



AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Aalborg Universitet

Vurdering af luftstrømningsmodeller for glasbygninger

Terpøger Andersen, K.

Publication date:
1995

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Terpøger Andersen, K. (1995). *Vurdering af luftstrømningsmodeller for glasbygninger*. SBI forlag. SBI-rapport Nr. 247

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.

Vurdering af luftstrømningsmodeller for glasbygninger



SBI-RAPPORT 247 · STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT 1995



Vurdering af luftstrømningsmodeller for glasbygninger

KARL TERPAGER ANDERSEN



SBI-rapporter er beretninger om afsluttede forskningsprojekter.

SBI-publikationer udgives i følgende serier: Anvisninger, Rapporter, Meddelelser, Byplanlægning og Beton. Publikationerne fås gennem boghandelen eller ved at tegne et SBI-abonnement. Institutets årsberetning, publikationskatalog og publiceringsdiskette er gratis og kan rekvireres fra SBI.

SBI-abonnement er en rabatordning med mange fordele for dem, der vil sikre sig løbende orientering om væsentlige udgivelser inden for byggeforskningsområdet. Ring til SBI og hør nærmere.

ISBN 87-563-0893-0.

ISSN 0573-9985.

Pris: Kr. 225,00 inkl. 25 pct. moms.

Oplag: 500.

Tekstbehandling: Lene C. Sørensen.

Omslag: Henning Holmsted.

Tryk: Bjørvig Offset, Hillerød.

Statens Byggeforskningsinstitut,

Postboks 119, 2970 Hørsholm.

Telefon 42 86 55 33.

Eftertryk i uddrag tilladt, men kun med kildeangivelsen:
SBI-rapport 247: Vurdering af luftstrømningsmodeller for glasbygninger. 1995.

Indhold

Symbolliste	6
Forord	7
1 Indledning	8
1.1 Rapportens indhold	8
2 CFD-programmer	10
2.1 Løsningsmuligheder	10
2.2 Turbulent strømning	11
2.2.1 Delvis turbulent strømning	11
2.3 Isoterme og ikke-isoterme forhold	12
2.4 Numerisk løsningsteknik	12
2.4.1 Relaxation og residualer	12
2.4.2 SIMPLE-metoden	13
2.5 Tilgængelige programmer	13
2.5.1 FloVENT	14
2.6 Brugerekspertise	14
2.7 Sammenfatning	14
2.8 Referencer	15
3 Zonemodeller	16
3.1 Et eksempel	16
3.1.1 Beregningsmodellen SAMIRA	16
3.1.2 Validering mod CFD-programmet SIMEC	17
3.1.3 Validering mod målte værdier	18
3.1.4 Diskussion af valideringen	18
3.2 Vurdering	19
3.3 Referencer	19
4 Flerrumsmodeller	20
4.1 Edb-programmer. COMIS	20
4.2 Vurdering	21
4.3 Referencer	21
5 Luftstrømningsformler	22
5.1 Stråleventilation	22
5.1.1 Stråleform	23
5.1.1.1 Sløret	24
5.1.2 Overgang mellem forskellige stråleformer	25
5.1.2.1 Coanda-effekt	25
5.1.3 Begrænsede stråler	26
5.1.4 Isoterme, frie stråler	26
5.1.4.1 Centralhastigheder	26
5.1.4.2 Begrænsninger for hastighedsformlerne	30
5.1.4.3 Kastelængder	31
5.1.5 Isoterme, begrænsede stråler	31
5.1.5.1 Centralhastigheder	31
5.1.5.2 Kastelængder	32

5.1.5.3	Indtrængningslængde i dybe rum	32
5.1.5.4	Returhastigheder i dybe rum	33
5.1.5.5	Afbøjning i korte rum	34
5.1.5.6	Returhastigheder i korte rum	35
5.1.6	Ikke-isoterme, frie stråler	36
5.1.6.1	Strålernes banekurver	37
5.1.6.2	Hastighedsforhold. Centralhastigheder	38
5.1.6.3	Temperaturforhold	39
5.1.6.4	Kaste- og indtrængningslængde	39
5.1.6.5	Vægstrålers klæbelængde	40
5.1.6.6	Vægstrålers banekurver	40
5.1.7	Ikke-isoterme, begrænsede stråler	40
5.1.7.1	Hastigheder, banekurver, temperatordifferencer og klæbelængder	41
5.1.7.2	Indtrængningslængder og returhastigheder	41
5.1.8	Isoterme stråler og loftsforhindringer	41
5.1.8.1	Kritiske afstande og højder	42
5.1.8.2	Hastigheder og indtrængningslængder	42
5.1.9	Ikke-isoterme stråler og loftsforhindringer	44
5.2	Fortrængningsventilation	44
5.2.1	Lufthastigheder	45
5.2.2	Nærzone	46
5.2.3	Temperaturforhold	46
5.3	Kuldenedfald	47
5.3.1	Forhold langs kolde flader	47
5.3.2	Forhold efter den kolde flade	48
5.4	Diskussion	48
5.5	Referencer	52
6	Bygningsbesøg	54
6.1	Trondheim Universitetet, Dragvoll	54
6.1.1	Klimaanlæg	55
6.1.2	Klimaforhold	55
6.1.3	Klimaberegninger og -målinger	55
6.2	Hotel Royal Garden, Trondheim	55
6.2.1	Klimaanlæg	55
6.2.2	Klimaforhold og klimaberegninger	55
6.3	ELA-bygningen, NTH, Trondheim	56
6.3.1	Klimaanlæg	57
6.3.2	Klimaforhold	58
6.3.3	Klimamålinger	58
6.3.4	Klimaberegninger	59
6.4	Olavs Kvartalet, Trondheim	59
6.4.1	Klimaanlæg	59
6.4.2	Klimaforhold	59
6.4.3	Klimaberegninger og -målinger	59
6.5	Höstvetet, Stockholm	61
6.5.1	Klimaanlæg	62
6.5.2	Klimaforhold	62
6.5.3	Andre forhold	63
6.5.4	Klimaberegninger	63
6.5.5	Klimamålinger	63
6.6	Skärholmens Centrum, Stockholm	64
6.6.1	Klimaanlæg	64
6.6.2	Klimaforhold	65
6.6.3	Klimaberegninger	65
6.6.4	Klimamålinger m.m.	65

6.7	Viby Torv, Århus	66
6.7.1	Klimaanlæg	66
6.7.2	Klimaforhold og klimaberegninger	67
6.8	Århus Stiftstidendes Bladhus, Århus	68
6.8.1	Klimaanlæg	68
6.8.2	Klimaforhold og klimaberegninger	68
6.9	Sammenfatninger og vurderinger	69
6.9.1	Tekniske anlæg og installationer	69
6.9.2	Beregnings- og projekteringspraksis	71
6.9.3	Reguleringspraksis	74
6.10	Afsluttende bemærkninger	74
6.11	Referencer	74
7	Samlet vurdering og konklusion	76
8	Summary	77

Symbolliste

	Enhed	
A	åbningsareal	m^2
A_R	tværsnit af rum vinkelret på stråleretning	m^2
B	rumbredde (på tværs af stråleretning)	m
C	hastighedskoefficient	
H	rumhøjde	m
K	konstanter markeret med forskellige indices	
L	rumlængde (i strålens retning)	m
Q	kølevirkning eller varmetilførsel pr. tidsenhed	W
T	absolut temperatur	K
V	volumenstrøm	m^3/s
b	åbningsbredde eller bredde af kold flade	m
k_x	kontraktionskoefficient	
c_p	varmefylde	$J/kg K$
d	åbningsdiameter	m
f	medrivningstal	
f	højde af forhindring (vil fremgå af sammenhæng)	m
g	tyngdeacceleration	m/s^2
h	åbningshøjde	m
p	tryk	Pa
s	kurvebanelængde regnet fra indblæsningsåbning	m
t	temperatur	$^{\circ}C$
v	hastighed	m/s
v_{rem}	maksimal hastighed i returstråle (langs gulv)	m/s
v_x	stråles centralhastighed i afstanden x	m/s
x	vandret afstand fra indblæsningsåbning	m
x_{kl}	klæbelængde	m
x_{ker}	kernelængde	m
x_{re}	indtrængningslængde	m
x_{rem}	afstand (langs gulv) hen til, hvor returhastigheden er størst	m
$x_{0,2}$	kastelængde	m
δ	grænselagstykkelse	m

Indices

b	begrænset rum
c	cirkulær stråle
f	flade
i	inde
kr	kritisk
m	middel eller maks. (fremgår af sammenhæng)
k	kontraheret
p	plan stråle
r	retur
u	ude

Forord

Luftstrømningsforholdene i et rum spiller en væsentlig rolle for den termiske komfort i rummet, samtidig med at de influerer på luftkvaliteten og energiforbruget. Luftstrømningsforholdene spiller ikke mindst en stor rolle i glasbygninger, dvs. glasoverdækkede arealer, hvor der samtidig kan være store glaspartier i facader og gavle.

Man kan ikke foretage luftstrømningsberegninger med de termiske simuleringssystemer, der i dag anvendes ved planlægning og projektering af bygninger og ventilationssystemer. Men i det integrerede energisimuleringsværktøj, der er under udvikling på SBI, vil der blive medtaget en model til beregning af luftstrømningsforholdene i bygninger generelt og dermed også i glasbygninger.

Der er derfor foretaget en kortlægning af mulighederne for at udvikle modeller for luftstrømningsberegninger. I tilknytning hertil er der gennemført en studietur til en række skandinaviske glasbygninger med henblik på at få belyst, hvordan indeklimaforholdene håndteres i praksis i sådanne bygninger.

I denne rapport indgår forstudier samt resultatet af studieturen. Dette arbejde er finansieret af SBI. Desuden rummer rapporten resultaterne af et detaljeret studium af de simple beregningsmodeller, der vil blive anvendt i ovennævnte integrerede energisimuleringsværktøj. Dette studium er udført med støtte fra Energiministeriets energiforskningsprogram under journalnummer 1213/92-0016. Studiet er detaljeret beskrevet i SBI-rapport 248, Beregning af luftstråler og returstrømme i rum, og i SBI-meddelelse 112, Kuldenedfald fra kolde flader, der begge er under udgivelse.

Der pågår i disse år en del internationalt arbejde på området organiseret gennem det internationale energiagentur IEA, og som SBI deltager i. De hidtidige resultater af dette arbejde er medtaget i rapporten. Det planlægges desuden at de fremtidige resultater vedrørende specielt zonemodeller og flerrumsmodeller efterhånden vil blive indarbejdet i det kommende integrerede energisimuleringsværktøj.

Rapporten henvender sig til forskere og rådgivende ingeniører, der beskæftiger sig med luftstrømningsforhold i bygninger og herunder specielt glasbygninger. Foruden til brug i SBI's kommende integrerede energisimuleringsværktøj vil resultaterne kunne anvendes til egne edb-programmer til luftstrømningsberegninger.

Der har under arbejdet været en værdifuld kontakt til Aalborg Universitet, og der skal her rettes en tak til professor Peter V. Nielsen og civilingeniør, ph.d. Per Heiselberg for udbytterige diskussioner under arbejdets planlægning og gennemførelse.

Statens Byggeforskningsinstitut
Afdelingen for Energi og Indeklima, juni 1995
Erik Christophersen, forskningschef

1 Indledning

Der bygges i stigende grad glasbygninger i forbindelse med såvel nybyggeri som renovering. Eksempler er glasoverdækkede gårdarealer i boligblokke, atrier i forbindelse med hotel- eller kontorkomplekser, glasoverdækkede indkøbsgader osv.

Med glasoverdækkede arealer fås attraktive opholdsmiljøer. Desuden regner man ofte med at opnå energi- og bygningsmæssige besparelser, som helt eller delvis kan dække finansieringen af ekstraudgiften til glasbygningen. Ved de bygningsmæssige besparelser tænkes især på de besparelser der kan opnås på de facade- og vinduespartier, der vender ud mod de glasoverdækkede arealer.

Der er almindeligvis tale om større rum, hvor luftstrømningsforholdene har stor indflydelse på såvel den termiske komfort som på energiforbruget til opvarmning og/eller køling samt til ventilation. Det er derfor vigtigt allerede i projekteringsfasen at kunne fastlægge luftstrømningsforholdene i specielt opholdszonerne.

De projekterende arkitekter og ingeniører har imidlertid ikke et værktøj hvormed de simpelt kan simulere de optrædende luftstrømninger. Dette er baggrunden for den foretagne kortlægning af mulige beregningsmodeller og -programmer til beregning af luftstrømningsforhold i glasbygninger, samt den gennemførte studietur til en række glasbygninger i henholdsvis Trondheim, Stockholm og Århus.

1.1 Rapportens indhold

Rapporten giver en gennemgang af mulighederne for at opstille beregningsmodeller, der simpelt kan integreres i edb-programmer til simulering af bygningers energi- og indeklimaforhold. Desuden beskrives studieturen og dens resultater.

Kapitel 2, CFD-programmer, behandler de såkaldte CFD-programmer til numerisk løsning af de grundlæggende strømningsligninger (CFD = Computational Fluid Dynamics). Det konkluderes at CFD-programmerne endnu ikke er velegnede som projekteringsværktøj. De er for tidskrævende at arbejde med og kræver desuden en del ekspertviden for at give pålidelige resultater.

Kapitel 3, Zonemodeller, behandler edb-beregningsmodeller, hvor man inddeler et rum i 10-30 celler (mod adskillige tusinde i CFD-modellerne). Hver celle repræsenterer et såkaldt strømningselement (fx en luftstråle eller en varmfane fra en radiator). Der opstilles en eller flere balanceligninger, der løses iterativt ved hjælp af edb. Det konkluderes at metoden er interessant, fordi den simpelt kan integreres i et termisk simuleringsprogram for energi og indeklima, men at der endnu mangler en del udviklingsarbejde, inden metoden er tilstrækkelig pålidelig til projekteringsformål.

Kapitel 4, Flerrumsmodeller, behandler edb-programmer til beregning af luftinfiltration mellem ude og inde og mellem flere rum i samme bygning. Der arbejdes internationalt med at gøre disse programmer bedre og mere brugervenlige. Det konkluderes at et sådant program i sin endelige form simpelt vil kunne integreres i et termisk simulering-program.

Kapitel 5, Luftstrømningsformler, gennemgår de foreliggende formeludtryk for hastigheds-, temperatur- og udbredelsesforhold i forskellige former for isoterme og ikke-isoterme stråler samt i kuldenedfaldet fra lodrette flader og i strømningen fra armaturer til fortrængningsventilation. Det konkluderes at det vil være muligt på grundlag af de foreliggende formeludtryk at opstille simpelt anvendelige beregningsmodeller til fastlæggelse af luftstrømningsforholdene i opholdszonerne i glasbygninger. Der er dog behov for en nærmere afklaring af en række forhold for dels at øge beregningssikkerheden, dels at udvide det område, der kan gøres til genstand for beregninger.

Kapitel 6, Bygningsbesøg, beskriver de besøgte glasbygninger. Der gives desuden en samlet oversigt og vurdering af de tekniske anlæg, der er anvendt for at opnå et ønsket indeklima samt af den anvendte beregnings- og projekteringspraksis.

Kapitel 7, Samlet vurdering og konklusioner, sammenfatter de enkelte kapitlers delkonklusioner.

2 CFD-programmer

Luftstrømningsforholdene i et rum bestemmes af 5 sammenhørende, partielle differentiallyigninger. Dette ligningssystem kan ikke løses analytisk. Man må bruge numeriske metoder, og det sker ved hjælp af såkaldte CFD-programmer (Computational Fluid Dynamics).

De nævnte 5 ligninger er (Lauder og Spalding, 1972, samt Nielsen, 1973):

- kontinuitetsligningen
- tre bevægelsesmængdeligninger (Navier-Stokes ligninger)
- energiligningen.

Kontinuitetsligningen udtrykker at tilvæksten af massen i et infinitesimalt kontrolvolumen er lig med den resulterende massestrøm gennem dette volumen.

Bevægelsesmængdeligningerne beskriver sammenhængen mellem bevægelsesmængdeændringer og kraftpåvirkninger. De indgående kræfter er volumenkræfter (fra tyngden), forskydningskræfter (fra friktionen) og normalkræfter (fra tryk), og man får tre ligninger svarende til 3 akseretninger.

Energiligningen holder regnskab med systemets totale energi, og det vil igen sige hvad der tilføres, hvad der afgives og hvad der ophobes. I forbindelse med luftstrømninger vil de indgående energiformer være mekanisk energi (dvs. potentiel og kinetisk) og varmeenergi, og her vil varmeenergien være den dominerende.

De fem differentiallyigninger med fem ubekendte (tryk, temperatur, og tre hastighedskomponenter) suppleres med en række randbetingelser, der dels giver den geometriske begrænsning af strømmingen, dels beskriver tryk-, temperatur- og hastighedsforholdene langs begrænsningsfladerne.

2.1 Løsningsmuligheder

Ovennævnte fem ligninger med tilhørende randbetingelser giver en komplet beskrivelse af strømmingen uanset om der er tale om laminar eller turbulent strømning. Ved de numeriske beregningsmetoder deler man strømningsområdet op i små delområder med en endelig udstrækning. Jo finere opdeling man kan foretage, desto tættere kommer man på den eksakte løsning. Men selv med edb er der grænser for, hvor fin en opdeling man kan foretage. Disse grænser sættes af computerens lagerkapacitet og af regnetiden.

2.2 Turbulent strømning

Computerbegrænsningerne giver især problemer i forbindelse med turbulent strømning. En numerisk løsning af ligningssystemet, der også omfatter turbulent strømning, kræver for det første at delområdernes udstrækning ikke overstiger turbulenshvirvlernes størrelse, og det vil sige, at maskevidden skal ned i størrelsesordenen én eller nogle få millimeter eller mindre end en tusindedel af strømningsområdets udstrækning i normale rum (Nielsen, 1973, Rodi, 1984, samt Nallasamy, 1987). Det betyder igen mindst 10^9 delområder ved tre-dimensional strømning. For det andet kræves der, at begyndelsesbetingelserne er meget korrekte, og dette gælder især forholdene ved indblæsningsåbningerne.

Med de største computere, der er til rådighed i dag, kan man klare 10^5 - 10^6 delområder (eller knudepunkter) svarende til en maskevidde på 1/50-1/100 af områdets udstrækning, og med pc'erne kan man klare et netværk med en maskevidde på 1/30-1/50 af udstrækningen eller ca. 10^4 - 10^5 delområder.

Turbulensproblemet løses ved at give afkald på en korrekt beskrivelse af hastighedsfluktuationerne og i stedet for regne med en middelværdi og en gennemsnitlig amplitudeværdi. De deraf følgende ubekendte beskrives ved hjælp af en turbulensmodel bestående af en eller flere ekstra ligninger.

Den hyppigst anvendte turbulensmodel i dag er den såkaldte k - ϵ model, hvor k er turbulensens kinetiske energi, og hvor ϵ udtrykker hvordan denne kinetiske energi forsvinder som varme. Dette giver to ekstra ligninger, så man i alt får 7 sammenhørende, partielle differentiaalligninger med 7 ubekendte. For at reducere regnetiden foretager man en simplificering af de fem oprindelige ligninger:

- Luften regnes inkompressibel (tilladeligt så længe lufthastighederne ligger væsentligt under lydhastigheden).
- Tyngdekraften medregnes kun i de tilfælde, hvor der optræder massefyldeforskelle i forbindelse med ikke-isoterme forhold.
- Energiligningen medtager ikke den mekaniske energi, men kun varmeenergien. Den medtager heller ikke den varme, der opstår som følge af friktionen, og heller ikke energiforholdene i forbindelse med fordampning eller kondensering.

2.2.1 Delvis turbulent strømning

De ovenfor anførte 7 ligninger kan kun beskrive en ren turbulent strømning, dvs. strømning med et højt Reynolds tal. Der kan imidlertid være områder, hvor turbulensgraden er lille, og det gælder bl.a. så snart man nærmer sig en begrænsningsflade, fx en væg. Dette problem løses oftest ved enten at indføre specielle vægfunktioner eller ved at erstatte k - ϵ modellen med en Low-Reynolds-Number model (Launder og Spalding, 1974).

Med vægfunktionsmodellen indføres to funktioner, der beskriver henholdsvis sammenhængen mellem hastighed og forskydningsspænding og mellem temperatur og varmestrøm. Disse to funktioner går fra et punkt i den fuldt turbulente strømning ind gennem grænselaget til vægfladen. Denne metode er meget anvendt, fordi den ikke kræver

flere delelementer, og fordi det er let at indføre egne erfaringer i de to funktioner ved blot at ændre på nogle af konstanterne.

Ved Low-Reynolds-Number modellen bevarer man k - ϵ modellen, men med bl.a. den modifikation, at to af modellens konstanter gøres variable ved at gøre dem afhængige af, hvor i grænselaget man befinder sig.

2.3 Isoterme og ikke-isoterme forhold

Ved isoterme forhold udgår energiligningen, og randbetingelserne er simple.

Ved ikke-isoterme forhold skal der, ud over at medtage energiligningen, tilføjes særlige randbetingelser for varmetransmissionen gennem begrænsningsfladerne samt for eventuel strålingsudveksling mellem disse flader.

Desuden skal tyngden medtages i bevægelsesligningerne som et opdriftsled og det kan være nødvendigt at modificere turbulensmodellen, så der tages hensyn til opdriftsforholdene. Alt i alt betyder det 5-10 gange længere regnetider sammenlignet med tilsvarende isoterme tilfælde (Christensen, 1991).

2.4 Numerisk løsningsteknik

Den numeriske løsning af det opstillede ligningssystem sker ved at inddele strømningområdet i et stort antal delområder. Der skelnes mellem "Finite-Difference-Method" (eller Finite-Controle-Volume-Method) og "Finite Element Method", og de adskiller sig fra hinanden ved blandt andet netinddelingen af strømningområdet. Men løsningsforløbet er omtrentlig ens for de to metoder.

2.4.1 Relaxation og residualer

Ved en numeriske løsning af et så kompliceret ligningssystem, som der her er tale om, er der risiko for at regneprocessen løber løbsk, dvs. at man for hver iteration kommer længere og længere væk fra at få balanceligningerne opfyldt.

Man prøver at løse dette problem ved at lægge en begrænsning på hvor meget værdierne må ændres fra iteration til iteration. Betragtes fx trykforholdene kan man indføre en såkaldt relaxationsfaktor α på følgende måde:

$$p_{n+1} = p_n + \alpha (p_{n+1} - p_n) \quad (2.1)$$

hvor α har en værdi mellem nul og én. Man kan vælge en lille α -værdi og derved mindske risikoen for instabilitet i beregningerne, men til gengæld kræver det flere iterationer og dermed mere regnetid inden man når frem til en løsning.

Man kan for hver iteration få beregnet det såkaldte residual, som angiver hvor godt den hidtil opnåede løsning opfylder balanceligningerne i hele strømningområdet. For den perfekt konvergente løsning vil residualet være nul. I praksis vil man stille sig tilfreds med, at residualet når ned under en vis fastlagt værdi. Under løsningsprocessen kan man

normalt følge residualets værdi på edb-skærmen og derved få et indtryk af hvor langt man er fra en løsning eller om man overhovedet er på vej mod en sådan.

2.4.2 SIMPLE-metoden

Et hyppigt anvendt beregningsforløb for CFD-programmer er den såkaldte SIMPLE-metode (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) (Pantakar, 1980):

1. Man gætter først et trykforløb for hele strømningsområdet.
2. Herudfra løser programmet bevægelsesligningerne, så man får det første bud på hastighedsfeltet.
3. Der løses en specielt opstillet ligning for trykstigningen i det næste tidsstep og denne trykstigning lægges til det foregående tryk.
4. Nye hastigheder beregnes af bevægelsesligningerne.
5. De øvrige ligninger til bestemmelse af temperatur og turbulensforhold løses.
6. De i trin 3 fundne tryk anvendes som et nyt gættet trykfelt, og man starter på ny fra trin 2, og hele proceduren gentages indtil man opnår en løsning, der konvergerer med hensyn til at tilfredsstille kontinuitetsligningen.

Det specielle ved metoden er beregningen af trykkorrektionsleddet i trin 3, som skal forbedre det gættede trykforhold, så man hurtigere opnår konvergens.

2.5 Tilgængelige programmer

De fleste, tilgængelige CFD-programmer anvender Finite-Difference-Metoden og her igen SIMPLE-fremgangsmåden, som det fremgår af tabel 2.1. Denne metode giver hurtigere konvergens ud fra en gættet startsituation end Finite-Element-Metoden (Liddament, 1991).

Tabel 2.1. Tilgængelige CFD-programmer (Liddament, 1991).

	Løsningsteknik		Beregningsomfang		
	Finite Difference SIMPLE ¹⁾	Finite Element Andet ²⁾	3D	k-ε turbulens- modul	Transient strømning
<i>Offentlig tilgængeligt</i>					
EXACT 3		×	×	×	×
WISH 3D	×		×	×	×
KAMELEON	×		×	×	×
<i>Kommercielle</i>					
PHOENIX	×		×	×	×
FLOVENT	×		×	×	×
FLOW-3D	×		×	×	×
FLUENT	×		×	×	×
STAR-CD	×		×	×	×
ASTECC	×		×	×	×
FIDEP		×	×	×	×

1) Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations.

2) Ikke nærmere oplyst.

2.5.1 FloVENT

CFD-programmet FloVENT er en aflægger af CFD-programmet PHOENICS og er udviklet specielt med henblik på luftbevægelser i bygninger (Rosten, 1991). Det er udviklet i samarbejde med BSRIA (The Building Services Research and Information Association). Det betragtes som et meget brugervenligt program og afprøves bl.a. i IEA (International Energy Agency) Task 12, subtask A3 (Atrier).

2.6 Brugerekspertise

De løsninger man får er tilnærmede løsninger, hvis kvalitet er afhængig af:

- om de opstillede randbetingelser beskriver situationen tilfredsstillende
- om netpunkterne (eller delementerne) er defineret tilstrækkeligt tæt
- om den benyttede turbulensmetode er velegnet til den pågældende opgave.

Man får således ikke en 100 pct. korrekt løsning, og der er heller ingen garanti for at programmet vil føre til en løsning. Det afhænger bl.a. af de valgte relaksationsfaktorer og andre parametre i øvrigt til stabiliseringsprocessen.

Numerisk beregning af luftstrømninger kan således være en kompliceret affære, og det er en almindelig vurdering, at der kræves en del ekspertise på området for at kunne gennemføre beregningerne og opnå pålidelige resultater. Dette fremgår bl.a. af følgende citater:

- "Der kræves i høj grad specialistviden. CFD-programmer skal betragtes som værktøjer som kan være en hjælp i design- og analysefasen, men som ikke kan kompensere for mangel på ekspertise" (Liddament, 1991).
- "Eftersom CFD i høj grad vedrører ikke-linære processer, der samtidig er stærkt indbyrdes afhængige, vil en høj grad af ekspertise og erfaring altid være nødvendig for såvel at udnytte CFD korrekt som at være klar over dens begrænsninger" (Leschziner, 1992).
- "Kvaliteten af resultaterne vokser ikke nødvendigvis med modellens antal af raffineringer" (Smith et al., 1992).
- "CFD-programmerne kan være vanskelige og tidsrøvende at anvende og er krævende med hensyn til computerkapacitet. Der kræves indsigt og erfaring for at udnytte dem fuldt ud. Men brugt med omhu og vigtigst af alt med udøvelse af en sund, ingeniørmæssig dømmekraft, kan man opnå en værdifuld forståelse af luftbevægelserne i ventilerede rum, som kan bruges ved projektering" (Whittle, 1991).

2.7 Sammenfatning

Ved brug af CFD-programmer er det meget tidskrævende at få indtastet alle forudsætningerne. Desuden kan regnetiden være lang, når der skal regnes på et ikke-isotermt tilfælde.

