



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



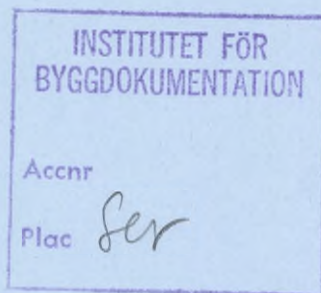
Rapport

R7:1987

Vindtryckfördelningar runt friliggande enfamiljshus

**Jämförelser mellan beräkningar och
försök**

**Kenneth Häggkvist
Roger Taesler**



R
9/11

Byggforskningsrådet

R7:1987

VINDTRYCKFÖRDELNINGAR

RUNT FRILIGGANDE ENFAMILJSHUS

Jämförelser mellan beräkningar och försök

Kenneth Häggkvist
Roger Taesler

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 851092-6
från Statens råd för byggnadsforskning till SMHI,
Norrköping.

REFERAT

Vid SMHI användes programsystemet PHOENICS för numerisk simulering av bl a strömning och tryckfördelning i 3 dimensioner runt olika byggnadskonfigurationer.

Projektets syfte har varit att verifiera PHOENICS-simuleringar av tryckfördelningen runt huskroppar genom jämförelser med motsvarande data enligt vindtunnelförsök, utförda vid SIB. Vid simuleringar har strömningsförhållandena i vindtunneln efterliknats så långt möjligt. Beräkningarna har utförts på "superdatorn" CRAY X-MP 48 i Reading, England, via terminalförbindelse med SMHI.

Resultaten visar god överensstämmelse kvalitativt sett mellan tryckfördelningen enligt numeriska simuleringar och vindtunnelmätningarna. Den kvantitativa överensstämmelsen i c_p -värden är också god. Vissa systematiska skillnader uppträder dock, vilka tyder på att de numeriska simuleringarna ger något kortare recirkulationszoner i lä av byggnaderna än vad fallet är i vindtunneln. Avvikelse i c_p -värdena är större för ett hus i grupp än för ett fritt exponerat. Jämförande beräkningar av luftomsättningen visar skillnader på maximalt ca 20% med c_p -värden enligt PHOENICS respektive vindtunnelmätningar. Denna skillnad är av samma storleksordning som skillnaden i total tryckdifferens mellan lovart- och läsida.

I Bygghörsningsrådets rapportserie redovisar forskaren sitt anslagsprojekt. Publiceringen innebär inte att rådet tagit ställning till åsikter, slutsatser och resultat.

R7:1987

ISBN 91-540-4684-X

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Svenskt Tryck Stockholm 1987

INNEHALLSFÖRTECKNING

Sid

FÖRORD

SAMMANFATTNING

| | | |
|-------|---------------------------------------|----|
| 1. | INLEDNING | 1 |
| 2. | DE NUMERISKA EXPERIMENTEN | 3 |
| 2.1 | <u>Allmänt</u> | 3 |
| 2.2 | <u>Beräkningsgeometri</u> | 4 |
| 2.3 | <u>Rand- och initialvillkor</u> | 7 |
| 2.3.1 | Enskilt hus | 7 |
| 2.3.2 | Hus i grupp | 9 |
| 3. | RESULTAT AV DE NUMERISKA EXPERIMENTEN | 10 |
| 3.1 | <u>Allmänt</u> | 10 |
| 3.2 | <u>Resultat - enskilt hus</u> | 12 |
| 3.3 | <u>Resultat - hus i grupp</u> | 18 |
| 3.4 | <u>Luftomsättningsberäkningar</u> | 24 |
| 4. | DISKUSSION | 27 |
| | REFERENSER | 30 |

FÖRORD

Numeriska modeller har sedan länge använts inom meteorologin för att simulera luftströmning på olika skalor - från den globala cirkulationen till lokala gränsskikt och turbulent spridning av rökplymer. Den teoretiska grunden är densamma för alla numeriska strömningsmodeller, varför det inte är någon principiell skillnad mellan meteorologiska och t ex byggnadsaerodynamiska problem. Begränsningar i den tillgängliga datorkapaciteten har dock tidigare medfört att olika numeriska modeller "skräddarsytt" speciellt för tillämpning på olika strömningstyper. Under de senaste åren har emellertid två viktiga förändringar ägt rum, nämligen utvecklingen av den s k PHOENICS-modellen - en mycket generell ekvationslösare, som kan appliceras på en rad olika strömningsproblem - dels en kraftig ökning av tillgänglig datorkapacitet. Genom medlemskap i det europeiska meteorologiska räknecentret ECMWF har SMHI tillgång till den senaste CRAY-datorn (X-MP 48). Dessa båda faktorer i kombination har gett SMHI unika möjligheter att utföra avancerade numeriska simuleringar av mycket komplexa strömningstyper.

Luftströmningen i och närmast ovanför bebyggelsen är av central betydelse inom byggnadsklimatologin (dvs studiet av växelverkan mellan atmosfären och bebyggelsen). Det är därför av största intresse att söka tillvarata de utvecklingsmöjligheter, som öppnats genom tillgången till PHOENICS-modellen och CRAY-datorn. Denna utveckling är emellertid ännu bara i sin början. Bl a måste erfarenheter erhållas av modellens tillämpningsmöjligheter och begränsningar vid studier av strömning i och över bebyggelse. Verifiering av modellsimuleringar mot mätningar är här av största betydelse. Ett första steg härvid är verifiering mot vind-tunnelmätningar av hög kvalitet och med en detaljeringsgrad, som motsvarar simuleringarna. En direkt verifiering mot fullskaleförhållanden vore givetvis önskvärd, men har hittills inte kunnat ske.

Den i föreliggande rapport redovisade undersökningen har utförts som ett separat projekt inom ramen för det byggnadsklimatologiska FoU-arbetet vid SMHI under ledning av undertecknad. Programmering och datorberäkningar liksom analys av resultaten och författandet av rapporten har utförts av förste statsmeteorolog Kenneth Häggkvist. Av stort värde för projektet har varit fortlöpande kontakter med professor Urban Svensson angående PHOENICS-modellens egenskaper och tolkningen av resultaten.

De fullständiga resultaten från datorkörningarna, dvs värden för varje gridcell av vissa beräknade storheter, finns t v sparade vid SMHI. Detta material står kostnadsfritt till förfogande för tillämpningar inom andra BFR-finansierade projekt. Utskrifter kan på begäran erhållas från SMHI.

Projektet har finansierats med anslag från BFR, proj.nr 851092-6.

Roger Taesler

SAMMANFATTNING

En inledande undersökning har utförts rörande möjligheterna att med en numerisk beräkningsmodell (PHOENICS/SMHI) studera tryckfördelningen på en huskropp. Beräkningsresultaten har jämförts med vindtunnelstudier av tryckförhållanden på ett likartat modellhus. Studien har utförts för ett enskilt hus och för ett hus beläget i en grupp av likadana huskroppar. Två olika anblåsningsriktningar har betraktats, mot långsidan och mot gaveln. Uppmätta vindtunnelförhållanden har reproducerats i möjligaste mån i den numeriska modellen.

Resultaten visar att modellen kvalitativt väl beskriver tryckfältet över både enskilt och i grupp placerat hus. Även kvantitativt beskrivs tryckfältet för enskilt hus bra, både beträffande tryckfördelningen och medeltrycket på olika byggnadsytor. För grupphuset är de kvantitativa avvikelserna relativt de i vindtunnel uppmätta resultaten större, både för tryckfördelningen och för medeltrycket. Avvikelseorna anser vi till största delen bero på den numeriska modellens tendens att "göra" recirkulationszonerna, lävakzonerna, alltför korta.

En beräkning av den naturliga luftomsättning som tryckfält över huskroppar ger upphov till, baserad både på beräknade och uppmätta tryck, har gjorts. Resultaten indikerar att luftomsättningsberäkningarna är tämligen okänsliga för tryckkoefficienterna. En annan möjlig förklaring till de små skillnaderna i beräknad luftomsättning är, att avvikelserna mellan beräknade och uppmätta tryckkoefficientvärden delvis tar ut varandra, så att den totala tryckdifferensen mellan husets lovart- och läsida blir approximativt densamma som vid vindtunnelmätningarna.

Med tanke på problemets svårighetsgrad ur numerisk modellsynpunkt, måste resultaten betraktas som goda. Arbetet har, för denna typ av strömningssituationer, dock påvisat vissa egenskaper hos modellen, som fordrar mer ingående och systematiska undersökningar än vad som varit möjligt i denna begränsade pilotstudie. Vidare har vi inte undersökt tryckförhållandena vid sneda anblåsningsriktningar, vilket hade gett resultaten en större allmängiltighet.

1. INLEDNING

Inom de områden inom aerodynamiken, som behandlar byggnadstekniska problem, används i allmänhet fysiska mätningar på olika skalor, då hypoteser skall prövas och då olika koefficienter skall bestämmas. Teoretiska lösningar, dvs direkta lösningar av strömningsekvationerna, har hittills, utom för vissa idealiserade fall, varit omöjliga att erhålla. Ekvationerna är dock möjliga att lösa med sk numeriska metoder där datorer används som beräkningsverktyg. Stora och snabba datorer erfordras dock för realistiska problemställningar.

De senaste årens utveckling av denna typ av datorer gör det nu möjligt att börja studera om åtminstone inte vissa byggnadsrelaterade strömningssproblem kan behandlas med hjälp av numeriska strömningssmodeller. De modeller som här avses är ur matematisk och numerisk synpunkt mycket komplicerade. Detta beror naturligtvis på att de fysiska processer som modellerna skall beskriva är allt annat än triviala. Vid realistiska problemsimuleringar, där turbulenta transportprocesser är väsentliga, uppstår problemet att parameterisera eller modellera dessa transporter. Inom byggnadsaerodynamiska problem, vilka i regel är tredimensionella med tämligen komplicerade geometrier, torde avancerade turbulensmodeller erfordras för korrekta kvantitativa beskrivningar. För problem av sådan art, att kvalitativa bedömningar är tillräckliga, kan eventuellt enklare modellformuleringar användas.

En användning av en numerisk modell kan tänkas vara bestämning av vindtryck på byggnader och på grupper av byggnader. Vindtryckets fördelning över husets väggar används bland annat för att bestämma energiförluster via luftläckage. Denna tänkta applikation diskuteras något i denna rapport.

I rapporten redovisas numeriska experiment, som har utförts beträffande luftströmning och tryckfördelning kring en huskropp. Syftet med experimenten har primärt varit att undersöka i vilken grad som en numerisk strömningssmodell, med en relativt avancerad modellering av de turbulenta transportprocesserna, kan reproducera de tryckfält omkring en huskropp, som uppmätts vid vindtunnelförsök.

Den använda numeriska strömningssmodellen är en kommersiell produkt, framtagen av ett engelskt utvecklingsföretag, CHAM Ltd. Modellen, som benämnes PHOENICS-modellen, är en avancerad ekvationslösare för mycket generella strömningstekniska problem, se Spalding (1981). PHOENICS används numera av ett flertal svenska industrier och högskoleinstitutioner förutom SMHI. Mestadels har modellen hittills främst använts inom internströmningssproblem. Inom SMHI används PHOENICS-modellen för strömningssberäkningar i naturen, exempelvis inom oceano-grafin, se Svensson (1985), och på lokal meteorologisk skala, Bringfelt (1984). Vissa tillämpningar inom byggnadsklimatologin redovisas i Taesler & Andersson (1984) och Häggkvist et al (1985).

