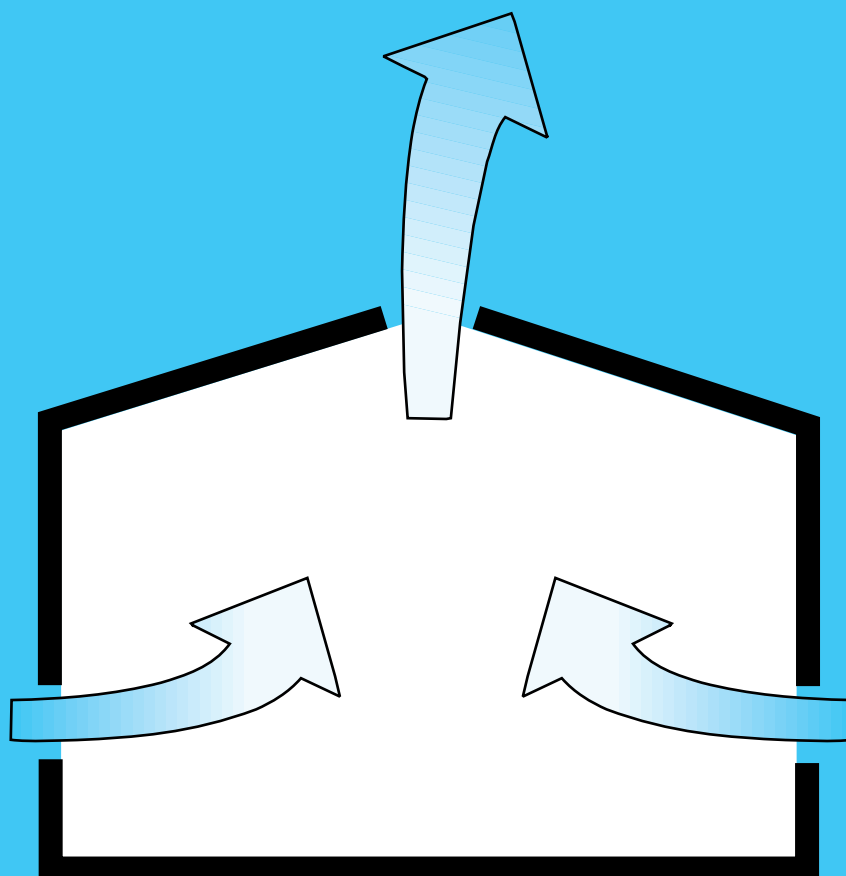


Dimensionering af naturlig ventilation ved termisk opdrift



SBI-RAPPORT 301 · STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT 1998



Dimensionering af naturlig ventilation ved termisk opdrift

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.

SBI-abonnement er en rabatordning med mange fordele for dem,

der vil sikre sig løbende orientering om væsentlige udgivelser

inden for byggeforskningsområdet. Kontakt SBI og hør nærmere.

ISBN 87-563-0996-1.

ISSN 0573-9985.

Pris: kr. 145,00 inkl. 25 pct. moms.

Oplag: 400.

Tekstbehandling: Winnie Larsen.

Tryk: Tekst og Tryk A/S.

Statens Byggeforskningsinstitut.

Postboks 119, 2970 Hørsholm.

Eftertryk i uddrag tilladt, men kun med kildeangivelsen:

SBI-rapport 301: Dimensionering af naturlig ventilation ved

termisk opdrift. 1998.

Indhold

Indhold	3
Forord	4
Indledning	5
Teoretiske forhold	6
Teori for det simpleste tilfælde	6
Udvidet anvendelsesområde	13
Konstruktive og reguleringsmæssige forhold	19
Beregningsforløb	22
Forhåndsberegninger og -overvejelser	22
Neutralplansplacering	22
Beregninger af temperaturdifferens	23
Beregning af åbningsarealer	23
Lufthastigheder og volumenstrømme	26
Eksempel. Kontorbygning	27
Temperaturdifferenser	28
Åbningsarealer ved konstant indetemperatur	31
Åbningsarealer ved indvendig temperaturlagdeling	34
Diskussion	36
Eksempel. Atrium	39
Bygningsdata	39
Forhåndsberegninger og -overvejelser	40
Arealberegninger	41
Summary	42
Referencer	43
Symbolliste	44

Forord

Der er en stigende interesse for naturlig ventilation til ventilering af bygninger. Men brugen af naturlig ventilation støder mod barrierer, som følge af usikkerhed om hvordan naturlige ventilationsanlæg virker, og hvordan de kan dimensioneres. Dette skyldes blandt andet, at ventilationen varierer med udeforholdene. Der er således ikke en simpel sammenhæng mellem åbningsarealerne, ventilationen og den resulterende temperatur-differens mellem inde og ude.

SBI har derfor gennemført et forskningsprojekt, der har haft til formål at udvikle simple beregningsmetoder til brug ved dimensionering af naturlig ventilation allerede tidligt i projekteringsfasen. Der blev som første fase gennemført et litteraturstudium, hvis resultater er publiceret i SBI-meddelelse 118: *Metoder til beregning af naturlig ventilation. Et litteraturstudium.*

Resultatet af det teoretiske arbejde forelægges i denne rapport, der henvender sig til forskere og rådgivere, der beskæftiger sig med naturlig ventilation.

Der har under arbejdet været en værdifuld kontakt til Aalborg Universitet, og der skal rettes en tak til ph.d. Per Heiselberg for gode kommentarer under arbejdets gennemførelse.

Statens Byggeforskningsinstitut
Afdelingen for Energi og Indeklima, august 1998
Erik Christophersen, forskningschef

Indledning

Naturlig ventilation opstår ved et samspil mellem vindpåvirkning og den såkaldte termiske opdrift, der skyldes temperaturforskellene mellem inde og ude.

Det er alene naturlig ventilation ved termisk opdrift der behandles i denne publikation. Endvidere behandles kun termisk opdrift gennem mindre åbninger anbragt i forskellige højder.

Termisk opdrift er kompliceret ved, at der ikke er en simpel sammenhæng mellem åbningsarealerne, ventilationen og den resulterende temperatur-differens mellem inde og ude. Øges f.eks. indløbsarealet, øges ventilationen godt nok, men dette medfører mindre temperaturdifferens, og dermed mindre drivtryk, og hvad bliver så det endelige resultat? Det bliver dermed også svært at få besvaret spørgsmål som:

- Hvor store skal åbningsarealerne være for at opnå tilstrækkelig ventilation en varm, vindstille sommerdag?
- Hvad er den optimale placering af åbningerne?
- Hvad sker der, når der ændres på åbningsforholdene?

I publikationens første kapitel gennemgås formelsættet for termisk opdrift i det simple tilfælde med to åbninger anbragt i forskellig højde i et rum med konstant temperatur. Desuden vises, hvordan formelsættet kan anvendes i situationer, hvor der dels er flere end to åbninger dels er en temperaturlagdeling i rummet. Endvidere gennemgås nogle styrings- og konstruktionsmæssige forhold.

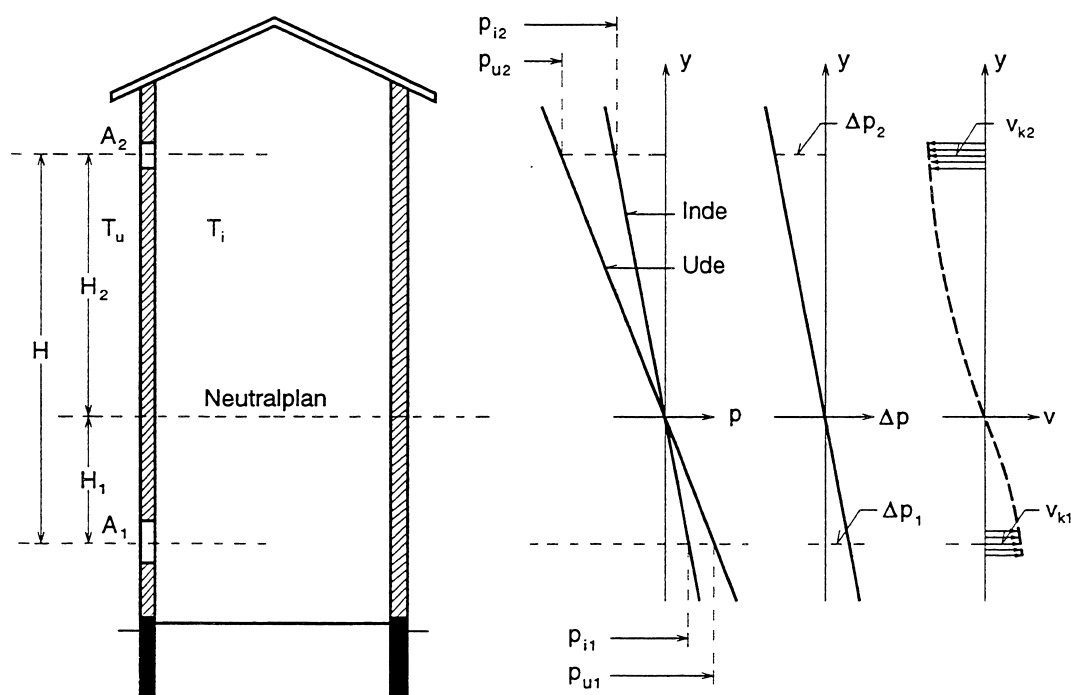
I publikationens efterfølgende kapitel vises fremgangsmåden ved beregning af naturlig ventilation, og derefter følger to kapitler, som viser eksempler på dimensionering af naturlig ventilation i henholdsvis en treetagers kontorbygning og et atrium.

Teoretiske forhold

Ved behandlingen af de teoretiske forhold indledes der med det simpleste tilfælde og det dertil hørende formelsæt. Derefter udvides formelsættets anvendelsesområde til også at omfatte mere komplicerede tilfælde.

Teori for det simpleste tilfælde

Det simpleste tilfælde for naturlig ventilation ved termisk opdrift er vist på figur 1. Der er tale om et rum med to åbninger anbragt i forskellig højde, hvor der tilføres varme i gulvhøjde. Der kan da med tilnærmelse regnes med konstant, indvendig temperatur. Til bestemmelse af luftstrømningen gennem åbningerne og dermed af ventilationen kan der opstilles ligninger for energi, massebalance og bevægelsesmængde samt for sammenhængen mellem trykdifferenser og lufthastigheder og mellem massefylde- og temperaturdifferenser som vist i Andersen (1995a).



Figur 1. Termisk opdrift i rum med to åbninger. Tryk- og hastighedsforhold.

Løsningen af ligningerne fører til trykdifferensforhold mellem inde og ude og til lufthastigheder i åbningerne, som er vist på figur 1. I den nederste åbning strømmer luft udefra og ind, og i den øverste strømmer luft indefra og ud, idet der inde i rummet er et undertryk i forhold til udeluften ved den nederste åbning og et overtryk ved den øverste. Et sted mellem de to åbninger er der et vandret plan, hvor det ind- og udvendige lufttryk er det

samme. Dette såkaldte neutralplan ligger i en sådan højde, at der strømmer lige så meget luft ind gennem den nederste åbning som ud gennem den øverste. Er de to åbningsarealer eksempelvis lige store, vil neutralplanet ligge midt imellem centrene af de to åbninger. Man kan rykke neutralplanet nedad ved at øge det nederste åbningsareal og rykke det opad ved at øge det øverste åbningsareal.

Neutralplanets højde H_1 over den nederste åbnings midte kan bestemmes af følgende udtryk:

$$H_1 = \frac{H}{1 + (T_i/T_u)(C_{a1}/C_{a2})^2(A_1/A_2)^2} \quad (1)$$

hvor:

H	er afstanden mellem åbningerne.
T_i og T_u	er henholdsvis den absolutte inde- og udetemperatur.
C_{a1} og C_{a2}	er åbningskoefficienterne for henholdsvis indløbs- og udløbsåbningen, som indeholder såvel friktionstabet som kontraktionen i åbningen.
A_1 og A_2	er åbningsarealerne for henholdsvis ind- og udløb.

I sommersituationen vil forskellen mellem inde- og udetemperatur almindeligvis være så lille, at man kan sætte $T_i/T_u \sim 1,0$. Yderligere vil ind- og udløbsåbningen normalt være udformet på omtrentlig samme måde, så forholdet mellem de to åbningskoefficienter også kan sættes til 1,0, og udtrykket for H_1 reduceres da til:

$$H_1 = \frac{H}{1 + (A_1/A_2)^2} \quad (2)$$

Neutralplanets afstand H_2 op til midten af den øverste åbning, der ofte kaldes den effektive skorstenshøjde, fås af:

$$H_2 = H - H_1 \quad (3)$$

Formelsæt

Når neutralplanets position kendes, kan man bestemme trykdifferenser og lufthastigheder og dermed også volumenstrømmen. Ved yderligere at anvende sammenhængen mellem volumenstrøm, varmebelastning og temperaturdifferens fås det formelsæt, som er vist i tabel 1. En detaljeret behandling af såvel ligningssystemet som dets løsning er givet i Andersen (1995a).

Inden man kan anvende formelsættet, skal følgende størrelser være fastlagte:

- Den lodrette afstand H mellem de to åbningers midte.
- Forholdet A_1/A_2 mellem de to åbningsarealer. (Ofte vil man som udgangspunkt anvende forholdet 1/1 og siden justere forholdet, hvis det er nødvendigt).

Tabel 1. Åbninger i to niveauer med konstant indetemperatur eller med temperaturlagdeling.

Række nr.		Søjle nr. I Formler baseret på temperaturdifferensen ΔT ¹⁾	Søjle nr. II Formler baseret på overskudsvarmen Φ_o ²⁾
1	<u>Indløbsforhold</u> trykdifferens, Δp_1 (Pa)	$\rho_u \Delta T g H_1 / T_i$	
2	lufthastighed, v_{k1} (m/s)	$\left(\frac{2 \Delta T g H_1}{\Psi_1 T_i} \right)^{1/2}$	$0,038 \left(\frac{\Phi_o H_1}{C_{a1} A_1} \right)^{1/3} \left(\frac{1}{\Psi_1} \right)^{1/2}$
3	<u>Udløbsforhold</u> trykdifferens, Δp_2 (Pa)	$\rho_i \Delta T g H_2 / T_u$	
4	lufthastighed, v_{k2} (m/s)	$\left(\frac{2 \Delta T g H_2}{\Psi_2 T_u} \right)^{1/2}$	$0,039 \left(\frac{\Phi_o H_2}{C_{a2} A_2} \right)^{1/3} \left(\frac{1}{\Psi_2} \right)^{1/2}$
5	Temperaturdif., ΔT (K eller °C) ¹⁾		$7,3 \cdot 10^{-5} T_i \left(\frac{\Phi_o}{C_{a1} A_1} \right)^{2/3} \left(\frac{1}{H_1} \right)^{1/3}$
6	Volumenstrøm, q_v (m ³ /s)	$C_{a1} A_1 \left(\frac{2 \Delta T g H_1}{T_i} \right)^{1/2}$	$0,038 (\Phi_o H_1)^{1/3} (C_{a1} A_1)^{2/3}$
7	Indløbsareal, A_1 (m ²)		$6,2 \cdot 10^{-7} \frac{\Phi_o}{C_{a1}} \left(\frac{1}{H_1} \right)^{1/2} \left(\frac{T_i}{\Delta T} \right)^{3/2}$
8			$140 \frac{q_v^{3/2}}{(\Phi_o H_1)^{1/2} C_{a1}}$ ³⁾
9	Udløbsareal, A_2 (m ²)		$6,2 \cdot 10^{-7} \frac{\Phi_o}{C_{a2}} \left(\frac{1}{H_2} \right)^{1/2} \left(\frac{T_u}{\Delta T} \right)^{3/2}$
10			$140 \frac{q_v^{3/2}}{(\Phi_o H_2)^{1/2} C_{a2}}$ ³⁾

¹⁾ $\Delta T = \Delta T_m$ og $T_i = T_{im}$ ved indvendig temperaturlagdeling, hvor ΔT_m er temperaturdifferensen midt mellem de to åbningsniveauer, og T_{im} er indetemperaturen samme sted.