Der kræves desuden en del ekspertise for at få fastlagt rimelige randbetingelser og passende relaxationskoefficienter for dels at få hurtig konvergens i beregningsprocessen og dels at få pålidelige resultater.

CFD-programmer må derfor foreløbigt betragtes som et forsknings- og udviklingsværktøj, der kan anvendes til bl.a. at kontrollere mere simple beregningsmodeller til brug i de projekteringsværktøjer, der anvendes i praksis.

2.8 Referencer

- Abbott, M. B. og Basco, D. R.:* Computational Fluid Dynamics. An Introduction for Engineers. Longman Scientific & Technical, 1989.
- Bjørnø, L. og Hartig, A.:* Strømningslære. Polyteknisk Forlag, 1984.
- Christensen, K. S.:* Numerisk simulering af luftstrømninger i stalde. Licentiaafhandling, KVL, 1991.
- Launder, B. E. og Spalding, D. B.:* Mathematical Models of Turbulence. Academic Press, London, 1972.
- Launder, B. E. og Spalding, D. B.:* The numerical computation of turbulent flows. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 3, pp 269-289, 1974.
- Leschziner, M. A.:* Turbulence Modelling Challenges Posed by Complex Flows. ROOM VENT, Vol 1, pp 31-58, Aalborg 1992.
- Liddament, M. W.:* A Review of Building Air Flow Simulation. Technical note AIVC 33, The Air Infiltration and Ventilation Centre, UK, 1991.
- Nallasamy, M.:* Turbulence models and their applications to the prediction of internal flows: A review. Computers and fluids. Vol 15, No. 2, pp 151-194, 1987.
- Nielsen, P. V.:* Beregning af luftbevægelse i et ventileret lokale. Ingeniørens Ugeblad nr. 5, 1973.
- Patankar, S. V.:* Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Hemisphere Publishing Corporation, 1980.
- Rodi, W.:* Turbulence models and their application in Hydraulics - a state of the art review. IAHR 1984.
- Rosten, H. I.:* Flomerics, Kingston upon Thames, UK. Personlig kommunikation, 1991.
- Smith, M. G., Walker, R. R. og Perera, M.:* Prediction of Natural Ventilation Air Flows in a Non-urban Office, ROOM VENT, Vol 3, pp 463-478, Aalborg 1992.
- Whittle, G. E.:* Evaluation of Measured and Computed Test Case Results from Annex 20, subtask 1. 12. AIVC Conference, Vol 1, pp 27-54, Ottawa, 1991.

3 Zonemodeller

Der arbejdes internationalt med såkaldte zonemodeller for luftstrømningsforhold, dvs. modeller hvor et rum opdeles i langt færre celler end i CFD-modellerne, og hvor der i de enkelte celler arbejdes med såkaldte strømningselementer i stedet for differentiallyigninger.

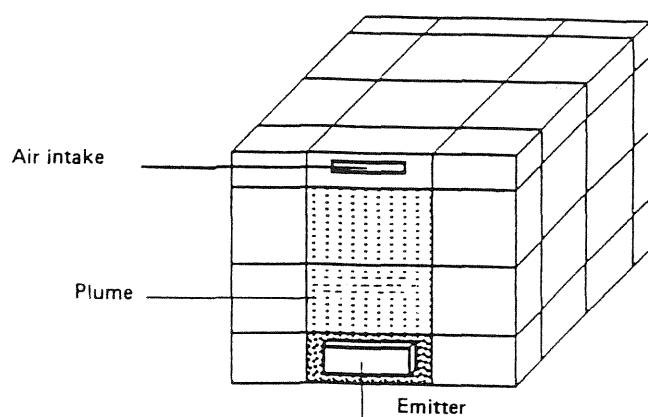
Strømningselementerne er dele af strømningsbilledet, som man har en løsning på, og kan fx være ligningen for en stråles udbredelse eller for strømningforløbet over en radiator.

Rumopdelingen foretages, så cellerne kommer til at ligge, hvor der sker noget strømningmæssigt markant, og hvor dette kan beskrives med et strømningselement. Målet hermed er at kunne beregne et begrænset antal vigtige størrelser for indeklimaet, fx lufthastighederne i visse kritiske områder, temperaturlagdeling i visse lodrette snit, luftskifte m.m., på en hurtigere måde end ved anvendelse af CFD-programmer.

Arbejdet hermed pågår bl.a. i det Internationale Energiagenturs (IEA) arbejdsgruppe vedrørende effektiv ventilation af store rum (Annex 26), hvor man dels arbejder med strømningselementerne, dels med sammenkoblingen af dem.

3.1 Et eksempel

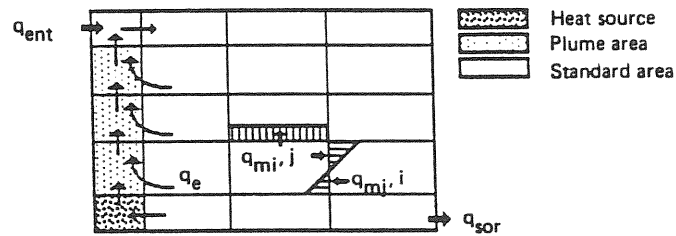
Et eksempel på en simplificeret model er fundet hos Dalicieux et al. (1992). De har ønsket at kunne bestemme temperaturlagdelingen i et rum, dels ud fra et komfortsyn, dels for at kunne bestemme varmetransmissionstallene mere nøjagtigt, herunder en bedre bestemmelse af de indvendige overgangstal.



Figur 3.1. Celleinddeling i zonemodell (Dalicieux et al., 1992).

3.1.1 Beregningsmodellen SAMIRA

I beregningsmodellen, der er døbt SAMIRA, grovopdeles et rum som vist på figur 3.1 og der skelnes mellem følgende tre celletyper, jvf. figur 3.2:

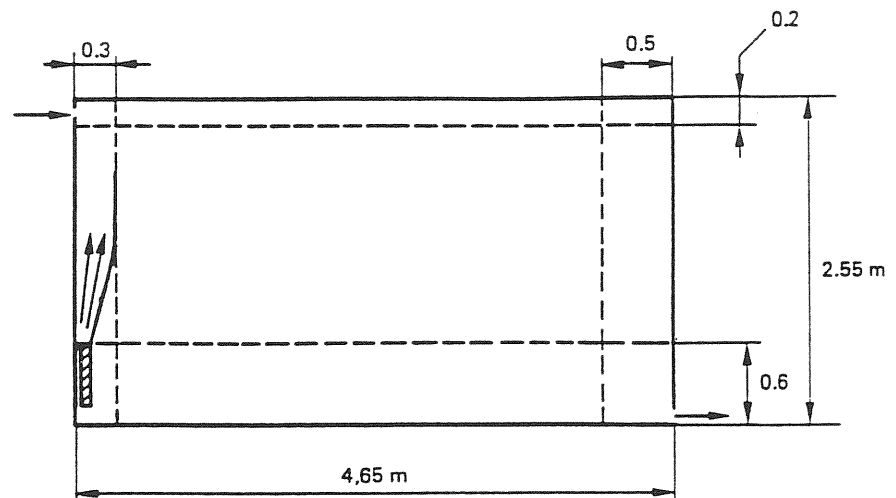


Figur 3.2. Celletyper i zonemodel (Dalicieux et al., 1992).

- varmekildeceller
- varmefaneceller (dvs. celler lodret over varmekilden)
- standardceller (dvs. celler i øvrigt).

For hver celle opstilles en masse- og en energibalanceligning, og de indgående drivkræfter er de trykdifferencer der opstår som følge af massefyldforskellene mellem de enkelte celler, jvf. figur 3.2. Desuden indgår der i ligningerne nogle erfaringstal for varme- og luftudvekslingen mellem standardcellerne og de to andre celletyper. Det opstillede ligningssystem løses numerisk.

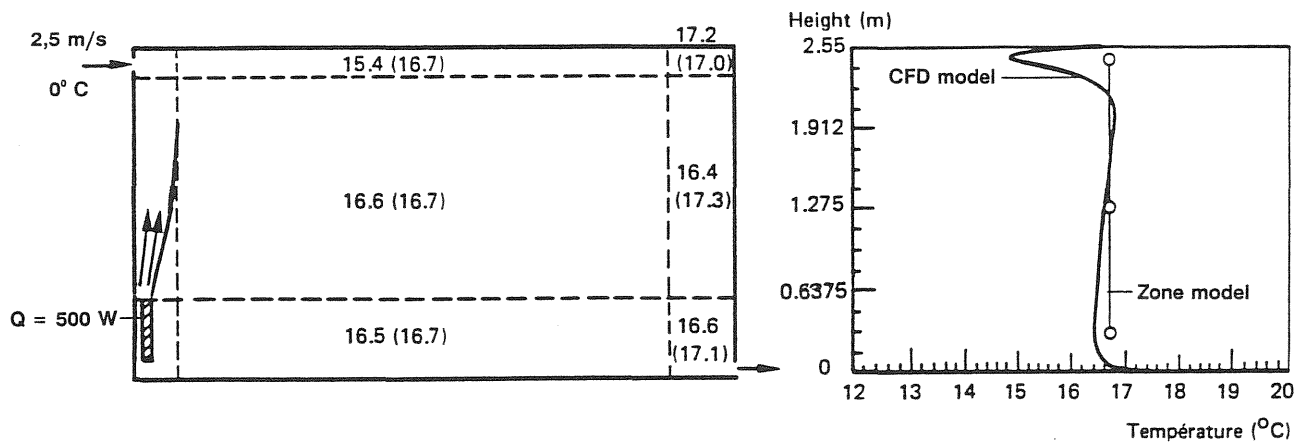
Dalicieux et al præsenterer resultaterne af modelberegningerne foretaget på et rum med det på figur 3.3 viste længdesnit, og disse resultater er valideret dels mod beregningsresultater fra et CFD-program, SIMEC, dels mod målinger udført i et testkammer.



Figur 3.3. Længdesnit af testkammer og af det rum, der er anvendt i edb-modelberegningerne (Dalicieux et al., 1992).

3.1.2 Validering mod CFD-programmet SIMEC

Nogle af beregningsresultaterne fra CFD-programmet SIMEC er vist på figur 3.4, hvor der også er medtaget de tilsvarende SAMIRA-resultater. Det ses at der især er en tydelig forskel mellem beregningsresultaterne i den øverste midtercelle, og denne forskel forklares med, at SAMIRA-programmet endnu ikke er i stand til at modellere kolde luftstråler.



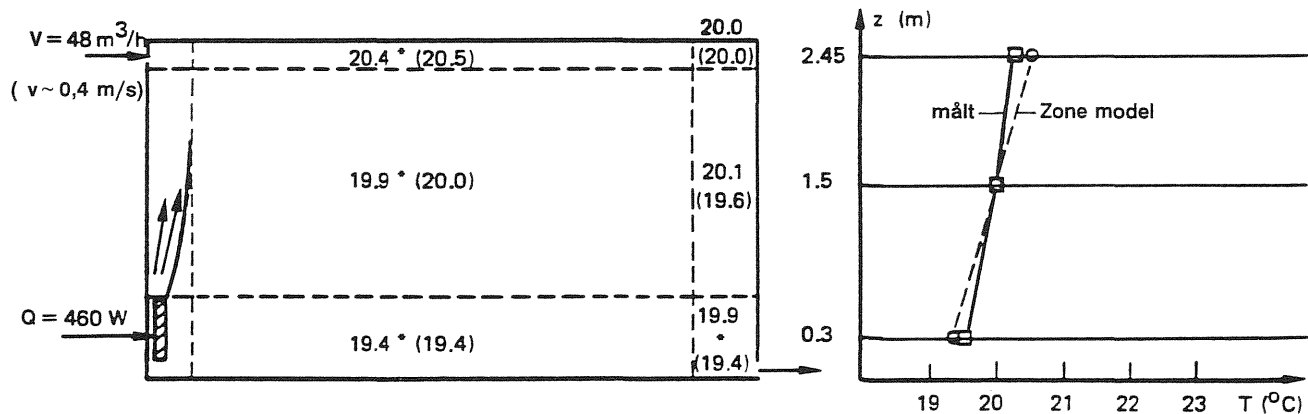
Figur 3.4. Beregnede temperaturer med henholdsvis CFD-programmet SIMEC og med zonemodellprogrammet SAMIRA. Resultaterne fra sidstnævnte er anført i parentes (Dalicieux et al., 1992).

3.1.3 Validering mod målte værdier

På figur 3.5 er vist målte og beregnede resultater, hvor de målte værdier er fra et testkammer med det i figur 3.3 viste længdesnit. Testkammeret er ca. 3,2 m bredt og har været anbragt i et større rum, hvor der har været holdt en konstant temperatur på 10 °C, som dermed også bliver temperaturen af den indblæste luft.

Såvel beregninger som målinger er gennemført under forudsætning af stationære forhold.

Som det ses af figur 3.5 er der bedre overensstemmelse med de målte værdier end med SIMEC-beregningsresultaterne.



Figur 3.5. Målte temperaturer. Temperaturer beregnet med zonemodellprogrammet er angivet i parentes (Dalicieux et al., 1992).

3.1.4 Diskussion af valideringen

De resultater, der er fundet ved zonemodellerne i forbindelse med valideringen mod CFD-programmet SIMEC, er ikke meget bedre end hvad man kan få ved følgende simple håndberegning, hvor $Q = 500 \text{ W}$ og $V = 90 \text{ m}^3/\text{h}$ er regnet pr. meter rumbredde:

$$t_i - t_u = \frac{Q}{\rho c_p V} = \frac{500}{1,2 \cdot 1010 \cdot 90/3600} = 16,5 \text{ °C}$$

Man får da $t_i = 16,5 \text{ }^\circ\text{C}$, idet $t_u = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ som anført på figur 3.4. Der er her set bort fra varmetransmissionstabet og dette må også antages at være tilfældet ved modelberegningerne.

Ved evalueringen mod de målte værdier er der balance i varmeregnskabet, hvis man regner med et varmetransmissionstab svarende til en k -værdi på ca. $0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$. At der ved denne validering er bedre overensstemmelse mellem de beregnede og de målte værdier også i den øverste midtercelle, hænger antagelig sammen med, at dels har indblæsningshastighederne været nede på ca. $0,4 \text{ m/s}$ i tilfælde b ($V = 48\text{m}^3/\text{h}$) mod de $2,5 \text{ m/s}$ ved valideringen mod CFD-programmet SIMEC, dels har temperaturforskellen mellem inde og ude været ca. $10 \text{ }^\circ\text{C}$ mod ca. $18 \text{ }^\circ\text{C}$.

3.2 *Vurdering*

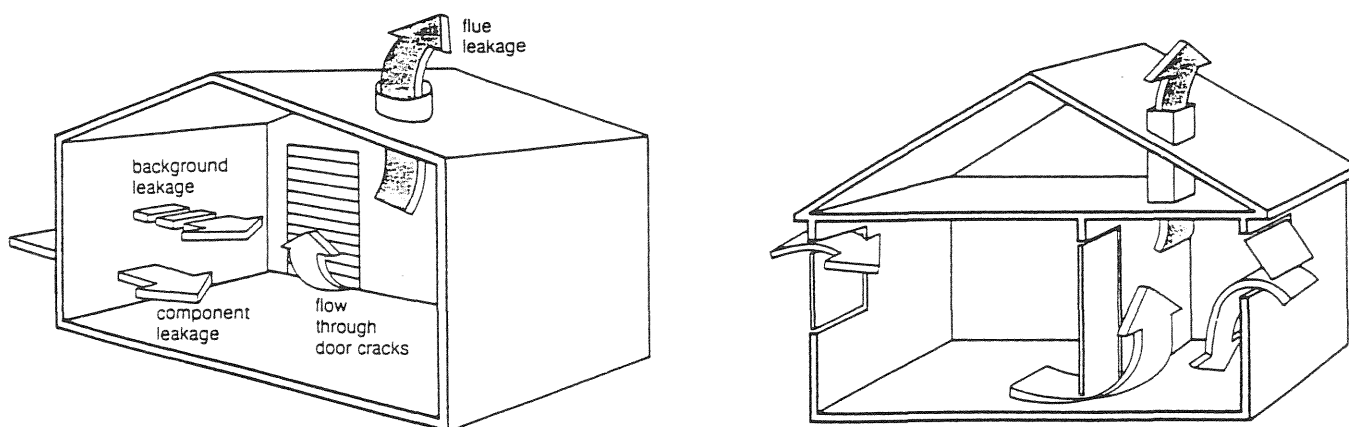
Med den grove celleinddeling, der er tale om ved zonemodellen, kan man ikke forvente en pålidelig beregning af temperatur- og luftstrømningsforholdene, så længe modellen ikke kan medtage fx kolde luftstråler.

3.3 *Referencer*

Dalicieux, P., Bouia, H. og Blay, D.: Simplified Modelling of Air Movements in a Room and its first Validation with Experiments. Room Vent, Vol 1, pp 383-397, Aalborg, 1992.

4 Flerrumsmodeller

Flerrumsmodeller anvendes til beregning af luftinfiltrationen i en bygning med flere rum. I litteraturen anvendes ofte benævnelsen "Multizone modeller", men de er her kaldt Flerzonemodeller for at undgå forveksling med zonemodellerne i kapitel 3. I flerrumsmodeller regnes der med, at hvert rum har sit konstante lufttryk og at trykdifferenserne bestemmer luftstrømmene gennem revner og sprækker, vinduer og døre som vist på figur 4.1.



Figur 4.1. Luftinfiltration mellem ude og inde og mellem rum indbyrdes (Liddament, 1986).

For hvert rum opstilles en massebalanceligning, og de ubekendte er trykkene i de enkelte rum. Der fås en ligning for hvert rum og der vil være lige så mange ubekendte som der er rum. De udvendige trykforhold bestemmes ud fra kendskab til vindhastighed og formfaktorer.

I ligningssystemet vil der kunne indgå formeludtryk for:

- luftstrømning gennem revner og sprækker
- luftstrømning gennem store åbninger
- luftstrømning gennem kanaler
- mekanisk ventilation
- termisk opdrift
- vindtryk på bygning
- formfaktorer
- temperaturlagdeling.

4.1 Edb-programmer. COMIS

Af en gennemgang af eksisterende edb-programmer for flerrumsmodeller foretaget af Feustel og Dieris (1992) fremgår det, at der findes mindst 50 edb-programmer på området, hvoraf godt 15 er offentligt tilgængelige. Det anføres dog at der er behov for:

- bedre bestemmelse af vindforhold
- følsomhedsstudie for at reducere kravene til inputdata
- validering af modellerne mod fuldskalamålinger.

Dette gælder tilsyneladende også for et af de senest udviklede programmer COMIS (Liddament, 1993).

Starten til COMIS blev gjort i første halvdel af 1989 af en ekspertgruppe som udviklede den første model. Der blev derefter arbejdet med programmet i IEA (Internationale Energiagentur) Annex 20 (Luftstrømninger i bygninger), og dette arbejde er fortsat i Annex 23 (Multizoneluftstrømningsmodeller).

COMIS foreligger i dag i en første, grov udgave, og i Annex 23 arbejdes der med nogle forbedringer vedrørende de oven for nævnte punkter, ligesom man vil søge at gøre programmet mere brugervenligt. Endelig vil man demonstrere brugen af det færdige program sammen med energisimuleringsprogrammer (Feustel, 1992).

4.2 *Vurdering*

Flerrumsmodellerne virker hensigtsmæssige til det påtænkte formål, og de vil i deres endelige form være simple at løse ved brug af edb.

4.3 *Referencer*

Feustel, H. E.: IEA-Annex 23, Newsletter no. 2, 1992.

Feustel, H. E og Dieris, J.: A Survey of Airflow Models for Multizone Structures. Energy and Buildings, vol. 8, no. 2, 1992.

H. E. Feustel and A. Raynor-Hoosen: Fundamentals of the multizone air flow Model - COMIS, Tech. Note 29, Air Infiltration and Ventilation Centre, Warwick, UK, May, 1990.

Liddament, M.W.: Air Infiltration Calculation Techniques - an Applications Guide. Air Infiltration and Ventilation Centre, Coventry, UK, 1986.

Liddament, M.W.: Air Infiltration and Ventilation Centre, Coventry, UK. Personlig kommunikation, 1993.

5 Luftstrømningsformler

Der findes formeludtryk til bestemmelse af luftstrømningsforholdene på delstrækninger i rum i en række tilfælde, hvor man enten har kunnet løse de bestemmende ligninger analytisk, eller hvor man har kunnet opstille erfaringsformler på basis af eksperimentelt arbejde. I det følgende vil der blive anført de formeludtryk, der kan anvendes til bestemmelse af lufthastigheder og temperaturforhold i opholdszoner.

Der vil blive skelnet mellem de to ventilationsformer, der hyppigst anvendes ved rumventilation:

- stråleventilation, hvor luften tilføres gennem indblæsningsåbninger, som er anbragt uden for opholdszonen, og det sker med en sådan hastighed, at der hurtigt sker en opblanding med den øvrige rumluft.
- fortrængningsventilation, hvor luften tilføres med lav hastighed gennem indblæsningsåbninger anbragt nede i opholdszonen.

Ud over luftstrømningerne fremkaldt af et ventilationsanlæg kan kolde eller varme flader give anledning til luftstrømninger. Her har især kuldene-faldet fra kolde flader interesse, da det kan skabe komfortproblemer i nærheden af gulvet.

5.1 Stråleventilation

Ved stråleventilation har luftstrømmen form af en stråle, der udgår fra indblæsningsåbningen. Luftstrålen vil rive luft med sig, og den medrevne luft erstattes af en returstrøm, der ofte vil forløbe nede langs gulvet. Man skelner derfor også mellem selve stråledelen og returdelen (eller returstrømmen).

Strømningsforholdene i stråledelen afhænger af følgende forhold:

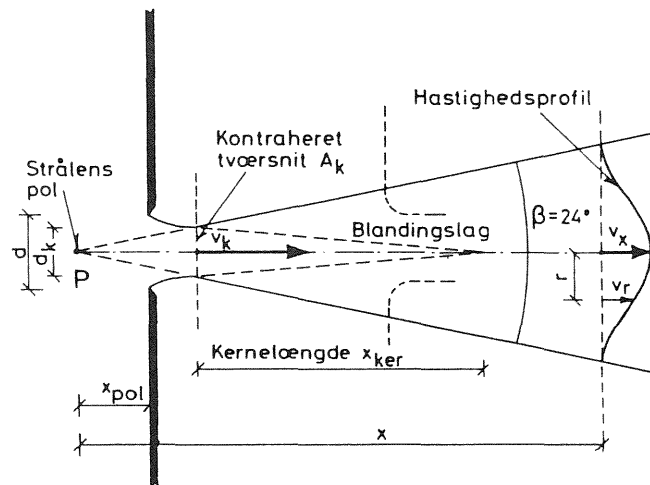
- indblæsningsluftens temperatur i forhold til rumluften, dvs. om der er tale om en isoterm eller en ikke-isoterm stråle
- indblæsningsåbningernes form, som igen er bestemmende for, om man får en aksesymmetrisk (cirkulær eller rektangulær), en radial eller en plan stråle
- indblæsningsåbningernes indbyrdes afstand, idet flere aksesymmetriske stråler kan smelte sammen til en plan stråle, hvis den indbyrdes afstand er lille nok
- indblæsningsåbningernes afstand fra loft, idet en såkaldt fristråle kan ændres til en såkaldt vægstråle, hvis afstanden er lille nok
- lokalets dimensioner på tværs af stråleretningen i forhold til strålens tværsnit og som afgør om man får en fri stråle efter en såkaldt begrænset stråle
- lokalets dimensioner i strålens retning, hvor forholdet mellem højde og dybde afgør om man skelner mellem korte og lange rum.

Idet forholdene i returdelen kan sættes i relation til forholdene i stråledelen, vil også returstrømningsforholdene afhænge af ovennævnte parametre.

5.1.1 Stråleform

Hvis udstømningsåbningen er skarpkantet, vil strålens tværsnit lige efter åbningen blive mindre end åbningsarealet, og dette formindskede tværsnit kaldes det kontraherede tværsnit (vena contracta). Lufthastigheden kan betragtes som konstant over dette kontraherede tværsnit.

Som følge af at strålen medriver luft fra omgivelserne, så snart den kommer ind i rummet, vil dens tværsnit begynde at vokse efter at have passeret det kontraherede tværsnit, og på den første strækning vil strålen bestå af to dele, som vist på figur 5.1. De to dele er dels kernen, hvor lufthastigheden er den samme som i det kontraherede areal, dels sløret, der ligger uden om kernen, og som består af en blanding af indblæst luft og luft fra omgivelserne. Kernerdelens tværsnit bliver mindre og mindre, medens sløret vokser, og i en vis afstand fra indblæsning vil kernen være helt forsvundet, og strålen vil derefter kun bestå af et slør.



Figur 5.1. Snit i aksesymmetrisk fristråle (efter Nielsen, 1988).

Afhængigt af indblæsningsåbningens form skelnes der mellem cirkulære og rektangulære (begge aksesymmetriske) stråler samt radiale og plane stråler. Desuden skelnes der mellem fristråler, hvor strålerne strømmer ind i et rum gennem en åbning anbragt et stykke fra langsgående væg og loft, og vægstråler, hvor strålerne strømmer ind gennem en åbning anbragt tæt på en lofts- eller vægflade.

I det følgende behandles kun aksesymmetriske og plane stråler, da radiale stråler ikke har interesse i den her behandlede sammenhæng.

I forbindelse med det kontraherede tværsnit A_k defineres en kontraktionskoefficient k_k :

$$A_k = k_k A \quad (5.1)$$

hvor k_k afhænger af udløbets form. Er udløbet skarpkantet som vist på figuren, vil man få en k_k -værdi på ca. 0,6, medens man med afrundede kanter kan nå op på $k_k = 1$.

Den konstante lufthastighed v_k bestemmes af:

$$v_k = k_v v_{ie0} \quad (5.2)$$

Her er k_v en hastighedskoefficient, der udtrykker friktionstabet ved strømningen gennem åbningen og hvis størrelse er 0,95-0,98. Desuden er v_{teo} den teoretisk mulige hastighed bestemt ved:

$$v_{teo} = (2 \Delta p / \rho)^{1/2} \tag{5.3}$$

For en plan stråle defineres kontraktionskoefficienten ved, jvf. figur 5.2:

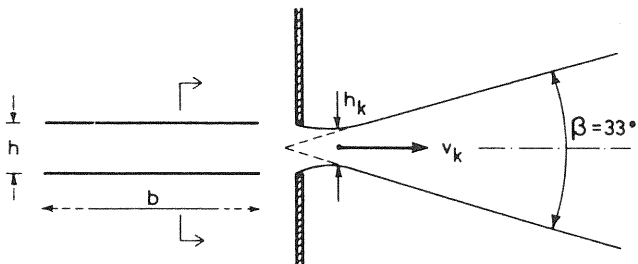
$$h_k = k_c h \tag{5.4}$$

5.1.1.1 Sløret

Sløret i en cirkulær fristråle danner en kegle med en keglevinkel på ca 24° og med toppunkt i et punkt, der ligger før udløbet, også kaldet strålens pol, jvf. figur 5.1. Dette punkt er samtidig nulpunkt i det koordinatsystem, hvori hastighedsforholdene beskrives. I praksis vil man dog oftest kunne tillade sig at se bort fra denne polafstand og regne med den vandrette afstand fra indblæsningsåbningen.

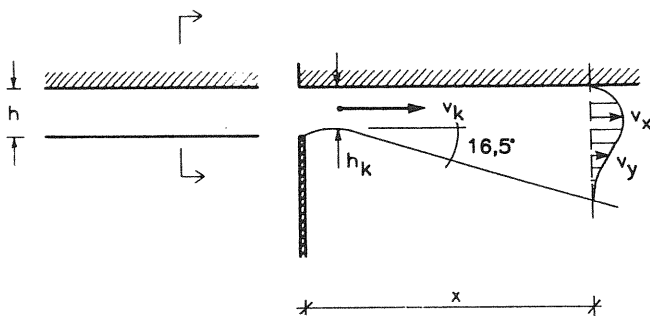
Lufthastigheden i stråleretningen vil være størst i slørets midte og hastighedsprofilerne for forskellige x-værdier vil være ligedannede som vist på figur 5.1.

