



## EDB-Programmer til beregning af passiv solvarme

Christensen, Jørgen Erik; Korsgaard, Vagn

*Publication date:*  
1987

*Document Version*  
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

*Citation (APA):*  
Christensen, J. E., & Korsgaard, V. (1987). *EDB-Programmer til beregning af passiv solvarme*. Technical University of Denmark. Byg Rapport No. 185

---

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

EDB-PROGRAMMER TIL BEREGNING AF  
PASSIV SOLVARME

JØRGEN ERIK CHRISTENSEN

LABORATORIET FOR VARMEISOLERING  
DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE  
MEDDELELSE NR. 185    OKTOBER 1987



## FORORD

Denne afhandling markerer afslutningen af mit licentiatstudium ved Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks tekniske Højskole, med professor Vagn Korsgaard som vejleder og lektor Preben N. Hansen som medvejleder.

Licentiatprojektet blev påbegyndt i august 1982 med et tilhørende stipendium fra Danmarks tekniske Højskole på 2 1/2 år. I tilknytning til dette bevilgede Anker Engelunds Fond et tre måneders stipendium til ophold i et privat firma. Denne del foregik i det rådgivende ingeniørfirma Birch & Krogboe, hvor stor inspiration er opnået i et behageligt arbejdsklima.

Efter disse stipendier har jeg været ansat ved en række relevante forskningsprojekter finansieret af Energiministeriet og Byggeriets Udviklingsråd (BUR), og arbejdet med at færdiggøre afhandlingen har således måttet indpasses efter arbejdet på fondsprojekter. Herudover har forfatteren modtaget støtte fra Statens Teknisk-Videnskabelige Forskningsråd og fra Otto Mønstedts Fond.

Jeg har god grund til at takke mine vejledere professor Vagn Korsgaard og lektor Preben N. Hansen og de øvrige medarbejdere ved Laboratoriet for Varmeisolering, der har givet råd under udførelsen af licentiatprojektet. Det har været meget inspirerende at arbejde i Laboratoriets dynamiske forskningsmiljø, og dette har været til stor gavn for projektet.

En speciel tak vil jeg gerne rette til Preben N. Hansen for hans store hjælpsomhed ved projektet. Desuden vil jeg gerne takke Hans Lund, Ove Mørck, Lars Olsen, Peder Vejsig Pedersen, Stig Eidorff, Carsten Rode Pedersen, Merete Hjorth Rasmussen og Jørgen Holm Pedersen for råd og bistand. Fra UNI-C, Århus, har Frede Espensen ydet et stort bidrag med det edb-mæssige i starten af projektet, hvilket jeg er meget taknemmelig for. Fra UNI-C, Lyngby, har Henrik Vinther været meget behjælpelig med forbindelsen til UNI-C, Århus, via Centernettet.

Jeg vil også gerne sende en tak til professor C.O. Pedersen, Dale L. Herron og Michael Witte fra BLAST Support Office, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA, uden hvis vejledning om opbygningen af BLAST programmet, udviklingen af forfatterens hjælpeprogram ikke havde været mulig.

For tegning af figurer vil jeg gerne takke Sally L. Høgsted og Kenneth Sørensen, og for korrekturlæsningen Bjarne Saxhof og min far. Til sidst vil jeg sende nogle venlige tanker til Birthe Friis der med sit gode humør med stor dygtighed og omhu har renskrevet rapporten.

Jørgen Erik Christensen  
August 1987



## INDHOLD

FORORD . . . . .	i
INDHOLD . . . . .	iii
RESUME . . . . .	iv
SUMMARY . . . . .	v
1. INDLEDNING . . . . .	1
1.1 Passiv solvarme . . . . .	1
1.2 Formål med projektet . . . . .	7
2. EDB-PROGRAMMER TIL PASSIV SOLVARME . . . . .	9
2.1 Valg af edb-program . . . . .	10
2.2 Beregningsteori for valgte programmer . . . . .	17
2.2.1 Differensmetoder . . . . .	19
2.2.2 Responsfaktormetoder . . . . .	22
2.3 Forskelle mellem BLAST og SUNCODE . . . . .	28
3. EDB-ARBEJDE . . . . .	33
3.1 Beskrivelse af BLAST-systemet . . . . .	33
3.1.1 BLAST . . . . .	35
3.1.2 REPORT-WRITER, JC-WRITER, PREPROCESSOR og WIFE . . . . .	39
3.2 JC-WRITER . . . . .	42
3.3 Styreprocedure og undervisningsmateriale . . . . .	47
4. VALIDERING . . . . .	50
4.1 Valideringsproces . . . . .	50
4.2 Validering med den canadiske "Direct Gain" testbyg- ning . . . . .	53
4.2.1 Resultater . . . . .	59
4.3 Smakkebo . . . . .	70
4.3.1 Resultater . . . . .	79
4.4 Sammenfatning . . . . .	89
5. AKTUELLE PROJEKTER . . . . .	93
6. KONKLUSION . . . . .	101
ORDLISTE . . . . .	104
SYMBOLLISTE . . . . .	106
REFERENCELISTE . . . . .	107
PUBLIKATIONSLISTE for Jørgen Erik Christensen . . . . .	110
FIGURLISTE . . . . .	112
TABELLISTE . . . . .	116

## RESUME

I denne sammenfattende afhandling redegøres for det arbejde forfatteren har udført i forbindelse med sit licentiatarbejde ved Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks tekniske Højskole, inden for området udnyttelse af passiv solvarme under danske klimaforhold.

Der er her i landet udviklet flere edb-programmer til beregning af bygningers energiforbrug og indeklima. De har imidlertid vist sig mindre velegnede til undersøgelser vedrørende passiv solvarme, da de kun kan regne på ét rum, og ikke i tilstrækkelig grad kan tage hensyn til den termiske effekt af den varmeakkumulerende masse i boligen. Det har derfor været hovedformålet med projektet at udvælge egnede programmer og eventuelt omarbejde dem så de blev hensigtsmæssige til simulering af passiv solvarme.

Projektet startede i 1982 inden personal computerne (PC) havde vundet almindeligt indpas, og derfor inden der fandtes detaljerede programmer på PC-niveau. Opmærksomheden samlede sig derfor kun om programmer til de store computere. På baggrund af analyser af ca. 40 edbprogrammer blev det amerikanske program BLAST (the Building Loads Analysis & System Thermodynamics program) valgt som et af de bedst egnede. Dette valg kan ikke betragtes som værende et éntydigt valg, da der kan fremføres mange argumenter for og imod de enkelte programmer.

Med videreudviklingen af et andet amerikansk program SERIES til PC-programmet SUNCODE blev dette program meget interessant, hvorfor det er medtaget i den sidste del af projektet. Hovedvægten i projektet er imidlertid lagt på videreudviklingen og brugen af BLAST.

I kapitel 3 er der en beskrivelse af BLAST-systemet og det edb-arbejde forfatteren har udført i tilknytning til dette. Dette har primært omfattet udviklingen af et selvstændigt program JC-WRITER, der er i stand til at læse resultatfilerne fra BLAST og bearbejde disse data og udskrive dem i ønskede formater.

I kapitel 4 er BLAST og SUNCODE blevet valideret med en canadisk testcelle og med et testhus i bebyggelsen Smakkebo ved Helsingør. I begge tilfælde er der fundet fin overensstemmelse mellem målinger og beregninger af energiforbrugene. Med hensyn til temperaturforholdene er der rimelig overensstemmelse i begge tilfælde. Der er imidlertid behov for yderligere undersøgelser, da temperaturudsvingene i den canadiske testcelle er for små, og da Smakkebo indeholder flere usikkerhedsfaktorer.

Til slut er kort beskrevet en række aktuelle projekter som forfatteren har været involveret i.

## SUMMARY

This dissertation is a summarization of the work carried out by the author during his studies for the Ph. D. degree at the Thermal Insulation Laboratory, the Technical University of Denmark. The subject has been the utilization of passive solar energy under Danish climatic conditions.

In Denmark, several computer programs have been developed and used to simulate the energy consumption and the indoor climate in buildings. However, these programs are less suitable for investigation of passive solar systems since they can only provide analysis of a single room and cannot sufficiently consider the thermal effect of the heat-accumulating mass of the building. Therefore, the main purpose of this project has been to select suitable programs, and, if necessary, re-edit them specifically for passive solar energy simulations.

This project started in 1982, at a time when personal computers (PC) were less common. For that reason no detailed programs at PC level existed. Hence attention was drawn to the big computers. In the light of analyses of about 40 computer programs, the American program BLAST (the Building Loads Analysis & System Thermodynamics program) was selected as being qualified for this task. This choice should not be considered as final since many arguments for and against each program may be stated.

The transfer of another American program, SERI-RES, into a PC-code - the program SUNCODE - makes this program very interesting. That is the reason why it has been included in the last part of the project. However, the greatest importance to the project is related to the adaption and use of BLAST.

In chapter 3, a description is given of the BLAST-system, and the computer work carried out by the author with the system. This work has primarily consisted in the development of an independent program, JC-WRITER, which is able to read the output files from BLAST, adapt these data and print them in the formats wanted.

In chapter 4, BLAST and SUNCODE have been compared and validated using experimental results from a Canadian test cell, and from a Danish test house, one of the "Smakkebo" houses at Elsinore. In both cases there has been a good accordance between the measurements and the calculations of the energy consumptions. As for the temperatures, the agreement was relatively good for both cases. However, further investigations will be necessary as the temperature fluctuations in the Canadian test cell were too small, and as Smakkebo manifested some uncertain factors.

Finally, a number of current projects in which the author has participated with BLAST calculations are briefly described.





## 1. INDLEDNING

Interessen for at benytte solenergi startede for alvor her i Danmark efter oliekrisen i 1973 og tog yderligere et opsving efter den næste oliekrise i 1979.

Ved udnyttelsen af solenergi arbejdes der med tre typer solvarmesystemer, alt efter hvorledes energien bliver tilført:

Aktive solvarmesystemer  
 Passive solvarmesystemer  
 Hybride solvarmesystemer

Aktive solvarmesystemer dækker over systemer, der er drevet ved hjælp af ventilatorer og pumper.

Passive solvarmesystemer dækker over bygningsdesign, hvor solvarmen udnyttes på en passiv måde til opvarmning af en bygning. Dette sker ved at nyttiggøre solenergien i kombination med varmelagring i bygningskonstruktionerne uden anvendelse af mekanisk drevne systemer.

Hybride solvarmesystemer dækker over en kombination af aktive og passive solvarmesystemer. Et hybridt system kan defineres som et system, der inkorporerer både naturlig og tvungen energitransport.

Da denne afhandling vedrører "udnyttelse af passiv solvarme under danske klimaforhold", vil der primært blive lagt vægt på passive systemer og sekundært på hybride systemer.

### 1.1 Passiv solvarme

Passiv solvarme er et relativt nyt begreb i Danmark, og dækker over at energien fra solen udnyttes til opvarmning af bygningen uden anvendelse af komplicerede tekniske anlæg. Når begrebet "passiv solvarme" benyttes her i landet, tænkes der normalt på såvel passive som hybride solvarmesystemer, selv om det strengt taget ikke er efter definitionen.

I det følgende vil der blive skelnet mellem passive og hybride solvarmesystemer. Passive solvarmesystemer kan karakteriseres ved følgende tre egenskaber:

1. Energien opsamles og anvendes i den pågældende bygning.
2. Energien transmitteres af naturlige drivkræfter. Disse drivkræfter kan bestå af ledning, stråling, naturlig konvektion og fordampning/fortætning.
3. Energien kan akkumuleres i bygningskonstruktionerne.

Den første egenskab giver sig selv og hænger sammen med den anden, idet energien transmitteres af naturlige drivkræfter.

Den tredje egenskab: "Varmeakkumulering i bygningskonstruktioner" spiller en central rolle ved udnyttelsen af passiv solvarme. Dette skyldes, at et eventuelt varmeoverskud kan akkumuleres i bygningskonstruktionerne og derved udjævne døgntemperatursvingningerne. Et hus med megen overskudsvarme vil følgelig få et mindre energiforbrug og et bedre indeklima, hvis det har en stor varmeakkumuleringssevne.

De vigtigste systemer under danske forhold kan deles op i 3 kategorier:

- |                     |                      |
|---------------------|----------------------|
| 1. Direkte tilskud  | (Direct Gain)        |
| 2. Glastilbygninger | (Attached Sunspaces) |
| 3. Solvægge         | (Solar Walls)        |

I det følgende vil disse tre systemer ganske kort blive beskrevet, idet der henvises til Passiv Solvarme - Projekteringsvejledning, fra Energiministeriets solvarmeprogram - 1985 for yderligere oplysninger. Inden beskrivelsen af de tre systemer vil solindfald meget kort blive beskrevet.

### Solindfald

Ved solindfald på en flade skelnes mellem direkte og diffus stråling. Den direkte stråling kan betragtes som kommende fra en punktformig kilde, der bevæger sig hen over himmelhvælvingen. Den diffuse stråling består dels af diffus himmelstråling og dels diffust reflekteret stråling fra omgivelserne. Den diffuse stråling er kun i mindre grad retningsbestemt. Solindfaldet på en flade kan følgelig sammensættes af følgende tre komponenter:

Direkte stråling  
 Diffus himmelstråling  
 Reflekteret stråling fra omgivelserne

Den direkte solindstråling mod en overflade er først og fremmest afhængig af solens højde på himlen og strålernes indfaldsvinkel. På en skyfri dag udgør den direkte stråling fra solen op til 85% af totalstrålingen. De resterende 15% er diffus himmelstråling og reflekteret stråling fra omgivelserne.

### Direkte tilskud (Vinduer)

Ved direkte tilskud (Direct Gain) forstås solindfald gennem vinduer.

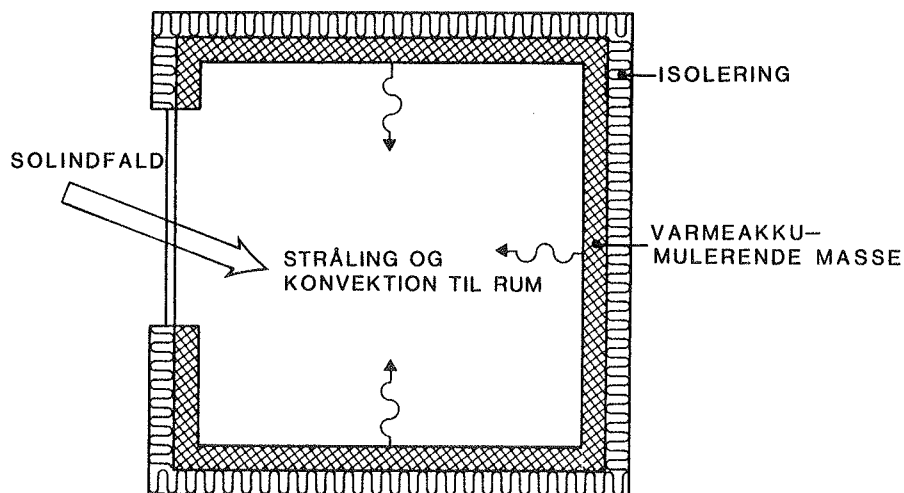
Når solstråling rammer en glastrude, vil en del blive reflekteret, en del absorberet og en del transmitteret. Den brøkdel af strålingen, som reflekteres, betegnes med refleksionsforholdet  $\rho$ , mens den brøkdel som absorberes og transmitteres betegnes med forholdene  $\alpha$  og  $\tau$ . Ved hjælp af  $\alpha$ ,  $\rho$  og  $\tau$  kan et udtryk for, hvordan solstrålingen fordeles, skrives på formen:

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

(1.1-1)

Størrelsen af  $\alpha$ ,  $\rho$  og  $\tau$  er afhængig af glassorten, indfaldsvinklen og strålingens spektralfordeling. Ved udnyttelse af passiv solvarme er det af interesse at benytte vinduer med et højt transmissionsforhold. Dette gælder for de fleste normale ruder, idet størstedelen af den solstråling, der rammer glasset, transmitteres direkte ind i rummet. Her rammer den de indvendige overflader og møbler, og bliver dels reflekteret og dels absorberet. Den reflekterede stråling rammer andre flader, hvor reflektions/absorptionsprocessen gentages indtil al strålingen er absorberet. Hvor stor en del af strålingen, der bliver absorberet, afhænger af fladens absorptionsforhold over for solstråling. En mørk flade vil have en større evne til at absorbere solstråling end en lys. Kun nogle få procent af solindfaldet vil ramme vinduerne igen og blive transmitteret ud af rummet.

Den stråling, der bliver absorberet, vil bevirke at overfladen bliver opvarmet. Overfladen vil afgive den opsamlede energi dels ved konvektion til rumluften og langbølget stråling til omgivelserne, og dels ved varmeledning ind i konstruktionerne. Den langbølgede stråling er ikke i stand til at passere gennem vinduet, hvilket bevirker at den indstrålede energi bliver i rummet. Denne effekt betegnes også som drivhuseffekten.



Figur 1.1-1. Illustration af direkte tilskud (Direct Gain).

For lodrette vinduer udnyttes solindfaldet bedst ved sydvendt orientering. Dette hænger sammen med at denne giver et stort solindfald om vinteren, hvor solen står lavt, og om sommeren kan et passende tagudhæng reducere solindfaldet, således at ubehagelige overtemperaturer undgås. Det er vigtigt at være forsigtig med store øst-, vest- og sydvendte vinduesarealer, da overophedning let kan optræde selv i forårs- og efterårsmånederne, hvis det ikke er muligt at lave nogen form for afskærmning.

Da solindfaldet i bygninger med store vinduesarealer ofte er meget større end der er behov for, er det vigtigt at bygningen har en stor termisk masse, hvor energien kan lagres i løbet af dagen og afgives igen om aftenen og om natten, når

der er behov for det. Hvis rummet ikke har den fornødne varmekapacitet i forhold til varmetilskuddet, vil der opstå overtemperaturer, og det vil være nødvendigt at bortventilere den overskydende varme.

Ved projektering af lette bygninger uden nævneværdig varmekapacitet er det vigtigt at være opmærksom på, at vinduesarealerne ikke må være for store, da der ikke vil være mulighed for at absorbere den overskydende varme. Det er derfor afgørende at afpasse vinduernes størrelse i relation til den termiske masse, for at der kan skabes et tilfredsstillende termisk indeklima.

### Glastilbygninger

Glastilbygninger (Attached Sunspaces) er i de senere år blevet meget populære i forbindelse med boliger, da de giver en attraktiv udvidelse af boligen i nær kontakt med naturen. Fordelene ved glastilbygninger er, at beboerne får forlænget den tid de kan opholde sig "ude", idet temperaturen i tilbygningen er meget højere end udetemperaturen om dagen i forårs- og efterårsmånederne. Herudover er der den fordel, at der er tørt og vindstille, hvilket betyder meget for komforten.

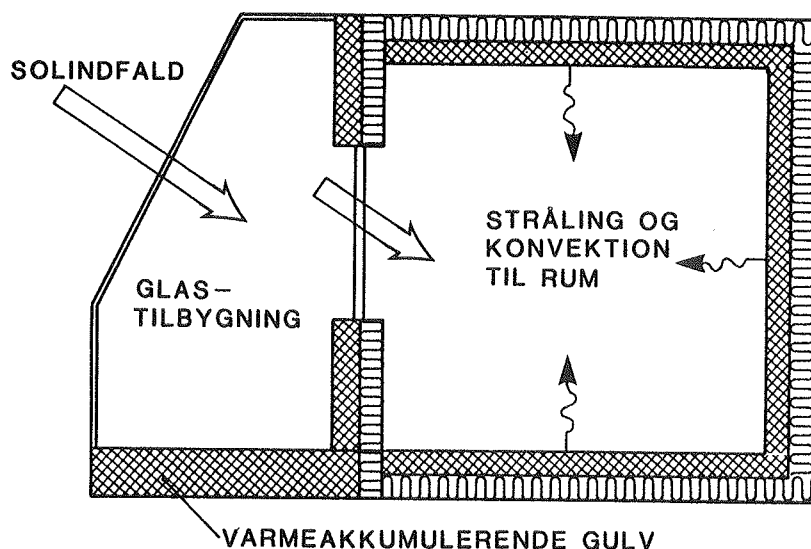
I mange af de boliger, der er blevet forsynet med glastilbygninger, er det sket ud fra komfortmæssige ønsker og krav, hvorimod de energimæssige betragtninger har haft mindre betydning. Glastilbygninger er imidlertid en af de foranstaltninger, der indgår under passiv solvarme, men det er først i de senere år, der er skabt interesse for bevidst energimæssig udnyttelse af glastilbygningen i dansk boligbyggeri.

Den energimæssige udnyttelse for en glastilbygning afhænger af følgende forhold:

1. Glasdækningens hældning og orientering
2. Glastilbygningens størrelse og placering ved bygningen
3. Glastilbygningens varmeakkumulering og konstruktion
4. Skyggeforhold
5. De tilstødende bygningsdeles konstruktion
6. Ventilation af bolig via glastilbygningen

Ad 1. Glasdækningen skal udformes, så varmetabet til det fri bliver mindst muligt, og så den tilførte varme fra solindfaldet er størst muligt i opvarmningssæsonen. Det er således en fordel at orientere glasfladerne sydligt.

Ad 2. Glastilbygningen bør dække så store vinduesarealer i ydervæggen som muligt. Jo større glastilbygningen er, og jo større areal den dækker, desto større bliver den opnåelige energibesparelse. Det glasdækkede rum bør udformes, så det har det størst mulige overfladeareal mod bygningen og det mindst mulige mod det fri. Ud-



Figur 1.1-2. Eksempel på glastilbygning.

formningen bør være sådan, at solen ikke skinner tværs gennem glasrummet og ud i det fri, og således at solindfaldet primært rammer tunge, varmeakkumulerende bygningsdele.

