt et børnebassin i den ene ende med lavtliggende, vandret loft. Ifølge målinger indblæses ialt 46800 m^3/h, hvoraf kun 2000 m^3/h er "recirkulering" gennem en lille vinduesåbning mellem hal og friskluftkanal, og resten er friskluft. Luftskiftet er ca. 5 gange i timen = friskluft. Hallen er projekteret og udført længe før energiprisstigningerne.



Figur 30.1

Principskitse af ventilationen i Haraldslund svømmehal. Indblæsningstemperaturen fra de to parallelsystemer styres af hver sin rumtermostat.

Målinger

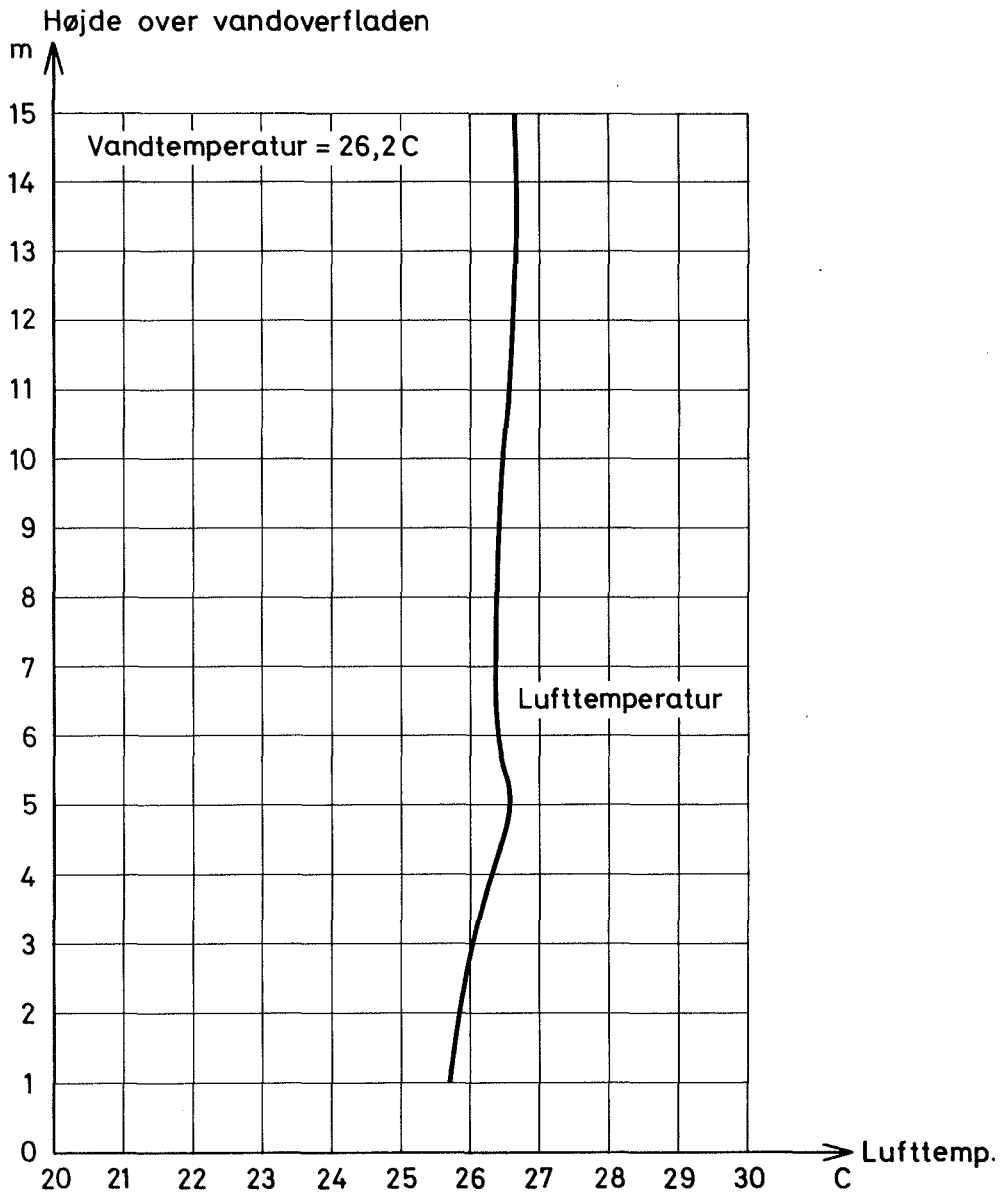
Målingerne blev udført i perioden 14.4.-20.4.1978. I indblæsningskanal og udsugning blev anbragt de i afsnit 3.2 omtalte fugtighedsmålere. Herudover måltes lufttemperaturen 1,5 m over det store bassins midte, vandtemperaturen og rumluftens relative fugtighed. Måleinstrumenter: datalogger + tapepuncher og termohygrografer.

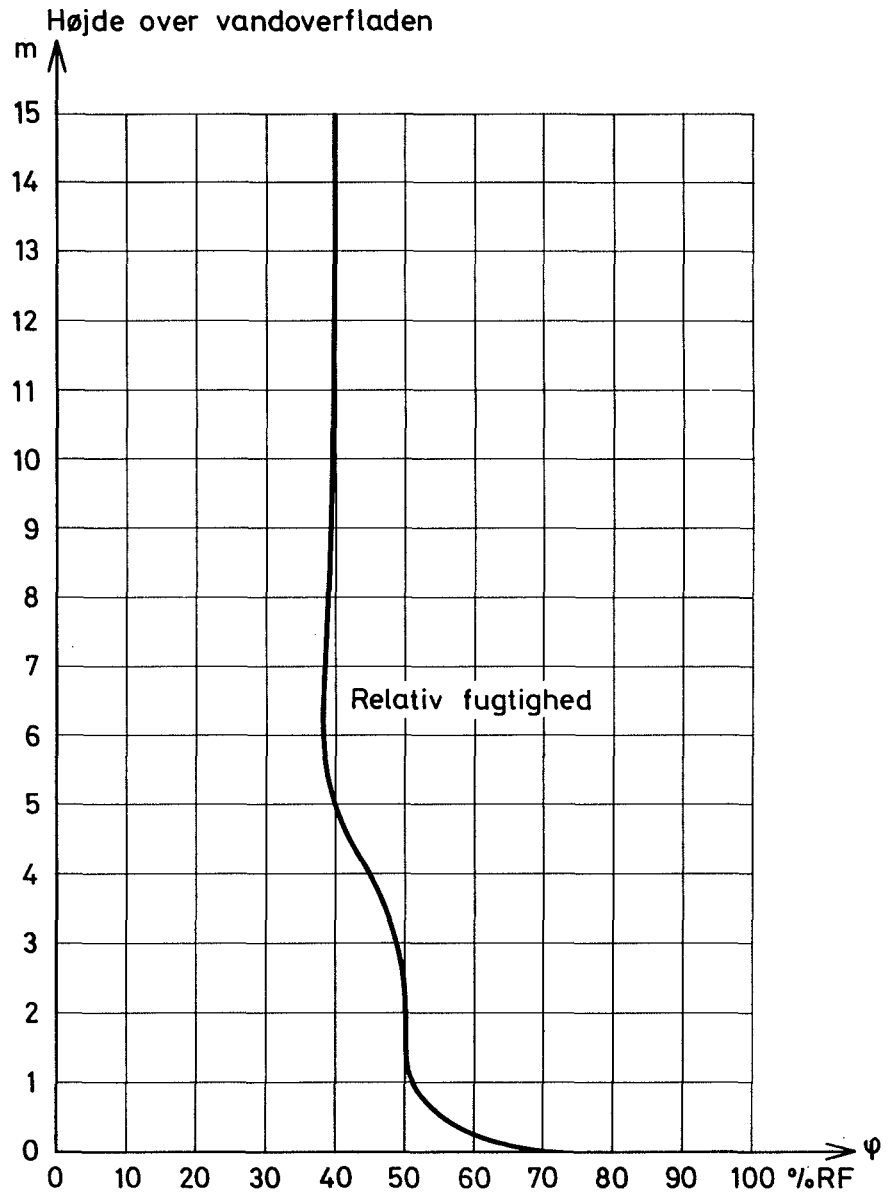
Resultater

Af flere årsager blev det ikke muligt at måle vandfordampningen. For det første var natdriften, der bestod i, at den ene indblæsningsventilator blev stoppet om natten, ved en fejltagelse ikke blev sat ud af funktion de første dage. Da der må være de samme forhold hele døgnet for at kunne sammenligne fordampning med og uden badegæster, kunne målingerne ikke anvendes. For det andet viste det sig, at fugtighedsmålerne var anbragt i for kraftig blæst, så vægerne dryppede og vandet i reagensglassene slap for hurtigt op. For det tredie pendlede indblæsningstemperaturerne kraftigt, oven i købet således, at det ene parallelsystem f.eks. på et givet tidspunkt indblæste luft ved 43 C, mens det andet indblæste luft ved 25 C. Disse pendlinger gjorde målingerne vanskelige, og har i øvrigt aldrig kunnet tages bort. Årsagen er givetvis dels, at de to varmeflader reguleres af hver sin rumføler, dels samme årsag som blev opdaget under målingerne i Års, og som derfor omtales i afsnit 5.3.

Det kunne frygtes, at en svømmehal, hvor loftshøjden er så stor som her, ville give en stor temperaturgradient. For at finde rumtemperaturens og rumluftens fugtighedsvariation med højden, blev den ene fugtighedsføler hejset ned fra toppen af pyramiden over midten af det store bassin og måling af temperatur og relativ fugtighed foretaget for hver m. Resultatet fremgår af figur 31.1 Heraf ses, at temperaturvariationen med højden er forbavsende lille, og at fugtigheden fordeler sig som ventet bortset fra en niveauændring i 3-5 meters højde.

Til trods for, at indblæsningen er nedadrettet, vil strålerne, altså når der som under disse målinger indblæses med overtemperatur, bøjes opad og mødes over midten af bassinet i 3-5 meters højde. Der er således en god omrøring af rumluften højere oppe, men ikke så god nede ved bassinoverfladen, hvilket også lufthastighedsmålinger viste.





Figur 31.1: Temperatur- og fugtighedsfordeling lodret over det store bassins midte i svømmehallen "Haraldslund" i Aalborg d. 20.4.1978 kl. 13.10 - 14.35

Vandret indblæsning, som der før har været i svømmehallen, vil ikke kunne give et tilstrækkeligt luftskifte i opholdszonen i denne svømmehal, hvilket personalets klager tidligere også tydede på. Det er en fordel, at det nuværende system giver lave lufthastigheder ved vandoverfladerne og dermed lav fordampning. Men rummets udformning er uheldig for ventilationen.

5.2. Sofiendalsskolens svømmehal

Denne svømmehal indeholder et 12,5·25 m bassin og er i øvrigt traditionelt i udformningen. En del rumluft udsuges af tagventilatorer. En anden del udsuges gennem lavtsiddende vægriste og føres til ventilationscentralen, hvor størstedelen recirkuleres og en lille del afkastes til det fri. At måle friskluftmængden var meget vanskeligt og at måle fugtighed i udsugningen fra tagventilatorerne var umulig af praktiske grunde. Derfor lykkedes det heller ikke i denne svømmehal at måle vandfordampningen.

Pendling

Også i denne svømmehal blev der målt kraftig pendling af indblæsningstemperaturen. Pendlingen var altid så kraftig, at rumtemperaturen svingede meget og svømmere og personale følte ubehag. Det forsøgtes at hindre eller formindske svingningerne ved at øge proportionalbåndet og forkorte integraltiden på PI-regulatoren, der blev styret af en termostat i udsugningen. Alle anstrengelser var forgæves. På figur 33.1 ses eksempelvis, hvordan rumtemperatur og indblæsningstemperatur svinger ved proportionalbånd på 6 C og en integraltid på ca. 5 min. Bemærk at minimum indblæsningstemperatur ikke virker eller har meget stor korrektion. Bemærk desuden den lange svingningstid på ca. 1 time.

5.3. Års svømmehal

På figur 34.1 ses en principskitse af anlægget i Års svømmehal. Hallen indeholder et traditionelt bassin med varierende vanddybde og et børnebassin. Indblæsning sker dels gennem en hulmur, der er opbygget til at adskille tilskuerpladser fra bassinperronen langs hallens østlige langside, dels gennem 4 indblæsningsriste i den sydlige ende af hallen. Udsugningen foregår gennem to store riste i hallens vestvæg. En hygrostat i udsugningskanalen styrer friskluftsspjæld og returluftspjæld. En termostat T1 i udsugningskanalen styrer reguleringsventilen til varmefladen. Termostaten T2 er en minimumtermostat placeret i indblæsningskanalen. Ud over denne primære regulering er der sikkerhedssystemer som frostsikring, brandsikring m.m. Desuden er der et ur, der stopper ventilationen om natten. Ventilatorerne startes om natten i kortere tidsrum af en rumhygrostat, når fugtigheden bliver for høj, eller af en rumtermostat, hvis rumtemperaturen bliver for lav. Ud over dette ventilationsanlæg findes der tre tagventilatorer, som startes af en rumhygrostat placeret under loftet, hvis rummets fugtighed ved topbelastning bliver for høj.