²⁾ $\Phi_o = \Phi_{oe}$ ved temperaturlagdeling, jvf. (5) og (6). ³⁾ q_v er et på forhånd fastlagt ventilationskrav.

- Åbningsformen, for at kunne fastlægge kontraktionen og friktionstabet i åbningerne.

Når ovennævnte størrelser er fastlagte, kan man med formelsættet bestemme trykdifferenser, lufthastigheder, volumenstrøm og nødvendige åbningsarealer ud fra enten en forudsat temperaturdifferens eller en kendt varmebelastning i rummet. Endvidere kan man bestemme den resulterende temperaturdifferens ud fra varmebelastningen. Når først indløbsarealet er bestemt, fås udløbsarealet ved brug af det på forhånd fastlagte forhold A_1/A_2 mellem de to arealer.

I tabel 1 er alle de indgående geometristørrelser (dvs. åbningsareal, åbningskonstant og afstand til neutralplanet) knyttet til indløbet. Desuden indgår indetemperaturen T_i . Det kan undertiden være hensigtsmæssigt at gennemføre beregningerne med udgangspunkt i udløbsforholdene. Dette gøres ved at ombytte indeks "1" med indeks "2" og indeks "i" med "u" i formelsættet samt i udtrykkene (1) og (2).

Overskudsvarmen Φ_o i formelsættet er den varme, der afsættes til luften og som fremkalder temperaturforskellen mellem inde og ude. Den fås som det samlede varmetilskud til rummet fra personer, elektrisk udstyr, solindfald m.m. med fradrag af varmetransmissionstabet og varmeakkumuleringen i bygningskallen. Begge fradrag er afhængige af den temperaturdifferens, som skal bestemmes. Dette medfører iterative beregninger, hvor man ved første gennemregning enten skønner de to fradragstørrelser eller ser bort fra dem.

I sommersituationen vil man ofte kunne se bort fra transmissionstabet, da temperaturdifferensen mellem inde og ude er lille, og man får et resultat på den sikre side.

Man har en speciel situation, når det betragtede rum er forsynet med store glaspartier i facader og tag. Solindfaldet bliver da den helt dominerende varmekilde. Her vil overskudsvarmen i sommersituationen direkte være den andel af solindfaldet der afgives konvektivt til luften fra alle rummets indvendige flader. Men det kan være svært at bestemme dels selve solindfaldet dels den andel, der afgives til luften.

Åbningskoefficienterne C_{a1} og C_{a2} medtager såvel friktionen som kontraktionen i åbningerne. De er defineret ved:

$$C_a = C_v C_k \quad (4a)$$

hvor C_v er hastighedskoefficienten, der tager højde for friktionstabet i åbningen, og C_k er åbningens kontraktionskoefficient, der angiver luftstrålens kontraktion i åbningen.

Hastighedskoefficienten kan bestemmes af:

$$C_v = 1/(1 + \zeta)^{1/2} \quad (4b)$$

hvor ζ er modstandstallet. I almindelige ventilationsåbninger uden kanaler vil friktionstabet være beskedent svarende til et modstandstal på 0,05-0,1, og det svarer igen til en hastighedskoefficient på ca. 0,95.

Kontraktionskoefficienten når ned på 0,6-0,65, hvis åbningen er skarpkantet. Den vil nærme sig 1,0, hvis åbningskanten er godt afrundet.

Modstandstallet ses i litteraturen opgivet med vidt forskellige værdier for ens åbninger med ens strømningsforhold. For en skarpkantet åbning med et friktionstab svarende til ovennævnte modstandstal på 0,1 kan man se anført et modstandstal på 2,5. Denne meget større værdi skyldes, at både det resterende dynamiske tryk i strålen og åbningskontraktionen er medtaget i modstandstallet. For omtrent samme skarpkantede åbningstype, men lukket ned til 1/4 af det fuldt åbne areal, angiver Idelchik (1986) et modstandstal på 21. Denne endnu større værdi skyldes, at nu er også åbningsgraden inkluderet i modstandstallet. De nævnte større modstandstal anvendes i specielt udledte formeludtryk til simpel beregning af volumenstrømme. Men man får forkerte hastigheder, hvis samme modstandstal anvendes i de normale hastighedsformler. En teoretisk analyse af de forskellige modstandstalsværdier er gennemført i Andersen (1996).

Strømningskoefficienten Ψ er en regneteknisk størrelse, der er defineret ved:

$$\Psi = 1 + \zeta \quad (4c)$$

Geometriske og effektive åbningsarealer

Der skelnes ofte mellem åbningernes geometriske areal, A og det kontraherede areal, A_k . Det sidste benævnes også det effektive areal, A_{eff} . Sammenhængen mellem arealtyperne er:

$$A_k = A_{eff} = C_k A \quad (5a)$$

Endvidere er der følgende sammenhæng mellem volumenstrøm og de nævnte arealer:

$$V = A_k v_k = (C_k A)(C_v v_{teo}) = C_k C_v A v_{teo} = C_a A v_{teo} = C_v A_{eff} v_{teo} \quad (5b)$$

hvor $v_{teo} = (2\Delta p/\rho)^{1/2}$ er den teoretisk mulige hastighed, der fås ved tabsfri strømning, når trykdifferensen over åbningen er Δp .

Gyldighedsområde

Der er ved udledelsen af formelsættet i tabel 1 forudsat:

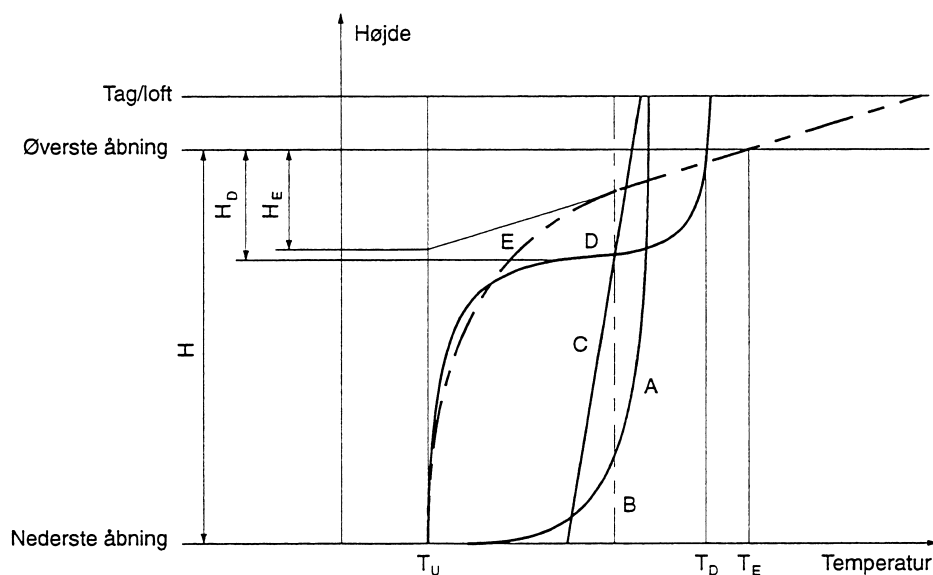
- samme indetemperatur overalt i rummet
- samme lufthastighed over hele åbningsarealet
- lodretstillede åbninger

Der vil i praksis være en vis temperaturlagdeling med den højeste temperatur i toppen af rummet. Endvidere vil hastigheden ikke være helt konstant over åbningerne, specielt ikke hvis åbningerne er placeret tæt på neutralplanet. Endelig kan åbningerne være såvel vandrette som skrånstillede. En teoretisk analyse af disse forhold er vist i Andersen (1995a). Analysens hovedresultater er anført i det følgende.

Temperaturlagdelingen afhænger af varmekildernes placering som vist skitse-mæssigt på figur 2, hvor figurens kurver hænger sammen med placeringen af varmekilderne på følgende måde:

- kurve A: varmen tilføres jævnt, nær gulvniveau,

- kurve B: er et teoretisk forløb, der med tilnærmelse optræder, når varmen tilføres jævnt i rummet, samtidig med at den indstrømmende luft blandes godt op med rumluften,
- kurve C: varmekilderne er omtrentligt jævnt fordelt på de indvendige vægflader,
- kurve D: varmen tilføres i den øverste del af bygningen eller fra koncentrerede varmekilder.
- kurve E: varmen tilføres fra loftet eller den øverste del af de lodrette vægflader.



Figur 2. Lodret temperaturforløb i afhængighed af varmetilførslen. Der henvises til teksten vedrørende sammenhængen mellem kurver og varmekildeplacering.

Formelsættet kan umiddelbart anvendes på de to situationer, der svarer til kurverne A og B. Desuden kan formelsættets søjle nr I anvendes med en lille modifikation, når varmen tilføres i den øverste del af rummet repræsenteret ved kurve D, hvor temperaturdifferensen hovedsagelig optræder over strækningen H_D , dvs. fra varmekildernes underkant og opefter, hvis der er tale om højt placerede varmekilder, eller den såkaldte lagdelingshøjde, hvis der er tale om koncentrerede varmekilder. Modifikationen består i, at der skal regnes med en lodret åbningsafstand lig med H_D . I søjle I skal der da indsættes en trykhøjde H_{D1} bestemt af formel (1), hvor H erstattes af H_D .

Formelsættet kan med tilnærmelse anvendes i situationer med en beskeden, lineær temperaturlagdeling ved at anvende den indvendige middeltemperatur og den tilsvarende middeltemperaturdifferens. Man vil da være på den sikre side i sine beregninger.

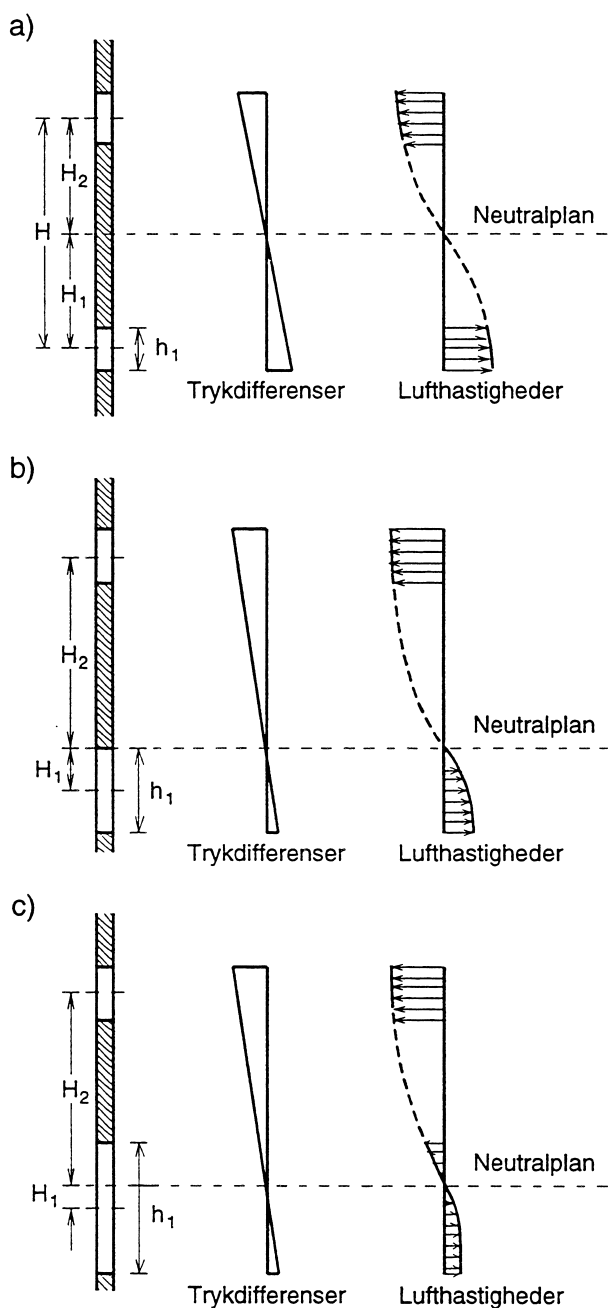
Formelsættet er *ikke* umiddelbart anvendeligt, hvis varmekilden er placeret usymmetrisk, så der optræder en vandret temperaturgradient. Den indvendige luftsøjle ud for ventilationsåbningerne får da en anden vægt end den middelluftsøjle, der regnes med i formelsættet, og beregningerne kan da resultere i en forkert volumenstrøm. Det skal dog bemærkes, at man kan regne med så godt som konstant, vandret temperatur selv med ikke helt symmetrisk placerede varmekilder. Dette fremgår af CFD-beregninger

(Computational Fluid Dynamics) udført af Heiselberg et al. (1996) og af Svidt et al. (1996), samt af målinger udført af Svidt et al. (1996) og af Höglund et al. (1987). (Nogle af sidstnævntes resultater er vist i Andersen, 1995b).

Hvor der optræder temperaturgradienter, kan man anvende formelsættet til at bestemme startværdier af temperaturdifferenser eller åbningsarealer til brug i en videre, iterativ beregningsproces.

Ved lodret temperaturlagdeling kan man komme tættere på det rigtige resultat ved at indføre en korrektionsfaktor, der beskriver graden af lagdelingen. Dette vil blive nærmere behandlet i det følgende afsnit om udvidet anvendelsesområde.