Tidigare brist på ändamålsenliga mätdata har gjort att någon mera ingående, kvantitativ test av PHOENICS-modellens lämplighet för just byggnadstillämpningar hittills inte utförts. Genom de vindtunnelmätningar som utförts vid SIB's Vindtunnellaboratorium har sådana tester nu blivit möjliga. Tryckfördelningen på en huskropp, ensamliggande och omgiven av andra likadana hus i olika konfigurationer, har undersökts i vindtunnel för olika anblåsningsriktningar, se Wirén (1985).

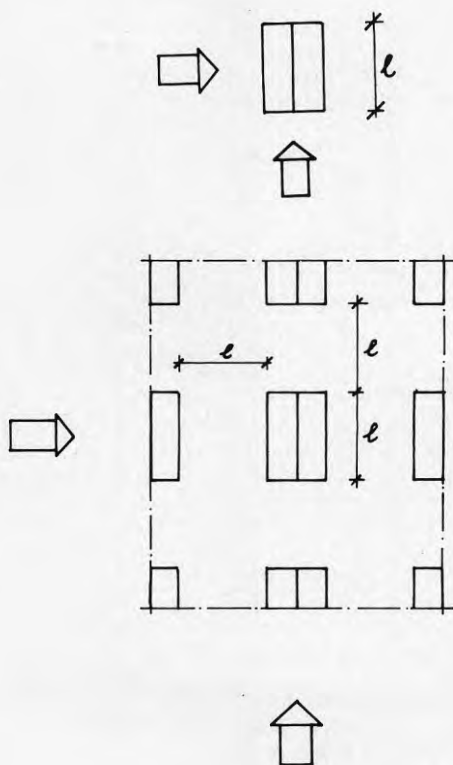
I denna rapports resultatredovisning diskuteras ej enbart direkta jämförelser mellan numeriskt beräknade och i vindtunnel uppmätta resultat. Luftomsättningsberäkningar för givna yttre och inre förhållanden har också gjorts med beräknade och uppmätta resultat som underlag. Detta ger oss en möjlighet att bedöma de kvalitetskrav, som vi måste ställa på just den typ av beräkningar, och för de fall, som redovisas i denna rapport.

2. DE NUMERISKA EXPERIMENTEN

2.1 Allmänt

I de numeriska experimenten har vindtunnelförsöken i möjligaste mån efterliknats. Måtten på det hus som har undersökts hade samma mått som det hus som studerades i vindtunneln. Detsamma gäller, så långt det var möjligt, för den vertikala fördelningen av vindhastighet och vindens turbulenta egenskaper.

Fyra olika fall har studerats. Dels ett ensamliggande hus, dels ett hus som var omgivet av likadana hus, Två olika vindriktningar har applicerats på dessa fall, strömning mot husets långsida och mot gavelsidan, se principfiguren nedan.



FIGUR 2.1 Principskisser över de studerade byggnadskonfigurationerna.

De studerade fallen har betraktats som stationära och ett iterativt beräkningsförfarande har använts för att erhålla konvergenta lösningar. Närmare beskrivning av initial- och randvillkor ges nedan i avsnitt 2.3.

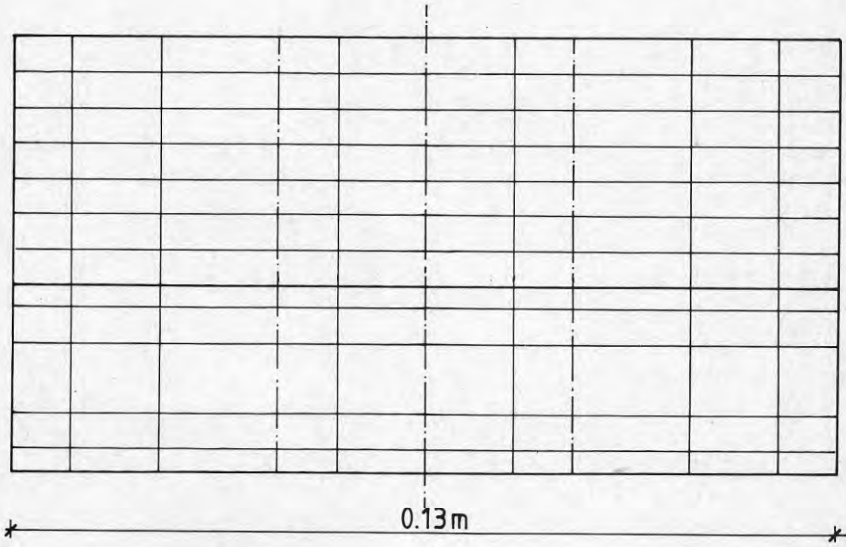
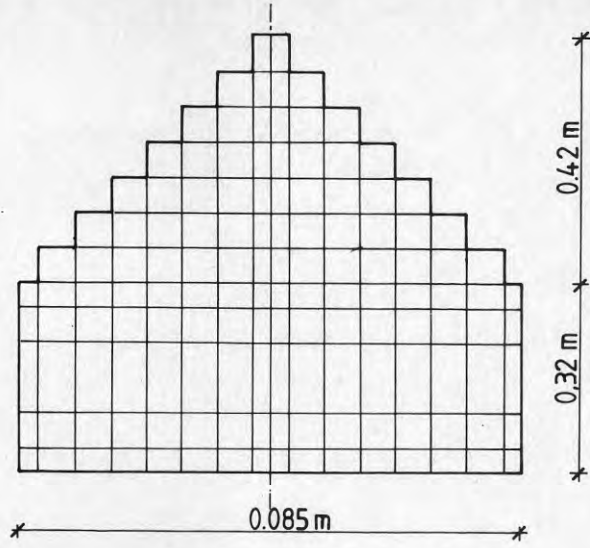
2.2 Beräkningsgeometri

I figur 2.2 visas hur det "numeriska" huset har utformats. Huset är en modell av ett $1\frac{1}{2}$ -plans hus, en i Sverige vanligt förekommande familjehustyp.

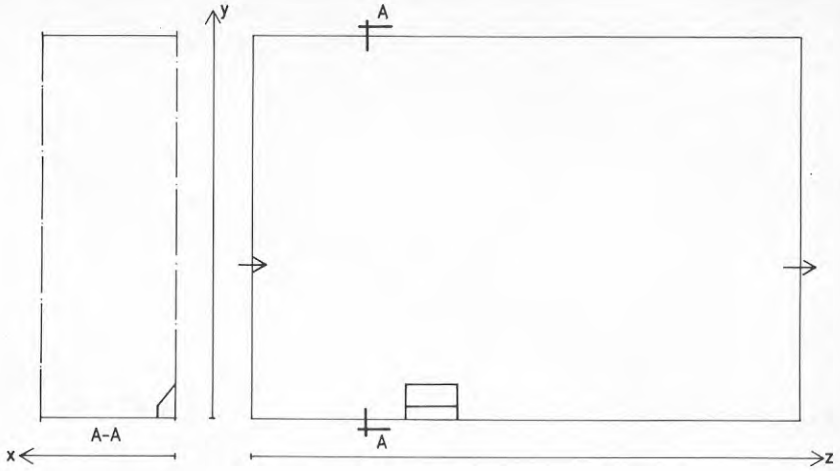
Det rätvinkliga beräkningsnät, som har använts, medför att taket blir trappstegsformat. Detta påverkar troligen strömningsbilden över taket något, speciellt vid långsidoanblåst hus. Eftersom huset i sig självt utgör den dominerande störningen i strömningsfältet, ansågs dock den valda takupplösningen tillräcklig. Höjden på beräkningsområdet var i alla beräkningsfallen ungefär 14 hushöjder. Beräkningsområdets utsträckning i strömningsriktningen valdes på olika sätt för de olika huvudfallen, enskilt hus respektive hus i grupp. För de beräkningar som rörde ensamliggande hus var det viktigt att in- och utströmsränderna kom så långt från huset så att de ej påverkades av eventuella recirkulationseffekter. Uppströmssträckan var ungefär fem hushöjder och nedströmssträckan var ungefär 12 hushöjder. I figur 2.3 visas hur beräkningsområdet, med inlagt huskropp, såg ut för enskilt, gavelanblåst hus. Beräkningsområdet vid långsidoanströmmat, enskilt hus var tämligen lika det som visas i figur 2.3.

Vad gäller studierna av hus beläget i grupp, finns två olika sätt att geometriskt specificera problemen. En direkt metod är att i beräkningsområdet "lägga" in så många hus som man avser att studera. Detta förfarande medför en kraftig ökning av antalet beräkningspunkter, relativt enskilt hus, om en god upplösning av varje enskilt hus i gruppen önskas. Den metod som här har använts, baseras på att höjden av det gränsskikt som skapas av ett stort antal hus, går mot ett approximativt konstant värde. Vi studerade då *ett* av de hus som var beläget i gruppen och simulerade detta med s_k periodiska randvillkor på in- och utströmsränder. Ett iterationsförfarande, där för varje ny iteration de "gamla" utströmsvillkoren användes som inströmsvillkor, gav då en framåtstegning hus för hus. Beräkningsområdet begränsades i dessa fall av halva avståndet till framför, bakom och vid sidorna liggande hus. Detta illustreras i figur 2.4 för gavelanströmmat hus.

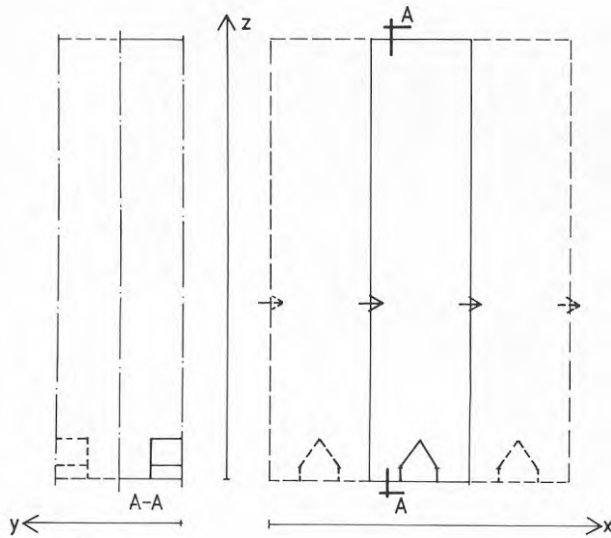
Antalet beräkningspunkter i de olika fallen varierade mellan 4160 och 7040. Beräkningarna har utförts på ECMWF's (= European Centre for Medium Range Weather Forecasts, Reading, England) CRAY X-MP 48, som används för väderprognosberäkningar, och som SMHI har tillgång till via terminal. Viss efterbearbetning samt grafisk visualisering av strömningen har utförts på SMHIs egen dator.



FIGUR 2.2 Utformning av det numeriska huset.



FIGUR 2.3 Principskiss över beräkningsområdet vid gavelanbläst, enskilt hus. Figuren är skalenlig relativt huset.



FIGUR 2.4 Principskiss över beräkningsområdet vid långsidoanbläst hus i grupp. Figuren är skalenlig relativt huset.