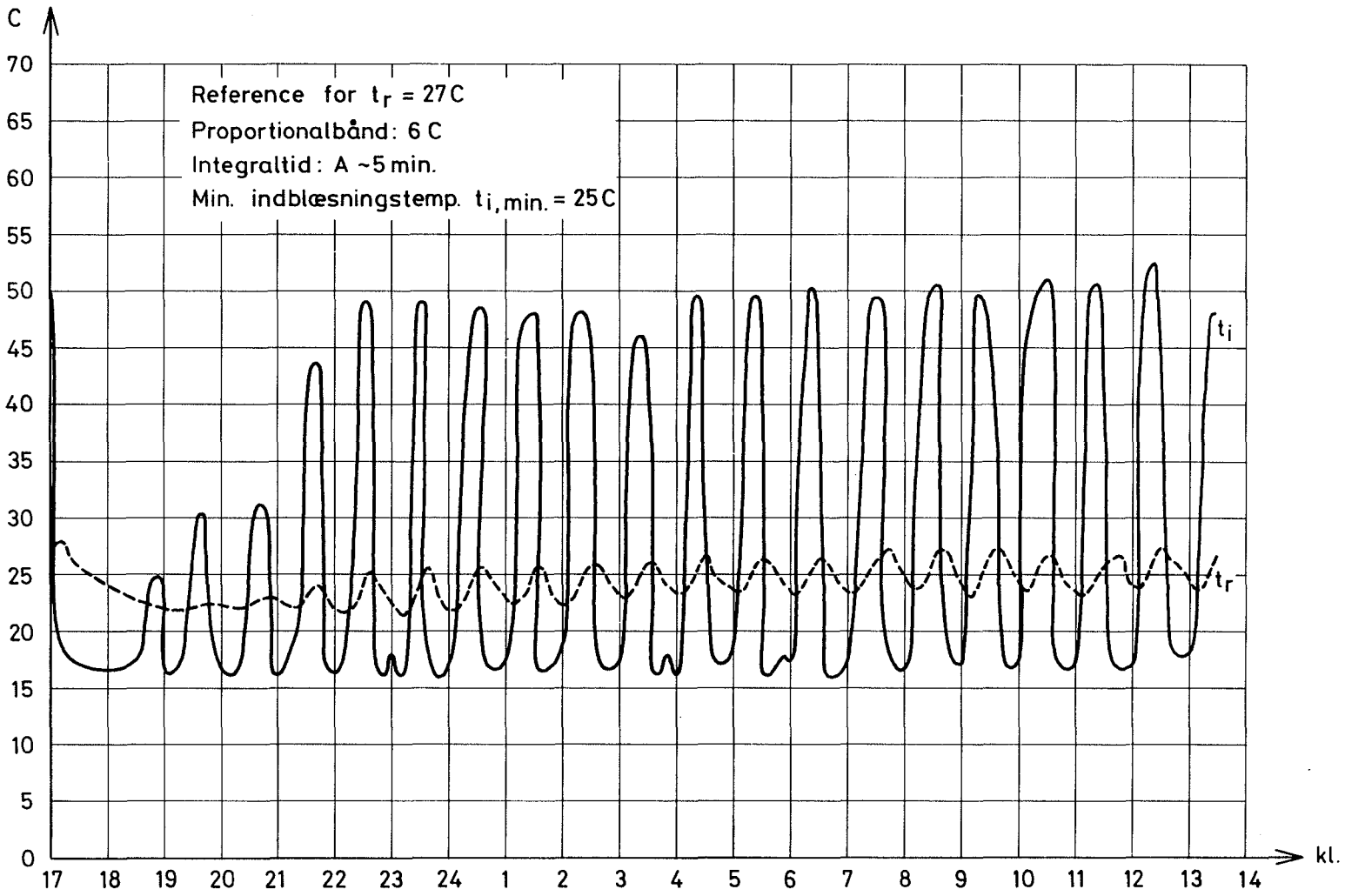
Målte luftmængder

Med spjældene styret helt ud til 100% friskluft måltes følgende luftmængder:

Friskluftmængden = 5,91 m^3/s = 21300 m^3/h

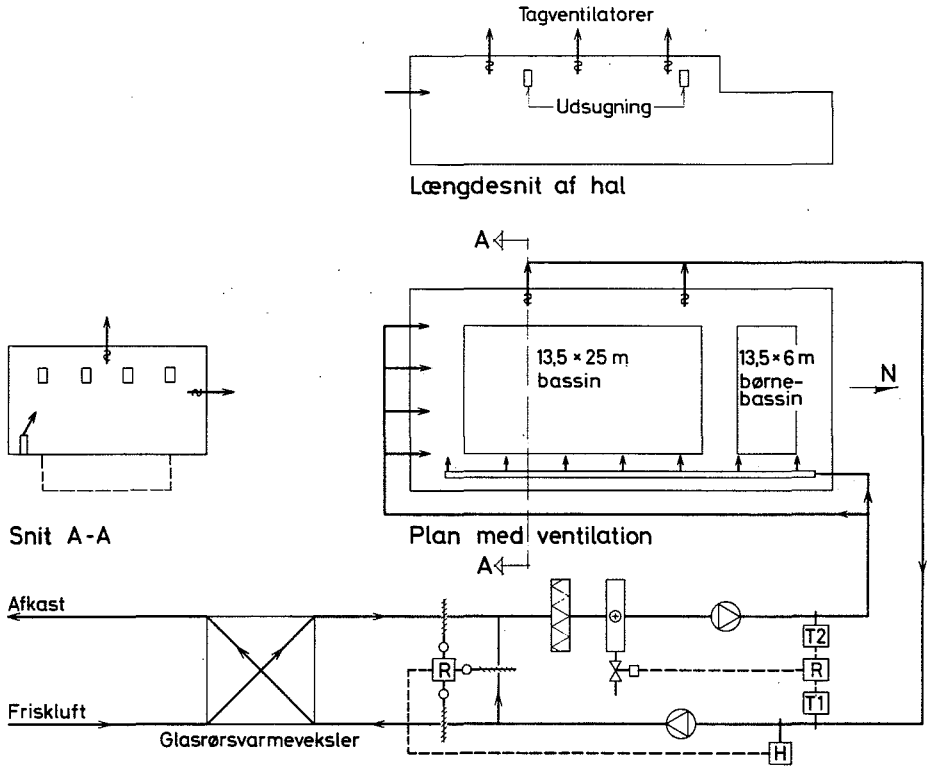
Udsuget luftmængde = 6,32 m^3/s = 22800 m^3/h

Forskellen skyldes en beskeden returluftmængde, idet recirkuleringsspjældet ikke kunne lukke helt tæt.



Figur 33.1: Sofiendalsskolens svømmehal d. 16.5.1978 kl. 17.00 til 17.5.1978 kl. 13.30. Indblæsningstemperatur = t_i, rumtemperatur 1 m over bassinmidte = t_r.

Figur 34.1.



Principskitse af ventilationen i Års svømmehal. Friskluftmængden styres af hygrostaten H. Rumtemperaturen styres af termostaten T1 i udsugningen, idet dog minimumtermostaten T2 sætter en nedre grænse for indblæsningstemperaturen.

Med spjældene styret helt ud til 100% recirkulering måltes ventilationsluftmængden til 7,22 m^3/s = 26000 m^3/h. At luftmængden her er større end ved 100% friskluft skyldes, at trykfaldet i varmeveksleren undgås i dette tilfælde. Normalt, det vil sige næsten hele året, vil friskluftspjældet være næsten lukket og ventilationsluftmængden ≅ 26000 m^3/h svarende til et luftskifte på ca. 4 h^{-1}.

Målinger

Det viste sig, at målingerne i denne svømmehal lykkedes fortrinligt. De i afsnit 3.2 omtalte fugtighedsfølere kunne anbringes i friskluftindtag og afkast og rumlufttemperatur, vandtemperatur og indblæsningstemperatur måltes med termoelementer. Disse målinger registreredes af datalogger + tapepuncher. Herudover blev der til kontrol anbragt tre termohygrografer forskellige steder i rummet. Disse viste god overensstemmelse indbyrdes og med fugtigheden i udsugningen. Under måling af vandfordampning kørtes med 100% friskluft hele tiden, således at friskluftmængden var konstant = 21300 m^3/h. Ligeledes var tagudsugning stoppet og natdrift sat ud af funktion under de egentlige vandfordampningsmålinger. Men herudover blev den normale drift sat i gang visse dage for at kontrollere funktionen af anlægget.

Resultater

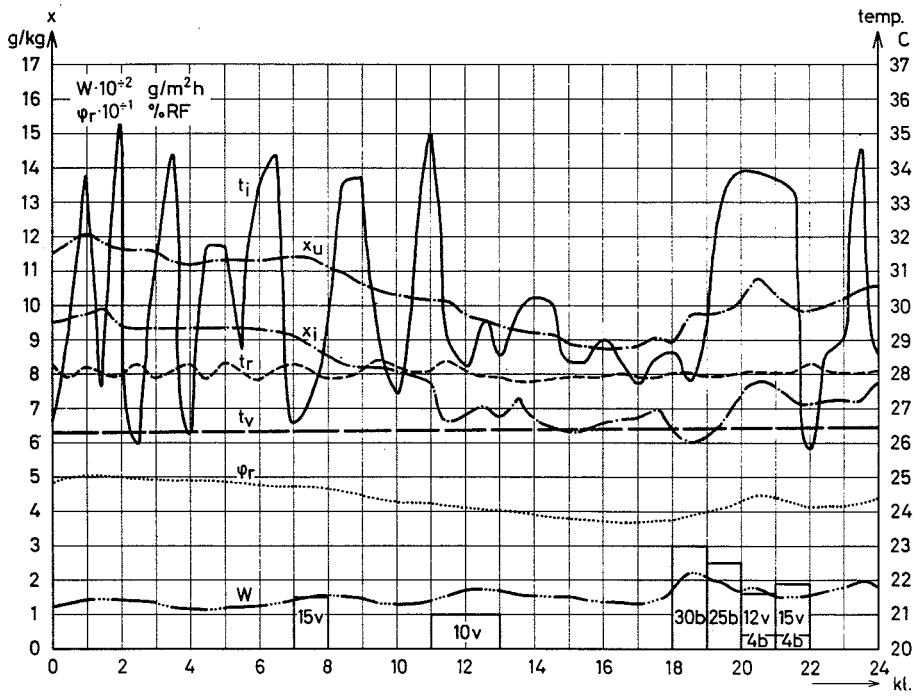
Den første serie målinger udførtes i perioden 4.6.-21.6.1978. Den samme voldsomme svingning i indblæsningstemperaturen, som var set i de andre svømmehaller viste sig straks. På figur 35.1 ses f.eks.

svingningerne den 8.6.1978. I dette døgn svingede udetemperaturen mellem 10 og 18 C. På diagrammet er indtegnet vandtemperatur t_v, rumlufttemperatur t_r, indblæsningstemperatur t_i, vandindhold i indblæsning x_i samt vandindhold i udsugning x_u. Af forskellen $x_u - x_i$ fås vandfordampningen W af:

$$W = \frac{(x_u - x_i)\,g/kg \cdot 21300\ m^3/h \cdot 1{,}2\ kg/m^3}{419\ m^2}\ g/m^2h$$

Det fremgår af diagrammet, at fordampningen W har varieret mellem 110 g/m^2h og 200 g/m^2h i løbet af døgnet, og at luftens relative fugtighed φ_r har svinget mellem 36 og 50% RF. Det ses af diagrammet, at indblæsningstemperaturen svinger meget.

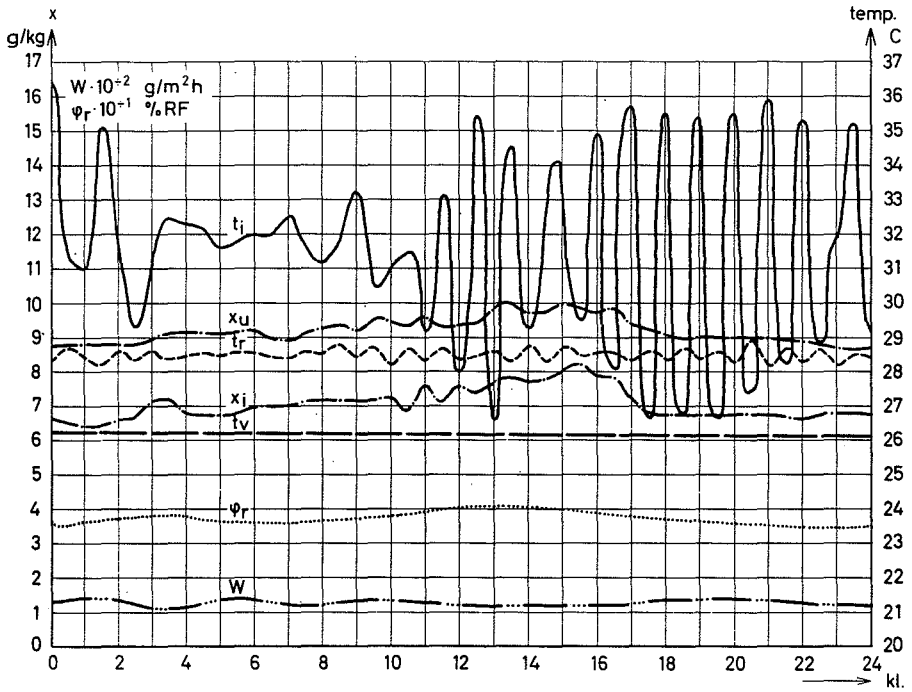
Figur 35.1.



Tilstande i Års svømmehal d. 8.6.1978 ved 100% friskluftdrift. t_v = vandtemperatur, t_r = rumtemperatur målt 1,5m over vandet, t_i = indblæsningstemperatur, x_i = vandindhold i indblæsning, x_u = vandindhold i udsugning, φ_r = relativ fugtighed, W = vandfordampning, og antal badende angives som f.eks. 15v=15 voksne eller 30b=30 børn.

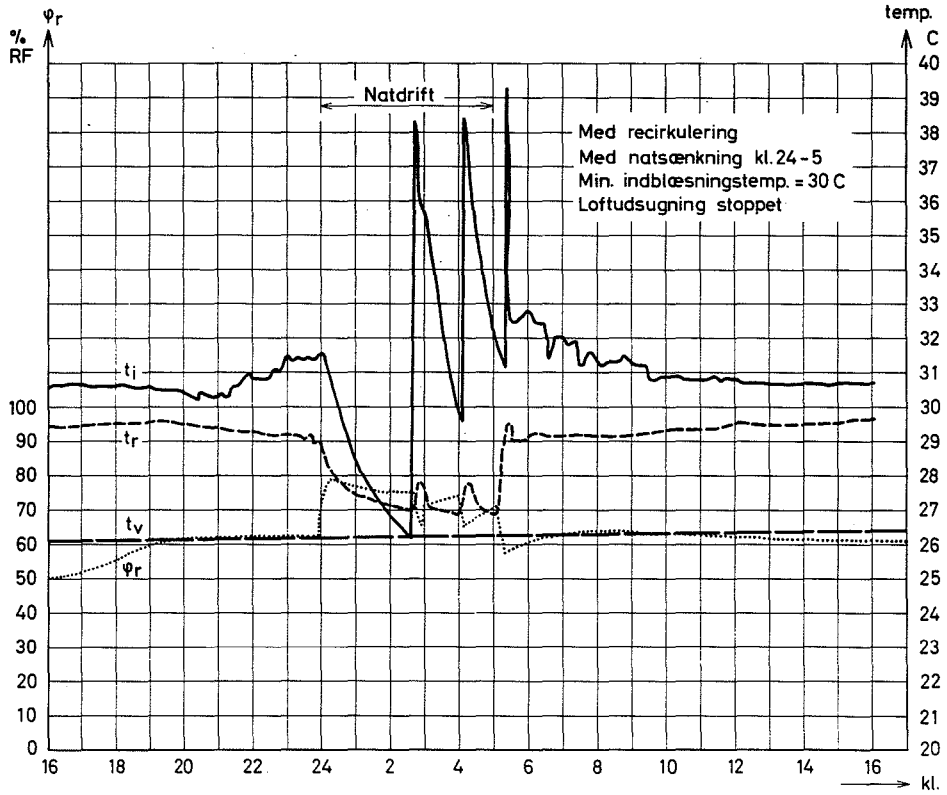
At det ikke er de badende, der bringer systemet ud af balance, fremgår af figur 36.1, der viser tilstandene den 10.6.1978, en lørdag, hvor der ikke var badende på grund af weekendlukning. Udetemperaturen den 10.6.1978 svingede mellem 10 og 15 C. Af dette diagram fremgår, at systemet kan være i ro f.eks. fra kl. 0330 til ca. kl. 11, men at en eller anden ukendt faktor kan bringe systemet i svingninger. Vi ser også her en ret lang svingningstid på en time eller mere ligesom i Sofiendalsskolens svømmehal.