- Ad 3. De varmeakkumulerende bygningsdele i glastilbygningen sikrer, at der opretholdes en overtemperatur i forhold til udetemperaturen, hvilket mindsker transmissionstab fra bygningen, primært gennem vinduerne. Tunge dele som betonflader og mursten er meget velegnede. Mørke flader er bedst, da de absorberer en større del af solstrålingen. Det er en fordel med en stor taghældning mod syd, da dette sikrer et større solindfald i opvarmningssæsonen. Ved taghældning over  $25^\circ$  mod syd opnås et større solindfald end for en lodret flade.
- Ad 4. Skygger bør reduceres så meget som muligt i selve opvarmningssæsonen, da de mindsker solindfaldet i glastilbygningen. Der kan skelnes mellem permanente skygger fra nærliggende bygninger, sprosser/spær i glastilbygningen og variable skygger fra beplantning. Ved planlægning af nybyggeri kan de permanente skygger reduceres ved hensigtsmæssig planlægning, hvorimod der ved opførelse af glastilbygninger i tilknytning til eksisterende boligbyggeri kun kan ændres på placeringen af glastilbygningen. De variable skygger fra beplantning kan være en fordel i sommerperioden, ligesom en solafskærmning kan reducere solindfaldet og dermed overtemperaturerne.
- Ad 5. Glastilbygningen er med til at reducere transmissionstab fra de bygningsdele der støder op til den, idet middeltemperaturdifferensen nedsættes med  $5-6^\circ\text{C}$  på grund af den højere gennemsnitstemperatur i glastilbygningen i opvarmningssæsonen i forhold til udetem-

peraturen. Ved at orientere de største vinduesarealer mod glastilbygningen opnås de største besparelser. Dette hænger blandt andet sammen med, at U-værdien for en to-lags rude nedsættes med ca. 20% hidrørende fra lævirkningen og den deraf forøgede ydre overgangsmodstand. Ventilationstabet fra boligen nedsættes også på grund af den højere temperatur og lævirkningen.

Ad 6. Nedsættelse af ventilationstabet kan ske ved at udluftning af boligen sker via glastilbygningen i stedet for direkte med udeluften.

### Solvægge

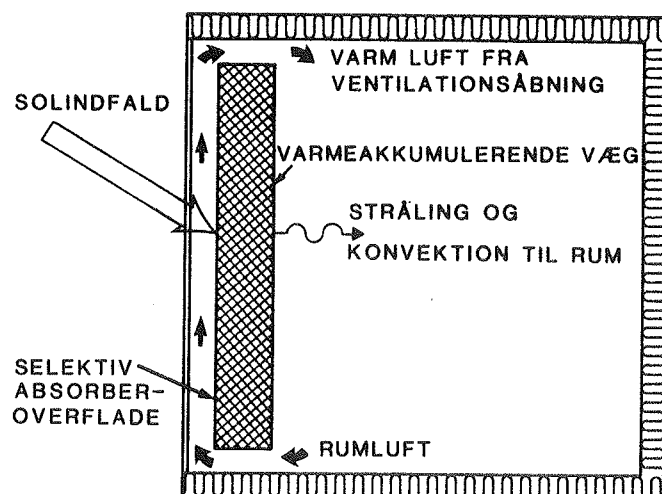
Solvægge (Solar Walls) bygger på princippet om en varmeopsamlende væg med en udvendig transparent afdækning. Systemet adskiller sig fra "direkte tilskud" ved, at solen ikke skinner ind i rummet, men at solstrålingen i stedet absorberes inde i klimaskærmen. Der findes flere forskellige former for solvægge, hvoraf tre skal nævnes her:

1. Solvægge uden ventilation
2. Solvægge med ventilation
3. Trombevægge

Solvægge uden ventilation består af en uisolaret tung væg med et eller flere lag glas eller tilsvarende transparent materiale. Energitilførslen til rummet foregår ved at solen skinner gennem glasset ind på den varmeakkumulerende væg. Dette medfører en temperaturstigning på overfladen af væggen, og en del af denne energi forplanter sig gennem væggen ved ledning for at blive tilført rummet ved konvektion og stråling. For at reducere varmetabet til det fri kan overfladen udføres med selektiv belægning, der medfører at tabet ved varmestråling nedsættes, herudover kan væggen udføres med flere lag glas. I perioder uden sol kan væggen yderligere isoleres med mobil isolering.

Solvægge med ventilation består af en isoleret ydervæg der har åbninger foroven og forneden samt en tynd plade mellem glasset og væggen. Princippet er herefter at pladen absorberer solvarmen, hvorefter luften mellem pladen og væggen bliver opvarmet og begynder at cirkulere op foran væggen og ind gennem åbningen foroven.

En Trombevæg er en kombination af en uisolaret varmeakkumulerende tung væg og en ventileret solvæg. Energioverførslen sker dels ved ledning gennem væggen, og dels ved at den opvarmede luft foran betonvæggen stiger op og cirkulerer ind gennem den øverste rist til rummet. På figur 1.1-3 er vist en skitse af en Trombevæg.



Figur 1.1-3. Illustration af Trombevæg.

## 1.2 Formål med projektet

I det foregående afsnit blev passiv solvarme kort beskrevet for at give læseren en kort introduktion til emnet. En problemstilling ved passiv solvarme er at det kan være vanskeligt at vurdere hvor store energibesparelser der vil forekomme ved forskellige konstruktionsmæssige tiltag. Det vil være omfattende, tidkrævende og kostbart at lave praktiske fuldskalaforsøg i de enkelte tilfælde, og af måletekniske årsager er det ligeledes vanskeligt at vurdere forskellene. Det er derfor lettere at benytte edb-programmer, der er i stand til at regne på passiv solvarme.

Hovedformålet med dette projekt har derfor været at udvælge egnede programmer og eventuelt omarbejde dem, hvis der var behov for det. Projektet startede i 1982 inden personal computere (PC) havde vundet indpas, og derfor inden der fandtes detaljerede programmer på PC-niveau. Opmærksomheden samlede sig derfor kun om de store computere (main frame). Hvis projektet var blevet startet i dag ville de PC-orienterede programmer selvfølgelig have været af meget stor interesse, da de sædvanligvis er interaktive og langt mere brugervenlige end programmer på store computere. Herudover har de den fordel, at når PC-eren først er anskaffet, er der ikke nogen direkte kørselsudgifter forbundet med dem. Dette set i forhold til programmer på de store computere, hvor betaling for maskintid ofte indgår.

I nærværende projekt blev det amerikanske energiberegningsprogram BLAST (the Building Loads Analysis & System Thermodynamics program) valgt til at være det bedst egnede til passiv solvarme på baggrund af de opstillede kriterier og tilgængelighed af egnede computere, jf. kapitel 2.1.

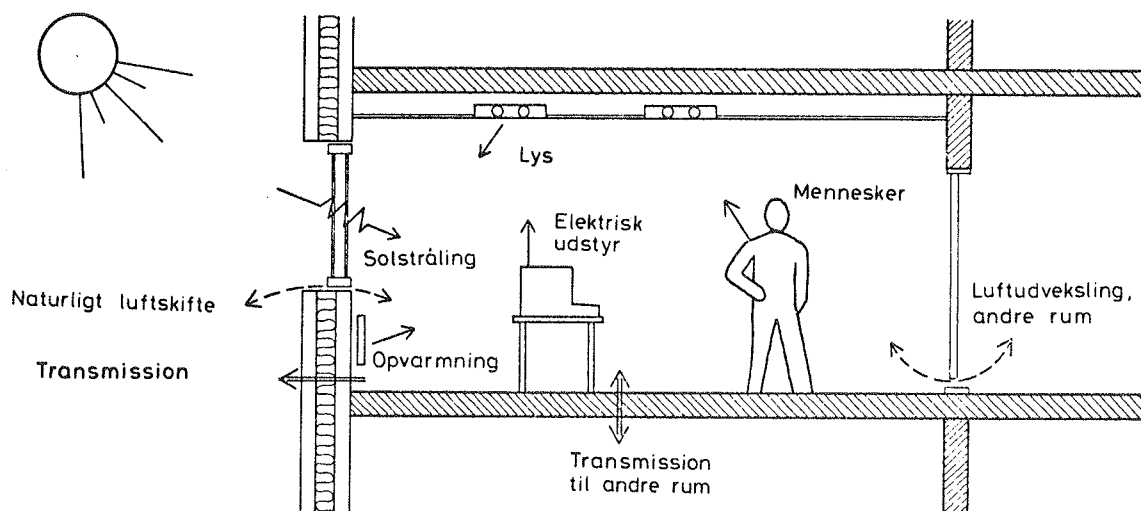


Med videreudviklingen af et andet amerikansk program SERIES (Solar Energy Research Institute - Residential Research Energy Simulator) til PC-programmet SUNCODE blev dette program imidlertid af meget stor interesse (De La Hunt, Mary Jane - 1985). Dette program er derfor også blevet anvendt i dette arbejde. Imidlertid kom programmet først til Danmark i efteråret 1985, hvorfor hovedvægten af arbejdet er lagt i videreudviklingen og benyttelsen af BLAST.

## 2. EDB-PROGRAMMER TIL PASSIV SOLVARME

Anvendelse af edb-programmer til undersøgelse af passiv solvarme er ved at vinde stigende indpas i Danmark, men det er stadig relativt få der benytter programmer, som er detaljerede nok til at give et klart billede af betydningen ved anvendelse af forskellige passiv solvarme foranstaltninger. Programmerne tager deres udgangspunkt i beregningen af bygningens energiforbrug og indeklima.

Indeklimaet og energiforbruget i et rum er et resultat af et kompliceret samspil mellem bygningens udformning, de termiske belastninger, klimaanlægget og de vejræssige påvirkninger. For at holde rede på dette er det nødvendigt at opstille en varmebalance for rummet. De kilder der indgår i denne varmebalance er illustreret på figur 2-1. For denne balance skal der til ethvert tidspunkt gælde, at den til rummet tilførte varme er lig med den bortførte varme, idet der medregnes den varmemængde, der tilføres eller afgives fra varmeakkumulerende bygningsdele.



Figur 2-1. Skematisk figur der illustrerer de forskellige kilder som indgår i varmebalancen.

Der findes mange modeller/metoder til bestemmelse af indeklimaet og energiforbruget både det øjeblikkelige og det årlige. Disse kan deles op i 2 kategorier:

- Stationære metoder
- Ikke stationære metoder

Hvor der antages stationære forhold, er der ingen ændringer i varmeindholdet i de akkumulerende bygningsdele, og varmebalancen bliver følgelig simpel, svarende til almindelige varmetabsberegninger. Stationære metoder kan imidlertid ikke anvendes til mere detaljerede analyser af passiv solvarme, idet det kun er muligt i mindre grad at tage hensyn til varmeakkumuleringen.

For ikke-stationære forhold er det nødvendigt at medtage varmeakkumuleringen i bygningskonstruktionerne, og dette medfører at varmebalancen bliver langt mere kompliceret. Da det ikke er muligt at regne eksakt på disse forhold, gøres der en række tilnærmelser med hensyn til den instationære varmeledning gennem bygningskonstruktionen.

De programmer, der er blevet undersøgt i dette projekt, er alle ikke-stationære programmer, hvor det er muligt at medtage indflydelsen af varmeakkumuleringen i bygningskonstruktionerne.

## 2.1 Valg af edb-program

Der er udviklet en hel del edb-modeller til beregning af termisk indeklima. Imidlertid er det kun få af dem, der er i stand til at regne på såvel passive som på hybride systemer. Som nævnt er valget af et egnet program til dette formål sket inden der fandtes detaljerede programmer på PC-niveau. I forbindelse med udvælgelsen blev ca. 40 programmer vurderet på baggrund af egne og tidligere undersøgelser af SERI - 1980 & Littler, J.G.F. - 1982 & Jørgensen, Ove - 1983 & Kommissionen for de Europæiske Fællesskaber - 1983. Herudover har diverse manualer for relevante edb-programmer, en række artikler i ASHRAE Transactions og personlige samtaler med en lang række forskere fra universiteter og læreanstalter ligget til grund for vurderingen.

Resultatet af de tre undersøgelser beskrives i det følgende, idet der henvises til en rapport af forfatteren fra november 1984 for en mere detaljeret redegørelse.

### Kommissionen for de Europæiske Fællesskaber

Kommissionen for de Europæiske Fællesskaber dannede i 1981 "The Passive Solar Modelling Sub Groups", bestående af en række eksperter fra EF's medlemslande, med det formål at undersøge og udvælge et avanceret edb-program til beregning af passiv solvarme. Resultatet af arbejdet blev beskrevet i Passive Solar Modelling Sub Group - 1983 og i Kommissionen for de Europæiske Fællesskaber - 1983.

Der blev medtaget ca. 50 modeller i arbejdet, hvilket skulle dække langt de fleste mulige på daværende tidspunkt. Analysen blev koncentreret om de modeller, der var velegnede til beboelsesbygninger og skønnedes anvendelige til passiv solvarme. Mange af de undersøgte modeller kunne imidlertid ikke anbefales af praktiske årsager som fx manglende dokumentation. I den indledende fase blev følgende fire udvælgelseskriterier benyttet:

### Indledende udvælgelseskriterier

1. Velegnet til passiv solvarme
2. Let at anvende
3. Fuldt dokumenteret
4. Let tilgængelig

Gruppen fandt, at kun fem modeller opfyldte de fire udvælgelseskriterier:

Program	Land
SUNCODE	USA
ESP	Storbritannien
DEROB IV	USA
LFBI	Belgien
MORE	Italien

### Littler

Littler har analyseret de tilgængelige modeller ved hjælp af et litteraturstudium og en række personlige samtaler. Resultatet af hans undersøgelse blev publiceret i Littler, J.G.F. - 1982 og viste at følgende 4 modeller kunne anvendes:

Program	Land
BLAST 3:0	USA
SUNCODE	USA
DEROB IV	USA
MORE	Italien

### International Energy Agency (IEA)

IEA har igennem sin forskning i Task VIII "Passive and Hybrid Solar Low Energy Buildings" udført et stort arbejde for at få et overblik over de tilgængelige edb-modeller. Arbejdet resulterede i rapporten Jørgensen, Ove - 1983, hvor 31 modeller fra 10 lande blev præsenteret, dels i oversigtstabeller, og dels i 3-4 siders skemaform for hver enkelt model.

Forfatteren har på baggrund af denne rapport og samtaler med andre forskere gennemgået modellerne i rapporten. Resultatet af denne undersøgelse er vist i tabel 2.1-1. Af denne fremgår det at kun otte programmer er velegnede til passiv solvarme:

PROGRAMMETS NAVN	Begrundelse for at en model er mindre velegnet til Passiv Solvarme
PASSIVE HOUSE DESIGN	Engelske enheder, en zone
ENCORE - CANADA	Direkte tilskud, engelske enheder
PASSIVE	Dokumentation mangler, WANG computer
SIMNET	Forskningsprogram, generelt netværksprogram
BA4	Direkte tilskud, en zone
HAUSER	Direkte tilskud
MORE	
SMP	Direkte tilskud
AZIZ	Direkte tilskud, en zone
BYVOK	Direkte tilskud, en zone
ENCORE	Direkte tilskud
BFEP	Forskningsprogram, generelt netværksprogram
KLI	Direkte tilskud
PASSIM	Forskningsprogram, generelt netværksprogram
MODPAS	Ikke offentligt tilgængeligt, simpel grundmodel
IGLOU	Stationær model
BAUDYN	Direkte tilskud, en zone
STEMOD/DYWAN	
MUR-DIODE	En zone
SOLTRAP	En zone
HELIOS	Direkte tilskud, en zone
BLAST 3:0	
DEROB IV	
DOE-2.1 A	
EMPS 2.0	Engelske enheder, forskningsprogram
SERI-RES 1.0	
TRNSYS 11.1	Programmet er mest koncentreret om aktiv solvarme
PASOLE	Forskningsprogram, generelt netværksprogram
LFB1	
SOLPA	Direkte tilskud, en zone
ESP	

Tabel 2.1-1. Resultatet af undersøgelse af egnede programmer til passiv solvarme baseret på Jørgensen, Ove - 1983 og samtaler med en række eksperter. (Christensen, Jørgen Erik - November 1984).

Direkte tilskud:	Programmet kan kun regne med direkte tilskud, hvorfor det ikke er velegnet til Passiv Solvarme.
Dokumentation mangler:	Da der ikke forefindes dokumentation til programmet, kan det ikke anvendes i praksis.
Engelske enheder:	Der anvendes kun engelske enheder i programmet.
En zone:	Programmet kan kun regne på en zone, hvilket må anses for utilstrækkeligt.
Forskningsprogram/generelt netværksprogram:	Programmet er et forskningsprogram baseret på en generel netværksmodel. Dette medfører, at programmet i princippet kan simulere hvad som helst; men det medfører samtidig, at det ikke er så let at anvende.
Stationær model:	Der anvendes en stationær grundmodel, hvilket betyder, at instationære forhold ikke kan simuleres. Dette betyder, at modellen ikke kan benyttes til passiv solvarme, hvor instationære forhold er af stor betydning.
WANG computer:	Programmet kan kun køre på en WANG computer, og da vi ikke har adgang til denne computer, kan vi ikke anvende programmet.

Program	Land
BLAST 3:0	USA
SERI-RES 1.0	USA
ESP	Storbritannien
DEROB IV	USA
DOE-2.1A	USA
LFB1	Belgien
MORE	Italien
STEMOD/DYWAN	Schweiz

En nærmere analyse viste at dokumentationen til MORE kun var skrevet på italiensk, og at faciliteterne i STEMOD/DYWAN var betydelig færre end i de øvrige programmer, hvorfor de to nævnte programmer tillige frasorteredes.

# Egnede edb-programmer til beregning af passiv solvarme

Resultatet af de foregående tre undersøgelser er sammenstillet i tabel 2.1-2. To af de viste programmer er imidlertid næsten identiske, idet Solar Energy Research Institute (SERI), USA lod det private firma Ecotope Group, Seattle, USA, udvikle SUNCODE ud fra SERI-RES. Oplysningerne angående "computere" er gældende for november 1984.

Land	Computer	Undersøgelse		
		Kommissionen for de Europæiske Fællesskaber	Littler	International Energy Agency (IEA) og forfatteren
USA	CDC, VAX, Harris		BLAST 3:0	BLAST 3:0
USA	CDC, VAX, PRIME, UNIVAC			SERI-RES 1.0
USA	CDC, PRIME	SUNCODE	SUNCODE	
Storbri- tannien	VAX, PRIME, DEC 10 el. 20 m.fl.	ESP	ESP	ESP
USA	CDC, UNIVAC, INTEL, IBM	DEROB IV	DEROB IV	DEROB IV
USA	CDC, IBM, DEC 10			DOE-2.1 A
Belgien	IBM	LFBI		LFBI
Italien	VAX, UNIVAC	MORE		

Tabel 2.1-2. Oversigt over resultaterne fra de tre beskrevne undersøgelser.

Som tidligere nævnt var dokumentationen i edb-programmet MORE kun skrevet på italiensk, hvorfor dette var uden interesse. Det belgiske edb-program LFBI havde if. personlig samtale med Hans Lund færre faciliteter og mindre brugervenlighed end det engelske ESP, hvorfor han klart anbefalede ESP. Der var således kun fem edb-programmer tilbage, idet SERI-RES 1.0 og SUNCODE betragtedes under et, da de er næsten identiske:

Program	Land
BLAST 3:0	USA
SERI-RES 1.0/SUNCODE	USA
ESP	Storbritannien
DEROB IV	USA
DOE-2.1A	USA

Forfatteren har i november 1984 beskrevet de udvalgte programmer nærmere for at få et overblik over hvad de enkelte programmer kan, hvorfor der henvises til denne rapport for en uddybende vurdering. En af de ting der kendetegner evalueringen er at der er mange faktorer der spiller ind ved et sådant valg. Det er derfor meget vanskeligt at vælge netop ét program.

Et af de vigtigste krav der imidlertid må stilles er, at det valgte program kan implementeres på en af de computere der er adgang til. Laboratoriet for Varmeisolering havde på daværende tidspunkt kun adgang til følgende computere via centernettet mellem de regionale edb-centre:

<u>Løreanstalt</u>	<u>Region</u>	<u>Computer</u>
Danmarks tekniske Højskole	UNI-C, Lyngby	IBM
Århus Universitet	UNI-C, Århus	CDC
Københavns Universitet	UNI-C, København	UNIVAC

Ud over adgang til disse computere har Laboratoriet i samarbejde med Danske Elværkers Forenings Udredningsafdeling (DEFU) haft mulighed for at køre på DEFU's VAX-computer. Alle de fire nævnte computere går under betegnelsen store computere (Main Frame).

Laboratoriet har i perioden omkring 1983 arbejdet med at implementere BLAST, SERI-RES og ESP, men det lykkedes kun at få BLAST og SERI-RES til at køre. BLAST blev implementeret på CDC, UNI-C, Århus af Frede Espensen og Stig Eidorff, og SERI-RES på UNIVAC, UNI-C, København af Ove Mørck.

Implementeringen af ESP blev via Hans Lund forsøgt af Ove Holmgård på DEFU's VAX-computer. Forsøget var forbundet med store vanskeligheder og blev opgivet i sommeren 1983, da det ville blive for omfattende et arbejde.

Laboratoriet havde således kun praktiske erfaringer med BLAST og SERI-RES, hvorimod de tre andre programmer kun har været studeret gennem andre universiteter og læreanstalter. Det var derfor kun muligt at få detaljeret kendskab til BLAST og SERI-RES, idet dette kun kan opnås ved at arbejde med programmerne. En endelig vurdering kunne således ikke gives, da dette ville kræve praktisk erfaring med alle programmerne.

Forfatteren har afslutningsvis i rapporten fra november 1984 sammenfattet hovedtrækkene ved de fem programmer og på baggrund af dette valgt BLAST, fordi programmet er detaljeret, beregningstiden er kort, og det er velegnet til passiv solvarme. Desuden kunne det implementeres på en computer Laboratoriet havde adgang til.