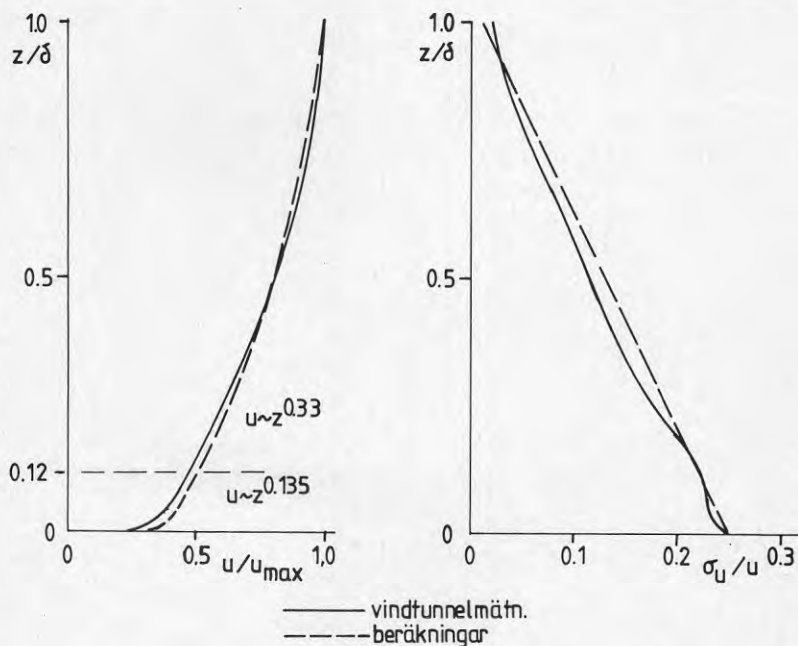
2.3 Rand- och initialvillkor

2.3.1 Enskilt hus

Eftersom detta problem behandlades stationärt med ett iterativt beräkningsförfarande, styrdes problemet av randvillkoren. Fördelen med att ansätta goda initialvärden är att beräkningstiden, antalet iterationer, fram till en konvergent lösning blir mindre än om initialvärden ansätts godtyckligt. I detta problem startades dock med homogena initialfält för alla beräknade variabler.

Problemets undre rand, golvet i den numeriska vindtunneln, behandlades som en hydrodynamiskt glatt yta. Utströmsranden behandlades så att inga impulser kunde fortplanta sig därifrån i uppströmsriktningen. Övre randen och sidoränder behandlades som symmetriplan, det vill säga att inga flöden tilläts över dessa ytor. På inströmsranden ansattes massinflöde och profiler av hastighet, turbulent kinetisk energi och den turbulenta kinetiska energins dissipation.

Som tidigare nämnts har vi i möjligaste mån reproducerat ett vindtunnel-experiment, Wirén (1985). I figur 2.5 nedan visas den ostörda hastighets- och turbulensintensitetsprofil som uppmättes i vindtunnelexperimenten. I figuren har också lagts in motsvarande profiler som ansattes som randvillkor på inströmsranden i de numeriska experimenten för det enskilda huset.



FIGUR 2.5 Vertikal fördelning av horisontell hastighet och turbulensintensitet. Helderagna kurvor är från ett vindtunnelexperiment, Wirén (1985). Streckade kurvor motsvarar de fördelningar, som använts i dessa numeriska simuleringar. Förklaring av figurbeteckningar ges i texten nedan.

Den i vindtunnelförsöken uppmätta hastighetsprofilen innehöll en brytpunkt på höjden 0.12 m över golvet. Den horisontella ostörda hastigheten i modelltaknivå var 12 m/s. Ovanför brytpunkten var koefficienten i en s k "power law" profilanpassning 0.33 och under brytpunkten var koefficienten 0.135. Då fås:

$$u(z) = u_{\infty} (z/\delta)^{0.33} \quad \text{för } 0.12 \lesssim z \leq \delta$$

$$u(z) = u_{0.12} (z/0.12)^{0.135} \quad \text{för } z \lesssim 0.12$$
(1)

$u(0.074) = 12$ m/s (hastigheten i taktoppnivå)

$\delta \approx 1$ m (höjden på vindtunnelgränsskiktet)

$z =$ avståndet från vindtunnelgolvet

Utnyttjas informationen ovan fås vidare,

$$u_{\infty} = 25.79 \text{ m/s} \quad (\text{friströmshastigheten})$$

$$u_{0.12} = 12.81 \text{ m/s} \quad (\text{hastigheten i brytpunktsnivå})$$
(2)

Formlerna i (1), med värden enligt (2), har använts för att specificera den vertikala fördelningen av den horisontella hastigheten på inströmsranden.

En approximation av den uppmätta turbulensintensitetsfördelningen, se figur 2.5, ges av ekvationen,

$$\bar{\sigma}_u / \bar{u}(z) = 0.247 - 0.235 \cdot z/\delta$$
(3)

Turbulenta kinetiska energin, k , ges av uttrycket,

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$$
(4)

u' , v' och w' är turbulenta hastighetsfluktuationer i x -, y - och z -riktningen. Överstrykningen innebär medelvärdesbildning.

$$\overline{u'^2} = \bar{\sigma}_u^2; \quad \overline{v'^2} = \bar{\sigma}_v^2; \quad \overline{w'^2} = \bar{\sigma}_w^2$$

Om isotropi råder är $\overline{u'^2} = \overline{v'^2} = \overline{w'^2}$ och

$$\overline{u'^2} = \overline{v'^2} = \overline{w'^2} = \frac{2}{3} k$$
(5)

Om isotropi ej råder måste (5) korrigeras. Zeman & Tennekes (1975) redovisar ett flertal mätningar. Ur dessa fås efter medelvärdesbildning,

$$\overline{u'^2} \approx 1.08 \cdot k \quad (6)$$

Vi får då följande uttryck för den vertikala fördelningen av den turbulenta kinetiska energin på inströmsranden.

$$k(z) = \frac{\overline{\sigma_u^2}}{1.08} = [(0.247 - 0.235 \cdot z/\delta) \cdot \overline{u}(z)]^2 / 1.08 \quad (7)$$

Dissipationen av den turbulenta kinetiska energin, ε , skrivs,

$$\varepsilon = c_D \cdot \frac{k^{3/2}}{L} \quad (8)$$

c_D är en koefficient och L är en längdskala. Båda återfinns i k - ε turbulensmodellen som här har använts, se Rodi (1980). Vi har överfört L till en s "mixing length"-skala, $l \sim z$, och får efter viss manipulation dissipationsfördelningen på inloppsranden,

$$\varepsilon(z) = 0.41 \cdot k(z)^{3/2} / z \quad (9)$$

där $k(z)$ ges av ekvation (7).

2.3.2 Hus i grupp

Som initialfält valdes här de fördelningar som beskrivs av ekvationerna (1), (2), (7) och (9). Eftersom vi här utnyttjade periodiska randvillkor, där inströmsrandvillkoren genereras av utströmsrandvillkoren vid varje iteration, fixerades hastighet, turbulent kinetisk energi och dess dissipation vid övre randytan. Sidoränderna och undre randytan valdes som tidigare till symmetriplan respektive en hydrodynamisk glatt yta.

Metoden, att så att säga hus för hus räkna oss in i en husgrupp istället för att betrakta en hel grupp samtidigt, innebär att vindtunnelsituation ej reproduceras helt korrekt. Metodiken har fördelen att medge en hög upplösning i gridnätet närmast den enstaka huskroppen, vilket ger en bättre strömningsbild än vi skulle få om vi fördelade samma antal gridpunkter på ett antal hus. De avvikelser mellan vindtunnel- och PHOENICS-simuleringarna, som framgår i det följande för detta fall, kan delvis bero på valet av denna intressanta cykliska procedur. Det har dock inte varit möjligt att undersöka betydelsen härav inom ramen för projektet.

3. RESULTAT AV DE NUMERISKA EXPERIMENTEN

3.1 Allmänt

De numeriska beräkningarnas utdata omfattade tredimensionella hastighets-, tryck-, turbulent kinetisk energi- och energidissipationsfält. Den utdatafil som programmet genererar kan sedan enkelt användas som indata till ett plottningsprogram, som i sin tur skapar underlag för visualisering av de olika fälten. Plottningsprogrammet, GRAFFIC, är ett biprogram till PHOENICS. Ett exempel på visualiserade hastighets- och tryckfält ges i figur 3.1, för långsidoanströmmat grupphus. De vertikala hastighets- och trycksektionerna (b och c), är tagna nära mitten av huskroppen, d v s nära $y=0$ i figur 2.4. Det horisontella hastighets-snittet (a), är ungefärligen taget på takfotshöjden. Plottarna i figur 3.1 illustrerar den information som enkelt kan fås ur beräkningsprogrammet för hela beräkningsdomänen. (Höjd- och längdskalor i figurerna har valts för att nå god upplösning i hela beräkningsdomänen. Husets form blir härigenom starkt deformerad. Andra skalor kan dock väljas, som ger en korrekt geometri åt huset.) Eftersom vindtunnelmätningarna utgörs av tryckmätningar på husets ytor, koncentrerar vi oss i den följande jämförelsen till de beräkningspunkter, som ligger närmast det numeriska husets olika ytor.

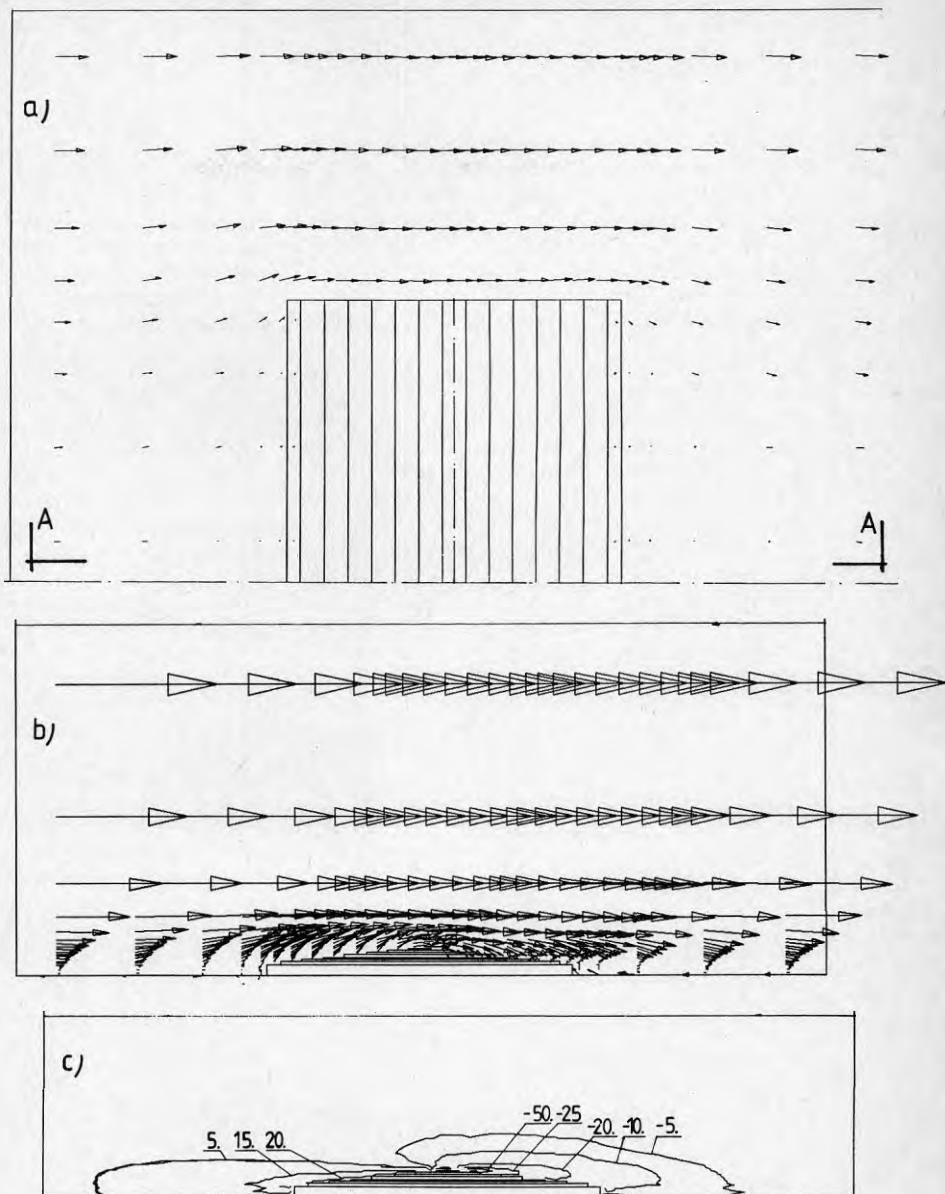
Ur de beräknade tryckfälten har då tryckkoefficienter (c_p) beräknats för de ovan nämnda beräkningspunkterna. Tryckkoefficienterna definieras enligt följande uttryck.

