



Ventilation

DATAMATBEREGNING AF LUFTSTRØMNINGER I BYGNINGER

Christen F. Pedersen

RESUMÉ:

Ved hjælp af et program, udviklet til beregning af luftstrømninger i bygninger, kan variationerne i luftforsyningen til rummene ved variation af forskellige ydre parametre som fx vindtryk, temperatur, kanaltryk bedømmes. Programmets principielle opbygning beskrives. Programmets anvendelse på et eksempel, der omfatter ca. 50 rum indenfor en etage i en ventileret bygning, omtales. Mulighederne for at udvide programmet til at omfatte luftstrømningsproblemer i højhuse samt problemer vedrørende røgbevægelser i bygninger under brand nævnes.

Notatet er resultatet af et forskningsarbejde udført af forfatteren for SBI.

August 1977

YDERLIGERE OPLYSNINGER KAN FÅS VED HENVENDELSE TIL:

Mag.scient. Christen F. Pedersen, Danmarks Ingeniørakademi, elektroafdelingen

Eftertryk tilladt med kildeangivelsen SBI-NOTAT og nr. Ved brudstykkevis gengivelse er det dog en forudsætning, at ovenstående resumé medtages, da meninger og resultater kan forflygtiges, hvis tekst eller illustrationer tages ud af den oprindelige sammenhæng.

Beregningsmetoder i almindelighed

Ønsket om at kunne simulere luftstrømningsforholdene eller andre indeklimatiske bygningsforhold under forskellige ydre omstændigheder er ikke nyt, men hvor man til disse formål tidligere anvendte analogregnemaskiner med elektriske strømme og spændinger som substitutter for de indeklimatiske parametre, er området nu stort set domineret af digitalregnemaskinerne. Der findes flere publicerede beskrivelser af programmer til beregning af luftstrømme i bygninger, og den almindelige fremgangsmåde er, at man opfatter luftstrømningssystemet, primært ventilationssystemet, i lighed med et elektrisk netværkssystem og benytter de Kirchhoff'ske love til løsning af et stationært luftstrømningsproblem.

To metoder omtales som generelle løsningsprincipper: "The knot method" og "The loop method". "The knot method", som måske også kunne kaldes grenstrømsmetoden, går ud på, at alle knudepunkter indledningsvis tilskrives visse tryk. Dette medfører bestemte grenstrømme mellem knudepunkterne. Betingelsesligningerne, der skal opfyldes, er af formen $\sum Q_i = 0$ for hvert knudepunkt. Q_i er grenstrømmen i den i 'te gren, som fører til den pågældende knude. Knudepunktstrykkene korrigeres så iterativt ved hjælp af betingelsesligningerne, indtil ligevægt er opnået. I "The loop method" benyttes cirkulerende maskestrømme. Med et system af cirkulerende maskestrømme er betingelsesligningerne af formen $\sum \Delta P_k = 0$, dvs trykfaldet langs en lukket maske er nul. Dette system skal ligeledes løses iterativt. Med cirkulerende maskestrømme er kontinuitetsbetingelsen i knudepunkterne automatisk opfyldt.

Ligningssystemet i det anvendte program

Metoden i nærværende program må nok betegnes som en blanding af begge metoder, idet der benyttes både maskestrømme og grenstrømme. Ventilationssystemet behandles som et maskestrømsproblem, dog også med ikke-cirkulerende maskestrømme og luftstrømme gennem fuger som grenstrømme.

Maskeligningerne udtrykker, at summen af trykfaldene gennem masken enten, hvis masken er lukket som ovenfor, er nul, eller, hvis den går fra ét trykniveau til et andet, er lig trykdifferensen mellem trykniveauerne. Som trykniveau kan man fx tænke på trykområdet på den ene eller den anden side af bygningen.

