

VEBER — et EDB-program til hjelp ved prosjektering av ventilasjonsanlegg



Særtrykk 226
Norges
byggforsknings
institutt 1974

Av sivilingeniør B. T. Larsen

1. Innledning.

I en bygning har ventilasjonsanlegget oftest to hovedfunksjoner:

- Forsyne de forskjellige rom med frisk luft.
- Delta i oppvarmingen/avkjølingen av rommene.

Begge disse funksjonene betinger at ventilasjonsluften kommer til de forskjellige rom i riktig mengde.

Det å dimensjonere et ventilasjonsanlegg er et meget komplekst problem dersom man ved beregningen skal ta hensyn til alle ytre faktorer som kan påvirke anlegget og luftfordelingen. I praksis har man derfor vært nødt til å basere sine beregninger på endel forenklinger. De viktigste av disse er:

- 1) Tilluft- og avtrekkssystemet betraktes hver for seg. De «to» systemene er i virkeligheten koplet sammen til ett ved hjelp av rommene.
- 2) Det tas ikke hensyn til andre luftveier enn ventilasjonskanalene. Andre luftveier er sprekker ved vinduer og dører, korridorer, trappeoppganger, heisesjakter etc.



- 3) Det tas ikke hensyn til andre drivkrefter enn vifter i systemet. Oppdriftskrefter og vindkrefter kan spille en ikke ubetydelig rolle i det ferdige anlegget.

Det er spesielt ved lavtrykks-systemer at man kan komme galt avsted ved å gjøre disse forenklingene.

Ved tilgang til store og hurtige EDB-maskiner er det ingenting i veien for å lage programmer uten å basere seg på disse forenklingene. I stedet for å betrakte strømning i et nett som har en «treforgreningstruktur» (f. eks.: tilluft strømmer gjennom stadig mindre kanaler for til slutt å munne ut i rommene) betraktes da strømning i et nett som består av «lukkende sløyfer» (f. eks.: luft går fra luftinntak, gjennom vifte, i kanaler til rommene, i kanaler fra rommene, gjennom vifte og ut i atmosfæren hvor sløyfene «lukkes»). Vi har med andre ord et *nettverksproblem*. Problemet med slike hydrauliske nettverk er i motsetning til de fleste elektriske, at komponentene har *ikke-lineære* motstandskarakteristikker. Ligningssystemer basert på massebalansen i knutepunkter (knutepunkt-orientert metode), eller betingelsen om trykkbalanse i en lukket sløyfe (sløyfe-orientert metode) må derfor løses iterativt («Prøve- og feilmotoden»). Ofte benyttes Newton-Raphsons metode.

Problemet med å finne luftstrømmer i bygninger er analogt med å finne vannstrømmer i vannledningsnett. Den matematiske modellen som VEBER bygger på er en modifikasjon av den som er beskrevet av Shamir og Howard [2].

2. Anvendelsesområder.

Som nevnt får man et nettverksproblem dersom man i beregningen skulle ta hensyn til oppdriftskrefter, vindkrefter, lekkasjeluftstrømmer, osv. Nettverket vil bestå av følgende elementer:

sq 697.9 ; 681.3.06
L
124

Kanaler,
Vifter,
Elementer som representerer utetthetene i bygget (dører, vinduer etc.).

VEBER kan analysere nettverk som er en vilkårlig kombinasjon av slike elementer. Det kan derfor brukes til følgende typer beregninger:

Kanalberegninger:

Det kan finne luftfordelingen i et gitt kanalsystem, evt. finne nødvendige ventil- og spjeldinnstillinger for å få balanse. Programmet kan også dimensjonere kanaler dersom man i tillegg til luftmengden oppgir hvilke trykk som ønskes i anlegget.

Infiltrasjonsberegninger:

Det kan finne lekkasjeluftstrømmer, luftstrømmer i trappesjakter etc. p.g.a. vind og oppdriftskrefter. Man vil m.a.o. kunne beregne infiltrasjonstillegget i varmebehovsberegningen, se hvordan matlukt/brannrøyk vil spre seg i bygget, osv.