$$c_p = (p(x, y, z) - p_{ref}) / \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u_{ref}^2 \right) \quad (10)$$

| | |
|--------------|---|
| $p(x, y, z)$ | = tryck i punkten (x, y, z) (N/m^2) |
| p_{ref} | = referenstryck (N/m^2) |
| u_{ref} | = referenshastighet (m/s) |
| ρ | = luftens densitet (kg/m^3) |

Som referenstryck har vi använt trycket mitt över huset i beräkningsområdets översta beräkningspunkt, motsvarande referenstrycket i vindtunnelförsöken. Referenshastigheten är här hastigheten på max. takhöjdsnivå vid ostörda förhållanden, alltså den horisontella hastighet som ges av inströmsprofilen vid taknocksnivå.

Resultaten presenteras nedan, för de olika fallen i form av en tryckfördelningskarta över byggnadsytorna. Vidare har en jämförelse av tryckfördelningen i vissa sektioner och nivåer, gjorts med resultat från vindtunnelförsöken. Formfaktormedelvärden för varje byggnadsyta presenteras i tabellerna 3.1, 3.2, 3.3 och 3.4. Dessa medelvärden har använts för bestämning av luftomsättningen vid olika anblåsningsriktning och -hastighet samt vid olika temperaturskillnad ute-inne. Motsvarande s k luftomsättningsmatriser har också beräknats utifrån vindtunnelförsökens resultat i några fall. En jämförelse mellan numeriskt beräknade och i vindtunneln uppmätta tryckkoefficienter, och de luftomsättningsmatriser som genereras av de olika koefficienterna, ger en uppfattning om den noggrannhet som är nödvändig då tryckförhållandena kartläggs.



FIGUR 3.1 Exempel på grafisk representation av de numeriska resultaten. Observera att bilderna är uttänjda i strömningsriktningen.

- a) Hastighetsvektorer i ett horisontalplan vid långsidoanblåst hus i grupp. Nivån motsvarar ungefär husets höjd vid takfoten.
- b) Hastighetsvektorer i ett vertikalsektion nära mitten av det långsidoanblåsta huset i grupp, se sektion A-A i a).
- c) Tryckfält (p) i vertikalsektionen A-A för samma fall som tidigare.

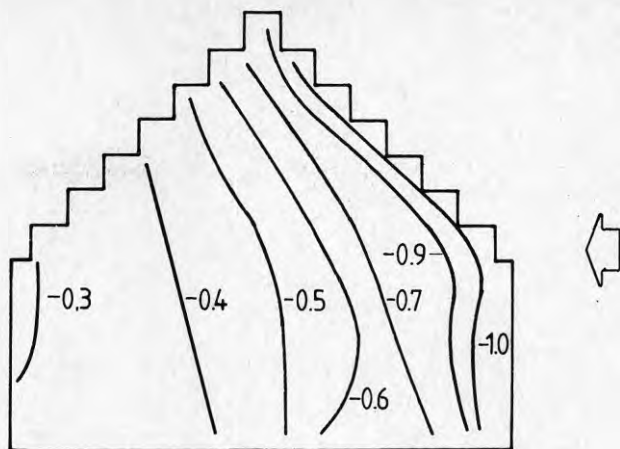
3.2 Resultat - enskilt hus

I figurerna 3.2 och 3.3 visas tryckfördelningen på husets olika byggnadsytor vid anblåsning från långsida respektive gavel. Tryckfördelningarna uppvisar följande karakteristika.

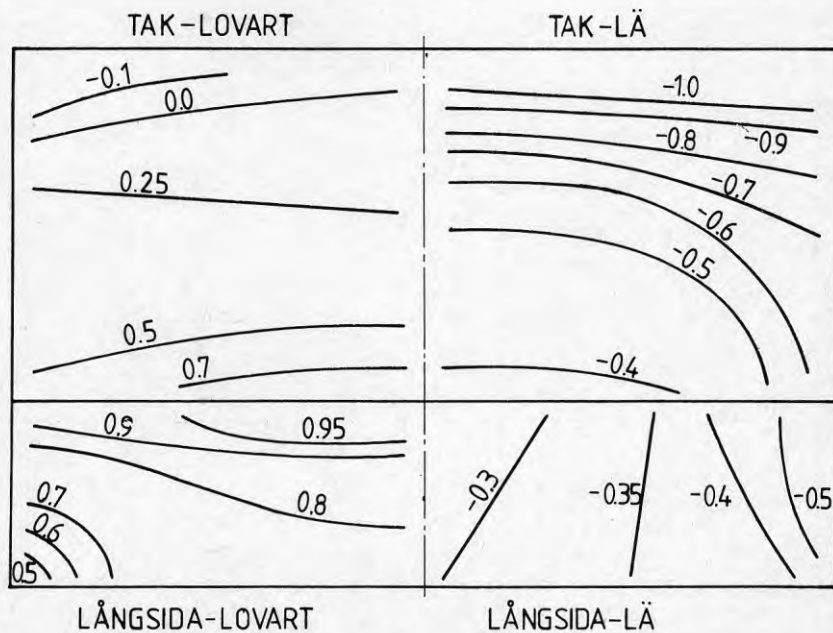
Allmänt gäller för långsidoanblåst hus, figur 3.2, att ett tryckmaximum återfinns på den vindexponerade framsidan och taket. På gaveln ses ett tryckminimum (max. undertryck) i framkanten. Trycket ökar mot bakkanten av gaveln på ett likformigt sätt över hela gavelytans höjd. På takets läsida är trycket minst (d v s kraftigaste undertryck) just bakom takåsen. Här minskar undertrycket ner mot takfoten mest i husets centrumsektion och minst i närheten av gavlarna. På lä väggparti är undertrycket störst ute vid gavlarna och de vertikala tryckskillnaderna är här små.

För det andra anblåsningsslaget, vind mot gavel, ses i figur 3.3 ett tryckmaximum relativt högt uppe på lovartgaveln. Vi ser också att tryckfördelningen lokalt omkring lovartgavelns vertikala symmetrilinje, tenderar att anta en hjärtform. På långsidorna och taket finns tryckminima nära lovartgaveln. Trycket stiger snabbt i vindriktningen närmast bakom framkanten. Från husets mitt till lågaveln är sedan trycket relativt konstant. På lå gavel ses ett tryckminimum just bakom kanten till taket och långsidorna. Trycket ökar här måttligt diagonalt in mot mitten av gavelytan.

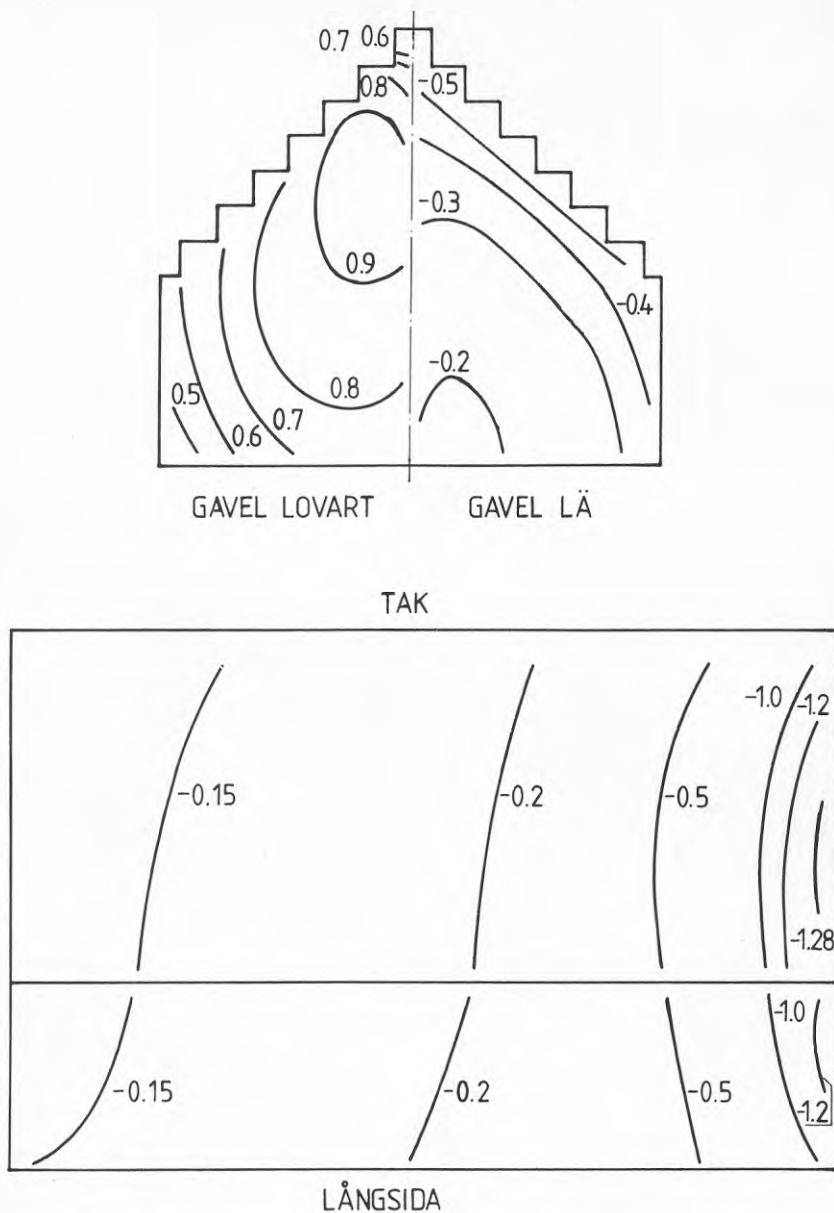
En direkt jämförelse mellan beräknade och i vindtunneln uppmätta tryckfördelningar kan göras i figurerna 3.4 och 3.5. Här visas den horisontella tryckfördelningen i tre olika nivåer och i tre vertikalsektioner över huskroppen. Ur figurerna framgår att beräknade och mätta tryckfördelningar kvalitativt visar stora likheter. Ett undantag är dock tryckfördelningen över lä takyta vid långsidoanblåst hus, se figur 3.4a, projektionen A-A. Beräkningen ger ett största undertryck bakom takåsen och en minskning av undertrycket ner mot lä takfot. Det omvända gäller för den uppmätta tryckfördelningen, figur 3.4.b; A-A. Kvantitativt gäller att de beräknade trycken är högre än de mätta, undantaget är också här lä takhalva vid långsidoanblåst hus. En tydligare redovisning av detta ges i tabellerna 3.1 och 3.2, där medeltryckkoefficienter för byggnadsytorna redovisas. De totala tryckskillnaderna över huset (lovart-läsida), skiljer sig mindre än tryckkoefficientvärdena för respektive yta. Detta kan delvis förklara, att den resulterande luftomsättningen på grund av självdrag blir nära nog densamma med c_p -värden enligt vindtunnel respektive simuleringar, se vidare avsnitt 3.3.