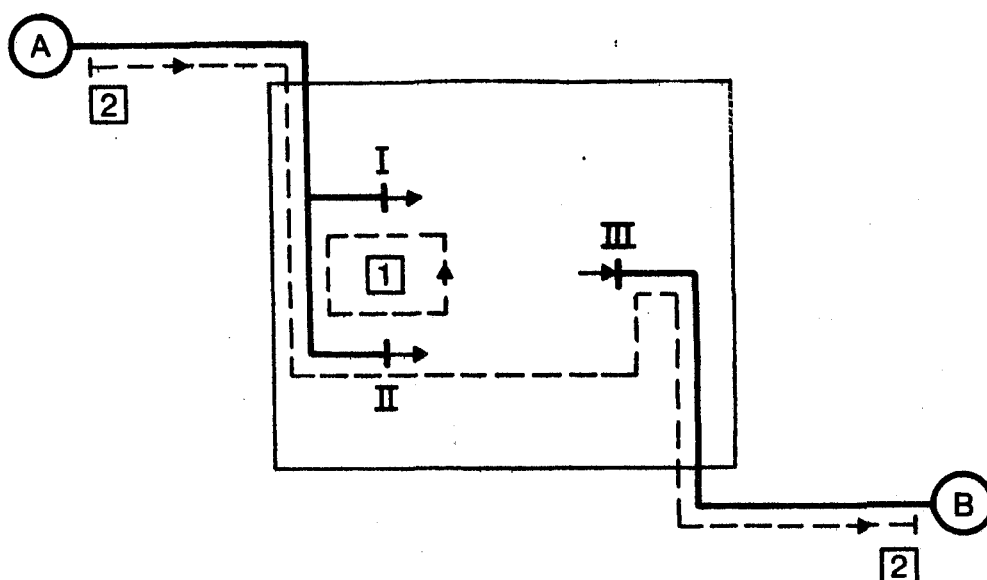


Fig. 1. Eksempel på åben og lukket maske.

I fig. 1 føres der luft til rummet fra et trykniveau ved A, og der føres luft fra rummet til trykniveauet ved B. Når ventilationssystemet balancerer, er luftstrømningsforholdene defineret ved kendskab til to parametre, fx de ved anemostaterne I og II udblåste luftstrømme V_1 og V_2 . For de to viste masker kan opskrives maskeligningerne

$$\begin{aligned} \text{maske 1: } & \Sigma(\text{trykfald over rørstykker}) + \Sigma(\text{trykfald over enkeltmodstande}) \\ & - \Sigma(\text{trykstigning over ventilatorer}) = 0 \end{aligned}$$

$$\text{maske 2: } \Sigma(\text{trykfald over rørstykker}) + \dots \text{ osv} = p_A - p_B$$

De enkelte led vedrørende trykfald er af formen

$$a V_1^2, \quad b(V_1 \pm V_2)^2 \quad \text{eller} \quad c V_2^2,$$

hvor a, b og c vil afhænge noget af V_1 og V_2 . Ligningerne er ulineære og må løses ved iterationsmetoder.

Maskeligningsmetoden, som her er illustreret på et ventilationsanlæg, kan principielt også anvendes på luftstrømme gennem døre og vinduer. Hovedretningslinien er, at luftstrømningssystemet opdeles i masker, som enten er lukkede, eller som går fra et trykniveau til et andet, og antallet af masker er bestemt ved antallet af uafhængige luftstrømningsvariable.

De grundlæggende formler, som anvendes ved tryktabsberegningerne, er for rørstykker

$$\Delta p = \lambda \frac{1}{2} \rho v^2 \frac{L}{D} = \lambda \frac{1}{2} \rho \left(\frac{V}{A}\right)^2 \frac{L}{D} \quad (1)$$

og for enkeltmodstande

$$\Delta p = \zeta \frac{1}{2} \rho v^2 = \zeta \frac{1}{2} \rho \left(\frac{V}{A}\right)^2 \quad (2)$$

hvor V er volumenstrømmen, A tværsnitsarealet, L rørlængden og D den hydrauliske diameter. For λ og ζ anvendes almindeligt anerkendte værdier angivet i litteraturen, jfr (3).

For lækagen gennem fuger ved vinduer og døre angives hyppigt formlen

$$\Delta p = c V^n$$

hvor n er omkring 1,4 - 1,6 for normale vinduesfuger og op til 2,0 for meget åbne fuger. Her anvendes dog en anden approksimation,

$$\Delta p = c_1 V + c_2 V^2 \tag{3}$$

hvor c_1 og c_2 er konstanter, der kan bestemmes på grundlag af lækagemålinger på de pågældende vinduer og døre. Strømningen gennem fuger skal her betegnes lækage, uanset at den undertiden er tilsigtet.