På grundlag af erfaringer fra svømmehalsmodellen blev det nu forsøgt at stoppe disse svingninger ved at hæve $t_{i,minimum}$. Resultatet oversteg ganske forventningerne. Systemet pendlede ikke mere ved ren friskluftdrift. For at undersøge, om systemet også var bragt i balance ved normal drift, det vil sige hygrostatreguleret recirkulering og natdrift, måltes temperaturer og relativ fugtighed også ved disse forhold ved



Figur 36.1.

Tilstande i Års svømmehal d. 10.6.1978 ved 100% friskluftdrift. t_v = vandtemperatur, t_r = rumtemperatur målt 1,5 m over vandet, t_i = indblæsningstemperatur, x_i = vandindhold i indblæsning, x_u = vandindhold i udsugning, φ_r = relativ fugtighed, W = vandfordampning. Ingen badende p.g.a. weekendlukning.



Figur 36.2

Tilstande i Års svømmehal d. 15.6.-16.6.78 ved normaldrift. t_v = vandtemperatur, t_r = rumtemperatur 1,5 m over vandet, t_i = indblæsningstemperatur og φ_r = relativ fugtighed.

forskellige tilstande. Et af resultaterne, der var helt analoge, ses på figur 36.2, hvor referencen for t_r er sat til 29 C og referencen for φ_r kl.16,00 er ændret fra 50 til 60% RF. $t_{i,min.}$ er sat til 30 C. Det ses af diagrammet, at når natdriften starter kl.

24, falder rumtemperaturen som ventet og φ_r stiger. t_i falder som en pæn tidskonstant, idet motorventilen til varmefladen lukker, når ventilatorerne stopper, og kanalføleren afkøles langsomt af omgivelserne. Når rumhygrostaten kræver start af ventilationen (kl. 0230 og 0400), indblæses naturligvis med maksimumtemperatur. Når dagdriften går i gang kl. ca. 5, starter indblæsningstemperaturen højt, men falder meget hurtigt til ro selv efter denne kraftige påvirkning.

Hvorledes pendling undgås

Af andre målinger, der blev foretaget, fremgik det, at når blot den minimale indblæsningstemperatur lå et par grader over rumtemperaturen undgås pendling. Da der praktisk taget hele året er varmebehov i en svømmehal, vil der næsten aldrig af den grund blive for varmt i hallen. Forklaringen på svingningsfænomenet ligger efter de udførte modelmålinger lige for: Hvis indblæsningstemperaturen ved faldende belastning tilfældigvis kommer under rumtemperaturen, vil indblæsningsstrålerne falde på grund af større massefylde end rumluften. Dette medfører uanset indblæsningsfacon i alle svømmehaller en forøgelse af lufthastigheden ved vandoverfladen og dermed kraftig forøget fordampning. Den forøgede fordampning medfører endnu større afkøling af rumluften. Når temperaturreguleringssystemet reagerer, sættes indblæsningstemperaturen op - hastigheden ved overfladen falder - vandfordampningen falder - afkølingen af rumluften falder, hvorved rumtemperaturen stiger endnu mere o.s.v. Det fremgår forhåbentlig klart, at alle svømmehaller vil kunne spare megen varme på grund af denne opdagelse. Svømmehaller med fjernvarmeforsyning vil undgå høje returtemperaturer, men der ligger yderligere den besparelse i at undgå svingningerne, at vandfordampningen og dermed friskluftbehovet nedsættes, hvilket også kommer svømmehaller med egen varmeforsyning til gode.

Fordampning

Af figur 36.1 fremgår, at vandfordampningen lørdag den 10.6.1978 er 110-140 g/m^2h. Denne lørdag er der ingen badende på grund af weekendlukning. Fordampningen svinger tilsyneladende en del, men noget af svingningen er falsk, idet fordampningen som nævnt tidligere er udregnet ud fra differencen $x_u - x_i$. En hurtig ændring i friskluftens vandindhold x_i vil på grund af rummets volumen først efterhånden kunne registreres på x_u. Men da fordampningen W er udregnet hver halve time ud fra de øjeblikkelige værdier af x_i og x_u, vil svingninger i x_i medføre falske svingninger i W.

Sammenlignes fordampningen her med fordampningskurverne vil man se, at fordampningen svarer til en middelhastighed ved overfladerne på lidt under 0,15 m/s.

Af figur 35.1 fra den 8.6.1978 ses for perioden om natten, hvor der ikke er badende, en fordampning på ca. 120 g/m^2h, hvilket også er lidt under den fordampning som fordampningskurverne for $\bar{v}$ = 0,15 m/s viser.

Røgforsøg i svømmehallen godtgør, at luftens hastighed ved overfladerne er ret høj. Ventilationssystemet er udført således, at omrøringen af rumluften er særdeles effektiv, selv om luftskiftet kun er ca. 4 h^{-1}. Tilsættes der røg til indblæsningen er denne jævnt fordelt

i hele hallen i løbet af få minutter - også selv om indblæsningstemperaturen sættes op på maksimum svarende til vintertilfældet.

Ændring af ventilationsluftmængden

Efter disse målinger gik den rådgivende ingeniør på installationsområdet og kommunens tekniske forvaltning med til at sænke ventilationsluftmængden 20% ved at udskifte remskiverne til ventilatorerne. Herved ville der til ventilatorernes drift kunne spares ca. 20.000 kr./år, og derudover ville der ved lavere lufthastigheder ved vandoverfladerne fordampe mindre vandmængder, hvorved friskluftbehovet ville falde. Hygrostaten og spjældene ville selv regulere friskluftmængden efter behov.

Nye målinger

Med spjældene styret helt ud til 100% friskluft måltes nu følgende luftmængder:

Friskluftmængden = 5,24 m^3/s

Udsuget luftmængde = 5,60 m^3/s

Med spjældene styret helt ud til 100% recirkulering måltes ventilationsluftmængden til 6,47 m^3/s.

Efter udskiftning af motorernes kileremskiver faldt luftmængderne således ikke med 20%, men kun til $\frac{5,24}{5,91}$ = 88% af de tidligere målte luftmængder. Årsagen hertil er, at motorerne har øget deres omdrejningstal ved den mindre belastning.

Det viste sig, at ændringen var for lille til at give nogen mærkbar reduktion af lufthastigheden ved overfladen. Men ved yderligere at vende indblæsningsristene langs hallens østside, således at indblæsningen rettedes skråt udad mod ydervæggen, kunne der med røgampul spores en virkning på lufthastigheden. Vandfordampningen blev i første omgang reduceret fra ca. 130 til ca. 90 g/m^2h under i øvrigt nogenlunde ens forhold. Men ved den lavere fordampning øgedes vandtemperaturen langsomt, indtil $\Delta t = t_{luft} - t_{vand}$ = ca. 1,5 C ved $\varphi_r \cong 0,40$ mod en balancetilstand før ændringen på $\Delta t \cong 2,5$ C ved $\varphi_r = 0,40$.

Reduktionen var altså for lille. I denne hal ville luftskiftet uden gener i hvert fald kunne sænkes til 2,9 h^{-1} svarende til de 80% af den projekterede luftmængde. På grund af tidnød måtte yderligere målinger desværre opgives. Der er dog ikke tvivl om, at såfremt vandfordampningen skulle sænkes væsentligt, ville en køling af bassinvandet være nødvendig.

5.4. De badendes vandfordampning

Grundlaget for bedømmelse af de badendes forøgelse af vandfordampningen blev ikke så bredt som ønskeligt og planlagt. Kun målingerne i Års svømmehal var pålidelige nok til vurdering af forøgelsen. Men de badendes indflydelse afhænger af svømmebassinets udformning, idet det er ret afgørende, hvor meget vand, der plaskes op på perronerne omkring bassinet. I Års er den finske rende dækket med specielle riste, der særdeles effektivt standser bølger, således at perronerne kun bliver våde af direkte skumsprøjt og af de våde badende.

At sætte de badendes indflydelse som en forøgelse af bassinernes fordampning vil efter de nye fordampningskurver at dømme være forkert. Har man opnået lave lufthastigheder og en lav fordampning, vil en kraftig belastning af badende kunne øge vandfordampningen med flere hundrede procent, hvorimod en svømmehal, hvor der i forvejen er en kraftig fordampning, måske kun vil få en lille procentvis forøgelse.

0,8 kg/person

Vurderes blandt andet figur 35.1 sammen med flere af samme art, som ikke er medtaget i rapporten, ser det ud til, at der ikke er nogen grund til at skelne mellem børn og voksne. Forøgelsen af vandfordampning fra badende må kunne sættes til ca. 0,8 kg pr. badegæst i Års. Det kan ikke regnes for givet, at denne størrelse vil gælde i alle svømmehaller. Sprøjter de badende meget på perronerne, og er disse opvarmede, vil belastningen givetvis øges. Ved højere relativ fugtighed vil fordampninen fra de badende og fra perronerne ske langsommere. Men da størstedelen af fordampningen formentlig kommer fra de våde perroner, vil dette fortrinsvis betyde, at belastningen udstrækkes til en længere periode, altså ikke nogen væsentlig ændring ved konstant belastning af badende. De 0,8 kg/person skulle ved rimelige rumtilstande være på den sikre side.

6. Varme tilført bassinvandet

For at klarlægge, hvor megen varme, der skal tilføres bassinvandet, blev der opbygget et nyt lille modelbassin i det samme klimarum som 7 m^2 bassinet. Det nye modelbassin, der var med 1 m^2 vandoverflade, blev opbygget med 2x5 cm skumplastisolering i sider og bund. På ydersiderne og midt i isoleringen blev der anbragt termoelementer, således at temperaturfaldet og dermed varmetransmissionen gennem isoleringen kunne beregnes. To elektriske akvarievandvarmere sørgede for konstant temperatur i vandet, og deres el-forbrug blev målt så nøjagtigt som muligt. Disaanemometerets føler blev stillet på et repræsentativt sted 2 cm over vandoverfladen, og lufthastigheden registreredes løbende på en linieskriver. Lufthastighedens gennemsnit søgtes fastholdt på 0,15 m/s ved variation af ventilationen.

6.1. Måleresultater for model

Efter korrektion af den tilførte varmemængde for transmission gennem sider og bund, hvor transmissionen var af størrelsesorden $\pm$ 1 W, opnåedes følgende måleresultater:

Måling nr.	Vand-temp. C	Luft-temp. C	$t_{luft} - t_{vand}$ C	Relativ fugtighed % RF	Vandfordampning g/m^2h	Tilført effekt gsn. W	Fordampningsvarme W
1	23,8	24,4	0,6	51	61	39,5	41,1
2	24,0	26,4	2,4	55	22	0,9	14,6
3	24,0	24,5	0,5	43	100	65,7	67,5
4	23,9	24,4	0,5	62	55	35,7	37,5
5	23,8	24,0	0,2	67	51	37,6	34,3
6	28,2	28,0	-0,2	77	54	37,5	36,5
7	27,5	28,2	0,7	61	76	52,9	51,4
8	27,7	28,5	0,8	61	82	52,0	55,4
9	27,4	28,4	1,0	46	111	75,6	75,4
10	27,9	29,2	1,3	42	112	65,0	76,0
11	28,1	30,5	2,4	46	33	15,2	22,3
12	23,7	25,4	1,7	53	139	78,4	94,5
13	23,9	26,0	2,1	40	120	69,5	80,0
14	24,0	24,5	0,5	42	145	94,5	98,2
15	24,0	24,3	0,3	60	93	58,4	63,1
16	24,0	24,4	0,4	68	70	44,9	47,7
17	28,2	28,5	0,3	42	158	109,1	106,7
18	28,2	28,5	0,3	48	150	99,8	101,7
19	28,2	28,4	0,2	58	137	93,1	93,4

Den tilførte effekt skal tages med forbehold, idet nøjagtigheden på resultaterne ikke er særlig god. Vandtemperaturen kunne måles med en nøjagtighed på ca. $\pm$ 0,05 C, men hvis vandets temperatur i løbet af måleperioden, der var på mindst 10 timer, f.eks. steg med 0,1 C, ville der hertil forbruges følgende gennemsnitseffekt, idet bassinets vandindhold $\cong$ 120 ℓ:

$$p = \frac{120 \text{ kg} \cdot 4187 \text{ J/kg C} \cdot 0{,}1 \text{ C}}{10 \text{ h} \cdot 3600 \text{ s/h}} = 1{,}4 \text{ W}$$

altså en usikkerhed på ca. $\pm$ 0,7 W.

Men hertil kommer en usikkerhed på effektmåleudstyret, der må skønnes til $\pm$ 2% af den aktuelle aflæsning. Den totale usikkerhed på den tilførte effekt må alt i alt skønnes til: $\pm$ 1 W $\pm$ 2% af aflæsning.

Det vil ikke ud fra de udførte målinger være muligt at beregne varmeovergangstallet α ved vandoverfladen. Sammenlignes den tilførte effekt med den til fordampningen forbrugte effekt, ses det, at de to poster altid er af samme størrelsesorden. At tage differensen og dele denne med en meget lille temperaturforskel $t_{luft}-t_{vand}$ ville give en unøjagtighed på flere hundrede % på α.

Inddeles derimod resultaterne i grupper med forskelligt $\Delta t = t_{luft}-t_{vand}$ fremkommer figur 41.1.