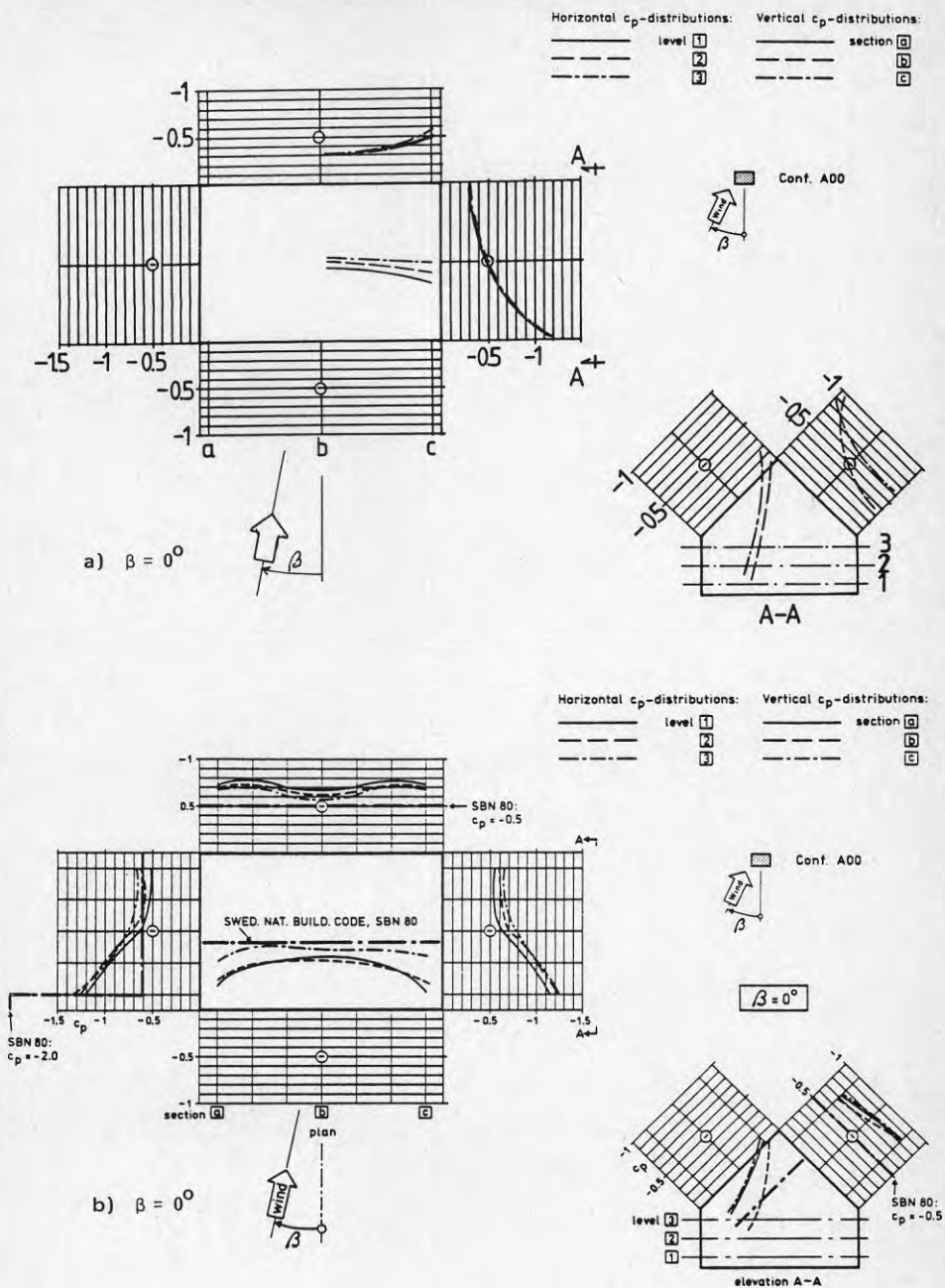
GAVEL



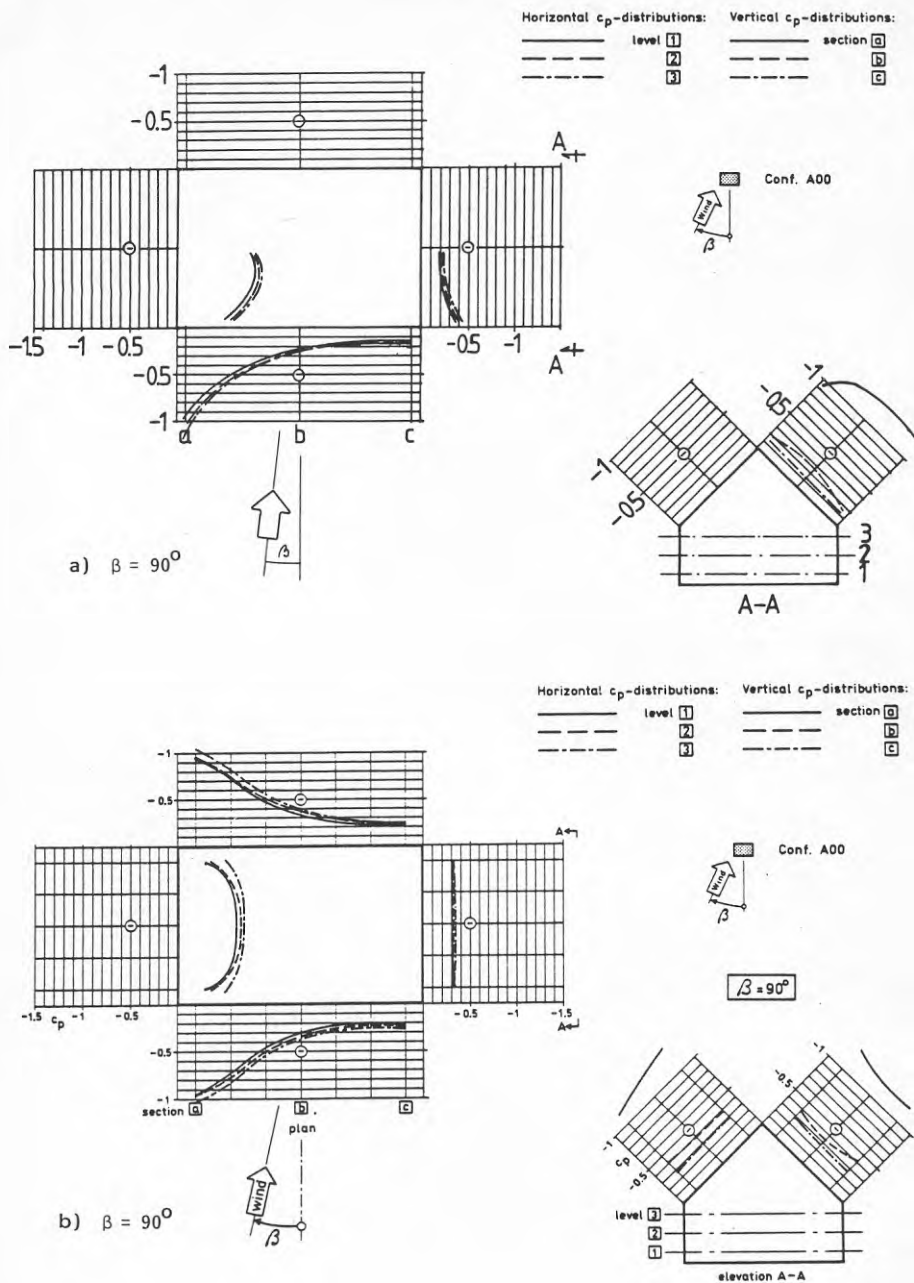
FIGUR 3.2 Tryckkoefficientfördelning (c_p) på väggarna på ett långsidoanströmmat enskilt hus. Beräkning med numerisk modell. (Obs. c_p -fälten över respektive lä- och lovartyta är symmetriska omkring den punkt-streckade mittlinjen i nedre delfiguren).



FIGUR 3.3 Tryckkoefficientfördelning (c_p) på väggarna på ett gavelanströmmat enskilt hus. Beräknat med numerisk modell. (Obs. symmetriförhållanden i övre delfiguren).



FIGUR 3.4 Beräknat a) och i vindtunnel uppmätt b), tryckkoefficientfördelning i olika nivåer och sektioner för långsidoanströmt enskilt hus. (Obs. symmetrin i a)).



FIGUR 3.5 Beräknat a) och i vindtunnel uppmätt b), tryckkoefficientfördelning i olika nivåer och sektioner för gavelanströmat enskilt hus. (Obs. symmetrin i a)).

