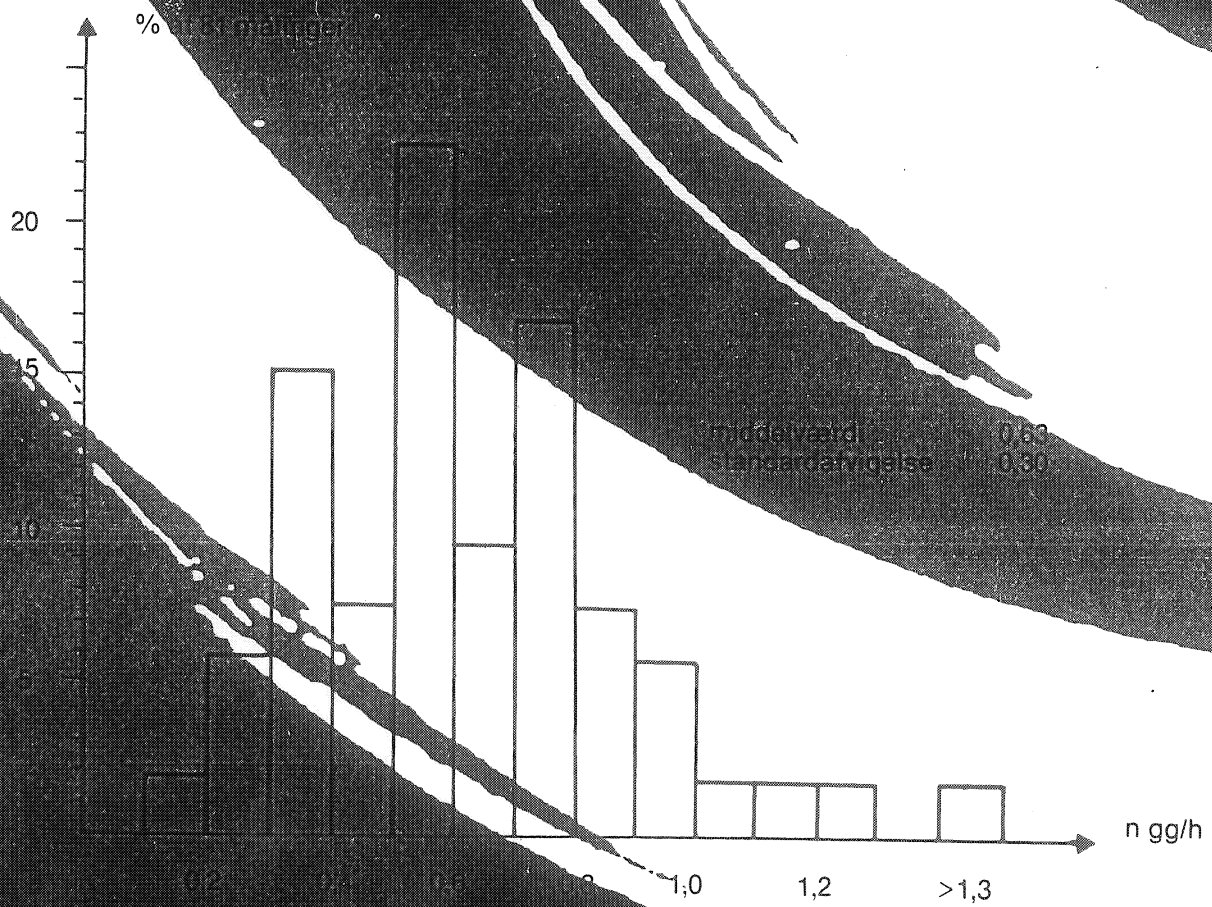


Boligerluftskifte



Rapport over Teknologirådsprojekt
Boligers luftskifte

Projektmedarbejdere:
Civilingeniør P. F. Collet
Bygningskonstruktør E. Frederiksen
Ingeniør T. Hoffmann
Ingeniør G. Madsen

0. FORORD

I foråret 1974 udarbejdede SOFUS-byg for Teknologirådet et katalog over en halv snes projekter, der alle sigtede på at nedbringe energiforbruget til bygningsopvarmning. Næsten alle projekter er nu gennemført, og vi står i dag med en solid viden om, hvor opvarmningsenergien bliver af, og hvordan der kan spares.

En del af energitabet i bygninger sker med den luft, der tilsigtet eller utilsigtet strømmer gennem bygningen. Der forelå i 1974 kun få og spredte oplysninger om luftskiftets størrelse, men usystematiserede erfaringer fra praksis viste, at mange huse var meget utætte, og at der forekom et unødigt stort energitab til den gennemstrømmende luft. Det blev anslået, at der ved tætning kunne spares 5-10% af opvarmningsenergien.

Den foreliggende undersøgelse, der er bekostet af Teknologirådet, har haft til formål at analysere forholdene i den eksisterende boligmasse og give konkrete anvisninger på tætning af bygninger. En væsentlig del af undersøgelsen har bestået i at udvikle egnede målemetoder.

Vi benytter lejligheden til at takke civilingeniør Bo Andersen, fa. Crone & Koch, lektor M.R. Byberg og lektor T. Lund Madsen, Laboratoriet for Varmeisolering samt civilingeniør P. Olufsen, Statens Byggeforskningsinstitut for inspirerende kritik og vejledning, samt alle de beboere, som har stillet deres boliger til rådighed for undersøgelsen.

Tåstrup, juli 1976

Knud E.C. Nielsen

I N D H O L D S F O R T E G N E L S E

| | side |
|---|------|
| 1. INDLEDNING | 1 |
| 1.1 Baggrund for projektet | 1 |
| 1.2 Projektets formål | 2 |
| 1.3 Projektets gennemførelse | 2 |
| 2. SAMMENFATNING | 5 |
| 3. BESKRIVELSE AF KENDTE PRIN- CIPPER ANVENDT VED MÅLING AF LUFTSKIFTE | 9 |
| 3.1 Måling på grundlag af luft- mængden | 9 |
| 3.2 Måling ved hjælp af sporgas | 10 |
| 3.3 Anvendelige sporgasser og måling af koncentrationen heraf | 11 |
| 3.4 Resultater af tidligere ind- og udenlandske målinger | 13 |
| 4. BESKRIVELSE AF DE I PROJEK- TET ANVENDTE METODER TIL MÅ- LING AF LUFTTÆTHED OG NATUR- LIGT LUFTSKIFTE | 19 |
| 4.1 Teoretisk baggrund for tryk- måling | 19 |
| 4.2 Praktisk gennemførelse af trykmålinger | 22 |
| 4.3 Baggrund for måling af det naturlige luftskifte ved hjælp af sporgas | 24 |
| 4.4 Praktisk gennemførelse af sporgasmålinger | 25 |
| 4.5 Kontinuerlig måling af luft- skifte | 28 |

| | | | |
|-----|---|-------|----|
| 5. | UDVÆLGELSE AF DEN UNDERSØGTE BOLIGMASSE | ..... | 31 |
| 5.1 | Udvælgelse af område | ..... | 31 |
| 5.2 | Udvælgelse inden for områderne | ..... | 31 |
| 6. | MÅLERESULTATER | ..... | 33 |
| 6.1 | Trykmålinger | ..... | 33 |
| 6.2 | Sporgasmåling | ..... | 38 |
| 6.3 | Kontinuerligt luftskifte | ..... | 51 |
| 7. | FORSØG MED TÆTNING AF BOLIGER | ..... | 57 |
| 7.1 | Beskrivelse af udbedringsarbejdet for den enkelte bolig | ..... | 58 |
| 7.2 | Generelt om materialevalg | ..... | 77 |
| 8. | LUFTSKIFTETS BETYDNING I ENERGIMÆSSIG HENSEENDE | ..... | 79 |
| 9. | KONKLUSION | ..... | 85 |
| 10. | LITTERATURHENVISNING | ..... | 87 |

BILAG:

1. Trykmåling
2. Regressionsanalyse af måleresultaterne for bolig 6
3. Data og måleresultater i forbindelse med sporgasmålinger
4. Resultat af kontinuerlige luftskiftemålinger
5. Skema med værdier af luftskifte før og efter tætning af 9 boliger

1. INDLEDNING

1.1 Baggrund for projektet

Størrelsen af luftskiftet i en bygning er af stor betydning for følgende forhold:

- a. bygningens varmeforbrug
- b. den termiske komfort
- c. rumluftens kvalitet og fugtindhold
- d. balancen i ventilationssystemet

For en rationel løsning af de problemer, der er forbundet med de nævnte forhold, må en første betingelse være et konkret kendskab til størrelsen af bygningens naturlige luftskifte i afhængighed af dens konstruktion og udformning, beliggenhed, vejrlig og brug.

De oplysninger, der hidtil har været tilgængelige på området, har været få og spredte, og har hovedsageligt været opgivet for specifikke rum, som f.eks. køkkener og baderum. Fra udlandet foreligger der rapporter over arbejder med måling af det naturlige luftskifte i forskellige typer af boliger, men så vidt det vides, har der aldrig, hverken herhjemme eller i udlandet, været foretaget målinger på et statistisk repræsentativt udvalg af den eksisterende boligmasse.

Teknologisk Institut har gennem en række konsultationsopgaver i afdelingerne for Byggeteknik og Varme- og Installationsteknik yderligere erkendt, at der findes en del bygninger, der er så utætte, at det eksisterende - og i øvrigt korrekt dimensioneret - varmeanlæg ikke har kunnet opvarme bygningen i rimelig grad, samt at andre bygninger er så tætte, og luftskiftet dermed så ringe, at det medfører fugtskader i såvel skjulte bygningskonstruktioner som kondens på synlige overflader.

1.2 Projektets formål

På ovennævnte baggrund ansøgte Teknologisk Institut i juli 1974 Teknologirådet om støtte til gennemførelse af et projekt med følgende formål:

- a. Undersøgelse af udenlandske målemetoders (sporgasmålingers) praktiske anvendelighed og muligheden for overførelse af de til målingerne hørende formelkonstanter.
- b. Udvikling af nye og hurtigere anvendelige målemetoder. (Ideen med at foretage trykmålinger forelå, men var ganske uafprøvet).
- c. Analyse af forholdene i den eksisterende bygningsmasse gennem måling på repræsentativt udvalgte bygninger.
- d. Beregninger vedr. det naturlige luftskiftes betydning for varmetabet.
- e. Udformning af konkrete løsninger til opnåelse af passende luftskifte, med sigte på såvel den eksisterende boligmasse som på nye bygninger.

1.3 Projektets gennemførelse

Efter en bevilling af projekttilskud fra Teknologirådet startede projektet op i efteråret 1974 med en omfattende litteratursøgning inden for emnet.

Sideløbende med et samarbejde med forskellige kommuners tekniske forvaltning om udvælgelse af en repræsentativ boligmasse, startede de indledende forsøg i foråret 1975 med udvælgelse af det bedst mulige udstyr til sporgasmåling, fastlæggelse af måleprocedurer, og opbygning af udstyr til trykmåling m.v.

Fremskaffelsen af det rigtige udstyr til såvel sporgasmåling som trykmåling samt fastlæggelse og indøvelse af måleprocedure var mere tidskrævende end forudset, hvorfor målingerne på den egentlige boligmasse først kom i gang sidst på efteråret i 1975.

Hen mod afslutningen af målingernes gennemførelse, i begyndelsen af 1976, blev der planlagt og gennemført tætning af ialt 9 boliger, hvis luftskifte blev målt før og efter tætningen.

2. SAMMENFATNING

På grundlag af målinger i 57 parcelhuse og 28 etagelejligheder, kan det fastslås, at det naturlige luftskifte i den danske boligmasse næppe er så stort, som der tidligere har været givet udtryk for. Målingerne viser, at gennemsnittet for det naturlige luftskifte ligger omkring 0,65 gange pr. time, medens man nok tidligere anslog tallet til at ligge omkring 1,0 gange pr. time.

Fordelingen af de undersøgte huse og lejligheder svarer ikke helt til fordelingen af den samlede boligmasse, der omfatter ca. 1,1 mill. huse og 0,9 mill. lejligheder, men gennemsnittet for den samlede boligmasse påvirkes næppe heraf, da undersøgelsen har vist, at middeltallet for de to grupper kun afviger meget lidt.

Selv om afskrækkende eksempler på utætte, nyere boliger, hovedsageligt parcelhuse, har efterladt det indtryk, at de nyere boliger var lige så utætte som de ældre, ses det af måleresultaterne, at der er et jævnt fald i størrelsen af det naturlige luftskifte i relation til boligmassens opførelsestidspunkt.

På trods af at luftskiftet er mindre end tidligere antaget, er der alligevel mulighed for besparelse af betydelige energimængder ved en tætning af den del af boligmassen, der har et naturligt luftskifte større end 0,5 gange pr. time. Den del af boligmassen, der ifølge målingerne har et luftskifte større end 0,5 gange pr. time, udgør ca. 65% af boligmassen, og det gennemsnitlige luftskifte i denne gruppe er ca. 0,75 gange pr. time. Hvis dette overføres til landsbasis, vil en reducere til 0,5 gange pr. time betyde, at der årligt kan spares omkring 30% af de 10 mill. Gcal, der - beregnet på grundlag af det samlede materiale - tabes i forbindelse med det naturlige luftskifte i boligmassen.

Ved sporgasmålingen er det med een enkelt måling heller ikke muligt at omregne resultatet til en normaltilstand, men erfaringerne fra kontinuerlige målinger over 3-4 dage i 4 huse viser, at det er muligt at finde en karakteristik for det enkelte hus, hvorefter det sammenholdt med udenlandske erfaringer skulle være muligt at korrigere til en normal tilstand for det enkelte hus.

Der er altså ingen af metoderne, der på realistisk vis gør det muligt at foretage en kontrol af et evt. normkrav til det naturlige luftskiftes størrelse.

Begge metoder vil dog være særdeles velegnet til kontrol af ensartet kvalitet i forbindelse med f.eks. seriefremstillet byggeri, og i denne forbindelse vil trykmålingen være den billigste.

Instituttet regner også fremover med at få megen glæde af det udstyr, der er indkøbt i forbindelse med projektet. Efter afslutningen af projektet har trykmåleudstyret, kombineret med røgudvikling, været anvendt i alm. konsultationsøjemed til påvisning og eftersporing af utætheder i tagkonstruktioner. Sporgasudstyret har, i forbindelse med en større sag om fugtskader i tagkonstruktionen på 2-3000 ens huse, været anvendt til at fastlægge opsugningsgraden af rumluft til tagkonstruktionen.

3. BESKRIVELSE AF KENDTE PRINCIPPER ANVENDT VED MÅLING AF LUFTSKIFTE

Luftskiftet i - eller tætheden af - et rum kan principielt måles på 2 forskellige måder:

1. Ved måling af den luftmængde, der under givne tryk passerer gennem utætheder i rummets begrænsninger.
2. Ved måling af opspædningsgraden af en til rumluften tilsat sporingsgas.

3.1 Måling på grundlag af luftmængden

I et nyt forslag til ændring af Svensk Byggnorm er der stillet krav om en bestemt tæthed af de elementer og fuger, der indgår i klimaskærmen. Man forestiller sig tilsyneladende, at de enkelte komponenter, så at sige, trykprøves efter anbringelsen i bygningen. Efter måling af luftgennemgangen ved forskellige differenstræk og med reference til normalårets vindforhold, vil man derefter summere resultaterne for de enkelte komponenter.

Fordelene ved en sådan målemetode vil givetvis være, at resultaterne let og eksakt kan sammenlignes måling for måling, hvad enten det drejer sig om måling i laboratorium eller på byggeplads, og måske ikke mindst, at den er uafhængig af vejr- og vindforhold.

Metoden er uden tvivl anvendelig i et laboratorium, men forekommer at være særdeles uhåndterlig på en bestående bygning, og dertil kommer, at metoden ikke tager hensyn til de i naturen forekommende lægørende genstande.

3.2 Måling ved hjælp af sporgas

Ved måling af luftskiftet efter dette princip tilsættes der til luften i det eller de rum, hvori luftskiftet skal måles, en sporgas, der let lader sig opblende i luften, og jo større luftskiftet er, des hurtigere vil koncentrationen af sporgassen falde.

Da der i henhold til fysikkens love er en entydig sammenhæng mellem koncentrationsfald pr. tidsenhed og luftskiftets størrelse, kan luftskiftet beregnes på grundlag af målinger heraf.

Den beregningsmæssige baggrund udtrykkes i den såkaldte "stofbalanceligning" (1), der verbalt udtrykt siger, at ændringen i mængden af sporgas i rummet ($V_R \cdot dc$) er lig den mængde sporgas, der tilføres rummet ($q \cdot dt + n \cdot V_R \cdot c_i \cdot dt$) minus den mængde, der fjernes ($n \cdot V_R \cdot c \cdot dt$).

$$(1) V_R \cdot dc = q \cdot dt + n \cdot V_R \cdot c_i \cdot dt - n V_R \cdot c \cdot dt,$$

hvor V_R = rummets volumen i m^3

c = koncentrationen af sporgas i rummet i m^3/m^3

c_i = koncentration af sporgas i den indblæste luft i m^3/m^3

q = den tilførte sporgas i m^3/h

dc/dt = ændring af koncentrationen af sporgas i tiden dt

n = luftskifte pr. time.

Integreres ligning (1) og sættes $c = c_0$ til tiden $t = 0$, fås det almengyldige udtryk.

$$(2) c = \frac{q}{n \cdot V_R} (1 - e^{-nt}) + (c_0 - c_i) \cdot e^{-nt} + c_i$$

Sættes $q = 0$ og løses (2) med hensyn til n , fås:

$$(3) \quad n = \frac{\ln \frac{c_1 - c_i}{c_2 - c_i}}{t_1 - t_2} \quad \text{hvor } c_1 \text{ og } c_2 \text{ er koncentrationen af}$$

sporgas i tiden t_1 og t_2 .

Såfremt $c_i = 0$ fås:

$$(4) \quad n = \frac{\ln \frac{c_1}{c_2}}{t_2 - t_1} = \frac{2,3 \cdot \log \frac{c_1}{c_2}}{t_2 - t_1}$$

svarende til at sammenhørende værdier af c og t ligger på en ret linie i et enkeltlogaritmeblad (fig. 3.2.1).

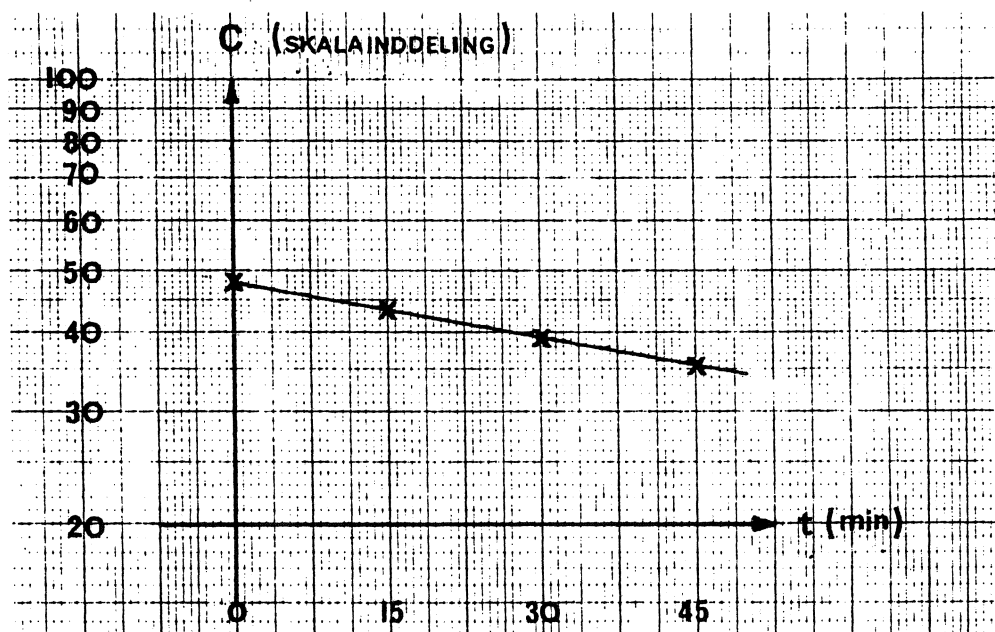


Fig. 3.2.1. Koncentrationsfald i afhængighed af tidsforløb.

3.3 Anvendelige sporgasser og måling af koncentrationen heraf

De i litteraturen oftest beskrevne sporgasser er kvælstofforilte N_2O (lattergas), ilt O , kulstofferilte CO_2 , helium He og krypton $^{85}_{Kr}$. Disse luftarter er alle ufarlige og er desuden i besiddelse af fysiske egenskaber, der er velegnet til bestemmelse af koncentrationen.

| Sporgas | Kuldioxid CO ₂ | Helium He | Kvælstof- forilte N ₂ O | Ilt O ₂ | Krypton 85kr |
|---|------------------------------|------------------|--|-----------------------|-----------------|
| friskluftindhold vol. % | 0,03 | 0 | 0 | 21 | |
| 1 stillesiddende per- son afgiver/optager m ³ /h (ved hårdt ar- bejde tidobles tal- let) | 0,025 | - | - | 0,025 | |
| massefylde, ρ kg/m ³ (0°C) | 2,13 | 0,18 | 1,98 | 1,43 | |
| måleområde, vol. % | 0-2 | 0-1 | 0-0,03 | 21-27 | |
| forbrug for 300 m ³ rum | 12 kg | 3 m ³ | 0,09 m ³ | 21 m ³ | 50 mC |
| sporgas pris pr. måling | 35 kr | 210 kr | 1,5 kr | 125 kr | 200 kr |

Tabel 3.2.2 Karakteristika for sporgasser til luftskiftemålinger, måleområde, forbrug og pris.

| Fabrikat måleprincip | Pris for måleud- styr ca. kr. | Kul- dio- xid. CO ₂ | Helium. He | Kvæl- stof- forilte. N ₂ O | Ilt. O ₂ | Krypton 85kr |
|--|--|---|---------------|--|------------------------|-----------------|
| Dräger, absorption i fast stof | 500 | X | | | | |
| Riken, ændring i brydningsforhold | 3000 | X | X | | | |
| Hartmann & Braun, Beckman, MSA, absorption af infrarøde stråler | 20000 | X | | X | | |
| Siemens, Hartmann & Braun, Servomex, ændring i magnetisk flux | 20000 | | | | X | |
| ændring af varme- overgangstal | | X | | | X | |
| radioaktivitet | 40000 | | | | | X |

Tabel 3.2.3 Principper og priser for måleudstyr til måling af sporgaskoncentrationer til luftskiftemålinger. De angivne fabrikater er de af TI kendte. Det udelukker ikke, at der eksisterer andre fabrikater, der er egnede til luftskiftemålinger.

Tabel 3.2.2 og 3.2.3 viser nogle karakteristika for de nævnte sporgasser samt de almindeligst benyttede metoder til måling af koncentrationen.

Af tabellerne ses endvidere, at priserne på den anvendte sporgas pr. måling, samt priserne på de apparater, hvormed koncentrationen måles, er meget varierende.

3.4 Resultater af tidligere ind- og udenlandske målinger

I U.S.A. har C.W. Coblenz og P.R. Achenback [3] foretaget målinger af det naturlige luftskifte i 10 forskelligartede huse af forskellige aldre, men alle med elektrisk opvarmning.

Målinger er foretaget ved hjælp af sporgas på den måde, at man til hvert enkelt rum i huset har tilført helium indtil en koncentration på ca. 0,5 volumenprocent var opnået. Ved hjælp af ventilatorer i de enkelte rum har man sikret, at koncentrationen var ens over alt i rummet, men koncentrationen har, afhængig af luftskiftet været forskellig fra rum til rum.

Heliumkoncentrationen er i de enkelte rum aflæst pr. 5 minutter, og ud fra stofbalanceligningen har man derefter beregnet det totale luftskifte for hele huset.

Resultatet af målingerne er vist i efterfølgende tabel nr. 3.4.1.

| Hus | Måling nr. | Registrerede vindforhold | | Temp.diff. mell. inde og ude °C | Luftskifte pr. time | | |
|-----------|------------|--------------------------|---------|---------------------------------|---------------------|--------------|-----------|
| | | Hastighed m/s | Retning | | Registreret | Korrigeret* | |
| | | | | | | Enkel måling | Middeltal |
| A | 1 | 7 | V | 25 | 0,84 | 0,71 | 0,62 |
| | 2 | 7 | V | 25 | 0,77 | 0,65 | |
| | 3 | 7 | VNV | 27 | 0,77 | 0,63 | |
| | 4 | 7 | V | 26 | 0,58 | 0,48 | |
| B | 5 | 3 | N | 23 | 0,71 | 0,78 | 0,75 |
| | 6 | 3 | N | 24 | 0,56 | 0,61 | |
| | 7 | 5 | S | 24 | 0,91 | 0,86 | |
| C | 8 | 5 | SV | 15 | 0,51 | 0,57 | 0,48 |
| | 9 | 7 | SV | 13 | 0,42 | 0,44 | |
| | 10 | 5 | SSV | 13 | 0,35 | 0,43 | |
| D | 11 | 6 | SSV | 14 | 1,14 | 1,24 | 0,99 |
| | 12 | 6 | SSV | 11 | 0,84 | 0,99 | |
| | 13 | 5 | SV | 16 | 0,67 | 0,76 | |
| E | 14 | 5 | V | 23 | 0,99 | 0,95 | 0,86 |
| | 15 | 5 | V | 23 | 0,81 | 0,80 | |
| | 16 | 3 | NV | 24 | 0,76 | 0,81 | |
| | 17 | 5 | N | 25 | 0,94 | 0,87 | |
| F | 18 | 3 | VSV | 30 | 0,55 | 0,53 | 0,37 |
| | 19 | 6 | VSV | 28 | 0,39 | 0,34 | |
| | 20 | 4 | VSV | 26 | 0,23 | 0,23 | |
| G | 21 | 3 | NV | 27 | 0,57 | 0,58 | 0,50 |
| | 22 | 3 | SV | 28 | 0,42 | 0,42 | |
| H | 23 | 3 | NØ-SV | 21 | 0,74 | 0,85 | 0,71 |
| | 24 | 3 | SV | 24 | 0,60 | 0,65 | |
| | 25 | 4 | NV | 29 | 0,69 | 0,64 | |
| I | 27 | 5 | V | 26 | 0,52 | 0,48 | 0,48 |
| | 28 | 3 | NØ | 24 | 0,58 | 0,63 | |
| J | 30 | 4 | V | 35 | 0,81 | 0,68 | 0,66 |
| | | | | | | | |
| Middeltal | | 4,4 | | 22,3 | 0,64 | | 0,64 |

Tabel 3.4.1 Resultat af Coblenz og Achenbach's måling af det naturlige luftskifte i 10 huse.

* Korrigeret til en temperaturforskell mellem ude og inde på 22 °C og en middel vindhastighed på 4,5 m/s.

På University of Illinois har man i 2 forsøgshuse målt det naturlige luftskiftes (n) afhængighed af vindhastigheden (v) og temperaturdifferencen (Δt) mellem ude og inde. For disse 2 huse har man fundet følgende sammenhæng:

$$(5) \quad n = 0,15 + 0,009 \cdot \Delta t + 0,029 \cdot v \text{ gange/time.}$$

På grundlag af denne sammenhæng har C.W. Coblentz korrigeret de målte luftskifter til en middel vindhastighed på 4,5 m/s og en temperaturdifferens på 22 °C.

Korrektionen er foretaget efter nedenstående formel:

$$n_k = \frac{0,48 \cdot n}{0,15 + 0,009 \cdot \Delta t + 0,029 \cdot v}$$

hvor n , v og Δt er de målte størrelser og n_k er det korrigerede luftskifte, der er anført i tabel 3.4.1.

Ud af de 10 boliger var de 4 stk. helt nye parcelhuse (C-F-G-I), 5 stk. (A-B-D-E-H) var huse mere end 20 år gamle. Den 10. bolig (J) var en ældre etagelejlighed. Gennemsnittet af middeltallene for det korrigerede luftskifte for de 4 nye huse, kan beregnes til 0,48 gange/time. For de 5 gamle huse bliver gennemsnittet 0,79 gange/time.

Ud fra middeltallet af luftskiftet og rumindholdet af det enkelte hus, har Coblentz beregnet luftgennemgangen igennem husets naturlige fuger, og fundet, at denne varierede fra 1,4 til 4,2 m³/m·h, når luftstrømmen regnedes jævnt fordelt over den samlede fugelængde.

R.R. Laschober og J.H. Healy, U.S.A. [5] har i 2 forsøgshuse målt det naturlige luftskifte på samme måde som C.W. Coblentz og P.R. Achenbach

Laschober og Healy har ved en lang række målinger af de sammenhørende værdier af luftskifte, vindhastighed og temperaturdifferens mellem ude og inde, fundet, at der for disse to huse kunne udtrykkes den sammenhæng, at

$$(6) n = 0,11 + 0,029 \cdot \Delta t + 0,188 \cdot v.$$

Den multiple korrelationskoefficient for denne sammenhæng, er angivet at være større end 0,9.