Ventilatorerne i systemet kan repræsenteres ved en 2. ordens tilnærmelse til ventilator karakteristikken for konstant omløbsfrekvens, hvis det ikke er tilstrækkelig nøjagtigt at regne med en konstant trykstigning.

Modifikation af begrebet trykniveau

Ønsker man at bestemme luftstrømmene såvel i ventilationssystemet som gennem vinduer og døre, fx med givne ydre vindtryk på bygningens sider og ved givne tryk i hovedkanalerne for indblæsning og udsugning, med en gennemført maskestrømsmetode, fås temmelig lange masker, idet de skal gå fra den ene side af bygningen til den anden. Maskeligningssystemet bliver derved vanskeligt at holde rede på.

Problemerne kan også belyses ved lækagen gennem en dør mellem to rum. Det vil være nødvendigt blot på grund af denne ene dør at etablere en lukket maske, hvori trykfaldet over døren indgår. I eksemplet fig. 2 går masken gennem døren ind i udsugningsristen i rum 2 og tilbage til rum 1 gennem udsugningen dér, inkluderende alle enkeltmodstande, bøjninger, anemostater og rørstykker, som passerer undervejs. Er disse maskeligninger imidlertid opstillet, kan iterationen gennemføres.

Men hvis man et øjeblik forestiller sig, at rummene selv er trykniveauer, vil det straks være muligt at indrette en langt simplere ligningsstruktur:

1. for ventilationssystemet behøver maskerne kun at gå fra rum til rum,
2. grenstrømmene gennem utætheder fås uden iteration ved blot at løse ligninger af typen (3) med hensyn til V .

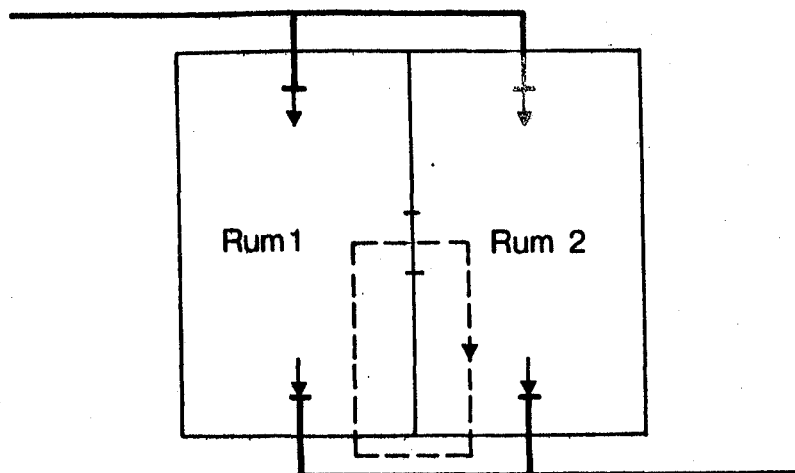


Fig. 2. Maskevalg, der tillader beregning af lækageluftstrømmen gennem dør mellem to ventilerede rum.

Dette vil naturligvis med arbitrære begyndelsesværdier for rumtrykkene føre til luftstrømme, som giver en nettoluftmængde ind i eller ud af rummene. Men er trykket i et rum P_r , kan $\frac{dP_r}{dt}$ beregnes på dette grundlag, og i et kort tidsrum τ kan trykstigningen approksimeres ved $\Delta P_r = \frac{dP_r}{dt} \tau$. De korrigerede trykværdier kan så danne udgangsværdier i en ny iteration på ventilationssystemet, med deraf følgende nye maskestrømme. Gentaget tilstrækkelig mange gange vil denne cyklus føre til, at ligevægten til slut indstiller sig med de rigtige tryk i rummene og de rigtige luftstrømme.

Den enklere maskestruktur betales således med et mere omfattende beregningsskema, som det dog er datamaten, der udfører.

En anden konsekvens af den anvendte programstruktur er, at man med enkle indgreb kan simulere åbningen af en dør eller et vindue og eventuelt sætte et ventilationssystem ind eller tage det bort.

Det skal dog for fuldstændighedens skyld også nævnes, at den anvendte metode - i hvert fald for bygninger uden ventilationsanlæg - tillader beregning af transiente luftstrømningsforløb.

Datamængdens størrelse

Mængden af tal, der skal indlæses, afhænger naturligvis af bygningens eller bygningsafsnittets størrelse og af de forenklinger, man er villig til at foretage. Datamængden indlæses i to grupper, en for rummene og en for ventilationssystemet.