Sløret i en plan fristråle begrænses af 2 skrå flader, der danner en vinkel på 33° med hinanden som vist på figur 5.2. Hastighedsprofilerne over et tværsnit af strålen vil være ligedannede på samme måde som for en cirkulær fristråle

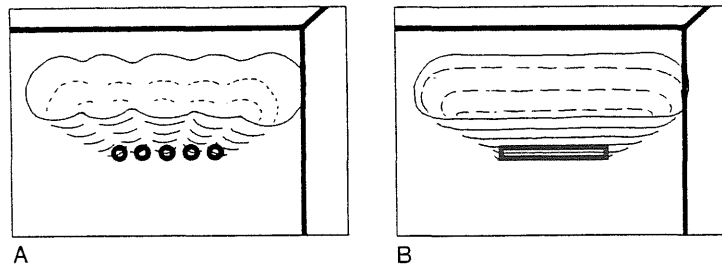


Figur 5.2. Plan fristråle (efter Nielsen, 1988).

Vægstråler antager en form, der med god tilnærmelse svarer til en halvering af de tilsvarende cirkulære og plane fristråler med vægfladen som symmetriplan. Dette er vist for en plan vægstråle på figur 5.3. Kernens og slørets keglevinkler halveres derved, og den største hastighed vil optræde tæt på fladen.



Figur 5.3. Plan vægstråle (efter Nielsen, 1988).



Figur 5.4. Overgang mellem forskellige stråleformer (Nielsen, 1981)

A: Fra aksesymmetrisk til plan stråle.

B: Fra plan til aksesymmetrisk stråle.

5.1.2 Overgang mellem forskellige stråleformer

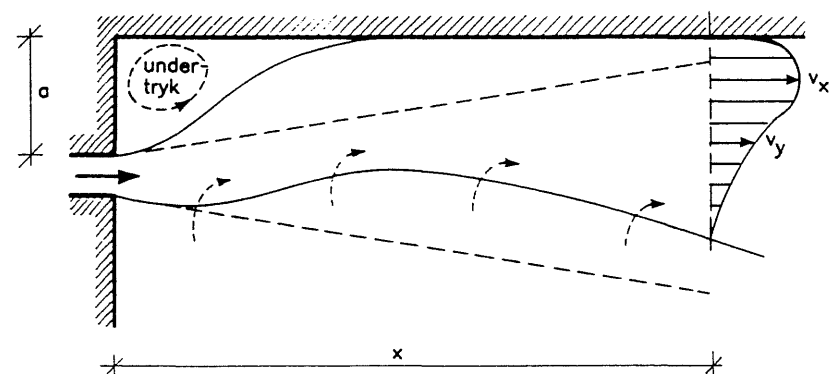
For stråler fra rektangulære åbninger gælder, at de hurtigt får samme tværsnitsform som stråler fra en cirkulær åbning. Der gælder desuden at flere aksesymmetriske stråler på en række vil kunne nå sammen og få samme stråletværsnit som en plan stråle som vist på figur 5.4, situation A.

For en fristråle fra en nærmest spalteformet åbning gælder, at den i starten vil have form som en plan stråle som vist på figur 5.4, situation B. Men i det videre forløb får den mere og mere karakter af en aksesymmetrisk fristråle som følge af, at stråletværsnittet vokser hurtigere i højden end i bredden.

5.1.2.1 Coanda-effekt

Hvis indblæsningsåbningen er placeret tæt på en flade, det være sig loft eller væg, vil den luft der bliver medrevet fra området mellem stråle og flade ikke blive erstattet hurtigt nok fra omgivelserne. Der vil da opstå et undertryk i nævnte område, og det vil trække strålen over mod (eller op mod) fladen som vist på figur 5.5. Man taler om at strålen "klæber" sig til fladen og kalder derfor også ofte strålen for en klæbestråle. Denne klæbeeffekt betegnes Coanda-effekten.

De forhold der skaber klæbeeffekten aftager med afstanden fra åbningen, og strålen fortsætter langs fladen som en vægstråle med det hastighedsprofil, en sådan stråle har.



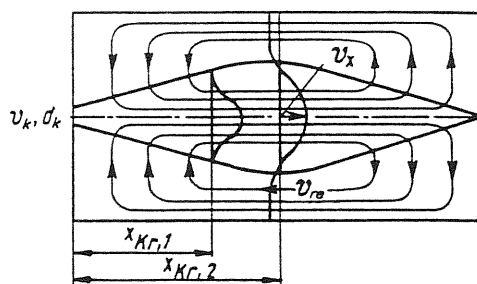
Figur 5.5. Stråle der tvinges op mod loft som følge af Coanda-effekten (efter Nielsen, 1988).

Coanda-effekten kan optræde ved såvel aksesymmetriske som plane stråler. Hvor stor afstanden mellem fladen og åbningskant maksimalt må være, for at Coanda-effekten vil optræde, afhænger af stråletypen. For loftsflader vil afstanden desuden afhænge af indblæsningsluftens temperatur i forhold til rumluften. Men selv kolde stråler vil kunne bøjes opad af Coanda-effekten og fortsætte et stykke langs loftet som en vægstråle. Egentlige talværdier for maksimumsafstanden til loftsfladen under de forskellige forhold har det ikke været muligt at finde i litteraturen.

5.1.3 Begrænsede stråler

Den luft, som en stråle river med sig, skal hele tiden erstattes, og det sker ved, at der føres luft tilbage i form af en returstrøm. Så længe rummets dimensioner er store i forhold til strålens, vil denne returstrøm ikke influere på strålens udbredelse. Rumtværsnittet kan betragtes som stort indtil stråletværsnittet udgør ca. 25 pct. af det samlede rumtværsnit A_R vinkelret på stråleretningen (Grimtlin, 1970), og så længe dette er tilfældet, tales der om en fri stråle (der kan således udmærket tales om en fri fristråle).

I det videre forløb vil stråletværsnittet vokse langsommere, jvf. figur 5.6. Når det er nået op på ca. 40 pct. af rumtværsnittet stopper tilvæksten, og stråletværsnittet vil derefter aftage, samtidig med at strålen klinger ud.



Figur 5.6. Strømningsforhold i begrænsede rum (Grimtlin, 1970).

5.1.4 Isoterme, frie stråler

Ved en isoterm stråle er den indblæste stråles temperatur lig med rumluftens temperatur, og tyngdekraften vil derfor ikke have nogen indflydelse på strålens forløb. Desuden er strålen fri, hvis rumdimensionerne er så store, at returstrømmen ikke influerer på strålens udbredelse.

5.1.4.1 Centralhastigheder

Ved centralhastigheden forstås maksimalhastigheden i strålen. Den vil for fristråler optræde i strålens midte, medens den for vægstråler vil optræde tæt ved væggen (eller loftet).

Hastighedsforholdene og dermed også centralhastigheden kan bestemmes ud fra bevægelsesmængdeligningen, idet bevægelsesmængdestrømmen vil være konstant i vandret retning. Dette fører til de centralhastigheder, som er anført i tabel 5.1 for forskellige former for

Tabel 5.1. Oversigt over formler for isoterme stråler.

	Fri stråle		Begrænset stråle ¹⁾	
	Friråle	Vægstråle	Friråle	Vægstråle
<i>Centralhastigheder:</i>				
cirkulær stråle, v_x/v_k	$C_c A_k^{1/2}/x$	$2^{1/2} C_c A_k^{1/2}/x$	$K_B (v_x/v_k)_{fri}$	$K_B (v_x/v_k)_{fri}$
rektangulær stråle, v_x/v_k	se afsnit 5.1.4.1			
plan stråle, v_x/v_k	$C_p (h_k/x)^{1/2}$	$2^{1/2} C_p (h_k/x)^{1/2}$	$\sim K_B (v_x/v_k)_{fri}$	$\sim K_B (v_x/v_k)_{fri}$
sammensat stråle, v_x/v_k	se afsnit 5.1.4.1			
<i>Kastelængder:</i>				
cirkulær stråle, $x_{0,2}$, m	$5,0 C_c v_k A_k^{1/2}$	$5,0 \cdot 2^{1/2} C_c v_k A_k^{1/2}$	se afsnit 5.1.5.2	se afsnit 5.1.5.2
plan stråle, $x_{0,2}$, m	$25 C_p^2 v_k^2 h_k$	$25 \cdot 2^{1/2} C_p^2 v_k^2 h_k$	se afsnit 5.1.5.2	se afsnit 5.1.5.2
<i>Indtrængningslængder, dybe num:</i>				
cirkulær stråle, x_{re} , m ²⁾			$\sim 3A_R^{1/2}$	$\sim 5A_R^{1/2}$
plan stråle, x_{re} , m ²⁾			$\sim 2,5H$	$\sim 4H$
<i>Returhastigheder, dybe num:</i>				
cirkulær stråle, v_{re}/v_k			$K_R (v_x/v_k)_{fri}$	$K_R (v_x/v_k)_{fri}$
plan stråle, v_{re}/v_k			$\sim K_R (v_x/v_k)_{fri}$	$\sim K_R (v_x/v_k)_{fri}$
<i>Max. returhastigheder, dybe num:</i>				
cirkulær stråle v_{rem}/v_k			$\sim (A_k/A_R)^{1/2}$	$\sim (A_k/A_R)^{1/2}$
plan stråle, v_{rem}/v_k			$\sim (h_k/H)^{1/2}$	$\sim (h_k/H)^{1/2}$
<i>Positioner for max. returhast., dybe num:</i>				
cirkulær stråle, x_{rem} , m			$\sim 2A_R^{1/2}$	$3A_R^{1/2}$
plan stråle, x_{rem} , m			$\sim 1,5H$	$\sim 2H$
<i>Max. returhastigheder, korte num:</i>				
cirkulær stråle, v_{rem}/v_L				$\sim 0,3-0,7$
plan stråle, v_{rem}/v_L				$\sim 0,7$

1) index "fri" henviser til fri stråle

2) jvf. tabel 5.3

fri- og vægstråler. Der indgår heri to hastighedskoefficienter, C_c for cirkulære stråler og C_p for plane stråler. Hyppigt anvendte C_c -værdier er vist i tabel 5.2, medens værdien for C_p ofte sættes til 2,5.

Tabel 5.2. C_c -værdier ved cirkulære og rektangulære stråler. (Nielsen, 1988).

Cirkulær åbning

$C_c = 5,7$ for $2,5 \text{ m/s} \leq v_0 \leq 5 \text{ m/s}$
 $C_c = 7,0$ for $10,0 \text{ m/s} \leq v_0 \leq 50 \text{ m/s}$

Rørformet indblæsning, længden $\geq 5 d$

$C_c = 6,8$

Rektangulær åbning

Afstand $x \geq 6$ gange bredden

$C_c = 6,5$ for bredde/højde = 1
 $C_c = 6,2$ for bredde/højde = 5
 $C_c = 6,0$ for bredde/højde = 10
 $C_c = 5,6$ for bredde/højde = 20

For en rektangulær fristråle fra en åbning med åbningsarealet $b \cdot h$ og med b større end h gælder, at den hastighedsmæssigt opfører sig som om den har to kernespidses. Mellem de to spidser svarer hastigheden til den, man får i en plan stråle fra en åbning med højden h , og efter 2. spids svarer hastigheden til den man får i en stråle fra en kvadratisk åbning med kantlængden b (Becher, 1972).

De to spidser bestemmes af:

$$x_{kern,1} = C_p^2 \cdot h_k$$

$$x_{kern,2} = C_c \cdot b_k$$

og centralhastigheden bestemmes af (Andersen, 1995a):

$$v_x / v_k = C_p (h_k / x)^{1/2} \text{ for } x_{kern,1} < x < x_{kern,2}$$

$$v_x / v_k = C_c (b_k h_k)^{1/2} / x \text{ for } x > x_{kern,2}$$

Hyppigt anvendte C_c -værdier for rektangulære åbninger er ligeledes anført i tabel 5.2.

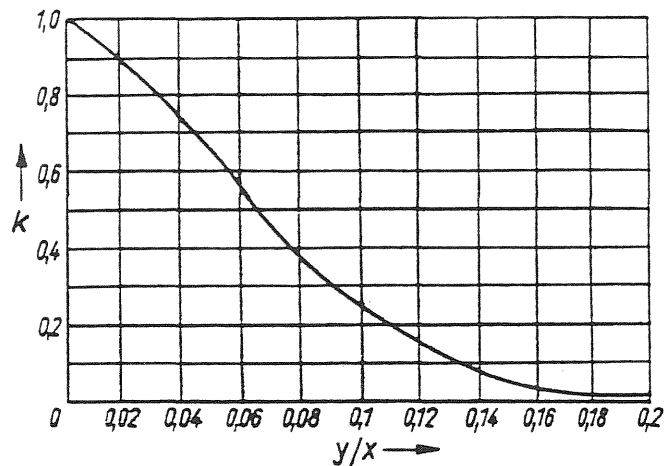
For **Coanda-vægstråler** viser forsøg, at der opstår et tab i bevægelsesmængdestrømmen på 30-40 pct. (Nielsen, 1981) når en fristråle ændres til en vægstråle som følge af Coanda-effekten. Af hastighedsudtrykkene ses, at centralhastigheden i vægstrålen som følge heraf reduceres med ca. 15-20 pct.

For **sammensmeltede stråler**, hvor flere parallelle stråler kan smelte sammen til en stråle i en vis afstand fra åbningerne, kan strålehastigheden i et vilkårligt punkt i den sammensmeltede stråle fås som summen af en række enkeltbidrag, der igen kan bestemmes ved at se på de

enkelte bidrag til bevægelsesmængdestrømmen igennem et lille delareal omkring punktet. Man finder da (Grimitlin, 1970):

$$v_{x,y} = (k_1 v_{x1}^2 + k_2 v_{x2}^2 + \dots k_i v_{xi}^2 + \dots)^{1/2} \quad (5.5a)$$

hvor v_{xi} er centralhastigheden for den pågældende stråle og k_i er en konstant der er bestemt af forholdet y_i/x , og hvor y_i igen er afstanden fra den i 'te stråles centralakse ud til det pågældende punkt. Denne konstant kan fås af figur 5.7.



Figur 5.7. Faktor k til brug i udtrykkene (5.5b) - (5.5d) (Grimitlin, 1970).

Ofte vil alle åbningerne være ens og med samme centralhastighed v_x og da kan (5.1) forenkles til:

$$v_{x,y} = v_x (n_1 k_1 + n_2 k_2 + \dots n_i k_i + \dots)^{1/2} \quad (5.5b)$$

hvor n 'erne er antallet af åbninger, der har samme vinkelrette afstand mellem åbningen og en akse gennem det betragtede punkt.

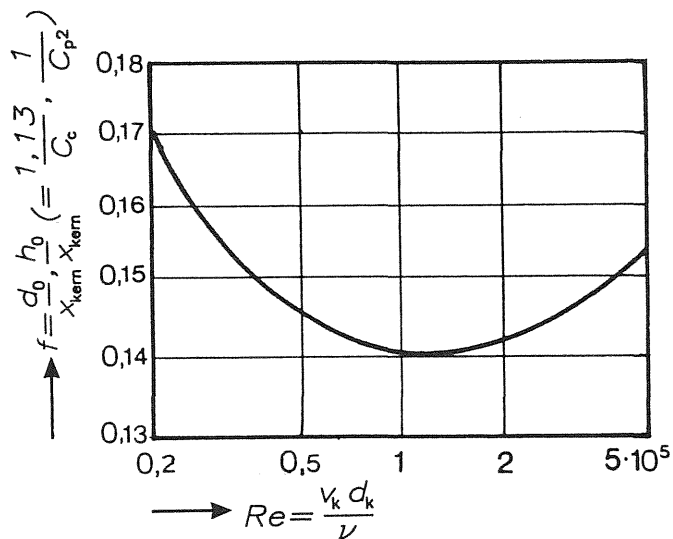
Bliver den sammensmeltede stråle aksesympetrisk fås:

$$v_{x,y} = (C_c A_k^{1/2}/x) (n_1 k_1 + n_2 k_2 + \dots n_i k_i + \dots) \quad (5.5c)$$

hvor A_k er den enkelte åbnings kontraherede areal. Ligger åbningerne på linie fås:

$$v_{x,y} = C_p (h_k/x)^{1/2} (n_1 k_1 + n_2 k_2 + \dots n_i k_i + \dots) \quad (5.5d)$$

hvor $h_k = n A_k/L$, og hvor igen L er afstanden mellem de to yderste åbninger. Udtrykket (5.5d) vil gælde indtil $x = x_{ker,2} = C_p^2 L$. For større x -værdier bliver strålen aksesympetrisk, og hastighederne bestemmes da af (5.5c).



Figur 5.8. Medrivningstallets afhængighed af Reynolds' tal (efter Stampe, 1982).

5.1.4.2 Begrænsninger for hastighedsformlerne

Der regnes normalt med, at hastighedskonstanterne kun afhænger af indblæsningsåbningens form, men det viser sig at åbningshastigheden, eller mere præcist Reynolds' tal, også spiller en rolle. Stampe (1982) angiver det på figur 5.8 viste sammenhæng mellem det såkaldte medrivningstal f og Reynolds' tal, hvor Reynolds' tal er defineret ved:

$$\text{Cirkulære stråler: } Re = \frac{v_k d_k}{\nu} \quad (5.6a)$$

$$\text{Plane stråler: } Re = \frac{v_k h_k}{\nu} \quad (5.6b)$$

og hvor ν er luftens kinematiske viskositet. Der er følgende sammenhæng mellem medrivningstallet og hastighedskonstanterne (Andersen, 1995a):

$$f = 1,13/C_c \text{ og } f = 1/C_p^2$$

Det ses at der er en minimumsværdi for medrivningstallet f (og dermed maksimumsværdi for C_c og C_p) for $Re \sim 10^5$.

Området for Reynoldstallet på figur 5.8 svarer omtrentlig til de hastighedsområder der er anført i tabel 5.2 for cirkulære åbninger, når åbningsdiameter er ca. 0,2m og dermed $d_k \sim 0,15m$. Men figurens f -værdier fører ikke helt til de i tabel 5.2 anførte K_c -værdier. For Re i området $0,2 \cdot 10^5 - 0,5 \cdot 10^5$ svarende til hastighedsområdet 2-5m/s fås således:

$$C_c \sim 1,13/0,155 = 7,3$$

og i området $10^5 - 5 \cdot 10^5$ svarende til hastighedsområdet 10-50 m/s fås:

$$C_c \sim 1,13/0,145 = 7,8$$

Der er ikke i litteraturen anført C_c -værdier for højere eller lavere R_e -tal eller for højere eller lavere hastigheder. Det er ligeledes uklart hvad lavere R_e -tal eller lavere hastigheder betyder for stråledannelsen. Målinger udført af Nielsen og Møller (1988) tyder dog på at strålen begynder at blive diffus for $R_e < 5000$.

Det skal endelig bemærkes, at hastighedsformlerne kun gælder for frie stråler, og det vil sige for $x < x_{kr1}$, hvis man har med begrænsede rum at gøre. Det vil igen sige, at hastighedsformlerne kun gælder så længe stråletværsnittet ikke overstiger ca. 25 pct. af rumtværsnittet. Det betyder teoretisk, at formlerne kun gælder i begrænsede rum så længe:

$$x < 1,5 (BH)^{1/2} \text{ for cirkulære fristråler}$$

$$x < 2 (BH)^{1/2} \text{ for cirkulære vægstråler}$$

$$x < 0,5 H \text{ for plane fristråler}$$

$$x < 1,0 H \text{ for plane vægstråler}$$

5.1.4.3 Kastelængder

Ved kastelængden forstås afstanden fra indblæsningsåbningen frem til et punkt, hvor centralhastigheden v_x har en bestemt størrelse. Ved dimensionering af et stråleventilationsanlæg kræves ofte, at centralhastigheden skal ned på 0,2 m/s eller derunder, inden strålen når opholdszonen eller en væg, der tvinger den ned i opholdszonen. Med dette krav fås fx for en cirkulær fristråle:

$$x_{0,2} = C_c A_k^{1/2} v_k / 0,2 = 5 C_c v_k A_k^{1/2} \quad (5.7)$$

Tilsvarende udtryk fås for de øvrige behandlede stråletyper, dvs. plane fristråler samt vægstråler.

For sammensmeltede stråler bestemmes kastelængden ved at løse en af ligningerne (5.1) - (5.4) med hensyn til $x_{0,2}$.

5.1.5 Isoterme, begrænsede stråler

De hidtil anførte centralhastighedsformler gælder som tidligere nævnt kun for de såkaldte frie stråler, hvor rummets dimensioner er så store i forhold til strålens tværsnit, at strålen kan udbrede sig frit uden at blive påvirket af den returstrøm, der skal erstatte den medrevne luft.

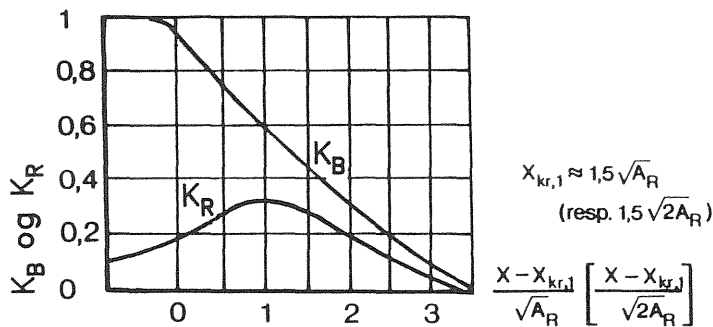
5.1.5.1 Centralhastigheder

I begrænsede rum gælder hastighedsformlerne kun for x -værdier mindre end x_{kr1} . For større x -værdier skal der i formlerne indføres en korrektionsfaktor K_B , således at centralhastigheden i det videre forløb bestemmes af (Grimitlin, 1970):

$$v_{x,b} = K_B v_x \quad (5.8)$$

hvor v_x er centralhastigheden i den tilsvarende frie stråle i afstanden x .

Grimitlin (1970) angiver de på figur 5.9 viste værdier for K_B . De er fundne for cirkulære stråler, men han anvender dem også i sine formler for plane stråler. Der er ikke fundet andre værdier for reduktionsfaktorerne for plane stråler.



Figur 5.9. Faktoren K_B til bestemmelse af strålehastigheden samt faktoren K_R til bestemmelse af returstrømmen i begrænsede rum (Grimitlin, 1970).

5.1.5.2 Kastelængder

For en begrænset cirkulær fristråle, kan kastelængden bestemmes af:

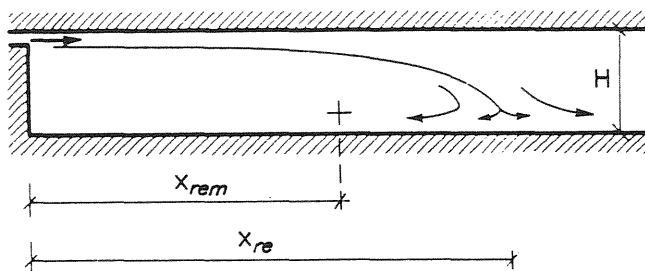
$$0,2 = K_B v_x = K_B C_c A_k^{1/2} v_k / x_{0,2} \quad (5.9)$$

hvor K_B fås af figur 5.9. Men da K_B selv er en funktion af x , kan (5.9) kun løses ved at opstille et analytisk udtryk for K_B eller ved at prøve sig frem.

Konstantværdierne i figur 5.9 kan også anvendes for cirkulære vægstråler, hvorimod der som nævnt ikke er fundet K_B -værdier for plane stråler.

5.1.5.3 Indtrængningslængde i dybe rum

I begrænsede rum bremses strålen, og i en vis afstand fra indblæsningsåbningen tvinges den nedad og deler sig som vist på figur 5.10.



Figur 5.10. Strømningsforhold og indtrængningslængde for isotermisk, plan stråle i et dybt lokale (Nielsen, 1988).

Tabel 5.3. Afstanden til vendepunktet x_{re} og til punktet med største returhastighed, x_{rem}

	Vendepunkt, x_{re}				Punkt for max. returhastighed, x_{rem}			
	Aksesymmetrisk ¹⁾		Plan stråle		Aksesymmetrisk. ¹⁾		Plan stråle	
	fristråle	vægstråle	fristråle	vægstråle	fristråle	vægstråle	fristråle	vægstråle
Baturin (1972)	$3 A_R^{1/2}$							
Grimitlin (1970)	$5 A_R^{1/2}$	$7 A_R^{1/2}$			$2,2 A_R^{1/2}$	$3,1 A_R^{1/2}$		
Krause (1972)	$2,5-3 A_R^{1/2}$							
Nielsen (1981)		$5 A_R^{1/2}$		$3-5 H$				
Nielsen (1983)				$4 H$				
Nielsen et al. (1987)		$4 A_R^{1/2}$						
Skåret (1976)								$1,5 H$
Schwenke (1975)				$3 H$				

1) $A_R = BH$

Der er udført målinger dels af afstanden x_{re} til det punkt, hvor strålen deler sig, dels af afstanden x_{rem} hen til, hvor returstrømmens hastighed er størst. Resultaterne er vist i tabel 5.3. Som det ses er der ret store afvigelser mellem de forskellige forfattere.

Det skal bemærkes, at indtrængningslængden er uafhængig af indblæsningshastigheden. Der er dermed heller ikke nogen sammenhæng mellem kastelængde og indtrængningslængde.

5.1.5.4 Returhastigheder i dybe rum

Hastighedsprofilen i returstrømmen langs gulvet i et dybt rum vil have en maksimumsværdi tæt på gulvfladen (svarende til maksimumsværdien tæt på loftsfladen for en vægstråle). Denne maksimumsværdi kan i afstanden x fra væggen med indblæsningsåbningen ifølge Grimitlin (1970) fås af

$$v_{rex} = K_R v_x \quad (5.10)$$

hvor v_x er centralhastigheden i den fri stråle i afstanden x og hvor returfaktoren K_R for cirkulære stråler kan fås af figur 5.9. Det ses af figuren, at den største centralhastighed i returstrømmen for en cirkulær stråle optræder for $x = 2,2 (A_R)^{1/2}$, hvor A_R er rummets tværsnitsareal

vinkelret på stråleretningen. For denne x -værdi er $K_R = 0,3$ og indføres v_x for en cirkulær stråle med $C_c = 7,3$, fås:

$$v_{rem} = 0,3 \cdot 7,3 A_k^{1/2} v_k / (2,2 A_R^{1/2}) = 0,99 (A_k/A_R)^{1/2} v_k \quad (5.11)$$

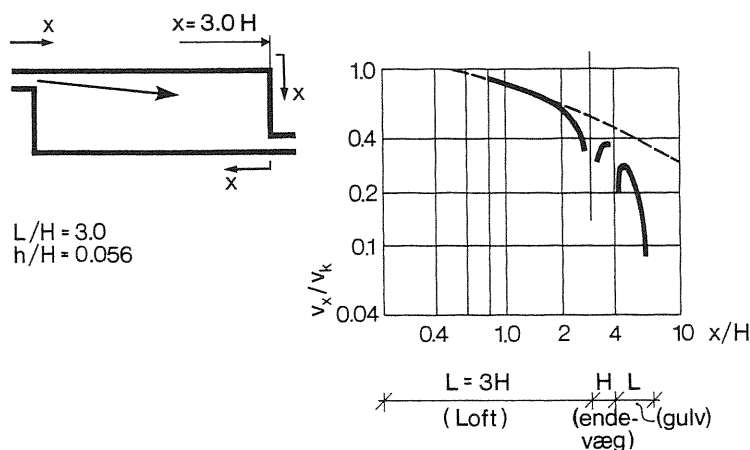
Der fås et tilsvarende udtryk for en cirkulær vægstråle.