Det er på grundlag af de samme målinger desuden påvist, at den nævnte lineære sammenhæng giver en bedre multipel korrelationskoefficient end den, der opnås, såfremt t og v indsættes med brudne eksponenter.

I fig. 3.4.2 er vist det resultat de to svenske professorer Höglund og Elmroth [4] har opnået ved måling på 6 forskellige huse. Deres konklusion er, at luftskiftet med god tilnærmelse kan udtrykkes som $n = 0,39 + 0,073 \cdot v$. Ved et større antal målinger på regelhuset (træskelethus) har man også undersøgt afhængigheden af temperaturdifferensen mellem ude og inde og her fundet frem til udtrykket

$$(7) n = 0,15 + 0,012 \cdot \Delta t + 0,077 \cdot v.$$

Også her har man beregnet den multiple korrelationskoefficient til at være bedre end 0,9.

Størrelsen af de konstanter, som de foran refererede 3 undersøgelser, kommer frem til, kan ikke umiddelbart sammenlignes, da de for samme klimabetingelser viser, at huse har haft forskellige tæthedsgrader.

Indsættes f.eks. $\Delta t = 17^{\circ}\text{C}$ og $v = 4$ m/s i formlerne i den tidligere nævnte rækkefølge fås:

$$(5) n = 0,15 + 0,009 \cdot \Delta t + 0,029 \cdot v = 0,42$$

$$(6) n = 0,11 + 0,029 \cdot \Delta t + 0,188 \cdot v = 1,36$$

$$(7) n = 0,15 + 0,012 \cdot \Delta t + 0,070 \cdot v = 0,60$$

Hvis sammenligningen derimod foretages med den forudsætning, at forholdet mellem konstanterne i de enkelte led i de enkelte udtryk holdes konstant og n sættes = 0,60 gange pr. time for $\Delta t = 17^{\circ}\text{C}$ og $v = 4$ m/s, fås omstændelige sammenlignelige udtryk:

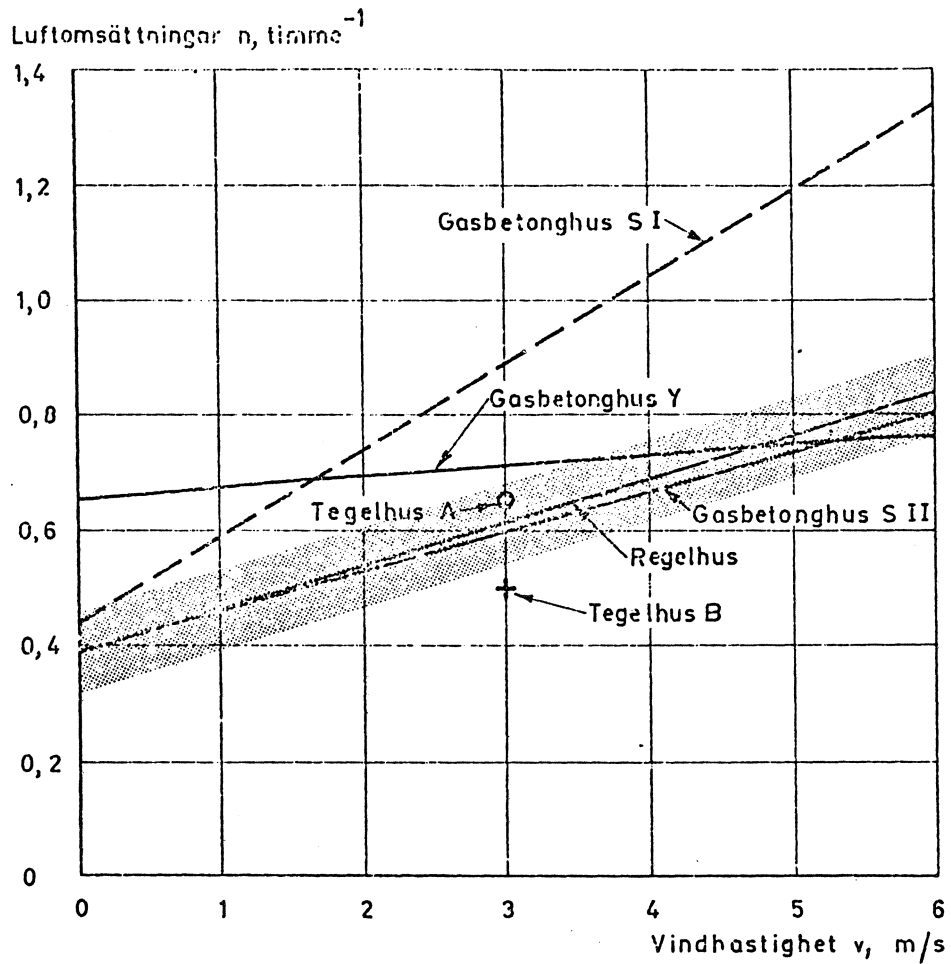


Fig. 3.4.2. Samband mellan antalet luftomsättningar och vindhastighet i de fem provhusen. Den streckade linjen som är markerad med "Gasbetonghus S I" visar sambandet mellan luftomsättning och vindhastighet då ett av rummen saknat golvbeläggning, varvid luft läckt mellan bostadsdel och kryprum. Bortsett från dessa resultat har luftomsättningarna i de olika husen varit av samma storleksordning. För normala vindhastigheter har antalet luftomsättningar under vintern varierat mellan ca 0,5 och ca 0,7 ggr/h.

$$(5) n = 0,21 + 0,013 \cdot \Delta t + 0,042 \cdot v$$

$$(6) n = 0,05 + 0,013 \cdot \Delta t + 0,083 \cdot v$$

$$(7) n = 0,15 + 0,012 \cdot \Delta t + 0,070 \cdot v$$

Denne sammenhæng er i forhold til Δt 17 °C og 30 °C vist i fig. 3.4.3, og det ses heraf, at der er en rimelig god overensstemmelse mellem de 3 udtryk i det normale vindområde fra 2-8 m/s.

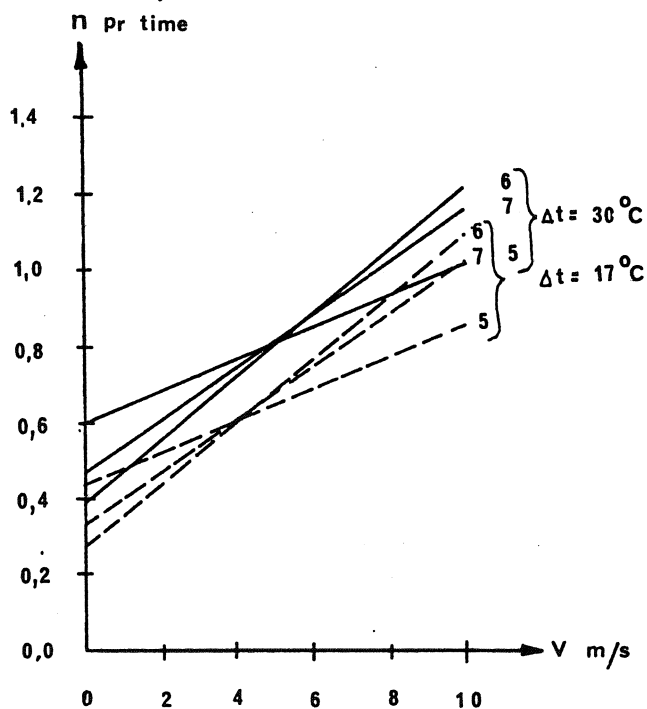


Fig. 3.4.3. Grafisk fremstilling af den sammenhæng, der fås mellem de to amerikanske og den svenske undersøgelse, når udtrykkene normeres til et luftskifte på 0,6 gange pr. time for $v = 4$ m/s og $\Delta t =$ henholdsvis 17°C og 30°C.

I Danmark har et forskerteam, bestående af Ib Andersen, Gunnar R. Lundqvist og Lars Møllehave, alle fra Hygiejnisk Institut ved Århus Universitet [1] undersøgt luftskiftet i et enkelt værelse i en række boliger med det formål at finde en sammenhæng mellem luftskiftet og af-dampningen af formaldehyd fra spånplader. Århus-forskerne har som sporgas anvendt den radioaktive luftart krypton ^{85}Kr , og koncentrationsfaldet er målt ved hjælp af Geiger Müller rør. Resultatet af målingerne er vist i fig. 3.4.4.

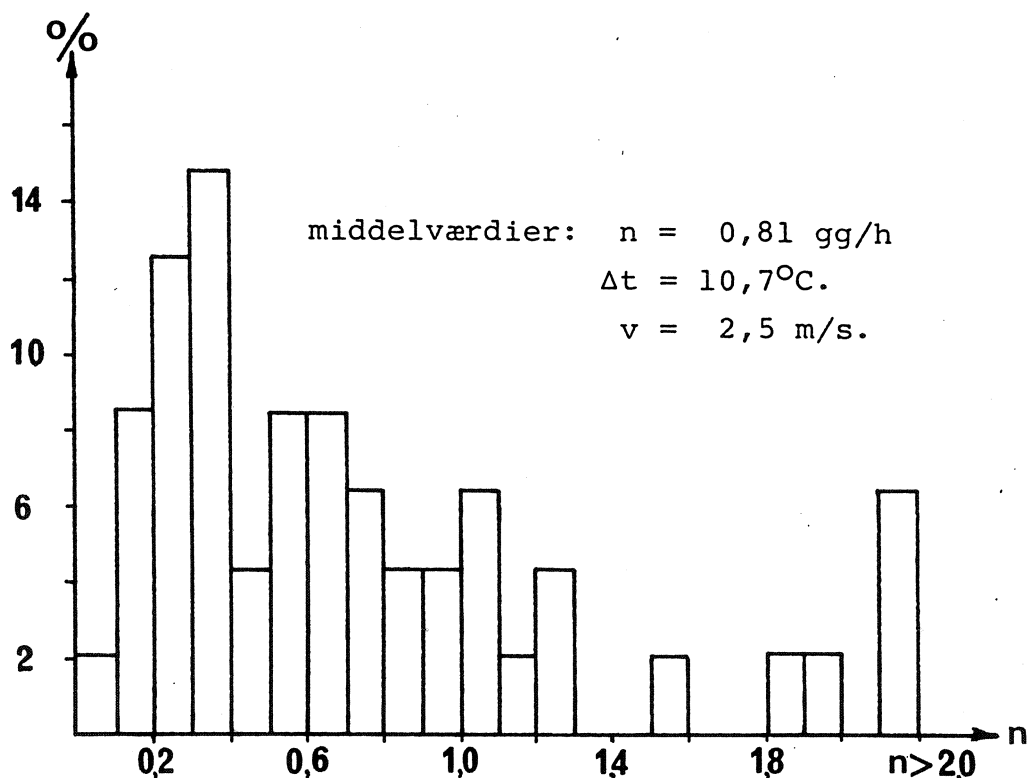


fig. 3.4.4. Det naturlige luftskifte i et enkelt værelse målt i 47 boliger.

Da den udskiftningsluft, der måles for det enkelte værelse, normalt passerer igennem mere end samme rum i boligen, er de luftskifter, der er vist i fig. 3.4.4, formentlig 1,5-2,5 gange større end boligens totale luftskifte.

4. BESKRIVELSE AF DE I PROJEKTET ANVENDTE METODER TIL MÅLING AF LUFTTÆTHED OG NATURLIGT LUFTSKIFTE

Ved projektets start forekom det ikke umiddelbart indlysende, at måling af det naturlige luftskifte, ud fra de gængse principper, der er beskrevet i afsnit 3.2, var særlig velegnet til måling af luftskiftet i en bolig med en opdeling i måske 10 til 15 rum, og med et samlet volumen på op til 500 á 1000 m³.

Sideløbende med opbygningen af udstyr til måling af det naturlige luftskifte er der derfor også foretaget beregninger og overvejelser af, hvorledes boligens lufttæthed på en af vind og temperatur uafhængig måde kunne undersøges. Beregningerne viste, at der uafhængig af vind- og temperaturforhold skulle være en entydig sammenhæng mellem mængden af en indblæst - eller udsuget - luftstrøm, og trykdifferencen over klimaskærmen, og at der således skulle være mulighed for at bestemme husets tæthedskarakteristik alene ved samtidig måling af indblæst luftmængde (f.eks. ved en ventilator anbragt i et dørhul) og trykforskel mellem ude og inde.

4.1 Teoretisk baggrund for trykmålingerne

De grundlæggende betragtninger for brugen af trykmålinger er den, at de ydre vindpåvirkninger - ved et givet overtryk i huset - vil ændre størrelsen af den indblæste luftmængde i omtrent samme omfang, som vindpåvirkningen vil ændre - i modsat retning - størrelsen af den udsugede luftmængde ved et numerisk lige så stort undertryk.

Størrelsen af luftgennemgangen i forskelligt orienterede facader er beregnet for varierende vindretninger under forudsætning af numerisk lige store over- og undertryk i huset. Det beregnede middeltal af luftgennemgang ved henholdsvis over- og undertryk er sat i relation til luftgennemgangen ved vindstille.

no: Beregnet luftskifte ved $v=0$ m/s.

nv: Luftskifte ved vindpåvirkning.

pv: Vindens hastighedstryk.

pt: Påtvunget trykdifferens over klimaskærm.

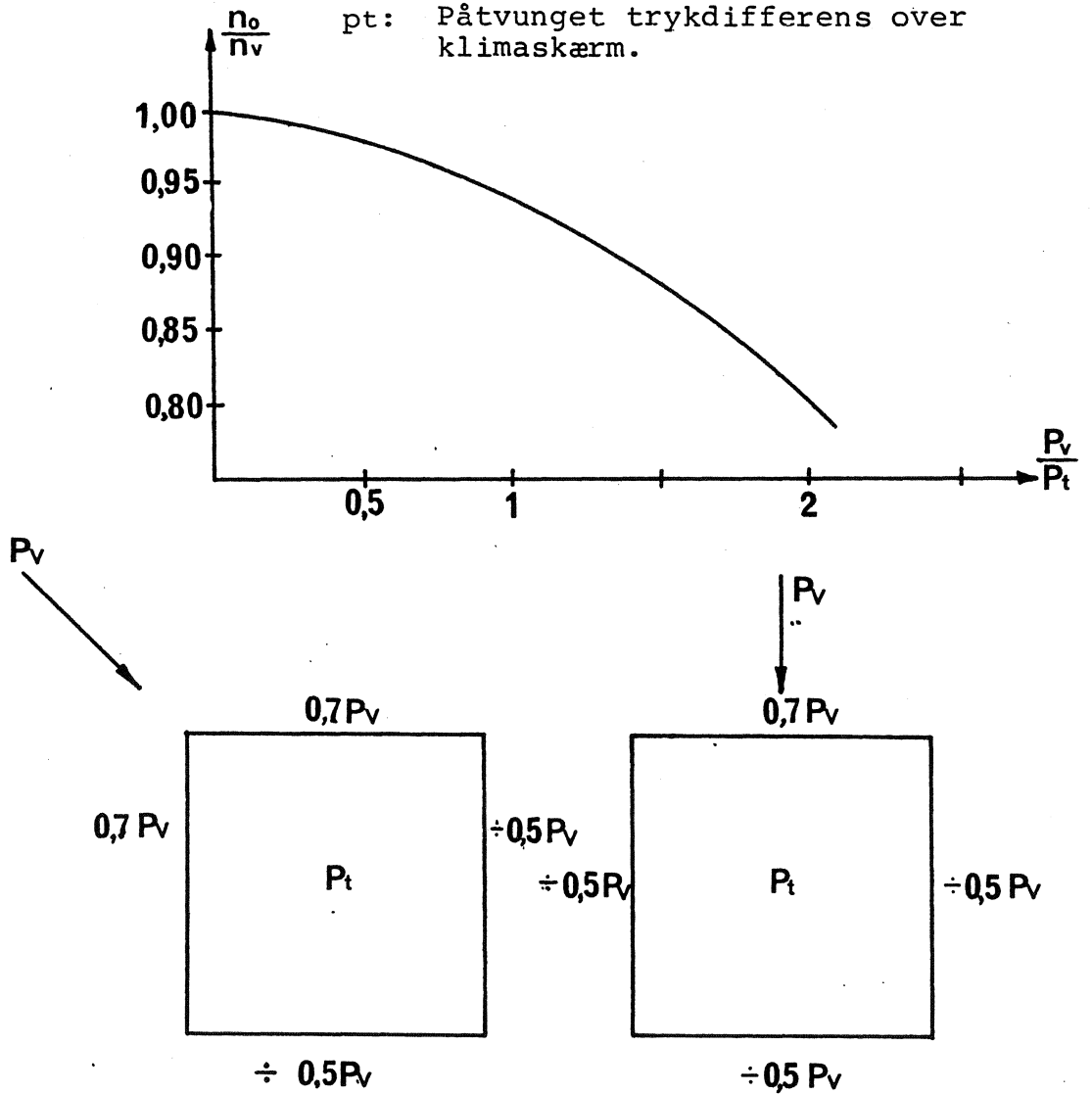


fig. 4.1.1. Kurven på den øverste fig. viser vindens beregnede indflydelse på måleresultatet af en trykmåling i en bolig, når vindretning og trykforhold i og omkring huset er som vist på de to nederste skitser, og det forudsætter, at alle facader er lige utætte og at luftgennemgangen i loft og gulvkonstruktionen er proportional med luftgennemgangen i facaderne.

Beregningerne er udført på grundlag af den kendte formel $V = c \cdot P_t^x$

hvor V = luftmængden pr. tidsenhed

c er en konstant, der afhænger af utæthedernes antal og geometriske udformninger. Utæthederne forudsættes ensartede og jævnt fordelt over alle vægge.

P_t er trykdifferensen over klimaskærmen

x er sat til værdien 0,7.

Beregningerne viser, at uanset om vindretningen er vinkelret på en facade eller husets diagonal, så vil vindens indvirkning på resultatet være begrænset.

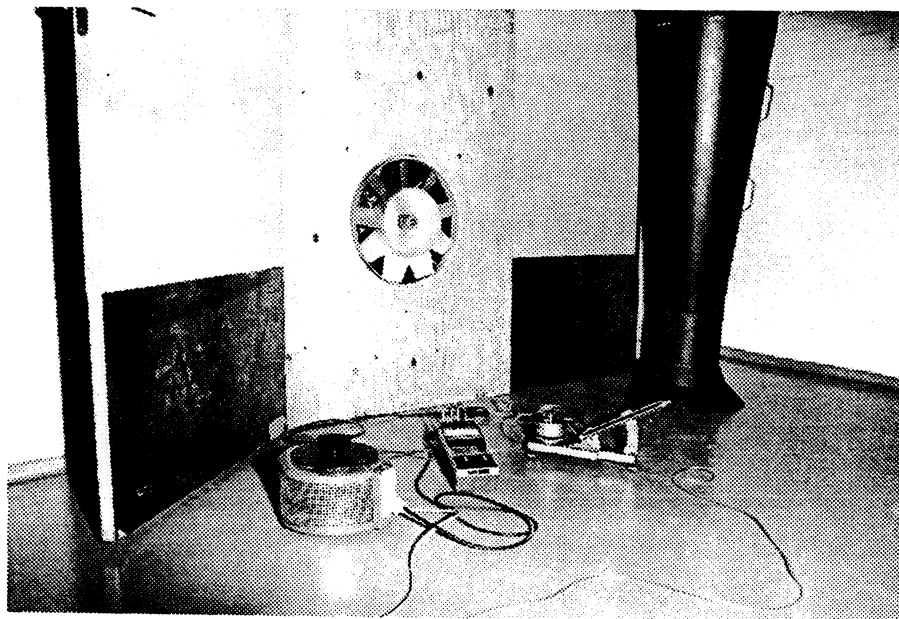
I fig. 4.1.1 er ovenstående beregninger anskueliggjort grafisk. Af figuren kan man aflæse den indflydelse, som forholdet mellem vindens beregnede dynamiske tryk P_v og den påtvungne trykdifferens over klimaskærmen har på den til opretholdelse af trykket P_t nødvendige luftmængde.

Af fig. 4.1.1 ses endvidere, at når $\frac{P_v}{P_t} < 1,5$, da vil den målte luftmængde kun afvige ca. 10% fra den luftmængde, der ville være blevet målt ved samme nominelle tryk P_t og vindstille, hvilket indebærer, at kurven $V = c \cdot P_t^x$ med rimelighed kan bestemmes for P_t i området 2-10 mmVS ved vindhastigheder op til 7 m/s, eller i området 5-10 mmVS ved vindhastigheder op til 11 m/s.

4.2 Praktisk gennemførelse af trykmålinger

Udstyret til gennemførelse af trykmålingerne omfatter en aksialventilator, der er sammenbygget med et venturirør. Rør og ventilator kan påbygges kraftige krydsfinérplader af forskellige størrelser. Krydsfinérpladen monteres og tættes mod karmen på en af husets yderdøre.

Under forsøget er der anvendt 2 størrelser ventilatorer, 1 stk. med 2800 omdr./min. og ydelse op til 8500 m³/h samt 1 stk. med 1400 omdr./min. og 4300 m³/h.



Fotoopstilling af udstyr til trykmåling.

I forgrunden ses fra venstre, variotransformer, wattmeter, skrårørsmanometer og yderst til højre venturirøret. I baggrunden en af de krydsfinérplader, der under prøvningen erstatter en udvendig dør. Indfældet i pladen ses den mindste af de to ventilatorer.

Luftmængden reguleres ved at ændre ventilatorens omløbs-hastighed, der styres ved hjælp af en variotransformer.

Luftmængden gennem venturirøret bestemmes ud fra kalibreringskurver i forhold til det dynamiske lufttryk, der måles ved indsugningen til røret.

Trykdifferencen mellem boligen og omgivelserne, og luftens dynamiske tryk i venturirøret, måles med et skrårørsmanometer med en nøjagtighed på 3/100 mm VS.

Vanskeligheden med at finde en neutral trykzone omkring huset er søgt imødegået ved at lade den udvendige slange udmunde i blomsterbede, højt græs eller lignende. Ved nyere huse uden haveanlæg, har man indstukket slangen i en blok af mineraluld, og udlagt denne i en afstand af 10-15 meter fra huset. Da det er middel af luftgennemstrømningen, der benyttes ved både over- og undertryk i huset, vil fejlen ved en ikke helt korrekt neutral zone være udjævnet.

Målingerne er foretaget i to serier, alle med stigende trykdifferens. I første serie, hvor alle ventilationsåbninger inkl. pejsespjæld og lign. har været lukket således, at der kun var tvangsåbninger tilbage, er der foretaget 5-10 sammenhørende målinger af luftmængde og henholdsvis over- og undertryk i huset. I anden serie er der foretaget 2-4 målinger med fuldt åbne ventiler, aftræk og lign.

I praksis har metoden kun givet måletekniske problemer i et par enkelte tilfælde, hvor vindretningen har været direkte på venturirøret, og hvor det således har været vanskeligt at opnå stabile tilstande under aflæsningen af trykdifferencerne.

Metoden må betegnes som værende absolut velegnet til bestemmelse af tæthedsgraden af et hus, men den eksakte relation til det naturlige luftskifte bliver forstyrret dels af, at den yderdør, hvori udstyret anbringes, måske har utætheder, der normalt yder et væsentligt bidrag til det naturlige luftskifte, og dels af, at 2 huse med samme tæthed vil have forskelligt luftskifte, såfremt de lægørende forhold er forskellige.

Tidsforbruget til gennemførelse af trykmålingerne har i gennemsnit været 2½-3 timer. Med en videreudvikling af udstyret til f.eks. reversibel ventilator, omformning af dørafspærringspladen m.v., skulle det være muligt at nedbringe tidsforbruget til ca. 1½ time.

4.3 Baggrund for måling af det naturlige luftskifte ved hjælp af sporgas

Et af projektets hovedmål har været at redegøre for varmetabet i den danske boligmasse som følge af det naturlige luftskifte. Det har således, uanset eventuelle fordele ved trykmålingen, været nødvendigt at opbygge et pålideligt udstyr til måling af det naturlige luftskifte, om ikke for andet, så for at finde en sammenhæng mellem de to målemetoder.

Af de målemetoder, der er beskrevet i afsnit 3.2-3.4, har vi fundet, at den mest nøjagtige og enkle metode måtte bestå i et udslip af sporgas i de enkelte rum samtidig med, at alle indvendige døre er åbne, således at koncentrationen, ved hjælp af et antal ventilatorer, kan holdes ens i samtlige rum. Koncentrationsfaldets afhængighed af tiden kan derefter bestemmes over 30-40 min. ved 4-5 målinger med ca. 10 min. intervaller, og luftskiftet beregnes på grundlag af stofbalanceligningen (1).

De fejlmuligheder, der kan forudses ved denne målemetode, er følgende:

1. Forstyrrelser af det naturlige luftskifte som følge af den kraftige luftbevægelse, der fremkaldes af ventilatorerne.
2. Muligheden for forskellige resultater afhængig af valg af sporgas og koncentrationsniveau.
3. Forstyrrelser af det naturlige luftskifte på grund af at alle indvendige døre er åbne.

Størrelsen af den under 1. nævnte fejlmulighed, er søgt afklaret på følgende måde: Efter måling og beregning af luftskiftet med kørende ventilatorer, har ventilatorerne været standset i ca. 20 min. Herefter er ventilatorerne startet, og når koncentrationen - efter ca. 5 min. forløb - atter har været ensartet i hele huset, er der foretaget en fornyet aflæsning, og luftskiftet i den forløbne tid er beregnet på grundlag af koncentrationen før og efter at ventilatorerne har været standset. Størrelsen af luftskiftet pr. time, målt med og uden kørende ventilatorer, har kun varieret med 3 á 4 procent, som f.eks. fra 0,62 til 0,64 gg/h. Hvilket må være et klart udtryk for, at ventileringen i rummene ikke virker forstyrrende på måleresultaterne.

Mulighederne for forskellige resultater afhængig af valg af sporgas og koncentrationsniveau er checket på den måde, at der samtidig er udsluppet CO₂ og N₂O. Begyndelseskoncentrationen af CO₂ var ca. 2% og blev målt med et Drægerrør. N₂O, der måles med en Uras 7N, havde en begyndelseskoncentration på ca. 200 ppm.

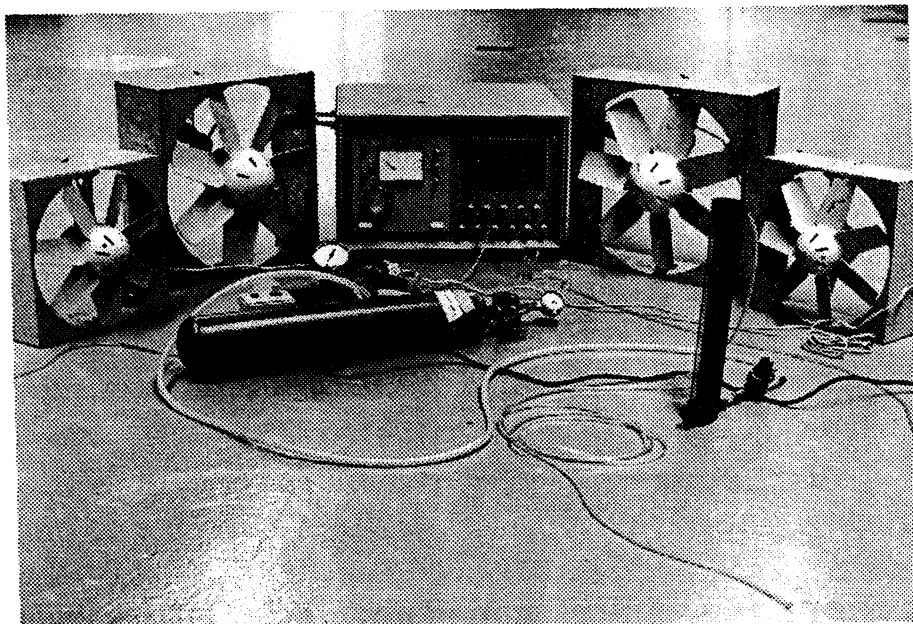
Resultaterne af målingerne på de to sporgasser varierede med et par procent. Afvigelserne må sandsynligvis i højere grad tilskrives Drægerrørens manglende aflæsningsnøjagtighed, end absorption og desorption af sporgasserne.

Den tredje fejlmulighed - de åbentstående døre - er ikke efterkontrolleret ved måling med den begrundelse, at de indvendige døre i en almindelig bolig sjældent er tætte og som oftest åbentstående. Nøjagtigheden af målingen vil sandsynligvis være størst, når målingerne foretages med åbentstående døre.