Er $\Delta t = 0$ svarer hældningen af linien netop til fordampningsvarmen, hvilket kunne forventes. Er fordampningen f.eks. = 100 g/m^{2}h, forbruges der hertil fordampningsvarmen:

$$\Phi = \frac{0{,}1 \text{ kg/hm}^2 (2500+1{,}93 \cdot t-4{,}9 \cdot t) \text{kJ/kg}}{3600 \text{ s/h}}$$

for $t_{vand} \cong$ 26 C fås:

$$\Phi = \frac{0{,}1 \cdot 2441}{3600} \cong 0{,}068 \text{ kW/m}^2$$

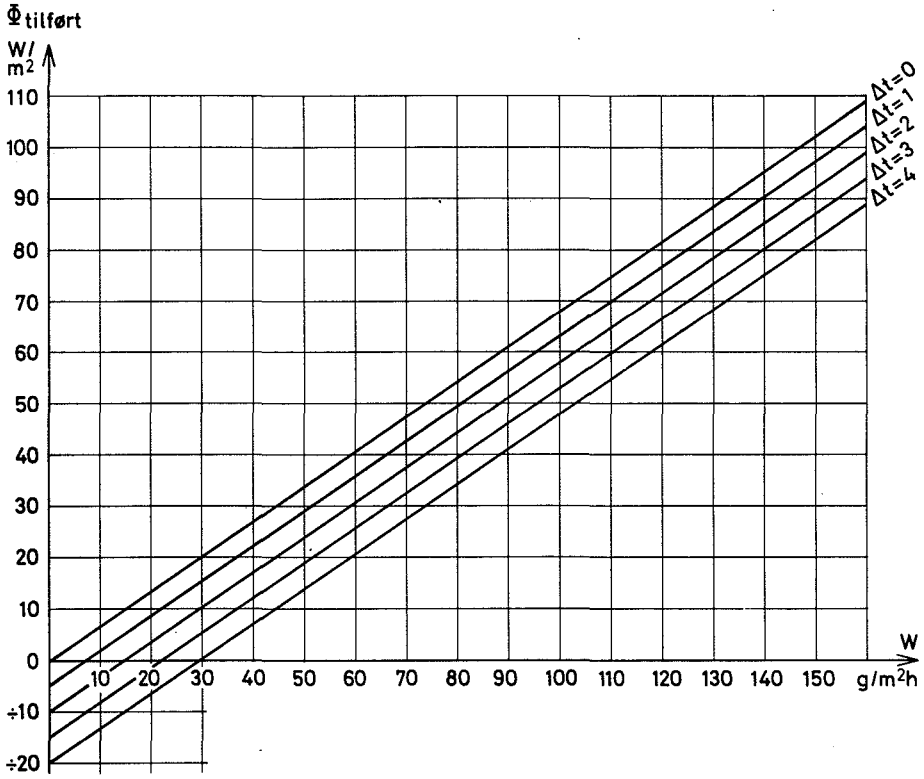
For $\Delta t = t_{luft}-t_{vand} > 0$ fås samme hældning, men med en forskydning nedad svarende til den effekt, der tilføres vandoverfladen. De udførte målinger giver ikke tilstrækkelige resultater, idet Δt ikke er sat højere end 2,4 C. Men de viser nogenlunde overensstemmelse med resultater udledt af Heinz Dienelt, der angiver

$$\alpha = 4{,}6+5{,}8 \cdot v+11{,}6 \left(\frac{T_{vandoverflade}}{T_{luft}} -1\right) \text{ W/m}^2\text{C}$$

for lave lufthastigheder v m/s.
(Målinger er dog kun udført med lufthastigheder ned til 0,5 m/s)

For svømmehaller bliver α da $\cong$ 5 W/m^{2}C, hvilket stemmer nogenlunde med vore resultater. Figur 41.1 er derfor udbygget med linier indtil Δt = 4 C.

Figur 41.1.



Nødvendig varmetilførsel til vandet $\Phi_{tilført}$ som funktion af vandfordampningen W. $\Delta t = t_{luft} \div t_{vand}$ er parameter. Lufthastighed ved vandoverfladen ≅ 0,15 m/s.

Strålingsudveksling

Det ville være ønskeligt med en mere nøjagtig bestemmelse af α, men her kommer også vanskeligheden med at udskille strålingsudvekslingen mellem vægge + loft og vandoverfladen ind i billedet. Er f.eks.

$$t_{vandoverflade} = 26\ C$$
$$t_{loft+vægge} = 22\ C$$

vil vandoverfladen ved stråling afgive ca.:

$$\Phi_s = 5{,}54\left[\left(\frac{273+26}{100}\right)^4 - \left(\frac{273+22}{100}\right)^4\right] = 23{,}2\ W/m^2$$

Hvis der derimod er høje indvendige overfladetemperaturer f.eks. om sommeren, og der er lys eller sol på vandoverfladen, vil der kunne blive tilført en meget større varmemængde til vandoverfladen. Derfor er en nøjere måling af α opgivet, som andre tidligere har måttet opgive det. For svømmehaller må det være tilstrækkeligt at regne med et α_k ved vandoverfladen på 5 W/m^2C og desuden udregne varmetilførslen ved stråling til vandoverfladen.

6.2. Fuldskalamålinger

Af andre varmeeffekter, der i aktuelle svømmehaller udveksles med bassinvandet, vil transmissionstabet til ingeniørgang og bund som regel kun betyde mindre. Ingeniørgangen er på grund af varmerør, ventilationskanaler, undervandsbelysning m.v. som regel ligeså varm som bassinvandet eller varmere. Er der ingeniørgang hele vejen rundt om bassinet, hvilket absolut er at foretrække af hensyn til tilsyn med utætheder, vil man nok gennemsnitligt komme de reelle forhold nærmest ved at sætte transmissionstabet gennem sider og bund til 0.

En anden varmeeffekt, der har større betydning, er varmetilførslen, der stammer fra pumperne til vandrensning m.v. Herfra vil vandet stort set tilføres den forbrugte el-effekt.

Nødvendig varmetilførsel ≅ 0

Det har vist sig, at såfremt man kører optimalt med sin svømmehal, d.v.s. lufttemperaturer mindst et par grader over vandtemperaturen og en luftfugtighed på ca. 50-60%, vil der slet ikke være behov for at tilføre varme til vandet. Under målingerne i Års svømmehal f.eks. har varmeveksleren for bassinvandsopvarmning altid været lukket. Af kurverne ses, at bassinvandet opvarmes eller afkøles ganske langsomt afhængigt af vandfordampningen. Balancetilstanden synes her f.eks. at være $\varphi_r = 0{,}40$; $t_{vand} = 25{,}5$ C; $t_r = 27{,}7$ C og vandfordampningen $W \cong 120$ g/m^{2}h. Ifølge figur 41.1 skulle effektforbruget til bassinvandet være ca. 70 W/m^2. Da de samlede bassinoverflader = 419 m^2, skulle dette svare til et behov på 29 kW. Cirkulationspumpen for vandrensningen er påstemplet effekten 11 kW. Resten d.v.s. 29-11 = 18 kW ~ 43 W/m^2 må hovedsagelig stamme fra strålevarmetilskud. Års svømmehal har fornuftigt nok kun få og små vinduer, men solen skal ikke skinne på nogen stor del af vandoverfladen, før effekten er betydelig i denne forbindelse. Den øvrige del af opvarmningen stammer fra belysning, badende og strålingsudveksling.

6.3 Konklusion

Da målingerne i de andre svømmehaller gav samme resultat, nemlig at opvarmning af bassinvandet ikke er nødvendig, må konklusionen blive følgende:

Bassinvandet vil altid opnå en acceptabel balancetemperatur. Tilføres megen varme øges temperaturen i vandet, indtil der igen er balance ved mindre $\Delta t = t_{luft} - t_{vand}$ som følge af øget fordampning. Øget varmetilførsel vil således automatisk øge friskluftbehovet. Hvis man omvendt forsøger at nå de meget lave fordampningstal fra figur 24.1, 24.2 og 25.1 f.eks. på 15 g/m^{2}h ved $t_{luft} = 28$ C, $t_{vand} = 26$ C, $\varphi_r = 0{,}60$ og $v \leq 0{,}1$ m/s, vil dette ligesom i modellerne normalt kun kunne opnås ved køling af bassinvandet. Man kunne f.eks. forestille sig, at bassinvandet brugtes til forvarmning af brugsvandet.

Førstegangsopvarmning

Hvis man ikke installerer varmeveksler til opvarmning af bassinvandet, kunne man måske frygte for, at førstegangsopvarmningen ville tage alt for lang tid. Men dette er ikke tilfældet. Hvis man lader ventilationsanlægget og vandcirkulationen gennem filtrene køre normalt under opfyldningen, vil en overslagsregning vise, at bassinvandet vil kunne opvarmes i løbet af de 2-3 uger, som påfyldningen normalt varer.

Komfort

I de fleste svømmehaller gør man den fejl, at vandtemperaturen sættes = eller højere end lufttemperaturen. Dette skyldes nok især, at tilsynet er påklædt, og derfor ønsker en lavere rumtemperatur for at være i komforttilstand. Ser man i stedet på de badendes komfort, vil en vandtemperatur omkring 26 C nok være passende. Hvis en badende opholder sig ovenfor vandet og er tør, vil komforttemperaturen være ca. 28 C for en stillesiddende og

24 C for middelaktivitet. Er den badende derimod våd, vil kroppens vandfordampning formentlig være af størrelsesordenen 200 g/m^{2}h og den hertil nødvendige kropsvarme af størrelsesordenen 150-200 W/m^2. Dette overstiger selv ved middel aktivitet (115 W/m^2) den varme, legemet producerer, således at komforttemperaturen formentlig for en våd ville være omkring 28-30 C. Det må da af hensyn til de badende være rimeligt at vælge en lufttemperatur på ca. 28 C.

Driftsøkonomi

Sammenlignes driftsudgifterne f.eks. for Års svømmehal i de to tilfælde:

1) t_{luft} = 28 C
t_{vand} = 26 C
φ_r = 0,60

2) t_{luft} = 26 C
t_{vand} = 26 C
φ_r = 0,60

spares i transmissionstab i tilfælde 2) i gennemsnit om året ca. 1 kW. Men vandfordampningen øges fra ca. 90 til ca. 130 g/m^{2}h ved v $\cong$ 0,15 m/s.

I tilfælde 1) bliver det gennemsnitlige friskluftbehov om året ca.

$$G_1 = \frac{W}{\Delta x} = \frac{90\ g/m^2h \cdot 419\ m^2}{(14,2-5,5)g/kg} = 4300\ kg/h$$

svarende til et effektforbrug til opvarmning på

$$\Phi_{f,1} = \frac{4300\ kg/h \cdot 1\ kJ/kg\ C(28-8)C}{3600\ s/h} = 23,9\ kW$$

I tilfælde 2) bliver det gennemsnitlige friskluftbehov om året ca.:

$$G_2 = \frac{W}{\Delta x} = \frac{130\ g/m^2h \cdot 419\ m^2}{(12,7-5,5)g/kg} = 7600\ kg/h$$

svarende til et effektforbrug til opvarmning på:

$$\Phi_{f,2} = \frac{7600\ kg/h \cdot 1\ kJ/kg\ C(26-8)C}{3600\ s/h} = 38,0\ kW$$

I Års svømmehal vil man således ved at sænke lufttemperaturen fra 28 til 26 C og i øvrigt ens forhold øge det gennemsnitlige varmeforbrug med ca. $\frac{38-23,9}{2}$ -1 = 6 kW, når luftvarmevekslerens gennemsnitlige virkningsgrad sættes til 0,5. Dette svarer til en årlig forøgelse af varmeudgifterne på ca.:
6 kW·24 h/døgn·365 døgn/år·0,12 kr./kWh $\cong$ 6000 kr./år.
Denne forøgelse er vel at mærke beregnet på baggrund af værdier ved ret høje lufthastigheder. Hvis man opnår lufthastigheder under 0,1 m/s, kan man selv af diagrammerne for vandfordampning se, hvor stor forskellen i vandfordampning og dermed friskluftbehovet bliver.

Loftsvarme og sol

Det fremgår forhåbentlig af det foregående, at loftsvarme må være helt utænkeligt i en svømmehal. Da de første målinger i vores modelrum startede for næsten 2 år siden, blev loftsvarmen anvendt i begyndelsen. Men det viste sig hurtigt, at loftsvarmen hævede vandoverfladens temperatur, så at vandfordampningen øgedes med flere hundrede procent sammenlignet med et normalt ventileret rum.

Solen er selvsagt meget værre. Gennem vinduerne i en svømmehal vil den tilføre belyste dele af bassinoverfladen flere hundrede W/m^2 og dermed øge fordampningen meget stærkt. Hvis solen har en nedbrydende virkning på kloraminer og dermed en positiv virkning i en svømmehal, så har den to afgørende negative virkninger, som bør bandlyse solbeskinnede vinduer i svømmehaller for al fremtid. Den ene ulempe er den omtalte helt urimelige forøgelse af vandfordampningen. Den anden meget væsentlige ulempe er, at en solbeskinnet bassinoverflade er ugennemsigtig for livredderne og dermed betyder øget risiko for drukneulykker.

"Drivhuse"

Dette forskningsprojekt kom for sent til at kunne advare mod opførelsen af glashuse over svømmebassiner. Mig bekendt er der indtil nu herhjemme opført to svømmehaller, der har meget store glasarealer i såvel vægge som tag. I forbindelse med et afgangsprojekt ved Instituttet for Bygningsteknik blev der i efteråret 1977 udført en række målinger i den nye glasoverdækning over Skansebadet i Nørresundby. Målingerne viste med al ønskelig tydelighed, at idéen med glas er helt umulig. En referatrapport om dette projekt vil måske blive offentliggjort i et teknisk tidsskrift, hvorfor der i denne rapport blot skal advares kraftigt mod glas i svømmehaller. Man vidste ikke bedre, da disse haller blev bygget som drivhuse. Nu har vi gjort forsøget, og det faldt ikke heldigt ud. Lad derfor disse to svømmehaller af glas blive de sidste herhjemme, og lad os blive fri for store vinduer i svømmehaller i fremtiden - helst helt fri for vinduer.

7. Konsekvenser af resultaterne

De i denne rapport beskrevne resultater skulle gerne medføre radikale ændringer i udførelse af ventilationsanlæg m.m. til svømmehaller og i driften af disse anlæg. Vi må erkende, at vi hver gang, der er projekteret en svømmehal hidtil, har bevæget os ud i det ukendte på flere områder. Det er min overbevisning, at denne rapport vil kunne give et væsentligt bidrag til at bringe projektering af svømmehaller på mere sikker grund, og at såvel investeringer som driftsudgifter vil kunne reduceres væsentligt, samtidig med at man opnår bedre komfort for de badende. Men et er, hvad der kan opnås ved nye anlæg, noget andet er de eksisterende anlæg. Derfor behandles disse hver for sig i det følgende.