For et simpelt rum med et vindue og en dør, en indblæsningsåbning og en udsugningsåbning, skal der specificeres en halv snes tal, der fordeler sig som følger: to konstanter for vinduet, to konstanter for døren samt numrene på de områder, de vender imod, rummets eget nummer, højde og volumen af rummet, dets højde over jordoverfladen og højde af indblæsnings- og udsugningsåbninger, rumtemperaturen samt begyndelsesværdien for trykket. Ved specifikationen af ventilationssystemet skal der for rørstykkerne oplyses, hvad længde og diameter er, tilsvarende er der to tal pr. bøjning, anemostat eller lignende. Kanaltemperatur og begyndelsesværdier for maskestrømmene angives ligeledes. Temperaturparametrene medtages, for at der kan korrigeres for volumenændringen af indblæst luft, som fremkommer, hvis indblæsnings- temperatur og rumtemperatur er forskellige.

I et beregningseksempel med 100 rum og et ret omfattende ventilations-system beløb det sig ialt ca 5000 tal. Der kan formentlig foretages visse forenklinger i indlæsningen, men til trods for en sådan rationalisering synes det alligevel, som om talmaterialet er meget stort. Det tager uforholdsmæssig lang tid at finde og rette fejl i datamængden, når tallene har individuel karakter. Det vil naturligvis blive lettere, hvis talmaterialet har et gentagelsesmønster, fx ens etager.

Datamængdens omfang og kontrollen med den peger på indretning af for-procedurer, som kontrollerer datamængden, inden den afsendes til egentlig beregning. Et sådant forbehandlingsprogram er da også benyttet, men der kan naturligvis kun blive tale om at undersøge, om visse regler for skrivning af data er overholdt. Decimalfejl afsløres ikke.

Eksemplet med de 100 rum er gennemregnet, men forekommer noget uoverskueligt, og i tilgift betyder de mange ventilatorer, der er placeret i udsugninger og indblæsninger, at hele systemet bliver meget "levende" og vanskeligere at give tilstrækkeligt gode begyndelsesværdier. Derimod er en gennemregning på en enkelt etage i samme bygning, hvilket involverer ca 50 rum, anderledes overkommelig. Forudsætningerne ved denne beregning, som beskrives nærmere i det følgende afsnit, har været, at luftstrømningsbilledet defineredes ved opgivelse af 10 ydre trykparametre: 2 tryk i hovedkanaler for indblæsning, 6 tryk i hovedkanaler for udsugning, samt trykkene i det fri ud for bygningens 2 facader.

Et forsigtigt skøn antyder derfor, at en større detailrigdom end i 100-rumsbygningen vil det være vanskeligere at administrere. Datamængder, der baseres på gentagelse af en bestemt struktur, bliver mere overskuelige. Regnetiden er ikke i første omgang den begrænsende faktor (beregningerne er foretaget ved NEUCC).

Undersøgelse af tolerancer

Er datamængden etableret, er det en enkel sag at undersøge variationer i de tilførte luftmængder som følge af ydre ændringer, eksempelvis: lukning af spjæld, åbning af vinduer eller temperaturændringer, og dermed få et indtryk af systemets følsomhed for ydre forstyrrelser.