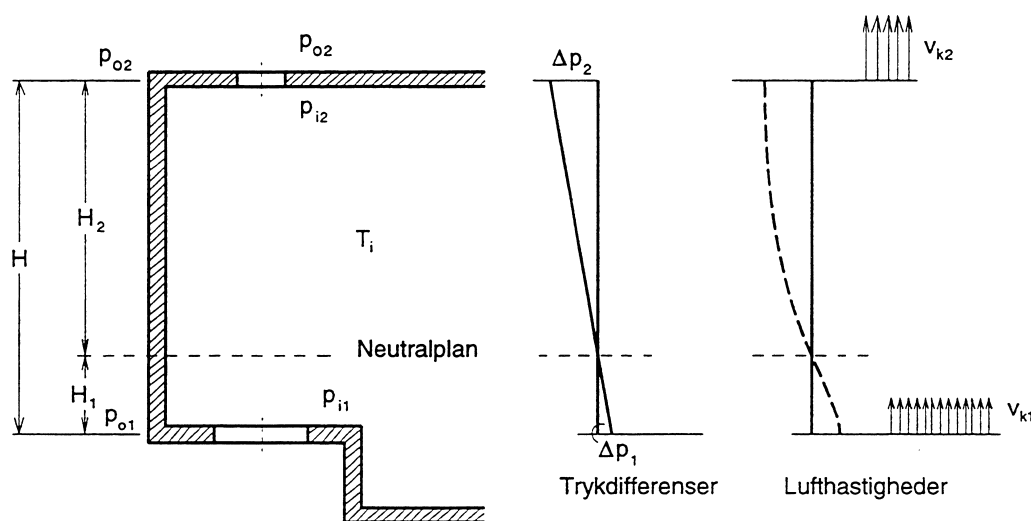
Lufthastighedsfordelingen over åbningerne bliver mere parabolisk, jo nærmere åbningerne kommer neutralplanet som vist på figur 3.



Figur 3. Neutralplanets placering ved forskellige åbningsarealforhold og deraf følgende trykdifferenser og lufthastigheder.

De teoretiske analyser viser, at man med god tilnærmelse kan anvende formelsættet, så længe neutralplanet ikke skærer gennem åbningsarealerne. I formelsættet regnes da med en konstant lufthastighed i åbningen svarende til den, der optræder i åbningens midte.

Åbningsorientering og -placering har ingen betydning. Formelsættet kan anvendes ved såvel vandrette som skråstillede åbninger. For vandrette åbninger fremgår dette direkte af figur 4. Ud fra et teoretisk synspunkt kan formelsættet også anvendes, uanset hvordan åbningerne er placeret vandret i forhold til hinanden, når blot deres højdemæssige placering holdes uændret og når der kan regnes med, at der ikke optræder nogen vandret temperaturgradient i rummet. Dette bekræftes af CFD-beregninger udført af Aiulfi (1994).



Figur 4. Trykdifferenser og lufthastigheder ved to, vandret placerede åbninger.

Udvidet anvendelsesområde

Formelsættets anvendelsesområde kan udvides til rum med udprægede temperaturlagdelinger samt til rum med flere end to åbninger. Dette gøres ved at indføre nogle korrektionsfaktorer, der beskrives i det følgende.

Temperaturlagdeling

Temperaturlagdelingen vil ofte være tilnærmelsesvis lineær, jf. eksempelvis Heiselberg et al. (1996), Svidt et al. (1996) og Andersen (1995b). Ved en lineær lagdeling fås trykdifferensforhold, som - noget overdrevet - er skitseret på figur 5. En teoretisk analyse viser (Andersen, 1995a), at neutralplanet rykker en smule opad i forhold til dets position ved konstant indetemperatur, men man får alligevel omtrentlig samme lufthastigheder i åbningerne og dermed samme volumenstrøm, som man får ved brug af rummets middeltemperatur. For at få den rigtige middeltemperatur skal der i beregningerne tages hensyn til, at den med ventilationsluften fjernede varmemængde er afhængig af indetemperaturen ud for den øverste åbning. Dette kan ske ved dels at erstatte temperaturdifferensen ΔT med middel-

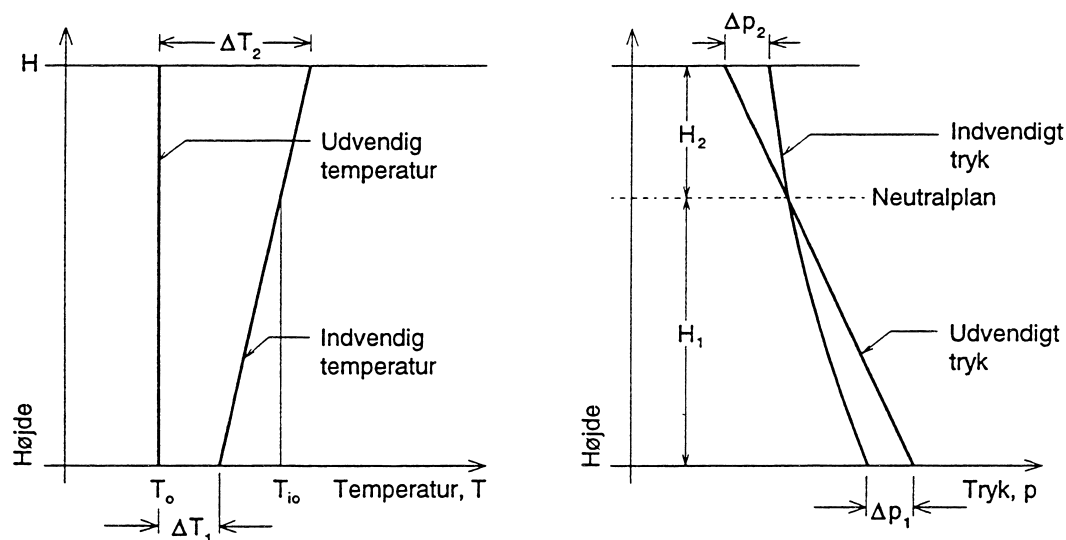
temperaturdifferensen ΔT_m dels at erstatte overskudsvarmen Φ_o i formelsættet med en korrigeret værdi Φ_{oe} bestemt ved (Andersen, 1998a):

$$\Phi_{oe} = \Phi_o / \varepsilon \quad (6)$$

hvor der er indført en temperaturfaktor ε bestemt ved:

$$\varepsilon = \Delta T_N / \Delta T_m \quad (7)$$

og hvor ΔT_N er temperaturdifferensen ud for den øverste åbning.



Figur 5. Trykforhold ved indvendig, lineær temperaturlagdeling.

Det ses, at der indgår to temperaturdifferenser i formelsættet, når der optræder temperaturlagdeling: temperaturdifferensen ΔT_2 over den øverste åbning i forbindelse med faktoren ε og middeltemperaturdifferensen ΔT_m i formelsættet ellers. Dette kan virke modstridende. Årsagen er, at den større temperaturdifferens over udløbsåbningen reducerer behovet for luft til at bortventilere overskudsvarmen, og dette fører til ovennævnte reduktionsfaktor. Samtidig er vægten af den indvendige luftsøjle mellem øverste og nederste åbning bestemmende for drivtrykket, og denne vægt er igen først og fremmest bestemt af middeltemperaturen. Derfor bliver ΔT_m bestemmende for lufthastighederne gennem åbningerne og dermed volumenstrømmen og i sidste instans også for de nødvendige åbningsarealer.

Situationen repræsenteret ved kurve D på figur 2 kan med god tilnærmelse håndteres ved at regne med $\Delta T_m = (H_D/H)\Delta T_{top}$ og $\varepsilon = \Delta T_{top}/\Delta T_m = H/H_D$. Situationen repræsenteret ved kurve E kan håndteres ved at regne med $\Delta T_m = 1/2(H_E/H)\Delta T_{top}$ og $\varepsilon = 2H/H_E$.

Flere åbninger og konstant indetemperatur

Ved flere end to åbninger er det hensigtsmæssigt at skelne mellem, om åbningerne er placeret i kun to højdeniveauer eller i flere niveauer.

Ved to åbningsniveauer kan formelsættet i tabel 1 anvendes uændret. Indløbsarealet vil da være det samlede åbningsareal i det nederste niveau, og udløbsarealet det samlede åbningsareal i det øverste niveau.

Ved flere åbningsniveauer kan formelsættet anvendes ved at indføre en "vægtet" trykhøjde H_1^* som vist i tabel 2.

Tabel 2. Åbninger i mere end to niveauer og med konstant indetemperatur.

Række nr.		Søjle nr. I Formler baseret på temperatordifferensen ΔT ¹⁾	Søjle nr. II Formler baseret på overskudsvarmen Φ_o ^{1) 2)}
1	<u>Indløbsforhold</u> trykdifferens, Δp_j (Pa)	$\rho_u \Delta T g H_j / T_i$	
2	lufthastighed, $v_{k,j}$ (m/s)	$\left(\frac{2 \Delta T g H_j}{\Psi_j T_i} \right)^{1/2}$	$0,038 \left(\frac{\Phi_o}{C_{a1} A_1} \right)^{1/3} \left(\frac{1}{H_1^*} \right)^{1/6} \left(\frac{H_j}{\Psi_j} \right)^{1/2}$
3	<u>Udløbsforhold</u> trykdifferens, Δp_j (Pa)	$\rho_i \Delta T g H_j / T_u$	
4	lufthastighed, $v_{k,j}$ (m/s)	$\left(\frac{2 \Delta T g H_j}{\Psi_j T_u} \right)^{1/2}$	$0,039 \left(\frac{\Phi_o}{C_{a1} A_1} \right)^{1/3} \left(\frac{1}{H_1^*} \right)^{1/6} \left(\frac{H_j}{\Psi_j} \right)^{1/2}$
5	Temperaturdif., ΔT (K eller °C)		$7,3 \cdot 10^{-5} T_i \left(\frac{\Phi_o}{C_{a1} A_1} \right)^{2/3} \left(\frac{1}{H_1^*} \right)^{1/3}$
6	Volumenstrøm, q_V (m ³ /s)	$C_{a1} A_1 \left(\frac{2 \Delta T g H_1^*}{T_i} \right)^{1/2}$	$0,038 (\Phi_o H_1^*)^{1/3} (C_{a1} A_1)^{2/3}$
7	Nederste indløbsareal, A_1 (m ²)		$6,2 \cdot 10^{-7} \frac{\Phi_o}{C_{a1}} \left(\frac{1}{H_1^*} \right)^{1/2} \left(\frac{T_i}{\Delta T} \right)^{3/2}$
8			$140 \frac{q_V^{3/2}}{(\Phi_o H_1^*)^{1/2} C_{a1}}$ ³⁾
9	Øverste udløbsareal, A_N (m ²)		$6,2 \cdot 10^{-7} \frac{\Phi_o}{C_{aN}} \left(\frac{1}{H_N^*} \right)^{1/2} \left(\frac{T_u}{\Delta T} \right)^{3/2}$
10			$140 \frac{q_V^{3/2}}{(\Phi_o H_N^*)^{1/2} C_{aN}}$ ³⁾

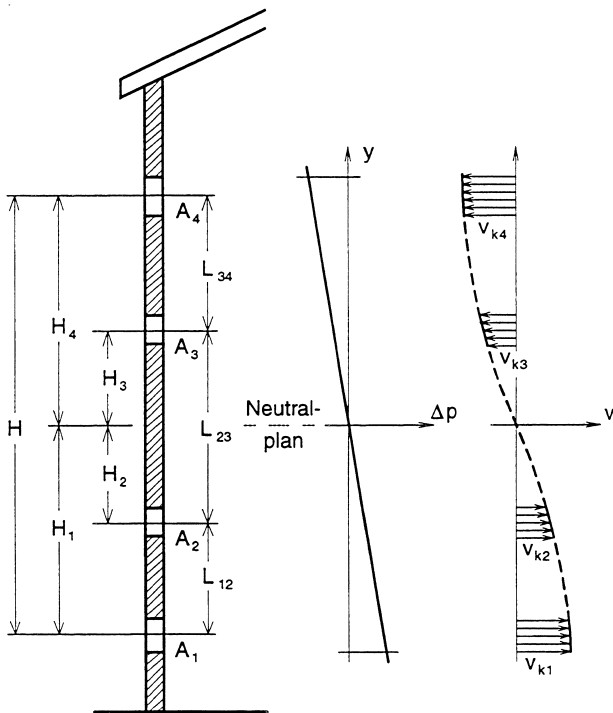
¹⁾ H_1^* bestemmes af (9). ²⁾ H_N^* bestemmes af (10). ³⁾ q_V er et på forhånd fastlagt ventilationskrav.

Vægtningen sker ud fra åbningsforholdene og åbningsafstandene (Andersen, 1998b). For en situation som vist på figur 6 med fire åbninger i hvert sit niveau og nummereret som vist på figuren, bestemmes den vægtede trykhøjde af:

$$H_1^* = H_1 \left(1 + \frac{C_{a2} A_2 \sqrt{H_2}}{C_{a1} A_1 \sqrt{H_1}} \right)^2 = H_1 \left(1 + m_2 n_2 q_2^{1/2} \right)^2 \quad (8)$$

hvor

$$m_2 = C_{a2}/C_{a1} \text{ og } n_2 = A_2/A_1 \text{ og } q_2 = H_2/H_1 = (H_1 - L_{12})/H_1$$



Figur 6. Trykdifferenser og lufthastigheder ved termisk opdrift i rum med fire åbninger.

Det ses, at der i (8) indgår trykhøjden H_1 , som er afstanden mellem neutralplanet og nederste åbning. Den bestemmes ved at opstille massebalanceligningen for den ind- og udstrømmende luft, og løse ligningen iterativt. Således som ligning (8) er opskrevet, er der regnet med, at neutralplanet er beliggende mellem åbningerne nr. 2 og 3. Et første skøn over neutralplanets placering kan fås ved at se bort fra de to midterste åbninger. Disse to åbninger vil ligge nærmest neutralplanet, og deres bidrag til massebalancen vil derfor være en del mindre end bidragene fra øverste og nederste åbning.

I det generelle tilfælde bestemmes den vægtede trykhøjde af, idet nederste åbning har indeks 1:

$$H_1^* = H_1 \left(1 + \sum_2^{N_1} \frac{C_{aj} A_j \sqrt{H_j}}{C_{a1} A_1 \sqrt{H_1}} \right)^2 = H_1 \left(1 + \sum_2^{N_1} m_j n_j q_j^{1/2} \right)^2 \quad (9)$$

hvor N_1 er antallet af åbninger under neutralplanet, og hvor

$$m_j = C_{aj}/C_{a1} \text{ og } n_j = A_j/A_1 \text{ og } q_j = H_j/H_1 = (H_1 - L_{1,j})/H_1$$

Også her må man gøre sig nogle forhåndsovervejelser om neutralplanets placering og derefter bestemme den endelige placering ved iterativ løsning af en massebalanceligning.