Det er heller ingen ting i veien for at man kan beregne luftstrømmer i bygningskonstruksjonen og kanalsystemene *samtidig*. Man kan m.a.o. analysere hvordan et bestemt ventilasjonsanlegg vil funksjonere i en gitt bygning ved gitte utvendige klimatiske forhold.

3. Nødvendige input-data.

Her kan det være på sin plass først å se på hvilke typer data som må til, uavhengig av om man bruker EDB eller ikke.

Kanalberegninger:

Kanaldimensjoner (balanseberegning),
Luftmengder (dimensjonering),
Kanallengder,
Kanalruheter,
Støttapsfaktorer.

Infiltrasjonsberegninger:

Luftens spesifikke vekt inne og ute,
Vindtrykk på fasader,
Høydeforskjeller,
Motstandstall for utettheter (vinduer, dører etc.)

Data for motstandstall for utettheter og vindtrykk på fasader kan finnes i [3] og [4].

I tillegg til disse data må man forklare maskinen hvordan nettverket ser ut. En datamaskin er (ennå) ikke i stand til å tyde en skisse som viser et ventilasjonsanlegg. Man må derfor ha et system som, ved hjelp av tall, på en entydig måte definerer nettet. VEBER benytter et system med *knutepunkter* og *elementer*. (Se fig. 1). Knutepunkter må man ha på følgende steder:

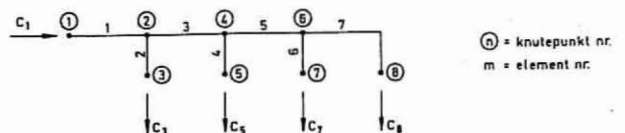


Fig. 1. Definisjon av knutepunkter og elementer.

I forgreningspunkter,

Der det skal luft inn i eller ut av nettet.

Knutepunktene forbindes med elementer av de typer som er nevnt under pkt. 2.

4. Teoretisk grunnlag.

Det er to metoder som kan benyttes til å finne luftstrømmer i nettverk. Den ene er å benytte seg av betingelsen om at det skal være massebalanse i alle knutepunkter. Den andre er betingelsen om at det må være trykkbalanse i alle tenkelige lukkede sløyfer i nettet. VEBER benytter betingelsen om massebalanse i alle knutepunkter. Matematisk kan dette uttrykkes som:

$$F_j = \sum_{i=1}^{NJ} Q_{ji} + C_j = 0 \quad (1)$$

Hvor:

Q_{ji} = luftmengde fra knutepunkt i til knutepunkt j

C_j = uttak/tilførsel i knutepunkt j

NJ = antall knutepunkter i nettet

Lign. 1 forklares best med et par eksempler.

For knutepunkt 2 og 3 i fig. 1 får vi:

$$F_2 = Q_{21} + Q_{24} + Q_{23} = 0 \quad (\text{knutepunkt 2})$$

$$F_3 = Q_{32} + C_3 = 0 \quad (\text{knutepunkt 3})$$

I tillegg til lign. 1 må vi ha en sammenheng mellom luftmengde og trykkfall for elementene:

$$H_i - H_j = R_{ij} Q_{ji}^n$$

eller

$$Q_{ji} = \frac{H_i - H_j}{R_{ij}^{1/n} \cdot |H_i - H_j|^{1-1/n}} \quad (2)$$

Hvor:

R_{ij} = «motstandstall» for elementet mellom knutepunktene i og j.

n = strømningsekspONENT. Denne varierer mellom 1 og 2. 1 for laminær og 2 for fullt utviklet turbulent strømning.

H_i = totaltrykk (inkl. oppdriftstrykk).

For kanaler er motstandstallet R gitt ved den såkalte Darcy's formel:

$$R_{ij} = 8\lambda_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}} \cdot \frac{\gamma_{ij}}{g} \cdot \frac{1}{\pi^2 d_{ij}^5} \quad (3)$$

Hvor: λ_{ij} = friksjonskoeffisienten (avhengig av kanalruheten)

l_{ij} = kanallengde

d_{ij} = kanaldiameter eller "ekvivalent" diameter for firkantkanal

γ_{ij} = luftens spesifikke vekt

Lign. 2 er skrevet på en måte som garanterer en entydig fortegnsgdefinisjon ($Q_{ji} > 0$ betyr strømning fra i til j).