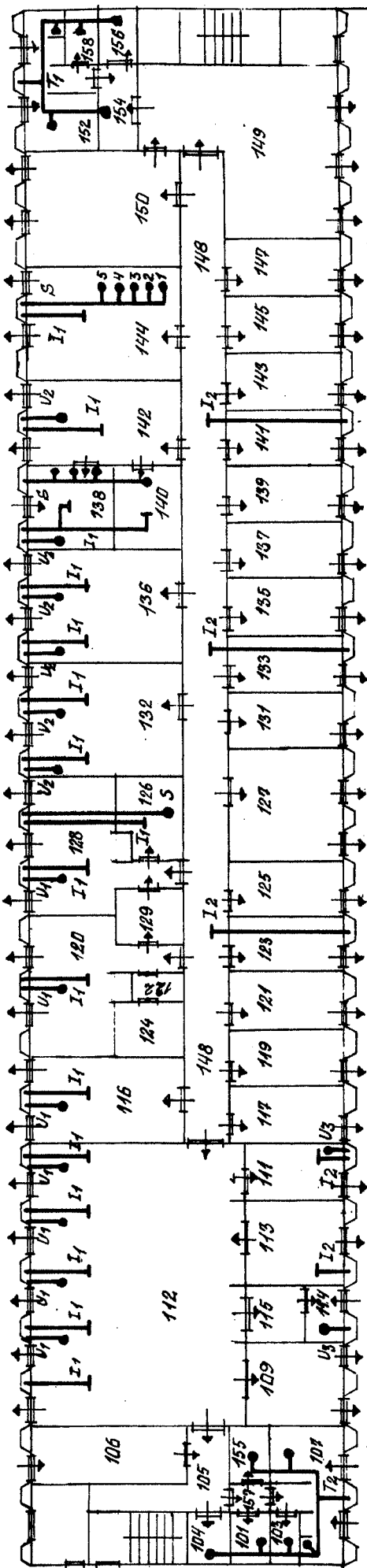
Først bestemmes ligevægtssituationen ved ud fra de ansatte begyndelsesværdier at iterere et passende antal gange, skønne af resultaterne, om ligevægten er indtrådt, og hvis dette ikke er tilfældet fortsætte beregningerne fra den nåede tilstand ved at bruge mellemresultaterne, der er udlæst på hulkort. Med den nåede situation som udgangspunkt kan ændringerne indføres. I eksemplet med 50 rum er der en række ændringer, som umiddelbart lader sig undersøge:

1. ændring af trykket i en hovedkanal på indblæsnings- eller udsugningssiden,
2. ændring af det ydre vindtryk,
3. lukning af anemostat,
4. åbning af dør mellem to rum,
5. åbning af vindue mod det fri.

Tilfældene 1 og 2 er udtaget som repræsentative. I første tilfælde antages som regneeksempel, at undertrykket i en hovedkanal, hvortil en del af udsugningsåbningerne (mærket U 1) er forbundet, sænkes med 50 Pa ($\sim 5 \text{ mm H}_2\text{O}$). I andet tilfælde indføres en trykforskel på 50 Pa mellem områderne i det fri ud for bygningens facader svarende til, at bygningen udsættes for en tværgående vindpåvirkning.

Fig. 3 viser den behandlede etage. Rummenes nummerering er indtegnet og ventilationskanalerne skitse-mæssigt antydet. Foruden de på figuren viste rørforbindelser er der lodrette rørstykker ($\sim 5 \text{ m}$), der forbinder kanalerne mærket U 1, U 2 og U 3 med tre forskellige udsugningsaggregater på taget. Enkelte udsugninger, mærket S, er udsugninger fra stinkskebe og er forbundet til selvstændige ventilatorer, ligesom udsugningerne mærket T er separate toiletudsugninger. Lufttilførslen kommer fra to hovedkanaler betegnet I 1 og I 2.

162.



161.

● udsugning
 — indblæsning

Fig. 3. Etageplan, der benyttes som regneeksempel.

I fig. 4 angives i kolonne A trykkene i Pa i de enkelte rum i ligevægts-udgangssituationen. Trykkene angives som overtryk i forhold til trykket i udsugningshovedkanalerne (målt ved udsugningsventilatorens sugeside). De ventilerede rum har numre mellem 101 og 158. Rumnumrene 12 og 29 betegner indblæsningshovedkanalerne, hvor trykket antages at være konstant 165 Pa (målt ved indblæsningsventilatorens trykside). Rumnumrene 300-303 betegner udsugningshovedkanalerne, hvor trykket som nævnt er sat til 0. Rumnumrene 305-306 betegner sugesiden af de separate toiletudsugningsventilatorer, hvor trykket antages at være konstant 30 Pa. Rumnumrene 161 og 162 betegner områderne i det fri ud for bygningens facader, hvor trykket er sat til 75 Pa.

I rum 126, 138, 140 og 144 findes separate stinksudsugninger. Disse antages at være i funktion og indgår i beregningerne ved et tilnærmet udtryk for ventilator karakteristikken.

I rummene 117-147, som alle er placerede på samme side af korridoren, er der, bortset fra rum 127, der har to vinduer mod det fri og derfor lettere luftadgang hertil, samme tryk overalt. Trykket ligger som venteligt mellem trykket i korridoren 148 og trykket i det fri.