TABELL 3.1. Medelformfaktorer för olika byggnadsytor vid anblåsning mot långsida på enskilt hus. Numerisk beräkning och vindtunnelmätning.

| Långsido- anblåsning | F o r m f a k t o r e r | | | | |
|--------------------------|-------------------------|---------|-------|------------|-----------|
| | Framsida | Baksida | Gavel | Tak (fram) | Tak (bak) |
| Numerisk beräkning | 0.8 | -0.36 | -0.6 | 0.32 | -0.86 |
| Vindtunnel- mätningar | 0.5 | -0.7 | -0.9 | 0.26 | -0.78 |

TABELL 3.2. Medelformfaktorer för olika byggnadsytor vid anblåsning mot gavel på enskilt hus. Numerisk beräkning och vindtunnelmätning.

| Gavel- anblåsning | F o r m f a k t o r e r | | | |
|--------------------------|-------------------------|----------|-------|-------|
| | Framgavel | Bakgavel | Sida | Tak |
| Numerisk beräkning | 0.82 | -0.34 | -0.34 | -0.49 |
| Vindtunnel- mätningar | 0.62 | -0.34 | -0.48 | -0.57 |

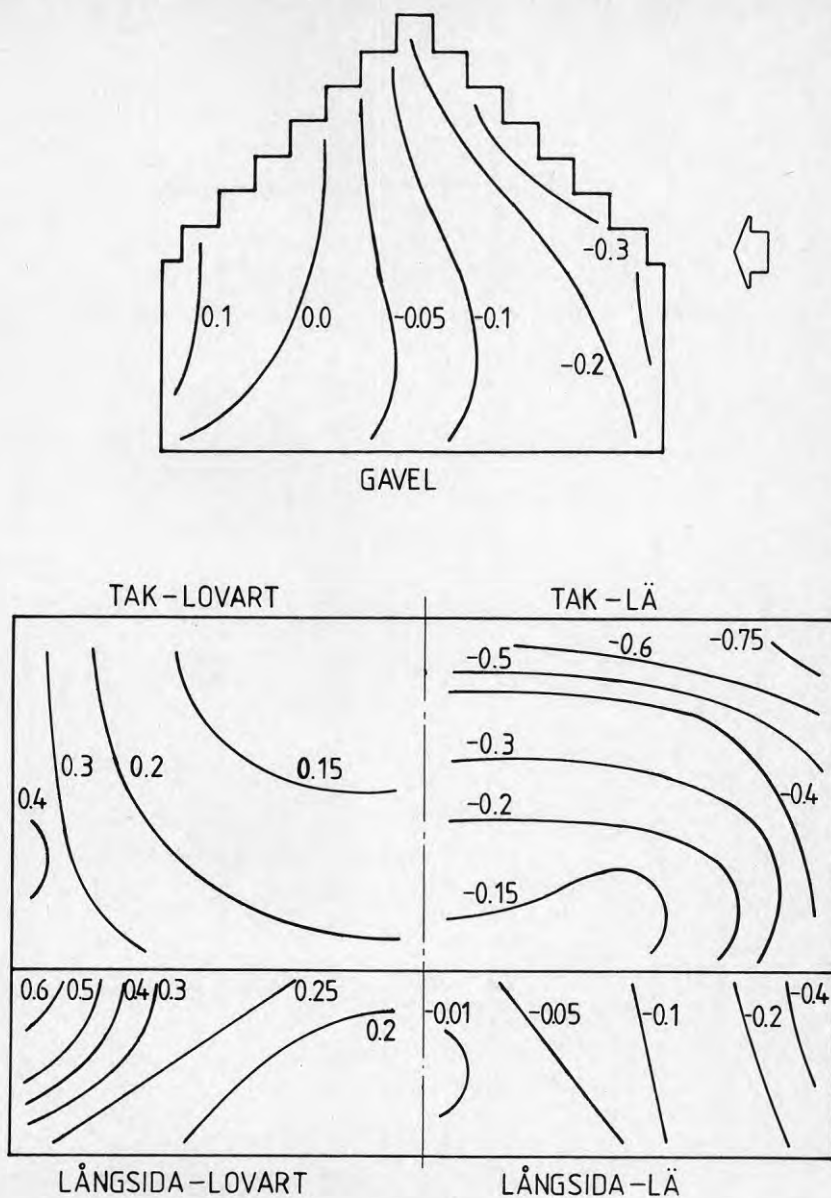
3.3 Resultat – hus i grupp

De beräknade tryckfördelningarna visas i figur 3.6, för ett långsidoanströmmat hus beläget i en grupp av andra hus. På gavlarna är trycket minst i framkanten, för att öka mot bakkanterna. På lå takyta ses det största undertrycket just bakom takåsen, något förskjutet mot gavlarna. På lå långsida finns det största undertrycket vid gavlarna och det minsta undertrycket är här i mitten av långsidan. Tryckskillnaderna i vertikalled är små på lå långsida. De exponerade ytorna, lovart och takyta, har tryckmaximum längst ute vid kanterna mot gavlarna. Det motsatta förhållandet råder vid fallet enskilt långsidoanblåst hus. Detta indikerar att grupphusets front är påverkat av den lävak som skapas av det uppströms belägna huset i gruppen.

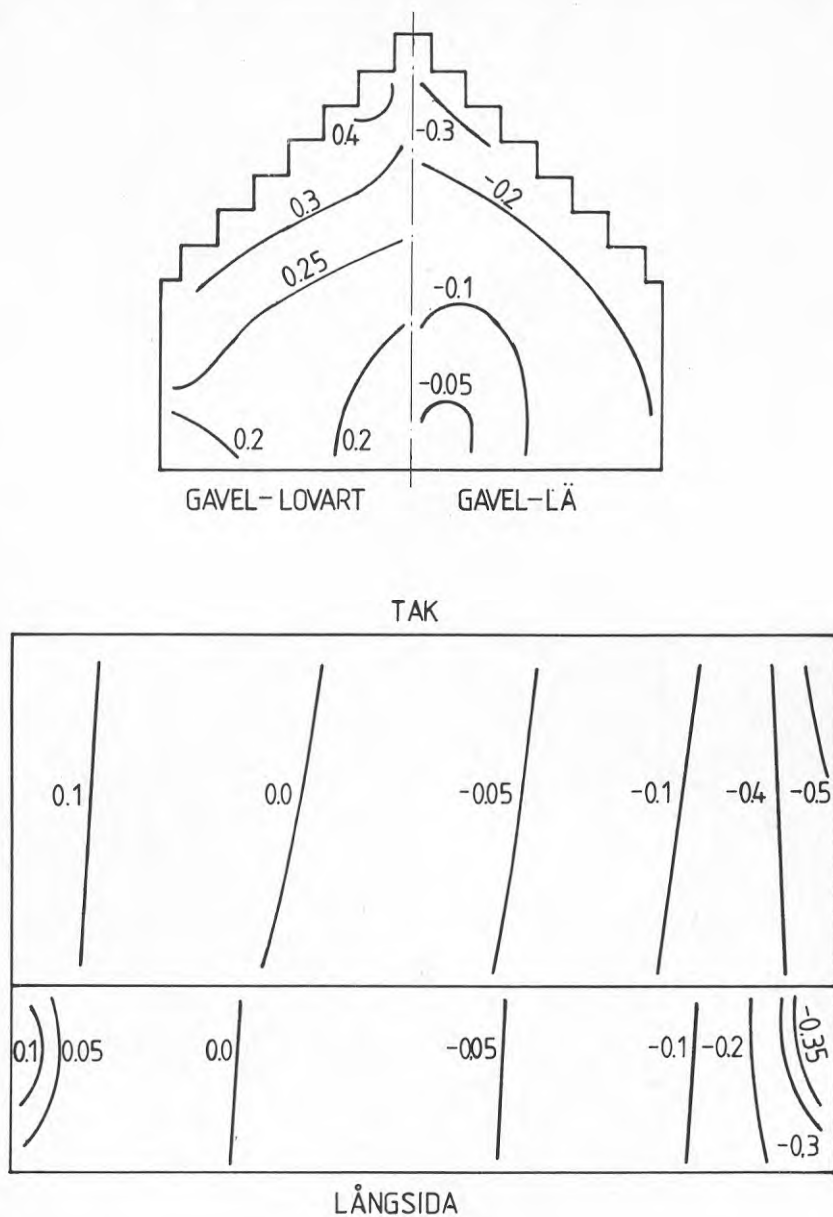
I figur 3.7, som analogt visar tryckfördelningen på ett gavelanströmmat hus i grupp, ser vi också kvalitativa likheter med det enskilda husfallet, vad gäller lå gavel, tak och långsidor. På lågaveln är trycket minst ute vid kanterna mot tak och långsidorna. In mot gavelytans centrum ökar trycket. På tak och långsidor har vi ett tryckminimum vid framkanten. Trycket ökar i strömningsriktningen för att på husets bakre del bli positivt. På den främre, anblåsta gavelytan ses att trycket är minst i mitten av ytan, för att öka ut mot kanterna. Också detta torde vara en lävaks-effekt, liksom i fallet med det långsidoanblåsta grupphuset.

I figurerna 3.8 och 3.9 kan vi jämföra beräknade och uppmätta tryckfördelningar i vissa nivåer och sektioner för grupphus-fallen. Kvalitativt är överensstämmelsen mellan beräknade och uppmätta fördelningar relativt god, utom vad gäller lå takhalva vid långsidoanblåst grupphus. De kvantitativa skillnaderna mellan de beräknade och mätta tryckfördelningarna är här större än i fallen med enskilt hus, speciellt vid anblåsning mot långsidan, figur 3.8.

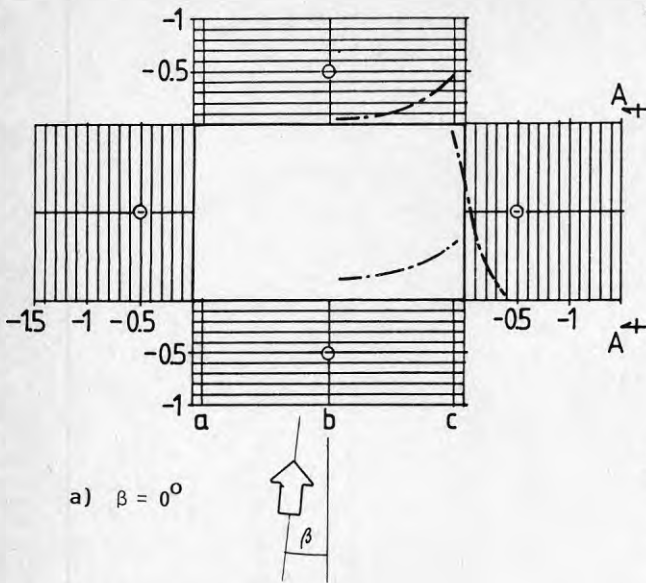
Vi har också för grupphus-fallen bestämt medelvärden för de olika byggnadsytornas tryckkoefficienter (formfaktorer). Dessa redovisas och jämförs med de från vindtunnelmätningarna bestämda medelformfaktorena i tabell 3.3 och 3.4. Karaktäristiskt är att de formfaktorer, med något undantag, som baseras på numeriskt beräknade resultat, är högre, än de uppmätta. Denna iakttagelse gjordes också för de enskilda husen, men i de här visade fallen är tendensen mer markant.



FIGUR 3.6 Tryckkoefficientfördelning (c_p) på väggarna på ett långsidoanströmat hus i grupp. Beräkning med numerisk modell.

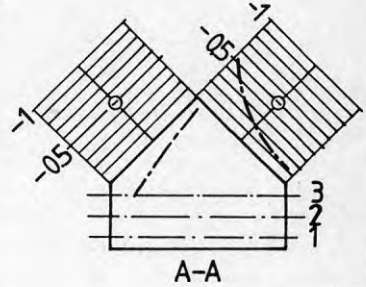


FIGUR 3.7 Tryckkoefficientfördelning (c_p) på väggarna på ett gavelanströmat hus i grupp. Beräkning med numerisk modell.