7.1. Projektering af nye svømmehaller

For nye svømmehaller skal der her angives en række punkter, der bør følges ved projektering og drift.

Vinduer

Undgå helst vinduer i en svømmehal. Skal der absolut være vinduer, skal de være små og orienteret mod nord eller være afskærmet således, at solindfald på bassinvandet undgås.

Ingeniørgang

Lad ingeniørgangen føre hele vejen rundt om bassinerne. Tilsyn med installationer og utætheder i bassinerne er absolut nødvendig. Føres ventilationskanaler m.v. i ingeniørgangen, vil denne blive så varm, at dyre gulvvarmeslanger under perronerne omkring bassinerne kan undværes. Disse gulvvarmeslanger har jo desuden vist sig at være udsat for stor korrosionsrisiko på grund af det salte klorvand. Husk at installere gulvafløb i ingeniørgangen.

Vandcirkulation

Injektionsåbningerne for renset vand til bassinerne skal placeres ca. 20 cm over bunden også i den dybe del af bassinerne. Herved kan opnås temperaturgradienter i den dybe del af bassinerne på kun ca. 0,2 C, mens injektionsåbninger umiddelbart under overfladen kan give temperaturgradienter på 6-8 C i dybe bassiner, hvilket er ensbetydende med ringe vandcirkulation i dybden.

Varmeveksler for bassinvand

Tilførsel af varme til bassinvandet i en normal svømmehal er ikke nødvendig. Installation af varmeveksler giver blot brugeren mulighed for at køre uøkonomisk. Derimod kan der installeres en varmeveksler, der køler bassinvandet ved hjælp af det kolde brugsvand. Automatisk regulering af kølingen er helt unødvendig på grund af det store bassinvolumen, håndafspærring vil fuldt ud være tilstrækkeligt.

Ventilationssystemets udførelse

Ventilationsanlægget bør udføres med hygrostatreguleret recirkulering. Eventuel luft-luft varmeveksler indsættes udenfor recirkuleringen. Ved beregning af, hvorvidt en luft-luft varmeveksler er en fordelagtig investering, må tryktabet over varmeveksleren og dermed øgede ventilatorudgifter ikke glemmes. Indblæsningstemperaturen bør styres via en termostat i udsugningen, men med en minimumtermostat til begrænsning af laveste indblæsningstemperatur. Minimumtermostaten skal stilles 2-3 grader højere end rumtemperaturen.

Luftskiftet

Luftskiftet i hallen skal sikre god omrøring og opblanding, men skal på den anden side give så lave lufthastigheder hen over vandoverfladen som muligt. Indblæsnings- og udsugningsåbningernes art og placering har naturligvis afgørende betydning. Placer ikke udsugningen i toppen af en høj svømmehal. Man må regne med større lufthastigheder ved vandoverfladerne ved den nyere type render, hvor vandoverfladen er omtrent i niveau med gulvet. Luftskiftet skal indreguleres efter ibrugtagning, som angivet i afsnittet indregulering.

Friskluftmængden

Den nødvendige friskluftmængde beregnes ud fra vandfordampningen, der bestemmes ved hjælp af fordampningskurverne + tillæg for badende. Et rimeligt dimensionerende maksimalt vandindhold i friskluften for regnvejr om sommeren må være x_i = 9-10 g/kg. Hvis man sørger for køling af bassinvandet og indregulerer luftskiftet, indtil lave lufthastigheder er opnået, kan figur 24.1, 24.2 og 25.1 anvendes. I modsat fald anvendes figur 25.2.

Natdrift

Særlige foranstaltninger til at reducere eller stoppe ventilationen om natten vil normalt ikke kunne svare sig. Stoppes ventilationen vil temperaturen i løbet af natten falde til lidt under vandtemperaturen. Den relative fugtighed stiger ret hurtigt til 70-80%. Den vandfordampning, der herefter sker, vil absorberes i hallens indvendige beklædning af træ eller mure og må fjernes igen ved opstart af normaldrift. Sættes en rumhygrostat til at starte ventilationen, når rumluftens fugtighed om natten bliver for høj, f.eks. > 70%, vil man sandsynligvis alt i alt øge fordampningen og dermed friskluftbehovet. Efter en omhyggelig indregulering vil det efter målingerne at dømme være bedst at lade anlægget køre uafbrudt. Derved opnås erfaringsvis langt færre driftsforstyrrelser. En lille detalje i denne forbindelse er, at hygrostater ændrer indstilling med temperaturen.

Indregulering af luftskiftet

Efter opstarten skal anlægget indreguleres til optimalt luftskifte. Ved at stille spjældene på maksimal friskluft fås den mindste indblæste luftmængde, idet recirkulering normalt giver mindre tryktab, især hvis der anvendes luft-luft varmeveksler. Stil desuden indblæsningstemperaturen op på maksimum, således at vinterdrift efterlignes. Tilsæt røg til indblæsningen og kontroller, at røgen hurtigt, d.v.s. i løbet af få minutter, er fordelt over hele hallens volumen. Er dette tilfældet, er det konstateret, at luftskiftet er tilstrækkeligt.

Det er vanskeligere at måle lufthastigheden ved vandoverfladen for at se, om luftskiftet er for højt. Med røgampul tilsættes røg til luften rundt om bassinerne for at skønne, om lufthastigheden over vandoverfladerne er for høj. Der vil være store forskelle i lufthastigheden såvel med tiden som med stedet. At bedømme den gennemsnitlige lufthastighed kræver erfaring, men generelt kan siges, at hvis luften meget resolut bevæger sig hen over vandoverfladerne i den ønskede retning, vil lufthastigheden være for høj. Hvis derimod luften undertiden står stille eller bevæger sig op og ned på visse steder, er lufthastigheden passende.

For hver gang ventilatorernes omdrejningstal ændres bør førstnævnte røgforsøg for opvarmningstilfældet gentages for at sikre tilstrækkeligt luftskifte overalt.

Indregulering af temperaturer og fugtighed

Med skrivende instrumenter til registrering af vandtemperatur, rumlufttemperatur og indblæsningstemperatur samt relativ fugtighed i hallen er indreguleringen meget let. Termostaten, der måler rumtemperaturen, sættes på den ønskede værdi og minimum indblæsningstemperatur 2-3 C højere. Hygrostaten kan passende sættes på 60% RF. Kontroller at indblæsningstemperaturen ikke pendler og at dens minimumværdi ikke underskrides. Uden for badetider skal indblæsningstemperaturen være helt i ro, mens den under badning vil svinge 2-3 C. Efter pludselig ændring f.eks. i referencen skal indblæsningstemperaturen hurtigt falde til ro. Hvis indblæsningstemperaturen uden badende eller anden varierende belastning pendler hurtigt, er der noget galt med reguleringssystemet, f.eks. at proportionalbåndet er stillet for snævert. Hvis indblæsningstemperaturen pendler langsomt, d.v.s. med en svingningstid på 1-1,5 timer, skal minimum indblæsningstemperatur hæves.

Vandtemperaturen vil efter lang tid, d.v.s. nogle døgn, indstille sig på en ligevægtstemperatur 2-3 C under rumtemperaturen. Den kan i nogen grad reguleres ved hjælp af den relative fugtighed. Øges den relative fugtighed, vil fordampningen falde og vandtemperaturen stige langsomt, indtil der igen er ligevægt mellem tilført varme og fordampningsvarmen. Omvendt vil vandtemperaturen falde ved lavere φ_r. Ved køling af bassinvandet vil der kunne opnås større afstand mellem luft- og vandtemperatur og dermed lavere fordampning.

Vandtemperaturen bør altid ligge mindst et par grader under rumtemperaturen. Mindre $\Delta t = t_{luft}-t_{vand}$ betyder en meget kraftig forøgelse af vandfordampningen og dermed af driftsudgifterne. Eventuelle hensyn til handicapbadende må ikke drives så vidt, at vandtemperaturer over ca. 26 C accepteres, da dette for rimelig drift ville medføre rumtemperaturer over 28 C.

7.2 Eksisterende svømmehaller

For eksisterende svømmehaller er de samme punkter som de i afsnit 7.1 nævnte aktuelle, men kan ikke altid gennemføres. I det følgende skal foranstaltninger nævnes i den rækkefølge, der normalt vil give faldende afkast i forhold til investeringen, startende med ændringer, som er gratis.

Min. indblæsningstemperatur

Indstillingen for minimum indblæsningstemperatur sættes 2-3 grader højere end den ønskede rumtemperatur. Kontroller at indstillingen aldrig underskrides.

Varme til bassinvand

Luk helt af for varmeveksleren, der tilfører varme til bassinvandet. Bliver bassinvandet for koldt, hæves rumtemperaturen og eventuelt den relative fugtighed. Rumtemperaturen bør være mindst 2-3 grader højere end bassinvandet.

Natdrift

Sæt eventuel natdrift ud af funktion.

Luftskiftet

Udfør de i afsnit 7.1 nævnte røgforsøg for at finde den optimale ventilationsluftmængde. Reduktion af luftmængden klares normalt ved udskiftning af kileremskiver. Forøgelse af luftmængden kan kræve større ventilatormotorer.

Lamper

For at mindske varmetilførslen til bassinvandet slukkes flest mulige lamper, også undervandsbelysningen, uden for benyttelsesperioderne.

Solafskærmning

Hvis solen gennem vinduer kan ramme vandoverfladen, må disse vinduer afskærmes effektivt helst med udvendige persienner. Anvend eventuelt fotocellestyring af solafskærmningen, men den skal være hurtig til at trække for, forsinkes før der trækkes fra, så pjatkørsel ved vandrende skyer undgås.

Recirkulering

Hvis det ikke findes i forvejen, kan der eventuelt etableres hygrostatstyret recirkulering. Denne ændring kan være meget dyr, men vil ofte kunne svare sig.

8. Kritik og konklusion

Man kunne ønske sig, at nærværende rapport også havde omfattet værdier for vandfordampning, når $t_{luft} < t_{vand}$, ligesom undersøgelser for flere lufthastigheder ville være ønskeligt. Men dette projekt har taget 1,5 år mod oprindeligt planlagt 1 år, og en sådan udvidelse ville tage meget længere tid og kræve flere ressourcer. F.eks. rakte de til rådighed værende varme- og køleeffekter m.m. ikke længere end til de undersøgte områder, og da resultaterne viste sig at være så revolutionerende i forhold til tidligere projekteringspraksis, fandtes det afgørende vigtigt at indskrænke undersøgelsen til de for svømmehaller mest interessante områder, således at resultatet kunne offentliggøres snarest muligt.

Hvis en og anden nidkær matematiker skulle mangle nøjagtige og korrekte usikkerhedsberegninger, så må vedkommende bedrøves med, at usikkerheden på målingerne ikke var så simpel og let at beregne. Luftbevægelser især er meget mærkelige specielt ved små lufthastigheder. Luften bevæger sig i alle mulige retninger med alle mulige frekvenser på alle mulige steder og tidspunkter - hvordan beregne usikkerhed på det? Når det alligevel voves at offentliggøre resultater, skyldes det, at der er fundet ret god overensstemmelse mellem modelmålingerne og fuldskalamålingerne.

Skulle projektet forbedres, ville det kræve en hel del mere udstyr og mere nøjagtigt måleudstyr, end dette institut for øjeblikket råder over eller har mulighed for at anskaffe. Men da handelsministeriet endnu ikke har orket at svare nej på en ansøgning af 11.11.1976 om energiforskningsmidler til dette projekt, kan man måske risikere at få en uventet bevilling om nogle år.

Det skal på ingen måde foregøgles, at de i denne rapport nævnte resultater er meget nøjagtige. Men et stort fremskridt er det dog, at hvor man efter alt at dømme før dimensionerede efter præmisser, der var flere hundrede procent ved siden af, nu vil kunne ramme inden for måske $\pm$ 20 %. Når anvendelsen tages i betragtning, hvor man jo i en stor svømmehal ikke kan tale om én rumtemperatur, én relativ fugtighed, én lufthastighed m.m., er det et spørgsmål, hvorvidt større nøjagtighed på måleresultaterne vil kunne give gevinst, der svarer til arbejdsindsatsen.

Hvad angår omfanget af svømmehalsbyggeri, er der nu ca. 200 overdækkede svømmehaller i Danmark, ca. 350 i Sverige og ca. 3000 i Vesttyskland. I Danmark bygges der for øjeblikket svømmehaller for ca. 125 mill. kr./år.

Følges anvisningerne i denne rapport vil man groft sagt kunne spare 20.000-100.000 kr. pr. år pr. svømmehal til el- og varmeenergi afhængig af hallens størrelse og driftsmåde. I nye svømmehaller kan dette opnås med mindre investering end normalt, i eksisterende svømmehaller ved forholdsvis små investeringer, der oftest vil kunne indtjenes på mindre end et år.

Litteratur

[1] Werner Häussler: Zur wasserverdunstung aus offenen Oberflächen.
Wissenschaftliche zeitschrift der Technischen Hochschule Dresden.
7(1957/58) Heft 5.

[2] Heiz Dienelt: Verdunstungsversuche an ruhenden Wasseroberflächen.
Doktordisputats fra "Fakultät für Maschinenbau der Technischen Hochschule Karl-Marx-Stadt" 1967.

[3] E. Eckert: Einführung in den Wärme- und Stoffaustausch.
3. Aufl. (1966) Springer Verlag, Berlin m.m.

[4] W. Häussler: Die temperaturverteilung im Wasser und in der Luft beim gekoppelten Wärme- und Stoffaustausch.
Dissertation (1955) Technischen Hochschule, Dresden.

[5] W. Häussler: Zur Wasserverdunstung aus offenen Oberflächen.
Wissenschaft. Z. der TH Dresden 7(1957/58)H.5.

[6] E. Hofmann: Wärme- und Stoffübertragung II. Teil im Handbuch der Kältetekchnik
3. Bd.
Herausgeber R. Plank.
Springer Verlag (1959) Berlin m.m.

[7] W. Klenke: Die Wärme- und Stoffübertragung bei der Verdunstungskühlung und die Beurteilung von Kühltürmen.
Dissertation (1964) TH Braunschweig.

[8] O. Krischer: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trochungstechnik.
Springer Verlag (1956) Berlin m.m.

[9] W.K. Lewis: The evaporation of a Liquid into a Gas. A Correction.
Mec. Engineering 55 (1933) s. 567.