Ved å skille ut oppdriftstrykket fra H og innføre støttap blir lign. 1:

$$F_j = \sum_{i=1}^{NJ} P_{ti} - P_{tj} + \gamma_{ij} \cdot (h_i - h_j) - \sum_{i=1}^{NJ} [c_{ij} Z_{ij} + R_{ij}]^{1/n} \cdot |P_{ti} - P_{tj} + \gamma_{ij}(h_i - h_j)|^{1-1/n} + C_j = 0$$

Hvor: P_t = totaltrykk (statisk + dynamisk trykk)

h = stedshøyde

c_{ij} = summen av alle støttapsfaktorer mellom knutepunktene i og j

$Z_{ij} = \frac{\gamma_{ij} l_{ij}}{2g} \cdot \frac{1}{A_{ij}^2}$

A_{ij} = kanalversnitt

(4)

Lign. 4 settes opp for alle NJ knutepunkter i nettet. Siden vi har NJ ligninger må vi ha NJ ukjente. Disse kan være totaltrykk, tilførsler/uttak eller motstander. Når det er funnet en ukjent motstand R, kan denne reduseres videre til å gi en ukjent diameter eller ruhet (lign. 3).

I de aller fleste tilfeller er ligningene ikke-lineære ($n > 1$), og løsningen må finnes med en iterasjonsmetode (VEBER benytter Newton-Raphsons metode). Som eksempel kan nevnes at for strømning i kanaler, som nesten alltid er turbulent, er $n = 2$, for strømning gjennom vindus- og dørsprekker er $n = 1,5$.

5. Eksempel på bruk.

Som nevnt kan programmet brukes til kanalberegninger, infiltrasjonsberegninger, og beregninger hvor hele bygget med ventilasjonsanleggene analyseres. Det skal her kort skisseres hvordan en beregning av den siste typen utføres. Dette er den mest avanserte bruk av programmet, men da den gjøres i «flere trinn» byr den ikke på spesielle problemer.

Vi forutsetter at vi har en 15-etasjers kontorblokk hvor hver etasje er et kontorlandskap. Fig. 2 viser 1. etasje. De andre etasjene er lik 1. etasje bortsett fra inngangen.

På figuren er inntegnet knutepunkter og elementer. Knutepunkt 1 representerer kontorlandskapet, knutepunkt 2 heissjakt, knutepunkt 3 trappesjakt, knutepunkt 4 avgrening for stige-kanal/avtrekkssystem, knutepunkt 5 avgrening for

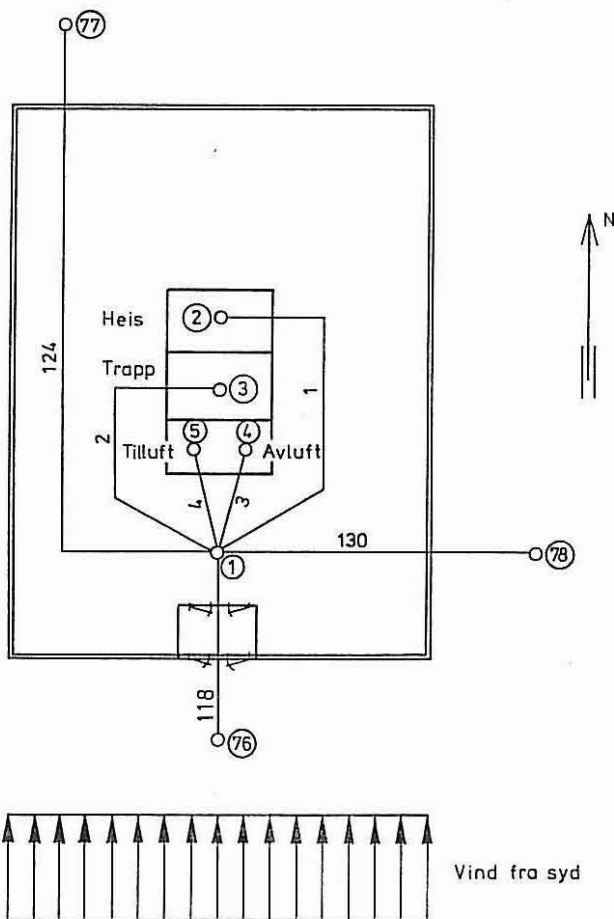


Fig. 2. Kontorblokk, etasjeplan.