4.4 Praktisk gennemførelse af sporgasmålinger

Målingerne indledes med opstilling af ventilatorerne, der som regel placeres i - eller ved - døråbninger såle-

des, at luften mellem de enkelte rum udveksles 5-10 gange pr. time. De benyttede aksialventilatorer er af en type, der er beregnet for indbygning i ydervæg eller lign. Til denne opgave er de blot indbygget i en pladejernsramme således, at de kan opstilles frit på gulvet og transporteres uden at lide overlast. Kapaciteten på de tre størrelser ventilatorer, der er anvendt, er henholdsvis 2400, 1200 og 600 m³/h, og de dertil hørende effektforbrug går fra 200 til 100 watt.



Fotoopstilling af udstyr til sporgasmåling.

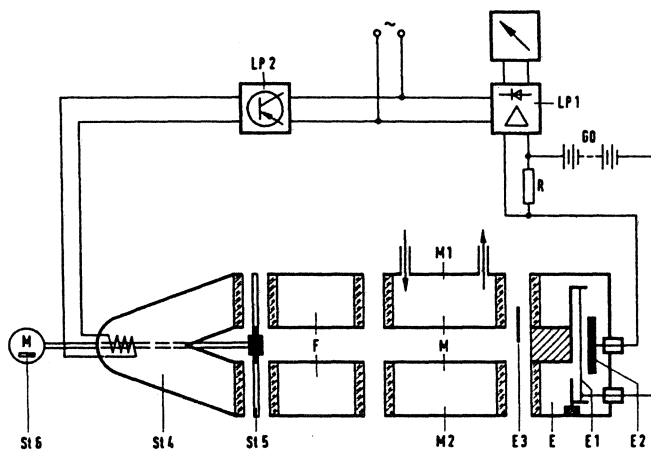
I forgrunden ses en 4 kg flaske med N₂O med tilkoblet flowmeter, klasse 1, samt 2 præcisionsmanometre. I midten gasanalysatoren, Uras 7N, der er sammenbygget med en 10 kanalomsifter. Flankerende ses eks. på ventilatorerne til brug for omrøring i luften. De store har en kapacitet på 2400 m³/h, de små 1200 m³/h. Lige bag trykflasken til højre ses tyristorstyringen for ventilatorerne.

Til brug under kontinuerlige målinger mangler der på billedet udstyr til vindmåling samt 1 stk. 2 punkt og 1 stk. 12 punktskriver.

Under målingerne på den sidste halvdel af boligområdet, har det ved hjælp af tyristorstyring og et fælles strømudtag været muligt at styre omdrejningen på ventilatorerne, og derved starte med en kraftigere omrøring af luften indtil sporgaskoncentrationen er blevet ensartet, hvorefter omdrejningerne har kunnet nedsættes til en fjerdedel.

Sporgassen er udledt i de enkelte rum, hvor man blot efter fornemmelse har udledt en vis mængde, således at begyndelseskoncentrationen har været 200-400 ppm jævnt fordelt over hele huset (1000 ppm er lig med 1 volumen promille). Til et almindeligt parcelhus forbruges ca. 200 g lattergas (N_2O).

Gennem slanger udlagt til 5-6 - efter erfaring - strategisk, vigtige rum plus en kontrolslange til det fri, suges luften ind i måleapparatet, der består af en Uras 7N.



| | | | |
|-----|-----------------------|------|--------------------|
| E | Empfänger | M 2 | Vergleichsrohr |
| E 1 | Membran | R | Hochohmwiderstand |
| E 2 | Gegenelektrode | St 4 | Strahlungsquelle |
| E 3 | Empfängerblende | St 5 | Blendenrad |
| F | Filterküvette | St 6 | Blendenradmotor |
| GQ | Gleichspannungsquelle | Lp 1 | Verstärker |
| M | Meßküvette | Lp 2 | Netzstabilisierung |
| M 1 | Meßrohr | | |

MÅLEPRINCIP I URAS 7N

(absorption af infrarød stråling)

Når koncentrationen af lattergas efter sædvanligvis 10-20 min. er ens over alt i huset, bringes gasflasken uden for huset for at sikre, at evt. gasudslip ikke utilsigtet påvirker måleresultatet.

Under normale forhold foretages der 4 aflæsninger med 10-15 min. intervaller. Resultaterne plottes ind på et enkeltlogaritme papir. Punkterne på papiret skal følge en ret linie. Hvor dette ikke har været tilfældet - og hvor målingerne derfor har måttet gøres om - har årsagen som regel været den, at en yderdør har været åbnet. Dårlig fordeling af gaskoncentrationen ved målingernes start vil også give knæk på kurveforløbet. Det samlede tidsforbrug til gennemførelse af sporgasmålinger, d.v.s. tilrigning af udstyr, målinger og beregninger m.v. samt afrigning, har i gennemsnit været 2-2½ time.

4.5 Kontinuerlig måling af luftskifte

Kort efter projektets start blev der fra Boligministeriet fremsat forslag til ændring af Bygningsreglementets kapitel 8 og 11, omhandlende henholdsvis isolering og ventilation. De nu gældende bestemmelser tangerer kun spørgsmålet om tæthed og friskluftskifte. I kapitel 8 står der f.eks., at "varmetabet ikke må forøges i væsentlig grad som følge af blæst og regn". Kapitel 11 angiver kun krav til ventilationsåbningernes størrelse. I det fremsatte forslag opererede man med krav om, at en bygning skal være så tæt, at det naturlige luftskifte maksimalt bliver 0,3 gange pr. time ved en vindhastighed på 6 m/s.

Da et sådant krav selvsagt må opfølges af en målemetode, der helst er uafhængig af vejrforholdene, har vi fundet det nødvendigt at foretage nogle kontinuerlige målinger af det naturlige luftskifte for at fastslå, om de formelkonstanter og relationer mellem det naturlige luftskifte, temperatur og vindforhold, som man ved udenlandske undersøgelser er kommet frem til, uden videre kan overføres til danske forhold. Her tænkes først og fremmest på forskelle i byggeskik og lægørende faktorer.

Målemetode, apparatur og opstilling til gennemførelse af de kontinuerlige målinger er generelt set det samme som er beskrevet i afsnit 4.4, men ved disse målinger er tilførslen af sporgas sket kontinuerlig ved udledning gennem et præcisionsflowmeter. Koncentrationen af sporgas, vindhastigheden i 6 meters højde samt den ind- og udvendige lufttemperatur er løbende registreret via en 12 punkts skriver. Oplysninger om vindretning og -hastighed i 10 meters højde er indhentet fra nærmeste meteorologiske målestation.

Målingerne er foretaget på 4 huse over et tidsrum på 3-7 dage pr. hus. Udstyret har været tilset mindst to gange dagligt, og det har været tilstræbt at regulere tilførslen af sporgas således, at den tilførte volumenmængde af N₂O har svaret til en koncentration på mellem 200-300 ppm. Det har dog til tider været ret vanskeligt at holde denne koncentration, dels på grund af variationerne i luftskiftet, og dels på grund af funktionsvanskeligheder med flowmeteret.

Variationerne i sporgaskoncentrationen er dog uden praktisk betydning, idet luftskiftet beregnes på grundlag af stofbalanceligningen (ligning (1) afsnit 3.2), hvoraf n udtrykkes

$$n = \frac{q \cdot 6 - V_r \cdot (c_2 - c_1)}{V_r \cdot \frac{c_1 + c_2}{2} \cdot 6}$$

d_t er altså her sat lig 6 timer.

c_1 er koncentrationen af N₂O ved begyndelsen af en 6 timers periode, c_2 er slutkoncentrationen for samme periode og samtidig begyndelseskoncentrationen for den næste periode.

q er den i perioden tilførte mængde af N₂O i m³/time.

Ud fra det beregnede luftskifte er der herefter for de sammenhørende værdier af n , Δt og v beregnet de konstanter a , b og c , som findes i udtrykkene i ligning (5) i afsnit 3.4.

Konstanterne er beregnet for det enkelte hus ved hjælp af en lineær regressionsmetode. Den multiple korrelationskoefficient er ligeledes beregnet for de enkelte relationer. Se tabel 6.3.1.

5. UDVÆLGELSE AF DEN UNDERSØGTE BOLIGMASSE

5.1 Udvælgelse af område

Ønsket om en repræsentativ udvælgelse af forsøgshusene blev tilgodeset ved, at der ud fra en tabel over tilfældige tal blev udtrukket postnumrene på 5 postdistrikter på Sjælland, idet man dog på forhånd havde udskudt Københavns og Frederiksbergs centrale bydele som værende atypiske, ligesom postdistrikter i en afstand af mere end ca. 60 km fra Tåstrup - af hensyn til begrænsning af transportomkostninger - også blev udskudt.

De fem udtrukne postdistrikter blev:

| | |
|------|-----------|
| 2820 | Gentofte |
| 4000 | Roskilde |
| 2630 | Tåstrup |
| 4690 | Haslev |
| 3400 | Hillerød |
| 2740 | Skovlunde |

5.2 Udvælgelse inden for områderne

Inden for de enkelte områder er udvælgelsen foretaget af de respektive kommuners tekniske forvaltning, der alt efter kommunens størrelse blev anmodet om at fremkomme med adresser på et vist antal parcelhuse og lejligheder, afstemt på en sådan måde, at alder og typer var typisk for den pågældende kommune.

På grundlag af oplysningerne fra kommunerne, blev de enkelte boligindehavere tilsendt et brev med en forklaring om undersøgelsens formål, samt hvilke fordele den enkelte kunne drage ved at stille boligen til rådighed for undersøgelsen. Af de fordele, der blev fremhævet, kan bl.a. nævnes:

Gode råd om tætning af boligen, såfremt det var nødvendigt.

Eftersyn af isolering og rådgivning desangående.

Vejledning i mulige besparelser ved regulering og pasning af fyringsanlæg.

Medvirken til en bedring af det kommende byggeri således, at den evt. næste bolig blev af en bedre standard.

Brevet til boligindehaveren indeholdt desuden en frankeret svarskrivelse, der i udfyldt stand gav relevante oplysninger om boligens type, alder, størrelse og indretning m.v.

Ca. 45% af de adspurgte ejere af parcel- eller to-familiehuse var villige til at deltage i undersøgelserne, hvorimod kun 30% af lejlighedsindehaverne viste positiv interesse for sagen.

For at råde bod på undervægten af svar fra lejlighedsindehaverne, blev der ved rundspørge til instituttets personale fremskaffet adresser på 10 fortrinsvis ældre lejligheder i Bro-kvartererne i København.

6. MÅLERESULTATER

6.1 Trykmålinger

Trykmålingerne er foretaget på ialt 12 parcelhuse og har fulgt den metode, som er beskrevet i afsnit 4.2. Dog har det på grund af manglende plads til venturirøret på 3 huse, hvor der var udv. vindfang, ikke været muligt at foretage målinger med overtryk i huset.

De enkelte måleresultater er afsat på alm. milimeterpapir. Nedenstående fig. 6.1.1 viser et eksempel på de registrerede værdier fra bolig nr. 6.

Bilag 1 viser måleresultaterne for samtlige 12 huse.

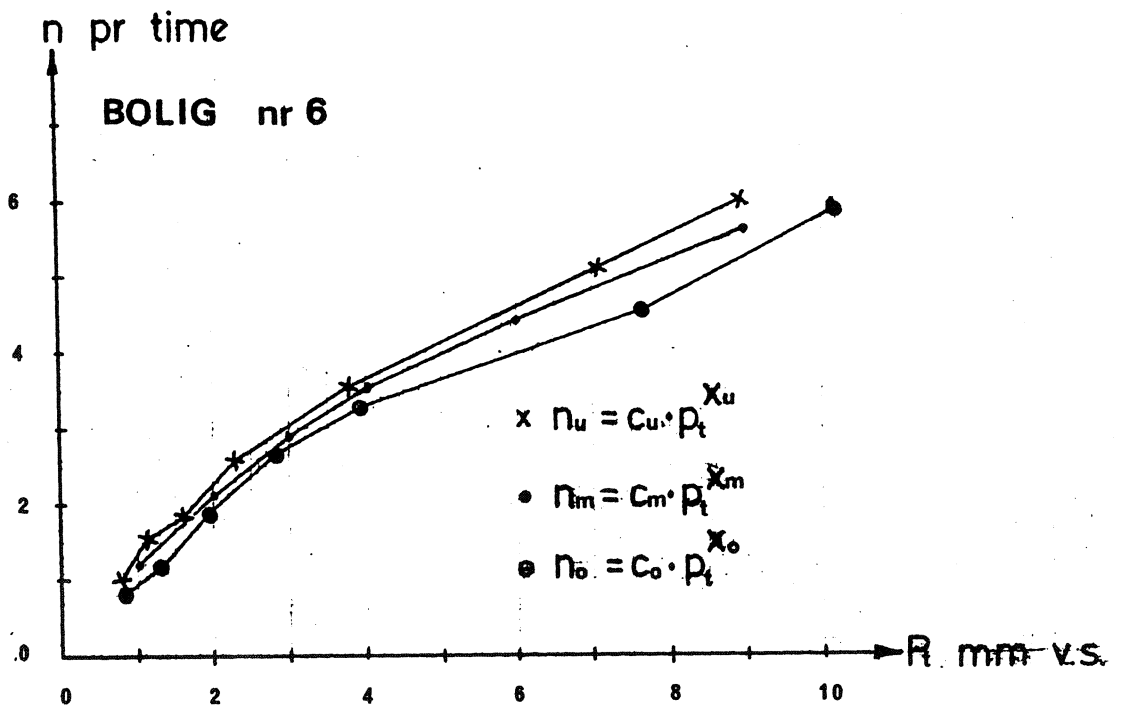


Fig. 6.1.1. Måleresultat for bolig nr. 6.

Index u. henviser til måling ved undertryk
Index 0 henviser til måling ved overtryk
Index m. henviser til det beregnede middeltal.

På grundlag af de registrerede værdier af luftskiftet n og trykdifferencen P_t er der ud fra formlen $n = c \cdot P_t^x$ beregnet størrelsen af konstanterne c_o , c_u , c_m , x_o , x_u og x_m for det enkelte hus.

De beregnede værdier fremgår af nedenstående tabel. Vedr. betydningen af indexerne, se fig. 6.1.1.

| Bolig nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | mid-del 1-12 | standard-afvigelse |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------------|--------------------|
| c_o | 3,6 | | | 2,6 | 2,2 | 1,17 | | 2,7 | 4,4 | 2,3 | 2,4 | 1,9 | 2,6 | 0,9 |
| c_u | 3,1 | 2,7 | 3,4 | 4,0 | 2,7 | 1,31 | 3,6 | 2,9 | 11,5 | 1,8 | 2,5 | 1,8 | 3,4 | 2,6 |
| c_m | 3,2 | | | 3,3 | 2,4 | 1,32 | | 2,7 | 7,9 | 2,1 | 2,4 | 1,8 | 3,0 | 1,9 |
| x_o | 0,62 | | | 0,76 | 0,61 | 0,70 | | 0,71 | 0,77 | 0,63 | 0,62 | 0,72 | 0,68 | 0,06 |
| x_u | 0,72 | 0,55 | 0,67 | 0,63 | 0,63 | 0,71 | 0,55 | 0,58 | 0,79 | 0,68 | 0,54 | 0,72 | 0,65 | 0,08 |
| x_m | 0,70 | | | 0,67 | 0,64 | 0,68 | | 0,66 | 0,78 | 0,66 | 0,57 | 0,72 | 0,68 | 0,06 |

Tabel 6.1.2 Beregnede c og x konstanter.

Beregningerne af c og x er foretaget ved at afsætte de sammenhørende værdier af n og P_t i et dobbelt logaritme-papir. Ud fra disse punkter kan den rette linie efter ligningen $\log.n = \log.c + X \log.P_t$ indtegnes på papiret. c og X kan beregnes ud fra denne linie, idet $n = c$, når $P_t = 1$ mmVS, og $x = \log. \frac{n}{c}$, når $P_t = 10$ mmVS.

Fig. 6.1.3 viser de indtegnede linier for bolig nr. 6, se næste side.

For de ialt 9 huse, hvor der er foretaget måling ved både over- og undertryk, har det vist sig, at den beregnede middelværdi af luftskiftet og den sammenhørende trykdifferens er i væsentlig bedre overensstemmelse med en ret linie på et dobbelt logaritme-papir end det er tilfældet med de målte sammenhørende værdier af n og P_t .

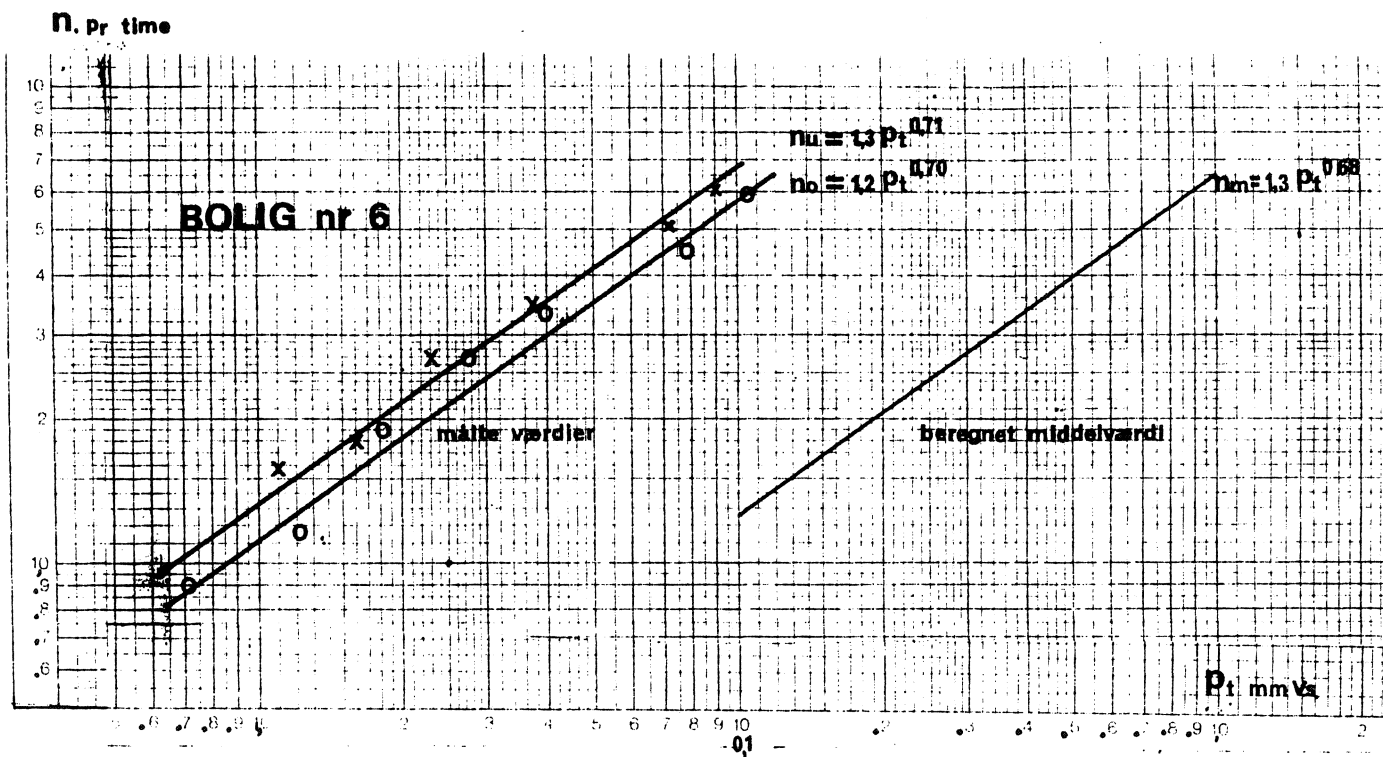


Fig. 6.1.3. Måleresultaterne fra fig. 6.1.1. overført til dobbelt logaritme papir.

Ved en korrelationsanalyse af måleresultaterne er der fundet en korrelationskoefficient, der for alle huse er bedre end 0,98.

Ved en regressionsanalyse af måleresultaterne fra bolig nr. 6, der er den bolig, hvor der er konstateret den dårligste overensstemmelse med en ret linie på det dobbelte logaritme papir, er det fundet, at de målte luftskifter i gennemsnit afviger fra de beregnede med:

- 8,4% ved undertryksmåling
- 6,6% ved overtryksmåling
- 3,4% ved det beregnede middelluftskifte.

EDB-udskriftet af regressionsanalysen er indsat som bilag 2.

Selv om målemetoden ved en større praktisk anvendelse skulle vise sig ikke at være lige så uafhængig af vindhastigheden som de foranstående teoretiske beregninger viser, må den dog alligevel betegnes som værende særdeles velegnet for kontrol og sammenligning af huses tæthed ved vindhastigheder op til 8-10 m/s. En sådan kontrol kunne eksempelvis tænkes at være relevant i forbindelse med seriefremstillede huse.

| Bolig | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | Middeltal og standardafvigelse |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|
| n_t gg/h | 3,2 | 2,7 | 3,4 | 3,3 | 2,4 | 1,3 | 3,6 | 2,7 | 7,8 | 2,1 | 2,5 | $\bar{n}_t = 3,2$ $s = 1,6$ |
| n_k gg/h | 0,29 | 0,40 | 0,88 | 0,32 | 0,59 | 0,34 | 0,56 | 0,42 | 0,76 | 0,16 | 0,38 | $\bar{n}_k = 0,46$ $s = 0,24$ |
| $n_t:n_k$ | 11,0 | 6,8 | 3,9 | 10,3 | 4,1 | 3,8 | 6,4 | 6,4 | 10,3 | 13,1 | 6,6 | $\bar{n}_t:\bar{n}_k = 7,5$ $s = 3,2$ |

Tabel 6.1.4. Sammenligning af det naturlige luftskifte korrigeret til normaltilstanden n_k , og luftskiftet n_t målt ved trykmåling ved $P_t = 1$ mmVS.

I tabel 6.1.4 er der foretaget en sammenligning mellem resultaterne, opnået med henholdsvis sporgasmåling og trykmåling i 11 af de omtalte 12 boliger.

Formålet med sammenligningen er, som beskrevet i afsnit 4, at undersøge, om der kunne udledes en sammenhæng mellem måleresultaterne af de to målemetoder, hvorefter trykmålingen kunne afløse sporgasmålingen.

Sammenligningen er foretaget på den måde, at det normerede, naturlige luftskifte efter sporgasmålingen er sammenlignet med luftskiftet ved trykmålingen, beregnet som $n_t = c_m \cdot P_t^{x_m}$ for $P_t = 1$ mmVS.

Som det ses af tabel 6.1.4 er der ingen sammenhæng mellem luftskifterne, målt ved de 2 metoder, hvilket i det væsentlige dels skyldes, at luftskiftet ved de to målemetoder ikke foregår på samme måde gennem de samme utætheder, og dels at trykmålingen i modsætning til sporgasmålingen, er uafhængig af de lægørende faktorer omkring

huset. Da det næppe er muligt på enkel vis at fastlægge eksakte størrelser af de lægivende faktorer (ruhedsgraden af et landskab), mener vi ikke der kan opstilles en brugbar sammenhæng mellem det naturlige luftskifte, målt ved sporgasmetoden og luftskiftet (tæthedsgraden), registreret ved trykmåling.

6.2 Sporgasmåling

Det naturlige luftskifte er ved en enkelt måling med sporgas målt i 53 huse og 28 lejligheder. Ud af disse er der i 5 huse og 4 lejligheder desuden foretaget to ekstra målinger i forbindelse med et forsøg på tilvejebringelse af tætning (se kap. 7).

Derudover er der i 4 huse over flere dage foretaget kontinuerlig måling af luftskiftet (se kap. 6.3), således at det samlede antal undersøgte boliger når op på 85 stk.

De direkte og de korrigerede måleresultater er, sammen med en række oplysninger om opførelsestidspunkt, areal og volumen, samt temperatur og vindforhold, vist i bilag 3.

Tallene fra bilag 3 er gjort illustrative ved hjælp af en række histogrammer på de følgende sider.

På fig. 6.2.1, 2 og 3, er vist den procentvise fordeling af boligerne i relation til luftskiftets størrelse, både for det totale materiale og for huse og lejligheder hver for sig.

På fig. 6.2.4, 5 og 6, er luftskiftet sat i relation til opførelsestidspunktet, og på fig. 6.2.7 er vindhastighedens betydning bragt ind i billedet.

Da målingerne er foretaget under forskellige temperaturer og vindforhold, vil de direkte målinger ikke være umiddelbart sammenlignelige, hvorfor måleresultaterne på figurerne også er korrigeret til en mormaltilstand med en vindhastighed på 4,6 m/s og en temperaturdifferens over klimaskærmen på 17 °C.

Som senere omtalt i afsnit 6.3 er der ikke fundet en entydig måde, hvorefter måleresultaterne kan korrigeres fra et sæt klimabetingelser til et andet, men den enkelte boligs

luftskifte følger dog med rimelig tilnærmelse ligningen $n = a+b\cdot\Delta t+c\cdot v$. Konstanterne a , b og c - samt forholdet imellem dem - kan imidlertid variere kraftigt fra hus til hus.

De konstanter, der er anvendt til korrektionen er udvalgt som et rimeligt gennemsnit af de værdier, der er fundet ved de kontinuerlige målinger på 4 huse, samt de svenske og amerikanske undersøgelser. Samtlige disse værdier er vist i tabel 6.3.3.

Indsættes normaltilstandens temperaturdifference $\Delta t = 17^\circ\text{C}$ og vindhastigheden $4,6\text{ m/s}$ i ligningen $n = a+b\cdot\Delta t+c\cdot v$ samtidig med de valgte konstanter $a:b:c = 1:0,05:0,30$, fås $n = 3,23$.

Korrektionen til den på stedet målte temperaturdifference og vindhastigheden i 10 meters højde, opgivet for nærmeste meteorologiske målestation, foretages ved at indsætte disse størrelser i nævneren i ligningen

$$n_k = n \frac{3,23}{1+0,05\cdot\Delta t+0,30\cdot v}$$

Korrektionen ændrer kun middelluftskiftet for det totale materiale fra $n = 0,62$ til $n_k = 0,63$, hvorimod middelluftskiftet for gruppen med huse ændres fra $n = 0,56$ til $n_k = 0,62$, og for lejlighederne ændres der fra $n = 0,70$ til $n_k = 0,66$.

Værdierne fra det totale materiale på fig. 6.2.1 er også vist som en akkumuleret sumkurve på fig. 6.2.8, og det ses heraf, at 80% af boligerne har et luftskifte mellem 0,4 og 0,8 gange/time med omtrent lige mange boliger til begge sider af middelværdien.

Af fig. 6.2.4, 5 og 6, ses det, at luftskiftet stiger relativt meget med boligens alder, idet det dog må erkendes, at perioden fra 1940 til 1960 og fra 1975 til i dag statistisk set er dårligt repræsenteret.

NATURLIGT LUFTSKIFTE I 81 HUSE OG LEJLIGHEDER.