[10] Lurie u. Michailoff: Die Verdunstung von Wasser aus offenen Oberflächen.
Gesundh.-Ing. 59 (1936) Nr. 21 s. 289/294.

[11] F. Merkel: Verdunstungskühling.
VDI-Forschungsheft 275 (1925).

[12] E. Sprenger: Verdunstung von Wasser aus offenen Oberflächen.
Z. Heizung und Lüftung 17 (1943) H. 1 s. 7/8.

[13] H. Thiesenhusen: Untersuchungen über die Wasserverdunstungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur des Wassers, der Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit.
Gesundh.-Ing. 53 (1930) H. 8 s. 113/119.

9. Tillæg

I slutningen af 1978 blev rapporten delvis efterprøvet. Dette skete dels via afgangsprojektet "Vinderup svømmehal" udført af Niels Bøge og Johannes Overgaard Andersen, dels ved laboratoriemålinger og beregninger i øvrigt.

9.1 Fordampningens størrelse

Ved målinger i Vinderup svømmehal har der på grund af praktiske vanskeligheder været en del usikkerhed på målemetoderne og dermed ret stor spredning på målingerne af den fordampede vandmængde. Men totalbilledet af ca. 50 målinger stemmer godt overens med de i rapporten angivne fordampede mængder for hastigheder $\bar{v} < 0{,}1$ m/s. Som i de andre svømmehaller, hvor målinger har fundet sted, har det vist sig, at selv om der blev lukket for varmevekslerne til bassinvandsopvarmning, var det ikke muligt på lang sigt at opnå lufttemperaturer, der lå højere end 1-2 C over vandtemperaturen. Derfor har de mindste fordampede vandmængder været ca. 50 g/m^2h.

En "billig" køling

Hvis der ikke i praksis indrettes køling af bassinvandet, skal man således ikke regne med de helt små fordampningsmængder på 10-20 g/m^2h, som modelmålingerne har vist. Men ifølge figur 41.1 skal der måske køles ca. 40 W/m^2 bassinoverflade for at sænke bassintemperaturen tilstrækkeligt. Dette vil normalt kunne opnås ved køling med brugsvand. Er bassinet f.eks. 12,5x25 m = 312,5 m^2, kræves der en køleeffekt på 0,040·312,5 = 12,5 kW = 10750 kcal/h, hvilket kan klares ved opvarmning af en brugsvandsmængde på 900 ℓ/h fra 8 til 20 C. Er brugsvandsmængden = ca. 50 ℓ/besøgende, kræves der altså et besøgstal på ca. 430 /døgn. Men hvis der tilsættes friskvand i forbindelse med filterskylninger, vil dettes køleeffekt naturligvis medvirke. Behovet for køling af bassinvandet afhænger således af filtertype og skylningsmetode.

9.2 Belysning og solindfald

For at varmetilførslen til bassinoverfladen ikke skal blive for stor, er det vigtigt, at der ikke installeres større lyseffekt i svømmehallen end nødvendigt. Ligeledes vil solindfald på bassinoverfladen være særdeles uheldigt.

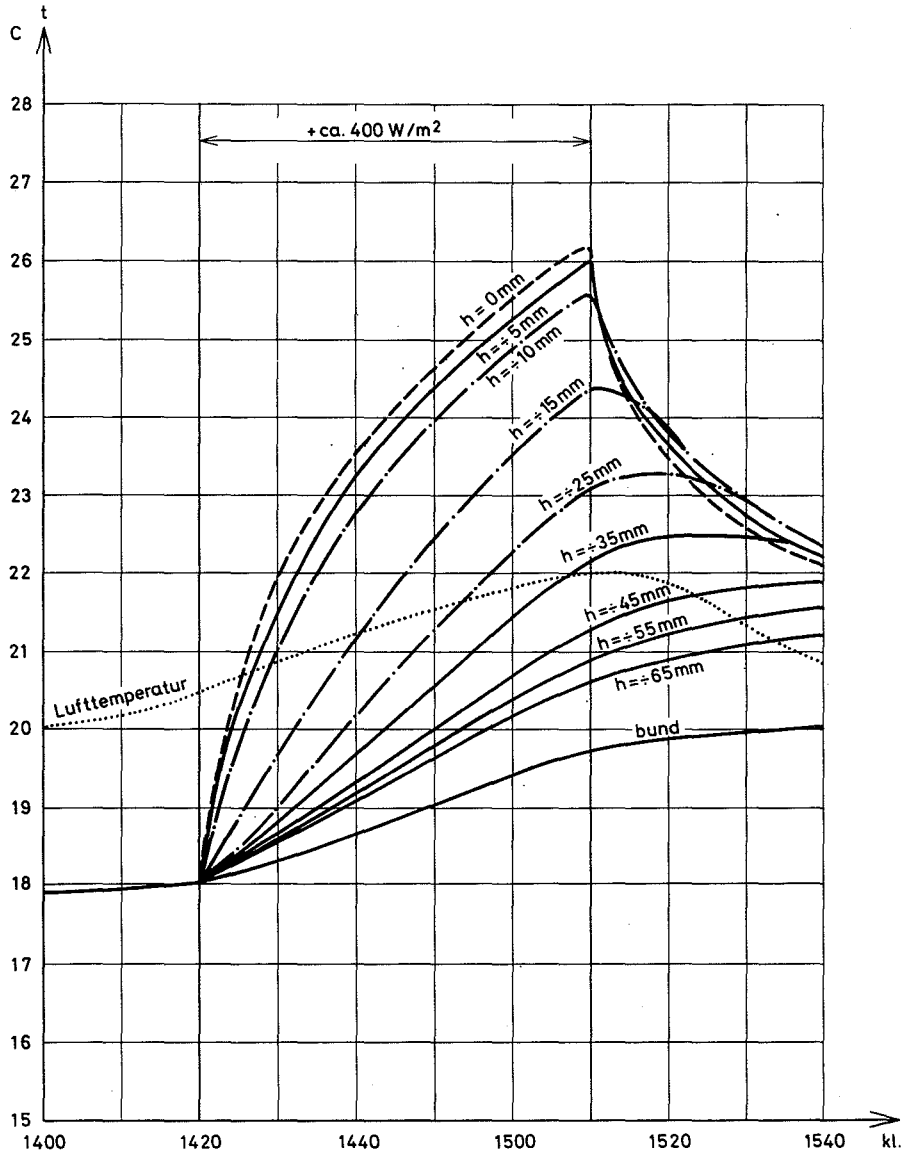
Strålingsmodel

For at se hvorledes stråling fra lys eller sol opvarmer vandoverfladen, blev der i laboratoriet udført et mindre forsøg. Et glaskar blev fyldt med ca. 5 ℓ vand, og termoelementer anbragtes i forskellige højder i forhold til vandoverfladen som angivet på figur 51.1. Over vandoverfladen tændtes i tidsrummet kl. 14,20-15,10 en lampe, som ved vandoverfladen gav en varmestråling med intensiteten 400 W/m^2.

Af figur 51.1 fremgår, at varmestrålingen hæver vandoverfladens temperatur meget kraftigt, og at de dybere lag efterhånden følger med op. Efter afbrydelse af strålingen falder overfladetemperaturen hurtigt især på grund af den kraftige fordampning, og temperaturerne i vandet udlignes efterhånden som følge af termiske strømninger i vandet.

Af figur 51.1 fremgår således, at varmestråling i høj grad absorberes af de øverste vandlag. En summarisk udregning af den varmemængde, der forbruges til opvarmning af "vandlagene", viser, at

Figur 51.1



Temperaturforløb i stillestående vand under og efter varmestråling mod vandoverfladen. h angiver målepunkternes placering i forhold til overfladen.

denne varmemængde er næsten af samme størrelse som den indstrålede effekt på 400 W/m^2. I dette tilfælde, hvor strålingen gik lodret ned mod vandoverfladen, synes der derfor ikke at være tale om refleksion af væsentlig størrelse. Ved indfaldsvinkler forskellig fra 0 vil dette forhold efter alt at dømme ændres. Således vil eventuelle solindfald i svømmehaller normalt i nogen grad reflekteres fra vandoverfladen afhængigt af, hvor glat og blank denne er, mens varmestråling fra loftsbelysning samt fra loft og vægge stort set absorberes af vandet.

Solpåvirkning i Vinderup

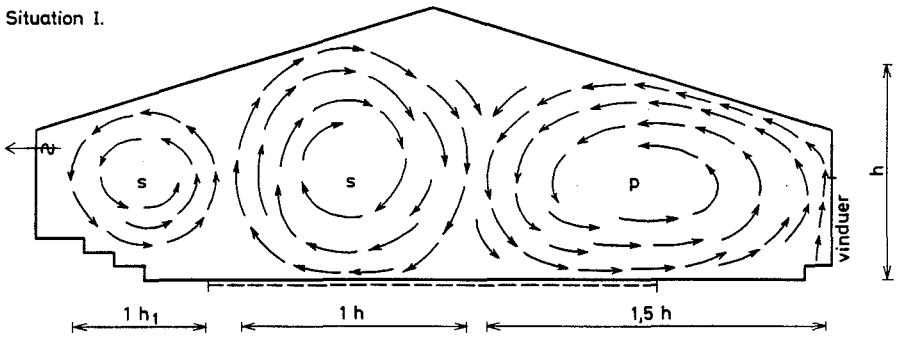
I Vinderup svømmehal forsøgtes ved målinger at efterbevise, at solindfald forøger fordampningen. I denne svømmehal er der vinduer langs næsten hele sydfacaden. På grund af tagudhæng og en jordvold udenfor

begrænses dog den tid, hvor solen kan skinne på en væsentlig del af bassinoverfladen til et par timer. Resultaterne svarede ikke til forventningerne. Den relative fugtighed i hallen steg ikke under solindfald, men viste snarere en svagt faldende tendens, og måling af vandoverfladetemperaturen viste praktisk taget konstant forløb. Forklaringen er, at omrøringen af bassinvandet i Vinderup er så effektiv, at den indstrålede effekt ganske vist afsættes i overfladevandet, men at dette hurtigt udskiftes med de dybere vandlag, således at en meget lille og umålelig langsom forøgelse af bassinvandets temperatur er følgen. Solens opvarmning af bassinvandet vil altså give en øget fordampning på længere sigt, men dens virkning kan på grund af bassinvandets meget store varmekapacitet ikke skelnes fra de generelle problemer med at holde bassinvandet afkølet. Med hensyn til den under solindfald målte faldende relative rumfugtighed skyldes den, at solen opvarmer andre overflader i svømmehallen, og disse igen rumluften, således at en lavere relativ fugtighed er følgen.

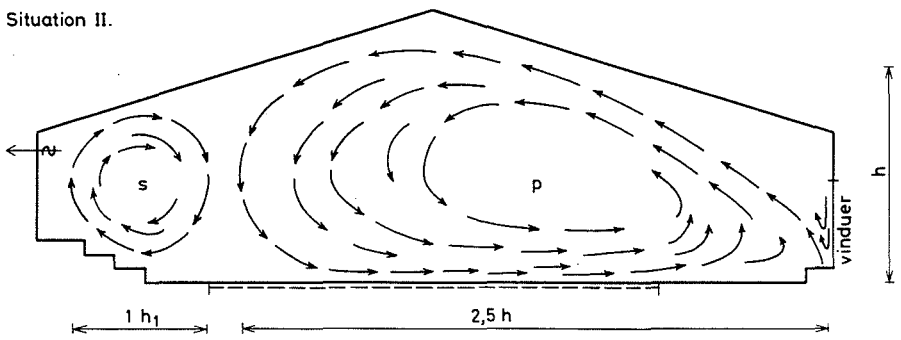
Det må således fastholdes, at solindfald i svømmehaller ikke bør forefindes, og at varmestråling til bassinoverfladen blandt andet fra belysningen i hallen skal reduceres mest muligt.

9.3 Ventilationsluftmængder

Målingerne i Vinderup har belyst nogle væsentlige ting i forbindelse med ventilation af svømmehaller. I Vinderup svømmehal er der indblæsning lodret op langs vinduerne i sydfacaden og udsugning højt på bagvæggen som vist på figur 52.1 og 52.2. Ventilationsluftmængden svarer til et luftskifte i hallen på kun 2 gange i timen, hvoraf 50% konstant er friskluft.



Figur 52.1
Luftstrømninger i Vinderup svømmehal ved høj indblæsningstemperatur



Figur 52.2
Luftstrømninger i Vinderup svømmehal ved isoterm indblæsning og kuldenedfald ved vinduer

Der er udført temmelig omfattende målinger af strømningsforhold og temperaturforløb i hallen. De to normalt forekommende strømningsbilleder gengives på figur 52.1 og 52.2. Det er konstateret, at det relativt lille luftskifte på 2 gange i timen har givet fuldt ud tilstrækkelig omrøring af rumluften, ja at lufthastighederne ved vandoverfladen endda er i overkanten af det ønskelige niveau. Det lille friskluftskifte på 1 gang i timen har ikke givet gener af nogen art, og der er ikke klorlugt i hallen.

2 bassintyper

Der er næppe nogen tvivl om, at man med den "nye" type bassiner med højtliggende vandoverflade, som findes i Vinderup, kan tillade et lavere luftskifte end i typen med skumrende, hvor det givetvis er vanskeligere at få udskiftet luften lige over vandoverfladen, hvor svømmerne skal ånde. Bassiner med højtliggende vandstand er derfor at foretrække.

Hvad friskluftmængden angår vil det være nødvendigt med en minimumsindstilling, idet en rumhygrostatstyret friskluftmængde vil kunne gå så langt ned som svarende til 0,1 gange friskluftskifte pr. time i vintertilfælde, såfremt bassinvandet køles. En minimum spjældindstilling svarende til ca. 0,5 gange friskluftskifte pr. time ser for nuværende ud til at være tilstrækkeligt. Om det er forsvarligt at gå endnu længere ned, kan kun erfaringer og målinger vise.

9.4 Bassinvandets cirkulation

På side 45 anbefales det, at injektion af filtreret vand i bassinet sker ca 20 cm over bunden også i den dybe del, idet man ellers risikerer manglende omrøring her. I Vinderup, hvor der er højt placerede injektionsåbninger, har målinger imidlertid vist tilstrækkelig omrøring i modsætning til Sofiendalsskolens svømmehal. Ved nærmere eftertanke må det naturligvis være således, at ligesom for ventilationens vedkommende, er impulsen i "indblæsningen" afgørende for, hvorvidt rumluften eller bassinvandet røres tilstrækkeligt rundt eller ikke. Men hvis der, som det er normalt, tilføres relativt varmt vand til bassinet, vil lavt placerede åbninger være en fordel, idet termiske strømninger så vil medvirke til omrøringen.