Nielsen (1981) gør opmærksom på, at returstrømsforholdene kan afhænge af forholdet mellem rumbredde og rumhøjde. For $B < 3,5 H$ vil forholdene være som de hidtil antagne med en returstrøm langs gulvet. For bredere rum, dvs. $B > 4H$, vil strålesløret ramme gulvet inden returpunktet nås, og returstrømmen vil da optræde langs siderne. Endelig anfører Nielsen (1981) at udtrykket (5.11) med tilnærmelse også kan anvendes på plane stråler, blot man erstatter A_k/A_R med h_k/H .

5.1.5.5 Afbøjning i korte rum

I et kort rum vil en stråle ramme endevæggen og blive tvunget ned mod gulvet, hvor den igen vil dreje 90° og returnere langs gulvet.

På figur 5.11 er vist et numerisk beregnet forløb af en plan vægstråle (Nielsen, 1976 og 1981). Det ses, at hastigheden aftager kraftigt før hjørnet mellem loft og endevæg. Her omsættes hastigheden til en trykstigning, der igen omsættes til hastighed ned langs endevæggen. Dette gentager sig i hjørnet mellem endevæg og gulv. I hjørnet ved gulvet fjernes der i dette tilfælde desuden samme mængde luft gennem en udsugningsåbning, som der kommer ind gennem indblæsningsåbningen.



Figur 5.11. Centralhastigheden i plan vægstråle i afhængighed af afstanden fra indblæsningsåbning, når afstanden måles langs lokalets omkreds. Den punkterede kurve viser den centrale hastighed, man ville have fået uden afbøjninger (efter Nielsen, 1981).

På figuren er med punkteret streg indtegnet den beregnede centralhastighed i tilfælde af, at strålen forløb uden knæk. Denne centralhastighed svarer også til at der ikke skete ændringer af selve hastighedens størrelse i forbindelse med luftstrålens retningsændring.

Hastighedsreduktionen i hjørnet kan skyldes, at der inden hjørnet sker en opbremsning, hvor stråletværsnittet udvider sig, og efter hjørnet en acceleration hvor stråletværsnittet indskrænker sig. Begge tværsnitsændringer medfører energitab, jvf. rørstrømninger, hvor der ved tilsvarende tværsnitsændringer skal regnes med modstandstal på 0,05 - 0,10. Endelig kan der optræde hvirveldannelser helt inde i hjørnet, som også medfører energitab.

De numerisk beregnede hastighedsreduktioner er på ca. 20 pct. i loftshjørnet og ca. 10 pct. i hjørnet ved gulvet.

5.1.5.6 Returhastigheder i korte rum

Den største returhastighed langs gulvet vil optræde lige efter at strålen har forladt væggen. Ved de numeriske beregninger, hvis resultater er vist på figur 5.11, findes:

$$v_{rem} / v_{L+H} \sim 0,7 = K_{rem} \quad (5.12)$$

hvor v_{L+H} er hastigheden i den uforstyrrede plane vægstråle for $x = L+H$.

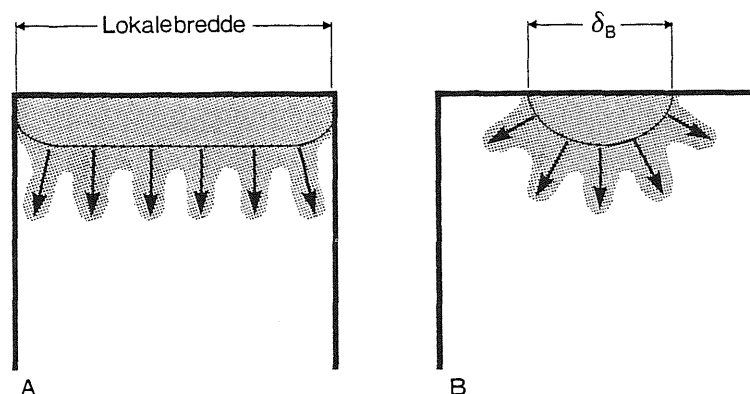
For en rektangulær vægstråle vil returhastigheden afhænge af forholdet b/B hvor b er åbningsbredden. Hvis forholdet har en sådan værdi, at strålen henne ved endevæggen udfylder loftet i hele dets bredde, som vist på figur 5.12, fås if. Hestad (1975):

$$v_{rem} / v_L \sim 0,7$$

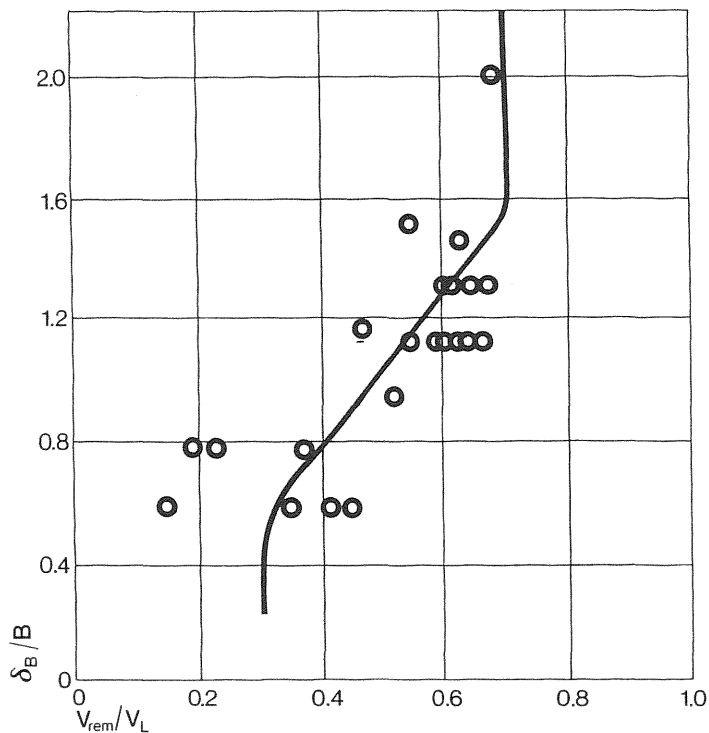
eller omtrentlig det samme som udtrykt ved (5.12). Er udbredelsen lille i forhold til vægstrålen, jvf. figur 5.12, fås:

$$v_{rem} / v_L \sim 0,3 \quad (5.13)$$

Hestads resultater er vist på figur 5.13. Der er ikke fundet værdier for forholdet v_{rem}/v_{L+H} eller v_{rem}/v_L for fristråler.



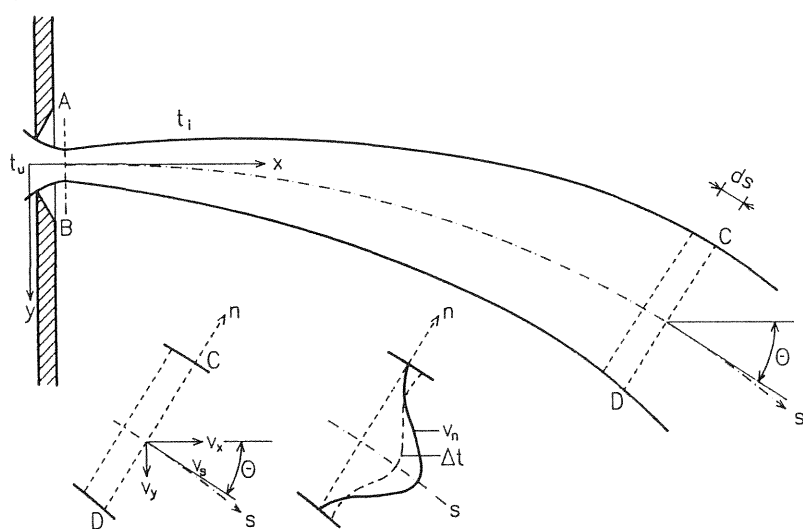
Figur 5.12. Aksesymmetrisk vægstråle mod endevæg, der enten når at blive næsten plan (A) eller forbliver tredimensional (B) (Nielsen, 1981).



Figur 5.13. Sammenhæng mellem hastighedsforholdet v_{rem}/V_L og strålens relative bredde ved endevæggen, δ_B/B (Nielsen, 1981).

5.1.6 Ikke-isoterm, frie stråler

Ved ikke-isotermiske stråler vil indblæsningsluftens temperatur være forskellig fra rumluftens. Dette bevirker, at strålen vil få et krumt forløb med opadgående retning for en varm stråle og nedadgående for en kold. I det følgende behandles kun stråler, der er koldere end rumluft, og som blæses ind vandret, som vist på figur 5.14.



Figur 5.14. Hastigheds- og temperaturforhold i ikke-isoterm stråle.

Tabel 5.4. Oversigt over formler for ikke-isoterme stråler.

	Fri stråle		Begrænset stråle ¹⁾	
	Fristråle	Vægstråle	Fristråle	Vægstråle
<i>Banekurver:</i>				
cirkulær stråle, y/d_k	$\sim 0,08 Ar (x/d_k)^3$		$(1/K_B)^3 (y/d_k)_{fri}$	
plan stråle, y/h_k	$0,16 Ar (x/h_k)^{5/2}$		$\sim (1/K_B)^3 (y/h_k)_{fri}$	
<i>Centralhastigheder:</i>				
cirkulær stråle, vandret, v_x/v_k	$\sim C_c A_k^{1/2}/x$		$K_B (v_x/v_k)_{fri}$	
cirkulær stråle, lodret, v_y/v_k	$\sim 1,9 Ar (x/d_k)$		$(1/K_B)^2 (v_y/d_k)_{fri}$	
plan stråle, vandret, v_x/v_k	$\sim C_p (h_k/x)^{1/2}$		$\sim K_B (v_x/v_k)_{fri}$	
plan stråle, lodret, v_y/v_k	$\sim 1,1 Ar (x/h_k)$		$\sim (1/K_B)^2 (v_y/v_k)_{fri}$	
<i>Temperaturer:</i>				
cirkulær stråle, $\Delta t_s/\Delta t_i$	$\sim 0,55 (v_x/v_k)$		$(1/K_B) (\Delta t_s/\Delta t_i)_{fri}$	
plan stråle, $\Delta t_s/\Delta t_i$	$\sim 0,60 (v_x/v_k)$		$\sim (1/K_B) (\Delta t_s/\Delta t_i)_{fri}$	
<i>Klæbelængder:</i>				
cirkulær stråle, x_{kl}/d_k		$1,7 Ar^{1/2}$		$K_B^{3/2} (x_{kl}/d_k)_{fri}$
plan stråle, x_{kl}/h_k		$1,3 Ar^{2/3}$		$K_B^2 (x_{kl}/h_k)_{fri}$

1) index "fri" henviser til fri stråle

Strålens banekrumning bestemmes af forholdet mellem opdrifts- og massekræfter, og dette kan udtrykkes ved Archimedes' tal:

$$Ar = \frac{l g \Delta t}{T_i v_k^2} \quad (5.14)$$

hvor l er samme karakteristiske, geometriske størrelse for indblæsningsåbningen, som blev anvendt i forbindelse med Reynolds' tal i (5.5) og (5.6), dvs. d_k eller h_k .

En oversigt over formeludtryk for ikke-isoterme stråler er givet i tabel 5.4.

5.1.6.1 Strålernes banekurver

En stråles banekurve kan udledes af bevægelsesmængdeligningerne, og for en cirkulær fristråle der blæses ind vandret fås (Andersen, 1995a):

$$\frac{y}{d_k} = 0,089 Ar (x/d_k)^3 \quad (5.15)$$

Konstantværdien 0,089 er noget højere end den værdi på ca. 0,07 der ofte ses anvendt og som fx anføres af Grimitlin (1970). Koestel (1955) når frem til konstantværdien 0,065.

For en vandret indblæst, plan fristråle fås:

$$\frac{y}{h_k} = 0,16 Ar \left(\frac{x}{h_k} \right)^{5/2} \quad (5.16)$$

5.1.6.2 Hastighedsforhold. Centralhastigheder

Bortset fra nedbøjningen, vil den ikke-isoterme stråle have samme form som den isoterme stråle med samme vinkler for kerne- og slørkegle.

Strålens centralhastighed bestemmes af bevægelsesmængdeligningerne, og for en cirkulær stråle, der blæses vandret ind, fås (Andersen, 1995a):

$$v_s = \left(\frac{T_s}{T_u} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{\cos \theta} \right)^{1/2} C_c \frac{A_k^{1/2}}{s} v_k \quad (5.17)$$

Den vandrette hastighedskomponent v_x bliver da:

$$v_x = v_s \cos \theta = \left(\frac{T_s}{T_u} \right)^{1/2} (\cos \theta)^{1/2} C_c \frac{A_k^{1/2}}{s} v_k \quad (5.18)$$

Dette udtryk er analogt til udtrykket for den tilsvarende isoterme stråle på nær leddene $(T_s/T_u)^{1/2}$ og $(\cos \theta)^{1/2}$. Desuden indgår kurvelængden s i stedet for den vandrette afstand x . Det kan vises, at man med god tilnærmelse kan bruge det isoterme udtryk så længe stråleaksens tangenvinkel med vandret er mindre end 35° , dvs.:

$$v_x \sim \frac{C_c A_k^{1/2}}{x} v_k \quad (5.19)$$

For plane stråler fås tilsvarende:

$$v_x = v_s \cos \theta = \left(\frac{T_s}{T_u} \right)^{1/2} (\cos \theta)^{1/2} C_p \left(\frac{h_k}{s} \right)^{1/2} v_k \quad (5.20)$$

og på tilsvarende måde som for de cirkulære stråler fås for $\theta < 35^\circ$:

$$v_x \sim C_p \left(\frac{h_k}{x} \right)^{1/2} v_k \quad (5.21)$$

Den lodrette hastighedskomponent kan bestemmes af:

$$v_y = v_s \cdot \sin \theta = v_x \operatorname{tg} \theta \quad (5.22)$$

For en cirkulær stråle og med $\operatorname{tg} \theta \leq 0,7$ (svarende til $\theta = 35^\circ$) fås med tilnærmelse:

$$v_y \sim 2,0 Ar (x/d_k) v_k \quad (5.23)$$

For en plan stråle fås tilsvarende:

$$v_y \sim 1,0 Ar (x/h_k) v_k \quad (5.24)$$

5.1.6.3 Temperaturforhold

I en kold stråle vil temperaturen over et stråletværsnit være lavest i strålens midte og vil vokse ud mod strålens rand. For en cirkulær fristråle fås (Andersen, 1995a):

$$\frac{\Delta t_s}{\Delta t_i} = \frac{t_i - t_s}{t_i - t_u} \sim 0,56 \frac{v_s}{v_k} \quad (5.25)$$

hvor t_s er temperaturen i strålens midte.

For en plan stråle fås:

$$\frac{\Delta t_s}{\Delta t_i} = 0,62 \frac{v_s}{v_k} \quad (5.26)$$

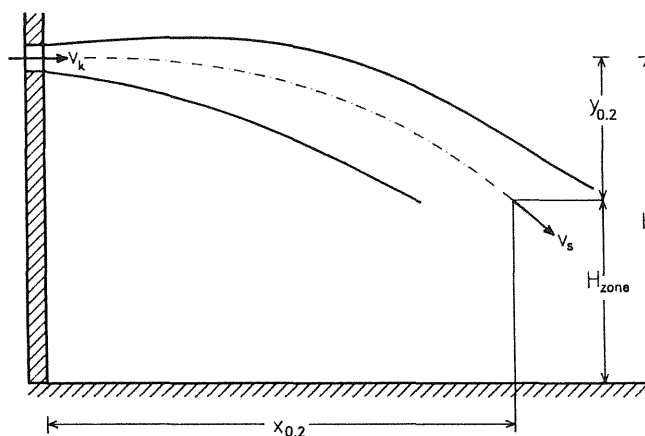
Der vil i begge tilfælde gælde, at v_s kan erstattes af v_x for den tilsvarende isoterme stråle, når banekurven ikke er for krum.

Den beregnede temperaturdifferens mellem stråle og omgivelserne er stærkt påvirket af de valgte slørvinkler og hastighedskonstanter. Dette medfører blandt andet, at Grititlin (1970) angiver en konstantværdi for cirkulære stråler på 0,7 i stedet for den her angivne 0,56 og for plane stråler på 0,9 i stedet for 0,62.

5.1.6.4 Kaste- og indtrængningslængde

Begrebet kastelængde knytter sig til isoterme stråler, men det kan om nødvendigt også anvendes i forbindelse med ikke-isoterme stråler. Man kan således beregne den vandrette afstand til det sted hvor centralhastigheden v_s er nede på 0,2 m/s. Samtidig kan man beregne hvor langt strålen da er nået ned, eller rettere om den er nået ned i opholds-zonen, jvf. figur 5.15.

Man kan også beregne, hvor langt strålen er nået hen, når den rammer gulvet. Men strålen vender ikke nødvendigvis her. Så man kan ikke tale om en egentlig indtrængningslængde.

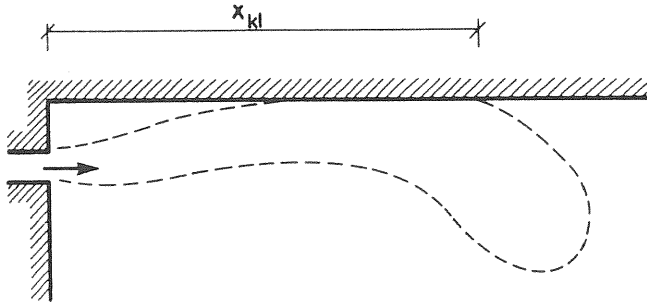


Figur 5.15. Fastlæggelse af kastelængde for fri, ikke-isoterm stråle.

5.1.6.5 Vægstrålers klæbelængde

En kold vægstråle vil følge en loftsflade et stykke inden den slipper fladen. Ligeledes vil Coanda-effekten kunne omdanne en kold fristråle til en vægstråle, der følger loftsfladen et stykke vej.

Den afstand x_{kl} fra indblæsningsåbningen, hvor strålerne slipper, kaldes klæbelængden, jvf. figur 5.16, og den vil først og fremmest afhænge af strålens Archimedes-tal.



Figur 5.16. Klæbelængden x_{kl} for kold stråle langs en loftsflade (Nielsen, 1981).

Grimitlin (1970) angiver, at kolde vægstråler slipper en loftsflade når det "stedlige" Archimedes-tal Ar_x når op på en bestemt værdi. I dette Archimedes-tal indsættes de stedlige værdier det pågældende sted i (5.14) i stedet for åbningsværdierne. Grimitlin angiver:

$$Ar_x = 0,4 \text{ for cirkulære stråler} \quad (5.27)$$

$$Ar_x = 0,5 \text{ for plane stråler} \quad (5.28)$$

Løses (3.27) og (3.28) med hensyn til x_{kl} , fås if. Grimitlin (1970):

$$x_{kl}/d_k = 1,7 Ar^{-1/2} \text{ for cirkulær stråler} \quad (5.29)$$

$$x_{kl}/h_k = 1,25 Ar^{-2/3} \text{ for plane stråler} \quad (5.30)$$

Målinger udført af Hested (1975 og 1976) fører omtrentlig til samme resultat, når rummets varmekilder er jævnt fordelt over gulvet. Hested (1976) fandt desuden at Ar_x kunne variere kraftigt for forskellige placeringer af varmekilderne.

5.1.6.6 Vægstrålers banekurver

Der er ikke i litteraturen fundet noget analytisk udtryk for banekurven for en kold stråle der slipper et loft. Men det må principielt kunne udledes ved at opstille bevægelsesligningerne med udgangspunkt i de værdier for temperaturdifferens, hastigheder og stråletværsnit, der gælder i slippunktet, og hvor der vil være vandret tangenthældning.

5.1.7 Ikke-isoterme, begrænsede stråler

En ikke-isoterm stråle vil ligesom en isoterm stråle blive bremset, når strålen udfylder en vis del af rumtværsnittet, og den tvinges til at vende om, når en endnu større del er udfyldt.

5.1.7.1 *Hastigheder, banekurver, temperaturdifferenser og klæbelængder*
 Gritlin (1970) anvender den samme korrektionsfaktor K_B (se figur 5.9) for både isoterme og ikke-isoterme stråler. Det giver de korrektioner på hastigheder, banekurver, temperaturdifferenser og klæbelængder som er vist i tabel 5.4.

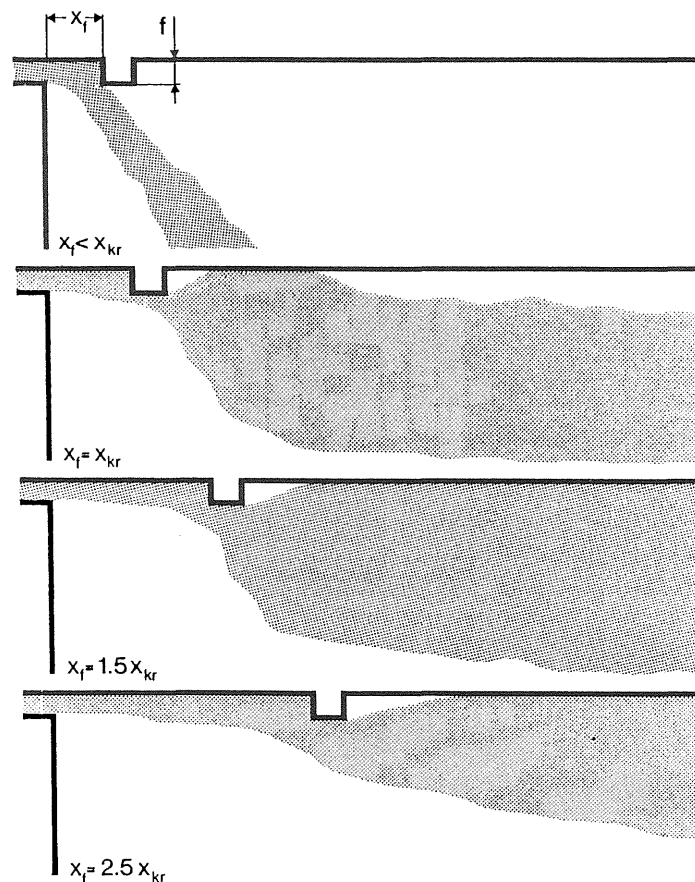
5.1.7.2 *Indtrængningslængder og returhastigheder*

Der er ikke fundet oplysninger over indtrængningslængderne i dybe rum defineret som den strækning strålen når ind, før den vender. Men da stråletværsnittet er omtrentlig uafhængig af, om strålen er isoterm eller ikke-isoterm, vil strålens udfyldning af rumtværsnittet ligeledes være det for tangenthældninger op til 30-35°. Under disse forhold vil man da kunne anvende de indtrængningslængder der er fundet for isoterme stråler. Dette bekræftes delvis af nogle modelforsøg udført af Schwenke (1975) med plane ikke-isoterme vægstråler, hvor han finder at strålen maksimalt når 3H ind i rummet, før den vender på samme måde som vist på figur 5.10.

Der er heller ikke fundet oplysninger om lufthastighederne i returstrømmen, men det må antages at man i en vis udstrækning kan anvende de fundne returhastigheder for isoterme stråler.

5.1.8 **Isoterme stråler og loftsforhindringer**

Hvis en isoterm vægstråle møder en forhindring under loftet, fx en loftsbjælke eller et lysarmatur, kan der ske følgende som vist på figur 5.17:



Figur 5.17. Forløb af stråle, der møder en forhindring i forskellige afstande fra indblæsningsåbningen (Nielsen, 1981).

1. Strålen afbøjes og fortsætter ned i opholdszonen, hvis afstanden mellem forhindring og indblæsningsåbning er mindre end en vis kritisk værdi x_{kr} .
2. Strålen afbøjes, men vender tilbage til loftsfladen lidt længere fremme, hvis afstanden til forhindringen er større end x_{kr} .
3. Strålen vil passere forhindringen uden at blive væsentligt påvirket, hvis afstanden til forhindringen er et passende antal gange større end x_{kr} .

Den kritiske afstand afhænger af forholdet mellem forhindringens og indblæsningsåbningens størrelse. Desuden kan rumstørrelsen spille ind.

5.1.8.1 Kritiske afstande og højder

For **cirkulære vægstråler** er sammenhængen mellem kritiske afstande og forhindringens højde undersøgt af bl.a. Schwenke (1975) og Nielsen et al (1987). Ud fra deres resultater kan man opstille følgende omtrentlige sammenhæng:

$$f_{kr} \sim 0,5 d_k + 0,04 x_f \quad \text{for} \quad d_k/H \sim 0$$

$$f_{kr} < 1,3 d_k \quad \text{for} \quad d_k/H > 0,04$$

For **plane vægstråler** er der udført undersøgelser af bl.a. Holmes og Sachariewicz (1973), Schwenke (1975) og Nielsen (1983), og ud fra deres resultater kan der opstilles følgende omtrentlige sammenhæng:

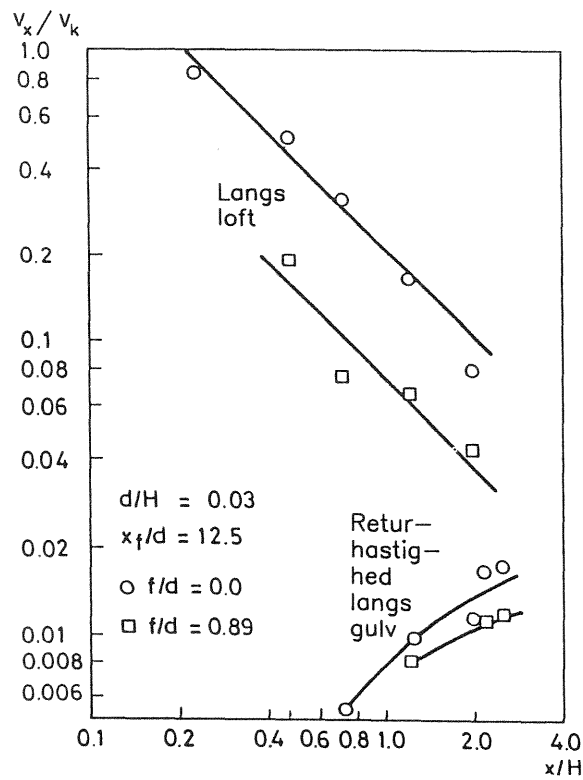
$$f_{kr} < 0,2 h_k + 0,03 x_f \quad \text{for} \quad h_k/H \sim 0$$

$$f_{kr} < 2 h_k \quad \text{for} \quad h_k/H > 0,01$$

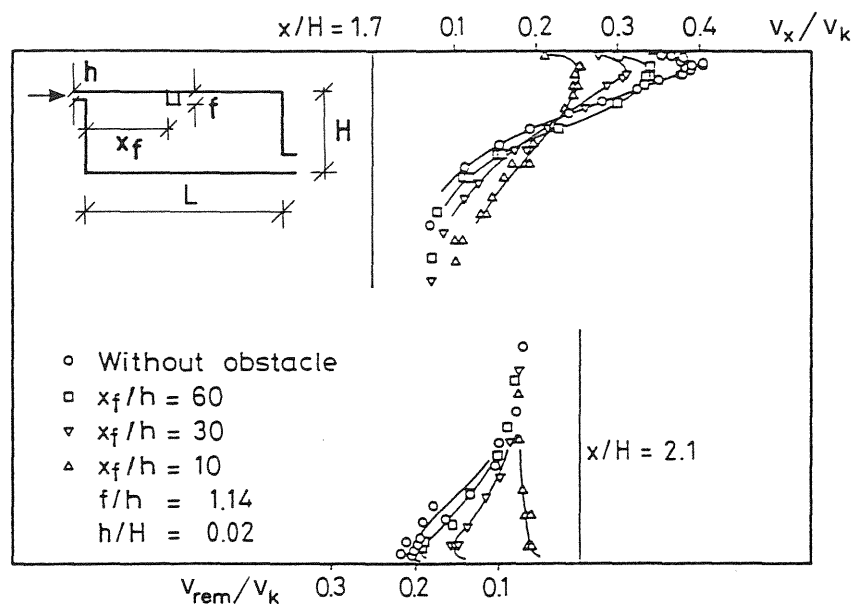
5.1.8.2 Hastigheder og indtrængningslængder

Centralhastigheden reduceres brat efter en forhindring. Reduktion er undersøgt for en række specielle tilfælde af Holmes og Sachariewicz (1973), Nielsen (1983) og Nielsen et al (1987). Eksempler er vist på figur 5.18 og 5.19 for henholdsvis en cirkulær og en plan vægstråle.