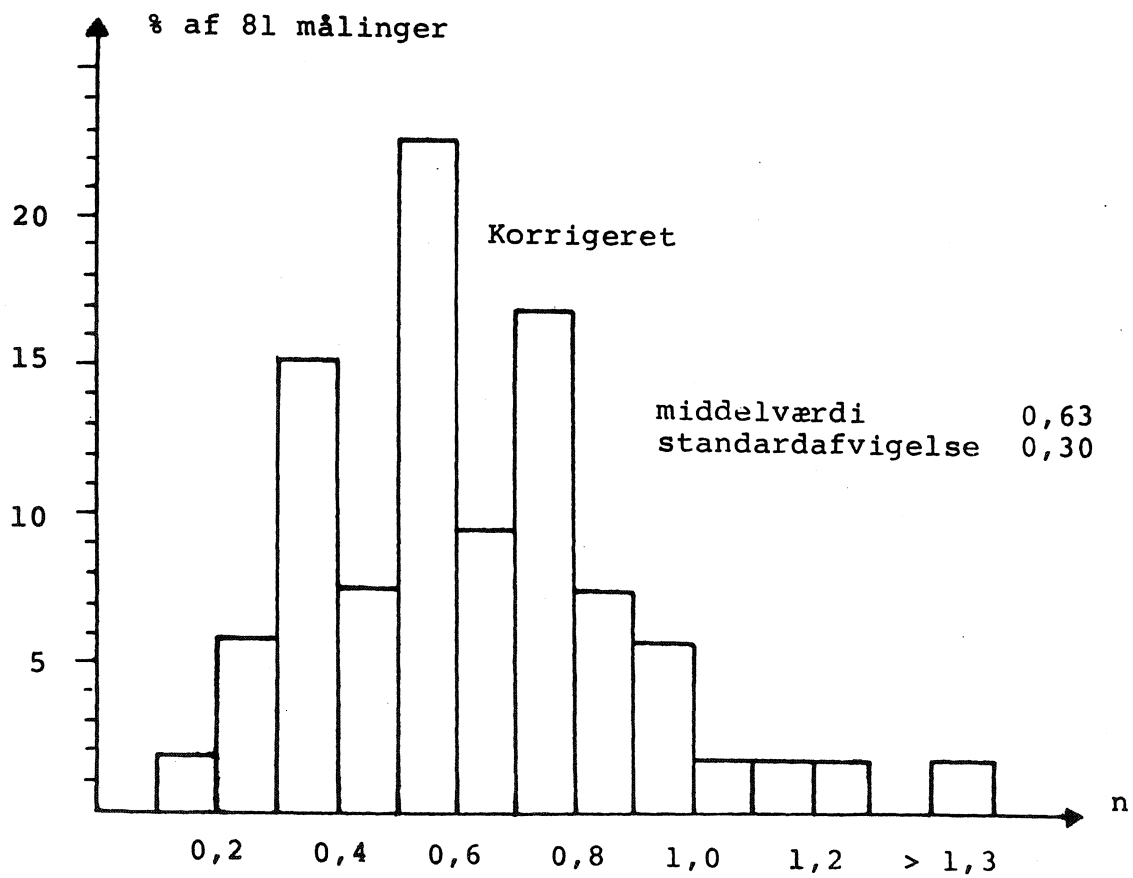
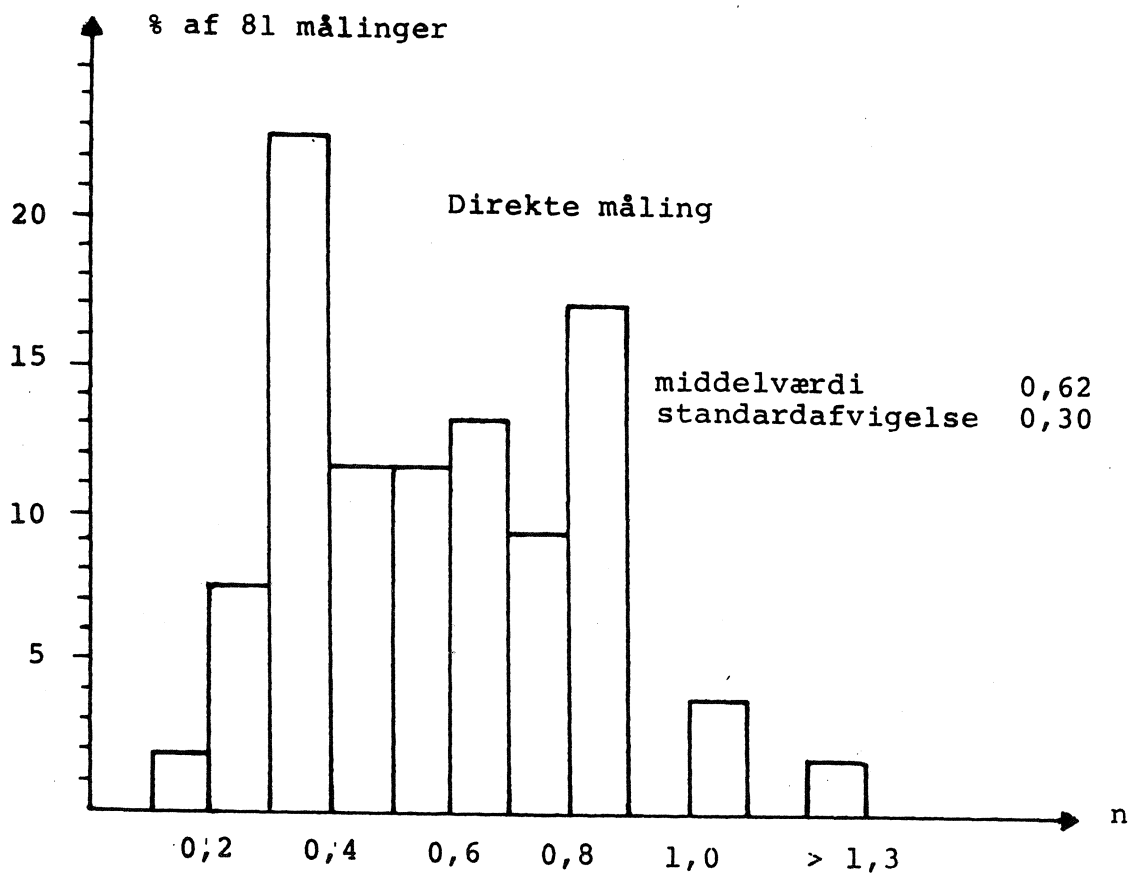


FIG. 6.2.1.

NATURLIGT LUFTSKIFTE I 53 HUSE.

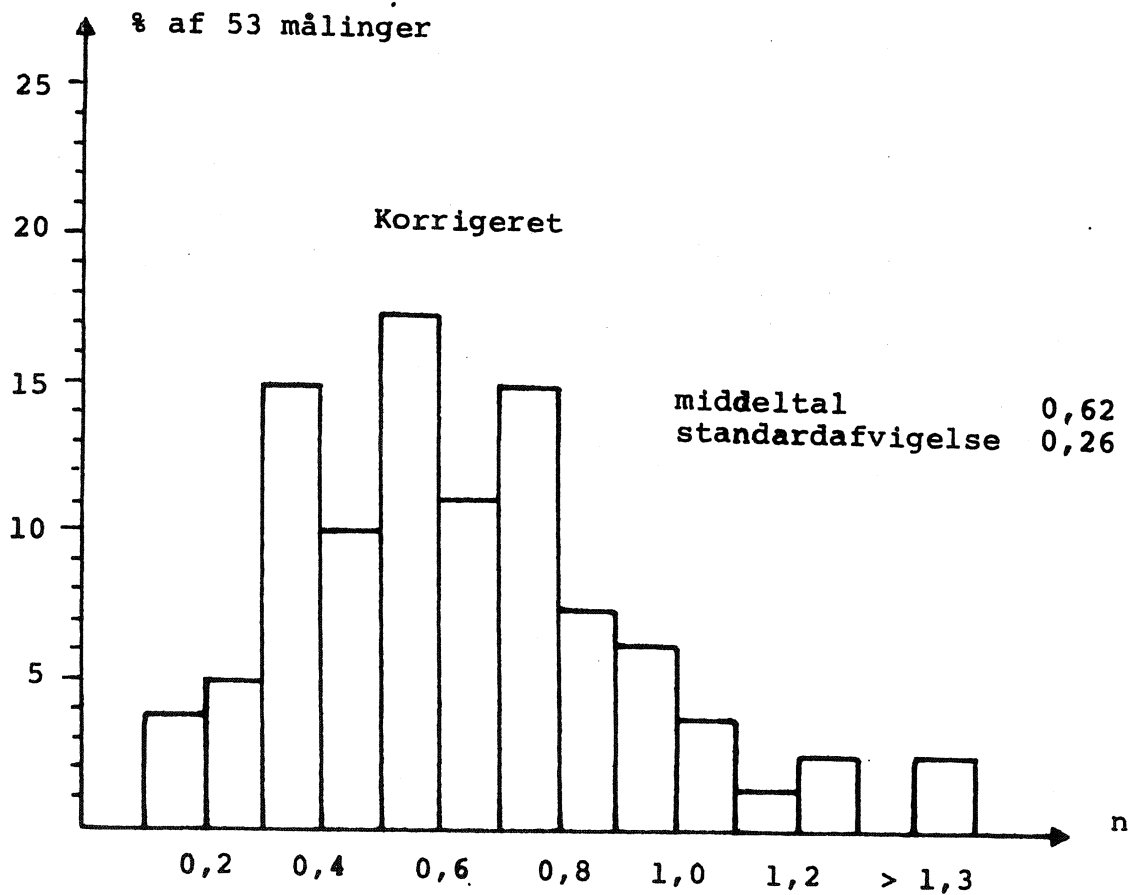
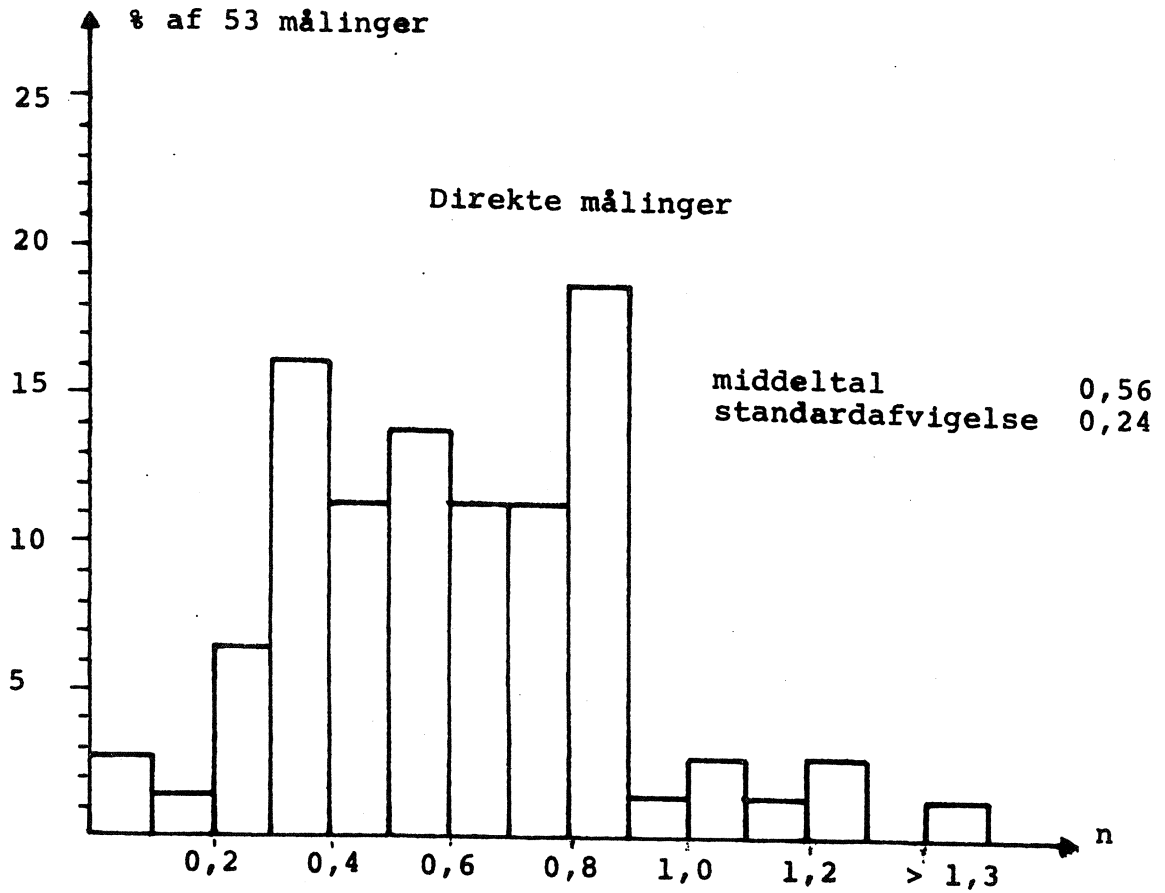


FIG. 6.2.2.

NATURLIGT LUFTSKIFTE I 28 LEJLIGHEDER.

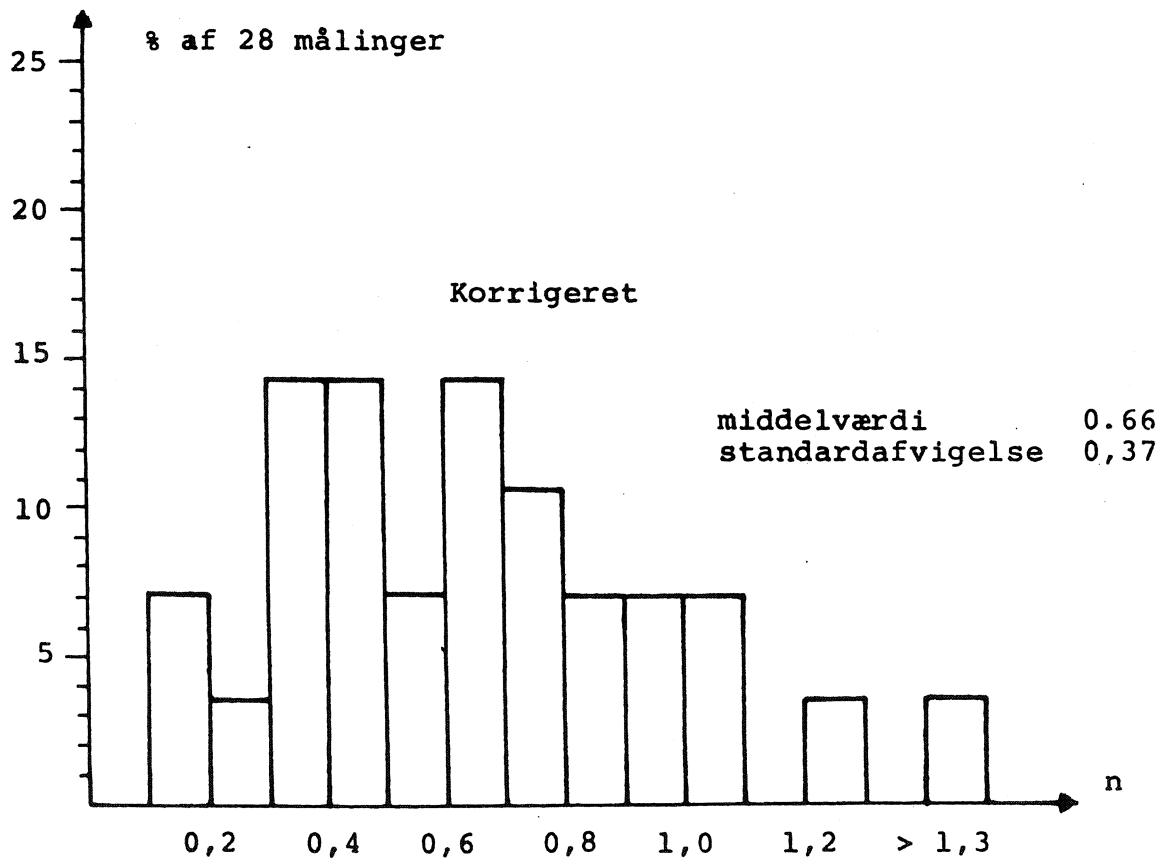
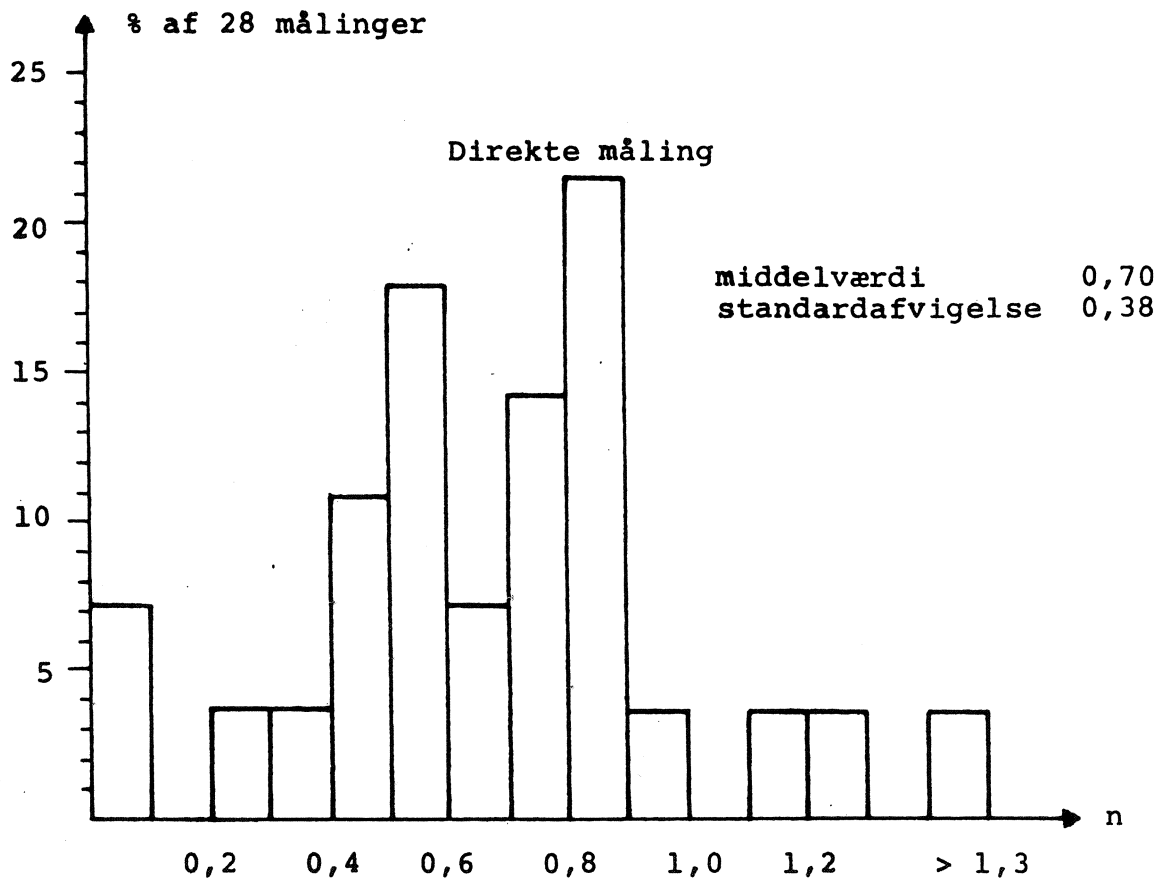


FIG. 6.2.3.

MIDDELVÆRDI AF LUFTSKIFTE I 31 HUSE OG LEJLIGHEDER I RELATION TIL OPFØRELSESTIDSPUNKT.

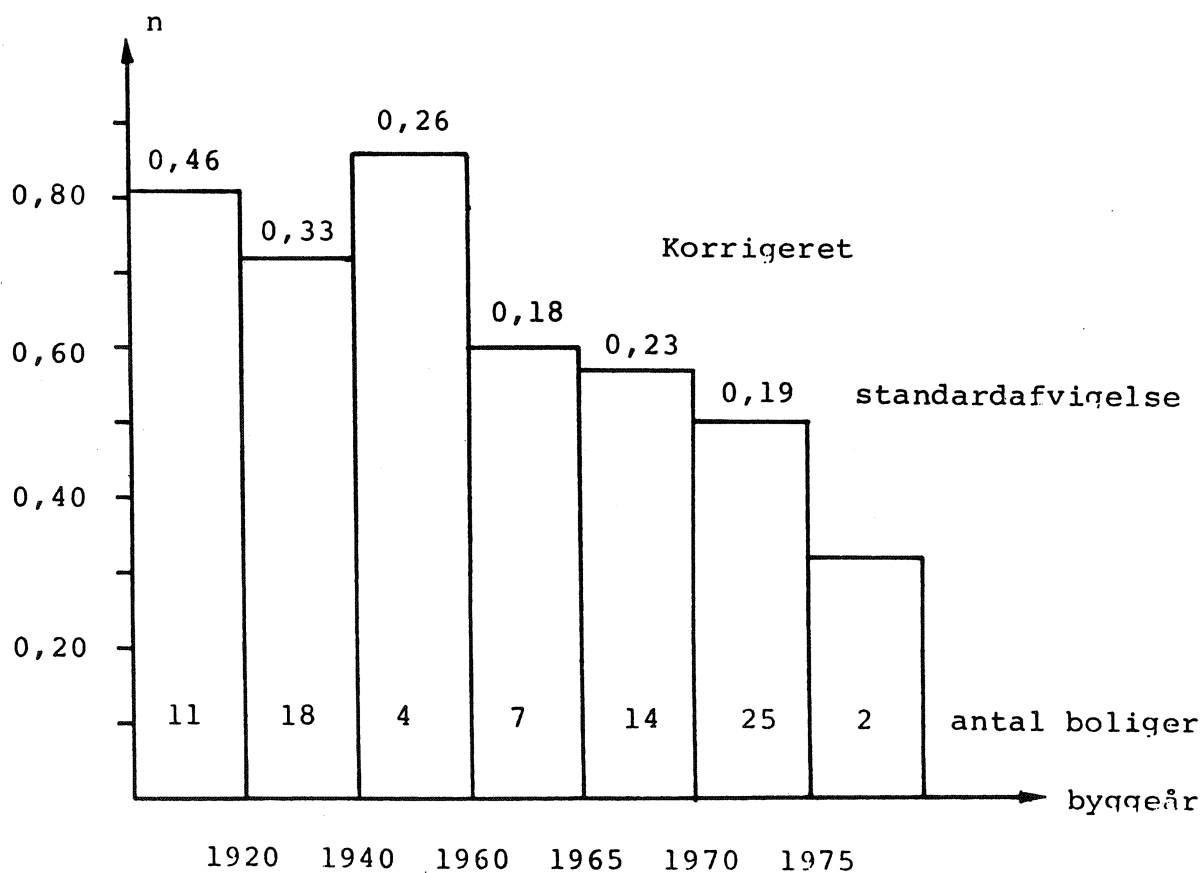
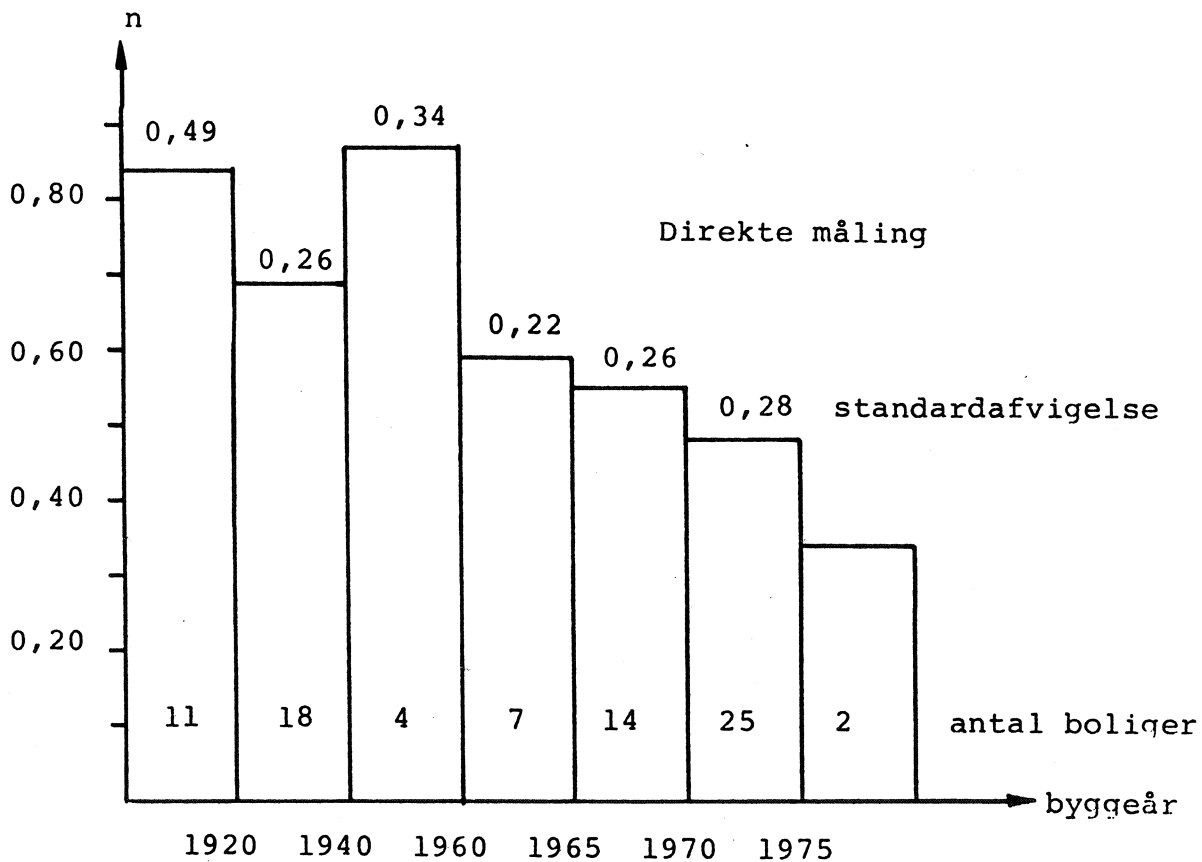


FIG. 6.2.4.

MIDDELVÆRDI AF NATURLIGT LUFTSKIFTE I 53 HUSE OG 28 LEJLIGHEDER I RELATION TIL OPFØRELSESTIDSPUNKT.

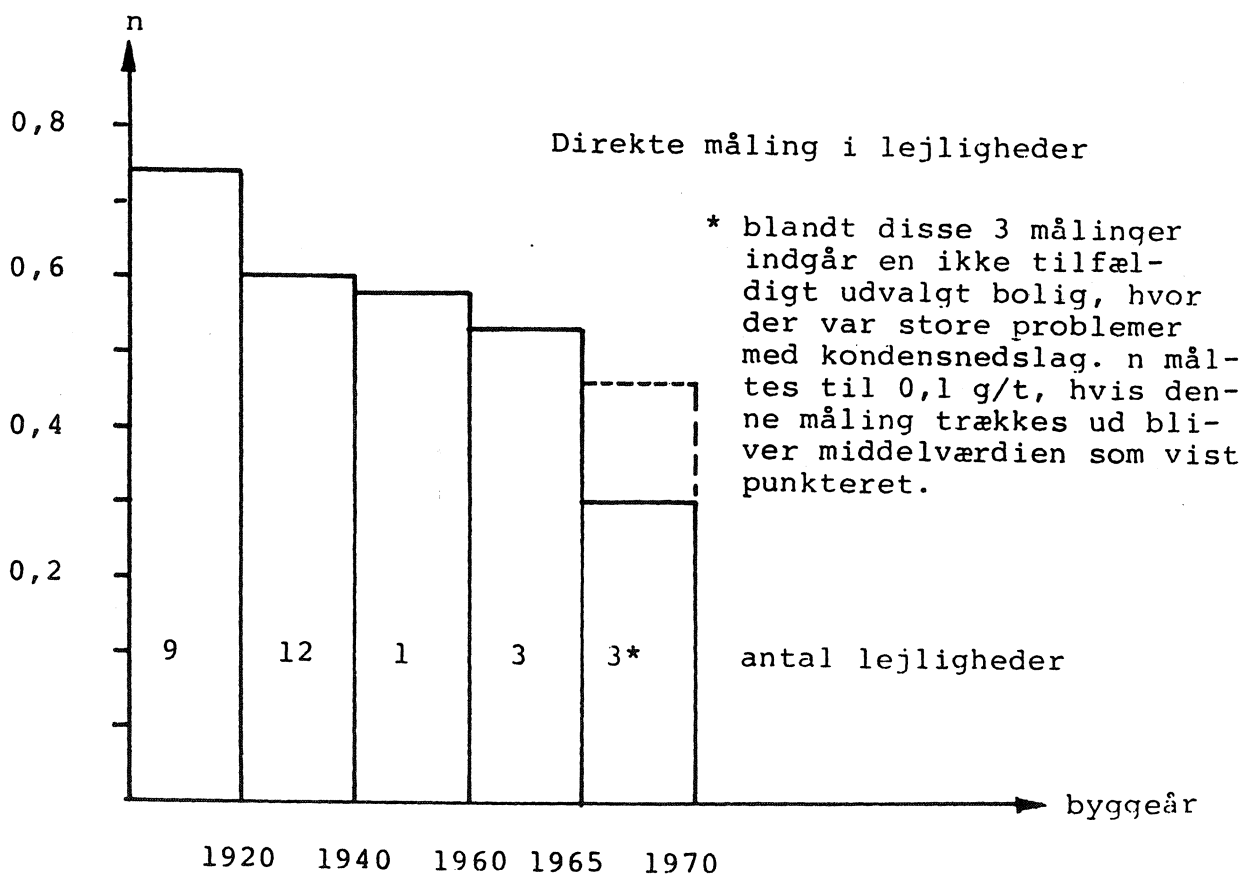
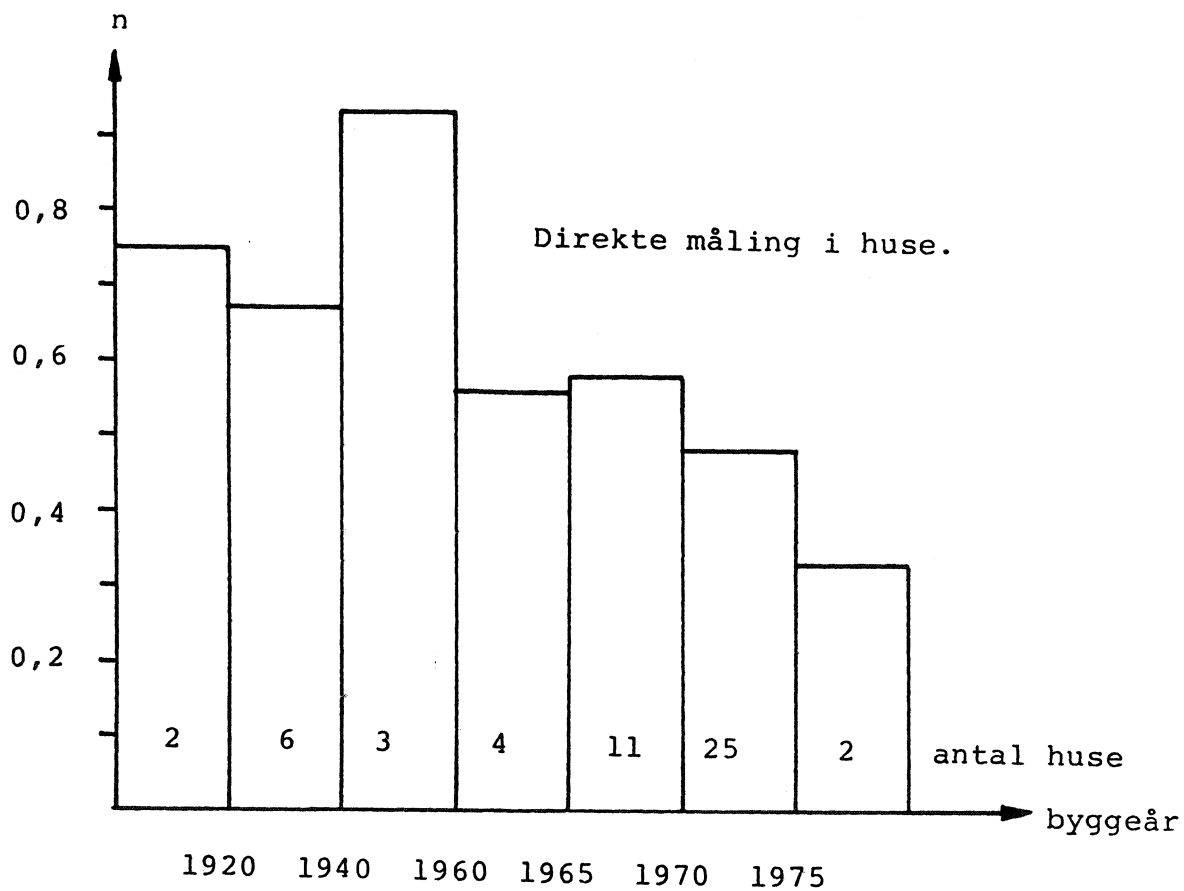


FIG. 6.2.5.