Der kan endvidere defineres en vægtet trykhøjde H_N^* , der knytter sig til åbningerne over neutralplanet med "N" som indeks for øverste åbning, og som er defineret ved:

$$H_N^* = H_N \left(1 + \sum_{N_1+1}^{N-1} \frac{C_{aj} A_j \sqrt{H_j}}{C_{aN} A_N \sqrt{H_N}} \right)^2 = H_N \left(1 + \sum_{N_1+1}^{N-1} m_j n_j q_j^{1/2} \right)^2 \quad (10)$$

hvor

$$m_j = C_{aj}/C_{aN} \text{ og } n_j = A_j/A_N \text{ og } q_j = H_j/H_N = (H_N - L_{j,N})/H_N$$

Flere åbninger og temperaturlagdeling

Der skelnes mellem, om åbningerne er placeret i to eller i flere højdeniveauer.

Ved to åbningsniveauer kan formelsættet i tabel 1 anvendes ved at indføre en temperaturfaktor ε , der defineres og indføres som vist i formlerne (6) og (7).

Ved flere åbningsniveauer tages der lettest hensyn til lagdelingen ved at gennemføre beregningerne med udgangspunkt i udløbsforholdene. Dette kan ske ved at indføre en ny, vægtet trykhøjde H_N^{**} som vist i tabel 3. Den nye trykhøjde rummer led for åbningskoefficient-, åbningsareal- og åbningshøjdeforhold ligesom H_N^* i (10), men har yderligere et led for temperaturdifferensforholdene (Andersen, 1998b). For situationen på figur 8 med de fire åbninger bestemmes den af:

$$H_4^{**} = H_4 \left(1 + \frac{C_{a3} A_3 H_3^{1/2} \Delta T_3}{C_{a4} A_4 H_4^{1/2} \Delta T_4} \right)^2 = H_4 \left(1 + m_3 n_3 q_3^{1/2} r_3 \right)^2 \quad (11)$$

hvor

$$m_3 = C_{a3}/C_{a4} \text{ og } n_3 = A_3/A_4 \text{ og } q_3 = H_3/H_4 = (H_4 - L_{34})/H_4 \text{ og } r_3 = \Delta T_3/\Delta T_4$$

Højden H_4 , der er afstanden mellem neutralplanet og den øverste åbning, vil være influeret af temperaturdifferenserne over åbningerne. Men man kan med god tilnærmelse anvende den værdi, som anvendes i den tilsvarende situation uden temperaturlagdeling, dvs. $H_4 = H - H_1$, hvor H_1 er den samme som i (9).

Tabel 3. Åbninger i mere end to niveauer og med temperaturlagdeling.

Række nr.		Søjle nr. I Formler baseret på middeltemperaturdifferensen ΔT_m ^{1) 3)}	Søjle nr. II Formler baseret på den korrigerede overskudsvarme $\Phi_{o\epsilon}$ ^{1) 2) 3) 4) 5) 6)}
1	<u>Indløbsforhold</u> trykdifferens, Δp_j (Pa)	$\rho_u \Delta T_m g H_j / T_{im}$	
2	lufthastighed, $v_{k,j}$ (m/s)	$\left(\frac{2 \Delta T_m g H_j}{\Psi_j T_{im}} \right)^{1/2}$	$0,038 \left(\frac{\Phi_{o\epsilon}}{C_{aN} A_N} \right)^{1/3} \left(\frac{1}{H_N^{**}} \right)^{1/6} \left(\frac{H_j}{\Psi_j} \right)^{1/2}$
3	<u>Udløbsforhold</u> trykdifferens, Δp_j (Pa)	$\rho_i \Delta T_m g H_j / T_u$	
4	lufthastighed, $v_{k,j}$ (m/s)	$\left(\frac{2 \Delta T_m g H_j}{\Psi_j T_u} \right)^{1/2}$	$0,039 \left(\frac{\Phi_{o\epsilon}}{C_{aN} A_N} \right)^{1/3} \left(\frac{1}{H_N^{**}} \right)^{1/6} \left(\frac{H_j}{\Psi_j} \right)^{1/2}$
5	Temperaturdif., ΔT_m (K eller °C)		$7,3 \cdot 10^{-5} T_{im} \left(\frac{\Phi_{o\epsilon}}{C_{aN} A_N} \right)^{2/3} \left(\frac{1}{H_N^{**}} \right)^{1/3}$
6	Volumenstrøm, q_v (m ³ /s)	$C_{a1} A_1 \left(\frac{2 \Delta T_m g H_1^*}{T_{im}} \right)^{1/2}$	$0,039 (\Phi_{o\epsilon})^{1/3} (C_{aN} A_N)^{2/3} (1/H_N^{**})^{1/6} (H_N^*)^{1/2}$
7	Øverste udløbs- areal, A_N (m ²)		$6,2 \cdot 10^{-7} \frac{\Phi_{o\epsilon}}{C_{aN}} \left(\frac{1}{H_N^{**}} \right)^{1/2} \left(\frac{T_u}{\Delta T_m} \right)^{3/2}$
8			$140 \frac{q_v^{3/2}}{(\Phi_{o\epsilon} H_N^{**})^{1/2} C_{aN}}$ ⁶⁾
9	Nederste indløbs- areal, A_1 (m ²)		$\frac{q_{v,16}}{C_{a1}} \left(\frac{T_{im}}{2\Delta T_m g H_1^*} \right)^{1/2}$ ⁷⁾

1) ΔT_m er temperaturdifferensen midt mellem øverste og nederste åbningsniveau.

2) $\Phi_{o\epsilon}$ fås af (6) og (7).

3) H_1^* fås af (9).

4) H_N^* fås af (10).

5) H_N^{**} fås af (12).

6) q_v er et på forhånd fastlagt ventilationskrav.

7) $q_{v,16}$ bestemmes af tabellens formel II6.

Nok bliver H_4 lidt mindre som følge af lagdelingen, men den lidt højere temperatur over neutralplansniveauet bevirker, at trykdifferenserne over åbningerne forbliver næsten uændrede.

I det generelle tilfælde bestemmes den "temperaturvægtede" trykhøjde af:

$$H_N^{**} = H_N \left(1 + \sum_{j=1}^{N-1} \frac{C_{aj} A_j H_j^{1/2} \Delta T_j}{C_{aN} A_N H_N^{1/2} \Delta T_N} \right)^2 = H_N \left(1 + \sum_{j=1}^{N-1} m_j n_j q_j^{1/2} r_j \right)^2 \quad (12)$$

hvor m_j , n_j og q_j er defineret tidligere i forbindelse med (10) og hvor yderligere:

$$r_j = \Delta T_j / \Delta T_N$$

For H_N kan der, ligesom ved (11) for fire åbninger, anvendes den værdi der fås, når der ses bort fra temperaturlagdelingen. Der må gøres nogle forhånds-overvejelser over neutralplanets placering, hvorefter dettes endelige placering kan bestemmes ved iterativ løsning af en massebalanceligning.

Konstruktive og reguleringsmæssige forhold

Før man går i gang med at dimensionere et naturligt ventilationsanlæg, skal der tages stilling til, hvordan det samlede åbningsareal skal fordeles mellem indløb og udløb.

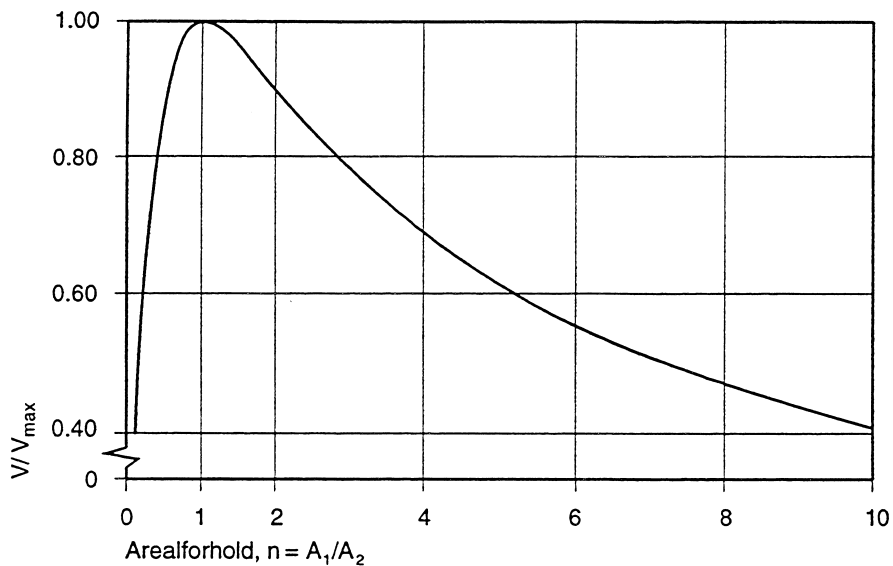
Senere, når man har fået beregnet de nødvendige indløbs- og udløbsarealer, kan det vise sig, at konstruktive forhold gør en omfordeling af åbningsarealerne ønskelig. Eksempelvis kan et mindre indløbsareal vise sig at passe bedre ind i modulet i en given vægkonstruktion.

Det kan også være nødvendigt at foretage justeringer af arealforholdene for at sikre, at der f.eks. kommer frisk luft ind i alle opholdsrum i en fleretagers bygning.

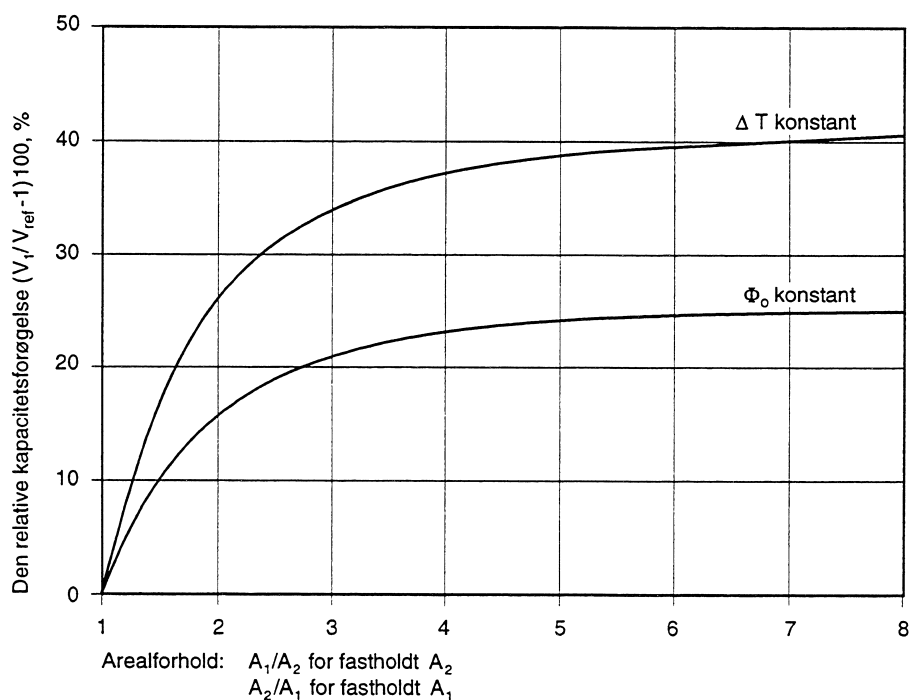
I Andersen (1995a) er der foretaget en analyse af en række konstruktive og reguleringsmæssige forhold, og resultaterne heraf er anført nedenstående.

Den optimale fordeling af åbningsarealerne fremgår i hovedtræk af figur 7, der viser volumenstrømmen som funktion af forholdet mellem ind- og udløbsarealet i et rum med to åbningsarealer, hvis samlede areal holdes konstant. Det ses, at der fås den største ventilation, når det samlede åbningsareal fordeles ligeligt på ind- og udløbet. Er det samlede areal f.eks. 1 m², fås således den største ventilation, når både indløbs- og udløbsareal er på 0,5 m². Men det ses også, at ventilationen ikke er særlig følsom over for ændringer i arealforholdet. Fordeles nævnte 1 m² med eksempelvis 0,67 m² på indløbet og 0,33 m² på udløbet, dvs. at arealforholdet er $A_1/A_2 = 2/1$, da bliver volumenstrømkapaciteten ca. 90 % af det maksimalt opnåelige.

Arealændringer kan også bestå i en forøgelse af et af arealerne og holde det andet konstant. Konsekvenserne heraf er vist på figur 8, hvor ventilationen er afbildet som funktion af arealforholdet i et rum med to åbninger, hvor enten indløbs- eller udløbsarealet holdes konstant, og



Figur 7. Volumenstrømmen i afhængighed af åbningernes arealforhold, når det samlede areal ($A_1 + A_2$) holdes konstant.



Figur 8. Forøgelse af volumenstrøm, når indløbs- eller udløbsareal forøges, medens temperaturdifferensen eller overskudsvarmen holdes konstant.

hvor samtidig enten temperaturdifferensen eller varmetilførslen holdes konstant.

Det ses, at man maksimalt kan opnå en ventilationsforøgelse på ca. 40 %, uanset hvor meget det ene areal øges i forhold til det andet, når der samtidig tilføres så meget ekstra varme, at temperaturdifferensen holdes konstant. Uden denne ekstra varmetilførsel kan der, som det ses, maksimalt opnås en forøgelse på ca. 25 %, da temperaturdifferensen bliver reduceret, og dette reducerer drivtrykket og dermed ventilationsforøgelsen.

Ændring af luftstømningsretningerne i ventilationsåbningerne kan opnås ved at ændre på neutralplanets position, og dette kan igen ske ved at ændre på forholdet A_1/A_2 mellem ind- og udløbsarealet. I eksempelvis en fleretagers kontorbygning, hvor de enkelte etager står i forbindelse med et højt atrium, kan man rykke neutralplanet opad for at sikre, at man også får friskluft ind gennem vinduesåbningerne i de øverste rum. Dette kan gøres ved enten at øge åbningsarealet i atriets tagluger eller ved at mindske de nederste etagers åbningsarealer.

Man kan få samme friskluftmængde ind i rummene på alle etager ved at indstille åbningsarealerne individuelt. Åbningsarealerne i de nederste åbninger skal da være mindre end i de åbninger, der ligger lige under neutralplanet.

Ændring af lufthastighederne i indløbsåbningerne kan ligeledes opnås ved at ændre på neutralplanets position. Der fås således en større hastighed ved at mindske indløbsarealet, idet afstanden fra åbningen til neutralplanet, hvilket igen vil sige trykhøjden, derved bliver større. Temperaturdifferensens størrelse er dog i sidste instans bestemmende for, hvor store hastigheder der kan opnås.

Beregningsforløb

Beregninger i forbindelse med naturlig ventilation ved termisk opdrift har normalt et af følgende to formål:

1. Ud fra kendt bygningsgeometri, åbningsarealer og varmebelastning at bestemme den resulterende temperaturdifferens mellem inde og ude.
2. Ud fra kendt bygningsgeometri, varmebelastning og komfortkrav (i form af krav til temperaturdifferens) at bestemme de nødvendige åbningsarealer.

Der vil i det følgende blive henvist til formlerne i tabellerne 1-4 med et romertal efterfulgt af et arabertal. Romertallet refererer til tabellernes søjler og arabertallet til tabellernes rækker.