stige kanal/tilluftsystem, knutepunkt 76 er utenfor sydfasade, knutepunkt 77 utenfor nordfasade og knutepunkt 78 utenfor øst- og vestfasade (øst- og vestfasadene kan tas med samtidig p.g.a. lik vindtrykkfordeling, se nedenfor).

Knutepunktene er forbundet med elementer. Element 1 er dør til heissjakt, element 124 er yttervegg på nordfasade, element 4 representerer tilluftsystemet i 1. etasje, 3 er avtrekksystemet, osv.

Tilluftanlegget er tenkt å være likt i alle 15 etasjer (fig. 3). Avtrekksanlegget er også likt i alle etasjer.

Vi er interessert i å analysere hva som vil skje når det er vind fra syd (8 m/s 5 m over bakken) og oppdriftskrefter (-20° C ute, 20° C inne). Vinden gir en trykkfordeling på fasadene som vist i fig. 4. Fasadene deles inn vertikalt i fem seksjoner som angitt i [3].

Første trinn i beregningen vil være å forinnstillingsberegne tilluft- og avtrekksanlegget for 1. etasje. Vi beregner da fordelingskanalene fra snitt A—A (fig. 3) og ut i etasjen. Det er i dette eksempel regnet med $300 \text{ m}^3/\text{h}$ i hver ventil, dvs.

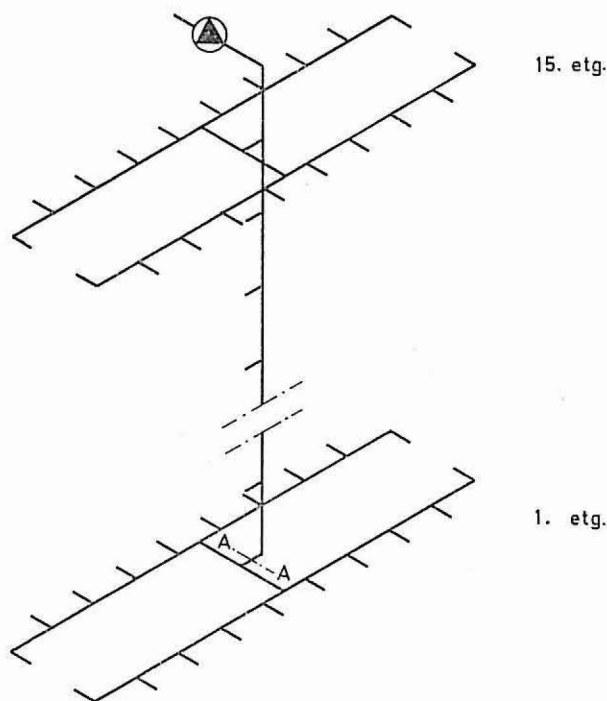


Fig. 3. Tilluftanlegget.