Det andet program, SERI-RES, Laboratoriet kunne benytte, har ikke så mange faciliteter som BLAST, men er til gengæld nemmere at anvende og er desuden velegnet til passiv solvarme.



Valget af BLAST kan derfor ikke betegnes som et éntydigt valg.

I de følgende år er udviklingen inden for edb-området gået meget stærkt, og mellemstore computere (Mini) og specielt personal computere (PC) er blevet meget almindelige. Dette har resulteret i et stort udviklingsarbejde inden for edb-programmer til beregning af bygningers energiforbrug og indeklima. Resultatet er blevet at alle fem programmer på nuværende tidspunkt (maj 1987) ligger på enten en mellemstor computer eller en personal computer. I tabel 2.1-3 er vist de aktuelle oplysninger angående hvilke computere de enkelte programmer ligger på. Tabellen kan kun betragtes som vejledende, da det er vanskeligt at kontrollere oplysningerne, ligesom graden af "support" af de enkelte versioner er meget forskellig. Eftersom SUNCODE er kommet i en PC-version, er denne refereret i stedet for SERI-RES, og den nyeste version af det femte program hedder DOE-2.1 C, hvorfor denne benyttes i det følgende.

Program	Computer		
	Stor computer (Main Frame)	Mellemstor computer (Mini)	Personal computer (PC)
BLAST 3:0	CDC VAX Harris	MicroVAX APOLLO, Domain Series 3000 HP9000	
SUNCODE	CDC VAX PRIME		PC
ESP	VAX PRIME (No support) DEC 10 (No support)	MicroVAX APOLLO, Domain Series 3000 SUN	
DEROB IV (DEROB VI)	CDC VAX UNIVAC CRAY	SUN INTEL SYS 310	
DOE-2.1 C	CDC VAX 780 DEC 10	MicroVAX SUN	PC

Tabel 2.1-3. Aktuelle oplysninger om hvilke computere de fem programmer kan anvendes på.

Som det fremgår af tabellen kan to af programmerne: SUNCODE og DOE-2.1 C køre på en personal computer. SUNCODE er via Ove Mørck's arbejde inden for Det Internationale Energi Agentur (IEA), Task VIII, (jf. kapitel 4) blevet installeret på Laboratoriets personal computere. Denne implementering har været meget enkel at foretage, set i forhold til hvor

tidkrævende det kan være at implementere programmer på de store computere. Forfatteren har i marts 1987 installeret den nyeste udgave af SUNCODE Version 5.5 på Laboratoriet for Varmeisolering.

PC-versionen af SUNCODE er meget brugervenlig og hurtig at sætte sig ind i. Den er derfor taget med ind i licentiatarbejdet sammen med BLAST, efter at den er kommet på Laboratoriet.

Af tabellen ses at BLAST nu kan fås til en række mellemstore computere, herunder APOLLO-Domain Series 3000, som Laboratoriet råder over. Der er imidlertid ingen planer om at prøve at implementere BLAST på denne maskine. Dette skyldes følgende: Det er tidkrævende da det er nødvendigt at "sætte sig ind i" en ny maskine, og det af forfatteren udviklede hjælpeprogram (jf. kapitel 3) er skrevet i Fortran IV og skal derfor omskrives til Fortran 77 for at kunne køre på APOLLO-computeren. Herudover vil det være nødvendigt at opbygge et nyt kommandosystem til kørsel med BLAST.

ESP er ved at blive implementeret på APOLLO'en af Lars Olsen i forbindelse med et EF-projekt.

## 2.2 Beregningsteori for valgte programmer

Ved valget af de to programmer BLAST og SUNCODE var det af interesse at se nærmere på modelopbygningen og beregningsteorien bag dem.

Modelopbygningen i BLAST er kort beskrevet i kapitel 3, idet der henvises til forfatterens publikation fra november 1984 for en mere detaljeret gennemgang. Med hensyn til beregningsteorien bag BLAST vil det blive for omfattende at gå i detaljer med denne, hvorfor der refereres til BLAST Support Office - 1984.

Den teoretiske baggrund for og brugen af SUNCODE er beskrevet i brugervejledningen til SUNCODE af De La Hunt, Mary Jane - 1985.

En af de grundlæggende forskelle mellem de to programmer er beregningen af den instationære varmeledning i bygningskonstruktionerne.

Beregningen af den instationære varmeledning udføres normalt i edb-programmer ved at benytte diskrete beregningsmetoder, hvilket vil sige at tiden deles op i tidsstep  $\Delta t$  på maksimalt en time. Denne beregning kræver løsning af et ligningssystem der repræsenterer al varmeudveksling i rummet. Dette betyder i den simpleste form én ligning for rumluften og én for hver overflade.

I det følgende vil beregningen af den instationære varmeledning i de to programmer blive beskrevet, idet der startes med grundteorien.

Instationær varmeledning

Ligningen for den generelle instationære varmeledning er af den paraboliske type og kan ifølge Hansen, Preben Nordgaard - 1978 skrives på formen:

$$\rho \cdot c \left( \frac{\partial T}{\partial \tau} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.2-1)$$

hvor

$\rho$	betegner densiteten	(kg/m <sup>3</sup> )
$c$	- varmekapaciteten	(J/kgK)
$\lambda$	- varmeledningsevnen	(W/mK)
$\tau$	- tiden	(s)
$T$	- temperaturen	(K)
$x, y, z$	- stedparametre	(m)

Ligningen er en tilstandsfunktion der beskriver hvordan temperaturfeltet i et vilkårligt legeme forandres i tiden som følge af varmeledning.

Differentieres et af leddene på højre side i ligning (2.2-1), fås:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial \lambda}{\partial T} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \frac{\partial \lambda}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.2-2)$$

Da leddet  $(\partial T / \partial x)^2$  indgår i ligning (2.2-2), er denne ligning og dermed ligning (2.2-1) ulineær. Da der for bygninger altid kan regnes med konstante fysiske data ( $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $c$ ), kan ligning (2.2-1) skrives på lineær form:

$$\rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.2-3)$$

idet  $\alpha = \lambda / \rho c$  er temperaturledningstallet (m<sup>2</sup>/s). Denne ligning betegnes som Fouriers varmeledningsligning.

I edb-programmer til simulering af termisk indeklimate regnes der altid en-dimensionalt ved beregningen af den instationære varmeledning for en væg, hvorfor (2.2-3) kan simplificeres til:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.2-4)$$

Denne ligning kan ikke benyttes direkte til undersøgelse af rums varmebalance, men det er muligt at lave forskellige tilnærmelser til den, se de efterfølgende afsnit. Det bliver herved muligt at opstille en varmebalance for rummet, hvor der indgår følgende tre former for varmetransmission:

1. Ledning
2. Stråling
3. Konvektion

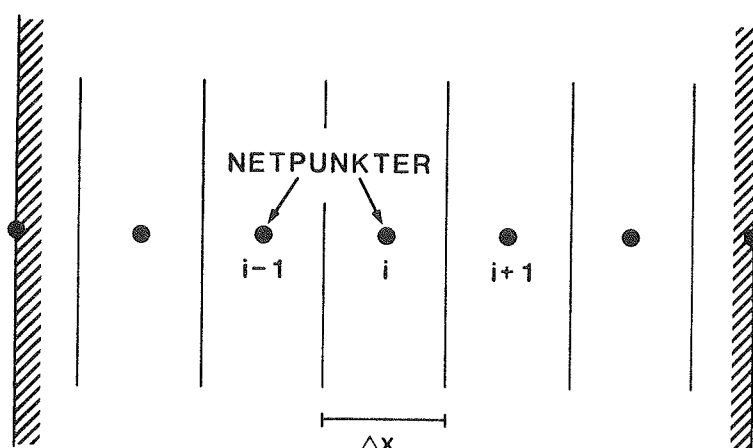
Den første benyttes ved varmeledningen gennem bygningskonstruktionerne, og de to andre benyttes ved varmeudvekslingen mellem overfladerne og rumluften. Alt efter hvorledes den partielle differentiaalligning løses, kan edb-programmerne deles op i forskellige kategorier. I denne sammenhæng er det SUNCODE og BLAST, der har interesse, hvorfor følgende to løsningsmetoder vil blive omtalt:

1. Differensmetoder - SUNCODE
2. Responsfaktormetoder - BLAST

### 2.2.1 Differensmetoder

Differensmetoder til beregning af varmeledningsproblemer har stor anvendelse, da det er muligt ved hjælp af edb-beregninger at løse selv meget komplicerede problemer. Differensmetoder kan deles op i eksplicitte og implicitte metoder. Ved de eksplicitte metoder løses en ligning for hver af de ubekendte parametre. Ved de implicitte metoder indgår hver af de ubekendte parametre i flere ligninger.

Princippet for beregningen er at Fouriers varmeledningsligning (2.2-4) omformes til en differensligning. Dette sker ved at inddele den væg, hvori det ønskes at få beregnet temperaturforløbet, i et antal punkter (differens netpunkter). Princippet er vist på figur 2.2-1, idet netpunkterne nummeres med "i".



Figur 2.2-1. Væg hvor der er indlagt netpunkter i en indbyrdes afstand  $\Delta x$ . "i" betegner den diskrete stedkoordinat.

Den endelige differensligning kan skrives på flere forskellige former afhængigt af hvilken tilnærmelse der benyttes. Ifølge De La Hunt, Mary Jane - 1985 benytter SUNCODE en eksplisit endelig differensmetode. Tilnærmelsen kan skrives på følgende form:

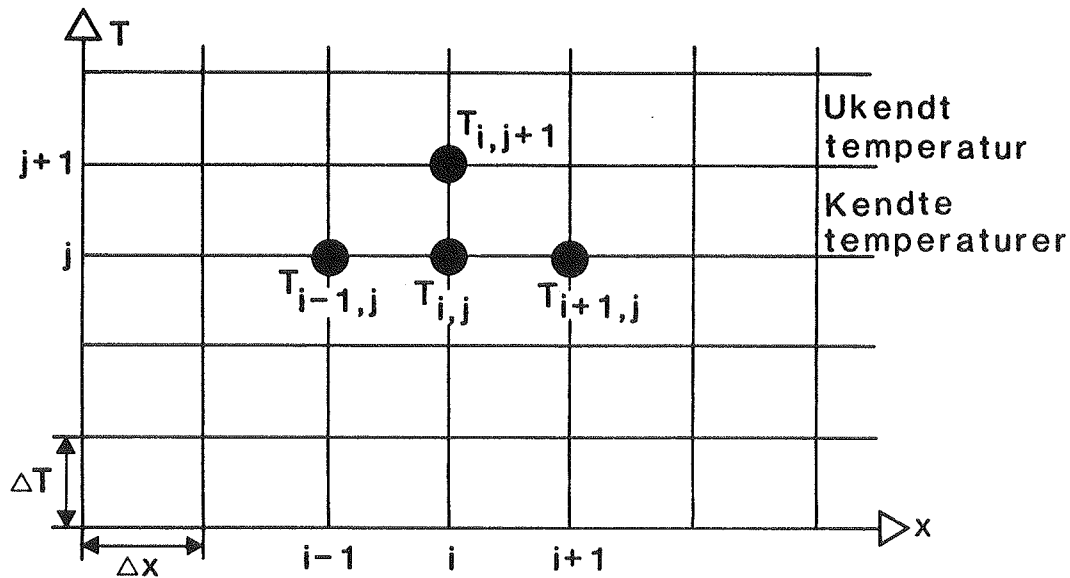
$$\frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{\Delta \tau} = \alpha \cdot \frac{(T_{i+1,j} - T_{i,j}) + (T_{i-1,j} - T_{i,j})}{\Delta x^2} \quad (2.2-5)$$

hvor det diskrete tidsstep  $\Delta \tau$  er forskellen mellem tidsniveauet  $j$  og  $j+1$ .

Ved at indsætte Fourier tallet  $R = \alpha \cdot \Delta \tau / (\Delta x)^2$  i ligning (2.2-5) og omordne, fås:

$$T_{i,j+1} = R \cdot T_{i-1,j} + R \cdot T_{i+1,j} + (1 - 2R) \cdot T_{i,j} \quad (2.2-6)$$

Herefter er det muligt på baggrund af de tre kendte temperaturer til tidspunktet  $j$ :  $T_{i-1,j}$ ,  $T_{i,j}$ ,  $T_{i+1,j}$  at finde den ukendte temperatur i det næste tidsstep  $j+1$ :  $T_{i,j+1}$ . Dette er illustreret på figur 2.2-2.



Figur 2.2-2. Den ukendte temperatur i det næste tidsstep  $j+1$  findes på baggrund af de kendte temperaturer i tidssteppet  $j$ .

For at ligning 2.2-6 kan anvendes, er det nødvendigt at stabilitetskravet er opfyldt. Ved at betragte ligning 2.2-6 nærmere ses det, at hvis koefficienten til  $T_{i,j}$  er negativ, kommer det til at betyde, at des større værdien er af  $T_{i,j}$ , des mindre vil værdien af  $T_{i,j+1}$  blive beregnet. Dette er uden fysisk mening. Det er derfor nødvendigt at koefficienten til  $T_{i,j}$  er større end eller lig 0 for at stabiliteten er opfyldt. Dette giver betingelsen:

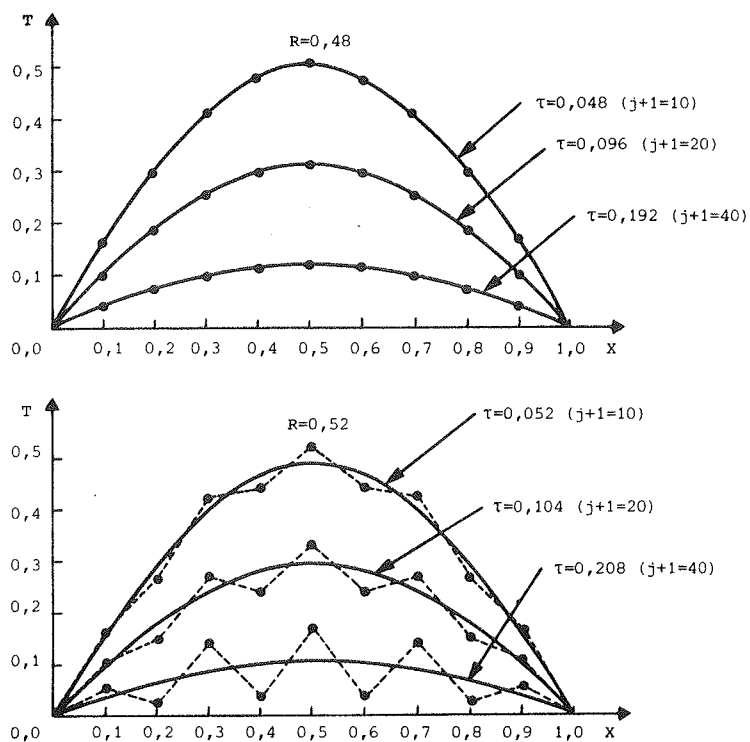
$$(1-2R) \geq 0 \Leftrightarrow R \leq 1/2 \quad (2.2-7)$$

Det er meget vigtigt at denne betingelse er opfyldt, hvilket fremgår af figur 2.2-3, hvor en analytisk løsning (korrekt) er sammenlignet med en endelig differensløsning for værdierne  $R = 0,48$  og  $R = 0,52$ .

Det ses af figuren at der er fin overensstemmelse for  $R = 0,48 < 0,5$  mellem den analytiske løsning og den endelige differensløsning. Derimod passer differensløsningen meget dårligt med den analytiske løsning når  $R = 0,52 > 0,5$ .

Den eksplícitte metode er beregningsmæssigt simpel at løse. Imidlertid er de tidsstep  $\Delta\tau$  der kan benyttes, afhængige af afstanden mellem differensnetpunkterne og materialeparametrene, idet ligning 2.2-7 giver betingelsen:

$$\Delta\tau \leq \frac{(\Delta x)^2}{2\alpha} = \frac{\rho \cdot c (\Delta x)^2}{2\lambda} \quad (2.2-8)$$



Figur 2.2-3. Sammenligning mellem en analytisk løsning (korrekt) og en endelig differensløsning.  
 Analytisk løsning: \_\_\_\_\_  
 Endelig differensløsning: .....  
 (Taget fra Smith, G.D.-1974 og redigeret om).

### 2.2.2 Responsfaktormetoder

Responsfaktormetoder er anvendt en del i USA og Canada til løsning af instationær varmeledning og anvendes i dag i en række edb-programmer til beregning af bygningers temperaturforhold og energiforbrug (NSBLD, NECAP, BLAST). De store fordele ved metoderne er at grænsebetingelserne ikke behøver at være periodestationære, og desuden at beregningstiden er lille, da det kun er nødvendigt at beregne en vægs responsfaktor en gang for alle. Metoden der anvendes i BLAST er en videreudvikling af den gængse responsfaktormetode og går under betegnelsen "Conduction Transfer Functions"-metoden. Metoden er beskrevet af Hittle, Douglas C. - 1981 og er baseret på en speciel summation af responsfaktorerne hvilket forøger beregningshastigheden ganske betragteligt. I det følgende vil kun basisprincippet ved responsfaktormetoden blive beskrevet, idet der henvises til den nævnte publikation for en nærmere redegørelse.

For en væg med konstante termodynamiske egenskaber er det muligt at benytte superpositionsprincippet til at løse Fouriers varmeledningsligning. Superpositionsprincippet er sammen med tidsserier en fundamental del af responsfaktormeto-

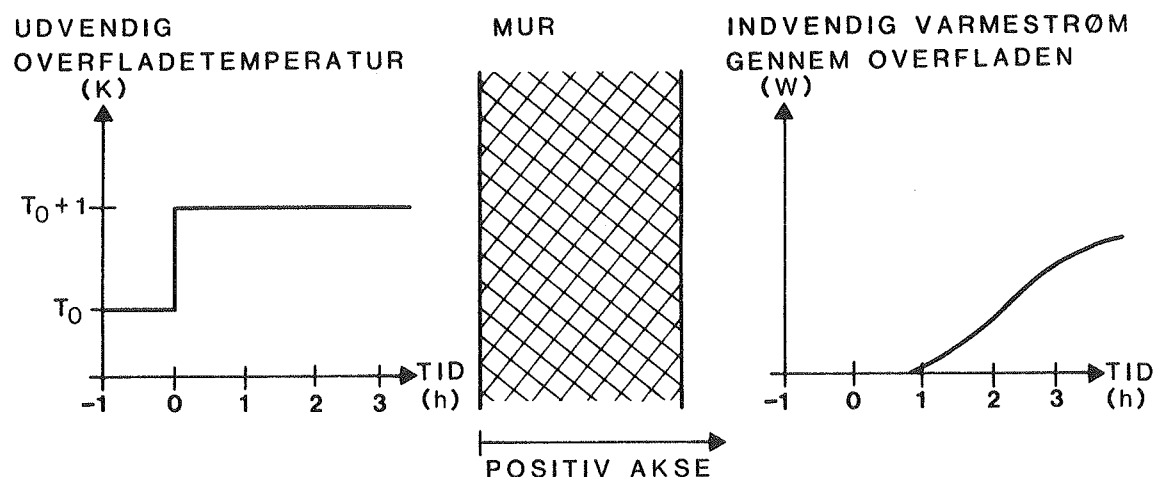
derne, hvorfor en forståelse for disse begreber er en forudsætning.

### Superpositionsprincippet

Linearitet og invariabilitet er en betingelse for enhver superpositionsmetode. Ved linearitet forstås, at systemet kan fremstilles ved et sæt lineære ligninger, hvorved størrelsen af en påvirkning på systemet og dets respons herpå er proportionale. Ved invariabilitet forstås, at en påvirkning af systemet til forskellige tidspunkter altid medfører samme respons fra systemet. Superpositionsprincippet kan herefter sammenfattes på følgende måde:

"Når et system påføres et antal påvirkninger, virker hver af påvirkningerne uafhængigt af de andre, og den totale forandring er summen af effekten for de uafhængige påvirkninger".

For at belyse begrebet lidt nærmere betragtes følgende hypotetiske eksempel med en mur i det én-dimensionale plan, der til at begynde med har en ensformigt fordelt temperatur  $T_0$ . Temperaturen af den udvendige overflade hæves herefter momentant til en temperatur en grad højere end  $T_0$ , mens den indvendige temperatur bliver holdt på  $T_0$ . Dette vil give anledning til en med tiden varierende varmestrøm gennem den indvendige overflade af væggen. Eksemplet er illustreret på figur 2.2-4.



Figur 2.2-4. Mur med ensformigt fordelt temperatur  $T_0$ , hvor den udvendige overfladetemperatur momentant forøges en grad til tiden nul, hvilket giver anledning til en varmestrøm gennem den indvendige overflade (varmestrømmen er fortegnet).

Hvis den udvendige overfladetemperatur hæves to grader i stedet for en, vil varmestrømmen gennem den indvendige overflade blive dobbelt så stor. Varmestrømmens variation med

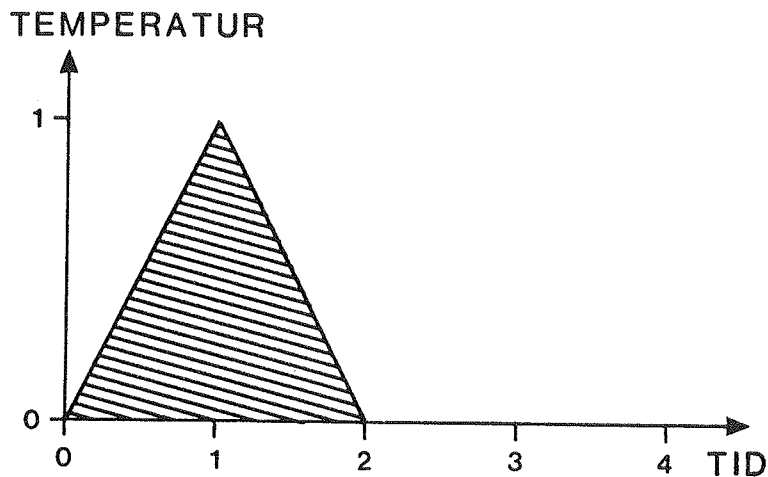


tiden kan også betegnes som væggens respons på den givne påvirkning.