9.5 Førstegangsopvarmning

I rapporten anbefales, at varmeveksler for bassinvandsopvarmning undlades helt, idet brugerne så ikke fristes til at anvende denne under normal drift, hvor en opvarmning af bassinvandet ikke blot er særdeles uøkonomisk, men også kan bevirke en så kraftig fordampning, at bygningsskader opstår på langt sigt. Der postuleres også på side 42, at førstegangsopvarmningen vil kunne klares uden varmeveksler på 2-3 uger. Forbedrede beregninger har vist, at dette er en lidt grov generalisering. Derfor skal her følge et eksempel på beregning af førstegangsopvarmningen i en almindelig offentlig svømmehal, der blot indeholder et bassin på 12,5x25 m^2.

Beregningsforudsætninger

Det forudsættes, at normal ventilation er igangsat, inden opfyldningen af bassinet påbegyndes, idet påfyldning af vand uden forudgående rumopvarmning vil kunne give uønsket fugtudskillelse i bygningsdelene. Der er gennemregnet to tilfælde, nemlig henholdsvis uden og med en vandvirkulationspumpe igang, hvis effekttilførsel til bassinvandet sættes til 10 kW. Der er ikke regnet med tændt belysning i hallen un-

der opfyldningen, men hvis belysningen er tændt i perioder, kan dens strålingseffekt mod vandoverfladen omtrentligt udregnes og sammenlignes med virkningen af cirkulationspumpen på 10 kW.

Forudsætninger i øvrigt er:

Bassinareal 12,5x25 m^2

Bassinvolumen 864 m^3

Areal mod jord 130 m^2

Areal mod ingeniørgang 440 m^2

Temperatur i ingeniørgang 20 C

Lufttilstand i hallen t_r = 28 C, φ_r = 0,60

Vandoverfladens modstrålingstemperatur t_o = 27 C

Jordtemperatur t_j = 8 C

Vandtilførsel $\Delta G_v = \frac{864\ m^3}{20\ døgn \cdot 24\ h/døgn \cdot 3600\ s/h} = 0{,}5\ \ell/s = 1{,}8\ m^3/h$

Vandets tilgangstemperatur t_{vi} = 8 C

Transmissionstal for bassinvægge k = 3 W/m^2C

Vandmængde i bassin = G_v

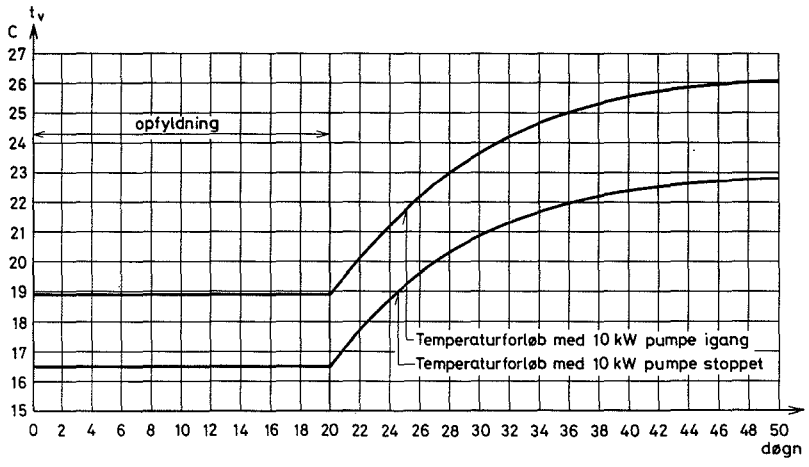
Vandets varmebalance for delperioder bliver da:

$$G_{v,beg} \cdot t_{v,beg} \cdot c_v + \Delta G_v \cdot t_{vi} \cdot c_v + \Sigma\Phi_{tilført} =$$

$$(G_{v,beg} + \Delta G_v)\, t_{v,slut} \cdot c_v$$

hvor $\Sigma\Phi_{tilført}$ indeholder transmission mod jord og ingeniørgang, strålingsudveksling, evt. pumpeeffekt, konvektion ved vandoverfladen og fordampningsvarme.

Med et konvektivt varmeovergangstal ved vandoverfladen på 2 W/m^2C fås det i figur 54.1 viste temperaturforløb.



Figur 54.1

Bassinvandets temperaturforløb under og efter opfyldning, når der ikke tilføres varme via varmeveksler.

Figur 54.1 synes at vise, at ved den normale opfyldning første gang, d.v.s. i forbindelse med nybyggeri, kan varmeveksleren udmærket undværes, idet det nødvendige tidsrum til opnåelse af acceptabel badtemperatur så rigeligt vil være til stede, mens den sidste afpudsning af byggeriet foregår.

Hvis der derimod er tale om f.eks. et svømmebassin, der kun skal anvendes i ferieperioder og tømmes i mellemtiden, er temperaturforløbet måske ikke tilfredsstillende.

Det ville i øvrigt være meget let at efterprøve disse beregninger ved at måle vandtemperaturen med passende mellemrum i en svømmehal under opførelse. I denne forbindelse skal man være opmærksom på, at vandstrømmen ΔG_v er afgørende for forløbet, ligesom rumluftens temperatur og relative fugtighed har væsentlig betydning.

9.6 Konklusion

Hvad angår fordampningens størrelse har alle målinger i eksisterende svømmehaller vist, at fordampningskurverne for $\bar{v} < 0{,}1$ m/s normalt kan anvendes, men at det ikke på længere sigt er muligt at nå fordampningstal under ca. 50 g/m^{2}h, hvis ikke bassinvandet køles. Den nødvendige køleeffekt afhænger af luft- og vandtemperatur, af luftens relative fugtighed, af besøgstallet og af den varmetilførsel, bassinvandet modtager fra belysning, pumper m.v. Alle varmetilskud bør derfor først og fremmest reduceres mest muligt, og dernæst bør der installeres varmeveksler for køling af bassinvandet.

De nødvendige ventilationsluftmængder ser ud til at ligge meget lavere i svømmehaller med vandspejlet i gulvhøjde end forventet. Indblæsning lodret op ved den ene langside og udsugning gennem nogle få riste højt på den modsatte væg ser ud til at kunne give tilstrækkelig omrøring og opblanding ved normale indblæsningshastigheder og så lave luftskifter som 2 gange pr. time, men naturligvis afhængig af hallens og indblæsningsåbningernes dimensionering og udformning. Det ser altså ud til, at store haller er relativt lette at gennemskylle med ventilationsluft.

Det ville være betryggende, hvis der blev iværksat målinger til fastsættelse af en mindste nødvendig friskluftmængde. Da fordampningen om vinteren kræver ganske lave friskluftmængder, der formodentlig ligger under en hygiejnisk grænseværdi, måske endda under flere faregrænser, og da driftsudgifterne i høj grad afhænger af friskluftmængden, ville sådanne målinger være kærkomne. Ved vort institut har vi desværre ikke måleudstyr til opgaven.

10. Tillæg 2, genoptræningsbade

Som følge af mange henvendelser fra rådgivende ingeniører vedrørende projektering af genoptræningsbade til hospitaler m.v. blev der i 1982 iværksat en tillægsundersøgelse af vandfordampningen ved de relativt høje vandtemperaturer, som nødvendigvis må forekomme i disse bade. Målingerne omfattede vandtemperaturerne 29, 31, 33, 35 og 37 C og lufttemperaturer, målt 20 cm over vandoverfladen, mellem 20 og 29 C. I modsætning til de tidligere beskrevne målinger blev der af tidsmæssige grunde kun målt ved en relativ luftfugtighed, 60 cm over vandoverfladen, på 60%.

10.1. Beskrivelse af model

Som følge af, at de tidligere udførte målinger viste god overensstemmelse mellem små modeller og fuldskala, valgtes et plastkar med overfladen 1x0,5 m. Karret blev opstillet midt i klimarummet og forsynet med måleudstyr som beskrevet tidligere for de andre modeller. Udvendigt blev karret isoleret med 2x50 mm plastskumisolering, således at transmissionstabet gennem sider og bund blev minimalt. Yderligere blev 11 termoelementer fordelt forskellige steder mellem plastkar og inderste lag isolering, og endnu 11 termoelementer anbragtes mellem de 2 lag isolering, således at temperaturfaldet i isoleringen kunne måles og dermed varmetransmissionen gennem sider og bund beregnes.

Vandets opvarmning

Vandet opvarmedes ved hjælp af elektriske varmelegemer reguleret af et kontakttermometer, og for at sikre nogenlunde ensartet temperatur overalt i vandet blev dette rørt rundt af en omrører med en tilført effekt på ca. 1 W. Effekttilførslen til vandet blev målt så nøjagtigt som muligt for at opklare, hvor stor en varmeeffekt man i virkeligheden skal forsyne bassinvand til bade af denne art med.

10.2. Vandfordampning

Nogle indledende målinger udført ved gennemsnitlige lufthastigheder på 0,04-0,17 m/s målt 2 cm over vandoverfladen afslørede, at vandfordampningen ved de i forhold til luften relativt høje vandtemperaturer ikke var afhængig af lufthastigheden i ret høj grad. Derfor tilstræbtes ved alle de følgende målinger en gennemsnitlig lufthastighed på 0,15 m/s, idet denne også må anses for at være realistisk under badning i virkeligheden.

På figur 57.1 ses en grafisk fremstilling af måleresultaterne. For at sammenligne med de i denne rapport tidligere nævnte måleresultater, blev der også udført en serie målinger ved vandtemperaturen 28 C, men da disse viste god overensstemmelse med de tidligere målinger og i øvrigt ikke vil være særligt aktuelle, er de ikke taget med på figuren.

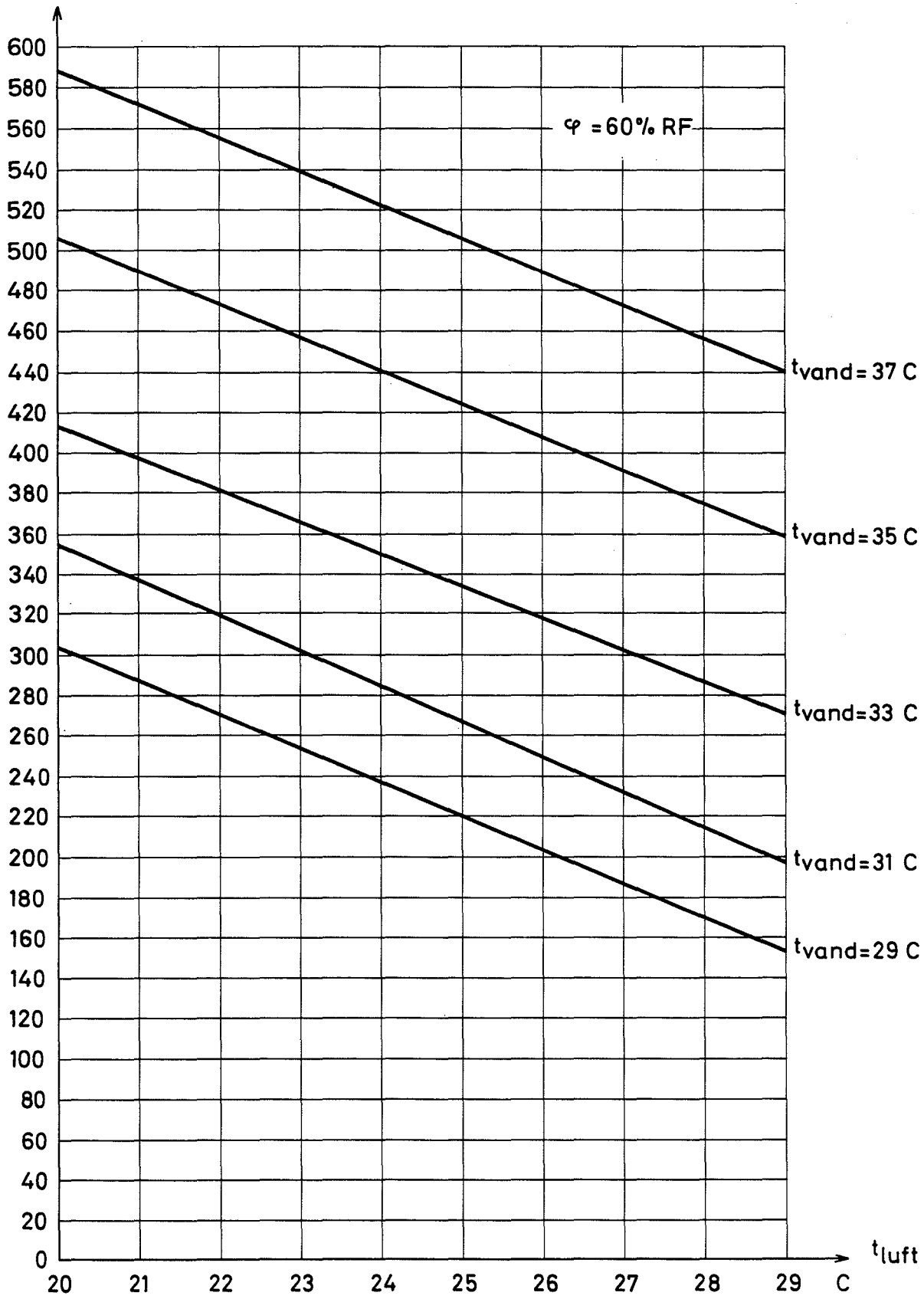
Det fremgår, at fordampningens størrelse er meget afhængig af forskellen mellem vandtemperaturen og lufttemperaturen, hvilket også bekræftes af de tidligere målinger.

10.3. Tilført effekt til vandet

Som tidligere nævnt måltes den til vandet tilførte effekt så nøjagtigt som muligt. Denne måling udførtes ved hjælp af wattmeter og en drifttimetæller. Ud over den herved målte effekt tilførtes vandet effekt ved omrøringen, men da der kun tilførtes ca. 1 W til motoren, og da virkningsgraden for motor, gear m.v. givetvis er lav, er den ved omrøringen tilførte effekt minimal.

Bortført effekt fra vandet

Varmeafgivelsen fra bassinvandet kan foregå ved fordampning, ved transmission gennem sider og bund, ved stråling fra overfladen til omgivel-



Figur 57.1: Fordampning fra en rolig vandoverflade. Luftens temperatur t_{luft} og relativ fugtighed φ målt 20 cm over vandoverfladen. Vanoverfladens temperatur = t_{vand}. Luftens middelhastighed $\nabla = 0{,}15$ m/s målt 2 cm over vandoverfladen.
Advarsel: der kan interpoleres, men ikke ekstrapoleres i diagrammet!

serne og ved konvektion til rumluften.