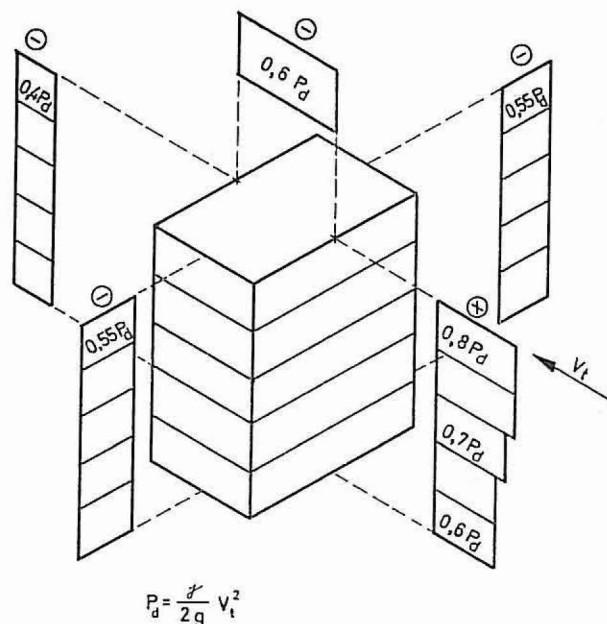


Fig. 4. Vindtrykkfordeling på fasader.

$6000 \text{ m}^3/\text{h}$ til hver etasje. Minste totaltrykkfall over ventiler er satt til 5 mm VS. Som resultater fra denne beregning vil vi få forinnstillingsverdier for alle ventiler og totaltrykket i snitt A—A. Vi kan nå beregne en ekvivalent enkeltmotstand som representerer fordelingskanalene.

Deretter balanseberegnes stige kanalene inklusive avgreninger, dvs. «stumpen» fram til snitt A—A. I hver avgrening inkluderer vi den ovenfor beregnede enkeltmotstand for fordelingskanalene i hver etasje. Som resultater fra denne beregningen vil vi få nødvendig tilleggsstruping i avgreningene i hver etasje (innstilling av spjeld), og nødvendig viftetrykk dersom vi i beregningen tar med aggregatets motstand.

Vi er nå istand til å foreta den «komplette» beregning. Figur 5 viser det nettverket vi nå får. De vertikale elementene representerer stige kanaler og heise/trappesjakter. De horisontale elementene representerer fordelingskanaler i hver etasje for tilluft/avtrekksystem og dører til heise/trappesjakter. Elementene som går «på skrå» representerer ytterveggene. P.g.a. vindtrykkfordelingen (fig. 4) er det ikke nødvendig å ha knutepunkter utenfor fasadene i hver etasje.

I denne «komplette» beregningen må vi også

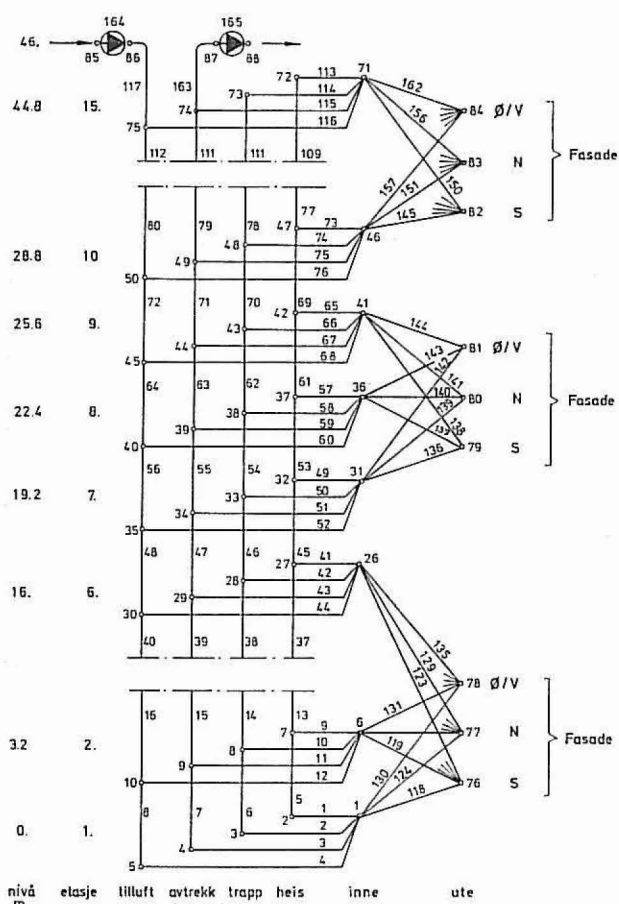


Fig. 5. Det «komplette» nettverket.

ha med viftene. Ved beregning av stigeanalene fant vi viftetrykk, og vi er derfor i stand til å velge vifter. Programmet forutsetter at viftetekarakteristikken er parabelformet. Karakteristikken til de valgte viftene må derfor tilnærmes med parabler som velges slik at de best mulig stemmer overens med karakteristikken i området omkring prosjektert driftspunkt (se fig. 6).