MIDDELVÆRDI AF NATURLIGT LUFTSKIFTE I 53 HUSE
OG 23 LEJLIGHEDER I RELATION TIL OPFØRELSES-
TIDSPUNKT.

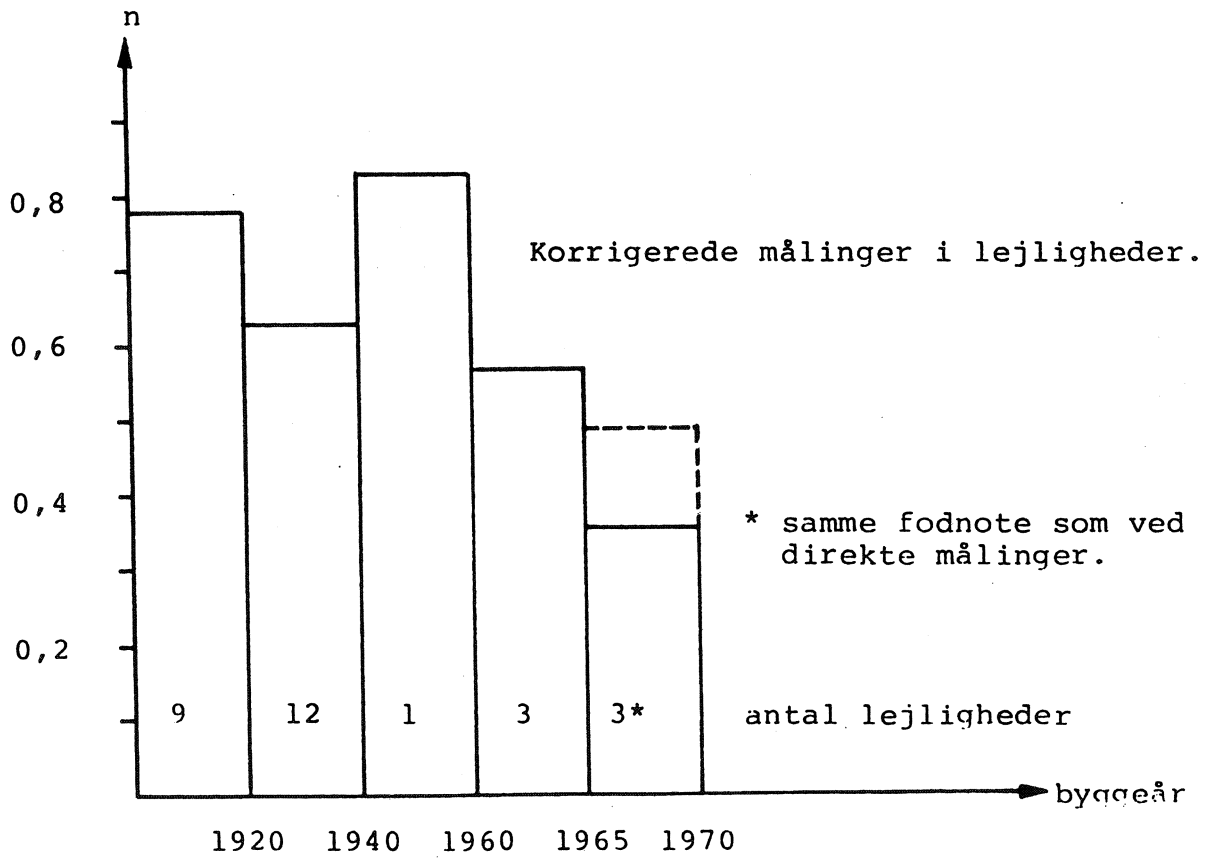
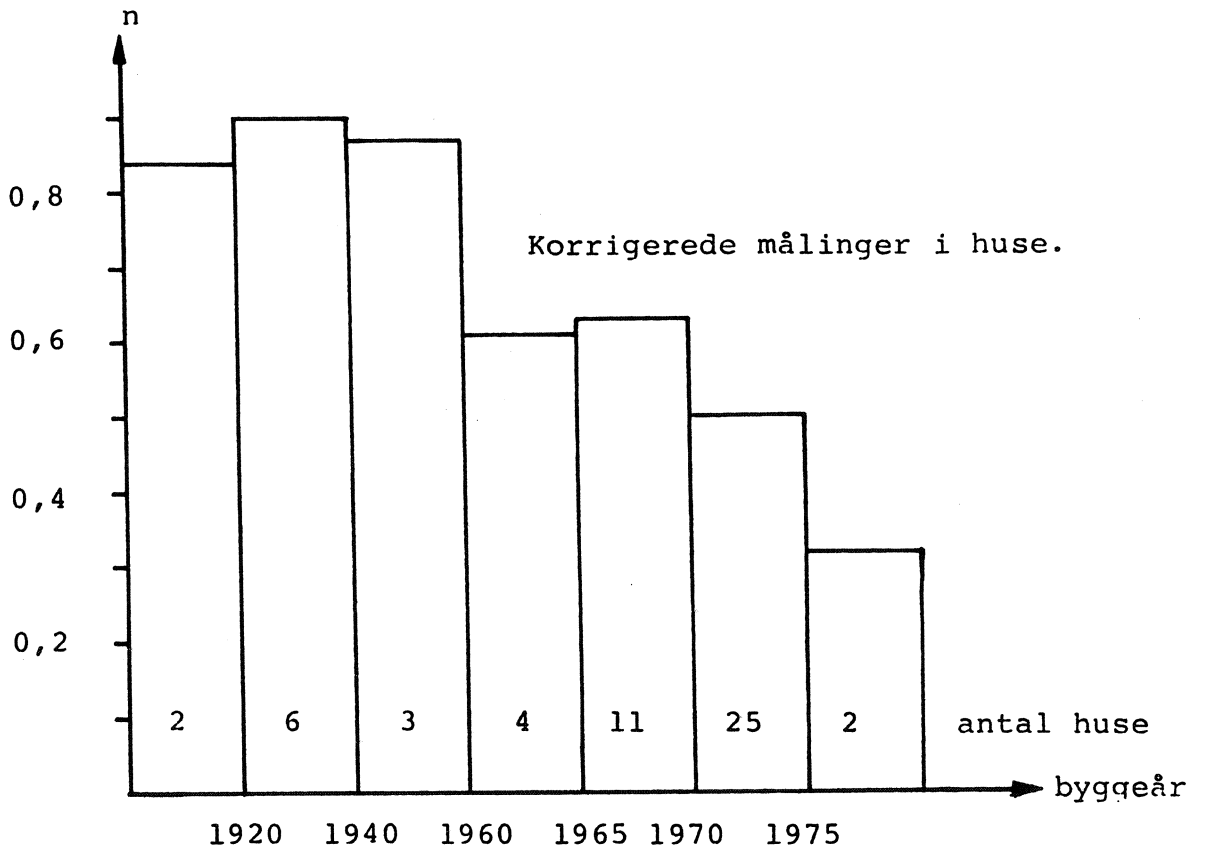


FIG. 6.2.6.

MIDDELVERDI AF DET NATURLIGE LUFTSKIFTE I
81 BOLIGER I RELATION TIL DEN MALTE
METEOROLOGISKE VINDHASTIHED.

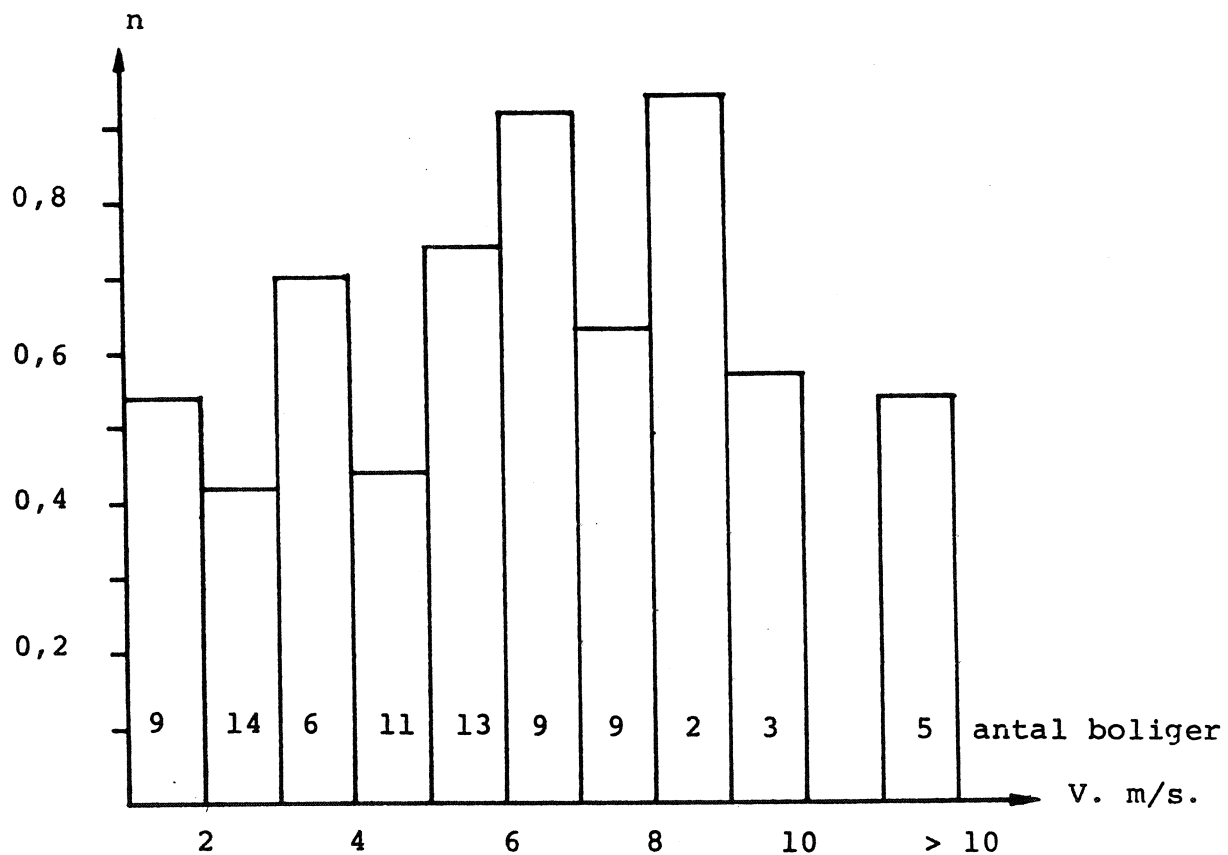


FIG. 6.2.7.

AKKUMULERET FORDELINGSKURVE FOR DET
NATURLIGE LUFTSKIFTE I 81 HUSE OG
LEJLIGHEDER

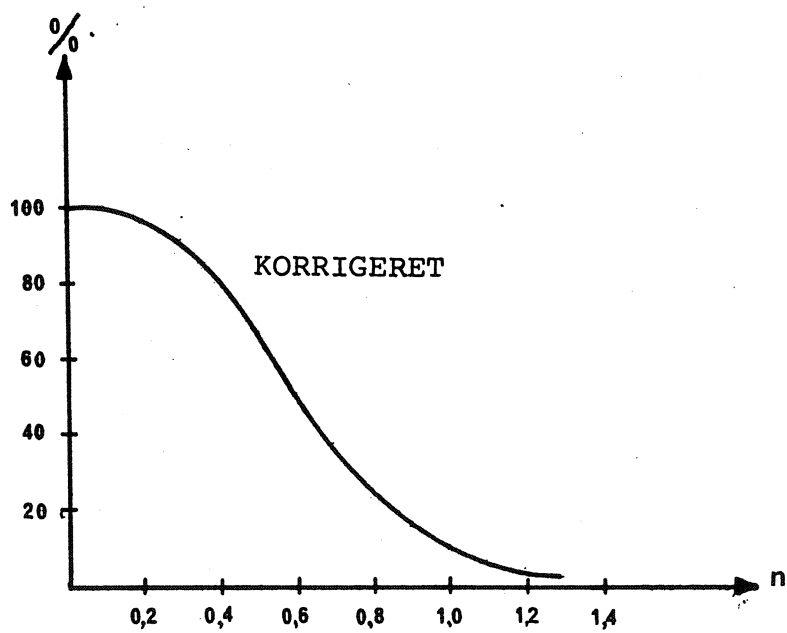
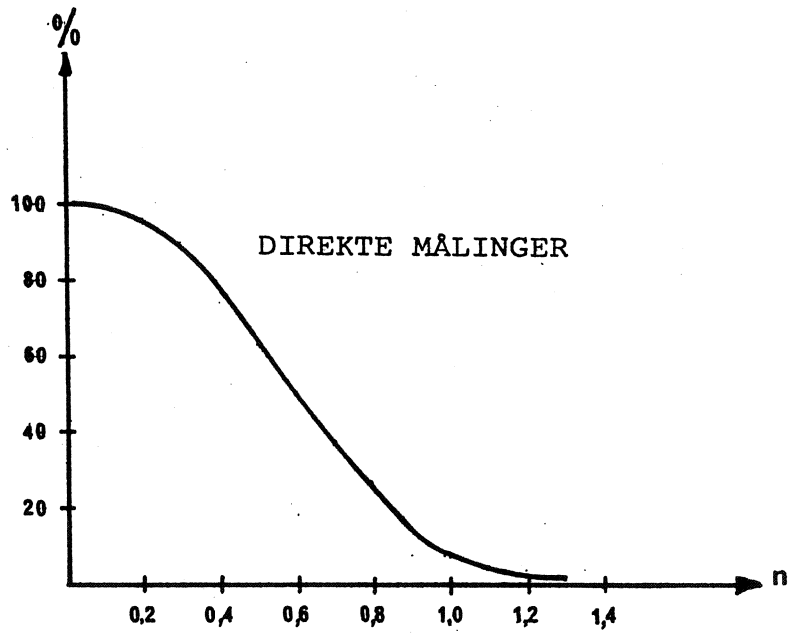


FIG. 6.2.8.

6.3 Kontinuerligt luftskifte

Luftskiftet er som nævnt i afsnit 4.5 målt kontinuerligt i 4 huse. (Resultaterne er dog kun behandlet for de 3 af husene). Selve målemetoden har under forsøget vist sig at være forholdsvis enkel at benytte, men det har derimod været vanskeligt at opnå en entydig sammenhæng (korrelation) mellem luftskifte, temperaturdifferensen mellem ude og inde og vindhastigheden.

Resultaterne af de enkelte målinger i de 3 huse er vist i bilag nr. 4, hvor middeltallet af luftskifte, temperaturdifferens og vindhastighed er anført med 6 timers intervaller.

Ved en multipel regressionsanalyse af måleresultaterne er konstanterne i ligning (5) $n = a + b\Delta t + c \cdot v$ bestemt både ud fra den vindhastighed v_6 , der er målt på stedet i 6 meters højde, og den vindhastighed v_{10} , der opgivet for 10 meters højde ved nærmeste meteorologiske målestation.

| Bolig | a | b | c | korrelationskoefficient mellem | | | |
|----------------------|-------|--------|-------|--------------------------------|---------------|------|----------------|
| | | | | n, Δt , v | n, Δt | n, v | Δt , v |
| nr. 1 ¹⁾ | 0,10 | 0,0015 | 0,016 | 0,47 | -0,13 | 0,65 | -0,49 |
| nr. 10 ¹⁾ | 0,075 | 0,0015 | 0,026 | 0,72 | -0,42 | 0,84 | -0,57 |
| nr. 10 ²⁾ | 0,011 | 0 | 0,015 | 0,78 | -0,42 | 0,88 | -0,44 |
| nr. 11 ¹⁾ | 0,17 | -0,010 | 0,048 | 0,49 | -0,55 | 0,69 | -0,67 |
| nr. 11 ²⁾ | 0,40 | -0,032 | 0,016 | 0,48 | -0,61 | 0,52 | -0,32 |

Tabel 6.3.1. Beregnede konstanter a, b og c samt korrelationskoefficienter ved kontinuerlig måling af det naturligt luftskifte i 3 parcelhuse.

- 1) beregnet ud fra den på stedet målte vindhastighed i 6 m højde.
- 2) beregnet ud fra den opgivne vindhastighed i 10 m højde ved nærmeste vejstation.

Korrelationskoefficienten mellem størrelserne n , Δt og v er ligeledes beregnet ud fra de resultater, der er anført i bilag nr. 4.

Af tabel 6.3.1 ses, at værdierne for a , b og c varierer stærkt fra hus til hus, samt at korrelationskoefficienterne ikke er særlig gode.

Årsagen til at korrelationskoefficienterne er så lave, er sandsynligvis dels, at de undersøgte huse - i modsætning til f.eks. de under det svenske forsøg omtalte - ligger i tæt bebyggede områder, hvor vindforholdene er stærkt turbulente, og dels at der har været et utilsigtet sammenhæng mellem vindhastighed og temperaturdifferens, således at Δt er faldet ved stigende v . Fig. 6.3.2 illustrerer denne sammenhæng.

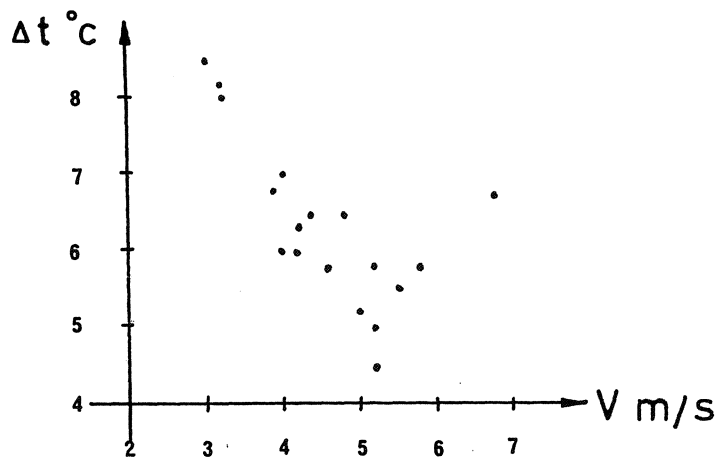


Fig. 6.3.2. Sammenhæng mellem målte værdier af v_6 og Δt i bolig nr. 11. Korrelationskoefficient Δt , $v_6 = -0,67$.

På trods af at korrelationsanalysen viser, at der er en forholdsvis dårlig sammenhæng mellem n , Δt og v giver en beregning af n , på grundlag af de målte værdier af Δt og v , sjældent en afvigelse, i forhold til det på stedet målte n , på mere end 20-30%, og kun 8-10% afvigelse i forhold til middelværdierne. De enkelte tal i beregningerne fremgår af bilag nr. 4.

Såfremt forholdet mellem konstanterne var ens fra hus til hus, ville det være muligt at bestemme ligningen $n = a+b\Delta t+c\cdot v$ ved blot en enkelt måling af luftskiftet, idet antallet af ubekendte konstanter i så fald ville blive formindsket fra tre til een.

For at konstatere om en sådan sammenhæng var til stede, er der på grundlag af resultaterne i tabel 6.3.1 samt de tal, der ligger til grund for fig. 3.4.3, foretaget en beregning af forholdet mellem konstanterne. Resultatet af disse beregninger ses i tabel 6.3.3, hvoraf det fremgår, at der desværre ikke findes nogen matematisk sammenhæng mellem konstanternes størrelse.

| Bolig | a | b | c |
|-------------------------|---|--------|-------|
| nr. 1 ¹⁾ | 1 | 0,015 | 0,16 |
| nr. 10 ¹⁾ | 1 | 0,020 | 0,35 |
| nr. 10 ²⁾ | 1 | 0 | 0,14 |
| nr. 11 ¹⁾ | 1 | -0,061 | 0,28 |
| nr. 11 ²⁾ | 1 | -0,079 | 0,039 |
| Sverige ¹⁾ | 1 | 0,080 | 0,51 |
| U.S.A. ³⁾ | 1 | 0,26 | 1,71 |
| U.S.A. ³⁾ | 1 | 0,08 | 0,47 |
| Benyttet til korrektion | 1 | 0,05 | 0,30 |

Tabel 6.3.3. Forholdet mellem konstanterne a, b og c i normeret form beregnet for 6 huse.

- 1) beregnet ud fra den på stedet målte vindhastighed i 6 m højde.
- 2) beregnet ud fra den opgivne vindhastighed i 10 m højde ved nærmeste vejrstation.
- 3) målebetingelser for vindhastighed ikke opgivet.

Det er også undersøgt, hvilken konsekvens valget af forholdet mellem a, b og c har for variationerne af luftskiftet igennem en varmesæson, beregnet efter formlen $n = a + b \cdot \Delta t + c \cdot v$, hvor n er sat lig 1 for $\Delta t = 17 \text{ }^\circ\text{C}$ og $v = 4 \text{ m/s}$. Konsekvensberegningerne for 9 forskellige forhold gående fra a:b:c = 1:0,02:0,10 til 1:0,10:0,50 er foretaget ved hjælp af referenceårets vejrdata. (Se SBI rapport 89) [7].

For de samme relationer mellem a, b og c er det ligeledes undersøgt, hvilken indflydelse valget af konstanterne har på varmetabet via luftskiftet, idet varmetabet er proportionalt med $n \cdot \Delta t$.

Tabel 6.3.4 og 6.3.5 viser i sammendrag de væsentligste tal fra EDB-beregningerne af de 9 relationers indflydelse på henholdsvis n og $n \cdot \Delta t$.

| Beregningsforudsætninger | n = a + b · Δt + c · v, hvor n sættes lig 1 for Δt = 17 °C og v = 4 m/s Beregnet med referenceårets vejrdata for varmesæsonens 227 dage | | | | | | | | | |
|--------------------------|---|------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------|
| | Afgrænsninger mellem a:b:c | GEN | Max. min. | 2% 98% | 5% 95% | 10% 90% | 20% 80% | 30% 70% | 40% 60% | 50% |
| | 1:0,02:0,10 | 1,06 | 1,88 0,65 | 1,49 0,76 | 1,39 0,79 | 1,31 0,84 | 1,23 0,90 | 1,16 0,95 | 1,10 1,00 | 1,05 |
| | 1:0,02:0,30 | 1,15 | 2,76 0,45 | 1,99 0,54 | 1,80 0,59 | 1,66 0,69 | 1,49 0,81 | 1,35 0,92 | 1,21 1,01 | 1,11 |
| | 1:0,02:0,50 | 1,18 | 3,21 0,34 | 2,25 0,41 | 2,01 0,45 | 1,82 0,60 | 1,62 0,75 | 1,43 0,89 | 1,26 1,01 | 1,13 |
| | 1:0,05:0,10 | 1,06 | 1,76 0,56 | 1,44 1,73 | 1,34 0,78 | 1,27 0,84 | 1,20 0,91 | 1,15 0,97 | 1,11 1,02 | 1,06 |
| | 1:0,05:0,30 | 1,12 | 2,51 0,44 | 1,83 0,59 | 1,67 0,66 | 1,55 0,73 | 1,39 0,83 | 1,28 0,92 | 1,18 1,01 | 1,09 |
| | 1:0,05:0,50 | 1,16 | 2,96 0,35 | 2,09 0,50 | 1,89 0,55 | 1,73 0,66 | 1,53 0,79 | 1,38 0,91 | 1,24 1,01 | 1,12 |
| | 1:0,10:0,10 | 1,05 | 1,65 0,44 | 1,43 0,66 | 1,35 0,72 | 1,28 0,80 | 1,21 0,90 | 1,15 0,97 | 1,10 1,02 | 1,06 |
| | 1:0,10:0,30 | 1,09 | 2,25 0,43 | 1,69 0,61 | 1,54 0,69 | 1,44 0,76 | 1,32 0,86 | 1,23 0,94 | 1,16 1,02 | 1,09 |
| | 1:0,10:0,50 | 1,13 | 2,66 0,36 | 1,92 0,55 | 1,73 0,62 | 1,59 0,71 | 1,43 0,82 | 1,31 0,92 | 1,20 1,02 | 1,11 |

Tabel 6.3.4. Det naturlige luftskiftes afhængighed af forholdet a:b:c.

| Beregningsforudsætninger | | $GN = \Delta t \cdot (a + b \cdot \Delta t + c \cdot v)$, hvor n sættes lig 1 for $\Delta t = 17 \text{ }^\circ\text{C}$ og $v = 4 \text{ m/s}$ GN temperaturforskelle \cdot luftskifte pr. time, OC/H Beregnet med referenceårets vejrdata for varmesæsonens 227 dage | | | | | | | | |
|--------------------------|---------------|---|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------|
| Forh. mellem a:b:c | Afgrænsninger | GEN | Max. min. | 2% 98% | 5% 95% | 10% 90% | 20% 80% | 30% 70% | 40% 60% | 50% |
| 1:0,02:0,10 | | 18,8 | 43,1 0,0 | 34,2 6,0 | 30,8 7,6 | 27,6 10,0 | 24,2 13,2 | 21,8 15,6 | 20,0 17,2 | 18,6 |
| 1:0,02:0,30 | | 20,0 | 63,2 0,0 | 42,4 5,6 | 35,4 7,2 | 31,4 9,4 | 27,0 12,4 | 24,0 15,0 | 21,8 17,2 | 19,4 |
| 1:0,02:0,50 | | 20,6 | 73,6 0,0 | 46,8 5,0 | 38,6 6,6 | 33,8 8,4 | 28,4 11,6 | 25,0 14,2 | 22,4 17,0 | 19,6 |
| 1:0,05:0,10 | | 18,9 | 46,3 0,0 | 36,0 5,2 | 32,8 7,0 | 28,8 9,4 | 24,8 12,8 | 22,2 15,2 | 20,4 17,2 | 18,8 |
| 1:0,05:0,30 | | 19,8 | 57,4 0,0 | 40,6 5,4 | 34,6 6,8 | 30,6 9,2 | 26,4 12,4 | 23,6 15,4 | 21,2 17,2 | 19,2 |
| 1:0,05:0,50 | | 20,4 | 67,9 0,0 | 45,0 5,0 | 37,4 6,6 | 32,8 9,0 | 28,0 12,0 | 24,6 14,8 | 22,2 17,2 | 19,6 |
| 1:0,10:0,10 | | 19,1 | 55,5 0,0 | 37,8 4,6 | 34,6 6,4 | 30,0 8,8 | 25,2 12,2 | 22,6 14,8 | 20,6 17,2 | 19,0 |
| 1:0,10:0,30 | | 19,6 | 51,6 0,0 | 39,6 5,0 | 35,0 6,4 | 30,8 9,0 | 26,4 12,6 | 23,2 15,4 | 21,0 17,4 | 19,0 |
| 1:0,10:0,50 | | 20,1 | 60,8 0,0 | 42,6 4,8 | 36,2 6,4 | 31,8 8,8 | 27,7 12,2 | 24,2 15,4 | 21,6 17,2 | 19,4 |

Tabel 6.3.5. $n \cdot \Delta t$'s afhængighed af forholdet mellem a:b:c.