Tallene i kolonne B betyder den samlede, gennem vindues- og dørfuger afgivne eller tilførte lækageluftstrøm i l/s (+ for afgivet, - for tilført). Lækageluftstrømmenes retninger er angivet ved små pile på fig. 3.

Kolonne C og D angiver ændringerne i henholdsvis rumtryk og lækageluftstrøm, som fremkommer, når trykket i udsugningskanalen U 2 sænkes med 50 Pa. Ændringerne måles i henholdsvis Pa og l/s og regnes med fortegn, således at tilvækst i tryk og udadgående lækage er positiv.

Kolonne E og F angiver på tilsvarende måde ændringerne i rumtryk og lækageluftstrøm, som fremkommer, når trykket i området i det fri foran den ene facade øges med 50 Pa.

RUMNR.	A	B	C	D	E	F
12	165	0	0	0	0	0
29	165	0	0	0	0	0
101	46	-4	-1	1	0	-1
103	45	-1	-1	0	-1	0
107	46	-49	-1	1	0	-1
157	52	0	-3	0	0	0
155	44	-6	0	2	0	0
109	78	0	-3	0	1	0
115	83	0	-9	0	3	0
114	68	-21	0	6	0	-2
113	124	48	-1	8	1	-3
111	90	10	-3	10	1	13
117	82	0	-1	0	3	0
119	82	0	-1	0	3	0
121	82	0	-1	0	3	0
123	82	0	-1	0	3	0
125	82	0	-1	0	3	0
127	78	0	0	0	1	0
131	82	0	-1	0	3	0
133	82	0	-1	0	3	0
135	82	0	-1	0	3	0
137	82	0	-1	0	3	0
139	82	0	-1	0	3	0
141	82	0	-1	0	3	0
143	82	0	-1	0	3	0
147	82	0	-1	0	3	0
149	77	0	0	0	5	0
148	98	269	-3	13	5	-24
154	46	-19	0	2	5	0
156	44	-1	-1	1	3	-2
158	44	-2	0	0	3	-3
152	46	-43	0	0	7	-25
150	78	0	-1	0	36	0
144	82	10	0	1	14	-60
142	79	38	0	1	14	-48
140	65	-10	0	0	4	-6
138	39	-51	0	1	3	-18
136	94	33	-1	2	6	-78
132	94	33	-1	2	6	-78
128	87	78	-11	-79	13	-77
126	83	-10	-6	-13	4	-10
129	91	0	-15	0	11	0
120	93	40	-15	-46	10	-67
122	93	0	-16	0	10	0
124	93	0	-16	0	10	0
116	93	32	-18	-42	11	-70
112	97	128	-17	-115	7	-180
106	75	0	-3	0	31	0
105	73	0	-9	0	4	0
104	47	-17	-1	5	0	-2
300-302	0	0	0	0	0	0
303	0	0	-50	0	0	0
305-306	30	0	0	0	0	0
161	75	-230	0	68	0	-64
162	75	-264	0	158	50	844

Fig. 4. Oversigt over rumtryk og lækageluftstrømme. A: rumtryk i udgangssituation, Pa. B: udadgående lækageluftstrøm i udgangssituation, l/s. C: tilvækst i rumtryk ved kraftigere udsugning, Pa. D: tilvækst i lækageluftstrøm ved kraftigere udsugning, l/s. E: tilvækst i rumtryk ved vindpåvirkning, Pa. F: tilvækst i lækageluftstrøm ved vindpåvirkning, l/s.

I fig. 5 vises nogle repræsentative værdier af luftstrømmene i ventilationsanlæggene målt i l/s. Tabellen er opbygget som fig. 4 med udgangssituationerne først og tilvæksterne ved de to ændringer i de næste kolonner. Rumnumrene er suppleret med betegnelser for den indblæsning eller udsugning, som kanalgruppen er knyttet til. Differensen mellem den af ventilationssystemet indblæste og udsugede luftstrøm, som må passere ind i eller ud af rummene gennem fuger, kan sammenlignes med netto lækageluftstrømmen i fig. 4. Det må her påpeges, at mens den netto ind- eller udstrømmende luftmængde i fig. 5 optræder som en differens mellem to relativt store størrelser med deraf følgende større unøjagtighed, så beregnes luftstrømmen i fig. 4 direkte ved trykdifferenserne over fugerne. Overensstemmelsen mellem de to sæt værdier fortæller, i hvilken grad balancen er indtrådt ved beregningen. I denne forbindelse må tilføjes, at programmet regner med, at de indblæste luftmængder er lidt koldere (20°C) end den udsugede rumluft (23°C), hvilket giver tallene i parentes. Overensstemmelsen synes tilfredsstillende.