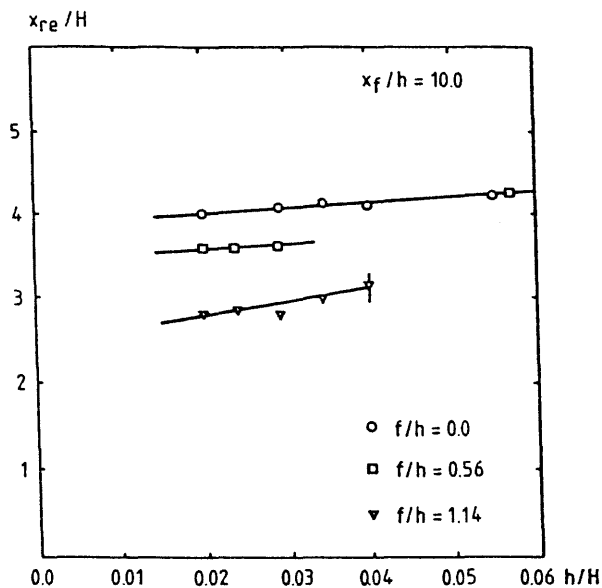
I de to sidstnævnte referencer er der også resultater for reduktion i returstrømmens hastighed, jvf. figur 5.18 og 5.19. Desuden har de begge undersøgt reduktionen af strålens indtrængningslængde. På figur 5.20 er vist resultaterne for en plan stråle.



Figur 5.18. En forhindrings indflydelse på en aksesymmetrisk stråles centralhastighed efter forhindringen og på dens returhastighed langs gulv (Nielsen et al., 1987).



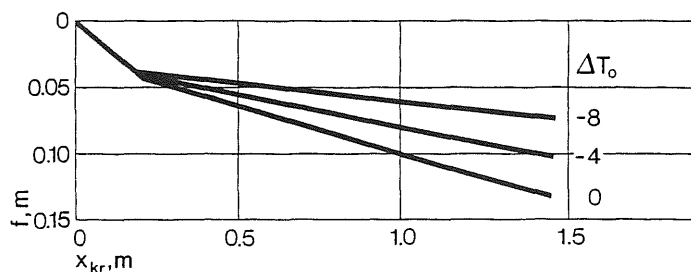
Figur 5.19. Hastighedsprofiler dels for plan stråle efter en forhindring målt for $x/H = 1,7$, dels for strålens returhastighed langs gulv målt for $x/H = 2,1$. Spalteåbningens og forhindringens højde var henholdsvis $h = 0,02 H$ og $f = 0,023 H$, hvor igen $H = 1/3 L$ (Nielsen, 1983).



Figur 5.20. Indtrængningsdybder for en plan vægstråle i afhængighed af strålens og forhindringens dimensioner når $x_f/h = 10,0$ (Nielsen, 1983).

5.1.9 Ikke-isoterme stråler og loftsforhindringer

Loftsforhindringers indflydelse på ikke-isoterme strålers videre forløb er undersøgt for plane stråler af bl.a. Holmes og Sachariewicz (1973) og Söllner og Klinkenberg (1972). Førstnævnte fandt ingen særlige udslag for ikke-isoterme forhold, og det kan skyldes at deres forhindring var anbragt ca. $60 \times$ spaltehøjden fra åbningen, og hvor temperaturdifferensen mellem stråle og omgivelser vil være reduceret kraftigt. Sidstnævnte fandt det på figur 5.21 viste sammenhæng mellem forhindringshøjde, kritisk afstand og temperaturdifferens for en såkaldt spaltediffusor anbragt i loftsfladen.



Figur 5.21. Sammenhæng mellem en forhindrings højde og dens kritiske afstand til indblæsningsåbningen med indblæsningsluftens undertemperatur som parameter. Indblæsningsåbningen var en såkaldt spaltediffusor anbragt i loftsfladen (Nielsen, 1981).

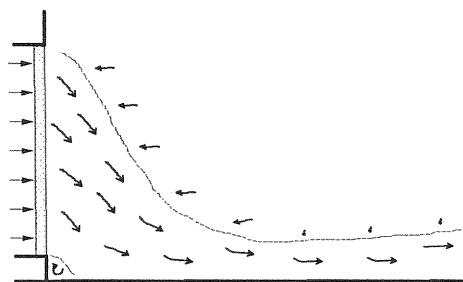
5.2 Fortrængningsventilation

Fortrængningsventilation er karakteristisk ved, at:

- indblæsningsåbningerne er placeret i gulvhøjde enten i selve gulvet, i væggene eller i fritstående armaturer.
- indblæsningshastigheden er lille, ca. $0,1 m/s$ (man taler om lavimpulsventiler)
- konvektionen i forbindelse med varmekilder giver en opadrettet luftstrøm, der fører den forurenede luft op mod loftet til udsugningsåbninger anbragt i eller lige under loftet.

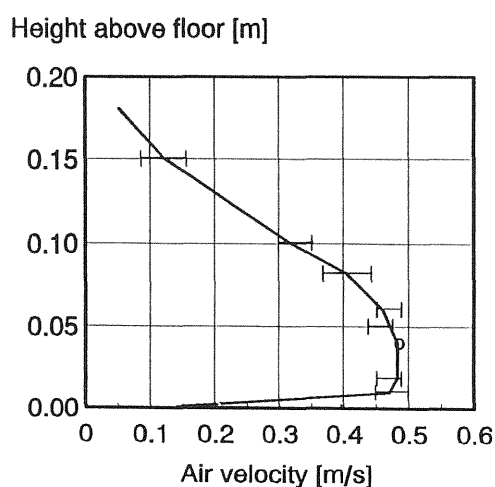
5.2.1. Lufthastigheder

Det videre strømningsforløb efter indblæsningsarmaturet afhænger af armaturets udformning, og det vil igen sige om det er udformet, så der medrives (eller induceres) lidt eller megen rumluft ved åbningsfladen.



Figur 5.22. Strømning gennem indblæsningsarmatur med filtermåtte. Der medrives ikke luft under selve udstrømningen, dvs. ingen induktion af rumluft (Skistad, 1994).

På figur 5.22 er vist udstrømningen fra et indblæsningsarmatur med filtermåtte, og hvor der ikke sker nogen nedrivning af rumluft. Den del af den kolde luft, der strømmer ud gennem armaturets øverste del, vil falde ned mod gulvet og vil give lufthastigheder i gulvniveau, der er større end selve indblæsningshastigheden. Lufthastigheden vil være størst lige over gulv i en afstand af ca. 0,3-0,8 m fra indblæsningsåbningen, som vist på figur 5.23.

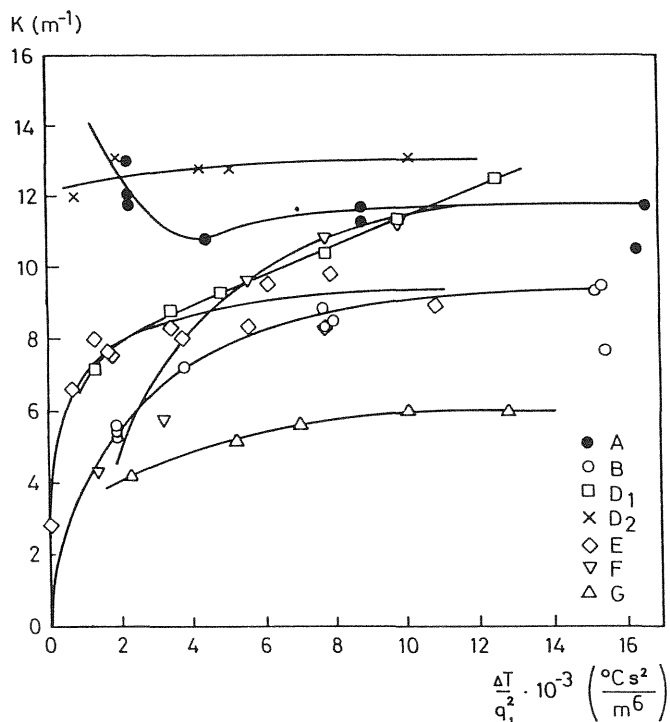


Figur 5.23. Hastighedsprofil målt 0,8 m foran indblæsningsarmaturet vist på figur 5.22 (Skistad, 1994).

Nielsen (1992) angiver følgende hastighedstryk for lufthastigheden langs gulv fra et enkelt, lodretstående indblæsningsarmatur og gældende for x større end ca. 1,0-1,5 m:

$$\frac{v_x}{q_1} = K \frac{1}{x} \quad (5.31)$$

hvor q_1 er den indstrømmende luftmængde i m^3/s . For forskellige armaturtyper kan K -værdien for strømningens midterplan fås af figur 5.24 i afhængighed af $\Delta T/q_1^2$.



Figur 5.24. Hastighedskonstanten K i formel (5.31) bestemt ud fra hastighedsmålinger på forskellige fortrængningsarmaturer (Nielsen, 1992).

Hvis flere armaturer er opstillet langs en væg, fås et stykke henne en såkaldt plan strømning langs gulvet, og for en sådan angiver Nielsen (1993) følgende hastighedsudtryk for x større end ca. 2 m:

$$\frac{v_x}{v_1} = \text{konstant} \quad (5.32)$$

hvor v_1 er indblæsningshastigheden, og hvor konstantens værdi ligger i området 1,1-1,4 for Archimedes-tallet liggende i området 3-30.

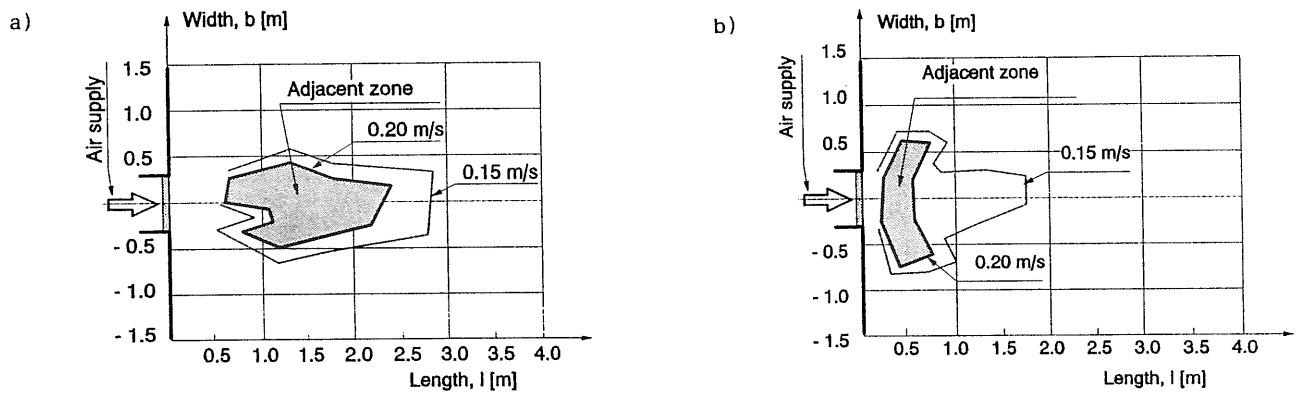
5.2.2 Nærzone

Ved fortrængningsanlæg anvender man ikke en kaste- eller indtrængningslængde som udgangspunkt for en dimensionering, men derimod begrebet nærzone. Ved nærzonen forstås det område efter en indblæsningsåbning, hvor lufthastigheden overstiger en vis værdi i en vis højde. Denne værdi er ofte 0,2 m/s målt i 100 mm's højde (ankelhøjde). Såkaldte nærzonekort er vist på figur 5.25 a og b.

5.2.3 Temperaturforhold

Medrivningen af rumluft også efter indblæsningsarmaturet vil bevirke at temperaturdifferencen mellem rumluften og den indblæste luft vil aftage under strømningsforløbet.

Den opadstigende varme luft vil resultere i en temperaturlagdeling med en gradient, der varierer med varmebelastningen og armaturtypen. Med kraftig varmebelastning fra koncentrerede varmekilder kan gradienten i en vis højde blive så stor at det får karakter af et temperaturspring.



Figur 5.25. Nærzonekort for henholdsvis et almindeligt lavimpulsarmatur og et armatur med sidespredning. I begge tilfælde er middelindblæsningshastigheden på 0,1 m/s og udetemperaturen på 3 °C (Skistad, 1994).

5.3 Kuldenedfald

Der vil altid opstå en luftstrømning langs lodrette flader i et rum, hvor fladens temperatur er forskellig fra rumluftens. Langs en kold flade vil rumluften blive afkølet og vil strømme nedad. Strømningen begynder ved den kolde flades overkant, og den finder sted i et grænselag langs fladen. Strømningen skifter retning nede ved gulvet og begynder at strømme ind i rummet langs gulvet, hvilket kan skabe trækproblemer i opholdszonen.

5.3.1 Forhold langs kolde flader

Strømningen vil på det første stykke af den kolde flade være laminar. Hvis den kolde flade er høj nok eller temperaturdifferencen mellem rumluft og flade er stor nok, slår strømningen over i at blive turbulent.

Der kan udledes teoretiske udtryk for hastigheder, temperaturer og grænselagstykkelse i såvel den laminare som den turbulente del, og herudfra kan man så videre beregne volumen- og bevægelsesmængdestrømme samt kølevirkning (bl.a. Eckert og Drake, 1959, og Eckert og Jackson, 1951). Sammenholdes de teoretiske værdier med målte, finder man bl.a., at de målte hastigheder er ca. 80 pct. af de teoretiske i det laminare område og ca. 70 pct. i det turbulente område. Dette fører til de formeludtryk for praktisk brug, som er angivet i tabel 5.5.

Tabel 5.5. Formeludtryk for forholdene langs kolde flader til brug i praksis. Her er x afstanden fra den kolde flades overkant, Δt_f er forskellen mellem rumluftens og fladens temperatur og b er fladens bredde (Andersen, 1995b).

	Laminar strømning		Turbulent strømning	
	teoretisk koff.	praktisk udtryk	teoretisk koff.	praktisk udtryk
Hastighed, m/s	0,11	$0,09(x\Delta t_f)^{1/2}$	0,10	$0,07(x\Delta t_f)^{1/2}$
Grænselagstykkelse, m	0,048	$0,048(x/\Delta t_f)^{1/4}$	0,11	$0,11 x^{0,7} \Delta t_f^{-0,1}$
Volumenstrøm, m ³ /s	0,0030	$0,0024 x^{3/4} \Delta t_f^{1/4} b$	0,0030	$0,0021 x^{1,2} \Delta t_f^{0,4} b$
Bevægelsesmængdestrøm, N	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-4} x^{5/4} \Delta t_f^{3/4} b$	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4} x^{1,7} \Delta t_f^{0,9} b$
Kølevirkning, W	1,44	$1,2 x^{3/4} \Delta t_f^{5/4} b$	0,91	$0,64 x^{1,2} \Delta t_f^{1,4} b$

5.3.2 Forhold efter den kolde flade

Strømningen vil fortsætte ned langs et eventuelt stykke lodret væg under den kolde flade (fx en brystning under et vindue). Er dette stykke højt nok, vil strømningshastigheden først holde sig nogenlunde konstant, før der sker en opbremsning i hjørneområdet, hvor strømningen skifter retning og derefter atter accelereres op på det første stykke langs gulvet (Lilja, 1966, og Heiselberg, 1993).

Strømningen langs gulvet vil have et hastighedsprofil, der minder meget om profilet for en vægstråle, hvor hastigheden er størst tæt ved den faste flade. Der må skelnes mellem et todimensionalt og et tredimensionalt tilfælde. Det todimensionale tilfælde optræder når den kolde flade har omtrentlig samme bredde som gulvfladen eller der er tætsiddende vinduer i hele vægfladens udstrækning. Det tredimensionale tilfælde optræder når den kolde flade er smal i forhold til gulvbredden.

Det todimensionale tilfælde er undersøgt af Lilja (1966) og af Heiselberg (1994) og der er god overensstemmelse mellem deres resultater. Heiselberg angiver på basis af sine målinger følgende udtryk for maksimalhastigheden langs gulvet:

$$v_x = 0,055 (h \Delta t_f)^{1/2} \quad \text{for } x < 0,4 \text{ m} \quad (5.33)$$

$$v_x = \frac{0,095 (h \Delta t_f)^{1/2}}{x+1,3} \quad \text{for } 0,4 \leq x \leq 2,0 \text{ m} \quad (5.34)$$

$$v_x = 0,030 (h \Delta t_f)^{1/2} \quad \text{for } x > 2,0 \text{ m} \quad (5.35)$$

hvor Δt_f er forskellen mellem rumluftens og den kolde flades temperatur, h er fladens højde og x er dens vandrette afstand langs gulv.

Det tredimensionale tilfælde er undersøgt af Shillinglaw (1977) og af Heiselberg (1994). Heiselberg har målt over den største strækning, og han angiver ud fra sine måleresultater følgende udtryk for maksimalhastighederne:

$$v_x = 0,055 (h \Delta t_f)^{1/2} \quad \text{for } x < 0,4 \text{ m} \quad (5.36)$$

$$v_x = \frac{0,13 (h \Delta t_f)^{1/2}}{x+2,0} \quad \text{for } x \geq 0,4 \text{ m} \quad (5.37)$$

Temperaturmæssigt kan der if. Heiselberg (1994) regnes med følgende største temperaturdifferens mellem rumluft og strømning både i det to- og det tredimensionale tilfælde:

$$\Delta t_{max} = (0,30 - 0,035x) \Delta t_f \quad (5.38)$$

5.4 Diskussion

Gennemgangen af de eksisterende formler for stråleventilation viser, at der er områder, hvor:

- forholdene er godt belyst
- forholdene er usikkert belyst
- der mangler oplysninger.

En opgørelse heraf er vist i tabel 5.6 og 5.7.

Forholdene er godt belyst for frie stråler i rum, hvor strålerne ikke begrænses. Der er dog en række detailforhold der kræver en bearbejdning eller afklaring. Det drejer sig blandt andet om:

- hastighedskonstanterne i formlerne for centralhastighederne
- konstanterne i udtrykkene for temperaturforløbet i strålens centralakse ved ikke-isoterme stråler
- grænseværdier for de åbningsafstande til loft, der medfører en Coanda-effekt
- bevægelsesmængdetab som følge af Coanda-effekten.

For stråler i begrænsede rum er kun cirkulære fristråler godt belyst.

De usikkert belyste områder vedrører især forholdene i plane, isoterme og ikke-isoterme stråler i begrænsede rum. Det vil blandt andet sige:

- reduktionsfaktorer for centralhastigheden i selve stråledelen, når man vælger de frie stråler som udgangspunkt for et formelsæt
- faktorer til bestemmelse af returhastigheder langs gulv
- klæbelængder for vægstråler
- temperaturforholdene i strålens centralakse
- centralhastigheder, indtrængningslængder og returhastigheder i forbindelse med loftsforhindringer.

Endelig er der en række områder, som er for dårligt eller slet ikke belyst. Det drejer sig blandt andet om ikke-isoterme vægstråler, hvor der mangler oplysninger om:

- strålernes banekurver efter at den har sluppet loftet
- returhastighederne
- temperaturforholdene i returdelene.

Desuden savnes der oplysninger om:

- en lang række forhold i forbindelse med loftsforhindringer og ikke-isoterme stråler
- det samme for nedhængte forhindringer samt gulvplacerede forhindringer.

For fortrængningsventilationens vedkommende er forholdene rimeligt godt belyst. Dog savnes et mere generelt formelsæt til projekteringsformål, hvor man ud fra armaturets induktions- og spredningsegenskaber sammen med indblæsningsluftens hastighed og temperatur kan fastlægge strømningforholdene langs gulvet.

Endelig er forholdene omkring kuldenedfald fra kolde flader godt belyst. Der er dog visse usikkerheder i forbindelse med de indgående konstanter, som bør afklares nærmere.

Sammenfattende vurderes det, at det i vid omfang er muligt at bestemme luftstrømningforholdene i opholdszonen ved brug af den eksisterende viden. Der er dog en række forhold, hvor der er behov for en nærmere afklaring for dels at øge beregnings sikkerheden, dels at udvide det område, der kan gøres til genstand for beregninger.

Tabel 5.6. Vurdering af formeludtryk for frie stråler og strømninger.

	Fristråler				Vægstråler				
	cirkulære	rektangulære	plane	sammensatte	cirkulære	rektangulære	plane	sammensatte	Coanda-effekt
<i>Isoterme forhold</i>									
1. Centralhastighed	x	x	x	(x)	x	(x)	x	(x)	(x)
2. Kastelængde	x	x	x	(x)	x	(x)	x	(x)	(x)
3. Indtrængningslængde									
4. Returhastighed i dybe rum									
5. Returhastighed i korte rum									
<i>Ikke-isoterme forhold</i>									
6. Banekurve	x	x	x	(x)	o	o	o	o	o
7. Centralhastighed, vandret	x	x	x	(x)	x	x	x	(x)	(x)
8. Centralhastighed, lodret	x	x	x	(x)	o	o	o	o	o
9. Kastelængde	x	x	x	(x)	o	o	o	o	o
10. Klæbelængde					x	x	x	(x)	(x)
11. Indtrængningslængde									
12. Returhastighed i dybe rum									
13. Returhastighed i korte rum									
14. Temperatur i stråledel	x	x	x	(x)	x	x	x	(x)	(x)
15. Temperatur i returdel									
<i>Loftsforhindringer, Isoterme forhold</i>									
16. Kritiske højder og afstande					x	x	x	(x)	o
17. Hastighed efter forhindring					(x)	(x)	(x)	(x)	o
18. Indtrængningslængde					(x)	(x)	(x)	(x)	o
19. Returhastighed i dybe rum					(x)	(x)	(x)	(x)	o
20. Returhastighed i korte rum					o	o	o	o	o
<i>Loftsforhindringer, Ikke-isoterme forhold</i>									
21. Kritiske højder og afstande					o	o	(x)	o	o
<i>Kuldenedfald</i>									
22. Centralhastighed langs flade							x		
23. Centralhastighed langs gulv							x		
24. Temperaturforhold							x		
<i>Fortrængningsventilation</i>									
25. Lufthastighed langs gulv						x	x	x	
26. Lufttemperatur langs gulv						x	x	x	
27. Temperaturstatificering						x	x	x	

x: godt belyst (x): usikkert belyst o: ikke belyst intet anført: uaktuelt

Tabel 5.7. Vurdering af formeludtryk for begrænsede stråler og strømninger.

	Fristråle				Vægstråler				Coanda-effekt
	cirkulære	rektangulære	plane	sammensatte	cirkulære	rektangulære	plane	sammensatte	
<i>Isoterme forhold</i>									
1. Centralhastighed	x	(x)	(x)	(x)	x	(x)	(x)	(x)	(x)
2. Kastelængde	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)
3. Indtrængningslængde	x	x	o	o	x	x	(x)	(x)	(x)
4. Returnhastighed i dybe rum	x	x	(x)	(x)	x	x	(x)	(x)	(x)
5. Returnhastighed i korte rum	o	o	o	o	(x)	(x)	x	(x)	(x)
<i>Ikke-isoterme forhold</i>									
6. Banekurve	x	(x)	(x)	(x)	o	o	o	o	o
7. Centralhastighed, vandret	x	(x)	(x)	(x)	x	(x)	(x)	(x)	(x)
8. Centralhastighed, lodret	x	(x)	(x)	(x)	o	o	o	o	o
9. Kastelængde	x	(x)	(x)	(x)	o	o	o	o	o
10. Klæbelængde					(x)	(x)	(x)	(x)	(x)
11. Indtrængningslængde	o	o	(x)	o	o	o	(x)	o	o
12. Returnhastighed i dybe rum	o	o	o	o	o	o	o	o	o
13. Returnhastighed i korte rum	o	o	o	o	o	o	o	o	o
14. Temperatur i stråledel	x	(x)	(x)	(x)	x	(x)	(x)	(x)	(x)
15. Temperatur i returdel	o	o	o	o	o	o	o	o	o
<i>Loftsforhindringer, Isoterme forhold</i>									
16. Kritiske højder og afstande					x	x	x	(x)	o
17. Hastighed efter forhindring					(x)	(x)	(x)	(x)	o
18. Indtrængningslængde					(x)	(x)	(x)	(x)	o
19. Returnhastighed i dybe rum					(x)	(x)	(x)	(x)	o
20. Returnhastighed i korte rum					o	o	o	o	o
<i>Loftsforhindringer, Ikke-isoterme forhold</i>									
21. Kritiske højder og afstande					o	o	(x)	o	o
<i>Kuldedælfald</i>									
22. Centralhastighed langs flade							x		
23. Centralhastighed langs gulv							x		
24. Temperaturforhold							x		
<i>Fortrængningsventilation</i>									
25. Lufthastighed langs gulv						x	x	x	
26. Lufttemperatur langs gulv						x	x	x	
27. Temperaturstatificering						x	x	x	

x: godt belyst (x): usikkert belyst o: ikke belyst intet anført: uaktuelt

5.5 Referencer

Andersen, K.T.: Beregning af luftstråler og returstrømme i rum. Statens Byggeforskningsinstitut, SBI-rapport 248, Hørsholm, 1995a.

Andersen, K.T.: Kuldenedfald fra kolde flader. SBI-meddelelse 112. Hørsholm, 1995b.

Becher, P.: Varme og ventilation 3. Teknisk Forlag, København, 1972.

Eckert, E. R. G. og Jackson, T. W.: Analysis of turbulent free-convection boundary layer on flat plate. National Advisory Committee for Aeronautics, Report 1015. Cleveland, Ohio, 1951.

Eckert, E. R. G. og Drake, R. M.: Heat and Mass Transfer. McGraw-Hill, 1959.

Grimtlin, M.: Zuluftverteilung in Räumen. Luft und Kältetechnik, nr. 5, 1970.

Heiselberg, P.: Aalborg Universitet, Personlig kontakt, 1993.

Heiselberg, P.: Stratified flow in rooms with cold vertical walls. ASHRAE winter meeting, New Orleans, 1994.

Hestad, T.: En dimensjoneringsmetode for tilluftsorganer baseret på teori, fullskalaforsøk og praktisk erfaring. Tekniska Meddelandet nr. 83, Institutionen för Uppvärmnings- och ventilationsteknik, KTH, Stockholm, 1975.

Hestad, T.: Dimensjonering av innblåsningsventiler, kaldluft-nedfall. Norsk VVS, nr. 6, 1976.

Holmes, M. J. og Sachariewicz, E.: The effect of ceiling beams and light fittings on ventilating jets. Laboratory report No. 79, HVRA, 1973.

Koestel, A.: Paths of horizontally projected heated and chilled air jets. ASHRAE Transactions, 1955.

Krause, D.: Freistrahlen bei der Sonderbewetterung. Neue Bergbautechnik, 2.Jg, Heft 1, Januar 1972.

Lilja, G.: Kallras - inte så farligt som det låter. Svensk VVS, Stockholm, hefte 9, side 499-506, 1966.

Nielsen, P. V.: Flow in air conditioned rooms (engelsk oversættelse af licentiatafhandling fra DTH 1974). Danfoss, 1976.

Nielsen, P. V.: Luftstrømning i ventilerede arbejdslokaler. Statens Byggeforskningsinstitut, SBI-rapport 128. 1981.