### Tidsserier

I det skitserede eksempel blev der benyttet en vedvarende temperaturstigning på én grad. I praksis er der behov for at beskrive variationen af den udvendige temperatur som en kontinuert funktion. De første metoder gik ud på at tilnærme denne funktion med firkantimpulser eller stepfunktioner.

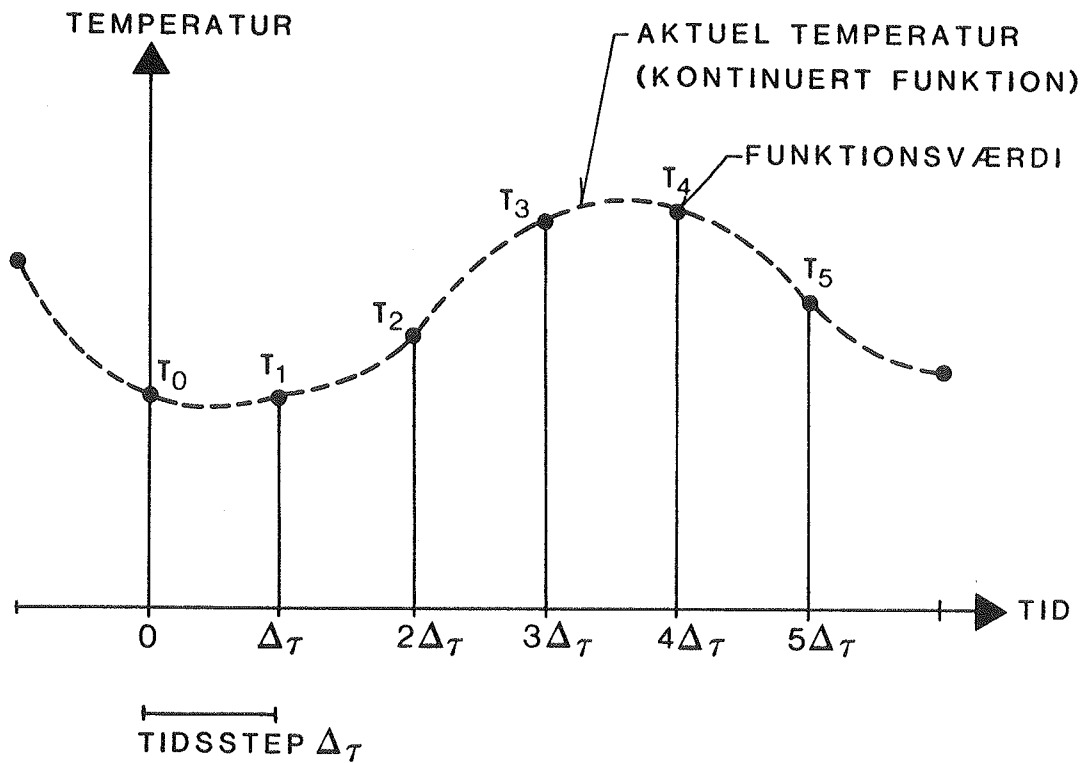
Mitalas, G.P. et al. - 1967 og Stephenson, D.G. et al. - 1967 forbedrede denne metode ved at introducere overlappende trekantimpulser. Som enhedsimpuls anvendes en trekant med højden én grad og bredden to tidsintervaller (fx to timer), jf. figur 2.2-5.



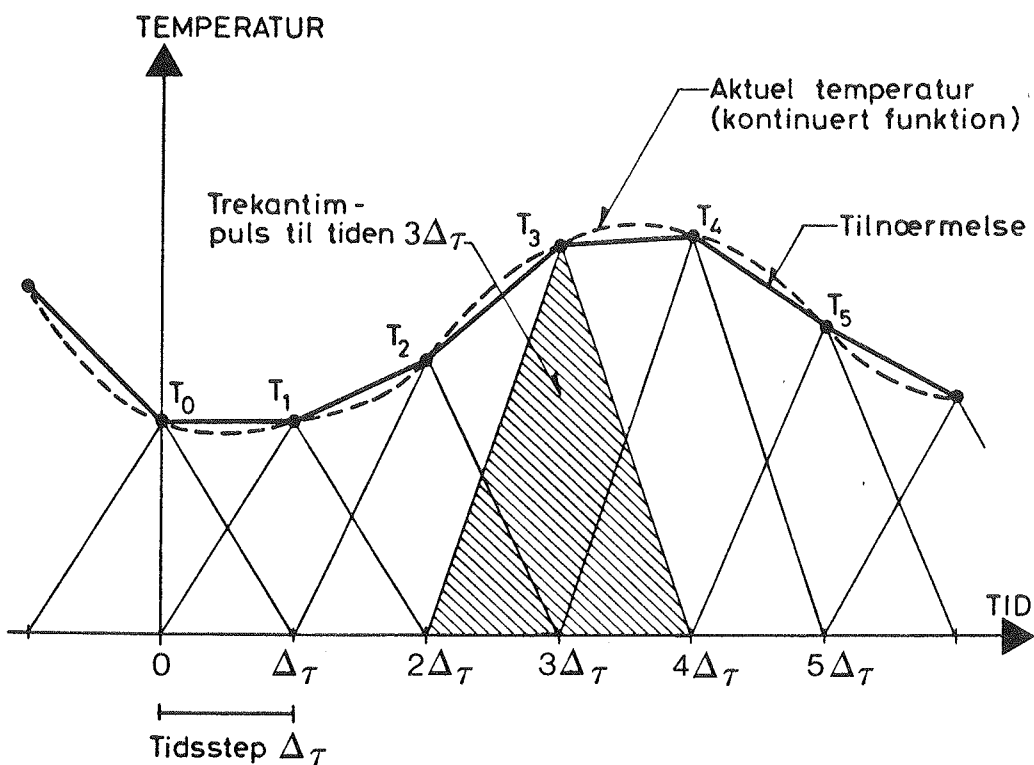
Figur 2.2-5. Enheds-trekantimpuls med højden én grad og bredden to tidsintervaller.

Princippet er herefter at beskrive den kontinuerte funktion ved at angive funktionsværdierne til fremadskridende ækvivalente tidsintervaller med en tidsserie, figur 2.2-6.

Hvert led i tidsserien repræsenteres herefter af en trekantimpuls med centrum i det pågældende tidspunkt og en bredde på det dobbelte af det tidsinterval der benyttes i beregningen. Den kontinuerte funktion i figur 2.2-6 er i figur 2.2-7 tilnærmet med en serie af trekantimpulser. Denne approksimation er en lineær interpolation mellem de enkelte tidspunkter, og præcisionen af denne afhænger af størrelsen af tidsintervallet. Ved brug af tilnærmelsen vist på figur 2.2-7 er det muligt at udregne selv komplicerede påvirkninger, idet tidsserierne følger de kumulative og distributive love, hvorfor de kan adderes, subtraheres, multipliceres og divideres. Det er derfor tilstrækkeligt at beregne systemets respons på én enheds-trekantimpuls, hvorefter det er muligt at udregne responsen på en vilkårlig påvirkning.



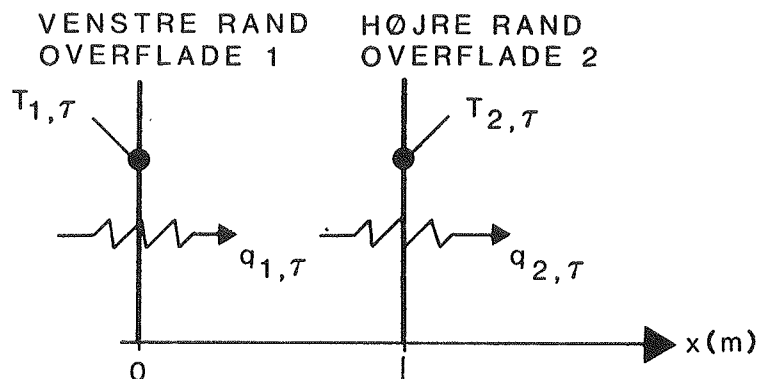
Figur 2.2-6. Kontinuerlig funktion angivet ved funktionsværdierne svarende til fremadskridende ækvivalente tidsintervaller.



Figur 2.2-7. Tidsserie af trekantimpulser tilnærmende et kontinuerligt funktionsforløb.

### Responsfaktorer

For at forstå anvendelsen af superpositionsprincippet for varmemstrømme gennem en væg betragtes figur 2.2-8, hvor en væg er skematisk vist med en venstre rand (overflade 1) og en højre rand (overflade 2). Der er fire variabler der har interesse: to overfladetemperaturer og to varmemstrømme gennem disse overflader. Der er således tale om et system med to drivende kræfter (temperaturer) og to strømme (varmemstrømme).

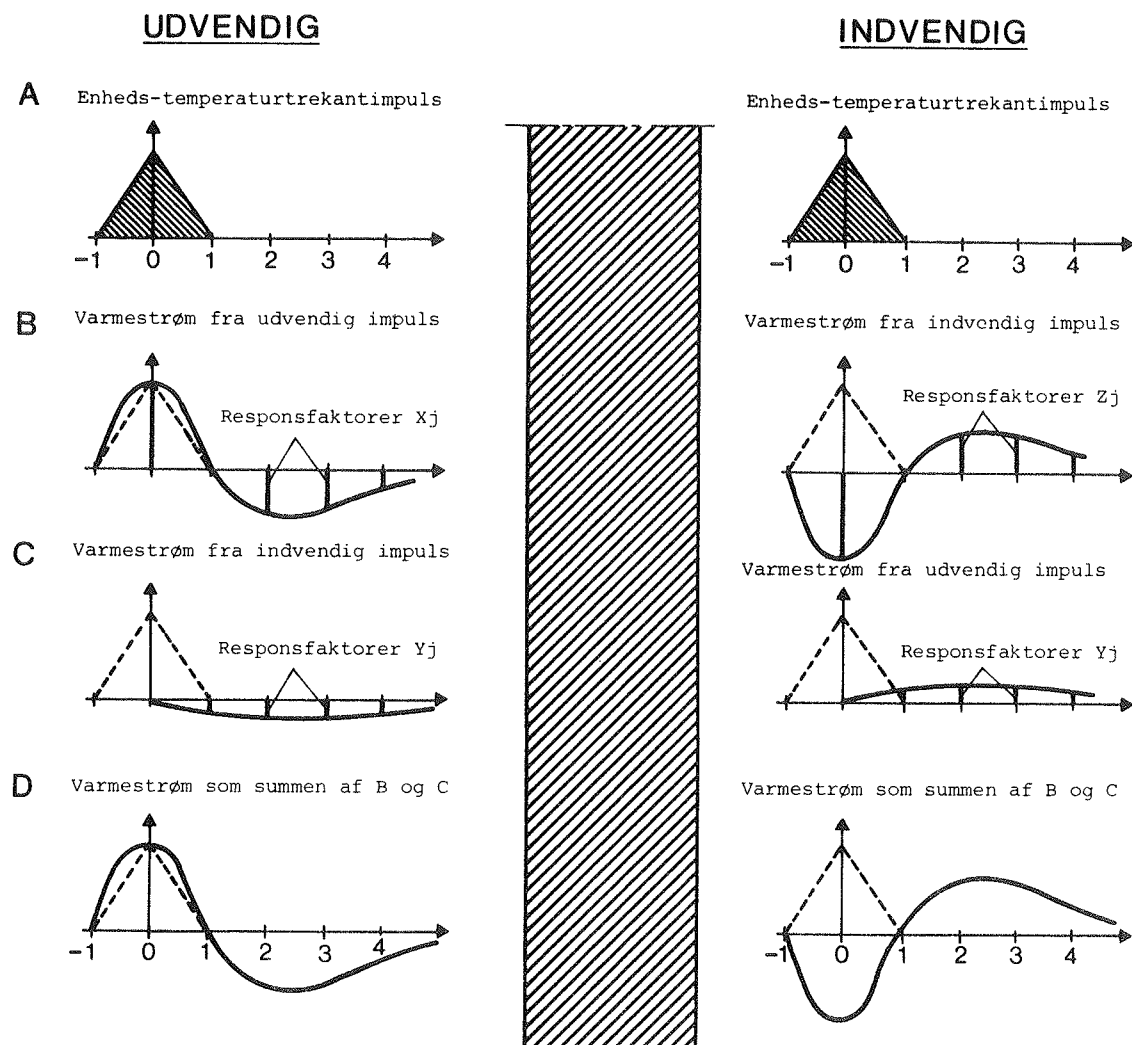


Figur 2.2-8. Væg med de fire variabler der har interesse: to overfladetemperaturer og to varmemstrømme.

Hvis der bliver lavet en ændring af temperaturen på den venstre rand, vil dette have en effekt på varmemstrømmen gennem begge randene. Tilsvarende gælder for den højre rand; men effekten behøver ikke at være den samme med mindre væggen er symmetrisk. For at forklare udviklingen af responsfaktor superpositionsteknikken er det en fordel at betragte varmemstrømmen på hver side som værende en sum af varmemstrømme fremkommet ved temperaturvariationer på den samme og den modsatte side.

Ved at betragte figur 2.2-9 kan principperne for superpositionen ses. En enheds-trekantimpuls med højden én grad bliver påtrykt på begge overflader til tiden 0, figur 2.2-9A. Disse påvirkninger giver anledning til en forøgelse af varmemstrømmen på den samme side som de bliver påtrykt, figur 2.2-9B. Desuden producerer de også en varmemstrøm på den modsatte side af væggen, som vist på figur 2.2-9C. Størrelsen af disse varmemstrømme ved tidsintervaller  $\Delta\tau$  er responsfaktorerne. De bliver benævnt som følger:

- X for varmemstrømmen gennem den venstre rand hidrørende fra en temperaturimpuls på den venstre rand.
- Y for varmemstrømmen gennem randen modsat temperaturimpulsen.
- Z for varmemstrømmen gennem den højre rand hidrørende fra en temperaturimpuls på den højre rand.



Figur 2.2-9. Skematisk illustration af varmemstrømme ved hjælp af superpositionsprincippet (varmemstrømmen er fortegnet).

Idéen med at summere disse varmemstrømme kan sammenfattes på følgende måde:

1. Den kontinuerte temperaturfunktion på figur 2.2-7 erstattes med en tidsserie af trekantimpulser for temperaturerne. Dette gøres for både den højre og venstre rand.
2. Varmestrømmen fra hver impuls på hver side bliver bestemt ved at eskalere responsen fra en enhedsimpuls med højden af den aktuelle temperaturimpuls.
3. Til slut lægges de eskalerede strømme hidrørende fra temperaturimpulserne på begge sider sammen. Teoretisk har en temperaturimpuls en virkning i uendelig lang tid, men i praksis dør den ud efter et vist antal tidsintervaller.

Matematisk kan de tre trin skrives som følger:

Varmestrøm gennem venstre rand:

$$q_{1,\tau} = \sum_{j=0}^{\infty} T_{1,\tau-j \cdot \Delta\tau} \cdot X_j - \sum_{j=0}^{\infty} T_{2,\tau-j \cdot \Delta\tau} \cdot Y_j \quad (2.2-9)$$

Varmestrøm gennem højre rand:

$$q_{2,\tau} = \sum_{j=0}^{\infty} T_{1,\tau-j \cdot \Delta\tau} \cdot Y_j - \sum_{j=0}^{\infty} T_{2,\tau-j \cdot \Delta\tau} \cdot Z_j \quad (2.2-10)$$

hvor  $X_j$  betegner til tiden  $j \cdot \Delta\tau$  sekvensen af tal-responsfaktorer, som er varmemstrømme på den venstre rand resulterende fra en enheds-trekant temperaturimpuls på den venstre rand til tiden  $\tau = 0$ ,  $j = 0, 1, 2 \dots$ .

$Y_j$  betegner til tiden  $j \cdot \Delta\tau$  sekvensen af tal-responsfaktorer, som er varmemstrømme på den modsatte rand af temperaturimpulsen resulterende fra en enheds-trekant temperaturimpuls til tiden  $\tau = 0$ ,  $j = 0, 1, 2 \dots$ .

$Z_j$  samme som  $X_j$  hvis væggen er symmetrisk, ellers er definitionen den samme som for  $X_j$ , idet ordet "venstre" substitueres med "højre".

$\tau$  er tiden

$\Delta\tau$  bredden af tidsintervallet. Enheds-trekantimpulsen har bredden  $2 \cdot \Delta\tau$ .

$q_1$  er varmemstrømmen gennem den venstre rand.

$q_2$  er varmemstrømmen gennem den højre rand.

$T_1$  temperaturen på den venstre rand.

$T_2$  temperaturen på den højre rand.

### 2.3 Forskelle mellem BLAST og SUNCODE

Ud over den grundlæggende forskel i grundmodellen i de to programmer er der en hel del andre træk der adskiller programmerne. I det følgende vil hovedtrækkene blive trukket frem.

I BLAST kan beregnes både temperatur/nettoenergiforbrug, ventilationssystem og centralvarme/køleanlæg, hvorimod SUNCODE ikke simulerer opvarmningssystemet. Imidlertid er de anlæg der simuleres med BLAST typisk amerikanske systemer, hvorfor der har været nogle problemer med at anvende dem. Ved undersøgelse af passiv solvarme har der imidlertid kun

været behov for at se på temperatur/nettoenergiforbrug, hvorfor begge programmer har været velegnede til dette.

### Stor\_computer\_kontra\_personal\_computer

#### BLAST

BLAST ligger som nævnt på en stor computer, og kørsel med programmet er baseret på en brugerdefineret inputfil. Eventuelle fejl i inputfilen findes ved at køre programmet og derefter finde fejlene i outputfilen, hvorefter den fejlrettede inputfil kan sendes igen.

Output fra BLAST er relativt omfattende, og dette har tidligere været lidt af et problem fordi filerne skulle printes ud ved UNI-C, Århus, og derefter sendes med posten, eller også skulle dele af dem printes ud ved brug af en slaveprinter. I 1986 blev det imidlertid muligt at overføre filer fra UNI-C, Århus, til UNI-C, Lyngby, og få dem printet ud.

Ved kørsel på en stor computer skal der betales for CPU tid, printning af filer, tilkoblingstid, lagerplads etc. CPU tiden er i denne sammenhæng den vigtigste faktor. Prisen for denne afhænger af prioritet af jobbet og betalingsklasse for brugeren. Laboratoriet ligger i den forskningsmæssige betalingsklasse, der er den laveste. Private firmaer ligger i den højeste betalingsklasse, hvilket betyder en femdobling af taksten for CPU tid.

Bygning	Årssimulering - Prioritet P1	
	Betalings- klasse Forskning	Betalings- klasse Kommerciel
Tubberupvænge uden glastilbygning 2 zoner, simpel model (kapitel 5)	34 kr	170 kr
Smakkebo 7 zoner, detaljeret model (kapitel 4.3)	80 kr	400 kr

Figur 2.3-1. Priseksempler for årssimuleringer med BLAST på den laveste prioritet - P1 (Forår 1987).

Med hensyn til prioriteten er der tre muligheder: P3 - 100% (fuld pris), P2 - 50% og P1 - 25%. I dagtimerne mandag til fredag er det nødvendigt at benytte prioritet P3. Denne benyttes således ofte til at køre korte simuleringer med BLAST eller for at checke inputfilen. Årssimuleringer sendes normalt på den laveste prioritet - P1, hvilket bety-

der at de bliver kørt om natten. For at give en idé om prisniveauet for at køre årssimuleringer med BLAST er der på figur 2.3-1 vist et par priseksempler.

## SUNCODE

SUNCODE kører på en personal computer, hvilket gør at det kun er anskaffelsesprisen for computeren inkl. service og prisen for programmet på 10500 kr. ekskl. moms (august 1987) der skal betales. Da de fleste råder over personal computere til andre formål, skal der efter køb af programmet reelt kun betales for kørselstid. Denne pris afhænger af den afskrivningspolitik der anvendes, og er selvfølgelig meget afhængig af om det er et privat firma eller en forskningsinstitution.

En af fordelene ved at benytte personal computer er at hele enheden er samlet på ét sted med skærm, computer og printer, hvilket gør det mere overskueligt. Desuden er prisen uafhængig af tidspunktet på dagen.

Kørsel med SUNCODE er delt op i to hovedprogrammer: EDIT og LOADS. EDIT tager sig af selve editeringen og oversættelsen af inputfilen. Hvis brugeren laver nogle input-fejl, bliver disse straks udpeget af programmet. Dette gør det meget let at finde fejl og herved også meget brugervenligt. Det andet program LOADS tager sig af selve simuleringen med den kompilerede inputfil fra EDIT.

## Antal\_rum/flader

BLAST kan regne på op til 20 rum med indbyrdes varmeudveksling, hvorimod grænsen i SUNCODE ligger på 10. I praksis er det imidlertid det samlede antal flader der sætter grænsen for hvor detaljerede bygninger der kan beregnes. Generelt kan det imidlertid konstateres at grænserne er sat så højt at der fås alt for komplicerede beregningsmodeller hvis man nærmer sig disse grænser, jf. kapitel 4.3 om Smakkebo.

## Geometri

I BLAST er der lagt op til et meget højt detaljeringsniveau, hvor geometrien for de enkelte rum beskrives eksakt med indgående dimensioner og koordinater. I mange tilfælde har dette detaljeringsniveau ikke den fulde berettigelse og medfører at inputfilen ikke er så overskuelig. I SUNCODE beskrives rummene blot ved flader med tilhørende arealer. Dette forenkler input-arbejdet ganske betragteligt.

Overgangsisolanser**BLAST**

I varmebalancen for BLAST indgår beregning af strålingsudvekslingen mellem overfladerne ved hjælp af en middelstrålingstemperaturteknik. Dette medfører at overfladerne har strålingsudveksling til en middelstrålingstemperatur i stedet for med hinanden. Herudover beregnes strålingsudvekslingen mellem udvendige overflader (vægge, tage, vinduer) og jordoverfladen og himlen.