Forhåndsregninger og -overvejelser

Før de egentlige beregninger kan påbegyndes, er det nødvendigt at gennemføre nogle forhåndsregninger og overvejelser vedrørende:

- varmebelastning fra solindfald, personer og udstyr,
- overskudsvarmen, dvs. den andel af varmebelastningen, der medfører en opvarmning af indeluften,
- infiltrationsforhold og friskluftventiler,
- ønskede indetemperaturforhold,
- om der skal regnes med temperaturlagdeling eller ej,
- udetemperaturen for den betragtede situation og dermed temperaturdifferensen mellem inde og ude,
- åbningskoefficienter ud fra åbningernes form,
- forholdet mellem åbningsarealernes størrelse,
- mulige åbningsplaceringer.

Neutralplansplacering

Uanset hvad der skal beregnes, skal neutralplanets placering bestemmes. Dette gøres med udtrykkene (1) eller (2) hvis åbningerne er placeret i kun to forskellige højdeniveauer.

Med åbninger i flere end to niveauer er det nødvendigt at opstille en massebalanceligning og eventuelt løse denne ligning iterativt.

Der tages ikke hensyn til en eventuel temperaturlagdelingen ved fastlæggelsen af neutralplanets placering.

Beregninger af temperaturdifferens

1. Bestem overskudsvarmen.
2. Bestem neutralplansplacering.
- 3a. *Med åbninger i to niveauer og med konstant indetemperatur* bestemmes temperaturdifferensen af formel II5 i tabel 1.
- 3b. *Med åbninger i to niveauer og med temperaturlagdeling* bestemmes temperaturdifferensen af formel II5 i tabel 1 med de anførte korrektioner.
- 3c. *Med åbninger i flere end to niveauer og med konstant indetemperatur* bestemmes temperaturdifferensen af formel II5 i tabel 2.
- 3d. *Med åbninger i flere end to niveauer og med temperaturlagdeling* bestemmes temperaturdifferensen af formel II5 i tabel 3 eller tabel 4.

Den fundne temperaturdifferens sammenholdes med den skønnede værdi anvendt til varmetransmissionsberegningerne, og beregningerne må eventuelt gentages med en ny skønnet værdi.

En kontrol af den beregnede temperaturdifferens kan fås ved at beregne ventilationsvarmetabet og sammenholde dette med den i beregningerne anvendte overskudsvarme.

Beregning af åbningsarealer

- 1 Bestem overskudsvarmen med anvendelse af den ønskede temperaturdifferens til bestemmelse af varmetransmissionstabet.
- 2 Bestem neutralplansplacering ud fra et antaget forhold mellem ind- og udløbsarealerne (typisk 1/1).
- 3a *Med åbninger i to niveauer* bestemmes det nødvendige indløbsareal af formel II7 i tabel 1.
Det nødvendige udløbsareal bestemmes ved brug af de åbningsarealforhold, der blev anvendt ved bestemmelsen af neutralplanets placering.
- 3b *Med åbninger i flere end to niveauer og med konstant indetemperatur* bestemmes det nødvendige indløbsareal i *nederste* niveau af formel II7 i tabel 2.
De øvrige åbningsarealer bestemmes ved brug af de åbningsarealforhold, der blev anvendt ved bestemmelsen af neutralplanets placering.
- 3c *Med åbninger i flere end to niveauer og med indvendig temperaturlagdeling* bestemmes det nødvendige åbningsareal i *øverste* niveau af formel II7 i tabel 3 eller tabel 4.
De øvrige åbningsarealer bestemmes ved brug af de åbningsarealforhold, der blev anvendt ved bestemmelsen af neutralplanets placering.

Fastlagt neutralplansplacering

I en bygning med flere end to åbningsniveauer kan det være aktuelt at rykke neutralplanet opad for at få frisk luft ind i alle opholdsrum. Dette vil eksempelvis være tilfældet i en fleretagers kontorbygning med kontorer ud mod et fælles, gennemgående midterparti. For at få frisk luft ind i alle

kontorer på en vindstille dag, skal neutralplanet ligge over friskluftåbningen i det højestliggende kontor.

- 1 Vælg neutralplansplacering.
- 2 Bestem overskudsvarmen.
- 3a *Ved konstant indetemperatur* bestemmes det nødvendige åbningsareal i det nederste og øverste niveau ved brug af henholdsvis formel II7 og II9 i tabel 2.
De øvrige åbningsarealer bestemmes ud fra de arealforhold, der er anvendt ved bestemmelsen af H_1^* og H_N^* .
- 3b *Ved indvendig temperaturlagdeling* bestemmes det nødvendige udløbsareal i øverste niveau af formel II7 i tabel 3.
De øvrige åbninger over neutralplansniveau bestemmes ved brug af de arealforhold, der blev anvendt ved bestemmelsen af H_N^{**} .
Det nødvendige indløbsareal i nederste niveau bestemmes ved hjælp af formel II9 i tabel 3.
De øvrige åbninger under neutralplansniveau bestemmes ved brug af de arealforhold, der blev anvendt ved bestemmelsen af H_1^* .
- 3c *Ved indvendig temperaturlagdeling og kun et åbningsniveau over neutralplanet* er $H_N \sim H_N^* = H_N^{**}$ og dette medfører en række forenklinger, som fremgår af tabel 4. Beregningsproceduren er den samme som angivet i punkt 3b, men med anvendelse af formel II7 og II9 i tabel 4.

Fastlagt neutralplansplacering og friskluftmængde

Med en neutralplansplacering over øverste friskluftåbning og med ens store åbningsarealer i alle niveauerne under neutralplanet vil der strømme mest frisk luft ind gennem de nederste åbninger og mindst ind gennem de øverste. Åbningsarealerne kan bestemmes, så der kommer ens friskluftmængder ind gennem alle friskluftåbninger.

Bemærk at lufthastighederne vil være forskellige med den største hastighed i de nederste åbningsniveauer. Dette kan der ikke ændres på.

- 1 Vælg neutralplansplacering.
- 2 Beregn overskudsvarmen.
- 3a *Ved konstant indetemperatur* bestemmes det nødvendige åbningsareal i øverste niveau ved brug af formel II9 i tabel 2.
Bestem dernæst de øvrige åbningsarealer over neutralplanet ved brug af de arealforhold, der blev anvendt til bestemmelse af H_N^* .
Bestem den resulterende volumenstrøm q_v ved hjælp af formel II6 i tabel 2, idet indeks "1" erstattes af indeks "N", og fordel volumenstrømmen ens på alle indløbsåbningerne.
Bestem indløbslufthastighederne $v_{k,j}$ som funktion af afstanden H_j op til neutralplanet ved hjælp af formel I2 i tabel 2.
Bestem det nødvendige åbningsareal for hver åbning ud fra den fundne volumenstrøm og den fundne hastighedsfunktion, idet $A_{j,nødv} = V_j / (C_{k,j} v_{k,j})$.

Tabel 4. Åbninger i mere end to niveauer, med indvendig temperaturlagdeling og med en neutralplansplacering, så der kun er udløbsåbninger i et niveau over neutralplanet, dvs. $H_N \sim H_N^* = H_N^{**}$.

Række nr.		Søjle nr. I Formler baseret på middeltemperaturdif., ΔT_m ^{1) 3)}	Søjle nr. II Formler baseret på den korrigerede overskudsvarme $\Phi_{o\epsilon}$ ^{1) 2) 3) 4)}
1	<u>Indløbsforhold</u> trykdifferens, Δp_j (Pa)	$\rho_u \Delta T_m g H_j / T_{im}$	
2	lufthastighed, v_{kj} (m/s)	$\left(\frac{2 \Delta T_m g H_j}{\Psi_j T_{im}} \right)^{1/2}$	$0,038 \left(\frac{\Phi_{o\epsilon}}{C_{aj} A_j} \right)^{1/3} \left(\frac{1}{H_N} \right)^{1/6} \left(\frac{H_j}{\Psi_j} \right)^{1/2}$
3	<u>Udløbsforhold</u> trykdifferens, Δp_N (Pa)	$\rho_i \Delta T_m g H_N / T_u$	
4	lufthastighed, v_{kN} (m/s)	$\left(\frac{2 \Delta T_m g H_N}{\Psi_N T_u} \right)^{1/2}$	$0,039 \left(\frac{\Phi_{o\epsilon} H_N}{C_{aN} A_N} \right)^{1/3} \left(\frac{1}{\Psi_N} \right)^{1/2}$
5	Temperaturdif., ΔT (K eller °C)		$7,3 \cdot 10^{-5} T_{im} \left(\frac{\Phi_{o\epsilon}}{C_{aN} A_N} \right)^{2/3} \left(\frac{1}{H_N} \right)^{1/3}$
6a	Volumenstrøm, q_V (m ³ /s)	$C_{a1} A_1 \left(\frac{2 \Delta T_m g H_1^*}{T_{im}} \right)^{1/2}$	$0,039 (\Phi_{o\epsilon} H_N)^{1/3} (C_{aN} A_N)^{2/3}$
6b		$C_{aN} A_N \left(\frac{2 \Delta T_m g H_N}{T_u} \right)^{1/2}$	
7	Udløbsareal, A_N (m ²)		$6,2 \cdot 10^{-7} \frac{\Phi_{o\epsilon}}{C_{aN}} \left(\frac{1}{H_N} \right)^{1/2} \left(\frac{T_u}{\Delta T_m} \right)^{3/2}$
8			$140 \frac{q_V^{3/2}}{(\Phi_{o\epsilon} H_N)^{1/2} C_{aN}}$ ⁴⁾
9	Nederste indløbsareal, A_1 (m ²)		$6,2 \cdot 10^{-7} \frac{\Phi_{o\epsilon}}{C_{a1}} \left(\frac{1}{H_1^*} \right)^{1/2} \left(\frac{T_{im}}{\Delta T_m} \right)^{3/2}$
10			$140 \frac{q_V^{3/2}}{(\Phi_{o\epsilon} H_1^*)^{1/2} C_{a1}}$ ⁴⁾

¹⁾ ΔT_m er temperaturdifferensen midt mellem øverste og nederste åbningsniveau.

²⁾ $\Phi_{o\epsilon}$ fås af (6) og (7).

³⁾ H_1^* fås af (9).

⁴⁾ q_V er et på forhånd fastlagt ventilationskrav.

- 3b Ved *indvendig temperaturlagdeling* bestemmes det nødvendige åbningsareal i øverste niveau ved brug af formel II7 i tabel 3. Bestem dernæst de øvrige åbningsarealer over neutralplanet ved brug af det arealforhold, der blev anvendt til bestemmelse af H_N^{**} . Bestem den resulterende volumenstrøm q_V ved hjælp af formel II6 i tabel 3. Fordel volumenstrømmen ens på alle indløbsåbningerne. Bestem indløbslufthastighederne $v_{k,j}$ som funktion af afstanden H_j op til neutralplanet ved hjælp af formel I2 i tabel 3. Bestem det nødvendige åbningsareal for hver åbning, idet $A_{j,nødv} = V_j / (C_{k,j} v_{k,j})$.

Effektive åbningsarealer

De fundne åbningsarealer er de geometriske åbningsarealer. I visse sammenhænge er man interesseret i de kontraherende eller effektive åbningsarealer.

Når de geometriske åbningsarealer er blevet bestemt fås de kontraherende eller effektive arealer ved brug af (5a).

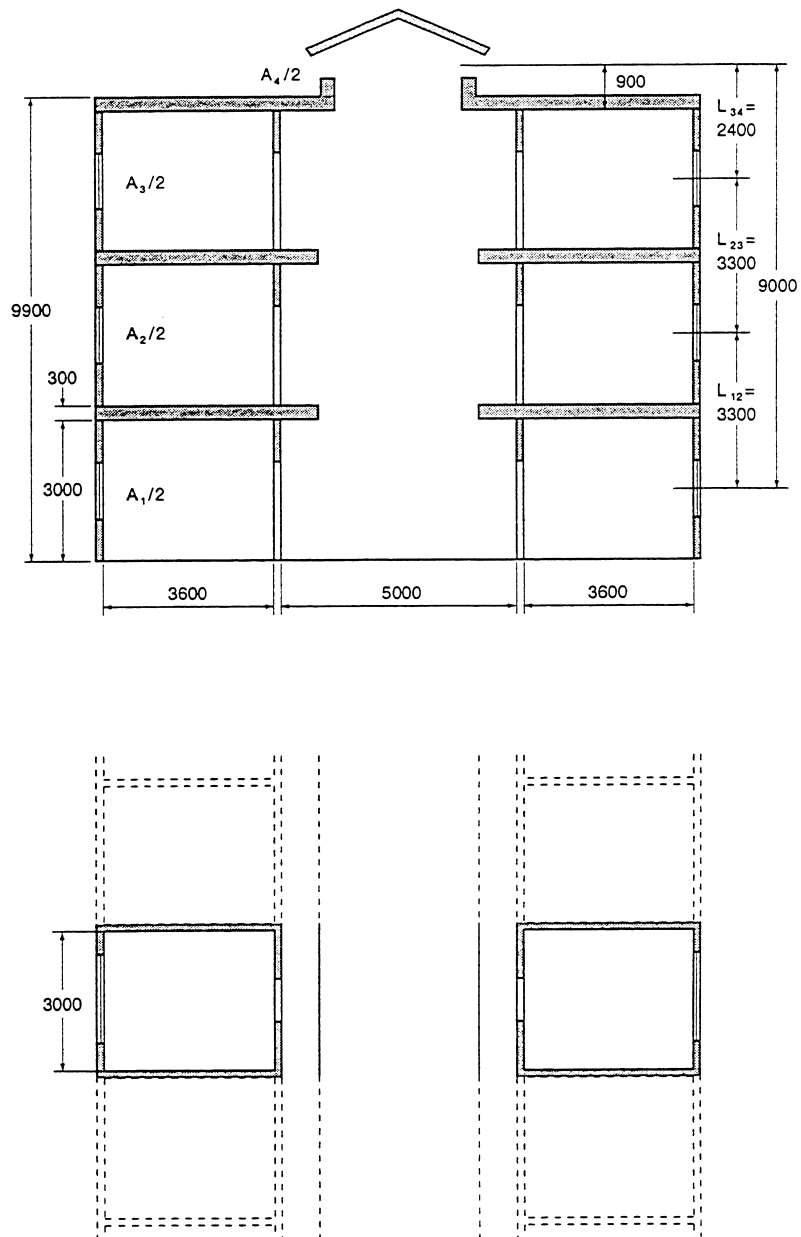
Lufthastigheder og volumenstrømme

Lufthastigheden i indløbsåbningen har eksempelvis interesse i forbindelse med vurderingen af lufthastighederne i et rums opholdszone. Det er hastigheden i åbningens kontraherende tværsnit, der er bestemmende, og den findes af formel I2 i tabellerne 1-4.