Et nærmere studium af tallene i de to tabeller viser, at gennemsnittet både for det naturlige luftskifte og $n \cdot \Delta t$ for alle praktiske formål er uafhængig af forholdet mellem a:b:c. Befinder man sig derimod i grænseområderne med de største værdier af luftskiftet og $n \cdot \Delta t$, bliver der en meget stor afhængighed af forholdet a:b:c.

Konklusionen på resultatet af de kontinuerlige målinger af luftskiftet og beregningerne med henblik på en relation til normerede klimabetingelser bliver, efter vor mening den, at det ikke på baggrund af en enkelt måling af

luftskiftet vil være muligt at korrigere resultatet til normalbetingelser ved hjælp af den i udlandet opstillede formel $n = a + b \cdot \Delta t + c \cdot v$. En følgeslutning heraf må være, at sporgasmetoden kun kan anvendes som kontrolmetode i forbindelse med evt. kommende krav i bygningsreglementet, såfremt målingerne foregår under fastlagte klima- og vejr-betingelser, der må opgives sammen med kravet om luftskiftets størrelse, f.eks. $\Delta t = 17 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$, $v = 4,6 \pm 1 \text{ m/s}$ og vindretning $225 \pm 45^\circ$. Det vil altså sige, at målingerne kun kan foretages de få dage om året, hvor sådanne vejr- og klimaforhold er til stede.

7. FORSØG MED TÆTNING AF BOLIGER

Efter målinger på de første 45 boliger, stod det klart, at et naturligt luftskifte på 0,8 til 1,0 gange pr. time eller større, lå en del over gennemsnittet, samt at boliger med et så stort luftskifte måtte betragtes som meget utætte.

Man havde også en fornemmelse af, hvor luftlækagerne i de pågældende boliger skulle søges, og hvordan de skulle afhjælpes, men der var nogen usikkerhed med hensyn til virkningen og omkostningen ved en afhjælpning. Det blev derfor besluttet at gennemføre en række forsøg, hvorunder der skulle foretages tætning af de ca. 10 boliger, hvori der var målt de største luftskifter, og med en fordeling således, at der var ca. lige mange parcelhuse og etageboliger. Udbedringen skulle foretages i et sådant omfang, at det svarede til, hvad man med rimelighed kunne forvente, at gode håndværkere selv kunne finde frem til på grundlag af en generel information om problematikken. Arbejdsmetoder og materialevalg skulle ligeledes være kendt i håndværkerkredse.

Udvælgelsen af de pågældende boliger viste sig at være ganske enkel, idet der ud af de første 45 målinger var 5 parcelhuse, hvor det ukorrigerede luftskifte var målt til en værdi større end 0,8 gange pr. time og det tilsvarende for 4 lejligheder i etageboliger. Ydermere var fordelingen blandt begge kategorier af boliger sådan, at der var eksempler på såvel ældre som nyere bygninger.

Den manuelle del af arbejdet er udført af en af instituttets egne snedkere samt en, i forbindelse med arbejdet, hyret tømrersvend.

Som en sikkerhed for målingernes pålidelighed blev der, før udbedringsarbejderne blev igangsat, foretaget en fornyet måling af det naturlige luftskifte. Resultatet af de

enkelte målinger før og efter tætningen, samt ændringen i absolut størrelse og i % er vist på bilag nr. 5.

Ved anvendelse af ventilatoren fra trykmåleudstyret har det med overtryk i huset, ved hjælp af røgampuller, været muligt at stedfæste de fleste af de luftlækager, der burde tættes.

7.1 Beskrivelse af udbedringsarbejdet for den enkelte bolig

I det efterfølgende er der nærmere beskrevet, hvilke udbedringer, der er foretaget i den enkelte bolig, samt angivet forbruget af tid og materialer. Desuden er oplyst måleresultaterne før og efter tætningen, samt beboernes opfattelse af virkningen. De anførte måleresultater er korrigeret til en vindhastighed på 4,6 m/s og en temperaturdifferens $\Delta t = 17 \text{ }^{\circ}\text{C}$, jævnfør afsnit 6.2. Det opgivne tal før tætningen er middeltallet af to målinger.



| | | |
|---|---|--------------------|
| Bolig nr. | : | 17 |
| Typehus opført | : | 1973 |
| Areal | : | 140 m ² |
| Volumen | : | 330 m ³ |
| Naturligt luftskifte før tætning | : | 0,58 gange/h |
| Naturligt luftskifte efter tætning | : | 0,29 gange/h |
| Beboernes opfattelse af tætningens virkning: | : | god |
| Medgået arbejdstid | : | 61 timer |
| Materialer | : | ca. 550 kr. |

Det udførte arbejde har omfattet:

Udskiftning af tætningslister på 2 stk. skydedøre, hoveddør og loftlem.

Afblænding af ubenyttet brevindkast.

Justering af anverfere på gående vinduesrammer.

Tætning med fugemasse mellem overkant mur og fodrem, mellem loft (tag) og skydedør og murværk i vestgavl, samt ved kalfatringsfuger ved vindues- og dørkarme.

I forbindelse med sidstnævnte, har bræddebeklædningen i de afblændede vinduespartier også været demonteret.

Om husets konstruktion og tæthed kan iøvrigt bemærkes:

Efter opstilling af gasbetonbagmurselementerne er fodrem og vinduespartierne monteret. Herefter er der foretaget en lukning med Secomastic af fuger mellem gasbeton og tilstødende træværk. Under skalmuringen er murstenene stødt knas op mod træværket i vinduer, døre og fodrem. Knasfugerne er selvfølgelig ikke lufttætte, og hulrummet mellem for- og bagmur kan således fyldes med luft, og det vil kunne forudses, at bagmuren ikke er mere lufttæt end at der fra hulmuren kan komme luft ind i huset. Denne mulighed er årsag til, at der er ofret den ret dyre udvendige fugning mellem mur og træ.

Loftisoleringen er udført som rullefilt med papir på oversiden. Ved fodremmen er isoleringen fastsømmet gennem brædder. Bræddernes længde svarer dog i de færreste tilfælde til afstanden mellem spærene, og muligheden for luftindtrængen under isoleringen omkring samlingen mellem spærhoved og -fod, kan ikke afvises.

I rum, hvor der findes trælofter, er dampspærren anbragt mellem 2 lag krydsende forskallingsbrædder, og kan således kun have punktvis klemte overlæg. Dampspærren kan derfor i disse rum ikke betragtes som værende lufttæt.

De formodede utætheder ved spærfod/fodrem og i dampspærre, er ikke søgt tætnet, da omkostningerne herved - i det væsentligste på grund af udhængsbeklædningens udformning - ikke skønnes at stå i rimeligt forhold til den forventede gevinst. Og det til trods for, at det er vor generelle opfattelse, at den største utæthed i mange nyere huse, findes i adskillelsen mod tagrummet.



| | | |
|--|---|--------------------|
| Bolig nr. | : | 23 |
| Flerfamiliehus opført omkring | : | 1875 |
| Ombygget ca. | : | 1935 |
| *Areal | : | 130 m ² |
| *Volumen | : | 360 m ³ |
| Naturligt luftskifte før tætning | : | 0,53 gange/h |
| Naturligt luftskifte efter tætning | : | 0,38 gange/h |
| Beboernes opfattelse af tætningens virkning: | : | god |
| Medgået arbejdstid | : | 34 timer |
| Materialer | : | ca. 200 kr. |

*Målingerne er kun udført i stueetagen.

Det udførte arbejde har omfattet:

Montering af tætningslister i overfalsen på samtlige forsatsvinduer. Forsatsvinduer forefindes på alle vinduer for de underste rammers vedkommende, hvorimod kun halvdelen af de øverste er forsynet med forsatsrammer.

Hvor forsatsvinduernes karm ikke har været lufttæt forbundet med selve vindueskarmen, er tætning foretaget med fugebånd eller fugemasse.

Hvor der ikke er forsatsrammer, er tætningen foretaget mellem vinduesramme og karm.

På den udvendige side er der med fugemasse foretaget mindre reparation af kalfatringsfuger, hovedsageligt mellem sålbænk og underkarm.

Terrassedør er afhøvlet, så fuldt anslag opnås, og forsynet med slagliste på udvendig side, samt tætningslister på karmfals.

Indgangsdøre fra trappegang til entré og fra bagtrappe til køkken, er forsynet med tætningslister, anbragt i karmlysning.

Om husets konstruktion og tæthed, kan iøvrigt bemærkes:

Da der er tale om et hus, hvor vægge og lofter er pudset ud i et, vil de eneste muligheder for lufttætheder stort set være begrænset til vinduer og døre. I det her-værende tilfælde var loftpuksen i den underliggende kælder dog i en sådan tilstand, at luftbevægelse mellem stue og kælder ikke kan afvises, navnlig under trykmåling af huset.



| | | |
|---|---|--------------------|
| Bolig nr. | : | 30 |
| Individuel villa opført | : | 1952 |
| Udvidet | : | 1969 |
| Areal | : | 270 m ² |
| Volumen | : | 670 m ³ |
| Naturligt luftskifte før tætning | : | 0,96 gange/h |
| Naturligt luftskifte efter tætning | : | 0,26 gange/h |
| Beboernes opfattelse af tætningens virkning: | | særdeles god |
| Medgået arbejdstid | : | 72 timer |
| Materialer | : | ca. 500 kr. |

Det udførte arbejde har omfattet:

Montering af tætningslister i false ved alle oplukkeli-
ge vinduer og yderdøre.

Justering af beslag på skydedør.

Justering og afhøvling af hoveddør og en del af vindues-
rammerne.

Nye anverfere på nogle vinduer samt nye fjedre til luk-
ning af brevindkast.

Omfugning af ca. halvdelen af den samlede længde af ud-
vendig kalfatringsfuger.

Fugning og afdækning med trælister ved så godt som samt-
lige indvendige fuger mellem bindingsværk og vindues-
konstruktion. Se fig. 7.1.1.

Om husets konstruktion og tæthed kan iøvrigt bemærkes:

Som vist på fig. 7.1.1 er samtlige false i vindueskarmkonstruktionerne frembragt ved, at der på bindingsværket er påfodret et brædt med en tykkelse, der er lig falsens dybde. Brættet er kun fastholdt ved sømning, og det naturlige svind i træet har bevirket, at der over alt er opstået en større eller mindre revne mellem bindingsværk og brædt.

Et uensartet svind i bræddernes bredde har desuden bevirket, at tætningen mellem oplukkelige rammer og false er blevet dårligere end ved traditionelle vindueskonstruktioner.

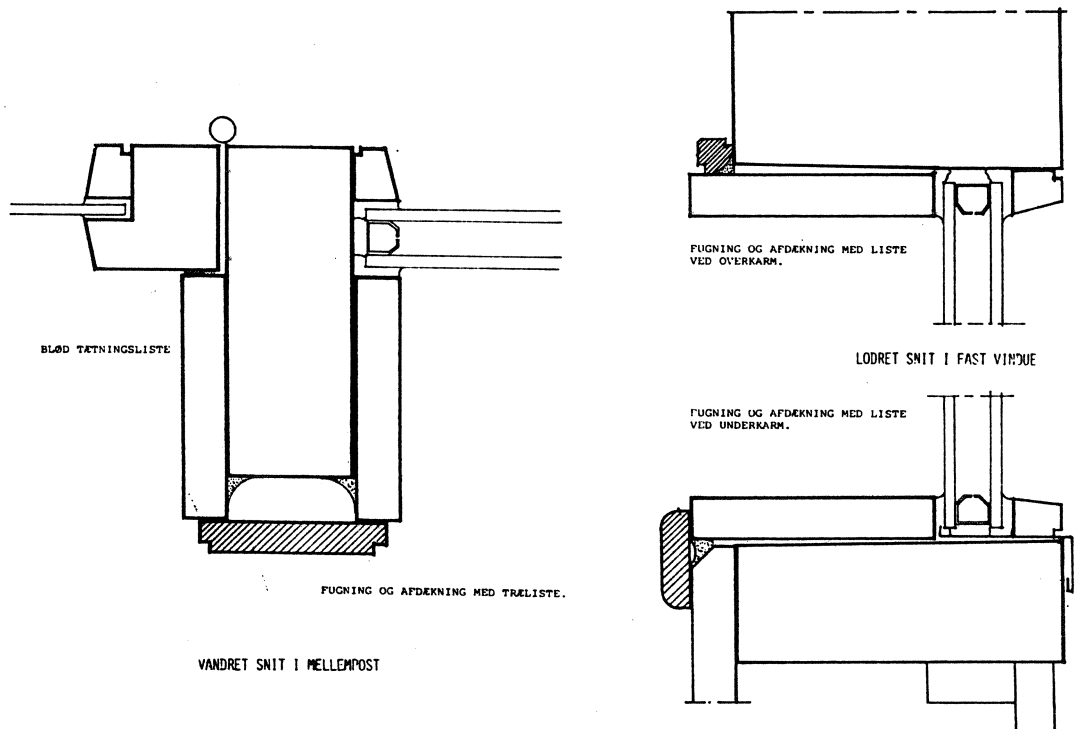


Fig. 7.1.1.

Sporingen med røgampuller under trykprøvningen viste, at der var luftlækager i tagkonstruktionen på den tilbygning, der ses i forgrunden på billedet, samt ved sammenbygningen med den lave bygning, der forbinder de to huse med rejsning. Mellembygningen har faldt tag, forbygningen har såkaldt paralleltag, og hovedbygningen har delvis udnyttet tagetage.

En tætning af de observerede luftlækager i forbindelse med tagkonstruktionen er ikke søgt gennemført. En sådan tætning ville indebære nedtagning og retablering af loftbeklædninger, og medføre urimelige store omkostninger i forhold til gevinsten.

Det er vor generelle erfaring, at facader, opbygget af lette trækonstruktioner, normalt ikke er særlig lufttætte, men vi har - igen på grund af de store omkostninger ved retablering af facadebeklædningen - ikke foretaget tætninger af facaden ud over det, der umiddelbart har kunnet foretages ved hjælp af fugemasse.



| | |
|--|----------------------|
| Bolig nr. | : 33 |
| Villa med kælder og første sal opført | : 1930 |
| Areal | : 157 m ² |
| Volumen | : 340 m ³ |
| Naturligt luftskifte før tætning | : 1,06 gange/h |
| Naturligt luftskifte efter tætning | : 0,53 gange/h |
| Beboernes opfattelse af tætningens virkning: | særdeles god |
| Medgået arbejdstid | : 44 timer |
| Materialer | : 250 kr. |

Det udførte arbejde har omfattet:

Opretning, justering og påsætning af tætningslister i fals på hoveddør, terrassedør, altandør og kælderdør.

Tætningslister i overfals på forsatsvinduer, samt tætning mellem forsats- og vindueskarme.

Tætningslister på skunklemme og loftlem.

Reparation med fugemasse af godt halvdelen af den samlede udvendige længde af kalfatringsfuger.

Bemærkninger iøvrigt:

Efter tætning af vinduer og døre, har huset, på grund af sin pudsede udførelse, en god tæthed. Det eneste sted, hvor der yderligere kunne tænkes forbedringer, vil være mellem skunkvægge og etageadskillelse.



| | | |
|---|---|--------------------|
| Bolig nr. | : | 40 |
| Typehus opført | : | 1967 |
| Areal | : | 104 m ² |
| Volumen | : | 260 m ³ |
| Naturligt luftskifte før tætning | : | 0,84 gange/h |
| Naturligt luftskifte efter tætning | : | 0,39 gange/h |
| Beboernes opfattelse af tætningens virkning: | | særdeles god |
| Medgået arbejdstid | : | 54 timer |
| Materialer | : | 650 kr. |

Det udførte arbejde har omfattet:

Tætning med fugemasse mellem fodrem og overkant mur, do. vindueskarme, også gavle.

Zinkafdækning under vinduer er demonteret, og fuge mellem karm og mur er udfyldt med fugemasse. Samtlige mørtelfuger mellem vindues- og dørkarme og murværk er udskiftet med elastisk fugemasse. Underbeklædningen på udhæng langs facader er demonteret, og loftisoleringens afslutning ved fodremmen er afdækket med et vindafskærmende brædt, hvis anslutning mod fodrem og spær er udfyldt med fugemasse. Se fig. 7.1.2. næste side.

På indgangsdøren er bestående løstsiddende kobberlister fjernet, og tætningslister er påklæbet i fals. Terrasse-dør er afhøvlet, justeret og forsynet med tætningslister i fals.

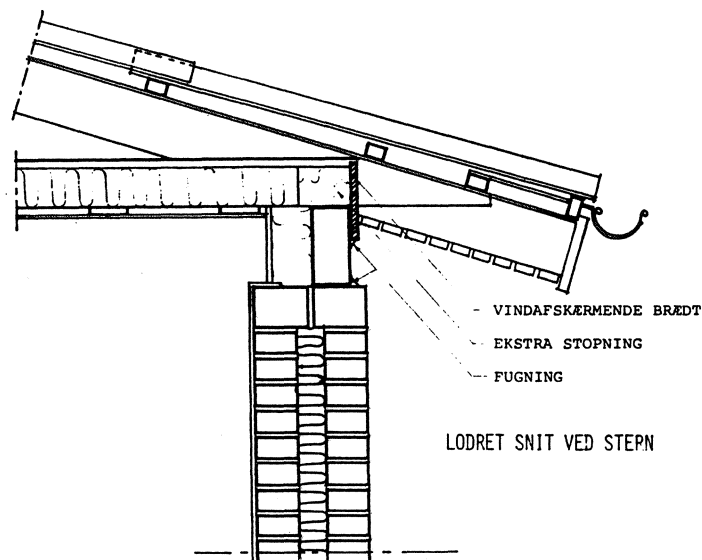


Fig. 7.1.2.

Huller mellem vinduesplader og vindueskarmsamlinger er udfyldt med fugemasse, og indvendig beklædninger mellem vinduer er eftersømmet.

I køkken, bad og gæstetoilet er aftrækskanalens udmunding i loftfladen blevet forsynet med en klapventil i størrelsen 10 x 15 cm og en tvangsåbning på 20%.

Bemærkninger iøvrigt:

Den væsentligste faktor af betydning for luftskiftet før tætning, har ganske givet været den manglende vindspærring for enden af isoleringen. Den udførte tætning betragtes ikke som værende optimal i lufttæt henseende, idet der af hensyn til tagrummets ventilation er bibeholdt en rimelig luftspalte op mod tagbeklædningen, hvilket indebærer muligheden for luftindtrængen under isoleringen og derfra videre til det underliggende rum. En total afspærring for en sådan luftindtrængen kan kun etableres med en vindspærre oven på isoleringen, og vindspærren skal desuden være i tæt forbindelse med det vindafskærmende brædt.

På grund af den lave taghældning er det imidlertid, med mindre tagbeklædningen fjernes, umuligt at etablere en sådan vindspærre.

En anden væsentlig faktor for luftskiftets størrelse, har dog også været størrelsen af aftrækskanalernes åbning ved loftfladen. Før anbringelsen af klapventilen var åbningen ca. 220 cm², efter ca. 30 cm² tvangsåbning.

Det skal bemærkes, at alle oplukkelige vinduer før forsøgets start var forsynet med gode tætningslister.



| | | |
|---|---|--------------------|
| Bolig nr. | : | 19 |
| Etagebolig opført | : | 1961 |
| Areal | : | 80 m ² |
| Volumen | : | 203 m ³ |
| Naturligt luftskifte før tætning | : | 0,66 gange/h |
| Naturligt luftskifte efter tætning | : | 0,26 gange/h |
| Beboernes opfattelse af tætningens virkning: | : | god |
| Medgået arbejdstid | : | 16 timer |
| Materialer | : | ca. 125 kr. |

Målingen blev foretaget i en 2½ værelses lejlighed i øverste etage midt i blokken.

Det udførte arbejde har omfattet:

Oplukkelige vinduer og altandøre er forsynet med tætningsslister i fals.

Entrédør er forsynet med tætningsslister anbragt i karmlysning. Brevindkast er justeret.

Ved altanpartiet, der er udført som en let trækonstruktion, er afdækningslister mod loft-gulv og sidebegrænsninger demonteret, og de bagved liggende fuger er udfyldt med fugemasse. Indvendig brystningsbeklædningsplade, der er fastholdt med "glaslister", har ligeledes været demonteret, og pladen er herefter fastklemmt i fugemasse.

Afdækningslisterne er genmonteret uden at malerarbejde har været nødvendigt.

Bemærkninger iøvrigt:

Den murede og in-situ støbte konstruktion muliggør kun luftskifte i forbindelse med vinduer og døre og kanaler for naturligt aftræk.

Vinduer og døre, der er med koblede rammer, er fra fødsel forsynet med kobbertætningslister. Listerne var generelt set i god stand, men aftegninger af slitagen godtgjorde, at de trods alt ikke ydede fuldkommen tætning. Kobberlisterne til trods, var der alligevel plads til at påklæbe en blød tætningsliste i falsen.



| | | |
|---|---|--------------------|
| Bolig nr. | : | 41 |
| Etagebolig opført | : | 1933 |
| Areal | : | 124 m ² |
| Volumen | : | 310 m ³ |
| Naturligt luftskifte før tætning | : | 0,75 gange/h |
| Naturligt luftskifte efter tætning | : | 0,53 gange/h |
| Beboernes opfattelse af tætningens virkning: | : | god |
| Medgået arbejdstid | : | 24 timer |
| Materialer | : | ca. 175 kr. |

Målingen er foretaget øverst midt i blokken i en 4½ værelses lejlighed, der går gennem 2 etager, nemlig manzard og kvistetage.

Det udførte arbejde har omfattet:

Anbringelse af tætningslister i fals ved oplukkelige vinduer og altandør.

Kalfatringsfuge omkring altandør er udbedret med fugemasse. Også i forbindelse med kvistkarm, og en spiraltrappes gennemføring i etageadskillelsen, er der tætnet med fugemasse.

Entrédør og dør fra værelse til loftgang er forsynet med tætningslister i karmlysning.

Dør fra køkken til bagtrappe er ca. 15 mm vindskæv, hvorfor det var nødvendigt med specielle forkilede trælisters, som baggrund for tætningslisterne i karmlysningen.

Ved altandør og tagvindue var det nødvendigt at lime lister på øverste rammestykke for at få kontakt med falsen foroven.

Bemærkninger iøvrigt:

Alle vinduer og altandør var før forsøgets start forsynet med en form for tætningsliste, f.eks. krøllede, overmalede kobberlister, eller en enkelt gummiliste, påklæbet forkanten af en forsatsramme.

Der var ikke umiddelbar mulighed for at checke opbygningen ud mod manzard og tagdækning iøvrigt, men i betragtning af, at så godt som alle flader så ud til at være påsat ekstra beklædningsplader, antages tætningen at være rimelig god.



| | | |
|---|---|--------------------|
| Bolig | : | 42 |
| Etagebolig opført | : | 1934 |
| Areal | : | 45 m ² |
| Volumen | : | 124 m ³ |
| Naturligt luftskifte før tætning | : | 0,92 gange/h |
| Naturligt luftskifte efter tætning | : | 0,79 gange/h |
| Beboernes opfattelse af tætningens virkning: | | god |
| Medgået arbejdstid | : | 26 timer |
| Materialer | : | ca. 150 kr. |

Målingen er foretaget i en 2 værelses lejlighed i øverste etage midt i den på billedet nærmest liggende halvdel. Lejligheden har kun facade til een side.

Det udførte arbejde har omfattet:

Tætning i fals ved vinduer i køkken og værelse.

Tætning af forsatsrammer på vindue og dør i altanparti til stue. Altandør tillige afhøvlet og justeret.

Tætningslister i karmlysning på entrédør.

Etablering af underlysramme i forbindelse med ovenlysskakt i badeværelse.

Fugning udvendig omkring altandør og indvendig mellem vindueskarm og fliser i køkken.

Bemærkninge iøvrigt:

Da lejligheden er med pudsede flader og kun har facade til en side, vil luftskiftet sandsynligvis være stærkt afhængig af vindretningen i forhold til vinduernes orientering.

Det har inden for en rimelig tid ikke været muligt at foretage måling efter tætningen ved samme vindforhold som før tætningen, og det er derfor nok mest rimeligt at lægge mere vægt på beboernes bedømmelse af virkningen end resultatet af målingen.



| | | |
|---|---|--------------------|
| Bolig | : | 49 |
| Etagebolig opført | : | 1900 |
| Areal | : | 80 m ² |
| Volumen | : | 224 m ³ |
| Naturligt luftskifte før tætning | : | 0,96 gange/h |
| Naturligt luftskifte efter tætning | : | 0,38 gange/h |
| Beboernes opfattelse af tætningens virkning: | | særdeles god |
| Medgået arbejdstid | : | 35 timer |
| Materialer | : | ca. 250 kr. |

Målingen er foretaget i en 3 værelses lejlighed i øverste etage. Vinduerne mod gaden er de to, der ses øverst til venstre i den forreste bygning.

Det udførte arbejde har omfattet:

Anbringelse af tætningsliste i fals på samtlige oplukkelige vinduer. Bemærk vinduesopdelingen. Kalfatringsfuger er generelt set udfyldt med fugemasse.

Under vindue i opholdsstue er der udfyldt med fugemasse mellem vægpanel og gulv, samt afdækket med træliste.

Entrédør og dør til bagtrappe er i karmlysningen forsynet med speciel udformet træliste med påsat tætningsprofil.

Brevindkast, håndtag på entrédør, samt enkelte anverfer på vinduer er repareret.

Bemærkninger iøvrigt:

Ingen af vinduerne har forsatsruder eller 2 lag glas.

Ruder med manglende kitning kan stadig være årsag til uønsket luftindtrængen.

Lejligheden er opvarmet med en petroleumskamin, der får sin forbrændingsluft fra det opvarmede rum.

7.2 Generelt om materialevalg

Hvor der har været mulighed for tætning i fals på vinduer, altandøre eller forsatsvinduer, har der fortrinsvis været anvendt selvklæbende, bløde skumlister på P.V.C. basis. Disse lister har, iflg. tyske afprøvnin-ger, en god bestandighed over for atmosfæriske påvirk-ninger, og har helt lukkede celler, god frostbestandig-hed, og er frem for alt meget bløde og smidige. Lister-ne er anvendt i to dim., henholdsvis 3,2 x 9 mm og 4,8 x 9 mm.

Selv om listerne er korrekt monteret, det vil blandt andet sige således, at listen i hængselsiden er anbragt så den tætnet mod rammens bagkant, må der ved vinduer/døre, som ofte åbnes, regnes med udskiftning af lister-ne en gang hvert eller hvert andet år.

Hvor der er foretaget fugning med fugemasse, er der stort set kun anvendt polyurethanbaseret masse. Ved ind-vendige fugninger, hvor der ikke er afdækket med lister, har den anvendte masse dog været på siliconebasis.

Hvis bagstopning har været nødvendig, er dette foreta-get med cirkulære profiler.

Fugning er kun foretaget efter forudgående omhyggelig afrensning og priming.

Ved tætning af døre er der hyppigst anvendt lister til fastgørelse i karmlysningen, og hvor det har været mu-ligt, er der anvendt stive plastiklister med blød vulst. Hvor dørenes skævheder har været større end 3-4 mm, er der fremstillet passende trælister med indfalsede tæt-ningslister med bløde læber.

8. LUFTSKIFTETS BETYDNING I ENERGIMÆSSIG HENSEENDE

Ved en kombination af den samlede, danske boligmasses fordeling efter alder og størrelse med den fundne fordeling af luftskiftet i relation til opførelsestidspunktet (se fig. 6.2.4), er det muligt at beregne det samlede energitab i forbindelse med det naturlige luftskifte.

I tabel 8.1.1 er vist, hvordan den samlede boligmasse er fordelt i forhold til opførelsestidspunkt, type og areal. Desuden er angivet middeltallet af det beregnede naturlige luftskifte inden for de forskellige opførelsesperioder, samt størrelsen af det årlige energitab, som gruppen af boliger inden for de enkelte opførelsesperioder tegner sig for, og yderligere er vist den enkelte boligs årlige energiforbrug til naturligt luftskifte.