De forskellige rumafsnit stiller forskellige krav til programmets iterationsformåen, og ved kørsel med programmet må man søge et kompromis mellem antal iterationer og numerisk stabilitet. To rum i hvert toiletområde udviser her nogen usikkerhed. Det er 102 og 103 i T 2 området og 156 og 158 i T 1 området. Rummene regnes forsynet med relativt tætte døre, hvilket reducerer de udsugede luftmængder betydeligt og medfører store relative usikkerheder på disse luftstrømme. Totaludsugningen fra områderne synes dog rimeligt godt bestemt.

RUMNR.	A	B	C	D	E	F
112 I 1	867	119(128)	223	26%	- 274	- 32%
112 U 1	748		340	45%	78	10%
116 I 1	202	30(32)	46	23%	- 36	- 18%
116 U 1	172		89	52%	34	20%
120 I 1	209	37(41)	45	22%	-35	- 17%
120 U 1	170		92	54%	33	19%
126 I 1	124	- 12(- 11)	8	6%	-5	- 4%
126 eget	136		- 6	- 4%	4	3%
136 I 1	372	29(33)	1	0%	-37	- 10%
136 U 1	343		- 1	0%	40	12%
142 I 1	182	36(38)	1	1%	-28	- 15%
142 U 2	146		- 1	- 1%	20	14%
144 I 1	232	6(8)	1	0%	-41	- 18%
144 S(1)	27		- 1	- 4%	2	7%
144 S(2)	27		0	0%	2	7%
144 S(3)	35		0	0%	3	9%
144 S(4)	55		0	0%	4	7%
144 S(5)	82		0	0%	7	8%
T 1	65	(- 65)	3	5%	23	37%
T 2	81	(- 81)	- 5	- 6%	- 3	- 4%
113 I 2	47	(48)	8	17%	- 3	- 6%
148 I 2	266	(269)	13	5%	- 24	- 9%

Fig. 5. Oversigt over indblæste og udsugede luftstrømme i udvalgte rum. A: indblæst og udsuget luftstrøm i udgangssituation, l/s. B: differens mellem indblæst og udsuget luftstrøm i udgangssituation (temperaturkorrigeret differens i parentes), l/s. C: tilvækst i indblæst og udsuget luftstrøm ved kraftigere udsugning, l/s. D: C i procent af A. E: tilvækst i indblæst og udsuget luftstrøm ved vindpåvirkning, l/s. F: E i procent af A.