Den resulterende volumenstrøm har interesse i forbindelse med vurderingen af luftskiftet i et rum, og volumenstrømmen kan bestemmes af formlerne I6 og II6 i tabellerne 1-4.

Eksempel. Kontorbygning

På figur 9 er vist snit og plan af en 3 m lang sektion i en treetagers kontorbygning der har nord-syd-vendte facader, og som skal ventileres ved naturlig ventilation. Bygningen er symmetrisk omkring et atrium, hvis delvist oplukkelige glastag rager op over kontordelen. Der etableres naturlig ventilation gennem vinduer og gennem taglugerne i glastaget. Der er et vinduesparti pr. kontor og 4 glaspartier over atriumdelen, hvoraf de to er udformet som tagluger, der kan åbnes.



Figur 9. Snit og plan af sektion i treetagers kontorbygning.

Beregningssituationen er en vindstille sommerdag med en udetemperatur på 25 °C. Den naturlige ventilation drives da alene af den termiske opdrift.

Til beregningerne anvendes formelsættet beskrevet i forrige kapitel, og anvendelsen vises gennem følgende to beregningsforløb:

1. Bestemmelse af indetemperatur, når åbningsarealerne kendes.
2. Bestemmelse af nødvendige åbningsarealer ud fra et kendt krav til temperaturdifferensen mellem inde og ude.

I begge beregningsforløb vises endvidere, hvordan beregningerne gennemføres, når der enten antages en konstant indetemperatur eller en lodret, lineær temperaturlagdeling.

Temperaturdifferenser

Temperaturdifferensen mellem inde og ude kan beregnes, når bygningsgeometrien og varmebelastningen er kendte størrelser. Men herudover skal der fastlægges og tages stilling til en række forhold, inden beregningerne kan påbegyndes.

Bygningsdata m.m.

En række bygningsdata kan fås af figur 11. Derudover kan der gives nedenstående oplysninger.

Glasarealer omfatter 6 vinduer à 1,6 m² og 4 tagluger à 2,8 m². Der er overalt anvendt to-lags lavemissionsglas med en skønnet transmittans på 0,65.

Solafskærmning. Der er opsat indvendig solafskærmning under atriets tag med en afskærmningsfaktor på 0,50.

Åbningsarealerne omfatter et oplukkeligt areal på 0,25 m² pr. vindue og 0,21 m² i to af de fire tagluger.

Åbningskoefficienter. Der regnes med, at alle åbninger er skarpkantede med en kontraktionskoefficient $C_k = 0,65$ og en hastighedskoefficient $C_v = 0,95$. Dette giver en åbningskoefficient $C_a = 0,62$, et modstandstal $\zeta = 0,1$ og en strømningskoefficient $\psi = 1 + \zeta = 1,1$ (jf. Andersen, 1996).

Varmebelastninger fra personer m.m. sættes til 20 W/m² i kontorerne og 2 W/m² i atriet.

Varmebelastningen fra solindfald fastsættes ud fra en direkte normalstråling på 770 W/m² ved en solhøjde på 56° og en diffus stråling på 120 W/m². Med den anvendte glastype og solafskærmning fås da følgende solindfald:

570 W pr. sydvendt vindue
125 W pr. nordvendt vindue
1860 W i alt i atriet

U-værdier. Der regnes med 0,3 W/m²K for ydervægge, 0,2 W/m²K for tag, 0,2 W/m²K for gulve og 1,6 W/m²K for glasarealer.

Infiltration. Der regnes med en lufttæthed svarende til en infiltration på 1,6 l/s m² ved 50 Pa.

Friskluftventiler. Hvert kontor er forsynet med en friskluftventil på 30 cm².

Forhåndsregninger og -overvejelser

Af hensyn til de videre beregninger, skal den samlede varmebelastning beregnes, og der skal skønnes en temperaturdifferens for at kunne fastlægge varmetransmissionstabet. Desuden skal infiltrationens og friskluftventilernes betydning vurderes.

Samlet varmebelastning er personbelastningen samt den del af solindfaldet, der afgives til luften ved konvektion fra de indvendige flader. Typisk afgives 10-30 % af solindfaldet til luften (Johnsen et al., 1993). Den samlede varmebelastning bliver 2500 W, når der regnes med, at 30 % af solindfaldet afgives til luften.

Temperaturdifferensen skønnes til 4 K. Dette skøn er baseret på en simplificeret situation, hvor der regnes med $\Phi_o = 2500$ W og hvor kun øverste og nederste åbning indgår i beregningerne. Da fås $\Delta T \sim 5$ K, og dette er på forhånd i overkanten.

Varmetransmissionstabet bliver på ca. 250 W, når $\Delta T = 4$ K.

Overskudsvarmen bliver på $\Phi_o = 2500 - 250 = 2250$ W. Med temperaturdifferenser på 3-5 K vil transmissionstabet normalt kun udgøre en lille del af den samlede varmebelastning. Man kan vælge at se bort fra transmissionstabet og få da en ΔT -værdi med en fejl på under 10 %, og fejlen vil være på den sikre side.

Infiltrationen bestemmes af en trykdifferens på ca. 1 Pa, og dette giver en infiltration på 0,05 til 0,1 l/s m² eller i alt 5-10 l/s. Sammenholdt med ventilationsbehovet på ca. 0,5 m³/s (for at få en temperaturdifferens på højst 4 K) ses, at infiltrationen ikke har nogen ventilationsmæssig betydning om sommeren.

Friskluftventilernes åbningsareal på 30 cm² pr. kontor skal sammenholdes med vinduesåbningsarealet på 2500 cm² pr. kontor. Friskluftventilerne har således heller ikke nogen ventilationsmæssig betydning om sommeren.

Neutralplansplacering

Neutralplanets placering bestemmes ved at opstille en massebalanceligning for åbningerne i de fire højdeniveauer. Ud fra åbningsarealfordelingen kan det på forhånd skønnes, at neutralplanet vil ligge et sted imellem 2. og 3. etages vinduer, og massebalanceligningen reduceres da til:

$$H_1^{1/2} + (H_1 - 3,3)^{1/2} - (6,6 - H_1)^{1/2} - 0,84(9,0 - H_1)^{1/2} = 0 \quad (13)$$

hvor H_1 er den lodrette afstand mellem nederste åbningsmidte og neutralplanet. Ligningen er opfyldt for:

$$H_1 = 4,5 \text{ m}$$

hvilket også opfylder forhåndsantagelsen om neutralplanets placering. Afstanden mellem neutralplan og øverste åbningsmidte bliver:

$$H_4 = H - H_1 = 4,5 \text{ m}$$

Temperaturdifferens ved konstant indetemperatur

Temperaturdifferensen mellem inde og ude kan, når indetemperaturen antages konstant, bestemmes af formel II5 i tabel 2, og hvor den "vægtede" trykhøjde H^* bestemmes af, jf. (9):

$$H_1^* = H_1 (1 + m_2 n_2 q_2^{1/2})^2 \quad (14)$$

Her er:

$$m_2 = C_{a2}/C_{a1} = 1,0$$

$$n_2 = A_2/A_1 = 1,0$$

$$q_2 = H_2/H_1 = (4,5 - 3,3)/4,5 = 0,27$$

således at der fås:

$$H_1^* = 4,5 (1 + 0,27^{1/2})^2 = 10,4 \text{ m}$$

Temperaturdifferensen bliver da, idet $T_i \sim 302 \text{ K}$ og $A_1 = 2 \cdot 0,25 = 0,50 \text{ m}^2$:

$$\Delta T = 7,3 \cdot 10^{-5} \cdot 302 \cdot \left(\frac{2250}{0,62 \cdot 0,50} \right)^{2/3} \left(\frac{1}{10,4} \right)^{1/3} = 3,8 \text{ K}$$

Denne temperaturdifferens er i god overensstemmelse med den på forhånd skønnede differens på 4 K.

Temperaturdifferens ved indvendig temperaturlagdeling

Antagelsen om konstant indetemperatur er en tilnærmelse. Der vil optræde en omtrentlig lineær temperaturlagdeling, idet varmen tilføres omtrentlig jævnt op gennem rummet. Temperaturlagdelingen (eller den lodrette temperaturgradient) kendes ikke på forhånd, men det antages, at temperaturen ud for den øverste åbning er ca. 2 °C højere end ud for den nederste. Temperaturlagdelingen kan da beskrives ved:

$$\Delta T = \Delta T_m + 0,2 y_i \quad (15)$$

hvor ΔT_m er middeltemperaturdifferensen, som optræder midt mellem øverste og nederste åbning, og y_i er den lodrette afstand fra denne midte.

Der vil optræde en meget stor temperaturgradient oppe ved og især oven over solafskærmningen. Men dette er uden betydning, fordi den heroppe afsatte varme ikke indgår i overskudsvarmen, og fordi strækningen er så kort, at det ingen betydning får for trykket i den luftsøjle, der bestemmer drivtrykforholdene.

Middeltemperaturdifferensen ΔT_m kan bestemmes af formel II5 i tabel 3. Det skønnes, at $\Delta T_m \sim 3,5 \text{ K}$, og da fås af ligningerne (7) og (15):

$$\varepsilon = (\Delta T_m + 0,2 y_i)/\Delta T_m = (3,5 + 0,2 \cdot 4,5)/3,5 = 1,26$$

Den "vægtede" trykhøjde H_4^{**} bestemmes af (11):

med

$$H_4 = H - H_1 = 9,0 - 4,5 = 4,5 \text{ m}$$

$$m_3 = C_{a3}/C_{a4} = 1,0$$

$$n_3 = A_3/A_4 = 0,5/0,42 = 1,2$$

$$q_3 = (H_4 - L_{34})/H_4 = (4,5 - 2,4)/4,5 = 0,47$$

$$r_3 = \Delta T_3/\Delta T_4 = 3,9/4,4 = 0,89$$

Der fås da:

$$H_4^{**} = 4,5(1 + 1,0 \cdot 1,2 \cdot 0,47^{1/2} \cdot 0,89) = 13,5 \text{ m}$$

og:

$$\Delta T_m = 7,3 \cdot 10^{-5} \cdot 302 \left(\frac{2250}{1,26 \cdot 0,62 \cdot 0,42} \right)^{2/3} \left(\frac{1}{13,5} \right)^{1/3} = 3,4 \text{ K}$$

Resultatet er så tæt på den antagne differens på 3,5 K, at en ny gennemregning er unødvendig.

Beregningerne kan kontrolleres ved at foretage en varmebalanceberegning. Gennem åbningsarealerne i tredje etages vinduer og i taglugerne bortventileres der følgende varmemængde:

$$\begin{aligned} \Phi_{vent} &= c_p \rho_i V_3 \Delta T_3 + c_p \rho_i V_4 \Delta T_4 \\ &= c_p \rho_i C_{k3} A_3 v_{k3} + c_p \rho_i C_{k3} A_3 v_{k3} \end{aligned} \quad (16)$$

hvor hastighederne v_{k3} og v_{k4} kan bestemmes af formel I4 i tabel 3. Idet $C_k/\psi = C_d$ fås:

$$\begin{aligned} \Phi_{vent} &= c_p \rho_i C_{a3} A_3 \left(\frac{2 \Delta T_m g H_3}{T_u} \right)^{1/2} \Delta T_3 + c_p \rho_i C_{a4} A_4 \left(\frac{2 \Delta T_m g H_4}{T_u} \right)^{1/2} \Delta T_4 \\ &= 1010 \cdot 1,15 \cdot 0,62 \cdot 0,5 \left(\frac{2 \cdot 3,4 \cdot 9,82 \cdot 2,1}{298} \right)^{1/2} 3,8 \\ &\quad + 1010 \cdot 1,15 \cdot 0,62 \cdot 0,42 \left(\frac{2 \cdot 3,4 \cdot 9,82 \cdot 4,5}{298} \right)^{1/2} 4,3 \\ &= 2245 \text{ W} \end{aligned}$$

Dette resultat afviger kun lidt fra den anvendte overskudsvarme Φ_o på 2250 W.

Åbningsarealer ved konstant indetemperatur

I den normale beregningssituation skal de nødvendige åbningsarealer bestemmes, så temperaturdifferensen mellem inde og ude ikke overskrider en på forhånd fastlagt grænse.

Bygningsdata og forhåndsovervejelser er de samme som ved temperaturdifferensberegningerne. Dette betyder igen, at der ses bort fra infiltrationen og friskluftventilerne, og at overskudsvarmen er 2250 W. Der regnes endvidere med, at temperaturdifferensen ikke må overstige 4 K.

Ens åbningsarealer

I første omgang antages, at åbningsarealet i hver af de to oplukkelige tagluger skal være det samme som i hvert af vinduesåbningsarealerne i de seks kontorer. Da fås samme åbningsareal i hvert højdeniveau, dvs. $A_1 = A_2 = A_3 = A_4$.

Afstanden fra nederste åbning til neutralplanet bestemmes af en massebalanceligning analog til (13) blot med den forskel, at talfaktoren 0,84 i sidste led erstattes af et 1-tal. Ligningen opfyldes da af:

$$H_1 = 4,7 \text{ m.} \quad (18)$$

Det nødvendige, samlede åbningsareal $A_{1,nødv}$ i vinduerne på 1. etage kan bestemmes af formel II7 i tabel 2.

Den vægtede afstand H_1^* kan bestemmes af ligning (14) med $m_2 = 1,0$, $n_2 = 1,0$ og $q_2 = (4,7 - 3,3)/4,7 = 0,30$, og der fås:

$$H_1^* = 4,7(1 + 0,3^{1/2})^2 = 11,3 \text{ m}$$

og videre fås:

$$A_{1,nødv} = 6,2 \cdot 10^{-7} \frac{2250}{0,62} \left(\frac{1}{11,3} \right)^{1/2} \left(\frac{302}{4} \right)^{3/2} = 0,44 \text{ m}^2$$

Hvert vindue på alle tre etager samt hver af de to tagluger skal således have et åbningsareal på $0,45/2 = 0,23 \text{ m}^2$.

Neutralplanet kommer til at ligge omtrentlig midt mellem 2. og 3. etages vinduer, og dette vil igen sige, at friskluften strømmer ind gennem 1. og 2. etages vinduer, og indeluften strømmer ud gennem 3. etages vinduer og gennem taglugerne.

Åbningsarealer for ventilering af alle kontorer

Man kan få friskluft ind gennem 3. etages vinduer ved at ændre åbningsarealerne, så neutralplanet rykker op over alle vinduerne, f.eks. op i højde med tredje etages loft. Afstanden mellem nederste åbning og neutralplanet bliver da $H_1 = 8,1 \text{ m}$.

Der ønskes uændret en temperaturdifferens på 4,0 K, og åbningsarealerne i vinduespartierne skal alle være lige store.