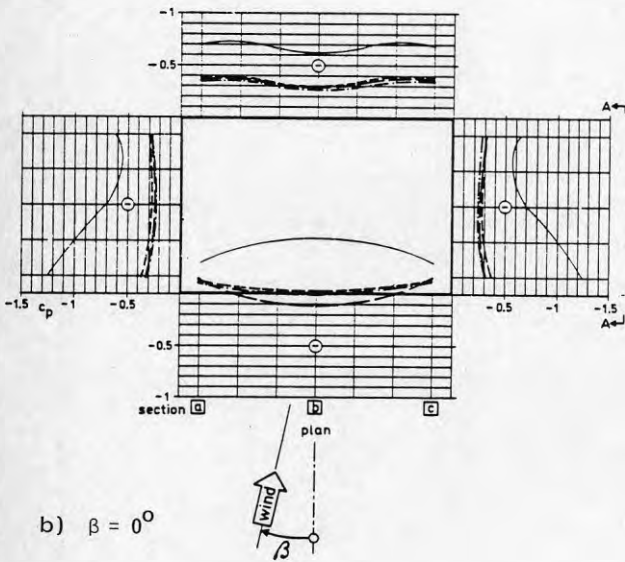


c_p -distributions, level 2 and section b

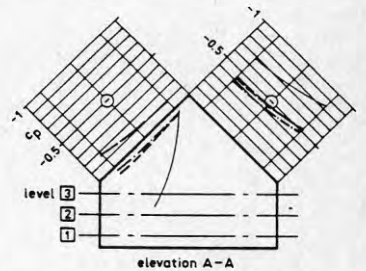
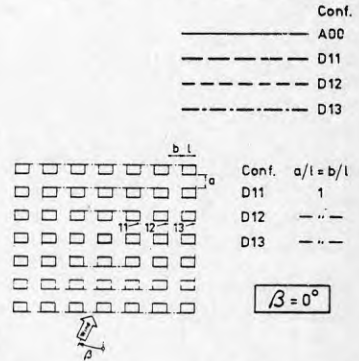
MOTSVARAR NÄRMAST
CONF D13 NEDAN



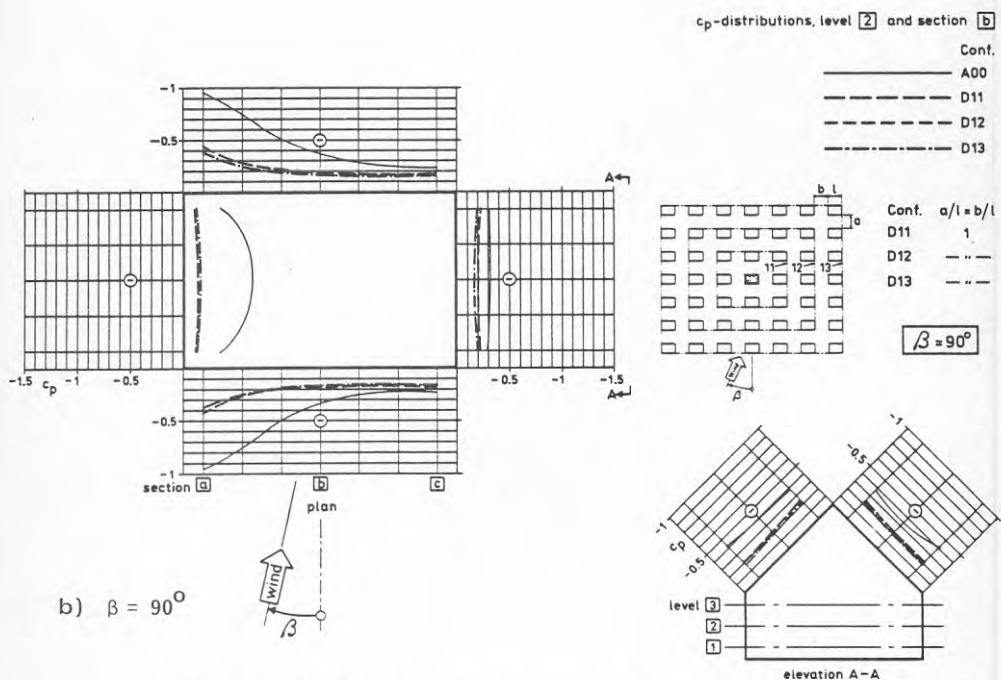
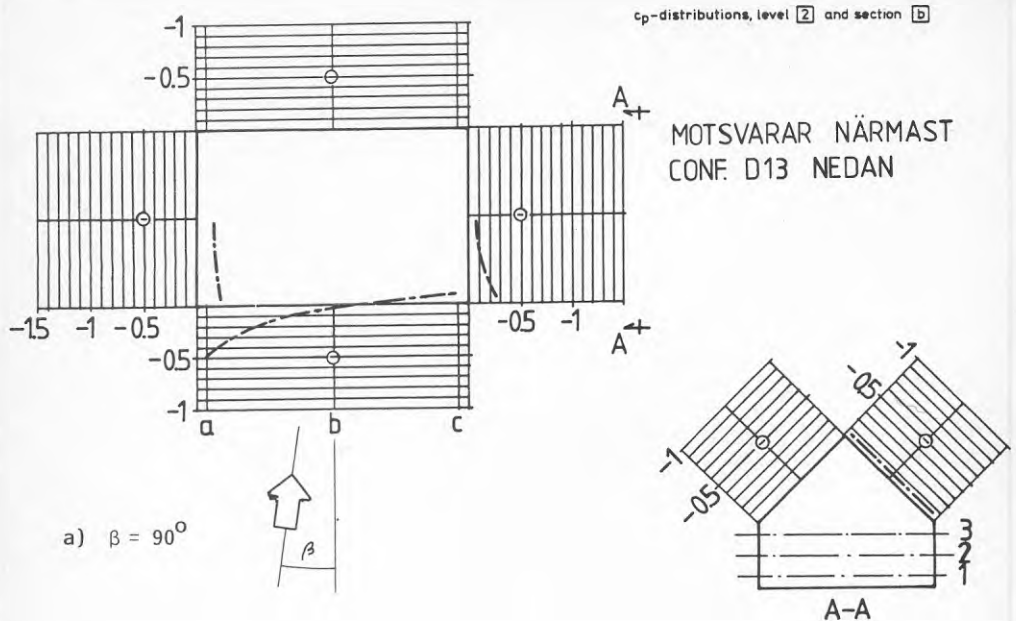
c_p -distributions, level 2 and section b



c_p -distributions, level 2 and section b



FIGUR 3.8 Beräknat a) och i vindtunnel uppmätt b), tryckfördelning i en nivå och en sektion för långsidoanströmt hus i grupp. (Obs. symmetrin i a)).



FIGUR 3.9 Beräknat a) och i vindtunnel uppmätt b), tryckfördelning i en nivå och en sektion för gavelanströmat hus i grupp. (Obs. symmetrin i a)).

TABELL 3.3. Medelformfaktorer för olika byggnadsytor vid anblåsning mot långsida på hus i grupp. Numerisk beräkning och vindtunnelmätning.

| Långsido- anblåsning | F o r m f a k t o r e r | | | | |
|--------------------------|-------------------------|---------|-------|------------|-----------|
| | Framsida | Baksida | Gavel | Tak (fram) | Tak (bak) |
| Numerisk beräkning | 0.33 | -0.12 | -0.09 | 0.32 | -0.42 |
| Vindtunnel- mätningar | 0.06 | -0.32 | -0.3 | 0.06 | -0.42 |

TABELL 3.4. Medelformfaktorer för olika byggnadsytor vid anblåsning mot gavel på hus i grupp. Numerisk beräkning och vindtunnelmätning.

| Gavel- anblåsning | F o r m f a k t o r e r | | | |
|--------------------------|-------------------------|----------|-------|-------|
| | Framgavel | Bakgavel | Sida | Tak |
| Numerisk beräkning | 0.26 | -0.16 | -0.06 | -0.08 |
| Vindtunnel- mätningar | 0.17 | -0,18 | -0.2 | -0.22 |

3.4 Luftomsättningsberäkningar

En numerisk strömningsmodell, liknande den som använts i detta arbete, har en potentiell användning för bestämning av tryckkoefficienter (formfaktorer), i studier av energiförbrukning i byggnader. Vind- och tryckfält bestäms, som i detta arbete, men för de vidare energiberäkningarna som utförs, tas i första hand de över huskroppen framräknade tryckkoefficienterna tillvara. Nästa steg är att bestämma den luftomsättning som uppstår av det från modellen erhållna tryckfältet och givna yttre och inre (i huset) förhållanden. Sådana beräkningar har här utförts med de medelformfaktorer som presenterades i tabellerna 3.1 t o m 3.4. Beräkningarna har också gjorts på vindtunneluppmätta medelformfaktorer. Denna typ av beräkningar diskuteras ingående i Taesler (1985).

I figurerna 3.10 och 3.11 presenteras dessa beräkningsresultat. Vi visar här resultaten i form av en parameter som avser förhållandet mellan "uppmätta" och "beräknade" luftomsättningar som funktion av vindhastigheten (u) vid några olika utetemperaturer (t_u). Innetemperaturen i byggnaden var 20°C. Parametern (θ), har bestämts enligt följande.

$$\theta = \frac{\text{luftomsättningar/tim (vindtunnelförsök)}}{\text{luftomsättningar/tim (num. beräkningar)}}$$

Beräkningarna ger främst den viktiga informationen om hur diskrepanser i formfaktorvärdena påverkar energiförlustberäkningarna storleksmässigt.

I figurerna ses att avvikelserna mellan de "beräknade" och "uppmätta" luftomsättningshastigheterna maximalt är ungefär 20%. Betrakta nu tryckdifferensen mellan lovert- och läsida, Δp . Den relativa skillnaden i tryckdifferensen mellan "beräknade" och "uppmätta" fall kan skrivas,

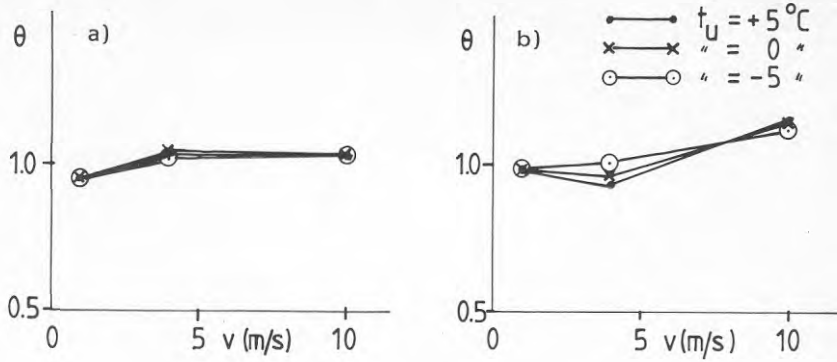
$$\gamma = \frac{\delta(\Delta p)}{\Delta p} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \delta(\Delta p) &= (\Delta c_p)_{\text{ber.}} - (\Delta c_p)_{\text{mätn.}} \\ \overline{\Delta p} &= 0.5 \cdot ((\Delta c_p)_{\text{ber.}} + (\Delta c_p)_{\text{mätn.}}) \\ \Delta c_p &= (c_p)_{\text{lovert}} - (c_p)_{\text{lä}} \end{aligned}$$

I tabell 3.5 framgår γ enligt ekvation (11) för de fall som har undersökts.