Indflydelsen af overfladeruhed og variation i vindhastighed medtages i forbindelse med beregning af de udvendige overfladers konvektive overgangsisolanser.

De indvendige overfladers konvektive overgangsisolanser justeres efter fladernes hældning, baseret på om fladerne er varmere eller koldere end rumluften. Brugeren kan ikke ændre på disse værdier hvilket er en ulempe hvis overgangsisolansens indflydelse ønskes nærmere undersøgt.

**SUNCODE**

I SUNCODE anvendes en resulterende overgangsisolans for stråling og konvektion. Dette svarer til det princip der benyttes i Dansk Ingeniørsforening - 1986, hvor den indvendige overgangsisolans sættes til  $0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$  og den udvendige til  $0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$ .

Naturligt luftskifte

I SUNCODE opgiver brugeren et specielt areal og en højde, hvorudfra rummets volumen udregnes. Brugeren opgiver herefter luftskiftet pr. time der skal benyttes. I BLAST angiver brugeren derimod et luftskifte i  $\text{m}^3/\text{s}$ , hvilket gør det vanskeligt umiddelbart at se hvad luftskiftet er pr. time. I output kommer der godt nok en oversigt over det, men dette tal er udregnet på baggrund af volumenet baseret på de varmetekniske flader. Da disse normalt er større end svarende til de indvendige mål, bliver luftskiftet beregnet for lille i output-udskriften, hvorfor brugeren evt. må kontrollere det manuelt.

Solindfald på flader

I BLAST medtages indvendig og udvendig absorption for lang- og kortbølget stråling, og fordelingen af solindfald sker i standardversionen af programmet på gulvet. Brugeren kan herudover selv specificere absorptionsforhold for lang- og kortbølget stråling eller lade programmet benytte nogle standardværdier (default values) på henholdsvis 0,90 og 0,75.



I SUNCODE angives hvor mange procent af solindfaldet der absorberes på de enkelte flader, samt hvor mange procent der går direkte til rumluften eller tabes ud gennem vinduet. Denne sum skal brugeren selv sørge for bliver 100 procent, ellers kommer der en fejludskrift fra programmet.

Det er en fordel i SUNCODE at solindfaldet kan fordeles direkte til rumluften. Dette kan kun lade sig gøre i BLAST ved at indføre nogle fiktive flader, og i dette tilfælde kun i standardversionen med solindfald på gulvet. Til gengæld har SUNCODE den ulempe at det kan give mange forskellige resultater efter hvorledes solindfaldet fordeles.

#### Tidsstep\_pr.\_time

BLAST anvender et fast tidsstep på en gang i timen. For SUNCODE's vedkommende skal stabilitetskriteriet i ligning 2.2-8 være opfyldt, hvilket bestemmer det mindste antal tidsstep pr. time. Brugeren kan imidlertid godt vælge et større antal tidsstep pr. time hvis der er behov for det. Dette er en stor fordel ved SUNCODE fremfor BLAST. Dette viste sig især ved en undersøgelse med brug af BLAST af diskontinuert opvarmede kirkerum, hvor varmesystemet skal hæve lufttemperaturen hurtigt. Der var tidssteppet på en time alt for stort til at give et billede af opvarmningsforløbet. Her ville SUNCODE sandsynligvis have givet bedre resultater, men dette er ikke undersøgt.

#### Vejrdata

BLAST benytter en speciel vejrdatabil der er genereret ved brug af hjælpeprogrammet WIFE, jf. kapitel 3.1.2. Dette hjælpeprogram er i stand til at læse en lang række forskellige vejrdatabiformater. SUNCODE læser derimod vejrdata direkte fra en fil og kan kun læse formatet TMY (NOAA Test Meteorological Year) og forkortede formater heraf. BLAST-systemet er således mere fleksibelt med hensyn til vejrdata. I praksis benyttes if. Michael Holtz, WIFE-programmet også til at generere vejrdata til SUNCODE, fordi det er så generelt anvendeligt. Dette er også gjort af forfatteren med hensyn til vejrdata fra Smakkebo, kapitel 4.3.

### 3. EDB-ARBEJDE

Efter valget af BLAST i 1983 skulle programmet anvendes i praksis. Inden dette kunne lade sig gøre, var det imidlertid nødvendigt at sætte sig grundigt ind i at bruge programmet og få den reviderede version implementeret her i Danmark. Herudover var der behov for at opbygge et styresystem til at håndtere de indgående filer og udbygge programmet, således at det fik flere output-faciliteter.

Problemet med et hvilket som helst program er, at ingen af dem er i stand til at opfylde alle tænkelige muligheder for ønsket output. Det var derfor et af formålene i dette projekt at modificere programmet således, at de output-resultater der havde interesse kunne produceres. Det viste sig imidlertid, at det var alt for kompliceret og besværligt at lave ændringer i selve BLAST-programmet, hvorfor opbygningen af et separat mindre program "JC-WRITER" blev påbegyndt.

I det følgende vil BLAST, det udførte edb-arbejde og det tilhørende undervisningsmateriale blive beskrevet, idet der henvises til de i det efterfølgende nævnte publikationer for nærmere oplysninger.

#### 3.1 Beskrivelse af BLAST-systemet

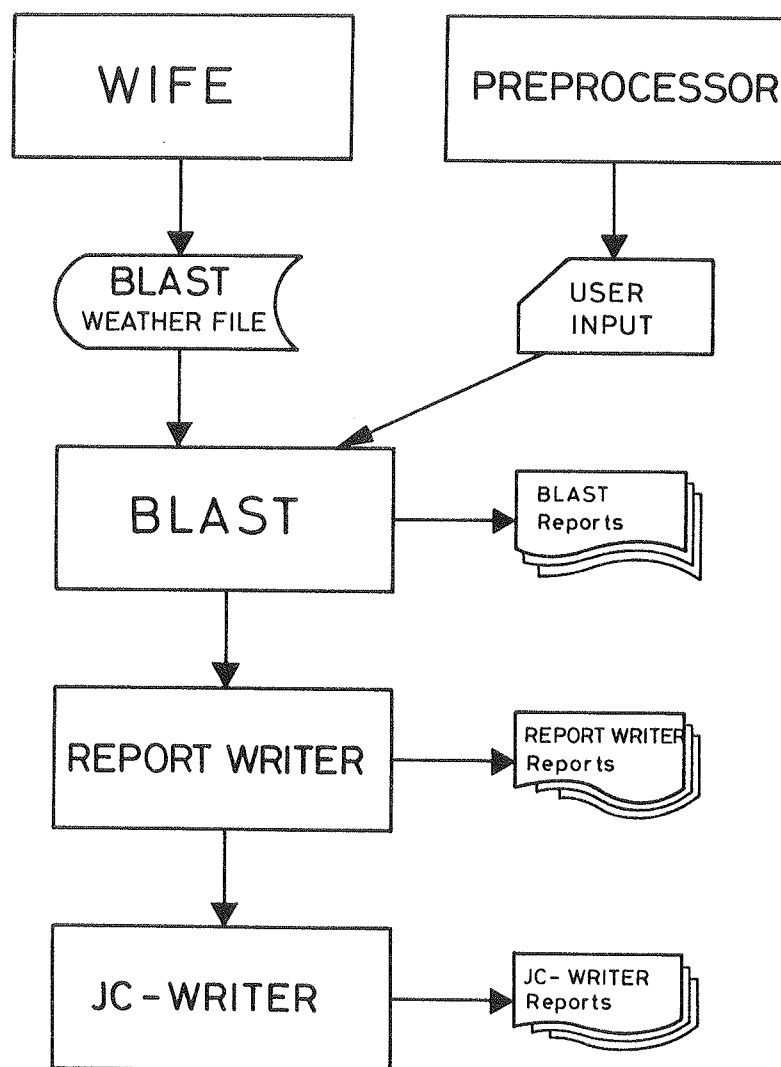
BLAST, the Building Loads Analysis and System Thermodynamics program, er udviklet af Construction Engineering Research Laboratory (CERL), Illinois, USA.

BLAST er udviklet på en datamat leveret af CDC. Programmet er skrevet i Fortran 4, men for at kunne benytte det på andre computere er der lavet en version i Fortran 77. Denne version af programmet kan if. tabel 2.1-3 køre på følgende computere: CDC, VAX, Harris, MicroVAX, APOLLO-Domain Series 3000, HP9000. BLAST (Fortran 4) blev implementeret på en CDC-maskine ved UNI-C, Århus i 1982/83. Denne version af programmet gik under betegnelsen "BLAST, Version 3:0 level 000". Der blev imidlertid konstateret en række fejl og mangler ved den, som gjorde at den ikke fungerede tilfredsstillende. I forbindelse med forfatterens studierejse til BLAST Support Office, Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, i november 1983 til februar 1984, blev den nyeste version på det pågældende tidspunkt "BLAST, Version 3:0, level 107" hentet til Danmark. Denne version blev implementeret på UNI-C, Århus, sommeren 1984 og fungerer fuldt ud tilfredsstillende.

Brugen af manualerne til BLAST har tidligere være generet af, at tre af dem var skrevet til BLAST Version 2:0, og den fjerde var skrevet til BLAST Version 3:0, og således dannede et supplement til de tre første. Dette medførte, at det var nødvendigt at læse i to manualer samtidig for at få den nødvendige information. Efter forfatterens studierejse til BLAST Support Office fik Laboratoriet for Varmeisolering en

kopi af en uofficiel kombineret manual, der sammenflettede BLAST Version 2:0 og 3:0 i én manual. Dette har været en stor fordel i det videre arbejde. I april 1986 udgav BLAST Support Office denne manual i gennemarbejdet form i "BLAST 3:0, User's Manual til BLAST".

### BLAST-systemet



Figur 3.1-1. Skematisk oversigt over det danske modificerede BLAST-system.

Det danske BLAST-system er vist på figur 3.1-1 og består af fem edb-programmer, hver med følgende funktioner:

BLAST : Selve energiberegningsprogrammet.

REPORT-WRITER: Producerer special-output-rapporter fra BLAST

JC-WRITER : Udviklet af forfatteren ud fra ønsket om at få mere brugervenligt output, og output-formater der ikke findes i BLAST.

PREPROCESSOR : Interaktivt program, der fremstiller inputfilen til BLAST.

WIFE : The Weather Information File Encoder (WIFE) fremstiller vejrdata til BLAST ud fra en række internationale formater.

Programmerne i BLAST-systemet, med undtagelse af JC-WRITER, er beskrevet nærmere af forfatteren i november 1984, hvorfor der kun vil blive givet en kort omtale her.

### 3.1.1 BLAST

BLAST er kerneprogrammet i BLAST-systemet og foretager energiberegningen. Programmet kan benyttes til beregning af energiforbrug, valg af energisystemer og til bestemmelse af de samlede energiomkostninger i bygninger. Programmet består af tre hoveddele:

1. Beregning af temperatur og nettoenergiforbrug (Building loads)
2. Beregning af ventilationssystem (Air handling system)
3. Beregning af centralvarme/køleanlæg og økonomi for det samlede projekt (Plants, Economic)

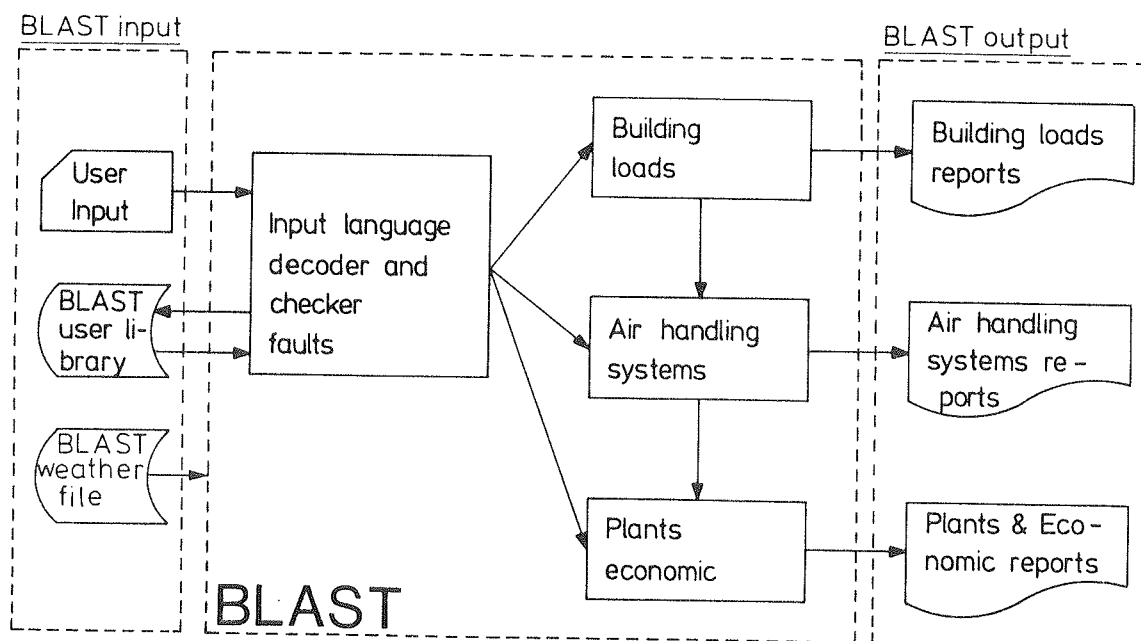
Programmet er omfattende og har gode algoritmer til beregning af belastninger, simulering af ventilationssystemer og til bestemmelse af centralvarme/køleanlæg. Programmet har i alt 120.000 programlinjer fordelt på ti underprogrammer, hvilket er beskrevet af forfatteren i oktober 1984.

Opbygningen af BLAST er skematisk vist på figur 3.1-2. Figuren består af tre dele:

1. Input til BLAST
2. BLAST-beregningen
3. Output fra BLAST

Input til BLAST består af tre filer: 1) Inputfilen (User Input), der beskriver den ønskede bygning med tilhørende ventilationsanlæg og centralvarme/køleanlæg, 2) BLAST-biblioteket (BLAST user library), hvor materialer, konstruktioner, belastningsprofiler etc. ligger, 3) BLAST vejrdatafil (BLAST weather file, WTHRFL) der indeholder vejrdata på timebasis for et helt år.

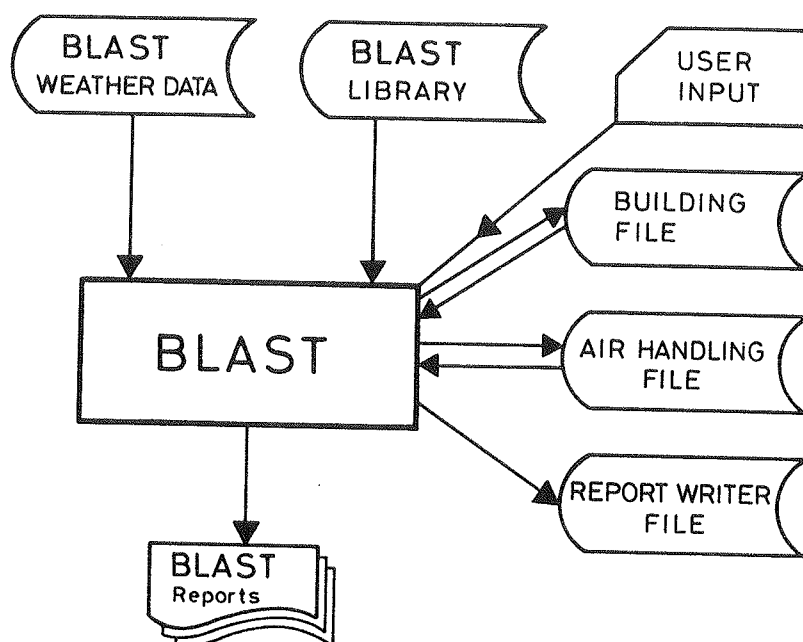
BLAST-beregningen foregår i tre dele: 1) Temperatur og nettoenergiforbrug (Building loads), 2) Ventilationssystem (Air handling system), 3) Centralvarme/køleanlæg og økonomi (Plants, Economic). Resultaterne på timebasis fra den første del af beregningerne bliver gemt i "Building loads data



Figur 3.1-2. Skematisk oversigt over BLAST-programmet.

file" (BLDFL), og fra den anden del i "Air handling loads data file" (AHLDFL), jf. figur 3.1-3. Herudover er der mulighed for at gemme brugervalgte parametre i "Optimal report file" (RPTFLE). Disse filer kan herefter anvendes dels af programmet selv for BLDFL og AHLDFL's vedkommende, og dels af REPORT-WRITER og JC-WRITER.

Output fra BLAST består dels af en række automatiske rapporter fra de tre dele af programmet, og dels af en lang række rapporter, som kan specificeres specielt. I alt er det muligt at få 96 forskellige rapporter, der beskriver resultater og parametre fra beregningen.



Figur 3.1-3. BLAST med tilhørende filer.

## Bygningsbeskrivelse

Opbygningen af rummodellen tager sit udgangspunkt i bygningsbeskrivelsen, hvor der gøres rede for bygningsgeometrien og de indgående konstruktioner med tilhørende materialer.

Materialer og bygningskonstruktioner: De enkelte materialer beskrives ved hjælp af oplysninger om tykkelse, varmeledningstal, varmfylde og densitet (figur 3.1-4). Alternativt kan materialer med lav varmekapacitet specificeres ved kun at angive en isolans for materialet. Ud fra de enkelte materialegag opbygges herefter bygningskonstruktionerne (figur 3.1-5).

Koordinatsystem og retningsangivelser: BLAST anvender kartesiske koordinater ved beskrivelsen af fladerne i zonerne. Z-aksen peger altid opad, hvorimod X- og Y-aksernes retninger er afhængige af origos placering i forhold til bygningen. Retningerne i programmerne er defineret i grader med uret: Nord =  $0^\circ$ , Øst =  $90^\circ$ , Syd =  $180^\circ$  og Vest =  $270^\circ$ .

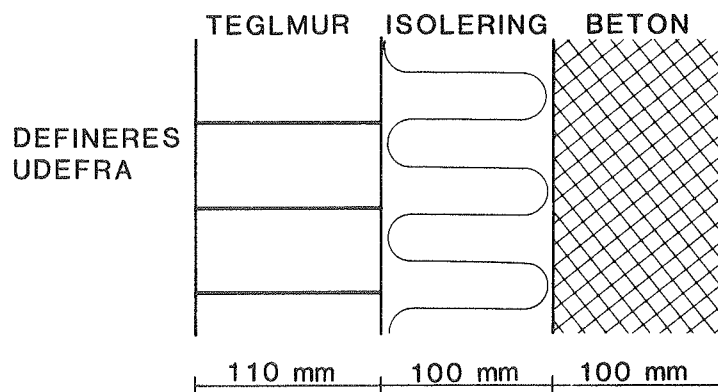
Optegning af simplificeret bygning: Optegningen af en specifik bygning bør altid simplificeres så meget som muligt under hensyntagen til den ønskede beregningsnøjagtighed. Fra den forenklede bygning konstrueres en tegning til brug for beregningen, hvor de enkelte vægge er ækvivaleret med en linje. På figur 3.1-6 er vist et eksempel på en simplificeret optegning af et parcelhus.



Figur 3.1-4. Eksempel på nødvendige parametre til beskrivelse af 100 mm tykt betonlag.

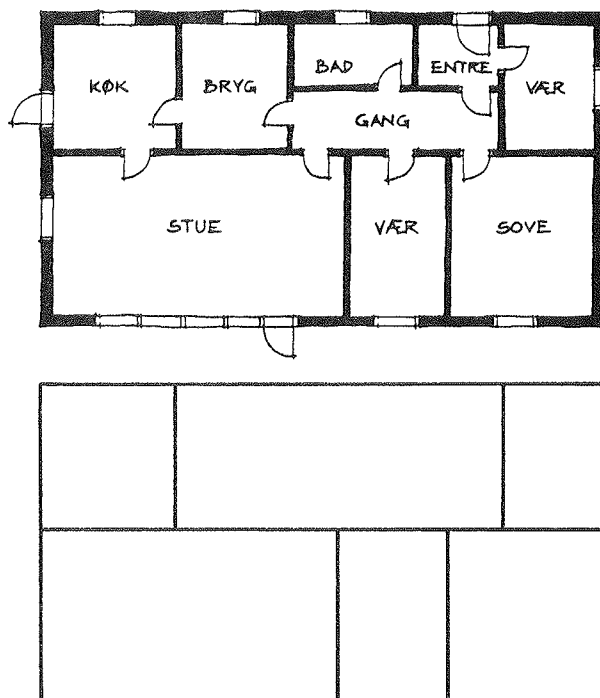
## Kontrolstrategi og belastning

For hvert rum kan kontrolstrategien for varme/køleanlægget og belastningerne angives. Den resulterende temperatur i rummet, som varme/køleanlægget skal holde, kan vægtes efter luft- og strålingstemperaturen. Belastningerne for de enkelte rum kan komme fra: Personer, elektricitet, lys, gas, naturligt luftskifte, ventilation og luftudveksling mellem rum. Afhængigt af hvilken belastning der er tale om, vari-



Figur 3.1-5. Eksempel på beskrivelse af en bygningskonstruktion bestående af tre lag:

DEFINE WALLS:  
 TEGLMUR = (TEGLMUR, ISOLERING, BETON),  
 END WALLS



Figur 3.1-6. Eksempel på hvorledes et parcelhus kan simplificeres.

erer beskrivelsen af den, men i hovedtræk angives følgende oplysninger: Maksimumsbelastning, belastningsprofil, varmeafgivelsens fordeling mellem konvektion og stråling, og hvilken tidsperiode belastningen skal virke i.

### 3.1.2 REPORT-WRITER, JC-WRITER, PREPROCESSOR og WIFE

#### REPORT-WRITER

REPORT-WRITER er et output-program, der kan udskrive i alt 143 forskellige brugervalgte parametre på time-, døgn- og månedsbasis. Dette forøger herved fleksibiliteten af BLAST-systemet med hensyn til output-faciliteter.