Fordampningsvarme

Efter måling af den fordampede vandmængde kunne den til fordampningen nødvendige varme let beregnes, idet vands fordampningsvarme Φ_f ved temperaturen t er:

$$\Phi_f = 2500-2{,}26 \cdot t \quad (kJ/kg)$$

Da temperaturen har lille betydning for fordampningsvarmen, er der ved alle vandtemperaturer regnet med en fordampningsvarme på 2420 kJ/kg.

Transmissionstab

Varmetabet ved transmission gennem sider og bund blev beregnet efter måling af temperaturforløbet i isoleringen. Transmissionstabet var maksimalt kun ca. 6% af den tilførte effekt.

Varmeafgivelsen ved stråling

Overfladetemperaturen på vand og omgivelser blev målt og varmeafgivelsen ved stråling beregnet efter formlen:

58.1

$$\Phi_s = \sigma_v \cdot A_v [(\frac{T_{vo}}{100})^4 - (\frac{T_o}{100})^4]$$

hvor σ_v = strålingstallet for vand $\cong$ 5,54 W/m^2K^4

A_v = vandoverfladens areal i m^2

T_{vo} = vandoverfladens temperatur i K

T_o = omgivende fladers temperatur i K

Varmeafgivelsen ved konvektion

Varmeafgivelsen ved konvektion lader sig vanskeligt beregne. Anvendes Heinz Dienelts formel angivet side 40 for lufthastigheden 0,15 m/s og de aktuelle temperaturer fås $\alpha_k \cong 5{,}5\text{-}6{,}1$ W/m^2C. De udførte målinger tyder på, at α_k er lidt større. Regnes

$$\Phi_k = \Phi_{tilført} - \Phi_f - \Phi_{trans.} - \Phi_s$$

for hver enkelt måling fås α_k af:

$$\alpha_k = \frac{\Phi_k \cdot 2}{t_{vo} - t_\ell} \quad (W/m^2C)$$

idet bassinoverfladen er 0,5 m^2

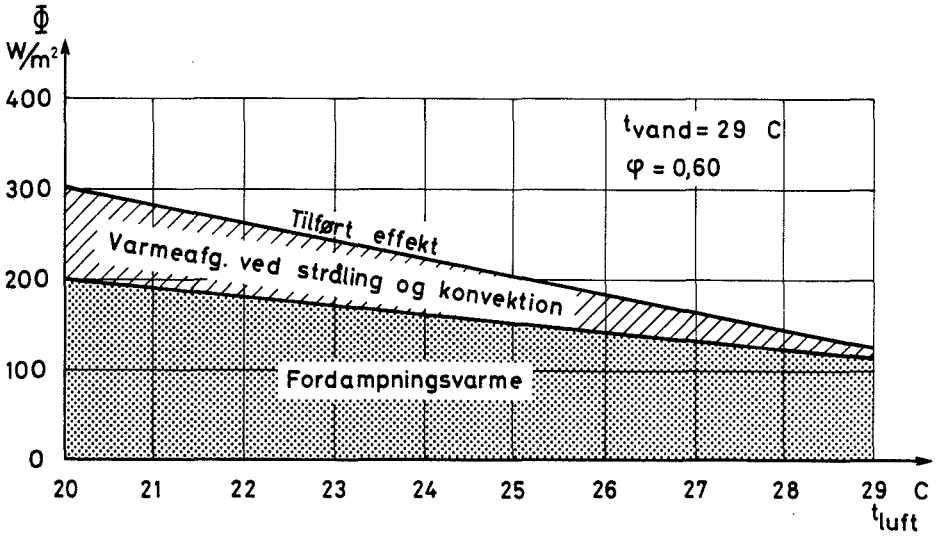
t_{vo} = vandoverfladetemperaturen i C

t_ℓ = lufttemperaturen i C

Beregnes α_k således ved alle de anvendte vand- og lufttemperaturer findes ganske viste en ret stor spredning af resultaterne, der skyldes den store betydning, måleusikkerheden får, når Φ_k beregnes som differensen mellem store tal, men tendensen er, at $\alpha_k \cong 6\text{-}7$ W/m^2C ved de her anvendte temperaturer og lufthastigheder. At α_k er så høj er naturligt nok, når det betænkes, at vel er den gennemsnitlige lufthastighed 0,15 m/s, men herudover er der kraftige fluktuationer i lufthastigheden, som givetvis må øge α_k.

Den tilførte effekt til vandet

På figurerne 59.1, 59.2, 59.3, 60.1 og 60.2 ses dels den til fordampningen forbrugte effekt, dels den tilførte effekt, idet der her er set



Figur 59.1
Vandets energibalance ved 29 C

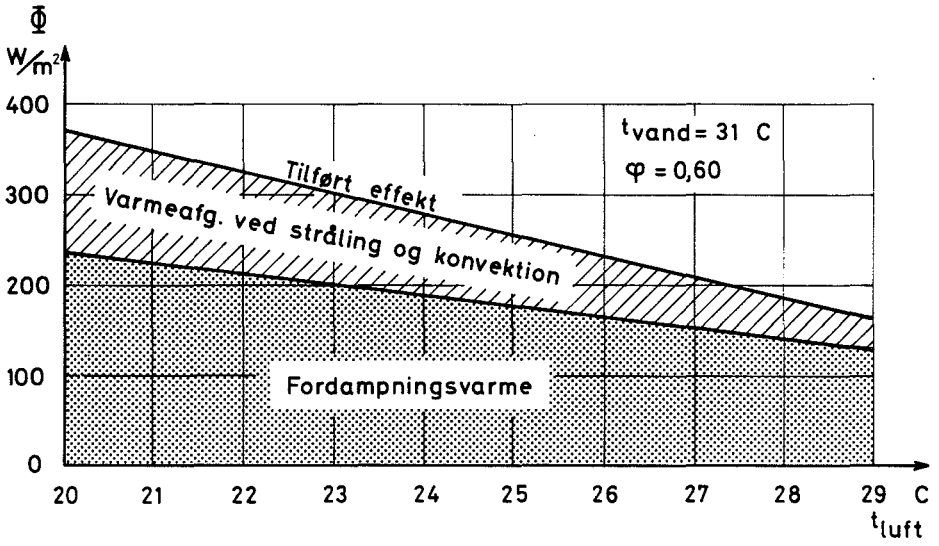


Fig. 59.2
Vandets enerbibalance ved 31 C

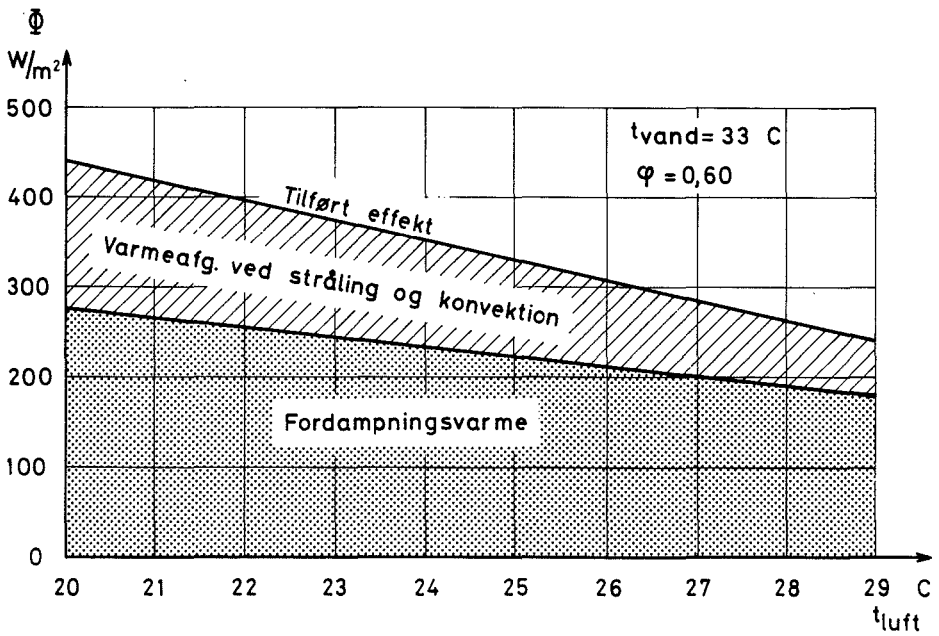
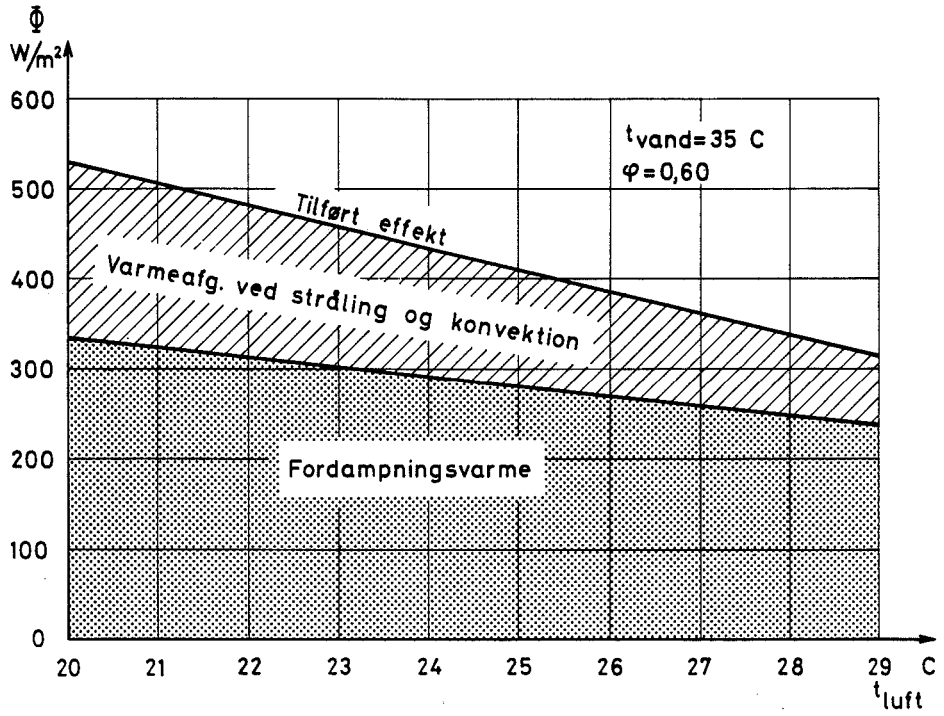
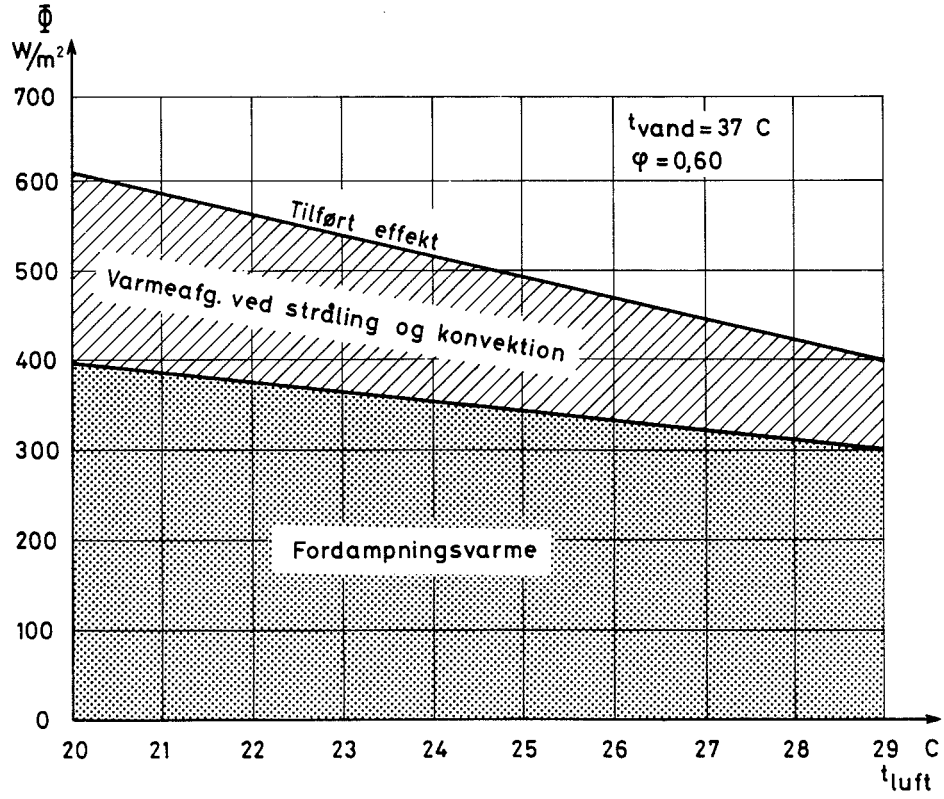


Fig. 59.3
Vandets energibalance ved 33 C

Figur 60.1
Vandets energibalance ved 35 C



Figur 60.2
Vandets energibalance ved 37 C



bort fra varmetransmissionen fra bassinet, der er lille i forhold til de andre størrelser. Anvendes disse kurver til dimensionering, må det erindres, at varmeafgivelsen ved stråling i praksis kan være større end ved modelmålingerne, idet de omgivende fladers temperatur har været nogenlunde lig med lufttemperaturen. Er de omgivende fladers temperatur lavere end lufttemperaturen, må der således korrigeres herfor ved hjælp af formel 58.1. Ligeledes må varmetransmissionen fra bassinet udregnes i aktuelle tilfælde og adderes til den aflæste, tilførte effekt.

10.4. Konklusion

Det fremgår klart, at vandfordampningen er langt højere ved de relativt høje vandtemperaturer, som anvendes i genoptræningsbade. Ud over, at den nødvendige effekttilførsel til bassinvandet øges med højere vandtemperatur, vil derfor også effektforbruget til affugtning af luften stige kraftigt. Man bør derfor altid af hensyn til energiforbruget vælge så lave vandtemperaturer som muligt og eventuelt overveje sænkning af vandtemperaturen uden for brugstiden. Dette kræver ganske vist til gengæld, at bassinvandet kan varmes op inden for en rimelig tid, hvilket kræver en høj installeret effekt. Men med de relativt små bassinstørrelser, som anvendes til genoptræningsbade, er dimensionering af en bassinvandvarmer til genopvarmning inden for en rimelig tid absolut en mulighed.