Gennemsnitstallene vedr. energiforbruget, for såvel den enkelte bolig som for den samlede gruppe, er vist på søjlediagrammer i fig. 8.1.2.

Ud fra det ovennævnte talmateriale er energitabet i forbindelse med det naturlige luftskifte i den samlede danske boligmasse beregnet til ca. 10 mill. Gcal pr. år. Ca. 55% heraf vedrører boliger, der er opført før 1940, medens samme boliggruppe kun udgør 45% af den samlede boligmasse.

Det nuværende, totale energiforbrug til boligopvarmning er af bl.a. Niels Bohr Instituttet opgjort til 60 mill. Gcal pr. år. Såfremt virkningsgraden af "fyringsanlæggene" sættes lig 70%, vil energitabet i forbindelse med luftskiftet udgøre 25% af den nyttiggjorte energimængde.

Overført til et typisk parcelhus med et årligt olieforbrug på ca. 4.000 liter, betyder et luftskifte på 0,7 gange/time til, at ca. 20% af den nyttiggjorte energi

| opførelses- tidspunkt | bolig type | areal m ² | antal 1000 | lofth. m | n gg/h | Årligt energitab. | |
|--------------------------|---------------|-------------------------|---------------|-------------|------------|-------------------------------|-------------------|
| | | | | | | pr. peri- ode mil. Gcal | pr. bolig Gcal |
| -1919 | huse | 105 | 275 | 3,0 | ** 0,85 | 3,28 | 6,5 |
| | lejligh. | 69 | 230 | | | | |
| 1919-1940 | huse | 105 | 195 | 3,0* | ** 0,75 | 2,14 | 5,7 |
| | lejligh. | 69 | 183 | | | | |
| 1941-1960 | huse | 110 | 201 | 2,5* | 0,70** | 1,74 | 4,7 |
| | lejligh. | 74 | 170 | | | | |
| 1961-1965 | huse | 115 | 115 | 2,4 | 0,60** | 0,74 | 4,2 |
| | lejligh. | 75 | 62 | | | | |
| 1966-1970 | huse | 130 | 122 | 2,4 | 0,55** | 0,83 | 4,3 |
| | lejligh. | 83 | 72 | | | | |
| 1971- | huse | 140 | 128* | 2,4 | 0,50** | 1,01 | 4,0 |
| | lejligh. | 90* | 128* | | | | |
| Diverse boliger | | 100* | 119 | 3,0* | 0,70* | 0,72 | 6,1 |
| Samlet boligmasse | | 1,9·10 ⁸ | 2000 | 2,7 | 0,71 | 10,5 | 5,2 |

tabel 8.1.1. Huse og lejligheder fordelt efter alder og antal.

Arealstørrelsen for huse er sat til 140 m² i 1971, og for ældre huse er arealstørrelsen mindsket i samme forhold som lejlighederne.

Arealstørrelsen for huse er sat til 140 m² i 1971 og for ældre boliger mindst i samme forhold som lejlighederne.

*) skønnede størrelser.

**) beregnet ud fra fig. 6.2.4.

medgår til opvarmning af erstatningsluften i forbindelse med det naturlige luftskifte.

Med baggrund i de i afsnit 7.1 beskrevne tætninger af 9 boliger, må det betegnes som realistisk at fremføre, at det med begrænsede midler for den enkelte er muligt at foretage en væsentlig reduktion af luftskiftet i en stor part af boligmassen. Såfremt den del af boligmassen, der ved normalt tilstanden $v = 4,6$ m/s og $\Delta t = 17$ °C har et luftskifte større end 0,5 gange/time (60% af boligmassen har et luftskifte på 0,75 gange/time) tætnes således, at luftskiftet falder til 0,5 gange/time, vil det-

BEREGNET ENERGITAB SOM FØLGE AF DET NATURLIGE LUFTSKIFTE.

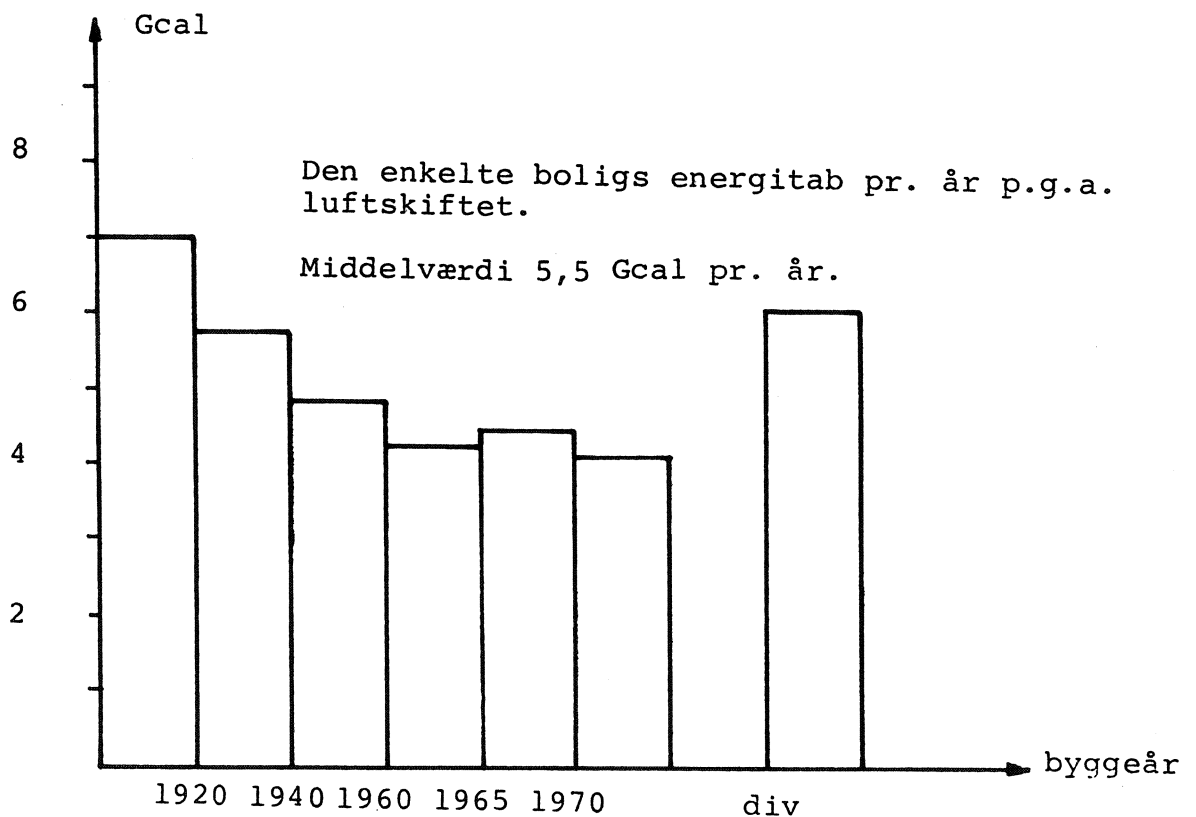
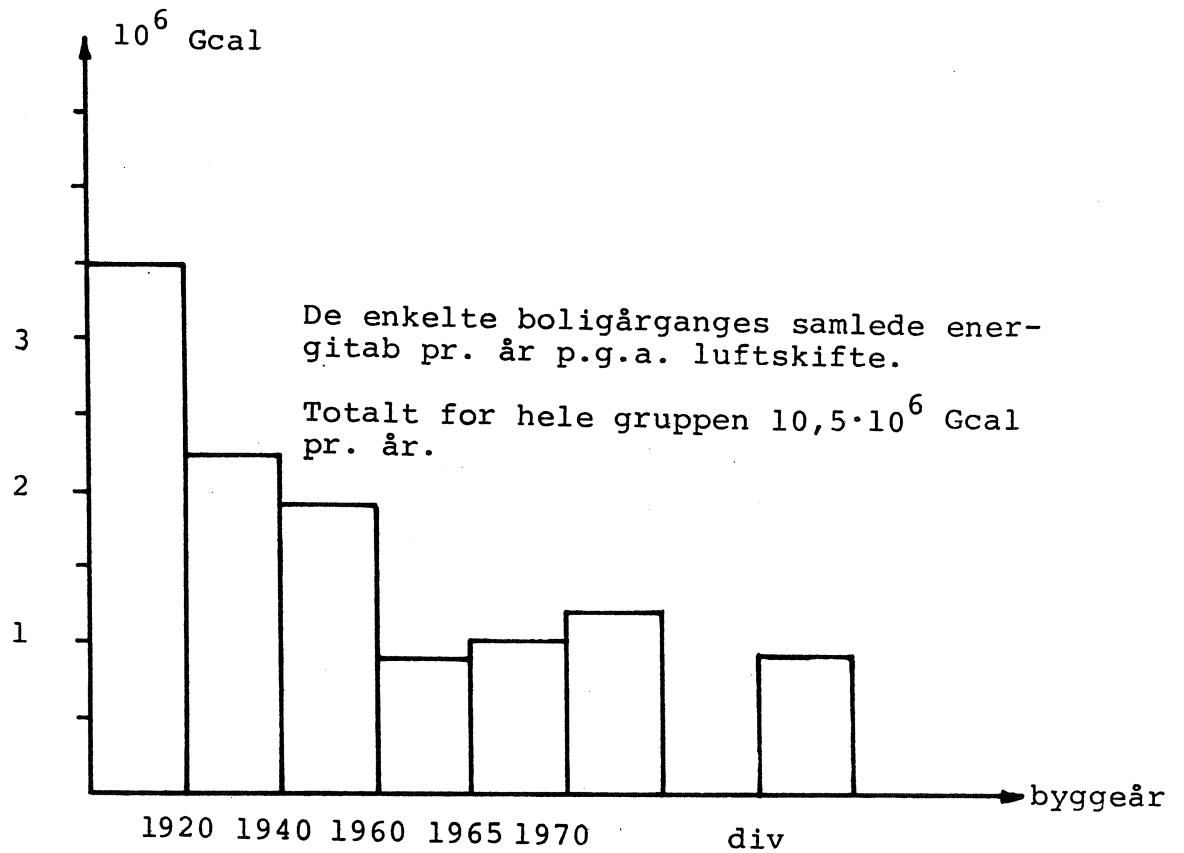


FIG: 8.1.2.

te medføre en besparelse på ca. 30%, ca. 3 mill. Gcal, af den energimængde, der på landsbasis årligt forsvinder sammen med luftskiftet.

Tætningen af en utæt bolig vil selv sagt medføre en mindskelse af trækgener, men komforttilstanden vil normalt også blive forbedret på et andet punkt, idet temperaturforskellen mellem gulv og middel rumhøjde vil blive mindre. En sådan ujævning af temperaturfordelingen i rummet vil ofte muliggøre en generel sænkning af rumtemperaturen. På landsbasis spares der ca. 3 mill. Gcal pr. år for hver grad rumtemperaturen sænkes.

En generel nedsættelse af luftskiftet til 0,3 á 0,5 gange/time skønnes ikke at ville medføre en forringelse af luftkvaliteten i en bolig, der beboes af en gennemsnitsfamilie på 3-4 personer. Ligesom der heller ikke synes at være større fare for en øgning af kondensskader i forbindelse med en sådan reducering af luftskiftet.

To ud af de 85 undersøgte boliger blev medtaget i undersøgelsen, fordi der eksisterede fugtproblemer, men i de øvrige 83 tilfældigt udvalgte boliger var der, selv i de mest tætte, ingen som helst problemer i fugtmæssig henseende.

I den ældre boligmasse, hvor vægge og lofter via pudsen er i lufttæt forbindelse med hinanden, og der desuden kun er få såkaldte snedkerpartier, vil en tætning i det væsentlige kun omfatte vinduer og døre samt kal-fatringsfuger rundt om disse.

Den lidt yngre boligmasse, der i større udstrækning har snedkerpartier og lette loftbeklædninger, er erfaringsmæssigt væsentlig vanskeligere at tætte, idet en stor del af luftskiftet sandsynligvis sker gennem disse konstruktioner.

Ved en økonomisk beregning af besparelserne synes det ikke rimeligt at benytte de priser på 150-200 kr. pr. Gcal, som er anført i rapporten fra Niels Bohr Instituttet, da der i disse priser er indregnet en række faste omkostninger. En pris på 100 kr. pr. Gcal svarer nok bedre til samfundets marginalbesparelse ved en reducere af energiforbruget.

Den før nævnte besparelse på 3 mill. Gcal, som en direkte følge af et reduceret luftskifte, andrager således 300 mill. kr. om året, ekskl. de sekundære besparelser ved en mulig sænkning af rumtemperaturen, der måske kan bidrage med yderligere godt 100 mill. kr.

Med udgangspunkt i erfaringerne fra tætningen af de 9 boliger, skønnes det, at den samlede pris for tætningen af den for besparelserne omhandlede boligmasse vil beløbe sig til små 2,5 milliarder kr., hvoraf ca. 2 milliarder vil være arbejds løn, beregnet på, at alt arbejde udføres af håndværkere. Omkring halvdelen af arbejdet er dog af en karakter, der gør det muligt for ejere eller lejere selv at udføre det.

9. KONKLUSION

Under henvisning til projektets formål kan der drages følgende konklusioner:

Det er ved trykmåling ikke muligt at fastlægge en relevant størrelse af en bygnings naturlige luftskifte, bl.a. fordi der ved en sådan måling ikke kan tages hensyn til de læggevende faktorer omkring bygningen, og fordi utætheder i forbindelse med f.eks. dampspærren i loftkonstruktionen ofte påvirkes af et påtvunget over- eller undertryk således, at utætheden forøges. I visse tilfælde kan der også være tale om, at den yderdør eller lignende, som under prøvningen erstattes af prøveudstyret, har utætheder, der i væsentlig grad bidrager til det naturlige luftskifte. Metoden vil dog være velegnet til kontrol af f.eks. seriefremstillet byggeri.

En enkelt sporgasmåling giver et nøjagtigt resultat af det øjeblikkelige luftskifte, men en præcis korrektion til normerede vejr- og temperaturforhold, lader sig kun udføre, såfremt husets karakteristisk fastlægges ved 3-4 målinger under forskellige vejr- og temperaturforhold.

Efter anskaffelse af hensigtsmæssigt udstyr og opnåelse af en rimelig rutine, har sporgasmålingerne været mindre tidskrævende, end det var forudset.

Det har ikke været muligt at finde nogle korrelationer mellem trykmåling og sporgasmåling.

Middelværdien af luftskiftet for den undersøgte boligmasse er ca. 30-40% mindre end forventet. Navnlig de nyere huse var tættere end tidligere antaget, hvilket kan bero på, at antagelserne i for stor grad har bygget på erfaringer i forbindelse med afhjælpning af gener fra et for stort luftskifte.

Omkring en 1/4 af landets samlede energiforbrug til boligopvarmning går tabt i forbindelse med det naturlige luftskifte. Med den fornødne indsats, burde det være muligt at nedsætte dette tal til omkring 1/5.

Husejere med de mest utætte huse anvender ca. 1/3 af olieforbruget til friskluftopvarmning, medens de med de meget tætte huse kun anvender 1/10 af olieforbruget til samme formål.

I de nyere boliger bør man især være opmærksom på at få skabt lufttætte forbindelser mellem væg- og tagkonstruktion, ligesom selve tagkonstruktionen bør være lufttæt ned mod rummet. I de ældre boliger er det først og fremmest fuger mellem ramme og karm på døre og vinduer samt kalfatringsfuger, der må tættes ved hjælp af hensigtsmæssige tætningslister og fugemasse.

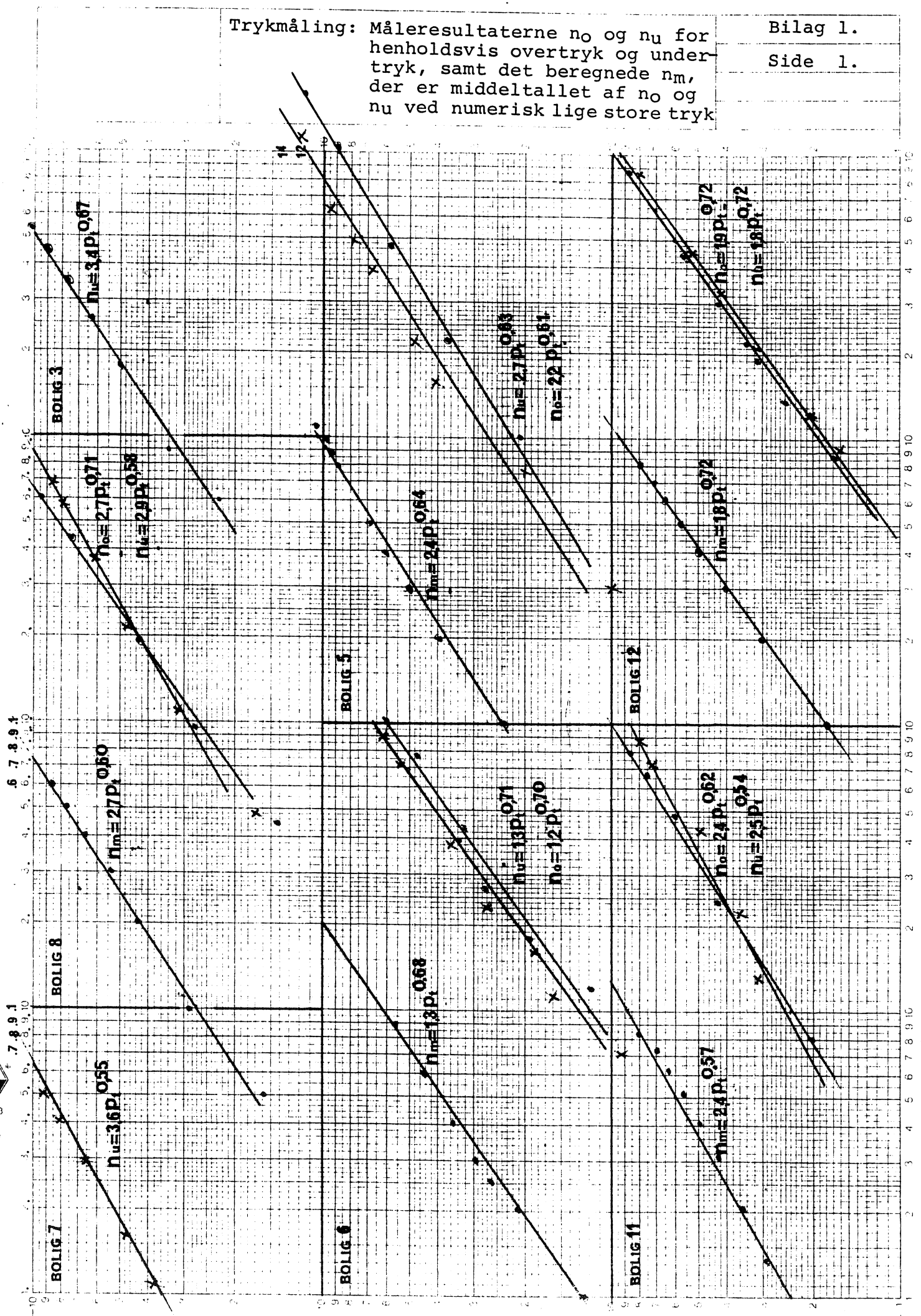
10. LITTERATURHENVISNING

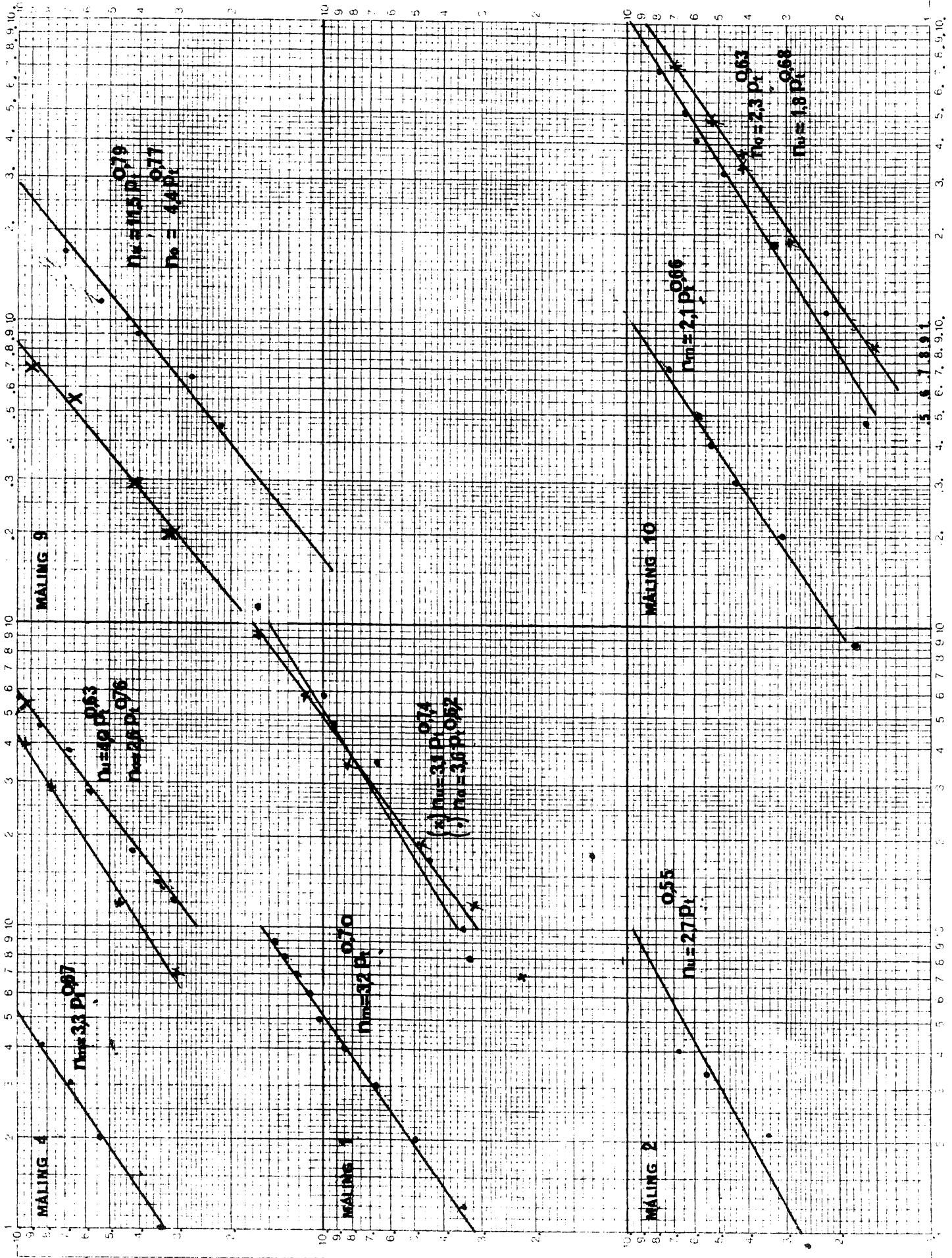
- [1] Formaldehydafgivelse fra spånplader -
en matematisk model
Ib Andersen, G.R. Lundquist, Lars Møllehave
Ugeskrift for læger, nr. 38, 1974.
- [2] Boligventilation
P. Becher, L. Evensen
SBI-rapport 44, 1961
- [3] Field Measurements of Air Infiltration in Ten
Electrically-Heated Houses
C.W. Coblentz, P.R. Achenbach
ASHRAE, No. 1845, 1963
- [4] Värmebalans i småhus, 1973
Elmroth og Höglund
- [5] Statistical analyses of air leakage in split-level
residences.
R.R. Laschober, J.H. Healy
ASHRAE, No. 1900, 1964
- [6] Measurement of Air leakage of Houses
S. Stricker
Ontario hydro research quarterly,
fourth quarter, 1974
- [7] Vejrdata for VVS-tekniske beregninger. Referenceår.
Bo Andersen, Stig Ejdorff, Hans Lund,
Erik Pedersen, Stig Rosenørn, Ole Valbjørn
SBI-rapport 89, 1974

IFIAS rapporter

- [8] Boligens energiforbrug 1973-2005
Asger Hansen, Niels Moe
Rapport nr. 1, Niels Bohr Institutttet
- [9] Energiefterspørgsel i Danmark 1990-2005, traditionelt og reduceret
Evald Brønd, Niels Moe
Rapport nr. 2, Niels Bohr Institutttet
- [10] Danmarks energiforsyning 1990-2005, traditionelt og reduceret
Sven Bjørnholm, Asger Hansen, Anders Holm
Rapport nr. 3, Niels Bohr Institutttet
- [11] Danmarks energiforbrug i samfundsøkonomisk belysning 1990-2005
Sven Bjørnholm, Asger Hansen, Anders Holm
Rapport nr. 4, Niels Bohr Institutttet
- [12] Energien i Danmark 1990-2005
Sven Bjørnholm
Rapport nr. 6, Niels Bohr Institutttet

Trykmåling: Måleresultaterne n_0 og n_u for henholdsvis overtryk og undertryk, samt det beregnede n_m , der er middeltallet af n_0 og n_u ved numerisk lige store tryk





Overtryk

POLYNOMIAL REGRESSION

MAX DEG = 1

| I | X | Y | XT | YT |
|---|---------|--------|---------|---------|
| 1 | 0.7000 | 0.8800 | -0.1549 | -0.0555 |
| 2 | 1.2000 | 1.1500 | 0.0792 | 0.0607 |
| 3 | 1.8000 | 1.9000 | 0.2553 | 0.2788 |
| 4 | 2.7000 | 2.7000 | 0.4314 | 0.4314 |
| 5 | 3.9000 | 3.3000 | 0.5911 | 0.5185 |
| 6 | 7.7000 | 4.5000 | 0.8865 | 0.6532 |
| 7 | 11.1000 | 5.9000 | 1.0453 | 0.7709 |

MEANS, VARIANCES, CORRELATION

X MEAN = 4.1571
 VAR(X) = 14.8662
 Y MEAN = 2.9043
 VAR(Y) = 3.3171
 RXY = 0.9779
 XT MEAN = 0.4477
 VAR(XT) = 0.1844
 YT MEAN = 0.3797
 VAR(YT) = 0.0919
 R(XT, YT) = 0.9887

| Beregnet | |
|----------|---|
| Y_B | $\frac{\hat{Y} - Y_B}{\hat{Y}} \cdot 100$ |
| 0.91 | - 3 |
| 1.33 | -15 |
| 1.76 | 7 |
| 2.34 | 14 |
| 3.02 | 9 |
| 4.85 | - 8 |
| 6.26 | - 6 |
| middel | 9 |

DEGREE REGRESSION= 1

COEFFICIENTS

| B(I) | STD ERROR | T | |
|---------------|-----------|---------|--------------|
| B(0)= 0.0673 | 0.0283 | 2.3774 | $c_0 = 1.17$ |
| B(1)= 0.6978 | 0.0473 | 14.7566 | $x_0 = 0.70$ |

RESIDUALS

| I | X | YT | YHAT | RESIDUAL |
|---|---------|---------|---------|----------|
| 1 | 0.7000 | -0.0555 | -0.0408 | -0.0147 |
| 2 | 1.2000 | 0.0607 | 0.1226 | -0.0619 |
| 3 | 1.8000 | 0.2788 | 0.2454 | 0.0333 |
| 4 | 2.7000 | 0.4314 | 0.3683 | 0.0631 |
| 5 | 3.9000 | 0.5185 | 0.4797 | 0.0388 |
| 6 | 7.7000 | 0.6532 | 0.6859 | -0.0327 |
| 7 | 11.1000 | 0.7709 | 0.7967 | -0.0259 |

Undertryk

POLYNOMIAL REGRESSION

MAX DEG = 1

| I | X | Y | XT | YT |
|---|--------|--------|---------|---------|
| 1 | 0.7400 | 0.9000 | -0.1308 | -0.0458 |
| 2 | 1.1000 | 1.6000 | 0.0414 | 0.2041 |
| 3 | 1.6000 | 1.8000 | 0.2041 | 0.2553 |
| 4 | 2.3000 | 2.6000 | 0.3617 | 0.4150 |
| 5 | 3.8000 | 3.5000 | 0.5798 | 0.5441 |
| 6 | 7.1000 | 5.1000 | 0.8513 | 0.7076 |
| 7 | 9.0000 | 6.0000 | 0.9542 | 0.7782 |

MEANS, VARIANCES, CORRELATION

X MEAN = 3.6629
VAR(X) = 10.2570

Y MEAN = 3.0714
VAR(Y) = 3.5990

RXY = 0.9887

XT MEAN = 0.4088
VAR(XT) = 0.1655

YT MEAN = 0.4083
VAR(YT) = 0.0860

R(XT, YT) = 0.9896

| Beregnet | |
|-------------------|-------------------------------|
| $\hat{Y}_B (n_B)$ | $\frac{Y - Y_B}{Y} \cdot 100$ |
| 1.06 | -18 |
| 1.40 | 12 |
| 1.83 | -2 |
| 2.37 | 9 |
| 3.39 | 3 |
| 5.30 | -4 |
| 6.27 | -5 |
| middel | 8 |