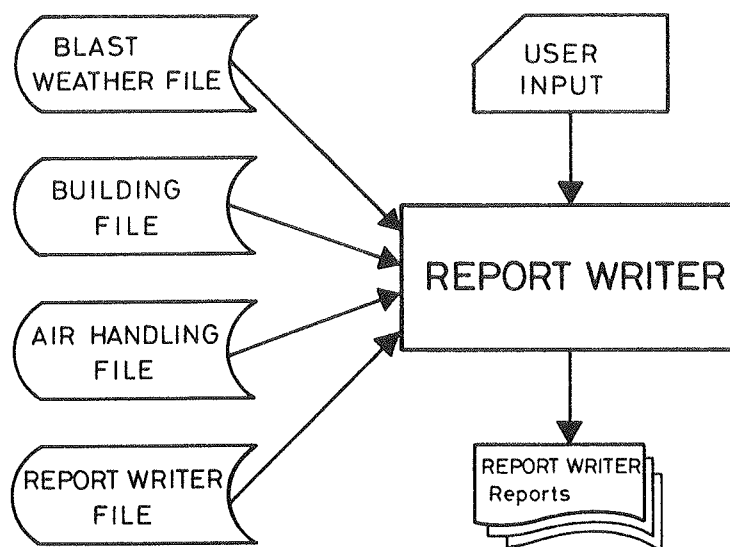
REPORT-WRITER kan køres i direkte forbindelse med BLAST simuleringen eller køres separat senere, under forudsætning af at resultatfilerne fra BLAST er gjort permanente.

Programmet er i stand til at læse og udskrive parametre fra de tre filer, der fremkommer i forbindelse med BLAST-simuleringen og vejrdatafilen (Weather file, WTHRFL), jf. figur 3.1-7:

1. Building loads data file (BLDFL)
2. Air handling loads data file (AHLDFL)
3. Optimal report file (RPTFLE)
4. Weather file (WTHRFL)

Building loads datafilen og Air handling loads datafilen er et resultat af 1. del (Beregning af temperatur og nettoenergiforbrug) og 2. del (Beregning af ventilationssystem) fra BLAST-simuleringen. Den 3. fil "Optimal report file" fremkommer i forbindelse med BLAST-simuleringen, idet de parametre, der ønskes udskrevet, indsættes i BLAST-inputfilen.

Opbygningen og subroutinerne i REPORT-WRITER programmet er beskrevet af forfatteren i december 1984.



Figur 3.1-7. Skematisk oversigt over REPORT-WRITER programmet.



JC-WRITER

Da BLAST og REPORT-WRITER ikke er i stand til at producere alle de output-rapporter der kunne ønskes, har forfatteren udviklet et specielt program "JC-WRITER". Dette program er i stand til at beregne fraktiler og timefordelinger og udskrive timeværdier for ønskede parametre, jf. kapitel 3.2. Herudover er der mulighed for at udskrive data uformatteret til videre bearbejdning.

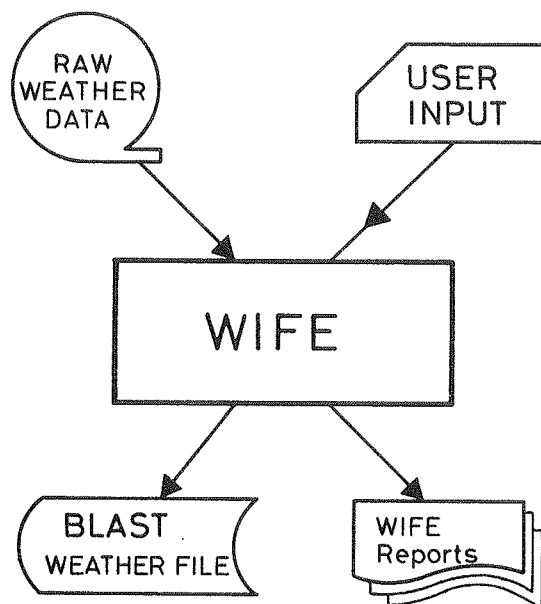
PREPROCESSOR

Inputmængden har tidligere været et problem i forbindelse med anvendelsen af BLAST, idet forberedelsen af inputfilen tog forholdsvis megen tid. Efter forfatterens studierejse til BLAST Support Office, hvor det lykkedes at få et eksemplar af den Preprocessor, som er blevet udviklet på stedet, er det blevet langt lettere at anvende BLAST.

Preprocessoren kører interaktivt, således at brugeren blot skal svare på spørgsmål, hvorved inputfilen automatisk bliver opstillet med den korrekte syntaks. Dette har nedsat inputarbejdet ganske væsentligt, samtidig med at det er blevet meget nemmere for nye brugere, idet de ikke behøver at sætte sig helt ind i syntaksen for programmet.

WIFE

WIFE (The Weather Information File Encoder program) er et separat program i BLAST-systemet, der benyttes til at konvertere forskellige internationale vejrdata til BLAST-format. Fremgangsmåden ved brugen af WIFE er illustreret på



Figur 3.1-8. Skematisk oversigt over brugen af WIFE programmet.

figur 3.1-8. Input til programmet består af en brugerdefineret inputfil (user input) og de rå-vejrdato (raw weather data), der ønskes konverteret. Ved kørsel med programmet fremkommer de konverterede BLAST-vejrdato i SI-enheder, (BLAST weather file), der kan benyttes i det videre arbejde. Det er således kun nødvendigt at foretage konverteringen én gang for et givet sæt vejrdato.

De vejrdato-formater, der kan benyttes, er følgende:

TRY	:	NOAA Test Reference Year
TMY	:	NOAA Test Meteorological Year
SOLMET	:	NOAA Solar Radiation
TDF-14	:	TDF-14 NOAA raw data
SOLAR 280	:	Solar radiation (280)
DATSAV	:	USAFETAC data save
OTHER	:	Brugerdefineret input format

Det sidste format "OTHER" kan udformes af brugeren i det format og de enheder, der ønskes. Forfatteren har omskrevet dette format, så det er i stand til at læse flere formater på en gang. Blandt disse er et kompakt format i SI-enheder og det forkortede input-format til SUNCODE. Ved at indlægge SUNCODE-formatet er det blevet muligt direkte at konvertere dette til BLAST-format. Dette har været en stor fordel i forbindelse med arbejdet med de to programmer.

De parametre, der indgår i BLAST vejrdatofilen efter WIFE-kørslen, indeholder dels en header for filen, hvor oplysninger om titel på vejrdato, årstid, bredde- og længdegrad, tidszone befinder sig, og dels følgende oplysninger på timebasis for året:

- Lufttemperatur
- Vådtemperatur
- Himmelstrålingstemperatur
- Direkte stråling
- Diffus himmelstråling
- Reflekteret diffus stråling fra omgivelserne
- Vindhastighed og -retning
- Barometertryk
- Regn eller sne

Programmets opbygning med tilhørende subrutiner er beskrevet af forfatteren i januar 1985.

### 3.2 JC-WRITER

I forbindelse med BLAST og REPORT-WRITER programmerne er der mulighed for en lang række output-rapporter. Imidlertid tilfredsstiller de ikke alle de krav og ønsker en bruger med rimelighed kunne stille. Det blev derfor besluttet at gå ind i programmet for at lave passende ændringer. For at gøre dette var det nødvendigt at analysere programmet nærmere for at få et overblik over det. Dette arbejde blev påbegyndt i forbindelse med forfatterens studierejse til BLAST Support Office. Arbejdet blev gjort ved at gennemgå hele programstrukturen og give en beskrivelse af samtlige subrutiner, hvilket resulterede i rapporterne af oktober og december 1984 om henholdsvis BLAST og REPORT-WRITER. Undersøgelsen gav et godt overblik over programmerne, men viste samtidig at det var vanskeligere end først antaget at gå ind i programmerne og lave ændringer. Det var derfor mest hensigtsmæssigt at lave et selvstændigt program, der var i stand til at læse resultatfilerne fra BLAST og bearbejde disse data og udskrive dem i de ønskede formater. I den indledende fase af dette arbejde er der god grund til at takke Dale L. Herron for hans vejledning om hvorledes resultatfilerne fra BLAST skulle læses, og professor C.O. Pedersen for at formidle kontakten.

Ved udviklingen af JC-WRITER programmet er der gjort et omfattende arbejde for at gøre det brugervenligt. Dette er sket ved at gøre programmet interaktivt, således at brugeren bliver guided ved hjælp af menuer. JC-WRITER kan anvendes på to måder:

1. Opstilling af input-fil til batch-kørsel
2. Interaktiv kørsel

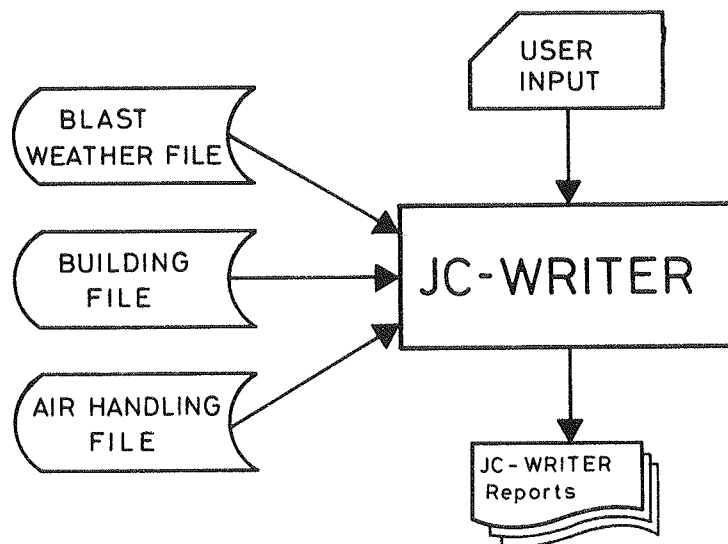
I det første tilfælde opstiller brugeren en inputfil til JC-WRITER i en interaktiv session. Dette foregår ved at brugeren svarer på en række spørgsmål om, hvilke parametre der ønskes, og på hvilken form. Efter denne session gøres inputfilen permanent, og den kan herefter benyttes i et batch-job. Dette kan enten ske ved at køre JC-WRITER sammen med BLAST, eller ved at køre den alene efter BLAST-simuleringen. Hvis den køres alene efter BLAST-simuleringen, er det nødvendigt at gøre resultatfilerne fra BLAST permanente.

I det andet tilfælde kan JC-WRITER køres interaktivt efter BLAST-simuleringen, og resultaterne fås med det samme på skærmen (evt. med en printer tilkoblet skærmen).

JC-WRITER er i stand til at læse to af de tre filer, der fremkommer i forbindelse med BLAST-simuleringen og vejrdatafil (Weather file).

1. Building loads data file (BLDFL), (Bygningsfil)
2. Air handling loads data file (AHLDFL), (Ventilationsanlægsfil)
3. Weather file (WTHRFL), (Vejrdatafil)

Desværre er det ikke lykkedes at læse den tredje BLAST fil: Optimal report file (RPTFLE), der produceres specielt til REPORT-WRITER programmet. Af den gamle supplementsmanual "BLAST, Version 3:0" fremgik det ellers, at dette relativt let kunne gøres, og i selve REPORT-WRITER programmet er udkastet til en subroutine skrevet, hvoraf det fremgår, hvorledes det programteknisk udføres. Imidlertid viste det sig, at det var langt mere kompliceret, og selv med hjælp fra Dale L. Herron lykkedes det ikke at læse filen. Dette blev derfor opgivet, og arbejdet blev koncentreret om de tre nævnte filer. En skematisk oversigt over JC-WRITER er vist på figur 3.2-1.



Figur 3.2-1. Skematisk oversigt for JC-WRITER.

Opbygningen af programmet har været tidkrævende og forbundet med større vanskeligheder end forventet. Dette hænger sammen med den komplekse opbygning af BLAST-systemet som medfører at tingene er vanskelige at gennemskue. Det har ligeledes været tidkrævende at gøre programmet brugervenligt. JC-WRITER er blevet benyttet og testet i forbindelse med en række kursusarbejder og eksamensprojekter uden at have voldt nævneværdige problemer. Det har således været muligt at se hvorledes aktuelle brugere har kunnet anvende programmet.

Omfanget af programmet er i den nuværende version fra december 1986 på ca. 5000 linjer. Heraf er de 1280 linjer hentet direkte ud af REPORT-WRITER programmet. Der er således tale om et relativt stort program set i forhold til de faciliteter der ligger i det. Dette hænger sammen med at det er interaktivt, skrevet delvis selvdokumenterende og løsningen af BLAST filerne er pladskrævende.

I det følgende vil faciliteterne samt brugervejledning kort blive beskrevet, idet der endvidere henvises til rapporter af forfatteren fra november og december 1986.

Faciliteter i JC-WRITER

Programmet er i stand til at beregne fraktiler, og ligeledes hvor mange timer en parameter ligger i et givet interval (timefordelinger) fx, hvor mange timer temperaturen ligger mellem 24,00 og 24,99°C i maj måned. Fraktiler og timefordelinger beregnes for hver måned i året og for hele året. Herudover er programmet i stand til at udskrive timeværdier for ønskede data. Denne facilitet er blevet lagt ind i programmet i et eksamensprojekt af Pedersen, Jørgen Holm - 1986.

Brugeren kan vælge imellem at få udskrevet fraktiler, timefordelinger eller timeværdier fra følgende tre filer:

1. Building Loads data file (BLDFL), (Bygningsfil)
2. Air Handling Loads data file (AHLDFL), (Ventilationsanlægsfil)
3. Weather file (WTHRFL), (Vejrdatafil)

I disse tre filer indgår følgende parametre:

1. Buildings Loads data file (Bygningsfil)

Nettovarmebehov	(W)
Nettokølebehov	(W)
Bunden varmeenergi	(W)
Varmegenvinding ved returluft	(W)
Varmepanelforbrug	(W)
Elektricitetsbehov	(W)
Gasbehov	(W)
Naturligt luftskifte	(kg/s)
Indelufttemperatur	(°C)

2. Air Handling Loads data file (Ventilationsanlægsfil)

Varmebehov for ventilationssystem	(W)
Kølebehov for ventilationssystem	(W)
Gasbehov for ventilationssystem	(W)
Elektricitetsbehov for ventilationssystem	(W)

3. Weather file (Vejrdatafil)

Udelufttemperatur	(°C)
Udeluftvådtemperatur	(°C)
Barometertryk	(N/m <sup>2</sup> )
Vindhastighed	(m/s)
Vindretning	(grader)
Himmelstrålingstemperatur	(°C)
Direkte stråling	(W/m <sup>2</sup> )
Diffus himmelstråling	(W/m <sup>2</sup> )
Reflekteret diffus stråling fra omgivelserne	(W/m <sup>2</sup> )

For hver enkelt variabel kan brugeren vælge, om både fraktiler og timefordelinger skal udskrives eller kun den ene. For fraktilernes vedkommende kan enten tre udskrives: 10%, 50%, 90% eller elleve: 5%, 10%, 20%, ..., 90%, 95%. Brugeren

kan tillige vælge, om det skal være i metriske (SI) eller engelske (British Engineering) enheder.

# Resultater fra JC-WRITER

Anvendelse af JC-WRITER sker normalt i to trin:

- 1) En interaktiv session, hvor inputfilen opstilles, og
- 2) Anvendelse af filen i et batch-job.

På figur 3.2-2 er vist et eksempel på en inputfil. Af denne fremgår det at den ikke er mnemoteknisk opbygget. Dette var oprindeligt tanken fra starten, men af tidsmæssige årsager er det desværre ikke nået. Det viser sig imidlertid, når brugeren er blevet fortrolig med programmet, at det er muligt at lave rettelser i inputfilen uden at køre den interaktive session med JC-WRITER igen.

1	JCWRITER	
2		1
3		2
4		5,
5		1
6	Y	
7		
8		9
9		1
10		2,
11	N	
12		4
13	N	
14	N	
15	Y	
16		2
17	N	
18		3
19		9
20		1
21		8
22	28	2
23	3	3
24	N	

Figur 3.2-2. Inputfil til JC-WRITER.

Udskriften fra JC-WRITER indbefatter dels brugerens input fra den interaktive session, og dels selve resultaterne. På figur 3.2-3 er vist en udskrift for beregningen af frakti-  
lerne og timefordelingerne for indelufttemperaturen. På  
figur 3.2-4 er tilsvarende vist en udskrift for timeværdier  
for perioden 19.-20. februar for parametrene: det samlede  
nettovarmebehov i bygning, nettovarmebehov i zone 1 med  
tilhørende indelufttemperatur og elektricitetsbehov.

\*\*\*\*\*  
 ZONE LOADS REPORT  
 PERCENTILES AND HOURLY DISTRIBUTION REPORT FOR : TEMPERATURES (MAT)  
 \*\*\*\*\*

VARMEAKKUMULERING (NR=10) ZONE 1 - LET (TUNGST GULV) ZONE 2 - TUNG  
 TEMPERATUR = 20 C, ORIENTERING = SYD, VINOVESAREAL = 15  
 FINNOMDEL. = NEJ, SOLINDFALD = JA, SOL TIL LUFT = 00  
 ZONE : 1  
 SIMULATED PERIOD: 1 - 1 - 1911 THRU 31 - 12 - 1911  
 LOCATION: \*\*\* TRY - DANSK TESTREFERENCEAAR \*\*\*

PERCENTILES	JAN C	FEB C	MAR C	APR C	MAY C	JUN C	JUL C	AUG C	SEP C	OCT C	NOV C	DEC C	YEAR C
5 %	20.0	19.0	19.0	19.0	19.0	21.9	21.0	21.0	20.0	19.0	19.0	19.0	19.0
10 %	20.0	19.0	19.0	19.0	20.0	22.0	22.0	22.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
20 %	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	23.1	23.1	23.1	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0
30 %	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	24.1	24.1	24.1	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0
40 %	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	24.8	25.0	26.1	22.4	22.4	22.4	22.4	22.4
50 %	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	25.9	26.1	27.3	22.9	22.9	22.9	22.9	22.9
60 %	20.0	20.0	20.0	20.0	21.8	27.9	28.9	29.9	23.4	23.4	23.4	23.4	23.4
70 %	20.0	20.0	20.0	20.0	22.0	29.6	30.6	31.8	24.9	24.9	24.9	24.9	24.9
80 %	20.0	20.0	20.0	20.0	23.1	31.8	32.8	33.8	26.1	26.1	26.1	26.1	26.1
90 %	20.0	22.0	22.0	23.1	23.9	32.8	33.8	34.8	27.1	27.1	27.1	27.1	27.1
95 %	20.0	22.0	22.0	24.0	24.0	32.8	33.8	34.8	27.1	27.1	27.1	27.1	27.1

HOURLY DISTRIBUTION C	JAN HR/MON	FEB HR/MON	MAR HR/MON	APR HR/MON	MAY HR/MON	JUN HR/MON	JUL HR/MON	AUG HR/MON	SEP HR/MON	OCT HR/MON	NOV HR/MON	DEC HR/MON	YEAR HR/MON
19.0	35	72	77	90	69	0	0	0	17	65	62	62	549
20.0	11	58	61	38	29	10	18	3	112	41	60	63	433
21.0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
22.0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
23.1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
24.1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
24.8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25.9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
27.9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
29.6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
31.8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
32.8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
33.8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
34.8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
27.1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
26.1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
24.9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
23.4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
22.9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
21.0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
20.0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
19.0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
SLM	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744	8760

Figur 3.2-3. Udskrift af fraktiler og timefordelinger for indelufttemperaturen i zone 1.