Av figur 5 går det fram at nettverket består av 88 knutepunkter og 165 elementer. VEBER har datagenereringsegenskaper, slik at alle reglemessigheter og gjentakelser utnyttes til å minske kodearbeidet. I dette tilfellet beskriver vi derfor først 1. etasje og deretter 2. etasje. Da 2. t.o.m. 14. etasje er like, gir vi maskinen beskjed om dette slik at den automatisk «bygger» seg opp til og med 14. etasje. 15. etasje må beskrives. Til slutt beskrives viftene og knutepunkter og elementer utenfor fasadene.

Kodearbeidet er nå ferdig. Etter at vi har fått punchet de tilsvarende hullkort, kan problemet kjøres på maskinen.

Figurene 7, 8 og 9 viser noen av resultatene fra to beregninger. I den ene beregningen er det oppdriftskrefter (-20°C ute, 20°C inne) og ingen vind. I den andre er det de samme oppdriftskreftene og i tillegg vind (8 m/s 5 m over bakken). Fig. 7 viser at ventilasjonsanlegget er lite influert av vind og oppdrift. Det skyldes de relativt høye trykkene i anleggene. (Viftetrykk på h.h.v. 60 og 80 mm VS, se fig. 6). Luftlekkasjer gjennom yttervegger er relativt beskjedne når det kun er oppdriftskrefter som virker (fig. 8). Når det i tillegg er vind, blir lekkasjeluftmengdene betydelige. Fig. 9 viser luftmengdene inn/ut av heisesjakt (tilsvarende for trappesjakt). Figuren viser at luftmengdene først og fremst skyldes oppdriftskreftene. De vertikale luftstrømmene i bygget er relativt små p.g.a. at det er regnet med ganske tette dører til heis- og trappesjakt. Bygget får derved en relativt høy «indre vertikal tetthet». Når det gjelder oppdriftsstrøm-

$$\text{Avtrekksvifte: } \Delta p = 165,5 - 0,1368 \cdot Q^2$$

$$\text{Tilluftvifte: } \Delta p = 150,5 - 0,148 \cdot Q^2$$

$$\text{D.v.s.: } \Delta p = a - b \cdot Q^2$$

$$\text{Hvor: } a = \frac{\Delta p_1 - \Delta p_2 \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^2}{1 - \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^2} \quad b = \frac{a - \Delta p}{Q^2}$$

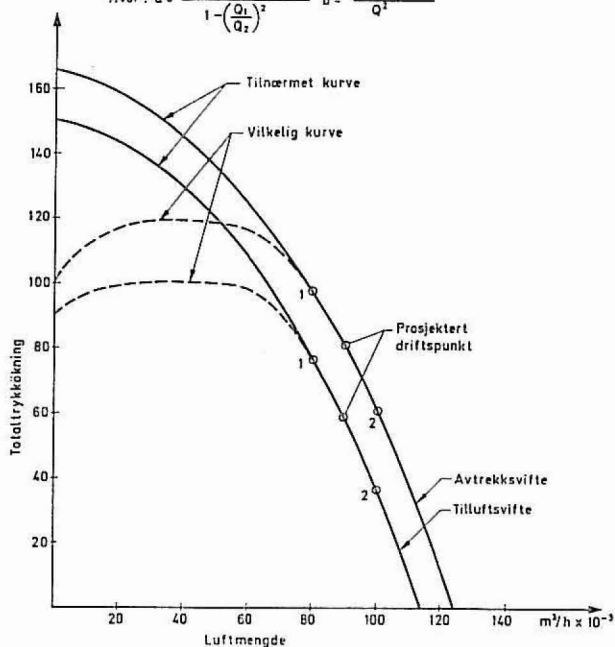


Fig. 6. Viftetekarakteristikker.

mer, er den indre vertikale tetthet like avgjørende som ytterveggenes tetthet.