DEGREE REGRESSION= 1

COEFFICIENTS

| | B(I) | STD ERROR | T | |
|--------|--------|-----------|---------|----------------|
| B(0)= | 0.1156 | 0.0257 | 4.5331 | $c = 1.31$ |
| B(1)= | 0.7136 | 0.0463 | 15.4167 | $x_u^u = 0,71$ |

RESIDUALS

| I | X | YT | YHAT | RESIDUAL |
|---|--------|---------|--------|----------|
| 1 | 0.7400 | -0.0458 | 0.0233 | -0.0691 |
| 2 | 1.1000 | 0.2041 | 0.1462 | 0.0580 |
| 3 | 1.6000 | 0.2553 | 0.2623 | -0.0070 |
| 4 | 2.3000 | 0.4150 | 0.3747 | 0.0402 |
| 5 | 3.8000 | 0.5441 | 0.5003 | 0.0137 |
| 6 | 7.1000 | 0.7076 | 0.7240 | -0.0165 |
| 7 | 9.0000 | 0.7782 | 0.7975 | -0.0194 |

Middeltryk

POLYNOMIAL REGRESSION

MAX DEG = 1

| I | X | Y | XT | YT |
|---|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 1.0000 | 1.2500 | 0.0000 | 0.0969 |
| 2 | 2.0000 | 2.1000 | 0.3010 | 0.3222 |
| 3 | 2.5000 | 2.6000 | 0.3979 | 0.4150 |
| 4 | 3.0000 | 2.9000 | 0.4771 | 0.4624 |
| 5 | 4.0000 | 3.5000 | 0.6021 | 0.5441 |
| 6 | 6.0000 | 4.5000 | 0.7782 | 0.6532 |
| 7 | 9.0000 | 5.6000 | 0.9542 | 0.7482 |

MEANS, VARIANCES, CORRELATION

X MEAN = 3.9286
VAR(X) = 7.5357

Y MEAN = 3.2071
VAR(Y) = 2.1670

RXY = 0.9838

XT MEAN = 0.5015
VAR(XT) = 0.0991

YT MEAN = 0.4631
VAR(YT) = 0.0467

R(XT, YT) = 0.9963

| Beregnet | |
|----------|-------------------------------|
| Y_B | $\frac{Y - Y_B}{Y} \cdot 100$ |
| 1.32 | - 5 |
| 2.12 | - 1 |
| 2.47 | 5 |
| 2.80 | 4 |
| 3.40 | 3 |
| 4.50 | 0 |
| 5.93 | - 6 |
| middel | 3 |

DEGREE REGRESSION= 1

COEFFICIENTS

| | B(I) | STD ERROR | T | |
|--------|--------|-----------|---------|----------------|
| B(0)= | 0.1201 | 0.0153 | 7.8393 | $c_m = 1.32$ |
| B(1)= | 0.6839 | 0.0264 | 25.8874 | $x_m^m = 0.68$ |

RESIDUALS

| I | X | YT | YHAT | RESIDUAL |
|---|--------|--------|--------|----------|
| 1 | 1.0000 | 0.0969 | 0.1201 | -0.0232 |
| 2 | 2.0000 | 0.3222 | 0.3260 | -0.0038 |
| 3 | 2.5000 | 0.4150 | 0.3923 | 0.0227 |
| 4 | 3.0000 | 0.4624 | 0.4465 | 0.0159 |
| 5 | 4.0000 | 0.5441 | 0.5319 | 0.0122 |
| 6 | 6.0000 | 0.6532 | 0.6503 | 0.0029 |
| 7 | 9.0000 | 0.7482 | 0.7728 | -0.0246 |

Data og måleresultater i forbindelse med sporgasmålinger

| Måling nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Type | H | H | H | H | H | H | H | H | H | H | H | H | H | H | L | L | H |
| År | 74 | 70 | 69 | 72 | 67 | 69 | 69 | 69 | 69 | 70 | 70 | 72 | 65 | 73 | 66 | 61 | 61 |
| Areal | 138 | 160 | 132 | 140 | 83,4 | 123 | 112 | 138 | 143 | 152 | 206 | 170 | 183 | 140 | 84 | 80 | 105 |
| Volumen | 324 | 380 | 320 | 330 | 197 | 295 | 260 | 322 | 350 | 370 | 480 | 395 | 418 | 330 | 210 | 203 | 263 |
| Beliggenh. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| LS | | | | | 25 | | | | | 21 | 20 | 19 | 22 | 20 | 20 | 21 | 19 |
| LU | | | | | 25 | | 18,6 | 22,1 | 20 | 6 | 6 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 0 |
| AL | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 14 | 14 | 17 | 15 | 16 | 17 | 19 |
| V | 3,5 | 4 | 1 | 4,5 | 4,5 | 4,5 | 3 | 1,8 | 1,5 | 2 | 2 | 4 | 1 | 4 | 6 | 6,5 | 1 |
| VH | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 7,8 | 3,6 | 2,1 | 1,6 | 4 | 4 | 6,2 | 6,2 | 6,2 | 7,5 | 7,7 | 2 |
| φ _S | | | | 50 | | | | | | x | x | x | x | x | x | x | 47 |
| φ _U | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| n | 0,2 | 0,27 | 0,6 | 0,22 | 0,4 | 0,35 | 0,36 | 0,21 | 0,35 | 0,34 | 0,17 | 0,57 | 0,37 | 0,81 | 0,54 | 0,89 | 0,56 |
| n _H | 0,29 | 0,40 | 0,88 | 0,32 | 0,59 | 0,34 | 0,56 | 0,42 | 0,76 | 0,37 | 0,19 | 0,52 | 0,32 | 0,72 | 0,43 | 0,69 | 0,71 |

| Måling nr. | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Type | L | H | L | L | L | L | H | H | H | H | H | L | H | H | H | H | L |
| År | 03 | 71 | 1870 | 69 | 52 | 68 | 64 | 64 | 64 | 52 | 73 | 32 | 30 | 24 | 22 | 12 | 36 |
| Areal | 70 | 128 | 129 | 87 | 36 | 85 | 93 | 93 | 93 | 270 | | 75 | 100 | 104 | 112 | 180 | 75 |
| Volumen | 195 | 305 | 360 | 226 | 90 | 215 | 230 | 230 | 230 | 675 | | 188 | 262 | 265 | 308 | 504 | 184 |
| Beliggenh. | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| LS | 21 | 22 | 21 | 21 | 23 | 17 | 21 | 20 | 22 | 19 | x | 18 | 23 | 20 | 18 | 19 | 18 |
| LU | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 6 | 5 | 4 | 3 |
| AL | 19 | 19 | 12 | 17 | 19 | 14 | 16 | 15 | 17 | 14 | 15 | 13 | 18 | 14 | 13 | 15 | 15 |
| V | 1 | 1 | 1 | 4 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 4,5 | 4 | 3 | 0,7 | 0,5 | 0,8 | 0,8 | 0,5 |
| VH | 2,5 | 2,0 | 5 | 5,2 | 2,3 | 2 | 4 | 4 | 5,2 | 6,2 | 6 | 5 | 1 | 1 | 1,5 | 1 | 1 |
| φ _S | 48 | 46 | 51 | 46 | 49 | x | 75 | 44 | 41 | 41 | 45 | 44 | 44 | 46 | 49 | 48 | 44 |
| φ _U | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| n | 0,09 | 0,42 | 0,76 | 0,58 | 0,68 | 0,08 | 0,76 | 0,33 | 0,6 | 1,26 | 0,63 | 1,23 | 0,26 | 0,86 | 0,55 | 0,33 | 0,54 |
| n _H | 0,11 | 0,53 | 0,72 | 0,55 | 0,83 | 0,11 | 0,82 | 0,36 | 0,57 | 1,14 | 0,57 | 1,26 | 1,26 | 1,39 | 0,85 | 0,52 | 0,84 |

| Måling nr. | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 |
|----------------|------|-----------------------|---------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|------|------|------------------------|------------------------|------|------|------|----------------------|------|------|
| Type | L | H | H | L | L | L | L | L | H | L | L | L | H | H | ⁽¹¹⁾ H | L | H |
| År | 34 | 74 | 67 | 33 | 34 | 37 | 34 | 30 | 65 | 60 | 34 | 1900 | 71 | 72 | 75 | 10 | 21 |
| Areal | 120 | 110 | 104 | 124 | 45 | 65 | 136 | 63 | 103 | 70 | 90 | 80 | 155 | 198 | 115 | 85 | 440 |
| Volumen | 324 | 260 | 260 | 310 | 124 | 163 | 360 | 170 | 250 | 180 | 242 | 224 | 386 | 475 | 258 | 245 | 1240 |
| Beliggenh. | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| LS | 20 | 23 | 21 | 23 | 21 | 19 | 22 | 18 | 20 | 23 | 20 | 18 | 22 | 22 | 21 | 21 | 22 |
| LU | 3 | 2 | 2 | 1 | 3 | 3 | 6 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | x 2 | x 2 | 14 | 0 | x 1 |
| AL | 17 | 21 | 19 | 22 | 18 | 16 | 16 | 14 | 19 | 23 | 20 | 18 | 24 | 24 | 7 | 21 | 25 |
| V | 0,5 | 6,5 | 6 | 3,5 | 5,5 | 2,5 | 2,5 | 4 | 7 | 0,3 | 1 | 0 | 3 | 0,2 | 4,5 | 0,5 | 0,1 |
| VH | 1 | ⁽¹¹⁾ 11 | ⁽⁹⁾ 8 | ^(16,5) 7 | ^(16,5) 6 | ^(12,5) 9 | ⁽¹⁴⁾ 12 | 11 | 8 | ⁽¹²⁾ 1,5 | ⁽¹⁶⁾ 2,5 | 3 | 5 | 2 | 11,5 | 3 | 3 |
| φ _S | 39 | 52 | 48 | 48 | 46 | 51 | 46 | 43 | x | x | x | x | x | 39 | x | 41 | x |
| φ _U | | 64 | 64 | 92 | 87 | 93 | 100 | 93 | 75 | 93 | 86 | 63 | 93 | 80 | x | 93 | 87 |
| n | 0,46 | 0,38 | 1,02 | 0,80 | 1,1 | 0,5 | 0,48 | 0,71 | 0,85 | 0,28 | 0,6 | 0,89 | 0,85 | 0,5 | 0,35 | 0,89 | 0,87 |
| n _H | 0,69 | 0,23 | 0,76 | 0,62 | 0,96 | 0,36 | 0,29 | 0,46 | 0,63 | 0,35 | 0,70 | 1,03 | 0,74 | 0,58 | 0,24 | 0,77 | 0,92 |

Data og måleresultater i forbindelse med sporgasmålinger

| Måling nr. | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 |
|------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------|------|----------------------|------|-----------------------|
| Type | H | H | H | H | H | L | L | L | L | L | L | L | L | H | H | H | H |
| År | 73 | 72 | 72 | 65 | 72 | 60 | 25 | 25 | 90 | 1900 | 1900 | 1792 | 35 | 71 | 10 | 59 | 69 |
| Areal | 273 | 140 | 258 | 350 | 230 | 85 | 135 | 158 | | | 134 | 76 | | 265 | 170 | 120 | 156 |
| Volumen | 627 | 335 | 625 | 886 | 552 | 210 | 365 | 442 | | | 430 | 200 | | 636 | 425 | 288 | 362 |
| Beløgnh. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| t_s | 21 | 23 | 22 | 22 | 21 | 17 | 22 | 21 | 24 | 20 | 21 | 20 | 22 | 24 | 21 | 20 | 22 |
| t_u | ⁽⁺⁰⁾ 0 | ⁽⁺³⁾ 0 | ⁽⁺³⁾ +1 | ⁽⁺⁰⁾ +1 | ⁽⁺⁵⁾ +3 | ⁽⁺⁷⁾ +4 | ⁽⁺⁶⁾ -5 | ⁽⁺⁸⁾ 5 | ⁽⁺⁸⁾ 5 | ⁽⁺⁵⁾ 5 | ⁽⁺⁷⁾ 3 | ⁽⁺⁷⁾ 3 | 5 | 5 | ⁽⁺⁴⁾ 4 | -1 | ⁽⁺²⁾ +2 |
| A_t | 21 | 23 | 21 | 21 | 18 | 13 | 17 | 16 | 19 | 20 | 18 | 17 | 17 | 19 | 17 | 21 | 24 |
| V | 0,5 | 0,1 | 1 | 2 | 0,5 | 1 | 4 | 4 | 8 | 11 | 4 | 4 | 7 | 6 | 2 | 1 | 1 |
| V_H | 2 | 1 | 4 | 3 | 5 | 6 | 9 | 11 | 7 | 7 | 7 | 6 | 10 | 7 | 5 | 5 | 5 |
| ϕ_s | ÷ | ÷ | × | ÷ | ÷ | ÷ | ÷ | ÷ | × | ÷ | ÷ | ÷ | ÷ | ÷ | ÷ | ÷ | ÷ |
| ϕ_u | 100 | 93 | 80 | 100 | 100 | 93 | 93 | 87 | 76 | 87 | 76 | 81 | 65 | 65 | 74 | 100 | 93 |
| n | 0,62 | 0,65 | 0,78 | 0,69 | 0,83 | 0,73 | 0,83 | 0,75 | 0,95 | 0,49 | 0,52 | 2,1 | 0,39 | 0,75 | 0,7 | 1,04 | 0,75 |
| n_H | 0,76 | 0,86 | 0,78 | 0,76 | 0,79 | 0,68 | 0,59 | 0,48 | 0,76 | 0,39 | 0,42 | 1,86 | 0,32 | 0,65 | 0,67 | 0,95 | 0,65 |

| Måling nr. | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | midte. | | | |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|------|------|------|------|------|--------|--|--|--|
| Type | H | H | H | H | H | H | H | H | L | H | H | H | H | | | | |
| År | 58 | 35 | 70 | 71 | 71 | 72 | 70 | 72 | 09 | 75 | 13 | 67 | 73 | | | | |
| Areal | 112 | 205 | 137 | 123 | 160 | 130 | 116 | 132 | 34 | 117 | 138 | 124 | 150 | | | | |
| Volumen | 290 | 544 | 318 | 295 | 376 | 312 | 343 | 318 | 75 | 274 | 375 | 298 | 360 | | | | |
| Beløgnh. | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | | | | |
| t_s | 24 | 21 | 22 | 22 | 21 | 18 | 25 | 24 | 23 | 22 | 20 | 24 | 22 | | | | |
| t_u | ⁽⁺²⁾ +1 | ⁽⁺³⁾ +1 | ⁽⁺²⁾ +2 | ⁽⁺²⁾ +2 | ⁽⁺¹⁾ +2 | ⁽⁺²⁾ 0 | ⁽⁺³⁾ 0 | ⁽⁺³⁾ +1 | 0 | +1 | 0 | 1 | 0 | +1 | | | |
| A_t | 25 | 22 | 24 | 24 | 18 | 18 | 25 | 25 | 23 | 21 | 19 | 24 | 21 | 16,5 | | | |
| V | 1 | 1 | 3 | 3 | 2,5 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 3 | 4 | 4 | 33 | | | |
| V_H | 3 | 5 | 4 | 7 | 6 | 2 | 2,5 | 2 | 2 | 2 | 4 | 5 | 5 | 4,8 | | | |
| ϕ_s | × | ÷ | ÷ | ÷ | ÷ | ÷ | 47 | ÷ | ÷ | ÷ | ÷ | × | ÷ | | | | |
| ϕ_u | 74 | 86 | 80 | 75 | 75 | 75 | 80 | | | | | | | | | | |
| n | 0,5 | 0,56 | 0,36 | 0,41 | 2,67 | 0,36 | 0,4 | 0,47 | 0,87 | 0,32 | 3,8 | 0,84 | 0,46 | 0,62 | | | |
| n_H | 0,51 | 0,50 | 0,34 | 0,31 | 0,55 | 0,47 | 0,43 | 0,53 | 1,02 | 0,39 | 0,82 | 0,73 | 0,42 | 0,63 | | | |

Data og måleresultater i forbindelse med sporgasmålinger

| Måling nr. | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 |
|----------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------|------|----------------------|------|-----------------------|
| Type | H | H | H | H | H | L | L | L | L | L | L | L | L | H | H | H | H |
| År | 73 | 72 | 72 | 65 | 72 | 60 | 25 | 25 | 90 | 1900 | 1900 | 1792 | 35 | 71 | 10 | 59 | 69 |
| Areal | 273 | 140 | 258 | 350 | 230 | 85 | 135 | 158 | | | 134 | 76 | | 265 | 170 | 120 | 156 |
| Volumen | 627 | 335 | 625 | 886 | 552 | 210 | 365 | 442 | | | 430 | 200 | | 636 | 425 | 288 | 362 |
| Beliggenh. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| ε _r | 21 | 23 | 22 | 22 | 21 | 17 | 22 | 21 | 24 | 20 | 21 | 20 | 22 | 24 | 21 | 20 | 22 |
| ε _u | ⁽⁺²⁾ 0 | ⁽⁺³⁾ 0 | ⁽⁺³⁾ +1 | ⁽⁰⁾ +1 | ⁽⁺⁵⁾ +3 | ⁽⁺⁷⁾ +4 | ⁽⁺⁶⁾ -5 | ⁽⁺⁸⁾ 5 | ⁽⁺⁸⁾ 5 | ⁽⁺⁵⁾ 0 | ⁽⁺⁷⁾ 3 | ⁽⁺⁷⁾ 3 | 5 | 5 | ⁽⁺⁴⁾ 4 | -1 | ⁽⁺²⁾ +2 |
| Δt | 21 | 23 | 21 | 21 | 18 | 13 | 17 | 16 | 19 | 20 | 18 | 17 | 17 | 19 | 17 | 21 | 24 |
| V | 0,5 | 0,1 | 1 | 2 | 0,5 | 1 | 4 | 4 | 8 | 11 | 4 | 4 | 7 | 6 | 2 | 1 | 1 |
| VH | 2 | 1 | 4 | 3 | 5 | 6 | 9 | 11 | 7 | 7 | 7 | 6 | 10 | 7 | 5 | 5 | 5 |
| φ _r | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × |
| φ _u | 100 | 93 | 80 | 100 | 100 | 93 | 93 | 87 | 76 | 87 | 76 | 81 | 65 | 65 | 74 | 100 | 93 |
| n | 0,62 | 0,65 | 0,78 | 0,69 | 0,83 | 0,73 | 0,83 | 0,75 | 0,95 | 0,49 | 0,52 | 2,1 | 0,39 | 0,75 | 0,7 | 1,00 | 0,75 |
| n _H | 0,76 | 0,86 | 0,78 | 0,76 | 0,79 | 0,68 | 0,59 | 0,48 | 0,76 | 1,39 | 0,42 | 1,86 | 0,32 | 0,65 | 0,67 | 0,95 | 0,65 |

| Måling nr. | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | midte | | |
|----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|------|------|------|------|------|------|-------|--|--|
| Type | H | H | H | H | H | H | H | H | L | H | H | H | H | | | |
| År | 58 | 35 | 70 | 71 | 71 | 72 | 70 | 72 | 09 | 75 | 13 | 67 | 73 | | | |
| Areal | 112 | 205 | 137 | 123 | 160 | 130 | 146 | 132 | 34 | 117 | 138 | 124 | 150 | | | |
| Volumen | 290 | 544 | 318 | 295 | 376 | 312 | 343 | 318 | 75 | 274 | 375 | 298 | 360 | | | |
| Beliggenh. | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | | | |
| ε _r | 24 | 21 | 22 | 22 | 21 | 18 | 25 | 24 | 23 | 22 | 20 | 24 | 22 | | | |
| ε _u | ⁽⁺²⁾ +1 | ⁽⁺³⁾ +1 | ⁽⁺²⁾ +2 | ⁽⁺²⁾ +2 | ⁽⁺¹⁾ +2 | ⁽⁺²⁾ 0 | ⁽⁺³⁾ 0 | +1 | 0 | +1 | 1 | 0 | +1 | | | |
| Δt | 25 | 22 | 24 | 24 | 13 | 18 | 25 | 25 | 23 | 21 | 19 | 24 | 21 | 16,5 | | |
| V | 1 | 1 | 3 | 3 | 2,5 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 3 | 4 | 4 | 33 | | |
| VH | 3 | 5 | 4 | 7 | 6 | 2 | 2,5 | 2 | 2 | 2 | 4 | 5 | 5 | 4,8 | | |
| φ _r | × | × | × | × | × | × | 47 | × | × | × | × | × | × | | | |
| φ _u | 74 | 86 | 80 | 75 | 75 | 75 | 80 | | | | | | | | | |
| n | 0,5 | 0,56 | 0,36 | 0,41 | 2,67 | 0,36 | 0,4 | 0,47 | 0,87 | 0,32 | 2,8 | 0,84 | 0,46 | 0,62 | | |
| n _H | 0,51 | 0,50 | 0,34 | 0,31 | 0,55 | 0,47 | 0,43 | 0,53 | 1,02 | 0,39 | 0,82 | 0,73 | 0,42 | 0,63 | | |

| Måleperiode (6 timer) | Δt | v | n | \hat{n} | $\frac{n - \hat{n} \cdot 100}{n}$ |
|--------------------------|------------|-----|------|-----------|-----------------------------------|
| 1 | 0,1 | 0,0 | 0,11 | 0,090 | 18,5 |
| 2 | 4,0 | 2,0 | 0,13 | 0,143 | -10,2 |
| 3 | 6,0 | 1,7 | 0,14 | 0,140 | 0,1 |
| 4 | 5,0 | 1,1 | 0,12 | 0,124 | -3,4 |
| 5 | 4,5 | 0,6 | 0,10 | 0,112 | -11,6 |
| 6 | 2,5 | 0,9 | 0,13 | 0,115 | 11,6 |
| 7 | 3,5 | 0,8 | 0,11 | 0,114 | -4,0 |
| 8 | 6,5 | 0,6 | 0,13 | 0,115 | 11,4 |

Resultat af kontinuerlig luftskiftemåling i bolig nr. 1.

Δt , v og n er middeltal for perioden.

\hat{n} = det luftskifte, der er beregnet efter at konstanterne a, b og c er fastlagt.

| Måleperiode (6 timer) | Δt | v | n | \hat{n} | $\frac{n - \hat{n} \cdot 100}{n}$ |
|--------------------------|------------|-----|------|-----------|-----------------------------------|
| 1 | 10,0 | 3,4 | 0,18 | 0,177 | 1,5 |
| 2 | 10,5 | 4,3 | 0,20 | 0,198 | 1,0 |
| 3 | 10,0 | 4,1 | 0,17 | 0,193 | -13,4 |
| 4 | 6,0 | 2,4 | 0,16 | 0,148 | 7,2 |
| 5 | 10,0 | 1,4 | 0,13 | 0,133 | -2,4 |
| 6 | 12,5 | 1,6 | 0,14 | 0,142 | -1,3 |
| 7 | 9,0 | 3,2 | 0,21 | 0,171 | 18,5 |
| 8 | 10,0 | 4,7 | 0,24 | 0,206 | 14,1 |
| 9 | 14,0 | 1,7 | 0,14 | 0,147 | -4,7 |
| 10 | 16,0 | 1,2 | 0,14 | 0,139 | 0,8 |
| 11 | 9,5 | 2,8 | 0,17 | 0,163 | 4,0 |
| 12 | 7,5 | 3,5 | 0,17 | 0,175 | -3,1 |
| 13 | 10,5 | 1,2 | 0,12 | 0,130 | -8,0 |
| 14 | 12,5 | 1,6 | 0,13 | 0,142 | -9,1 |
| 15 | 8,0 | 5,0 | 0,25 | 0,209 | 16,3 |
| 16 | 6,5 | 4,6 | 0,18 | 0,198 | -10,0 |
| 17 | 9,5 | 2,9 | 0,13 | 0,165 | -27,3 |
| 18 | 11,0 | 3,5 | 0,16 | 0,181 | -13,3 |

Resultat af kontinuerlig luftskiftemåling i bolig nr. 10.

Δt , v og n er middeltal for perioden.

\hat{n} = det luftskifte, der er beregnet efter at konstanterne a, b og c er fastlagt.

| Måleperiode (6 timer) | Δt | v | n | \hat{n} | $\frac{n - \hat{n} \cdot 100}{n}$ |
|--------------------------|------------|-----|------|-----------|-----------------------------------|
| 1 | 6,5 | 4,8 | 0,34 | 0,319 | 6,1 |
| 2 | 5,1 | 5,0 | 0,34 | 0,322 | 5,2 |
| 3 | 6,5 | 4,4 | 0,30 | 0,305 | -1,8 |
| 4 | 8,2 | 3,2 | 0,25 | 0,268 | -7,2 |
| 5 | 8,5 | 3,0 | 0,23 | 0,262 | -13,8 |
| 6 | 8,0 | 3,2 | 0,26 | 0,267 | -2,9 |
| 7 | 7,0 | 4,0 | 0,27 | 0,293 | -8,4 |
| 8 | 6,8 | 3,9 | 0,30 | 0,289 | 3,8 |
| 9 | 4,5 | 5,2 | 0,39 | 0,328 | 15,9 |
| 10 | 5,0 | 5,2 | 0,35 | 0,329 | 5,9 |
| 11 | 6,0 | 4,2 | 0,24 | 0,297 | -23,2 |
| 12 | 6,8 | 4,2 | 0,24 | 0,298 | -24,1 |
| 13 | 5,8 | 5,2 | 0,35 | 0,331 | 5,3 |
| 14 | 5,8 | 4,6 | 0,20 | 0,310 | -55,2 |
| 15 | 5,5 | 5,5 | 0,42 | 0,341 | 18,8 |
| 16 | 5,8 | 5,8 | 0,49 | 0,352 | 28,1 |
| 17 | 6,8 | 6,8 | 0,33 | 0,390 | -18,1 |

Resultat af kontinuerlig luftskiftemåling i bolig nr. 11.

Δt , v og n er middeltal for perioden.

\hat{n} = det luftskifte, der er beregnet efter at konstanterne a , b og c er fastlagt.

| Bolig nr. | Før tætning | | | | Efter tætning | | | | Ændring | |
|-----------------------|--------------|----------|------------------------|----------------|---------------|----------|------------------------|----------------|-------------------------|----|
| | n gg/h | v m/s | n _k gg/h | vind- retn. | n gg/h | v m/s | n _k gg/h | vind. retn. | Δn _k gg/h | % |
| 17 | 0,81 0,47 | 6 4 | 0,69 0,47 | SSØ Ø | 0,34 | 5 | 0,29 | Ø | 0,29 | 50 |
| 19 | 0,69 0,89 | 5 7 | 0,60 0,72 | Ø | 0,35 | 2 | 0,40 | ØNØ | 0,26 | 40 |
| 23 | 0,76 0,41 | 5 6 | 0,72 0,34 | NV Ø | 0,38 | 4 | 0,38 | N | 0,15 | 30 |
| 30 | 1,26 0,79 | 6 3 | 1,06 0,86 | Ø | 0,25 | 3 | 0,26 | NV | 0,70 | 70 |
| 33 | 0,86 1,08 | 3 3 | 0,96 1,16 | Ø | 0,57 | 4 | 0,53 | N | 0,53 | 50 |
| 40 | 1,02 1,09 | 9 5 | 0,69 0,98 | NV SØ | 0,35 | 3 | 0,39 | N | 0,45 | 55 |
| 41 | 0,80 0,81 | 6 3 | 0,67 0,83 | V NØ | 0,54 | 3 | 0,53 | Ø | 0,22 | 30 |
| 42 | 0,74 1,10 | 5 6 | 0,65 0,92 | Ø V | 0,69 | 3 | 0,79 | Ø | 0 | 0 |
| 49 | 0,89 0,73 | 2 3 | 1,11 0,81 | Ø SV | 0,46 | 6 | 0,38 | NØ | 0,58 | 60 |
| Gennem- snit | 0,84 | 4,8 | 0,79 | | 0,44 | 3,7 | 0,43 | | 0,35 | 41 |
| Stan- dard afv. | 0,27 | | 0,22 | | 0,14 | | 0,16 | | 0,21 | 20 |

Naturligt luftskifte før og efter tætning af 9 boliger. Luftskiftet er målt 2 gange før tætningen, idet boligen udvalgte efter den første måling, hvorefter der blev foretaget en kontrolmåling inden arbejdet blev påbegyndt.

Ændringen i luftskiftet er beregnet ud fra middeltallet af de korrigerede luftskifter inden tætningen og det korrigerede luftskifte efter tætningen.