Det nødvendige indløbsareal på 1. etage kan bestemmes af formel II7 i tabel 2, og den vægtede trykhøjde H_1^* bestemmes i dette tilfælde af:

$$H_1^* = H_1 (1 + m_2 n_2 q_2^{1/2} + m_3 n_3 q_3^{1/2})^2 \quad (19)$$

hvor

$$m_2 = C_{a2}/C_{a1} = 1,0$$

$$m_3 = C_{a3}/C_{a1} = 1,0$$

$$n_2 = (A_2/A_1) = 1,0$$

$$n_3 = A_3/A_1 = 1,0$$

$$q_2 = (H_1 - L_{12})/H_1 = 4,8/8,1 = 0,59$$

$$q_3 = (H_1 - L_{12} - L_{23})/H_1 = 1,5/8,1 = 0,18$$

således at der fås:

$$H_1^* = 8,1 (1 + 0,59^{1/2} + 0,18^{1/2})^2 = 38,9 \text{ m} \quad (20)$$

Åbningsarealet bestemmes da af:

$$A_{1,n\ddot{o}dv} = 6,2 \cdot 10^{-7} \frac{2250}{0,62} \left(\frac{1}{38,9} \right)^{1/2} \left(\frac{302}{4,0} \right)^{3/2} = 0,24 \text{ m}^2 \quad (21)$$

eller 0,12 m² pr. vindue, dvs. ca. det halve af de før bestemte åbningsarealer på 0,25 m².

Det nødvendige åbningsareal i taglugerne kan bestemmes af formel II9 i tabel 2. Her er $H_4^* = H_4 = 9,1 - 8,1 = 1,0$ m (afstanden op til neutralplanet er øget med 0,1 m for at medregne den større åbningshøjde i taglugerne). Der fås da:

$$A_{4,n\ddot{o}dv} = 6,2 \cdot 10^{-7} \frac{2250}{0,62} \left(\frac{1}{1,0} \right)^{1/2} \left(\frac{298}{4,0} \right)^{3/2} = 1,5 \text{ m}^2 \quad (22)$$

eller næsten det firedobbelte af det oprindelige taglugetåbningsareal på 2 · 0,21 m².

Åbningsarealer for samme ventilering af alle kontorer

Med neutralplanet placeret i loftshøjde på 3. etage og med ens vinduesåbningsarealer i de tre etager vil der komme mest friskluft ind i kontorerne i nederste etage, da lufthastighederne i åbningerne er størst her. Der kan opnås samme friskluftmængde i alle kontorer ved at variere vinduesåbningsarealerne. Lufthastighederne kan derimod ikke ændres, da de alene er afhængige af åbningsafstanden fra neutralplanet.

Der ønskes en uændret temperaturdifferens på 4,0 K på 3. etage. Taglugetåbningsarealet, der kan bestemmes af formel II9 i tabel 2, bliver da uændret 1,5 m², jf. (22).

Volumenstrømmen kan bestemmes af formel II6 i tabel 2, når indeks "1" erstattes af indeks "4". Den kan også bestemmes mere direkte af:

$$q_V = \frac{\Phi_o}{c_p \rho_i \Delta T} = \frac{2250}{1010 \cdot 1,17 \cdot 4,0} = 0,48 \text{ m}^3/\text{s} \quad (23)$$

Der skal derfor strømme 0,08 m³/s ind gennem hvert af de seks kontorvinduer.

Lufthastigheden i vinduesåbningerne kan bestemmes af formel I2 i tabel 2:

$$v_k = \left(\frac{2 \Delta T g y}{\psi_1 T_i} \right)^{1/2} = \left(\frac{2 \cdot 4,0 \cdot 9,82 \cdot y}{1,1 \cdot 302} \right)^{1/2} = 0,49 y^{1/2} \quad (24)$$

hvor y er afstanden fra neutralplanet ned til midten af den pågældende vinduesåbning. Det nødvendige åbningsareal pr. vindue bliver da:

$$A_{n\ddot{o}dv.} = \frac{q_v}{C_k v_k} = \frac{0,080}{0,65 \cdot 0,48 y^{1/2}} = \frac{0,25}{y^{1/2}} \quad (25)$$

og for vinduerne på de enkelte etager fås:

1. etage, $y = 8,1$ m: $A_{n\ddot{o}dv} = 0,09$ m²/vindue
2. etage, $y = 4,8$ m: $A_{n\ddot{o}dv} = 0,11$ m²/vindue
3. etage, $y = 1,5$ m: $A_{n\ddot{o}dv} = 0,21$ m²/vindue

Åbningsarealer ved indvendig temperaturlagdeling

Der vil som tidligere nævnt altid optræde en temperaturlagdeling i den betragtede kontorbygning. Der antages samme temperaturlagdeling som tidligere beskrevet ved ligning (15), og det kræves nu, at den maksimalt tilladte temperaturdifferens på 4 K nu optræder ud for kontorerne på tredje etage.

Der gennemføres samme tre beregningsforløb som ved konstant holdt indetemperatur.

Ens åbningsarealer

Ens åbningsarealer betyder, at $A_1 = A_2 = A_3 = A_4$, og da bliver $H_1 = 4,7$ m, jf. (18).

Først bestemmes det nødvendige udløbsareal $A_{4,n\ddot{o}dv}$ i øverste niveau, dvs. i taglugerne, af formel II7 i tabel 3. Den indgående middeltemperaturdifferens ΔT_m er temperaturdifferensen midt mellem øverste og nederste åbningsmidte, og dvs. i højden $9,0/2 = 4,5$ m over første etages åbningsmidte. Ud for tredje etage, dvs. 2,1 m over midterplanet, skal der endvidere gælde, at temperaturdifferensen $\Delta T_3 = 4,0$ K. Middeltemperaturdifferensen bestemmes da af, jf. ligning (15):

$$4,0 = \Delta T_m + 0,2 \cdot 2,1$$

hvilket fører til $\Delta T_m = 3,6$ K. Videre fås:

$$\Delta T_4 = 3,6 + 0,2 \cdot 4,5 = 4,5 \text{ K}$$

$$\varepsilon = 4,5/3,6 = 1,25$$

Den "vægtede" trykhøjde H_4^{**} bestemmes af ligning (16) med:

$$H_4 = H - H_1 = 9,0 - 4,7 = 4,3 \text{ m}$$

$$m_3 = 1,0$$

$$n_3 = 1,0$$

$$q_3 = (4,3 - 2,4)/4,3 = 0,44$$

$$r_3 = 4,0/4,5 = 0,89$$

Der fås da:

$$H_4^{**} = 4,3(1 + 0,44^{1/2} \cdot 0,89)^2 = 10,9$$

og videre:

$$A_{4,n\ddot{o}dv} = 6,2 \cdot 10^{-7} \frac{2250}{1,25 \cdot 0,62} \left(\frac{1}{10,9} \right)^{1/2} \left(\frac{298}{3,6} \right)^{3/2} = 0,41 \text{ m}^2$$

Taglugeåbningsarealet skal altså i alt være 0,41 m², og hvert vinduesåbningsareal skal være 0,41/2 = 0,21 m².

En kontrol af varmebalancen viser en bortventileret varme på 2210 W, hvilket afviger mindre end 2 % fra overskudsvarmen på 2250 W.

En ændring af temperaturdifferenskravet fra $\Delta T_3 = 4 \text{ K}$ til $\Delta T_3 = 3 \text{ K}$ medfører et arealkrav på $A_{4,n\ddot{o}dv} = 0,64 \text{ m}^2$ og dermed et vinduesåbningsareal på 0,32 m².

Med $H_1 = 4,7 \text{ m}$ ligger neutralplanet under 3. etages vinduer, således at der kun kommer frisk luft ind gennem vinduerne på 1. og 2. etage.

Åbningsarealer for ventilering af alle kontorer

For også at få frisk luft ind gennem vinduerne på 3. etage skal åbningsarealerne korrigeres, så neutralplanet kommer op i højde med f.eks. 3. etages loft. Der regnes uændret med en temperaturdifferens på 3. etage på $\Delta T_3 = 4 \text{ K}$, således at lagdelingskoefficienten ligeledes er uændret $\epsilon = 1,25$. Endvidere skal alle vinduesåbningsarealer være lige store, dvs. $A_1 = A_2 = A_3$.

Da taglugerne er de eneste åbninger oven over neutralplanet, kan det nødvendige åbningsareal i lugerne bestemmes ved anvendelse af formel II7 i tabel 3 med $H_4^{**} = H_4 = 1,0$ eller direkte af formel II7 i tabel 4. Afstanden op til neutralplanet er øget med 0,1 m for at medregne den større åbningshøjde i taglugerne. Desuden er $\Delta T_m = 3,6 \text{ K}$ som fundet ovenfor. Der fås da:

$$A_{4,n\ddot{o}dv} = 6,2 \cdot 10^{-7} \frac{2250}{1,25 \cdot 0,62} \left(\frac{1}{1,0} \right)^{1/2} \left(\frac{298}{3,6} \right)^{3/2} = 1,4 \text{ m}^2$$

eller 0,7 m² pr. hver af de to oplukkelige tagluger.

Det nødvendige åbningsareal i nederste niveau, dvs. $A_{1,n\ddot{o}dv}$, kan bestemmes af formel II9 i tabel 3 eller i dette tilfælde mere direkte af formel II9 i tabel 4. For den indgående H_1^* kan der anvendes den tidligere fundne $H_1^* = 39,0 \text{ m}$, jf. (20). Der fås da:

$$A_{1,n\ddot{o}dv} = 6,2 \cdot 10^{-7} \frac{2250}{1,25 \cdot 0,62} \left(\frac{1}{39,0} \right)^{1/2} \left(\frac{302}{3,6} \right)^{3/2} = 0,22 \text{ m}^2$$

eller 0,11 m² pr. vindue.

Som kontrol af de foretagne tilnærmelser undersøges i hvor høj grad masse- og energibalancen er opfyldt.

Massestrømmen gennem udløbet bestemmes af:

$$q_{M,ud} = \rho_i C_{a4} A_4 v_4 = 1,15 \cdot 0,62 \cdot 1,40 \cdot \left(\frac{2 \cdot 3,6 \cdot 9,82 \cdot 1,0}{298} \right)^{1/2}$$

$$= 0,49 \text{ kg/s}$$

Den samlede massestrøm gennem indløbsåbningerne bliver:

$$q_{M,ind} = 1,16 \cdot 0,62 \cdot 0,23 \left(\frac{2 \cdot 3,6 \cdot 9,82}{302} \right)^{1/2}$$

$$[8,1^{1/2} + (8,1-3,3)^{1/2} + (8,1-6,6)^{1/2}] = 0,50 \text{ kg/s}$$

Den bortventilerede varmemængde bliver:

$$\Phi_{vent} = c_p q_M \Delta T_4 = 1010 \cdot 0,49 \cdot 4,5 = 2230 \text{ W}$$

Det ses, at både massebalancen og energibalancen kan betragtes som værende tilfredsstillende opfyldt.

Åbningsarealer for samme ventilering af alle kontorer

Der ønskes uændret $\Delta T_3 = 4 \text{ K}$ (på 3. etage). Taglugeåbningsarealet $A_{4,nødv}$, der kan bestemmes af formel II7 i tabel 3 eller tabel 4, bliver da uændret $1,4 \text{ m}^2$, jf. foregående afsnit.

Volumenstrømmen kan bestemmes af formel II6 i tabel 3, eller mere direkte af formel II6 i tabel 4 i dette tilfælde, hvor der kun er et åbningsniveau over neutralplanet. Der fås en volumenstrøm på $0,42 \text{ m}^3/\text{s}$. Der kan også anvendes den i forrige afsnit fundne massestrøm på $0,49 \text{ kg/s}$, som svarer til en volumenstrøm på:

$$q_V = q_M / \rho_u = 0,49 / 1,16 = 0,42 \text{ m}^3/\text{s}$$

Samme friskluftmængde i alle kontorer betyder da, at der skal strømme $0,07 \text{ m}^3/\text{s}$ gennem hvert vindue. Lufthastigheden i vinduesåbningerne kan bestemmes af formel I2 i tabel 3:

$$v_k = \left(\frac{2 \cdot 3,6 \cdot 9,82 \cdot y}{1,1 \cdot 302} \right)^{1/2} = 0,46 y^{1/2}$$

Det nødvendige åbningsareal i vinduerne bestemmes da af:

$$A_{nødv} = \frac{q_V}{C_k v_k} = \frac{0,07}{0,65 \cdot 0,46 y^{1/2}} = \frac{0,23}{y^{1/2}}$$

Dette fører til følgende vinduesåbningsarealer på de enkelte etager:

1. etage, $y = 8,1 \text{ m}$: $A_{nødv} = 0,08 \text{ m}^2/\text{vindue}$
2. etage, $y = 4,8 \text{ m}$: $A_{nødv} = 0,11 \text{ m}^2/\text{vindue}$
3. etage, $y = 1,5 \text{ m}$: $A_{nødv} = 0,19 \text{ m}^2/\text{vindue}$

Diskussion

De beregnede temperaturdifferenser og åbningsarealer er sammenfattet i tabel 5.

Tabel 5. Sammenfatning af beregnede temperaturdifferenser og åbningsarealer i en treetagers kontorbbygning.

	Konstant indetemperatur			Temperaturlagdeling			
	1. etage	2. etage	3. etage	1. etage	2. etage	3. etage	Tagluge
<u>Temperaturdifferensberegninger</u>							
Forudsatte åbningsarealer, m ²	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,21
Beregnede temperaturdifferenser, °C	3,9	3,9	3,9	2,5 ¹⁾	3,2 ¹⁾	3,8 ¹⁾	4,3 ¹⁾
<u>Åbningsarealberegninger</u>							
Forudsatte temperaturdifferenser, °C	4,0	4,0	4,0	2,7	3,4	4,0	4,5
Beregnede arealer, m ²	0,23	0,23	0,23	0,21	0,21	0,21	0,21
Ens åbningsarealer	0,12	0,12	0,12	0,11	0,11	0,11	0,70
Friskluft i alle kontorer ²⁾	0,09	0,12	0,21	0,08	0,11	0,19	0,70
Samme friskluftmængde i alle kontorer ²⁾							

¹⁾ Middeltemperaturdifferensen er 3,6 °C

²⁾ Neutralplanet er beliggende i højde med 3. etages loft

Fuldt åbne har vinduespartierne et åbningsareal på $0,88 \text{ m}^2$, og taglugerne et åbningsareal på $1,9 \text{ m}^2$. De beregnede, nødvendige arealer kan således øges med en faktor 3, og dette vil reducere temperaturdifferenserne med en faktor 2 fra ca. $4 \text{ }^\circ\text{C}$ til ca. $2 \text{ }^\circ\text{C}$.

De væsentligste usikkerheder ved beregningerne knytter sig til overskudsvarmen, temperaturlagdelingen, åbningsarealerne og kontraktionskoefficienterne.

Usikkerheden på overskudsvarmen skyldes især, at solindfaldet er bestemt ud fra nogle overslagsberegninger baseret på solintensiteten, glassets transmittans og solafskærmningen, og at den andel på 30 % af solindfaldet, der afgives til luften, ligeledes er et skøn.