\*\*\*\*\*  
 HOURLY REPORTS FROM: 19 - 2 - 1911 THRU 22 - 2 - 1911  
 \*\*\*\*\*

TUBBERUPVAENGE 2 - BOLIGTYPE A NR=3  
 BYGNING TUNG GLASTILBYGNING HALVTUNG  
 ORIENTERING SYD-20 SKYGEGARDINER JA

ZONE NUMBER: 1 SYSTEM NUMBER: 0  
 SIMULATED PERIOD: 1 - 1 - 1911 THRU 31 - 12 - 1911  
 LOCATION: \*\*\* TRY - DANSK TESTREFERENCEAAR \*\*\*

DATE: 19 - 2 - 1911

DATE: 20 - 2 - 1911

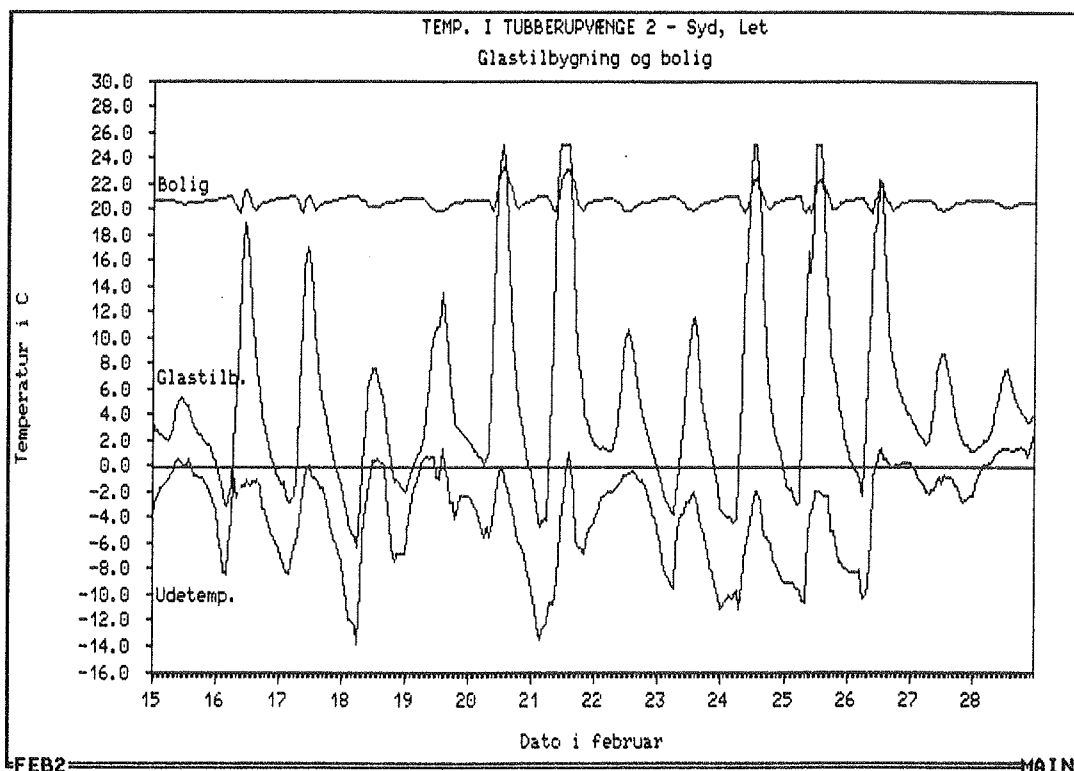
HOURLY	SUM HEATLD W	HEAT. W	LOAD W	ZONE TEMP. C	ELEC. W	NLOAD W
1	5639.0	3091.1	20.8	310.0	1	1
2	5474.0	3022.5	20.8	310.0	1	1
3	5255.0	2911.2	20.8	310.0	1	1
4	4957.0	2746.2	20.8	310.0	1	1
5	4646.0	2595.4	20.8	310.0	1	1
6	4344.0	2464.5	20.8	310.0	1	1
7	4044.0	2344.5	20.8	310.0	1	1
8	3744.0	2234.5	20.8	310.0	1	1
9	3444.0	2124.5	20.8	310.0	1	1
10	3144.0	2014.5	20.8	310.0	1	1
11	2844.0	1904.5	20.8	310.0	1	1
12	2544.0	1794.5	20.8	310.0	1	1
13	2244.0	1684.5	20.8	310.0	1	1
14	1944.0	1574.5	20.8	310.0	1	1
15	1644.0	1464.5	20.8	310.0	1	1
16	1344.0	1354.5	20.8	310.0	1	1
17	1044.0	1244.5	20.8	310.0	1	1
18	744.0	1134.5	20.8	310.0	1	1
19	444.0	1024.5	20.8	310.0	1	1
20	144.0	914.5	20.8	310.0	1	1
21	14.0	804.5	20.8	310.0	1	1
22	1.0	694.5	20.8	310.0	1	1
23	1.0	584.5	20.8	310.0	1	1
24	1.0	474.5	20.8	310.0	1	1

HOURLY	SUM HEATLD W	HEAT. W	LOAD W	ZONE TEMP. C	ELEC. W	NLOAD W
1	4526.0	2505.3	20.7	310.0	1	1
2	4614.0	2567.6	20.7	310.0	1	1
3	4726.0	2636.5	20.7	310.0	1	1
4	4778.0	2672.7	20.7	310.0	1	1
5	4900.0	2744.4	20.7	310.0	1	1
6	4996.0	2798.3	20.7	310.0	1	1
7	5115.0	2865.1	20.7	310.0	1	1
8	4668.0	2492.5	20.7	310.0	1	1
9	4512.0	2467.9	20.6	310.0	1	1
10	4367.0	2367.0	20.6	310.0	1	1
11	4236.0	2276.0	20.6	310.0	1	1
12	4115.0	2185.0	20.6	310.0	1	1
13	3994.0	2094.0	20.6	310.0	1	1
14	3873.0	2003.0	20.6	310.0	1	1
15	3752.0	1912.0	20.6	310.0	1	1
16	3631.0	1821.0	20.6	310.0	1	1
17	3510.0	1730.0	20.6	310.0	1	1
18	3389.0	1639.0	20.6	310.0	1	1
19	3268.0	1548.0	20.6	310.0	1	1
20	3147.0	1457.0	20.6	310.0	1	1
21	3026.0	1366.0	20.6	310.0	1	1
22	2905.0	1275.0	20.6	310.0	1	1
23	2784.0	1184.0	20.6	310.0	1	1
24	2663.0	1093.0	20.6	310.0	1	1

Figur 3.2-4. Udskrift af timeværdier for perioden 19.-20. februar.

Hvis det ønskes, kan resultaterne udskrives uformateret, hvorefter data kan overføres fra CYBER til en PC ved hjælp af programmet Kermit og derefter præsenteres grafisk med Symphony. Dette er illustreret på figur 3.2-5, hvor temperaturforløbet er vist for en bolig med en tilhørende glas-

tilbygning sammen med udetemperaturen for en 14-dages periode fra den 15. til den 28. februar.



Figur 3.2-5. Temperaturforløbet for en bolig med tilhørende glastilbygning sammen med udetemperaturen for en 14-dages periode.

### 3.3 Styreprocedure og undervisningsmateriale

Mange af de brugere, der har haft behov for at benytte BLAST, har ikke haft særlig stor viden om hvorledes en CYBER virker. Der er derfor blevet opbygget en styreprocedure for BLAST der kun kræver et minimum af viden hos brugerne. I denne procedure er de nødvendige kommandoer samlet til eksekveringen af BLAST med tilhørende programmer.

Styreproceduren kaldes ved at indtaste kommandoen:

-C

Hvorledes styreproceduren er bygget op, og hvilke faciliteter der ligger i det, kan oplyses ved at indtaste:

HELPBLS

Denne kommando aktiverer et specielt, af forfatteren udviklet, hjælpeprogram der giver information om følgende faciliteter i BLAST-systemet:

- 1) Information om BLAST
- 2) Information om PREPROCESSOR til BLAST
- 3) Information om WIFE
- 4) Litteratur om BLAST-systemet



- 5) Hvorledes egne programmer kompileres og sendes som batch-job
- 6) Hvorledes resultater, filer etc. printes.

En mere detaljeret redegørelse for styreproceduren med tilhørende anvendelse ligger uden for rammerne af denne afhandling, men brugen af den er beskrevet af forfatteren i august 1985, og selve styreproceduren i november 1986. Kørsel med BLAST-programmet vil dog kort blive beskrevet.

### Kørsel med BLAST

Ved kørsel med BLAST-programmet er kommandoproceduren opbygget således, at der er mulighed for at specificere en række parametre. Det mindste, der skal specificeres for at sende programmet, er:

BLAST, I = BLAST-Inputfil

hvilket medfører, at BLAST-Inputfilen bliver benyttet i simuleringen sammen med "Det Danske Referenceår - TRY" på den laveste prioritet "P1".

Ud over dette kan følgende parametre specificeres med komma imellem:

IRW = REPORT-WRITER Inputfil.

IJC = JC-WRITER Inputfil.

L = Outputfil  
"Outputfil" vælges, hvis intet specificeres.

B =  $\left\{ \begin{array}{l} \text{LOADS1, LOADS2, LOADS3} \\ \text{FAN1, FAN2, FAN3} \\ \text{PLANT1, PLANT2, PLANT3} \end{array} \right\}$  Styrer kald og sletning af BLAST-filerne: BLDFL, AHLDFL.

WTF = Vejrdata  
"Det Danske Referenceår - TRY" vælges, hvis intet specificeres. Egne vejrdata kan vælges.

LIB = BLAST-bibliotek  
"Det Danske BLAST-bibliotek" benyttes, hvis brugeren ikke indtaster andet. Eget bibliotek kan vælges.

POST = B  
Output fra kørslen bliver automatisk printet og sendt med posten til brugeren, hvis "B" indtastes.

PRIO =  $\left\{ \begin{array}{l} \text{P3} \\ \text{P2} \\ \text{P1} \end{array} \right.$   
Jobbet sendes på den laveste prioritet "P1", hvis intet andet skrives. "P3" er den højeste prioritet.

### Undervisningsmateriale

Da interessen for at anvende BLAST har været stor blandt de studerende ved Danmarks tekniske Højskole og Danmarks Ingeniørakademi har der været behov for at udarbejde undervisningsmateriale. Dette har været tidkrævende, fordi det var nødvendigt ikke blot at give en beskrivelse af BLAST, men også at give en indføring i hvorledes en CYBER bruges. Dette skyldes at de studerende ikke er fortrolige med denne maskine, da der anvendes en IBM computer på Danmarks tekniske Højskole. Forfatteren har derfor skrevet en rapport i august 1985, hvor der er blevet givet en introduktion til UNI-C, Århus og BLAST. Rapporten er bygget op om tre kapitler og otte appendikser.

Det har betydet en stor lettelse, at dette materiale er blevet skrevet, og det er forfatterens opfattelse, at det har været til stor hjælp for nye brugere af programmet.

## 4. VALIDERING

### 4.1 Valideringsproces

I de sidste 20 år er der blevet udviklet edb-programmer til beregning af bygningers energiforbrug og indeklima. Som en del af dette arbejde har validering spillet en vigtig rolle ved vurderingen af de enkelte programmer.

Ron Judkoff har i kapitel 4 i Mørck, Ove - June 1986 beskrevet, hvorledes valideringen bør foregå. Han har i henhold til Judkoff, Ron et al. - 1983 delt processen op i tre forskellige teknikker:

1. Individuelle sammenligninger mellem edb-programmer
2. Analytiske test
3. Empiriske test

I tilknytning til disse tre teknikker er der syv principielle fejlkilder som opmærksomheden bør henledes på, delt op på fire eksterne og tre interne:

Eksterne: 1. Forskelle mellem de aktuelle vejrdato omkring bygningen og de vejrdato der benyttes i programmet.  
 2. Forskelle mellem aktuel brug af bygningen og dem der er antaget af brugeren af programmet.  
 3. Inputfejl i forbindelse med opstilling af inputfilen til programmet.  
 4. Forskelle mellem de aktuelle termiske og fysiske egenskaber ved bygningen og de brugervalgte.

Interne: 5. Forskelle mellem de aktuelle termiske varme-transporter i og mellem forskellige komponenter og de algoritmer der repræsenterer disse mekanismer i programmet.  
 6. Fejl i løsningsteknikker.  
 7. Programmeringsfejl.

For at identificere interne fejl er det nødvendigt at kontrollere de eksterne meget nøje.

### 1. Individuelle sammenligninger mellem edb-programmer

Individuelle sammenligninger har den fordel, at de ikke behøver data fra en rigtig bygning, og det er derfor muligt at eliminere de eksterne fejl med undtagelse af eventuelle inputfejl (nr. 3). Hertil kommer, at det er muligt at lave et stort antal parameteranalyser inden for begrænset tid og herudfra afgøre, hvilke mere detaljerede undersøgelser der bør foretages. Desuden kan det enkelte program simuleres mod sig selv for at undersøge effekten ved at bruge forskellige algoritmer.

Den største ulempe ved denne teknik er manglen på en korrekt løsning. Det er derfor mest hensigtsmæssigt at benytte flere programmer med forskellige fremgangsmåder og løsningsmodeller. Hvis sådanne programmer stemmer overens ved en lang række forskellige testtilfælde, kan det forventes, at det fysiske system er blevet beskrevet tilfredsstillende. Hvis derimod programmer med den samme løsningsmetode anvendes og giver det samme resultat, kan det udmærket tænkes at de alle er ukorrekte.

Eftersom der mangler en korrekt løsning ved denne teknik, giver den det bedste resultat, hvis den benyttes sammen med den analytiske og empiriske teknik beskrevet i det følgende. De individuelle sammenligninger kan følgelig benyttes inden de empiriske test for at se, hvilke der er behov for, og hvilket niveau de skal foregå på.

## 2. Analytiske test

Ved analytiske metoder defineres simple testtilfælde, der kan løses analytisk og ved brug af indgående edb-programmer. Disse metoder kan teste beregningen af de fundamentale varmetransportmekanismer isoleret eller i kombination med andre. Grænsebetingelserne er simple og klart definerede, hvilket ikke er muligt med en empirisk model.

Styrken ligger i at den eksakte løsning kendes, hvorved de vigtigste fejl i varmetransportligningerne kan anskueliggøres og isoleres.

Ulemperne ved metoderne ligger i at det er et begrænset antal konfigurationer, for hvilke der findes en analytisk løsning. Desuden kan de analytiske løsningsmetoder kun teste den numeriske løsningsteknik (fejlkilde nr. 6), de er ikke i stand til at teste korrektheden af modellen selv.

## 3. Empiriske test

Ved empiriske test foretages der en sammenligning mellem aktuelle målinger og beregninger fra en bygning. Usikkerheden ved disse test ligger dels i måleusikkerheden og dels i de termiske materialedata m.m. der indgår i beregningerne. For at en testcelle skal være brugbar er det derfor nødvendigt at måledata opsamles med meget stor præcision og opfylder nogle specifikke krav. Det højeste niveau er, if. Judkoff, Ron et al. - 1983, "klasse A", og denne klasse fordrer mange sensorer for selv simple bygninger, og at disse skal være ubeboede for at undgå den eksterne fejlkilde nr. 2. Der findes meget få testceller der opfylder "klasse A" kriteriet. En af dem der opfylder disse krav er den canadiske testcelle som beskrives i kapitel 4.2.

### Den sammenlignende, analytiske og empiriske test kombineret

De sammenlignende og analytiske teknikker giver information om hvilke empiriske testtilfælde der bør vælges. Dette bør gøres med stor omhu, da de empiriske test er meget dyre og kræver et stort tidsforbrug. Efter at de empiriske data er indsamlet og bearbejdet, giver de sammenlignende teknikker mulighed for at ekstrapolere til tilfælde hvor der ikke forefindes empiriske data.

Judkoff, Ron et al. - 1983 har samlet fordelene og ulemperne ved de tre teknikker i en tabel, der er bearbejdet af forfatteren til tabel 4.1-1. Når de enkelte teknikker anvendes separat, giver de ikke nok information til en samlet validering. Til gengæld er det en meget værdifuld validering, hvis alle tre teknikker benyttes sammen. Dette er imidlertid meget tidskrævende og kræver flere forskeres specialviden om de enkelte programmer. Forfatteren har derfor valgt at benytte to empiriske modeller til at teste BLAST og SUN-CODE, velvidende at dette ikke er nogen samlet validering af programmerne. Det giver imidlertid et billede af beregningsnøjagtigheden, der i sammenhæng med andre forskeres undersøgelser giver en delvis validering.

Teknik	Fordele	Ulemper
<u>Sammenlignende</u>	Ingen usikkerhed med input.	Ingen sand løsning.
Relativ test af model og løsningsproces	Hvilken som helst grad af kompleksitet. Billig. Hurtig: Mange sammenligninger mulige.	
<u>Analytisk</u>	Ingen usikkerhed med input.	Ingen test af model.
Test af numerisk løsning	Eksakt sand løsning givet ved simplificeringen af modellen. Billig.	Begrænset til tilfælde for hvilke analytiske løsninger kan udledes.
<u>Empirisk</u>	Tilnærmet sand standard inden for måleusikkerheden.	Målinger medfører nogen grad af inputusikkerhed.
Test af model og løsningsproces	Hvilken som helst grad af kompleksitet.	Detaljerede målinger af høj kvalitet er dyre og tidskrævende. En begrænset mængde måledata er økonomisk mulige.

Tabel 4.1-1. Fordele og ulemper ved forskellige valideringsteknikker.

(Taget fra Judkoff, Ron et al. - 1983 og bearbejdet).

## De to empiriske modeller - Task VIII

I 1981 startede Det Internationale Energi Agentur (IEA) inden for "the Solar Heating and Cooling Programme", Task VIII "Passive and Hybrid Solar Low Energy Buildings". I afsnit 2.1 er en del af dette projekt beskrevet i forbindelse med valg af edb-program.

Formålet med dette Task er at forbedre forståelsen og forøge brugen af passive og hybride huse. Forskningsprogrammet består af fem subtasks:

- O. Grundlæggende teknologiske definitioner
- A. Udførelse af målinger og analyser
- B. Modellering og simulering
- C. Design metoder
- D. Bygningsdesign, konstruktion og dataopsamling

Forfatteren har ud fra dette Task valgt to empiriske modeller til valideringsarbejdet. Disse består af den canadiske "Direct Gain" test bygning, Ottawa, Canada, som blev benyttet i forbindelse med valideringsarbejdet i subtask B, og det danske boligbyggeri Smakkebo, Snekkersten ved Helsingør, der er det danske bidrag til subtask D. Den canadiske testcelle er beskrevet i kapitel 4.2, og Smakkebo i kapitel 4.3.

### 4.2 Validering med den canadiske "Direct Gain" testbygning

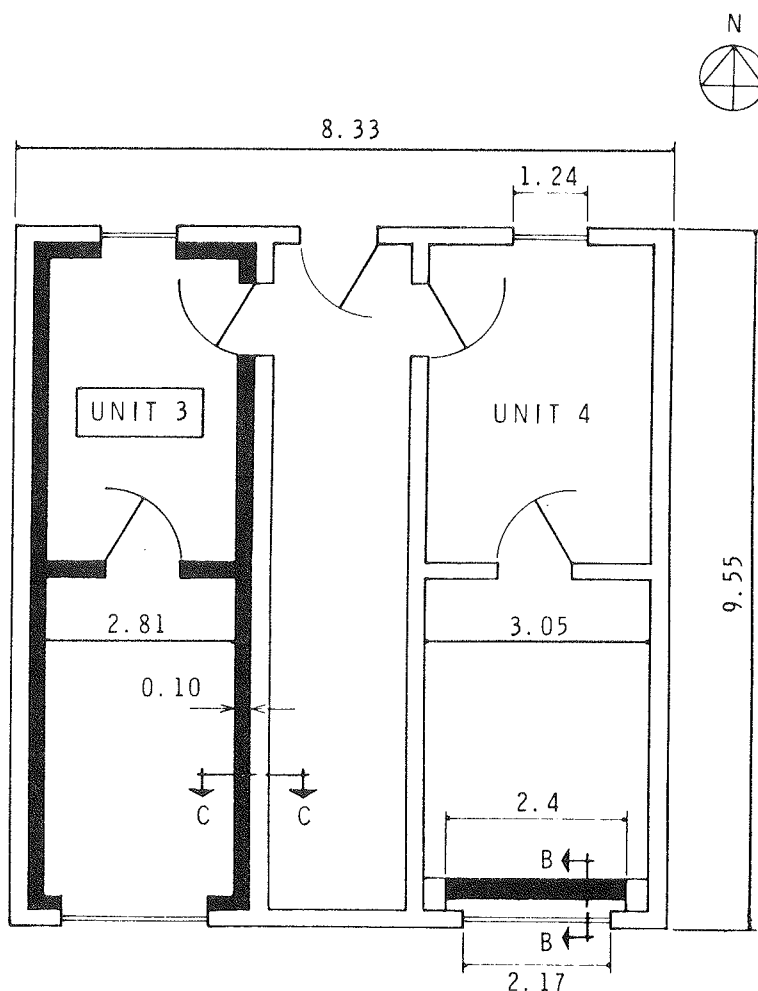
Den canadiske "Direct Gain" testbygning er benyttet til at validere 11 forskellige simuleringsprogrammer fra 7 lande. Resultatet af dette arbejde er beskrevet af Mørck, Ove - June 1986. Testcellen er valgt, fordi den er veldokumenteret, har simple konstruktioner og måledata af høj kvalitet, der gør den velegnet til validering.

Forfatteren har derfor benyttet denne testcelle til den empiriske validering af BLAST og SUNCODE. De to programmer er valideret af Judkoff, Ron - 1985 (SERI-RES 1.0 er dog anvendt i stedet for SUNCODE), men vælges alligevel da der bliver fokuseret på nogle andre ting, og da det ved opstilling af en given model er nødvendigt at foretage en lang række valg der har indflydelse på resultatet.

I det følgende vil testcellen blive omtalt som "den canadiske testcelle".

### Beskrivelse af bygningen

Testbygningen er beliggende i Ottawa, Canada og er en del af de passiv sol test-faciliteter, der er blevet bygget med støtte fra the Division of Building Research, National Research Council of Canada. Faciliteterne består af tre bygninger, der hver er delt i to enheder. Den enhed der undersøges i nærværende validering er den tredje og er vist på figur 4.2-1. Testbygningerne er dokumenteret i detaljer af Barakat, S.A. - 1982.

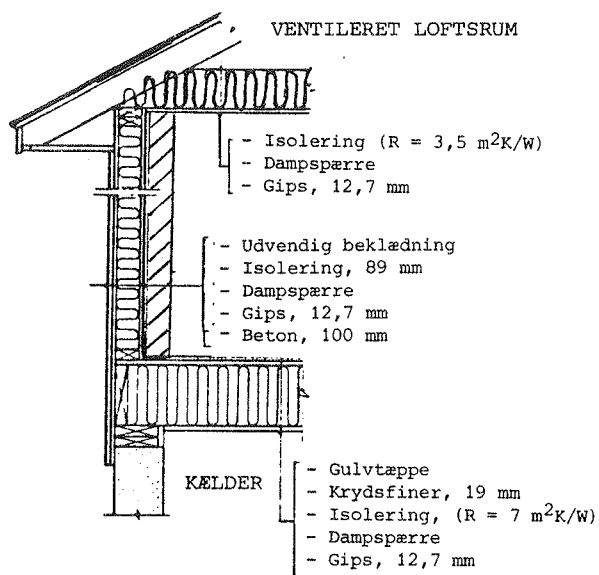


Figur 4.2-1. Plan over den 3. og 4. enhed i den canadiske "Direct Gain" testbygning. (Judkoff, Ron - 1985).