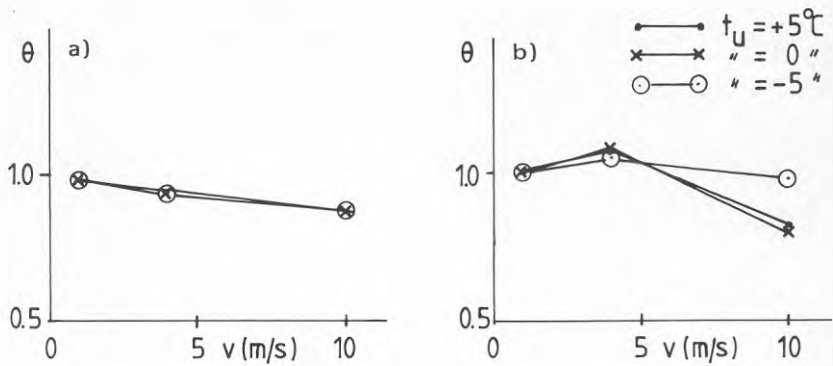
TABELL 3.5. Relativa skillnader i beräknade och uppmätta tryckdifferenser över huskroppens lovart- och läsidor. Se också texten.

| Trycksidor i | | Ensamliggande hus | | Hus i grupp | |
|---|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| lä | lovart | Anblåsning mot | | | |
| | | långsida/tak | gavel | långsida/tak | gavel |
| | långsida | $\gamma \approx -3\%$ | - | $\gamma \approx 17\%$ | - |
| | tak | $\gamma \approx 12\%$ | - | $\gamma \approx 43\%$ | - |
| | gavel | - | $\gamma \approx 17\%$ | - | $\gamma \approx 18\%$ |
| $\bar{\gamma}$ (ej ytviktade medelvärden) | | $\approx 10\%$ | | $\approx 25\%$ | |



FIGUR 3.10 Jämförelse mellan "mätta" och "beräknade" luftomsättnings-hastigheter, se texten.

- a) Långsidoanströmmat, enskilt hus
b) Gavelanströmmat, enskilt hus



FIGUR 3.11 Jämförelse mellan "mätta" och "beräknade" luftomsättnings-hastigheter, se texten.

- a) Långsidoanströmmat hus i grupp
b) Gavelanströmmat hus i grupp

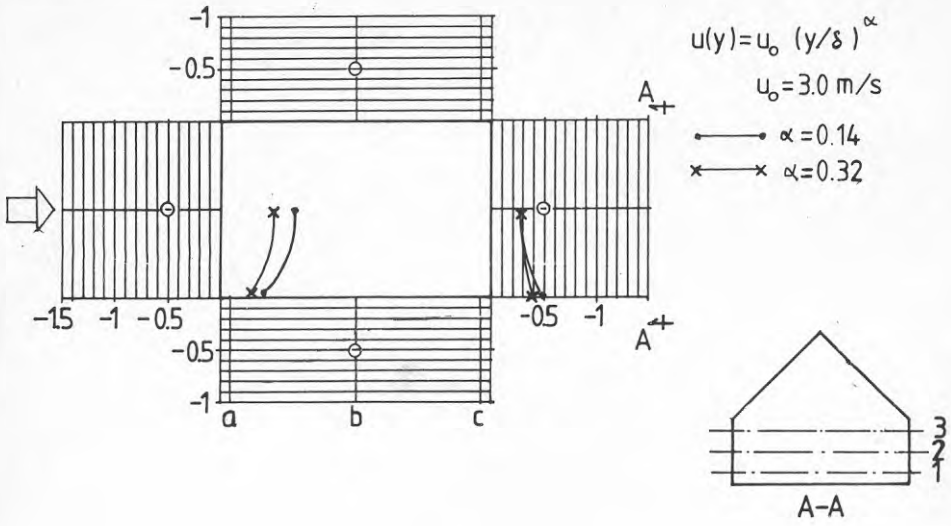
4. DISKUSSION

De tredimensionella numeriska simuleringar av strömning och tryckfördelning kring byggnader, som här redovisas, är - såvitt känt - de första av detta slag som utförts. Studierna bör ses som inledande försök att använda PHOENICS-modellen för byggnadsaerodynamiska tillämpningar. Några få, relativt enkla fall av strömning omkring huskroppar har studerats, och vissa resultat har jämförts med vindtunnelundersökningar. I de numeriska experimenten har vi försökt reproducera vindtunnelmiljön i möjligaste mån med hjälp av geometriska arrangemang, initial- och randvillkor.

De beräkningsresultat som uppnåtts är uppmuntrande. De fall som har studerats är ur numerisk modelleringsynpunkt ej triviala. Problemet innehåller flera olika strömningstyper som modellen samtidigt skall ge en korrekt beskrivning av. Exempelvis skall modellen ge en bra beskrivning av det gränsskikt som huset befinner sig i, den stagnationszon som uppstår på byggnadens frontsida och den recirkulationszon som bildas i lä och på sidorna av byggnaden. Dessa strömningstyper är naturligtvis "kopplade" i vårt problem. Det är dock vanligt att man använder så att säga skräddarsydda modeller för studier av vart och ett av dessa problemtyper, exempelvis sk gränsskiktmodeller för gränsskiktssimuleringar etc.

Vi skall nu mera ingående diskutera avvikelserna mellan numeriskt beräknade och uppmätta resultat som de ovan har redovisats. Vi har tidigare konstaterat att dessa avvikelser allmänt kan karakteriseras med att de beräknade medeltrycken var alltför höga, dvs för kraftiga övertryck i övertryckszoner och för svaga undertryck i undertryckszoner. Vi studerar områdena var för sig.

Den hastighetsprofil som vi ansätter på inströmsranden motsvarar den hastighetsprofil som i vindtunneln uppmättes i samma position som huset men under ostörda förhållanden. Under sträckan från uppströmsranden, fram till den plats huset ligger, förändras den "numeriska" profilen en aning. Vi har ej speciellt studerat problemets känslighet för dylika profilmödrändringar. Vårt beräkningsmaterial innehåller dock försök med två olika profiler men med en relativt låg friströmshastighet, 3 m/s. I figur 4.1 visas tryckfördelningen på lovert-lävågg vid enskilt gavelanströmmat hus för de olika hastighetsprofilerna.



FIGUR 4.1 Tryckfördelning i nivån 2, A-A, för två olika hastighetsprofiler. Gavelanströmmat enskilt hus.

I figuren ovan ses att skillnaden i det maximala övertrycket, som genereras av respektive profil, är ungefär 30%. Detta indikerar, trots den låga friströmshastigheten, en viss känslighet för profilens utformning. Vi kan alltså inte utesluta, att en av eventuellt flera orsaker, till det förhöjda övertrycket kan vara osäkerhet i profilformuleringen. Vad gäller grupphus, så påverkas lovartsidan av läeffekter från uppströms liggande hus, och ett mer komplext mönster uppstår här. Här introduceras dels profilavvikelse och dels de avvikelser som diskuteras nedan rörande undertryckszoner.

Angående undertryckszonerna, så ser vi i figur 4.1, att tryckfördelningen på lä gavel ej nämnvärt påverkas av olikheter i hastighetsprofilen. Detta är inte förvånande, då tryckfältet i dessa områden i hög grad styrs av huset själv och dess geometri, Rodi (1980), anger att med den turbulensbeskrivning som används i PHOENICS-modellen, $k-\epsilon$ modellen, blir, vid beräkning av recirkulerande flöden, recirkulationszonen ungefär 20% kortare än vad mätningar visar. Rodi (1980) menar vidare att hela felet kanske inte skall tillskrivas turbulensmodellen, numerisk diffusion kan också bidra till avvikelserna. Den "kortare" recirkulationszonen skapas genom att turbulensen på ett effektivt sätt transporterar in horisontellt momentum in i vakzonens centrum, och en alltför snabb återhämtning av recirkulerande effekter sker. Tryckskillnaden mellan omgivningen och en punkt i vakzonen blir då mindre än vad som mäts upp i ett ekvivalent vindtunnelförsök.

Denna effekt torde bli än mer accentuerad vid studier av hus i grupp. Vakzonerna påverkar då både lovart- och läsida på de betraktade husen. Recirkulationszonens längd och avstånden mellan husen blir här viktiga parametrar att studera. Det är dock inte klart i vilken grad som "vak-effekten" orsakar de ovan diskuterade diskrepanserna. Från vindtunnelförsöken finns ej vind- och tryckfält i husets omgivning redovisade, så någon jämförelse av recirkulationszonernas längd och allmänna utseende låter sig ej göras.

De beräknade medelformfaktorerna avviker, speciellt vad gäller grupphus, från de medelformfaktorer som baseras på vindtunnelmätningarna. Då medelformfaktorerna används i luftomsättningsberäkningar visar sig emellertid skillnaden mellan "beräknade" och "mätta" luftomsättningshastigheter vara relativt liten (figurerna 3.10 och 3.11). En förklaring härtill kan vara att det är tryckskillnaden över hela huset (lovart-lä), snarare än de enskilda byggnadstornas formfaktorer som är av betydelse för luftomsättningen.

REFERENSER

- Bringfelt, B., 1984.* Phoenics-simulering av plymspridning över ett skrovligt underlag. FoU-notis nr 32, SMHI, Norrköping.
- Hägkvist, K., Andersson, C., Taesler, R., 1985.* Phoenics-applications in building climatology, in: Numerical simulation of fluid flow and heat/mass transfer processes, edited by N.C. Markatos, D.G. Tatchell, M. Cross and N. Rhodes. Lecture notes in engineering, nr 18, Springer-Verlag. ISBN 3-540-16377-8.
- Rodi, W., 1980.* Turbulence models and their application in hydraulics - a state of the art review (IAHR). University of Karlsruhe. Karlsruhe, FRG. ISBN 90 212 70021.
- Spalding, D.B., 1981.* A general purpose computer program for multi-dimensional one- and two-phase flow. Mathematics and computers in simulation. North Holland Press, Vol XXIII, 267-276.
- Svensson, U., 1985.* PHOENICS in environmental flows. A review of applications at SMHI, in: Numerical simulation of fluid flow and heat/mass transfer processes, edited by N.C. Markatos, D.G. Tatchell, M. Cross and N. Rhodes. Lecture notes in engineering, nr 18, Springer-Verlag. ISBN 3-540-16377-8.
- Taesler, R., Andersson, C., 1984.* A study of air-flow and wind comfort around an office building using the PHOENICS-code. SMHI, Norrköping, Sweden.
- Taesler, R., 1985.* Klimatberoendet i bebyggelsens energibudget. Data och beräkningsmetoder. BFR-rapport R116:1985. ISBN 91-540-4456-1.
- Wirén, B.G., 1985.* Effects of surrounding buildings on wind pressure distributions and ventilation losses for single-family houses. Part 1: 1½-storey detached houses. Meddelande M85:19. Statens institut för byggnadsforskning. ISBN 91-540-9237-X.
- Zeman, O., Tennekes, H., 1975.* A self-contained model for the pressure terms in the turbulent stress equations of the neutral atmospheric boundary layer. Journal of the atmospheric sciences, Vol. 32, 1808-1813.

**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 851092-6
från Statens råd för byggnadsforskning till SMHI
Norrköping.**

R7: 1987

ISBN 91-540-4684-X

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6707007

**Abonnemangsgrupp:
W. Installationer
Z. Konstruktioner och
material**

**Distribution:
Svensk Byggtjänst, Box 7853
103 99 Stockholm**

Cirka pris: 33 kr exkl moms