- Nielsen, P. V.: Air diffusion in rooms with ceiling-mounted obstacles and two dimensional isothermal flow. 16th International Congress of Refrigeration, Paris 1983.
- Nielsen, P. V.: Luftfordeling i rum. DANVAK Grundhåndbog for Varme- og Klimateknik, 1988.
- Nielsen, P. V.: Velocity Distribution in the Flow from a Wall-Mounted Diffuser in Rooms with Displacement Ventilation, Proc. of the Third International Conference on Air Distribution in Rooms, ROOMVENT '92, Aalborg, 1992.
- Nielsen, P. V.: Displacement Ventilation - Theory and Design. Aalborg Universitetscenter. 1993.
- Nielsen, P. V., Evensen, L., Grabau, P. og Thulesen-Dahl, J. H.: Air distribution in rooms with ceiling-mounted obstacles and three-dimensional isothermal flow. Room Vent 87, International conference on air distribution in ventilated spaces, Stockholm, 1987.
- Nielsen, P. V. and Möller, Å. T. A.: Measurements on Buoyant Jet Flows from a Ceiling-mounted Slot Diffusor. Aalborg University Centre, Dept. of Indoor Environmental Technology. Publ. no. 6, 1988.
- Regenscheit, B: Die Berechnung von radial strömenden Frei- und Wandstrahlen, sowie von Rechteckstrahlen. Gesundheitsingenieur, 1971, Heft 7, p. 193-201.
- Schwenke, H.: Über das Verhalten ebener horizontaler Zuluftstrahlen im begrenzten Raum. Luft und Kältetechnik 1975/5, p. 241-245.
- Shillinglaw, J. A.: Cold window surfaces and discomfort, BSE vol. 45, side 43-51, 1977.
- Skistad, H.: Displacement Ventilation. Research Studies Press Ltd., Taunton, England, 1994.
- Skåret, E.: Luftbevegelse i ventilerte rom. Institutt for varme-, ventilasjons- og sanitærteknikk, NTH, Tapir, Trondheim, 1976.
- Stampe, O. B.: Glent Ventilation. Glent og Co. A/S, Hvidovre, 1982.
- Söllner, G. og Klinkenberg, K.: Leuchten als Störkörper im Luftstrom. Heizung, Lüftung/Klimatechnik, Haustechnik, 23, nr. 4, 1972.

6 Bygningsbesøg

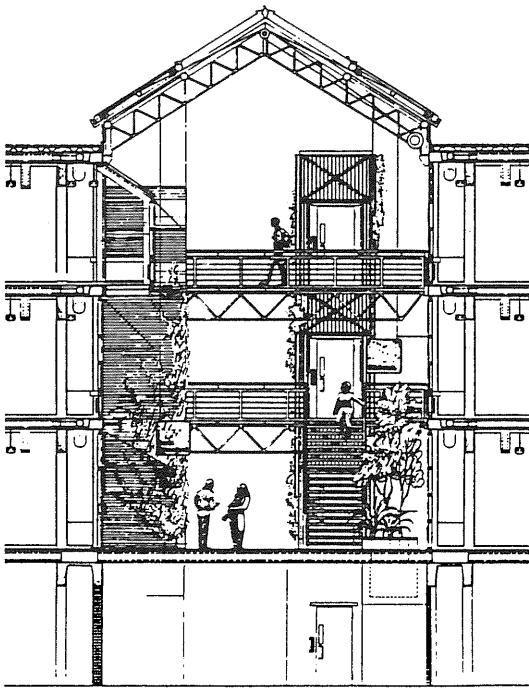
Den gennemførte studietur til 8 skandinaviske glasbygninger havde til formål at få belyst dels de klimamæssige problemer i sådanne bygninger, dels de beregningsmetoder, der var blevet anvendt ved projekteringen.

6.1 Trondheim Universitetet, Dragvoll

Trondheim Universitetet på Dragvoll blev taget i brug i 1970. De glasoverdækkede gadearealer er på ca. 1600 m², og et snit er vist på figur 6.1.

De overdækkede gader er godt 8 m brede, og den indvendige højde er ca. 16 m. Glasoverdækningen er almindelig 2-lags glas båret af en stålkonstruktion. Facaderne mod gaderne er alle udført som en isoleret, let konstruktion beklædt med perforerede aluminiumsplader og med 1-lags glas i vinduerne. Der er murede trappetårne i gaderne, og gadebelægningen er keramikfliser. Ca 40 pct. af glasarealet kan skydes til side og tilfredsstiller da kravene til brandventilation.

Rummene ud mod glasgaderne kan beskyttes mod direkte sollys ved hjælp af bevægelige markiser.



Figur 6.1. Snit i glasoverdækket gade på Trondheim Universitet, Dragvoll (Sigsgård, 1985).

6.1.1 Klimaanlæg

Der er ikke lavet noget egentligt klimaanlæg i tilknytning til glasgaderne. Der tilføres varme dels gennem transmissionsvarmetabet fra de tilstødende rum, dels som den del af rummenes returluft, der ikke recirkuleres. I de koldeste vinterperioder recirkuleres op mod 70 pct. af luften i lokalerne, og de resterende 30 pct. forsvinder ud i glasgaderne. Der er den sikkerhed på systemet, at når glasgadetemperaturen kommer under 8 °C, kører rumventilationsanlægget hele tiden. Formålet hermed er at sikre at glasgadetemperaturen ikke kommer under 5 °C.

Det er energimæssigt et meget uøkonomisk system, og derfor var man ved at installere radiatorer på glasgavlene og varmtvandsbaserede strålingspaneler et stykke over gadeniveauet. Med disse ændringer vil man kunne etablere varmegenvinding på al rumluften i kontorer og undervisningslokalerne. Desuden mindskedes risikoen for kuldenedfald ved gavlene.

6.1.2 Klimaforhold

Man ønsker om vinteren at opretholde en indetemperatur i glasgaden, der er 10-15 °C over udetemperaturen, dog mindst 5 °C af hensyn til beplantningen. Om sommeren åbner man i taget i de varmeste perioder. Der synes ikke at have været problemer med for høje temperaturer i sommerperioden.

6.1.3 Klimaberegninger og -målinger

Under projekteringen er der kun lavet håndberegninger af indeklimaforholdene. Der foreligger ingen registreringer af temperaturforholdene.

6.2 Hotel Royal Garden, Trondheim

Hotel Royal Garden blev bygget i årene 1982-1984. Der er tre glasoverdækkede gårdarealer på i alt ca. 1350 m², og et snit igennem et af dem er vist på figur 6.2. Glasgårdenes indvendige højde er ca. 22 m. Glasstrukturen er 2-lags energiglas i aluminiumsprofiler og båret af en stålkonstruktion. Ca. 30 pct. af glasarealet i taget kan åbnes, og der er desuden åbninger i glasgavlene.

Der er langsgående lameller udvendigt på restaurantens glasgavl (mod sydøst), og der er indvendige markiser i restauranten.

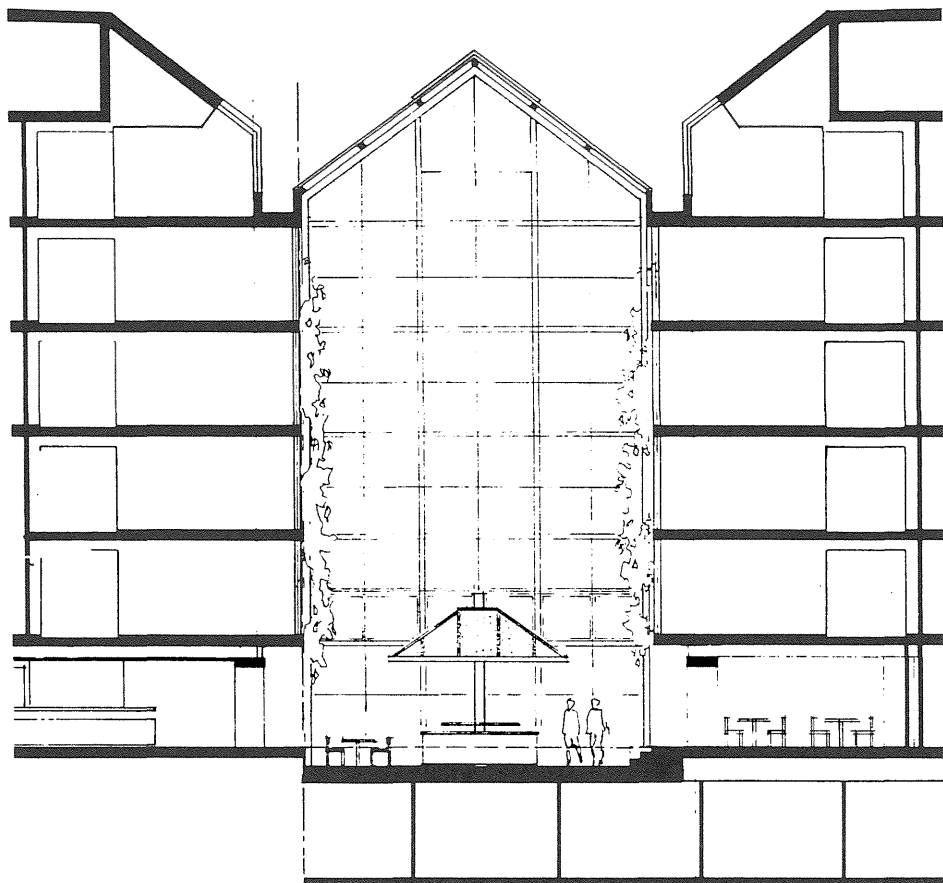
6.2.1 Klimaanlæg

Hotellet får ca. halvdelen af sit varmebehov dækket ved hjælp af et varmepumpeanlæg, som henter varmeenergien fra elven, der strømmer forbi lige udenfor. Desuden udnyttes solenergien fra glasgårdene i hotellets klimaanlæg.

Der er gulvvarme i glasgårdene, og desuden opvarmes de om vinteren ved hjælp af et fortrængningsventilationsanlæg med indblæsningsåbninger anbragt i opholdsniveau. Sommertemperaturen holdes nede ved at lugerne i tag og gavle åbnes automatisk.

6.2.2 Klimaforhold og klimaberegninger

Der tilstræbes en indetemperatur i glasgårdene på 18-20 °C om vinteren, og man kan om sommeren holde en temperatur nede i opholdszonen, der kun ligger en smule over udetemperaturen.



Figur 6.2. Snit i glasoverdækket gårdareal på Hotel Royal Garden, Trondheim (Sigsgård, 1985).

Under projekteringen blev der gennemført klimaberegninger ved hjælp af programmet ROYAL-DEBAC, som er en videreudvikling af det amerikanske DEBAC-program med særlig henblik på denne opgave. Man har specielt regnet på energiforholdene i forbindelse med varmepumpeanlægget og varmegenvindingen fra glasgårdene. Der er desuden beregnet lufttemperaturer i opholdszonen og oppe under glastaget, ligesom der er beregnet operative temperaturer i opholdszonen. ROYAL-DEBAC kan regne på en 2-zone model, men man må gætte sig til luftudvekslingen mellem de 2 zoner. Man fandt bl.a. at de operative temperaturer ville blive for høje i restauranten, og det resulterede i opsætningen af lamellerne på restaurationsgavlen samt af de indvendige markiser.

Kuldenedfald fra glasgavlene reduceres ved hjælp af en række konvektorer anbragt over hinanden med en indbyrdes, lodret afstand på godt 3 m. Konvektorerne er udformet som gangbroer, som man kan gå på i forbindelse med den indvendige rengøring af glasgavlene.

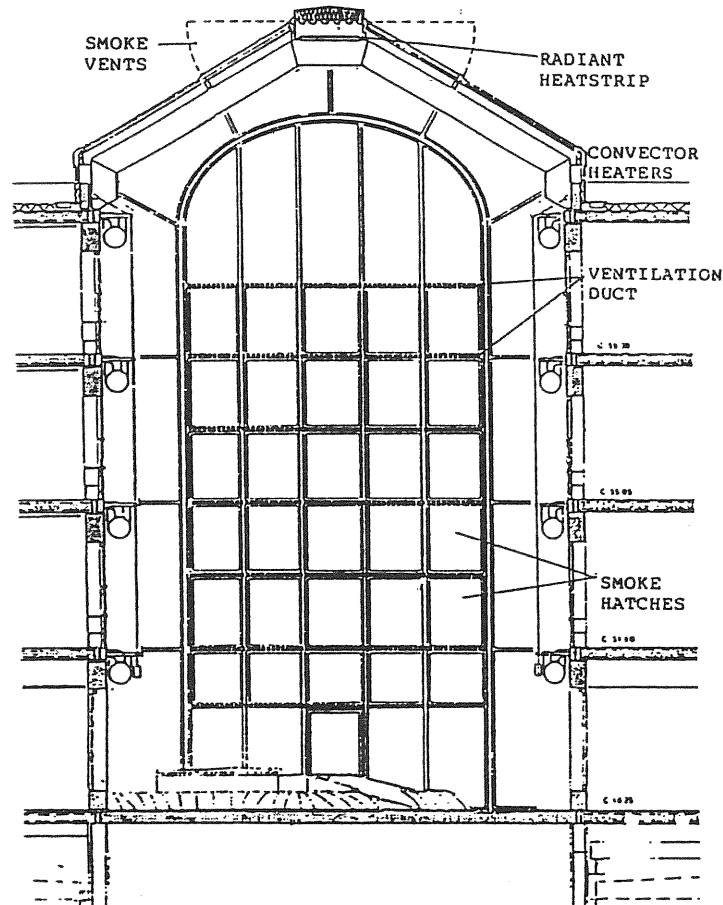
Der foreligger ingen tilgængelige måle- eller beregningsresultater af temperaturforholdene.

6.3 ELA-bygningen, NTH, Trondheim

I forbindelse med modernisering og udvidelse af elektroafdelingens laboratoriebygninger på Norges Tekniske Højskole i Trondheim overdækkede man 3 øst-vest-vendte gårde, der forbinder nybyggeriet

med det eksisterende bygningsanlæg, og en nord-syd-gående gade, der forbinder de ældre bygninger indbyrdes. Der er tale om et glasoverdækket areal på ca. 2000 m², der blev taget i brug i 1986. Et snit gennem en af gårdene er vist på figur 6.3. Den indvendige højde er godt 15 m.

I glastaget er der anvendt 2-lags energiglas båret af en stålkonstruktion. Ca. halvdelen af glasarealet kan åbnes og desuden er der åbningmuligheder i gavlene. I de nye bygninger har man kunnet spare på facaderne ind mod glasgårdene, da de er beskyttede mod vejrliget, og de består derfor kun af lette, isolerede elementer med 1-lags vinduer.



Figur 6.3. Snit i en af glasgårdene i ELA-bygningen, NTH, Trondheim (Aschehoug et al., 1990).

6.3.1 Klimaanlæg

Glasgårdene tilføres varme fra radiatorer anbragt langs gavlene, fra varmetabet gennem de tilstødende rums facader, samt fra luftudvekslingen med de tilstødende rum. Endelig er der strålingspaneler oppe under taget, men de anvendes kun, når der er meget koldt.

De tilstødende rum er mekanisk ventilerede med et ligetryksanlæg, og der er gættet på en infiltration til glasgården på 0,1 luftskifte i timen.

Sommerventilationen klares ved hjælp af lugerne i tag og gavle. Lugerne var oprindeligt manuelt styrede, men styringen fandt ikke altid sted når det var nødvendigt, og derfor fik man i de varmeste sommerperioder ofte klager fra brugerne af rummene ud mod glasgårdene. Der er nu installeret automatisk styring.

6.3.2 Klimaforhold

Der tilstræbtes oprindeligt en minimumstemperatur på 15 °C inde i glasgårdene. Denne temperatur er senere hævet til 18 °C som følge af øget brug af disse gårde på grund af et større studentertal.

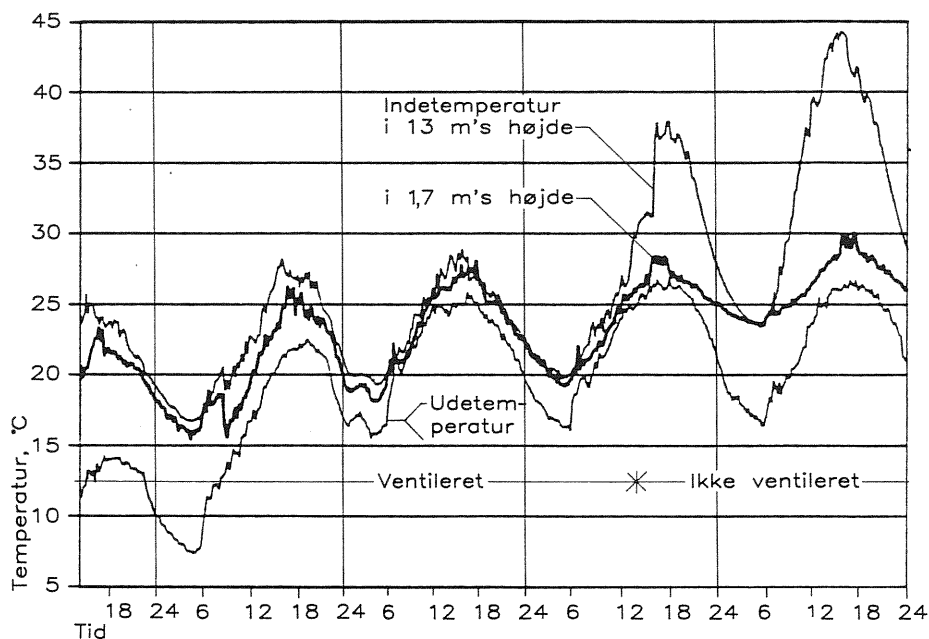
Der har ikke været problemer med at holde en rimelig sommerstemperatur, efter at styringen af lugerne i tag og gavle er blevet automatisk.

6.3.3 Klimamålinger

Der er gennemført omfattende målinger af energi- og temperaturforholdene. Specielt interessante er de temperaturmålinger, der blev foretaget i en uge hvor der var meget varmt hele ugen igennem (dvs. udetemperatur på 15 °C om natten og op til 24 °C om dagen og med klar himmel). Måleresultaterne fra denne periode viser:

- at med åbne luger i tag og gavl lå lufttemperaturen i opholdszonen højst et par grader over udetemperaturen, og den steg yderligere højst 1-2 °C, som vist på figur 6.4, når man nåede op i 13 m's højde, hvilket svarer til den øverste etage af de tilstødende lokaler.
- at disse temperaturer holdt sig nogenlunde konstante selv efter flere dages varmt vejr.
- at temperaturen steg et par grader i opholdszonen de efterfølgende par dage, hvor man lukkede for ventilationsåbningerne, medens den oppe i toppen af glasgårdene steg 10 °C på førstedagen og ca. 15 °C på andendagen, som vist på figur 6.4.

Der udførtes ligeledes sporgasmålinger med lukkede og åbne luger. Med lukkede luger fandt man et luftskifte på ca. 0,5. Med et åbent areal på 8 m² i gavle og i tag fandt man et luftskifte på ca. 4 gange i timen.



Figur 6.4. Indetemperaturkurve i henholdsvis 1,7 og 13 meters højde i en periode med solrigt vejr og næsten vindstille. Ventilationslugerne var åbne de første 3 dage, hvorefter de blev lukket (efter Jacobsen, 1989).

6.3.4 Klimaberegninger

Under selve projekteringen blev der gennemført edb-beregninger med programmet ROYAL-DEBAC. Der er siden foretaget beregninger med programmet TARP (Thermal Analysis Research Program) udviklet af National Bureau of Standards, USA. Man har fundet god overensstemmelse mellem målte og beregnede middeltemperaturer i de perioder af året, hvor temperaturgradienten op gennem bygningen ikke var for kraftig (fx om natten og i vinterperioderne). Den beregnede middeltemperatur om sommeren med lukkede luger, hvor der er stor temperaturforskel op gennem bygningen, lå derimod tæt på den målte temperatur i toppen.

Der er ligeledes foretaget omfattende simuleringer af energiforholdene og der er fundet god overensstemmelse mellem målte og beregnede energiforbrug.

6.4 Olavs Kvartalet, Trondheim

Der er tale om et nyt kulturhus med en kongres- og koncertsal, der er forbundet med et butikscenter ved hjælp af et glasoverdækket areal. Det blev indviet i 1990. Glasoverdækningen er udført med 2-lags energiglas.

6.4.1 Klimaanlæg

Om vinteren opvarmes centret delvis ved gulvvarme i nederste etage. Desuden er der en slags varmegenvinding, hvor man henter varm luft oppe fra toppen af bygningen, blander det op med frisk luft og fører det ned i stueplansniveau.

Sommerforholdene klares ved hjælp af naturlig ventilation med afgangsåbninger i tagfladen og tilgangsåbninger længere nede i glasfacaden.

Der var oprindeligt regnet med, at der skulle etableres en udvendig afskærmning for at sikre imod for høje temperaturer i de varmeste sommerperioder, og her var det især forholdene i kongressalens foyer på første sal, man var nervøse for. Men af økonomiske grunde blev denne afskærmning sløjft.

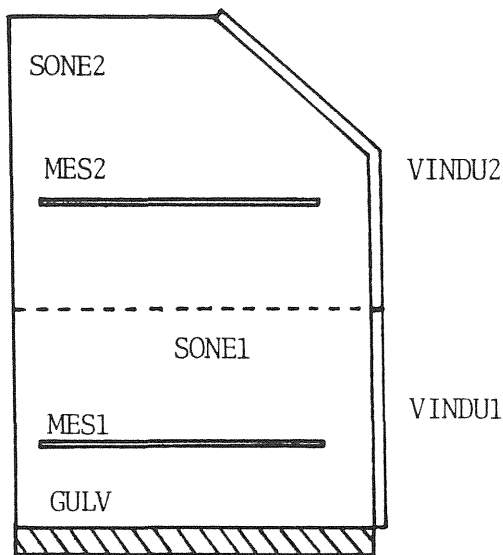
6.4.2 Klimaforhold

Ved projekteringen var klimaønskerne, at indetemperaturen i koncertsalens foyer på 1. sal ikke måtte overstige 25 °C i den varmeste sommerperiode, og om vinteren skulle der være 15-18 °C nede i butiksområdet.

6.4.3 Klimaberegninger og -målinger

I forbindelse med projekteringen blev SINTEF i Trondheim (Stiftelsen for industriel og teknisk forskning ved Norges tekniske Højskole) engageret af det rådgivende ingeniørfirma til at gennemregne nogle alternativer, der skulle vise hvordan man bedst kunne klare sommertemperaturerne i foyeren. Beregningerne blev gennemført ved brug af programmet ROYAL-DEBAC på en beregningsmodel, som vist på figur 6.5.

Der blev gennemført 3 simuleringer, hvor der blev regnet med 80 pct. udvendig afskærmning og hvor der blev regnet med henholdsvis køling,



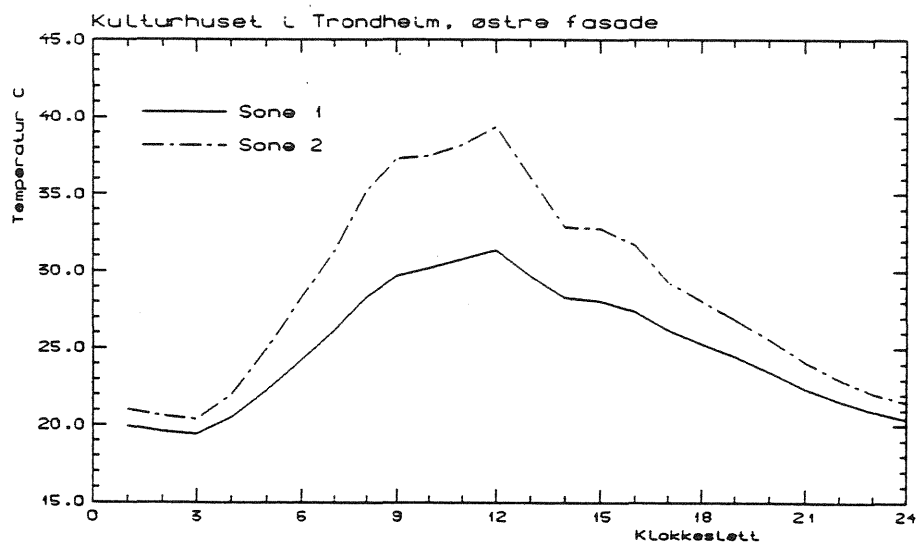
Figur 6.5. Beregningsmodel for glasoverdækkede arealer (Kolsager og Bryn, 1988).

ingen køling og ingen køling, men med ekstra ventilation af det glasoverdækkede areal. Endelig gennemførtes en fjerde simulering, hvor man udelod solafskærmningen.

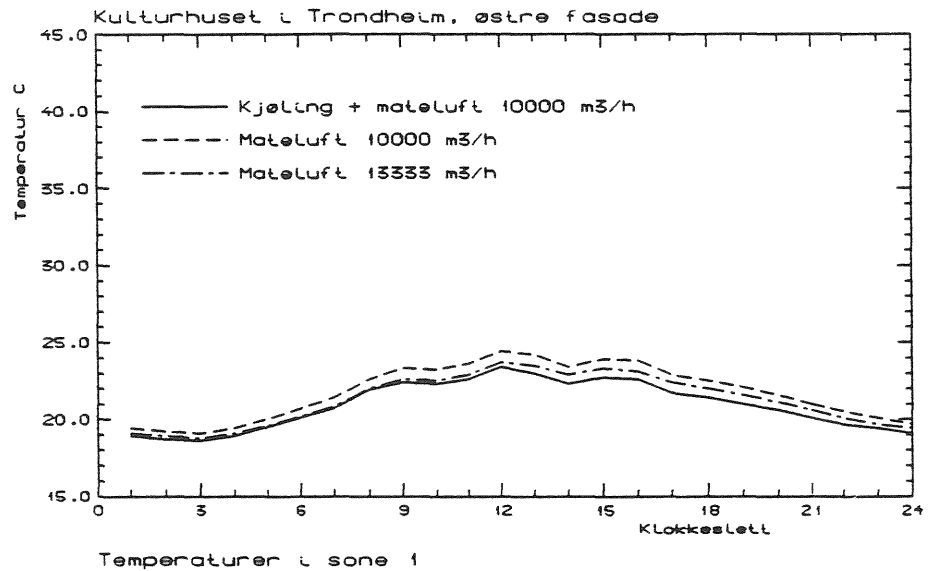
Ifølge edb-beregningerne ville solafskærmningen være en nødvendighed, jf. figur 6.6, mens den påtænkte køling ikke ville have nogen større effekt, jf. figurerne 6.7 og 6.8.

Der blev som sagt ikke etableret den nævnte solafskærmning, og det har hidtil ikke givet problemer, hvilket igen kan skyldes, at man endnu ikke har haft dagarrangementer i kongressalen i sommertiden. I stueetagen med forretningerne har der heller ikke været problemer om sommeren.

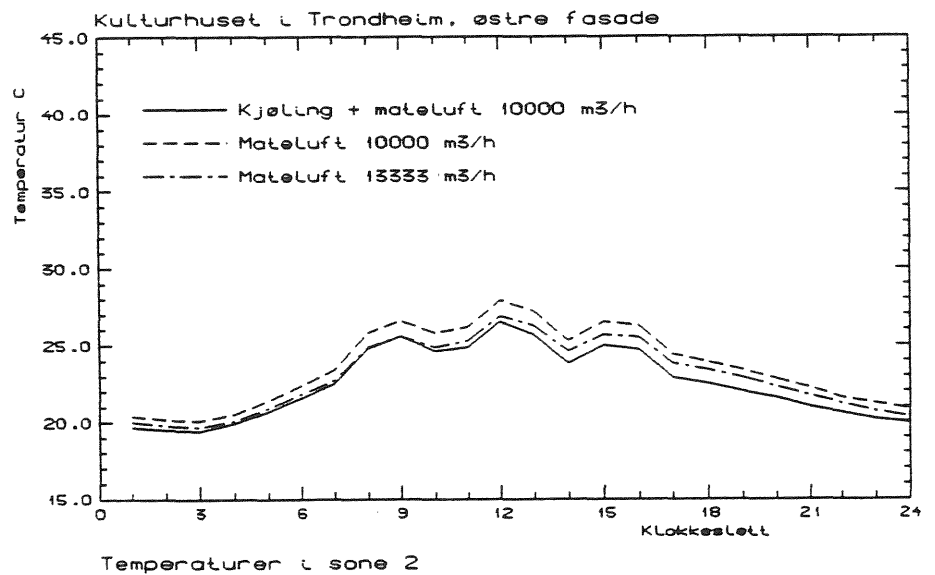
Der foreligger ikke tilgængelige temperaturmålinger.