Disse beregningene falt heldig ut for ventilasjonsanleggets vedkommende. Det vil være naturlig å stille følgende spørsmål:

Hvor lave trykk kan man ha i anleggene uten at man får problemer p.g.a. de utvendige klimatiske forhold?

Hva vil en annen utførelse av ytterveggene få å si for lekkasjeluftmengdene (varmebehovet)?

Hva med andre vindstyrker/vindretninger?

Hva med andre utetemperaturer?

Når man først har kodet og punchet dataene for et bygg, er det meget enkelt å få svar på slike spørsmål. Det vil i de fleste tilfeller kun

dreie seg om å skifte ut noen av hullkortene i «kortstokken» og så gjøre en ny kjøring. Det at man hurtig og billig kan analysere en rekke alternativer, er et av de viktigste argumentene for å benytte EDB.

Det kan nevnes at VEBER også med fordel kan benyttes før man har bestemt seg for hvordan ventilasjonsanlegget skal se ut. Et eksempel på dette er vist i fig. 10 som viser en etasje i et sykehus. Etasjen består av vanlige pasientrom og en operasjonsstue. Problemet består i å finne nødvendig overskudds-/underskuddsluftmengde (C_B) i korridoren for å hindre luftvdring mellom pasientrommene når det er trykkforskjell mellom nord- og sydfasade p.g.a. vind. Dessuten skal man finne nødvendige luftmengder til/fra operasjonsstuen og de to siste trinnene i «slusen» mellom korridor og operasjonsstue for å oppnå de lufttrykkene som er gitt i figuren. Et slikt slusearrangement gjør det mulig å hindre luftvdring

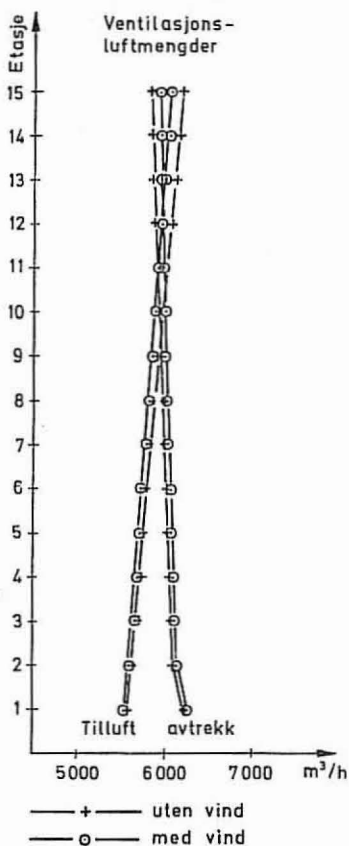


Fig. 7. Luftmengder i ventilasjonsanleggene.

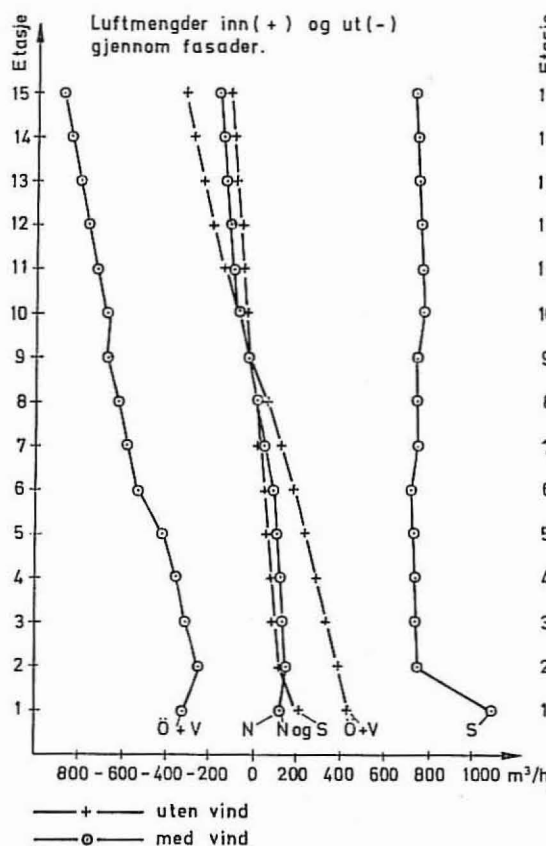


Fig. 8. Luftmengder gjennom yttervegger.