Temperaturlagdelingen er baseret på en skønnet lodret temperaturgradient på $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ pr. m. Det ses af tabel 5, at temperaturlagdelingen i det aktuelle tilfælde ikke influerer væsentligt på beregningsresultaterne. Dette skyldes, at der med en temperaturgradient på $0,2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{m}$ er tale om en beskedent temperaturlagdeling.

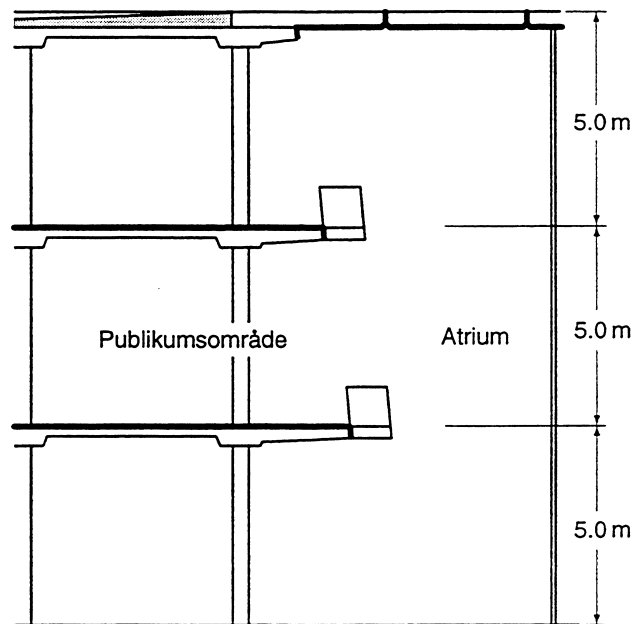
Åbningsarealernes størrelse er usikre derved, at der kun er regnet med åbningsarealet fra selve åbningsspalten. De trekantformede åbninger i siderne, når vinduerne og taglugerne kun er delvist åbne, er således ikke medtaget. Endelig svarer de anvendte kontraktionskoefficienter til værdierne for skarpkantede åbninger. Så snart luften bliver ledt ind eller ud på en eller anden måde, mindskes kontraktionen, hvilket resulterer i en større kontraktionskoefficient og dermed et større, effektivt åbningsareal.

Med den anvendte middeltemperaturdifferens på $4 \text{ }^\circ\text{C}$ og en drivhøjde $H_1 = 8 \text{ m}$ (når neutralplanet er placeret i niveau med 3. etages loft) bliver lufthastigheden i nederste etages vinduer på ca. $1,5 \text{ m/s}$. Hastigheden kan blive fordoblet i forårs- og efterårsmånederne, hvor temperaturdifferensen kan nå op over $15 \text{ }^\circ\text{C}$. Dette kan igen resultere i trækgener i opholdszonerne, hvilket man skal være opmærksom på ved udformningen og placeringen af indløbsåbningerne.

Eksempel. Atrium

På figur 10 er vist snit af et atrium med nord-syd-vendte gavle, der er 15 m højt, 30 m langt og 6 m bredt. Atriet skal ventileres ved naturlig ventilation og indetemperaturen ud for de tilstødende publikumsområder må ikke overstige 30 °C på en vindstille sommerdag med en udetemperatur på 27 °C.

Der ønskes bestemt de effektive åbningsarealer til brug som startværdier for edb-beregninger med et CFD-program (Computational Fluid Dynamics).



Figur 10. Snit af atrium.

Bygningsdata

En række bygningsdata kan fås af figur 12. Derudover kan der gives nedenstående oplysninger.

Glasdækkede arealer omfatter glastag med et vandret projiceret areal på 180 m², og to gavle à 90 m². Der er overalt anvendt et to-lags, let reflekterende glas, der anslås at have en transmittans på 0,55.

Solafskærmning er etableret indvendigt under glastaget og langs sydgavlen, og den anslås at have en afskærmningsfaktor på 0,5.

Åbningsarealer. Der regnes i første omgang med lige store ind- og udløbsarealer. Indløbsåbningen er en enkelt åbning i atriets nordende. Af komfortmæssige årsager placeres den, så dens underkant er 2,2 m over gulvniveau. Udløbsåbningerne findes i glastaget.

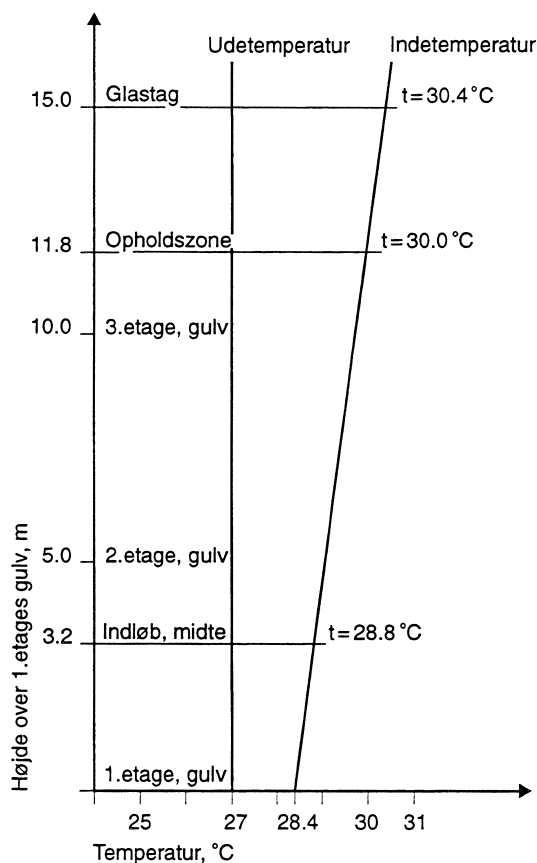
Åbningskoefficienter. Der regnes med skarpkantede åbninger med en kontraktionskoefficient $C_k = 0,65$ og en hastighedskoefficient $C_v = 0,95$. Dette giver en åbningskoefficient $C_a = 0,62$.

Forhåndsregninger og -overvejelser

De nødvendige forhåndsregninger og -overvejelser vedrører åbningsdimensioner, temperaturlagdeling og overskudsvarme.

Indløbets åbningshøjde forventes at blive så stor, at den får indflydelse på drivhøjden. Åbningshøjden skønnes i første omgang til 2 m. Midten af indløbet kommer da til at ligge 3,2 m over gulv.

Temperaturlagdelingen antages at være lineær, da der kan regnes med varmekilder fordelt i hele atriets højde som følge af, at der midt på dagen vil være solbeskinnede, indvendige flader op gennem hele atriet. Der antages en temperaturforskel på 2 °C mellem tag og gulv svarende til en temperaturgradient på 0,13 °C/m. Der fås da en lodret temperaturprofil som vist på figur 11, når temperaturen ud for opholdszonen på 3. etages balkon ikke må overstige 30 °C. Dette resulterer i en middeltemperaturdifferens mellem nederste og øverste åbning på $\Delta T_m = 2,6$ °C.



Figur 11. Antaget temperaturlagdeling i atrium.

Solindfaldet bliver på ca. 54 kW når solen står i syd og der tages hensyn til den anvendte glastype og solafskærmning.

Overskudsvarmen bestemmes ud fra en antagelse om, at 30 % af solindfaldet afgives til luften, og at varmetransmissionstabet er ca. 2 kW. Der fås da en overskudsvarme på 14 kW.

Arealberegninger

I forbindelse med CFD-beregninger er det hensigtsmæssigt at arbejde med de effektive åbningsarealer, da man så i første omgang undgår at skulle tage stilling til størrelsen af kontraktionen og friktionstabt i åbningerne.

Det effektive areal bestemmes ved at sætte åbningskoefficienten $C_a = C_v \cdot 1,0 = 0,95$ i formelsættet, jf. (4a). Det geometriske areal kan efterfølgende bestemmes som $A = A_{eff}/C_k$, jf. (5a).

Med lige store indløbs- og udløbsarealer vil neutralplanet med god tilnærmelse ligge midt mellem de to åbningsarealer, så $H_1 = (15 - 3,2)/2 = 5,9$ m. Endvidere er lagdelingsfaktoren $\varepsilon = \Delta T_\phi/\Delta T_m = 3,4/2,6 = 1,31$.

Det effektive indløbsareal kan bestemmes af formel II7 i tabel 1 med $\Delta T = \Delta T_m$ og $\Phi_o = \Phi_{o\varepsilon}$ samt ved at anvende $C_{a1} = 0,95$. Der fås da:

$$A_{1,eff} = 6,2 \cdot 10^{-7} \frac{14000}{1,31 \cdot 0,95} \left(\frac{1}{5,9} \right)^{1/2} \left(\frac{303}{2,6} \right)^{3/2} = 3,6 \text{ m}^2$$

Det geometriske indløbsareal kan bestemmes af, idet $C_{k1} = 0,65$:

$$A_1 = A_{1,eff}/C_{k1} = 3,6/0,65 = 5,6 \text{ m}^2$$

Indløbsarealet kan eksempelvis være en 2 m bred og 2,8 m høj åbning. Åbningsafstanden og afstanden til neutralplanet bliver da henholdsvis 0,4 m mindre og 0,2 m mindre end antaget. En ny gennemregning resulterer i et ca. 1,5 % større åbningsareal.

Det effektive og det geometriske udløbsareal bliver ligeledes henholdsvis 3,6 og 5,6 m².

Summary

SBI Report 301: Natural Ventilation by Thermal Buoyancy

A set of formulas for calculating natural ventilation in a room, with either constant temperature or with vertical, linear temperature stratification is presented.

The design of the room and the horizontal location of the openings are not important for the application of the set of formulas. The important parameters are the vertical distance between openings, the shape of the openings and the heat load. Moreover, the location of heat sources is important, as the location should not be so unsymmetrical that it causes significant horizontal temperature gradients.

It may be difficult to determine opening coefficients and the size of solar gain, especially the part of the solar gain given off to the ambient air.

The set of formulas can be used for determining temperature differences or necessary opening areas, and during the design phase it will be suitable for assessing alternative solutions.

The use of the formulas is demonstrated for dimensioning natural ventilation in a three-storey office building and for calculating the size of the opening areas in an atrium to be used as starting values for advanced air flow calculations.

Referencer

Aiulfi, D.: Rådgivende Ingeniørfirma, Sorane, Lausanne, Schweiz. Personlig kontakt 1994.

Andersen, K.T.: Theoretical Considerations on Natural Ventilation by Thermal Buoyancy. ASHRAE Transactions, Vol. 101, Part 2, 1995a.

Andersen, K.T.: Vurdering af luftstrømningsmodeller for glasbygninger. Statens Byggeforskningsinstitut. SBI-rapport 247, Hørsholm, 1995b.

Andersen, K.T.: Inlet and Outlet Coefficients. A Theoretical Analysis. ROOMVENT '96, Japan. 1996.

Andersen, K.T.: Natural Ventilation by Thermal Buoyancy with Temperature Stratification. ROOMVENT '98, Sverige, 1998a.

Andersen, K.T.: Natural Ventilation in Rooms with several Openings and with Temperature Stratification. AIVC Conference, Norge 1998b.

Heiselberg, P., Thau, U.M., Trelldal, J.: Det Kongelige Bibliotek, Amager - Projektering af naturlig ventilation. VVS-bladet nr. 15, dec. 1996.

Höglund, I., Ottoson, G., Öman, R.: Överglasning av stora bygnads-volymer. Skärholmens Centrum. Institutionen för byggnadsteknik, Meddelande nr. 150, KTH, Stockholm, 1987.

Idelchik, I.E.: Handbook of Hydraulic Resistance, Hemisphere Publ., New York, 1986.

Johansen, K., Grau, K., Christensen, J.E.: tsbi 3. Edb-program til termisk simulering af bygninger og installationer. Brugervejledning. Statens Byggeforskningsinstitut, SBI, Hørsholm, 1993.

Svidt, K., Hendriksen, O.J., Heiselberg, P.: Sukkertoppen i Valby - analyse af indeklimaet i et naturligt ventileret atrium. VVS-bladet nr. 15, dec. 1996.

Symbolliste

		Enhed
A	åbningsareal	m^2
C_k	kontraktionskoefficient	
C_a	åbningskoefficient, se formel (4a)	
C_v	hastighedskoefficient, se formel (4b)	
H	lodret afstand mellem midte af øverste og nederste åbning	m
H_1	lodret afstand mellem neutralplanet og midte af nederste indløb, se formel (1) og (2)	m
H_2	lodret afstand mellem neutralplanet og midte af udløb ved to åbninger, se formel (3)	m
H_j	lodret afstand mellem neutralplan og åbningsmidte for åbning nr. j	m
H_N	lodret afstand mellem neutralplanet og midte af øverste åbning ved åbninger i flere end to niveauer	m
H_1^*	"vægtet" trykhøjde under neutralplanet ved åbninger i flere end to niveauer, se formel (8) og (9)	m
H_N^*	"vægtet" trykhøjde over neutralplanet ved åbninger i flere end to niveauer, se formel (10)	m
H_N^{**}	"vægtet" trykhøjde over neutralplanet ved flere åbningsniveauer og temperaturlagdeling, se formel (11) og (12)	m
$L_{j,n}$	lodret afstand mellem åbningerne nummer j og nummer n	m
N	antal åbninger eller åbningsniveauer	
N_1	antal åbninger eller åbningsniveauer under neutralplanet	
T	absolut temperatur	K
c_p	varmefylde (= 1010 J/kg K)J/kg K	
g	tyngdeacceleration (= 9,82 m/s ²)	m/s ²
m	åbningskoefficientforhold	
n	åbningsarealforhold	
p	tryk	Pa
q	åbningsafstandsforhold	
q_V	volumenstrøm	m ³ /s
q_M	massestrøm	kg/s
r	temperaturdifferensforhold	
v	lufthastighed	m/s
ε	temperaturfaktor, se formel (7)	
ρ	luftens massefylde	kg/m ³
ζ	modstandstal	
Φ_o	overskudsvarme	W
Φ_{oe}	korrigeret overskudsvarme ved temperaturlagdeling se formel (6) og (7)	W
ψ	strømningskoefficient (= 1 + ζ)	

Indices

k	kontraktion	N	øverste åbning
i	indvendig	u	udvendig
j	åbningsnummer	1	nederste åbning
m	middel	2	udløb ved to åbninger

Rapporten behandler et simpelt formelsæt til beregning af naturlig ventilation ved termisk opdrift. Der betragtes først det simple tilfælde med to åbninger og ensartet indetemperatur. Derefter vises, hvordan formelsættet kan udvides til også at omfatte rum med temperaturlagdeling og med åbninger i mange højdeniveauer. Anvendelsen af formelsættet vises på en treetagers kontorbygning og på et atrium. Rapporten henvender sig til forskere og rådgivere, der beskæftiger sig med naturlig ventilations-systemer.