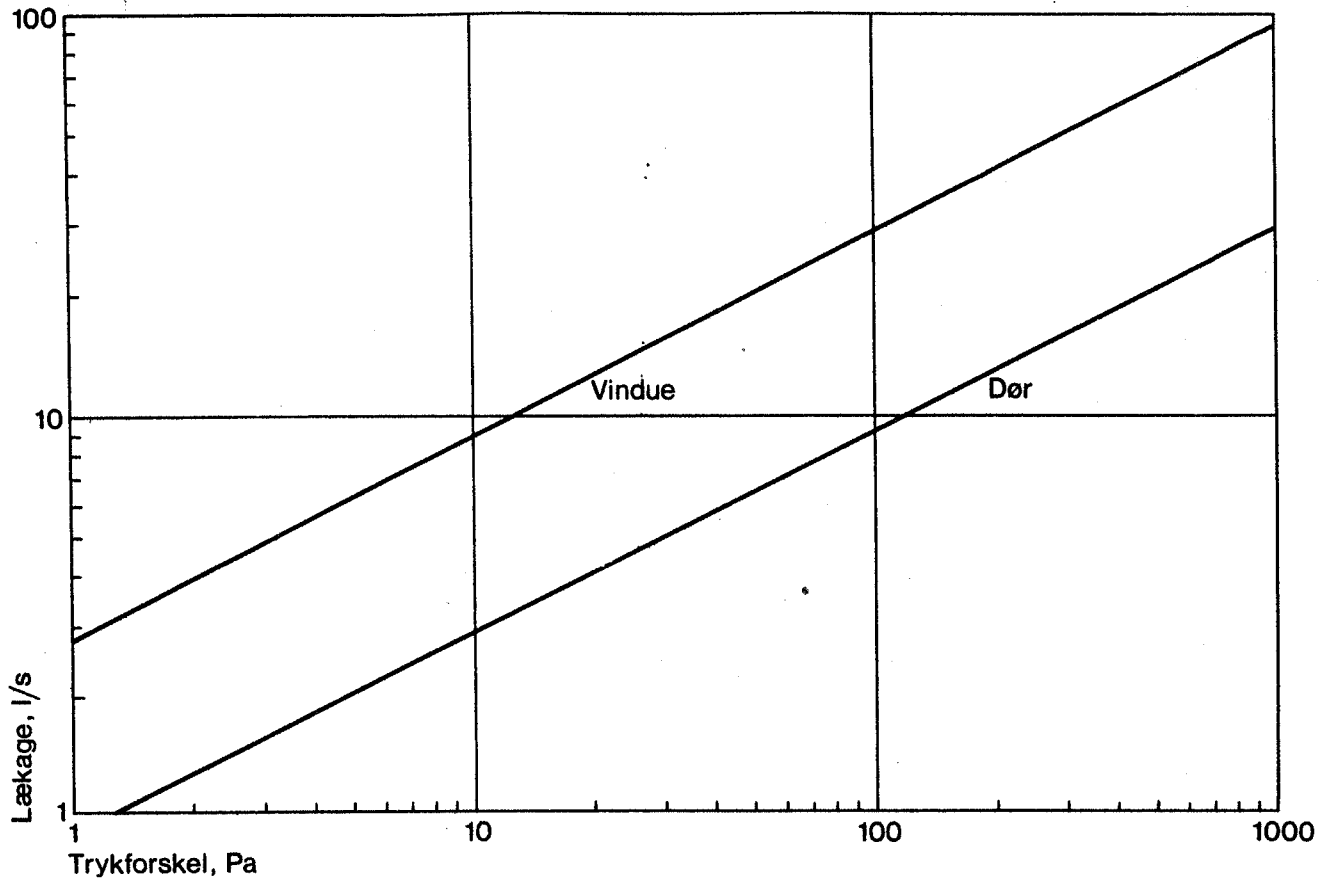


Fig. 6. Forudsat lækage gennem lukket vindue til det fri og lukket inderdør i afhængighed af trykforskel.

Luftstrømningsprogrammers anvendelighed i øvrigt

I Japan er man langt fremme med udviklingen af datamatprogrammer til beregning af luftstrømme i bygninger. Disse programmer har været anvendt ved beregning af røgbevægelsen under brand under stationære strømningsforhold. En artikel (1) af T.Wakamatsu fra 1971 illustrerer en anvendelse på en 10-etages bygning. Denne problemstilling er især farvet af skorstensvirkningen i høje bygninger, en effekt der forstærkes med voksende temperaturdifferens mellem ude og inde. Bygningsbeskrivelsen er væsentlig mere "storkasket" end det ovenfor anførte eksempel. T.Wakamatsu's højhus beskrives med ialt 50 rum samt trappe og elevatorskakter.

Skorstensvirkningen er også relevant ved tolerancebetragtninger (2), men en undersøgelse kræver en høj, slank bygningsmodel fremfor den brede, flade bygning, der har været forlæg ved eksemplet ovenfor.

- (1) T.Wakamatsu: Calculation of smoke movement in buildings. Offentliggjort i Main reports on production, movement and control of smoke in buildings. Occasional report of Japanese association of fire science and engineering, No 1, 1974.
- (2) E.Christophersen: Tolerancer for ventilationsanlæg. Offentliggjort i SBI-rapport 86 samt i VVS nr. 1, 1973.
- (3) P.Becher: Varme og ventilation. Teknisk forlag 1971-72.

Summary

The principles behind a program for calculating air flow in buildings are outlined. The generally accepted method for these calculations is Kirchhoff's network equations, of which "The knot method" and "The loop method" are alternatives. The program uses a mixture of both, in an attempt to keep the intermingling of the equations to be solved on a low level. Results of calculations on a 50-room example, in which it was the purpose to demonstrate the possibility of using the program for discussion of ventilation system fluctuations, are presented.