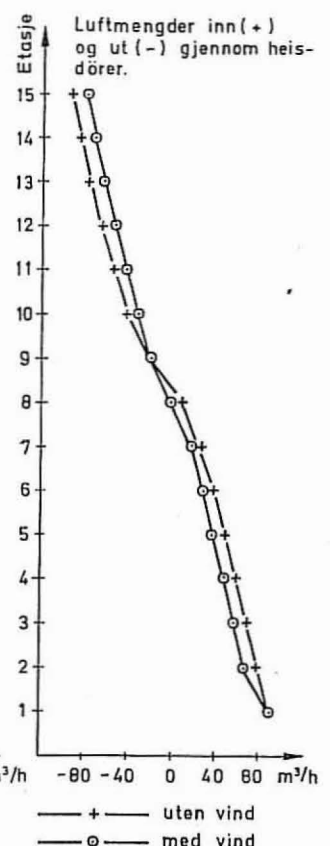


Fig. 9. Luftmengder inn/ut av heisesjakt.

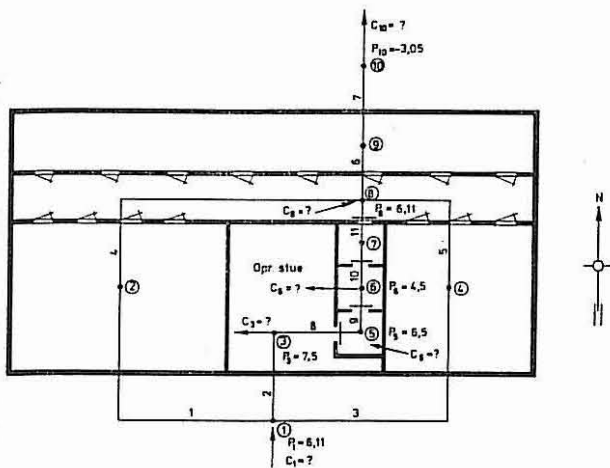


Fig. 10. Sykehusetasje.

fra korridor til operasjonsstue, selv når korridoren har overtrykk i forhold til operasjonsstuen.

6. Hvor og hvordan kan programmet benyttes?

Programmet er skrevet i språket FORTRAN IV og utprøvd på maskinen UNIVAC 1108 hos A/S Fjerndata i Oslo. Dette betyr at det også uten

problemer kan kjøres i Trondheim på NTH's maskin og i Bergen på universitetets maskin.

Programmet kan benyttes av alle som ønsker det. Det mest praktiske vil være å bruke det i samarbeid med NBI inntil man får det «inn i fingrene». Programmet vil også bli lagt inn i en «programbank» hos A/S Fjerndata (og eventuelt også i Trondheim og Bergen) slik at det kan benyttes helt uavhengig av NBI. Regnemaskinutgiftene ved bruk av programmet er relativt små.

Litteraturhenvisninger.

1. Larsen, B. T.: Ventilasjonsberegninger. Brukerbeskrivelse av datamaskinprogrammet VEBER. Norges byggforskningsinstitutt, Oslo 1974.
2. Shamir, U. H. og Howard, C. D. D.: Water Distribution System Analysis. Journal of the Hydraulics Division, January 1968. Proceeding of the American Society of Civil Engineers.
3. Jackman, P. J.: A Study of the Natural Ventilation of Tall Office Buildings. The Journal of the Institution of Heating and Ventilating Engineers, August 1970.
4. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers: Handbook of Fundamentals. New York 1967.

Særtrykk fra Norsk VVS 7/74
Universal-Trykk, Oslo