Figur 6.6. Beregningsresultater når solafskærmning udelades (Kolsager og Bryn, 1988).



Figur 6.7. Beregnede temperaturer i zone 1 med og uden kjøling (Kolsager og Bryn, 1990)

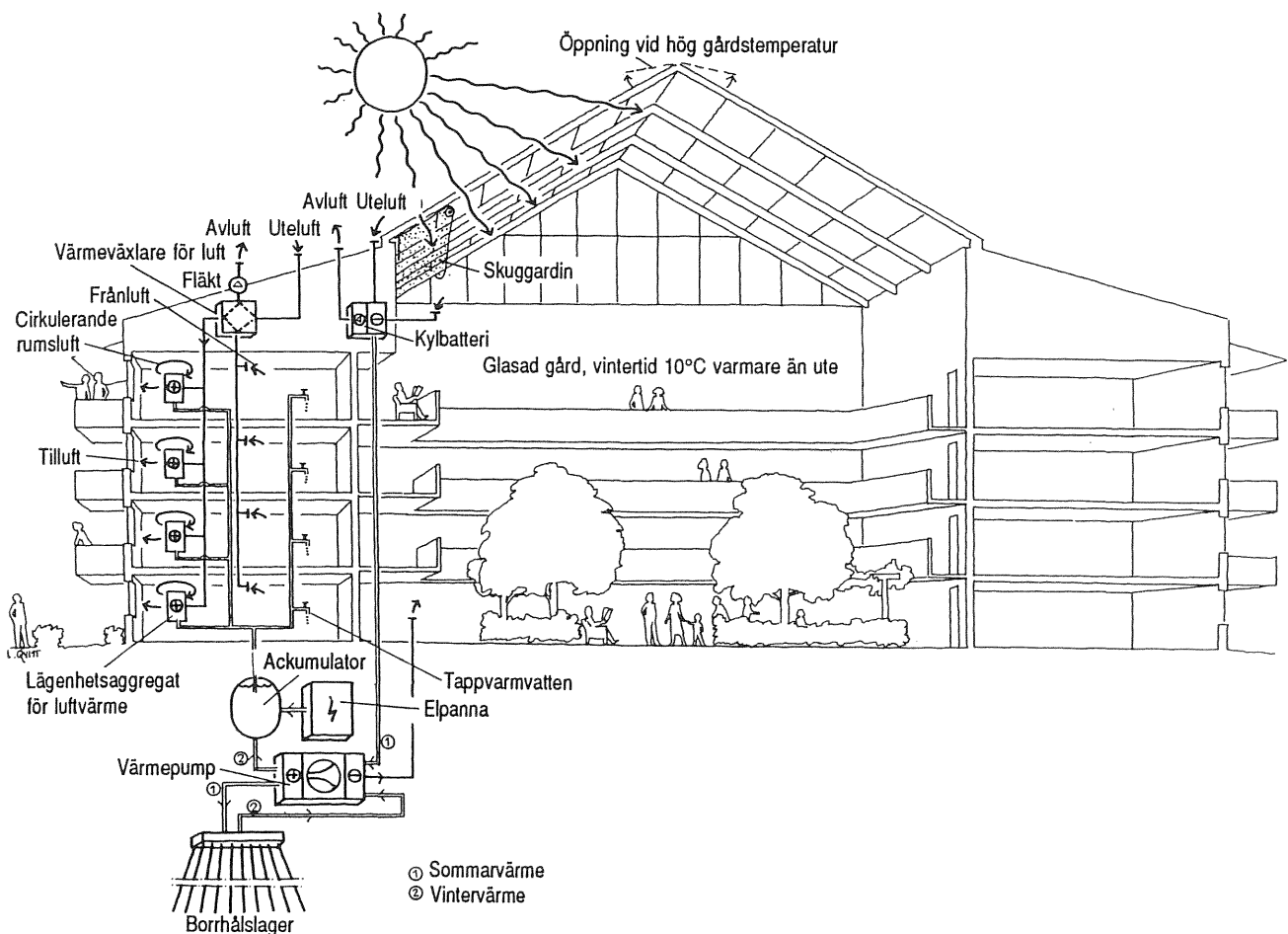


Figur 6.8. Beregnede temperaturer i zone 2 med og uden kjøling (Kolsager og Bryn, 1988).

6.5 Höstvetet, Stockholm

Höstvetet er en beboelsesejendom beliggende i den sydlige del af Stockholm. Bygningerne ligger omkring 2 gårde, hvoraf den ene, der er på 700 m², er helt lukket og overdækket med glas, som vist i figur 6.9. Ejendommen stod klar til indflytning i 1986, og den er en af de seks beboelsesejendomme, der indgår i det såkaldte Stockholmsprojekt, hvis formål er at undersøge beboelsesejendomme med lavt energiforbrug.

Facadebeklædningen mod glasgården er halvt eternitplader og halvt facadetegl. Glastaget er opbygget af to lag 5 mm hærdet glas med ventileret mellemrum.



Figur 6.9. Den glasoverdækkede gård i boligkomplekset Høstvetet, Stockholm (Elmroth et al., 1988).

6.5.1 Klima anlæg

Et centralt element i glasgårdens klimaanlæg er et varmelager bestående af 25 stk. 80 m dybe borehuller ned i fjeldet, hvortil der føres varme fra gården om sommeren og hvorfra der tappes varme om vinteren via et varmepumpeanlæg og en varmeveksler. Med dette anlæg kan luften i glasgården afkøles om sommeren og opvarmes om vinteren.

Glastaget er forsynet med et indvendigt skyggegardin, og der er åbninger i toppen af taget, som sammen med åbninger længere nede i korridorer ud til yderfacaderne og i indgangspartierne kan skabe naturlig ventilation om sommeren.

6.5.2 Klimaforhold

Det tilstræbes, at temperaturen i glasgården ikke kommer under 2 °C i vinterperioden og at den om sommeren ikke overstiger udelufttemperaturen væsentligt.

Vinterkravet sikres ved at tilføre varme fra varmelageret. Om sommeren afkøles luften, når gårdtemperaturen kommer over 20 °C, og det sker ved at lede luften ned gennem varmelageret som herved oplades til vinterperioden. Når gårdtemperaturen kommer over 24 °C åbnes for lugerne i tag og facader. Desuden trækkes skyggegardinerne for ved kraftig solstråling. Taglugerne lukker atter, hvis der kommer regn, og alt dette styres fra en lille vejstation anbragt på en af gavlene. På besøgstidspunktet var skyggegardinerne ude af funktion på grund af en fejl, og man var ikke indstillet på at rette fejlen, da man mente, at skyggegardinerne faktisk var unødvendige.

6.5.3 Andre forhold

Afgangsåbningerne i taget og tilgangsåbningerne længere nede er dimensioneret således at røgzone ved brand holder sig over vinduerne i øverste etage.

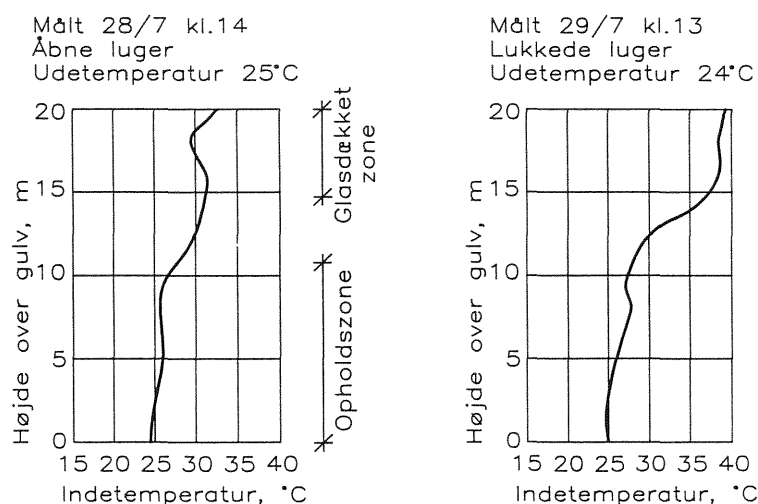
Der er gjort en del ud af akustikken i gården. Man ønskede en akustik der ikke var dårligere end den man ville have fået, hvis gården ikke havde været glasoverdækket. Man beregnede forholdene i de to situationer og fandt bl.a., at det var nødvendigt at montere akustikplader under de udvendige loftsgange, at lave åbne stødfuger i teglvæggene og endelig at opsætte lydabsorbenter på passende steder rundt omkring i gården. Man kunne derved opnå en efterklangstid på under 1,5 sek.

6.5.4 Klimaberegninger

Der er gennemført edb-beregninger af energibalace og temperaturforhold med såvel det svenske program BRIS som det amerikanske DEROP. Temperaturberegningerne viste, at man med fuld køling kunne holde en temperatur på omkring 20 °C nede i opholdszone selv på en varm sommerdag. Oppe i glaszone måtte man regne med væsentligt højere temperaturer, når den naturlige ventilation ikke var i funktion.

6.5.5 Klimamålinger

Der er gennemført et ret omfattende temperaturmåleprogram under en varm sommerperiode. Resultaterne viser ligesom i ELA-bygningen i Trondheim, at med åbne luger er temperaturen nede i gårdens opholdszone et par grader over udetemperaturen, og den er yderligere et par grader højere oppe i glaszone. Så snart man lukker for den naturlige ventilation stiger temperaturen endnu et par grader i opholdszone og 10-15 grader oppe i glaszone. Man får altså i dette tilfælde nærmest to zoner med en meget kraftig temperaturgradient i overgangen mellem de to zoner, således som det er vist på figur 6.10.

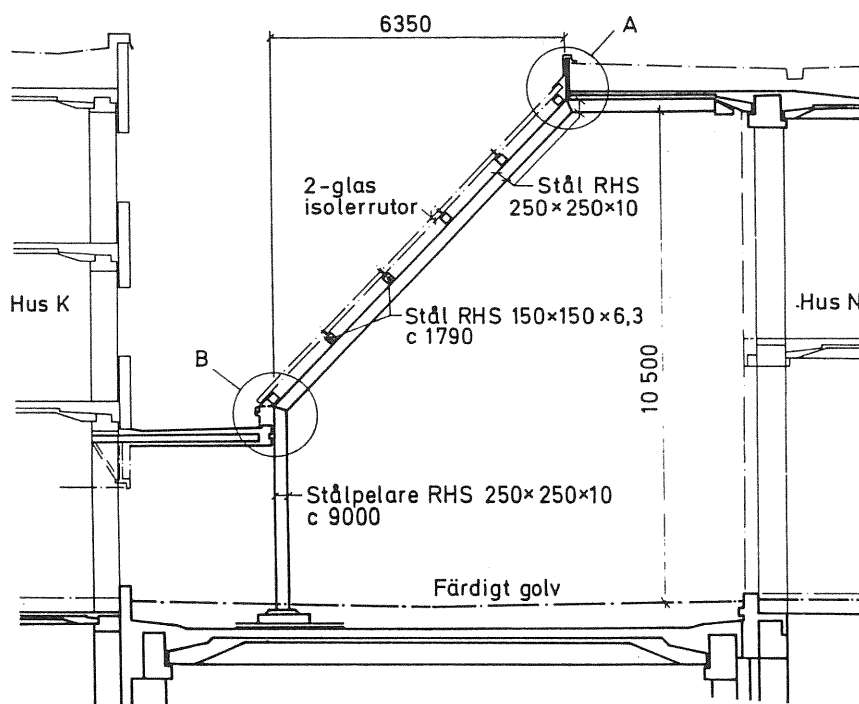


Figur 6.10. Målte temperaturprofiler på to på hinanden følgende dage med omtrentlig samme indeklima. Den ene dag var der åbnet for ventilationslugerne. Den anden dag var de lukkede. Køleanlægget var i gang begge dage (efter Hamnerbjörk og Svensson, 1987).

6.6 Skärholmens Centrum, Stockholm

Skärholmens Centrum er et stort butikscenter i den sydvestlige udkant af Stockholm. Det er opført i slutningen af 60'erne. I 1984 gennemførtes en overdækning af 2/3 af gadearealerne. Formålet var at få etableret et bedre fysisk miljø omkring forretningerne, som kunne stoppe en nedadgående omsætning.

Overdækningen er på i alt 2700 m². Ca 1/3 er udført med 3-lags opaliserede plastpaneler båret af træbuer, og hvor højden fra gulv til top er ca. 5,5 m. Resten er udført i 2-lags termoglas i en højde på ca. 10 m, og som er vist i snit på figur 6.11. Endelig er der to glastårne, der begge er 22 m høje.



Figur 6.11. Snit i glasoverdækket gade i Skärholmens Centrum (Höglund et al., 1987).

6.6.1 Klimaanlæg

Om vinteren opvarmes gaderne ved hjælp af en række varmluftsagregater med tilknyttede varmevekslere for at udnytte varmen i afgangsluften. Desuden er der indlagt gulvvarme i gaderne. Endelig tilføres der varme gennem de tilstødende butikkers glasfacader, ligesom der er en luftudveksling mellem butikker og gade. Man har ikke fundet det nødvendigt at installere radiatorer af hensyn til kuldenedfald hverken i glasgavlne eller i glastårnene.

Om sommeren ventileres gaderne ved naturlig ventilation med afgangsåbninger i toppen af tagene samt i glastårnene, og hvor tilgangsåbningerne er centrets indgange. Det har kun vist sig nødvendigt at bruge gulvvarmen i de allerkoldeste perioder.

6.6.2 Klimaforhold

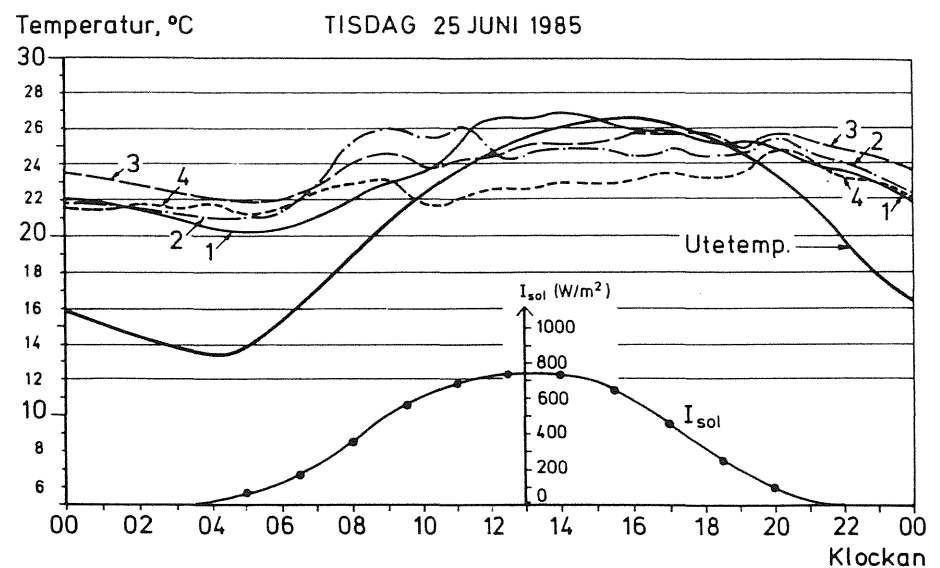
Der er regnet med, at man i vinterhalvåret skal kunne holde en lufttemperatur i de glasoverdækkede gader på ca. 18 °C i dagtimerne, fallende til 15 °C om natten. Om sommeren satses der alene på at holde indetemperaturen så tæt på udetemperaturen som muligt ved hjælp af den naturlige ventilation.

6.6.3 Klimaberegninger

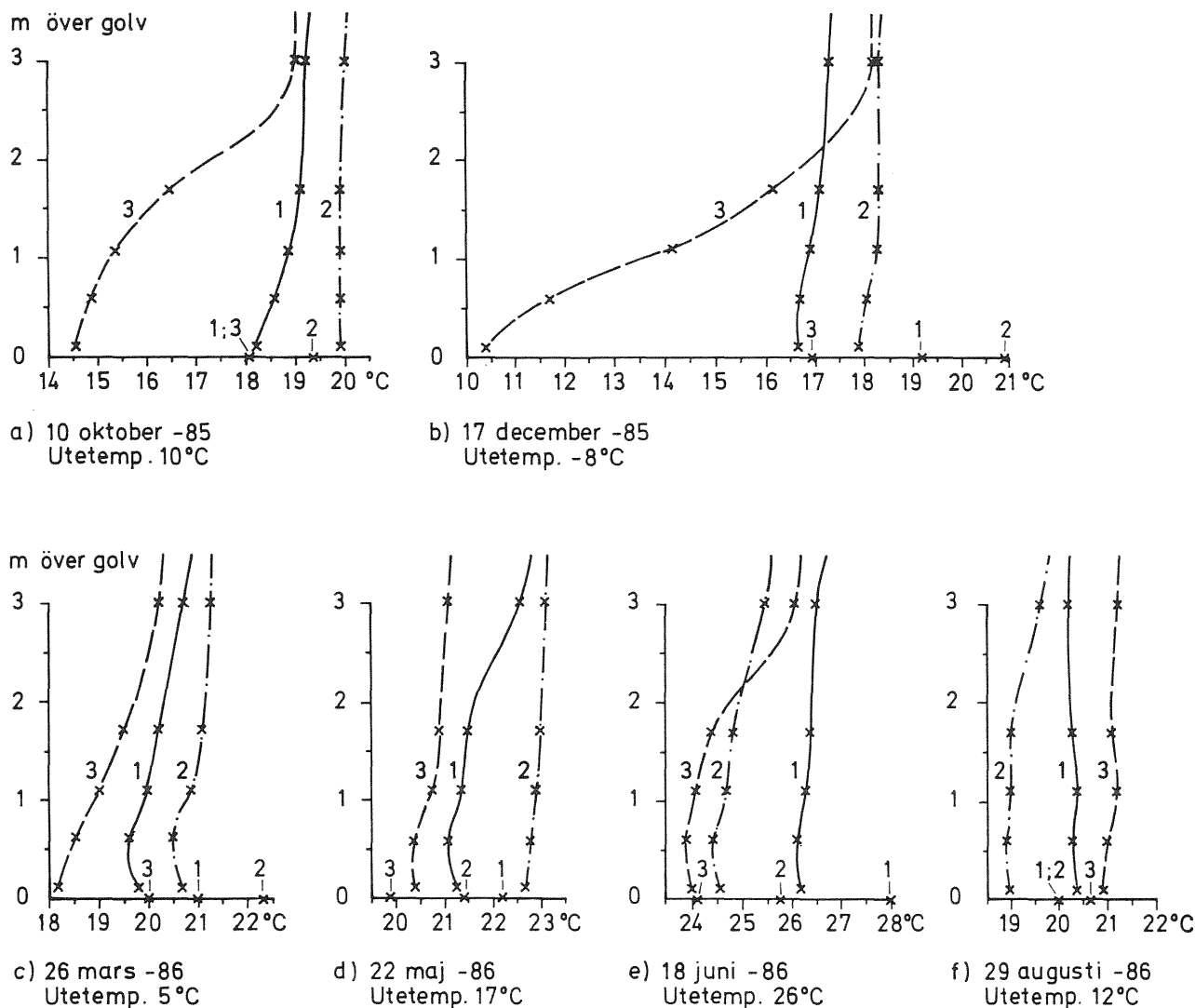
Under projekteringen er der foretaget forenklede håndberegninger af energibalance og temperaturforhold. Kun solindfaldet er beregnet ved hjælp af edb.

6.6.4 Klimamålinger m.m.

Der er gennemført omfattende målinger af temperaturerne forskellige steder i de overdækkede gader under såvel vinter- som sommerforhold. Målingerne viser, at det om sommeren er muligt at holde en lufttemperatur i opholdszonen, der ikke overstiger udetemperaturen selv på de varmeste dage, som vist på figur 6.12. Temperaturen holder sig næsten konstant op til 3 m's højde, som det fremgår af figur 6.13. Derimod kan der være en kraftig temperaturgradient oppe i de to tårne, hvis lugerne ikke er åbnet helt op. Målingerne viser desuden, at der ikke er stor forskel imellem opholdszonens temperatur i henholdsvis centrets nordlige og sydlige ende.



Figur 6.12. Temperaturer målt i 3 meters højde henholdsvis 10 m fra karruseldør (kurve nr. 3 og 4), 14 m fra karusseldør (kurve nr. 1) og længere inde i det glasoverdækkede areal (kurve nr. 2). Desuden den målte udetemperatur (Höglund et al, 1987).



Figur 6.13. Gulvtemperaturer og temperaturprofiler målt midt på dagen på 6 forskellige dage og målt henholdsvis midt inde i centret (kurver nr. 2), 14 m fra karrusseldør (kurver nr. 1) og 10 m fra karrusseldør (kurver nr. 3) (Höglund et al., 1987).

6.7 Viby Torv, Århus

Der er tale om en ca. 2000 m² glasoverdækning, der er udført i 1990. Den indvendige højde er ca. 10 m i selve gågaden, og glasoverdækningen afsluttes i den ene ende med en glaspyramide, hvis maksimumshøjde er 12 m over gulvniveau. Der er anvendt klar 2-lags termoglas over selve gaden, lavenergiglas i indgangsfacaden og stærkt farvet glas (ca. 20 pct. solindfald) i pyramiden.

Ca. 30 pct. af glasarealet over gaden kan åbnes, og i pyramiden er der yderligere åbninger med et indsugningsareal på ca. 17 m² og et afkastningsareal på ca. 15 m².

6.7.1 Klimaanlæg

Der er installeret gulvvarme i gågaden, og desuden tilføres der om vinteren varme fra radiatorer ved gavlene samt fra luftdyser i pyramiden. De sidstnævnte to varmekilder skal også sikre mod kuldenedfald.

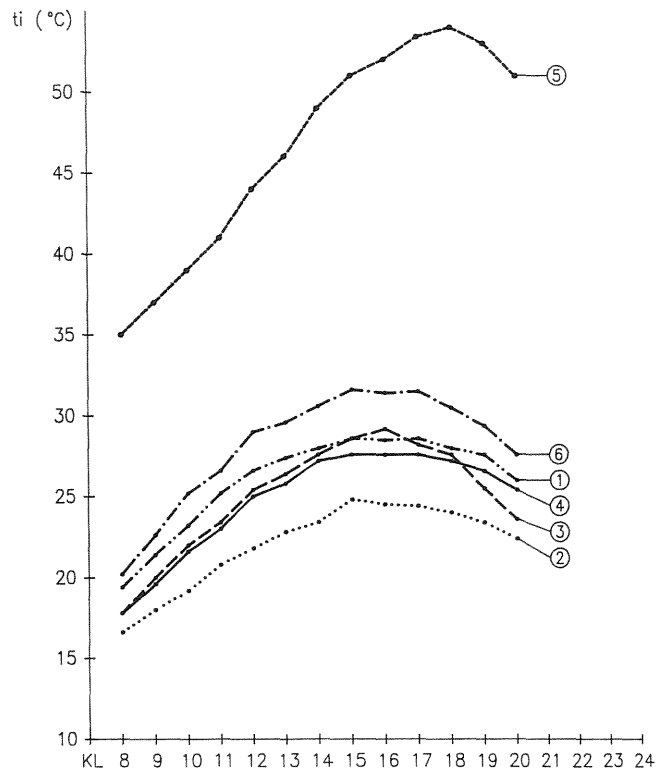
Det var oprindeligt påtænkt at installere skyggegardiner under glasoverdækningen, men de blev slettet af projektet. Der anvendes i stedet for parasoller rundt omkring i gaden.

6.7.2 Klimaforhold og klimaberegninger

I forbindelse med projekteringen er der udført håndberegninger for den overdækkede gågades vedkommende, og man har her tilstræbt en indvendig lufttemperatur om vinteren på 15-17 °C, mens man om sommeren har satset på en indetemperatur ikke højere end 4-5 °C over udetemperaturen.

For pyramiden er der gennemført edb-beregninger ved hjælp af tsbi3. En række alternativer blev undersøgt, og resultatet af disse beregninger er vist på figur 6.14.

Nogle foreløbige temperaturmålinger tyder på, at de stillede klimakrav overholdes.



① – ⑤ coated glas med solafskærmningsfaktor 0,15

① max. udetemperatur 24,8 °C (varm sommerdag)

② max. udetemperatur 21,0 °C (typisk sommerdag)

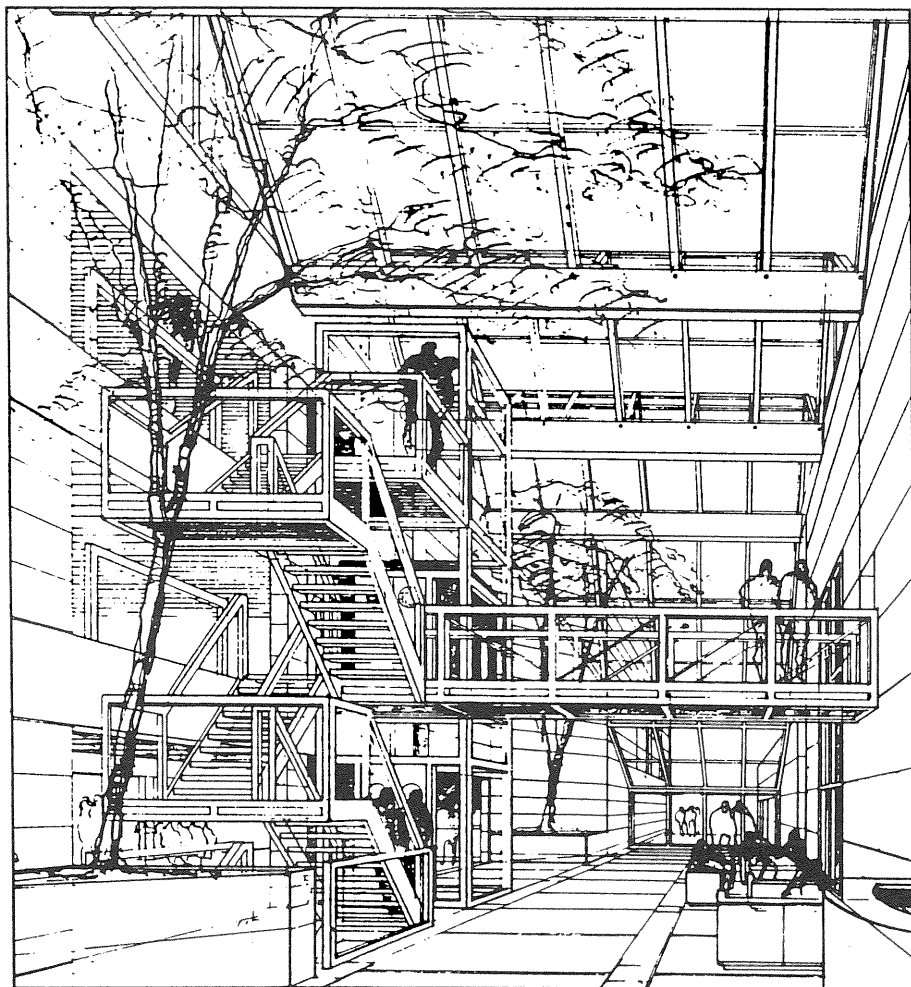
③ max. udetemperatur 25,2 °C (varmeste sommerdag)

④ som ①, men med supplerende solafskærmning ved café

⑤ som ①, men med konstant lukkede vinduer

⑥ som ①, men med almindeligt klart 2 lags glas

Figur 6.14. Beregnede temperaturkurver i Pyramiden på Viby Torv, beregnet med energisimuleringsprogrammet tsbi3 (Sandfeld, 1991).



Figur 6.15. Glasgården i Århus Stiftstidendes nye administrationsbygning (Firmabrochure).

6.8 Århus Stiftstidendes Bladhus, Århus

I Århus Stiftstidendes nye bladhus i udkanten af Århus er der en glasoverdækket forhal samt en egentlig glasgård i tilknytning til administrationsbygningen, som er vist på figur 6.15. Begge glasoverdækninger er udført i klar 2-lags termoruder, og der er installeret skyggegardiner under glasset.

6.8.1 Klimaanlæg

Såvel forhal som glasgård opvarmes ved gulvvarme plus enkelte konvektorer, som skal hindre kuldnefald.

6.8.2 Klimaforhold og klimaberegninger

Bygherrens krav til indeklimaet var minimum 20 °C om vinteren og maksimum 25 °C om sommeren. Der er kun gennemført håndberegninger under projekteringen.

Der har været problemer med kuldnefald og støj ved receptionen i forhallen, og her har man derfor installeret varmluftdyser samt nogle akustikbatts.

Der var oprindeligt åbent mellem glasgård og kontorer, men det gav trækproblemer som følge af termiske luftstrømninger samt støjproblemer. I dag er der lukket med glas mellem kontorerne og glasgården.

6.9 Sammenfatninger og vurderinger

I tabel 6.1 er der givet en oversigt over de tekniske foranstaltninger der er taget i brug for at løse vinter- og sommerproblemerne i de besøgte glasbygninger. I tabel 6.2 er der groft vist de beregningsmetoder der er anvendt og de målinger der er gennemført. Tabellernes enkelte punkter vil blive behandlet nærmere i det følgende sammen med en række andre forhold af interesse.

6.9.1 Tekniske anlæg og installationer

Gulvvarme. Der var installeret gulvvarme i alle butikscentrene (Olavs Kvartalet, Skärholmens Centrum og Viby Torv) samt i Royal Garden og i Århus Stiftstidendes bladhus. Alle disse steder var vinterkravet at det overdækkede areal skulle være fuldt klimatiseret, dvs. at inde-temperaturen ikke måtte komme under 18-20 °C om vinteren. I Skärholmens Centrum havde man lukket for gulvvarmen, da man fandt den unødvendig og kunne klare sig med de varmtluftsagregater der var installeret. I ELA-bygningen, hvor man også ønskede en indetemperatur på mindst 18°C om vinteren, var der ikke gulvvarme, og man gav udtryk for, at det ikke var nødvendigt.

Konvektorer. For at undgå kuldenedfald var der opsat konvektorer på glasgavlene i alle glasbygningerne på nær Skärholmens Centrum i Stockholm.

Strålingspaneler. Der var installeret strålingspaneler i ELA-bygningen helt oppe under glastaget. De brugtes kun i de allerkoldeste perioder. Man satte spørgsmålstegn ved nytten af disse strålingspaneler, når de var anbragt så højt oppe, idet man havde beregnet, at de kun kunne hæve temperaturen nede i opholdszonen med ca. 1 °C.

Tabel 6.1. Oversigt over tekniske foranstaltninger til løsning af vinter- og sommerproblemer i de besøgte glasbygninger.

Klima-anlæg	OPVARMNING			KONDENS			GLASTYPE		KØLING		AFSKÆRMNING	
	Varmluft-anlæg	Gulv-varme	Strålings-panel	Konvek-torer	Varm-luftdyser	Klar	Energi-glas	Gennem-farvet	Kølean-læg	Naturlig vent.	Skygge-gardin	Afskærm-ning
<i>Trondheim</i>												
Universitetet			x	x		x				x		
Royal Garden		x		x			x			x		x
ELA			x	x			x			x		
Olavs Kvartalet		x		x			x			x		
<i>Stockholm</i>												
Höstvetet						x			x	x		x
Skärholmens C	x	x				x				x		
<i>Århus</i>												
Viby Torv												
Gågade Pyramide		x		x			x			x		x
Stiftstidende		x		x	x	x				x		x

Tabel 6.2. Oversigt over anvendte beregningsmetoder og gennemførte målinger i de besøgte bygninger.

	BEREGNINGER ¹⁾				MÅLINGER ²⁾			
	Middel-temp.	Operativ temp.	Akustik	Brand	Kulde-nedslag	Luft-temp.	Globe-temp.	Akustik
<i>Trondheim</i>								
Universitetet	x							
Royal Garden	xxx				x			
ELA	xxx	xxx			x	x	x	x
Olavs Kvartalet	xxx			x	x			
<i>Stockholm</i>								
Höstvetet	xxx	xxx	xxx	xxx		x		
Skärholmens C.	x					x		x
<i>Århus</i>								
Viby Torv								
Gågade	x		xxx		x	(x)		
Pyramide	xxx				x	(x)		
Stiftstidende	x				x	(x)		

1) x: håndberegninger, xxx: edb-beregninger

2) (x): orienterende.

På universitetet i Dragvoll var man ved at installere strålingspaneler for at undgå at skulle tilføre varm luft fra de tilstødende lokaler. Disse strålingspaneler skulle anbringes væsentligt lavere end i ELA-bygningen.

Køling. Der var kun anvendt køling i et af de besøgte byggerier, nemlig i Höstvetet i Stockholm, hvor man om sommeren blæste afkølet luft ind i opholdszonen hentet fra varmeveksleren i forbindelse med varme-lageret. Dermed kunne man holde opholdszonetemperaturen under udetemperaturen, og det blev oplyst, at det på en varm sommerdag faktisk følte koldt at komme ind i glasgården udefra.

Naturlig ventilation. Det er især ved anvendelse af naturlig ventilation, at man har søgt at holde sommertemperaturen nede i glasområderne. De temperaturmålinger der er gennemført under sommerforhold viser, at man med naturlig ventilation kan opnå en indetemperatur, der kun er 2-3 °C over udetemperaturen selv med anvendelse af klart glas i overdækningen. I Skärholmens Centrum kunne man i perioder komme

under udetemperaturen ved at foretage natafkøling af det glasoverdækkede område.

Skyggegardiner. Der var installeret skyggegardiner i Höstvetet og i Århus Stiftstidendes bladhus. Desuden var der lavet udvendig afskærmning på Hotel Royal Garden i restaurantens gavl. I Höstvetet var gardintrækket ude af funktion, og skyggegardinet kunne derfor ikke bruges. Det ville antageligt ikke blive sat i stand, da man ikke mente at skyggegardiner var nødvendige.

På Århus Stiftstidende var man glade for skyggegardinerne, men det var især fordi man fandt, at de havde en god støjdæmpende virkning.

I Olafs Kvartalet var der oprindeligt projekteret med en 80 pct. udvendig afskærmning på glasfacaderne, men de blev aldrig opsat. Noget tilsvarende gjaldt de skyggegardiner, der var projekteret til gågaden på Viby Torv. Begge steder klarede man sig med markiser og parasoller.

Glastyper. I de to ældste glasoverdækninger, Trondheim Universitetet i Dragvoll samt Skärholmens Centrum i Stockholm, var der anvendt klart glas. Desuden var der anvendt klart glas i de to tilfælde, hvor der samtidigt var installeret skyggegardiner, dvs. Höstvetet i Stockholm og Århus Stiftstidendes bladhus i Århus. I de øvrige glasbyggerier var der anvendt forskellige former for energiglas. En særlig kraftig solafskærmende glastype var anvendt i pyramiden på Viby Torv, hvilket gjorde glasspyramiden meget mørk set udefra (solafskærmningsfaktor opgivet til at være 0,15-0,20).

6.9.2 Beregnings- og projekteringspraksis

De rådgivende ingeniører har først og fremmest beregnet energiforbruget om vinteren og middeltemperaturen om sommeren. I de ældre byggerier (Universitetet på Dragvoll og Skärholmens Centrum) samt i de mindre og ret traditionelle byggerier (gågaden i Viby Torv og Århus Stiftstidendes bladhus) har man foretaget håndberegninger. I de yngre og de mere utraditionelle byggerier (Royal Garden og Olafs Kvartalet i Trondheim og pyramiden i Århus) samt byggerierne hvori der indgår et element af forsøgsbyggeri (ELA i Trondheim og Höstvetet i Stockholm), har man brugt edb-simuleringsprogrammer. De projekterende er her ofte gået i samarbejde med et forskningsinstitut.

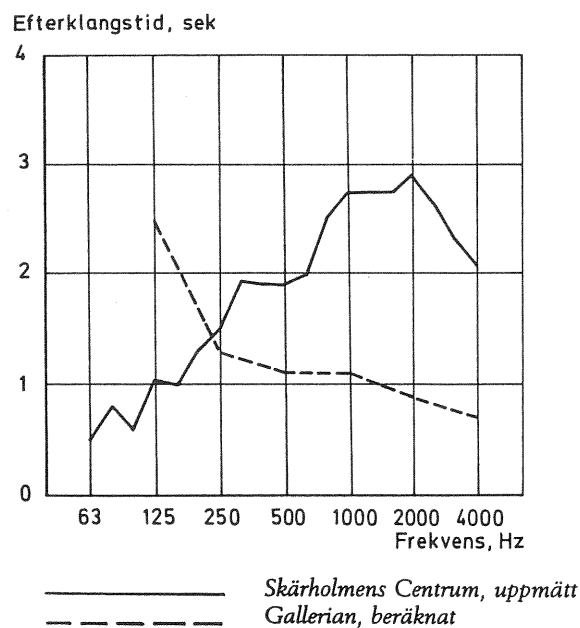
Operative og effektive temperaturer. I forbindelse med projekteringen af Höstvetet blev der beregnet operative temperaturer på en varm sommerdag, idet man var bange for at den skulle blive for høj.

I Skärholmens Centrum er der målt effektive temperaturer forskellige steder med et komfortmeter (Brüel og Kjær). Man fandt at på en varm solskinsdag ville ca. 50 pct. føle, at der var for varmt når de opholdt sig direkte i solen, mens antallet af utilfredse ville blive halveret til ca. 25 pct., hvis de opholdt sig i skyggen.

Akustiske forhold. I forbindelse med projekteringen af de to svenske og det ene danske glasbyggeri (Viby Torv) blev der gjort overvejelser om de akustiske forhold, og det vil først og fremmest sige efterklangstiden. Der blev udført edb-beregninger for Höstvetet og Viby Torv, og begge steder blev der tilstræbt en efterklangstid på maks. 1,5 sek. I forbindelse

med Høstvetet brugte man desuden edb til at vurdere forskellige støj-dæmpende foranstaltninger.

I Skärholmens Centrum blev der foretaget lyd-målinger både før og efter glasoverdækningen, idet det var et krav, at glasoverdækningen ikke måtte forringe lydforholdene mærkbart. Før overdækningen målte man efterklangstider på under 1,5 sek. i hele det hørbare frekvensområde. Efter overdækningen målte man 1,0-1,5 sek. i området 125-225 Hz og 1,5-3 sek. i området 225-4000 Hz, jvf. figur 6.16. Der blev endelig konstateret støjproblemer i glasoverdækningen i Århus Stiftstidendes bladhus, og de blev siden afhjulpet ved hjælp af batts (receptionen) og glasadskillelser (glasgården).



Figur 6.16. Middelværdien af målte efterklangstider før og efter glasoverdækningen i Skärholmens Centrum (Höglund et al., 1987).

Brandforhold. Der er ved alle glasbygningerne gjort en del overvejelser vedrørende brandforholdene og specielt vedrørende røgdækkets højde over gulv i tilfælde af brand.

Kun i Skärholmens Centrum er de glasoverdækkede arealer brand-sikrede med sprinklere, og det hænger sammen med, at der allerede var installeret sprinkleranlæg i forretningerne.

Myndighedskravet er, at brandforholdene ikke må være ringere, end hvis arealet ikke havde været overdækket. Dette betragtes fx af de norske myndigheder som værende opfyldt, hvis åbningsarealet i taget udgør ca. 40 pct. af den samlede overdækning.

For Olavs Kvartalets og Høstvetets vedkommende er der specielt gjort en del ud af røgdækkets placering over gulv for at afgøre, om det kunne tillades at vinduerne i de øverste etager kunne åbnes. Der findes edb-programmer for disse beregninger. Der er således et norsk program, RVENT, udviklet på SINTEF, og der findes også et svensk program (Kellner, 1991).

Overfladetemperaturer, konvektorantal og kondensdannelse. Der blev gjort overvejelser omkring overfladetemperaturer og kondensrisiko ved projekteringen af Höstvetet i Stockholm (Kellner et.al., 1986). Desuden er der beregnet overfladetemperaturer af alle de rådgivende ingeniører i forbindelse med kuldene-faldsproblemet. Overfladetemperaturen er blevet beregnet ud fra forholdet mellem den indvendige overgangsisolans og den samlede isolans. Forskellen mellem inde- og overfladetemperaturen bliver da ca. 1/4 af den samlede temperaturdifferens mellem inde og ude.

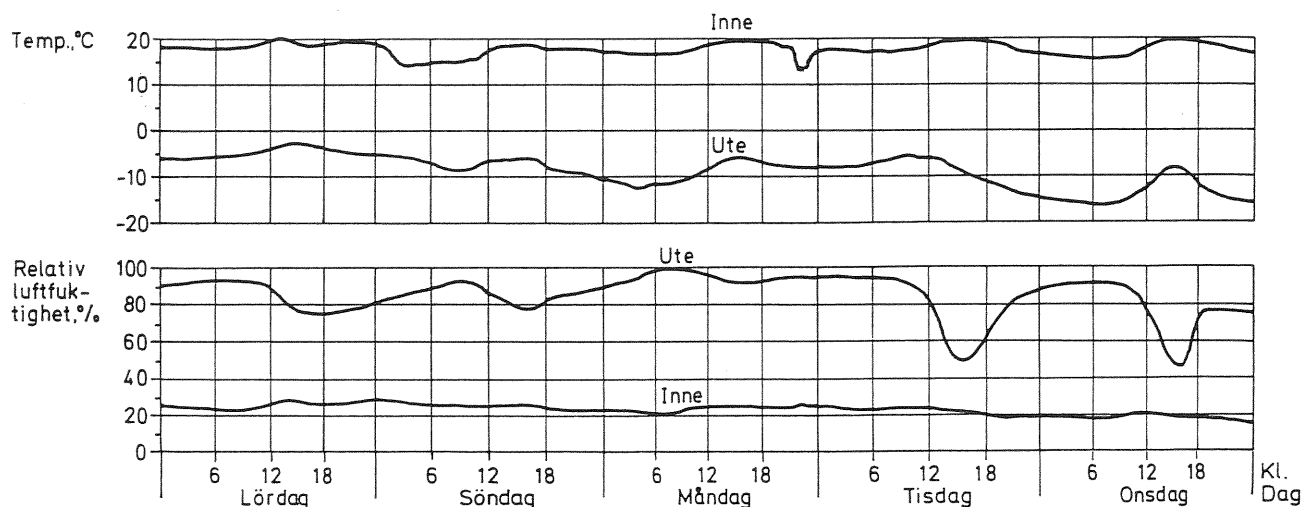
Antallet af konvektorer (eller den lodrette afstand imellem dem) bestemtes ved at forlange, at den afgivne varme skulle kunne opvarme den nedfaldende luft til indelufttemperaturen.

Der har ikke været kondensproblemer noget steds, og det skyldes antagelig de lave, indvendige luftfugtigheder, der optræder om vinteren, hvor udeluften ofte opvarmes 15-20 °C. Selv med 100 pct. relativ fugtighed udvendigt kan man nå ned under 40 pct. indvendigt. I Skärholmens Centrum er der målt luftfugtigheder under 20 pct. på frostklare dage, hvor det indvendige fugttilskud har været på maks. 1,0 gram fugt pr. m³ luft, jf. figur 6.17.

Luftudveksling. Temperaturlagdeling. Lufthastigheder. I forbindelse med energi- og temperaturlagdelinger indgår luftudvekslingen mellem glasområder og de tilstødende rum som en vigtig faktor. I alle de foretagne beregninger er denne luftudveksling blevet fastlagt ud fra et skøn.

Man vil gerne kunne beregne temperaturlagdelingen i et glasoverdækket rum. Beregning heraf er dog kun gennemført i forbindelse med Olavs Kvartalet, hvor man opdelt rummet i to oven på hinanden liggende zoner og skønnede en luftudveksling mellem de to zoner.

Man er opmærksom på, at der kan optræde store lufthastigheder i åbne døre og vinduer. Ved komfortmålingerne i Skärholmens Centrum en varm sommerdag fandt man lufthastigheder på 1,2-1,7 m pr. sek. i to varehusindgange beliggende midt i det overdækkede areal.



Figur 6.17. Indvendige temperaturer og relative luftfugtigheder målt i Skärholmens Centrum i dagene 15.-19. februar 1986 (Höglund et al., 1987).

6.9.3 Reguleringspraksis

Varmetilførslen om vinteren fra varmeaggregater var automatisk reguleret ud fra indetemperaturen. Om sommeren havde man automatisk regulering af åbningsarealerne. Automatikken var mest udbygget i Höstvetet i Stockholm, hvor der var automatisk styring af gardiner, ventilationsåbninger og køling ud fra indetemperatur, solindfaldet, vind og nedbør.

Sommerreguleringen i ELA-bygningen havde oprindeligt været manuel, men var siden gjort automatisk for at imødekomme klagerne over, at der ofte blev for varmt i de øverste, tilstødende lokaler.

6.10 Afsluttende bemærkninger

Der er delte meninger om, hvorvidt gulvvarme er nødvendigt i glasoverdækkede områder, der ønskes fuldt klimatiserede i vinterperioden. Noget tyder på, at den kan udelades, hvis man nogle få dage om året kan acceptere en lavere indetemperatur end 18 °C. Eller man kan supplere varmetilførslen ved et billigere alternativ, de få dage det er aktuelt.

Der er også delte meninger om behovet for skyggegardiner i sommerperioden. Det kan konstateres at det er gået udmærket de steder hvor man har etableret skyggemuligheder inde i selve rummet i form af parasoller. På samme måde kunne man måske i nogle tilfælde undgå kraftigt tonede glaspartier.

Der fokuseres blandt de rådgivende en del på temperaturlagdelingen i forbindelse med temperaturforholdene en varm sommerdag. Her er spørgsmålet, hvor stor en temperaturgradient man får, når ventilationslugerne er helt åbne. Nogle temperaturmålinger tyder på at den er meget beskeden i denne situation. Derimod kan man forestille sig problemer om foråret og efteråret på dage med solskin, hvor lave udetemperaturer gør, at lugerne holdes lukkede.

Af hensyn til komfortforholdene er man stærkt interesseret i at kunne beregne luftstrømningsforholdene i de glasoverdækkede rum. Endelig synes der at være en vis usikkerhed vedrørende dimensioneringen af naturlig ventilation, herunder hvilken effekt man kan opnå ved at køle med naturlig ventilation.

6.11 Referencer

Aschehoug, Ø. et.al.: Evaluation of the ELA-Building. SINTEF-rapport STF 62 A 90017, 1990.

Aschehoug Ø., NTH, Trondheim. Personlig kontakt.

Atrium Engineering. Rapport fra seminar organiseret af The Environmental Engineering Group of the Inst. of Mech. Eng., London, 1990.

Bryn, I., SINTEF, Trondheim. Personlig kontakt, 1991.

- Capellmann, C. og Tjelflaat, P.O.: Measurements for the ELA-Atrium under Summer Conditions. IEA-Annex 26 Research Item Report. SINTEF, Trondheim, 1993.
- Elmroth, A. et.al.: Sex unika hus. Teknik och erfarenheter från Stockholmsprojektet. Byggeforskningsrådet, Stockholm 1988.
- Engelbrekt, I. og Johnsson, H.: Stockholmsprojektet. Effekt og energisimuleringar med dataprogrammen BRIS och DEROB. Byggeforskningsrådet rapport R59:1986, Stockholm, 1986.
- Hamrebjörk, L. og Svensson, J.: Temperaturförhållanden under sommertid i överglasade gårdar. Eksamensarbete i byggnadsteknik, KTH, Stockholm, 1987.
- Hestnes, A. G.: Passive and Hybrid Solar Commercial Buildings. Four Norwegian Case Studies. SINTEF-rapport, 1989.
- Höglund, I. et al.: Överglasning av stora bygnadsvolymer. Skärholmens Centrum. Institutionen för byggnadsteknik, KTH, Stockholm, 1987.
- Jacobsen, T.: Energy Savings and Thermal Climate in Passive Solar Heated Buildings. Doktorafhandling, NTH, 1989.
- Jacobsen, T., SINTEF, Trondheim. Personlig kontakt, 1991.
- Kellner, J. et al.: Stockholmsprojektet. Höstvetet. Överglasad gård, värmepumpar och borrhållager i flerbostadshus - System Suncourt. Byggeforskningsrådet, rapport R81:1986, Stockholm, 1986.
- Kellner, J., Entreprenørfirmaet J.M.Bygg, Stockholm. Personlig kontakt, 1991.
- Kolsaker, K. og Bryn, I.: Kulturhuset i Trondheim - simulering af klimaforhold i østvendt glassfasade. SINTEF-rapport STF 15-A88005, 1988.
- Lindberg, K., Rådgivende ingeniørfirma Gjettum, Trondheim. Personlig kontakt, 1991.
- Sandfeld, P., Rådgivende ingeniørfirma Raundahl og Jørgensen, Århus. Personlig kontakt, 1991.
- Sigsgård, Niels: Glasoverdækkede uderum - en registrering af 12 skandinaviske byggerier. BUR-rapport, 1985.
- Tjelflaat, P. O.: Naturlig ventilasjon i glassgårder. Foredragsmanuskript, Trondheim, okt. 1986.
- Tjelflaat, P. O., NTH, Trondheim. Personlig kontakt, 1991.
- Öman, R., Institutionen för byggnadsteknik, KTH, Stockholm. Personlig kontakt, 1991.

7 Samlet vurdering og konklusion

Det fremgår af såvel litteraturstudiet som af den gennemførte studietur, at de rådgivende arkitekter og ingeniører ikke har noget værktøj til rådighed, hvormed de simpelt kan beregne luftstrømningsforholdene i glasbygninger. Dermed har de heller ikke mulighed for at få fastlagt fx temperaturlagdelingen, som de gerne vil kunne bestemme i disse ofte høje bygninger.

Man kan beregne luftstrømningsforholdene ved hjælp af de såkaldte CFD-programmer (Computational Fluid Dynamics), men de er for tids-, ekspertise- og edb-kapacitetskrævende til at kunne anvendes af de rådgivende i deres daglige arbejde sammen med fx energisimuleringsprogrammer. Der arbejdes derfor internationalt på at udvikle grovere beregningsmodeller, som det vil være lettere at arbejde med end CFD-modellerne. Det drejer sig om de såkaldte zonemodeller og flerrumsmodeller til beregning af henholdsvis luftstrømninger i enkeltrum og luftudvekslingen mellem flere rum.

Zonemodellerne er de mest interessante i den her behandlede sammenhæng, idet målsætningen med dem netop er at få et simpelt edb-værktøj til simulering af luftstrømningsforholdene i et rum. Men forskningsindsatsen har hidtil været beskednen, hvorfor der er et godt stykke vej endnu, inden der kan forventes pålidelige modeller.

Man er en del længere fremme med flerrumsmodellerne, hvor der forventes at foreligge brugbare edb-programmer i løbet af kort tid. Men de vil kun kunne beregne selve luftudvekslingen mellem rum.

På kort sigt, og det vil blandt andet sige til brug i det integrerede edb-system til energi- og indeklimaanalyser, der er under udvikling på SBI, er der tilbage den mulighed at udarbejde edb-programmer baseret på de formeludtryk, som er anført i denne rapport's kapitel 5. Der vil simpelt kunne udvikles edb-programmer til beregning af:

1. Isoterme stråler, dvs. frie og begrænsede, cirkulære og plane fri- og vægstråler med tilhørende returstrømme.
2. Ikke-isoterme, frie stråler, herunder deres temperaturforhold.
3. Kuldenedfald fra kolde flader, herunder hastigheds- og temperaturforhold langs gulv.
4. Fortrængningsventilation, især hastighedsforholdene langs gulv.

De nævnte programmer vil kunne udformes, så de kan fungere som selvstændig edb-programmer, eller således at de kan fungere sammen med det tidligere nævnte, integrerede edb-system.

Programmerne vil kunne udbygges til zonemodeller efterhånden som disse udvikles. Desuden vil flerrumsmodellerne kunne inddrages, når de foreligger i en færdig form. Til denne udbygning vil kunne anvendes resultaterne fra det arbejde, der pågår inden for det Internationale Energiagentur, IEA.

8 Summary

SBI Report 247: Evaluation of air flow models in glass buildings

Glass-roofed areas, such as glass-roofed courtyards in blocks of flats and atria in connection with hotel or office complexes provide attractive spaces for the residents, guests, etc. In addition, it is usually possible to achieve energy and construction savings that wholly or partially make up for the extra cost of the glass-roofing.

The courtyards or atria are usually large spaces in which the air flow conditions have a major effect on both the thermal comfort and the energy consumption for heating and/or cooling and ventilation. It is therefore important to determine the air flow conditions, especially in the occupancy zones, at the design stage.

However, architects and engineers have no tool with which they can simply simulate the air flows occurring. For this reason, possible models and programs for computation of the air flow in glass-roofed spaces have been studied and a study tour has been carried out to a number of glass buildings in Scandinavia - in Trondheim (N), Stockholm (S) and Århus (DK).

Air flow conditions can be calculated by means of so-called CFD programs (Computational Fluid Dynamics), but these programs are too time consuming and require too much expertise and computer time for use by consultants in their daily work, together with, for example, energy simulation programs. Therefore, international work is in progress to develop simpler models that are easier to work with than the CFD models. These simpler models are the so-called zonal models and multizone models for computation of air flows in single rooms and the air exchange between several rooms.

The zonal models are of most interest in the present context because the aim with them is precisely to have a simple computer tool to simulate the air flow conditions in a room. However, the research input has so far been modest, so there is still some way to go before reliable models can be expected.

Better progress has been made with multizone models, with usable computer programs likely to appear shortly. However, they will only be able to calculate the actual air exchange between rooms.

The possibility, which is left in the short term, is to design computer programs based on the existing air flow formulae given in chapter 5 of this report. It will be a simple matter to develop programs for calculation of:

1. isothermal jets, i.e. free and restricted, circular and plane, free and wall jets with related reverse flows
2. non-isothermal, free jets, including temperature conditions
3. natural convective flow from cold faces, including velocity and temperature conditions along the floor

4. displacement ventilation, especially the velocity conditions along the floor.

The said computer programs could be designed to function as independent programs or together with more integrated computer based tools for energy and indoor climate analyses.

The last chapter of the report describes the glass-roofed buildings visited. Besides a detailed description of each, it contains a survey and evaluation of the technical installations used to achieve the desired indoor climate as well as the design practice applied.

Rapporten kortlægger mulighederne for at udvikle modeller til luftstrømningsberegninger til brug i et integreret energisimuleringsværktøj, der er under udvikling på SBI. I den sammenhæng gennemgås CFD-programmer (Computational Fluid Dynamics), zonemodeller, flerrumsmodeller samt foreliggende luftstrømningsformler. I rapporten beskrives desuden otte skandinaviske glasbygninger. Herunder gives der en oversigt over de anvendte tekniske anlæg samt de foranstaltninger, der i øvrigt er gjort for at opnå et ønsket indeklima. Rapporten henvender sig til forskere og rådgivende ingeniører, der beskæftiger sig med luftstrømningsforhold i bygninger og herunder specielt glasbygninger.