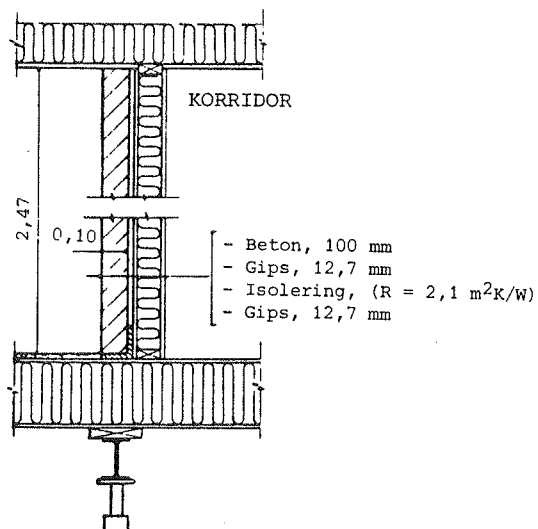
Testenheden består af et velisoleret nord- og sydorienteret rum med lette gulve og lofter, og en tung kerne der udgøres af 100 mm tykke vægge af beton. Rummene er forbundet med en dør. I nordrummet er der tillige en isoleret ståldør, tætnet langs kanterne med magnetisk tape, ud til en korridor.

I sydrummet er der et vindue med et nettoglasareal på  $2,6 \text{ m}^2$ , og mod nord et vindue med  $1 \text{ m}^2$ . Vinduerne er udført som vinduesrammer med termoruder, hvis glasafstand er 6,4 mm.

Et snit gennem den tredje enhed er vist på figur 4.2-2. Bygningen er i ét plan med en opvarmet kælderetage og et ventileret loftsrums. Indermurene mod øst grænser op til en opvarmet korridor. Alle andre vægge er ydervægge. De vigtigste karakteristika for testenheden er vist i tabel 4.2-1.



(a) Ydervæg, 3. enhed



(b) Korridorvæg, 3. enhed

Figur 4.2-2. Snit gennem konstruktionerne i den tredje enhed.

(Taget fra Judkoff, Ron - 1985 og bearbejdet).



<u>Dimensioner</u>		
Rumdybde		4,38 m
Rumbredde		2,81 m
Rumhøjde		2,47 m
Gulvareal pr. rum		12,3 m <sup>2</sup>
Transmissionskoefficient for vægge*		0,38 W/m <sup>2</sup> ·K
	for loft	0,26 W/m <sup>2</sup> ·K
	for gulv	0,13 W/m <sup>2</sup> ·K
<u>Vinduer</u>		
Sydvendt vindue:	Vinduesareal	3,4 m <sup>2</sup>
	Glasareal	2,6 m <sup>2</sup>
	Karmareal	0,8 m <sup>2</sup>
Nordvendt vindue:	Vinduesareal	1,4 m <sup>2</sup>
	Glasareal	1,0 m <sup>2</sup>
	Karmareal	0,4 m <sup>2</sup>
Transmissionskoefficient:	Glas	2,86 W/m <sup>2</sup> ·K
	Karm	2,70 W/m <sup>2</sup> ·K
<u>Døre</u>		
Dør i mellemvæg:	Areal	1,65 m <sup>2</sup>
	Transmissionskoeff.	2,27 W/m <sup>2</sup> ·K
Korridor-dør:	Areal	1,9 m <sup>2</sup>
	Transmissionskoeff.	0,80 W/m <sup>2</sup> ·K
<u>Temperaturer</u>		
Varme:	Setpunkt	20°C
	Dødbånd	0,1 K
Ventilation:	Setpunkt	27°C
Korridor temperatur		20°C
<u>Øvrige parametre</u>		
Luftcirkulation mellem rum		0,047 m <sup>3</sup> /s
Ventilatoreffekt (Cirkulation)		21 W
Termisk masse		13.565 kg
Varmekapacitet		11.550 kJ/K

\*Alle vægge er af en trærammekonstruktion, 38x89 mm lægter pr. 0,6 m.

Tabel 4.2-1. Karakteristika for testenheden.  
(Taget fra Judkoff, Ron - 1985 og bearbejdet).

Testenheden kan benyttes på to måder. I den første er døren lukket mellem nord- og sydrummet, og rummene optræder som to selvstændige rum. I den anden er døren åben, og der er placeret en lille ventilator ( $0,047 \text{ m}^3/\text{s}$ ) i døråbningen, så at der cirkulerer luft mellem rummene. I dette tilfælde er den sidstnævnte måde benyttet.

Nord- og sydrummene bliver opvarmet individuelt med elektriske varmeovne med stor temperaturpræcision, der slår til når temperaturen falder til  $20^\circ\text{C}$  eller derunder. Udover dette er der i sydrummet placeret en udsugningsventilator, der går i gang når temperaturen passerer  $27^\circ\text{C}$ . Alle rummene er tætnet så godt som muligt, hvorved det naturlige luftskifte er blevet så lavt, at det beregningsmæssigt kan sættes til 0.

### Vejrdata

De medfølgende vejrdato var fra aktuelle målinger ved testfaciliteterne i Ottawa, Canada. De inkluderer timeværdier (gennemsnit eller integreret over timen) for en periode på 14 dage fra den 29. december 1980 til den 11. januar 1981. Følgende vejrdato parametre fulgte med:

Gennemsnitlig udetemperatur	$^\circ\text{C}$
Total global horisontal stråling	$\text{W}/\text{m}^2$
Total lodret stråling på syd	$\text{W}/\text{m}^2$
Total lodret stråling på nord	$\text{W}/\text{m}^2$
Direkte normal stråling	$\text{W}/\text{m}^2$
Gennemsnitlig vindhastighed	$\text{km}/\text{h}$
Vindretning	grader

### Måleresultater

For den aktuelle periode medfulgte følgende måleresultater på timebasis for testenheden:

Gennemsnitlig lufttemperatur i sydrummet	$^\circ\text{C}$
Gennemsnitlig lufttemperatur i nordrummet	$^\circ\text{C}$
Gennemsnitlig lufttemperatur i korridoren	$^\circ\text{C}$
Gennemsnitlig lufttemperatur i loftsrummet	$^\circ\text{C}$
Totalt varmebehov for testenheden	W
Kølebehov for sydrummet (ventileret)	W

## Modelopbygning

Ved modelopbygningen med BLAST og SUNCODE af den canadiske testcelle er der opstillet en 2-zone model for det syd- og nordvendte rum. De tilstødende opvarmede rum: korridoren og kælderetagen er simuleret ved at sætte temperaturen på den anden side af væggen til 20°C. For det ventilerede loftsrums vedkommende er det simuleret ved at sætte temperaturen lig udeluftens og ikke lade det være solbeskinnet.

I forbindelse med simuleringerne er der gjort en række forudsætninger:

Naturligt luftskifte. Da testcellen er meget tæt, har den et naturligt luftskifte meget nær 0 gange pr. time, hvorfor denne værdi er sat til 0.

Luftcirkulation mellem rum. Luftcirkulationen mellem rummene er i BLAST modelleret med "CROSS MIXING" med et luftskifte på 0,047 m<sup>3</sup>/s og i SUNCODE ved en specifik varmeoverføring på 57,12 W/K.

Intern belastning. Ventilatoren afgiver en konstant effekt på 21 W, der fordeles ligeligt mellem de to zoner. Ud over dette varmetilskud er der ikke regnet med noget.

Varmeeffekt. Effekten er sat tilstrækkelig højt til at den kan dække behovet.

Solindfald direkte til rumluft. I SUNCODE har brugeren mulighed for at lade en del af solindfaldet gå direkte til rumluften. I standardtilfældet er der imidlertid valgt at lade alt solindfaldet gå til overfladerne, hvilket er sket ud fra den vurdering at der ikke er nogen gardiner eller møbler etc. I et par undersøgelser er der dog valgt henholdsvis 10% og 20% gående direkte til rumluften, idet der ved dette begreb "direkte til rumluften" er underforstået solindfald på meget lette overflader som gardiner, møbler etc.

Tidsstep. I BLAST er tidssteppet en fast værdi på en time, og denne værdi kan ikke ændres. I SUNCODE, hvor der anvendes en eksplicit metode (jf. kapitel 2.2), skal stabilitetskriteriet for Fourier-tallet være opfyldt, hvilket giver en binding på hvor store tidsskridt der kan benyttes. I den første model med alle de aktuelle materialedata er det nødvendigt med elleve tidsskridt pr. time. Denne værdi er acceptabel, set i lyset af den korte tidsperiode (14 dage) der simuleres. Det er imidlertid ikke en fair måde at sammenligne BLAST og SUNCODE med, idet BLAST kun benytter et tidsstep pr. time. Derfor er SUNCODE-modellen simplificeret ved at erstatte gipspladerne og den udvendige beklædning med

modstande (uden varmekapacitet), hvorved tidssteppet er nedbragt til to pr. time. Dette tidsstep er i de følgende beregninger benyttet som reference. Til slut er det kritiske krydsfiner lag, der betinger to tidsstep pr. time, slået sammen med tæppebelægningen, hvorved antallet af tidsstep pr. time reduceres til et.

Antal netpunkter i betonlag - SUNCODE. I det 100 mm betonlag er der regnet med to netpunkter. For variationen med elleve tidsstep pr. time er der kørt med to og fire netpunkter for at se indflydelsen på resultatet.

#### 4.2.1 Resultater

Sammenligningen mellem beregningerne og målingerne er foregået ved at se på temperaturer, effektbehov og energiforbrug. For temperaturernes vedkommende er det kun det sydvendte rum der har interesse, idet det nordvendte rum har en konstant temperatur på 20°C. Med hensyn til effektbehovet kendes udelukkende det samlede varmebehov for testenheden.

Sammenligningen foregår bedst ved at plotte de målte og beregnede resultater op på en figur med passende valgte enheder for y-aksen (temperatur - °C, effektbehov - W) periode/tid for x-aksen. Dette er tilsyneladende et meget banalt synspunkt, men ikke desto mindre er det et punkt, hvor der ikke altid udarbejdes anvendelige kurver. Det gælder således det tidligere omtalte Task VIII projekt. I slutrapporten for dette internationale arbejde af Mørck, Ove - June 1986, er de valgte kurver af meget svingende kvalitet. Et eksempel på dette er vist for det canadiske program ENCORE på figur 4.2-3, hvor den målte og beregnede temperatur i det sydvendte rum er plottet op mod hinanden. Umiddelbart ser det ud som om der er vældig god overensstemmelse, men i realiteten er det vanskeligt at se særlig meget.

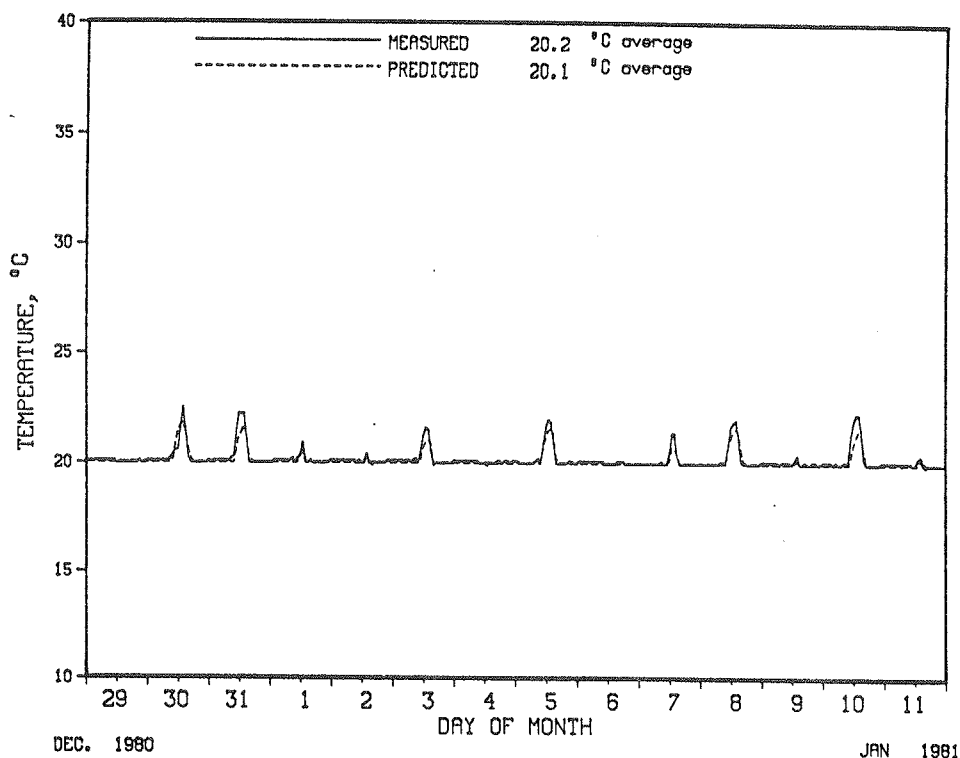
Tidsperioden på de 14-dage er også for lang til at beregningsresultaterne kan vurderes. Forfatteren har derfor valgt at koncentrere sig om den anden uge, fordi den har den fordel at simuleringsmodellen er "svinget" ind i relation til de aktuelle måledata.

#### Temperaturer

På figur 4.2-4 er de beregnede og målte temperaturer vist for perioden 5.-11. januar 1981. For SUNCODE's vedkommende er der forudsat to tidsstep pr. time, og at alt solindfaldet er fordelt til overfladerne - referencetilfældet. Af figuren fremgår det, at BLAST beregner temperaturen lidt for lavt, hvorimod SUNCODE ligger for højt den 5. og 8. januar, og for lavt 7. og 10. januar.

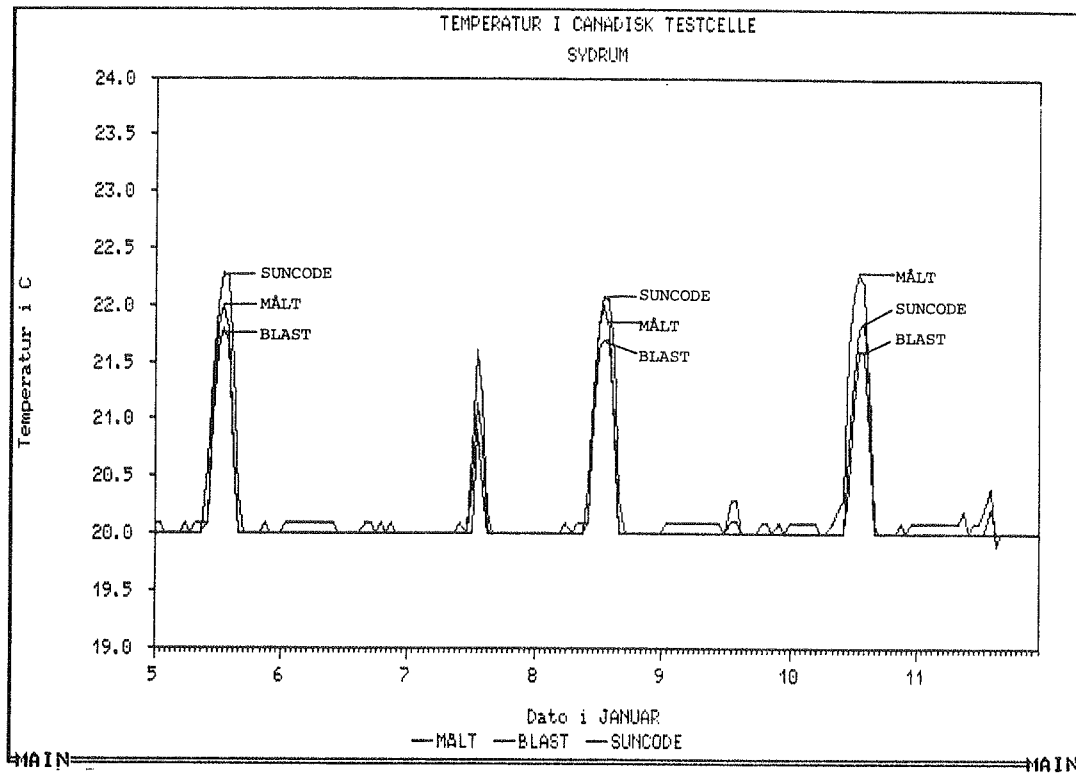
Det er imidlertid vanskeligt at se mere detaljeret, hvor godt de beregnede resultater stemmer med målingerne. Døgn-

## HUT 2, UNIT 3, S. ROOM

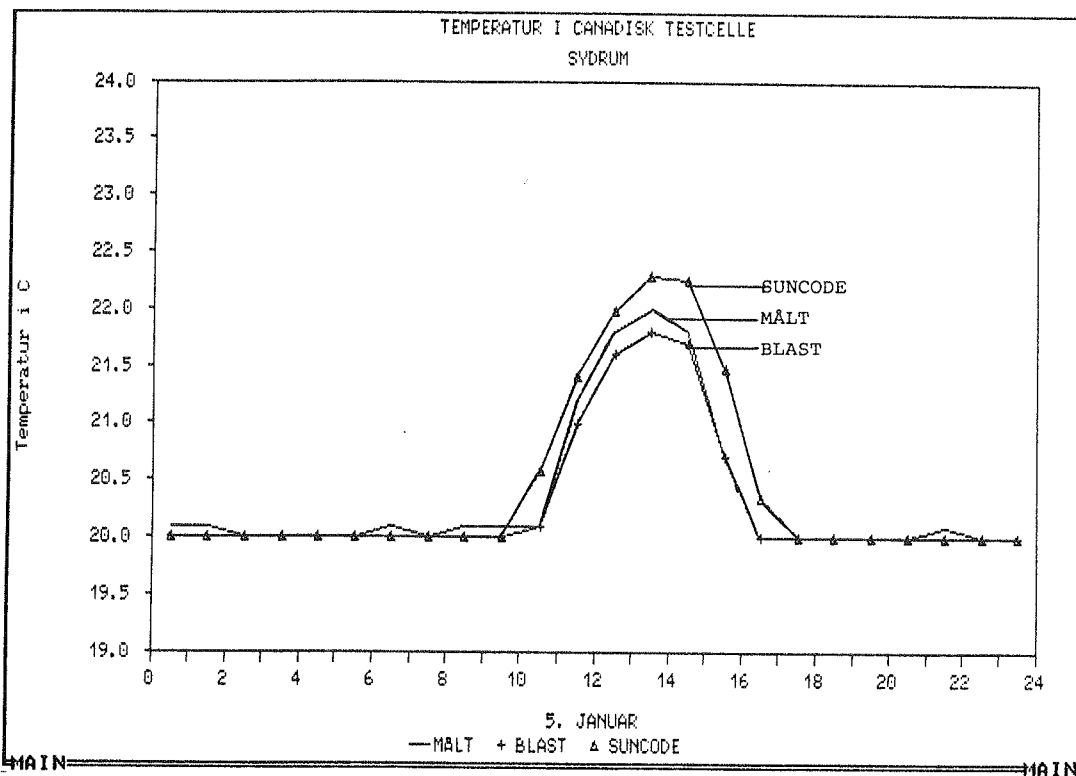


Figur 4.2-3. Beregnede temperaturer med ENCORE, Canada, for det sydvendte rum plottet op mod de aktuelle målinger.

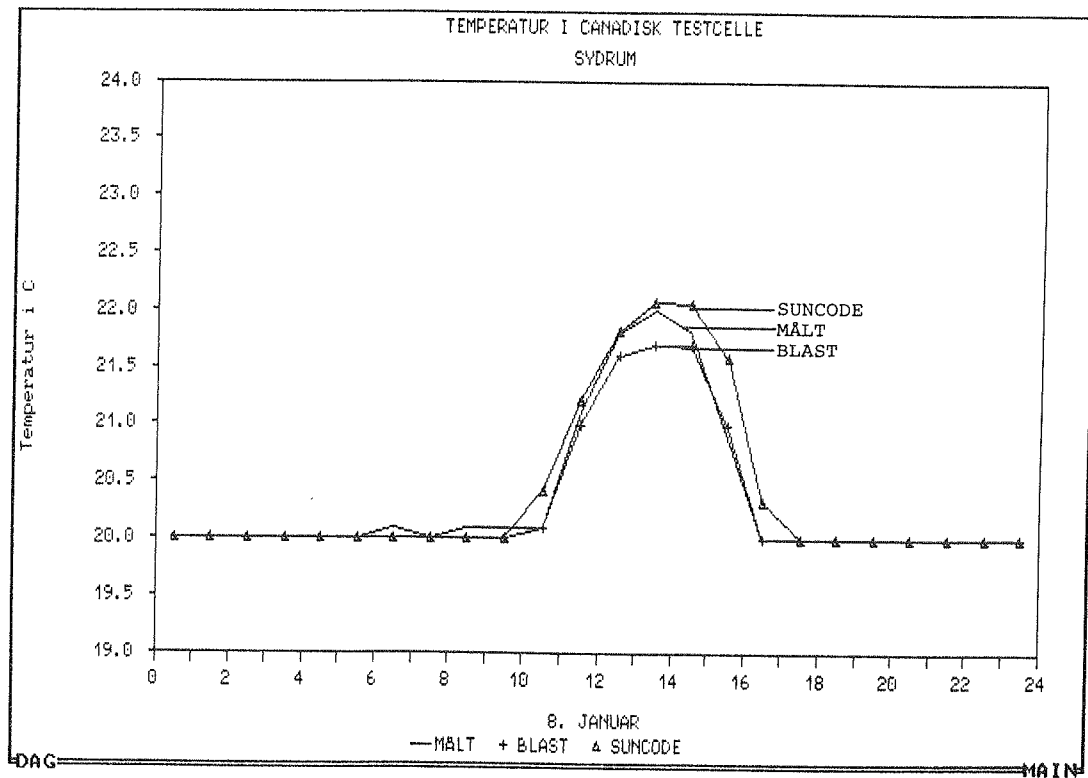
variationen er derfor tegnet op for de tre mest solrige dage: 5., 8. og 10. januar på figurerne 4.2-5 til 4.2-7. Af figur 4.2-5 og 4.2-6 ses det, at der er meget fin overensstemmelse mellem de beregnede og målte temperaturer, idet SUNCODE ligger lidt over og BLAST lidt under de målte værdier. Af figur 4.2-7 ses det, at de målte temperaturer ligger over de beregnede. Her giver SUNCODE de bedste resultater, hvilket er meget naturligt eftersom de beregnede temperaturer i SUNCODE generelt ligger over BLAST.



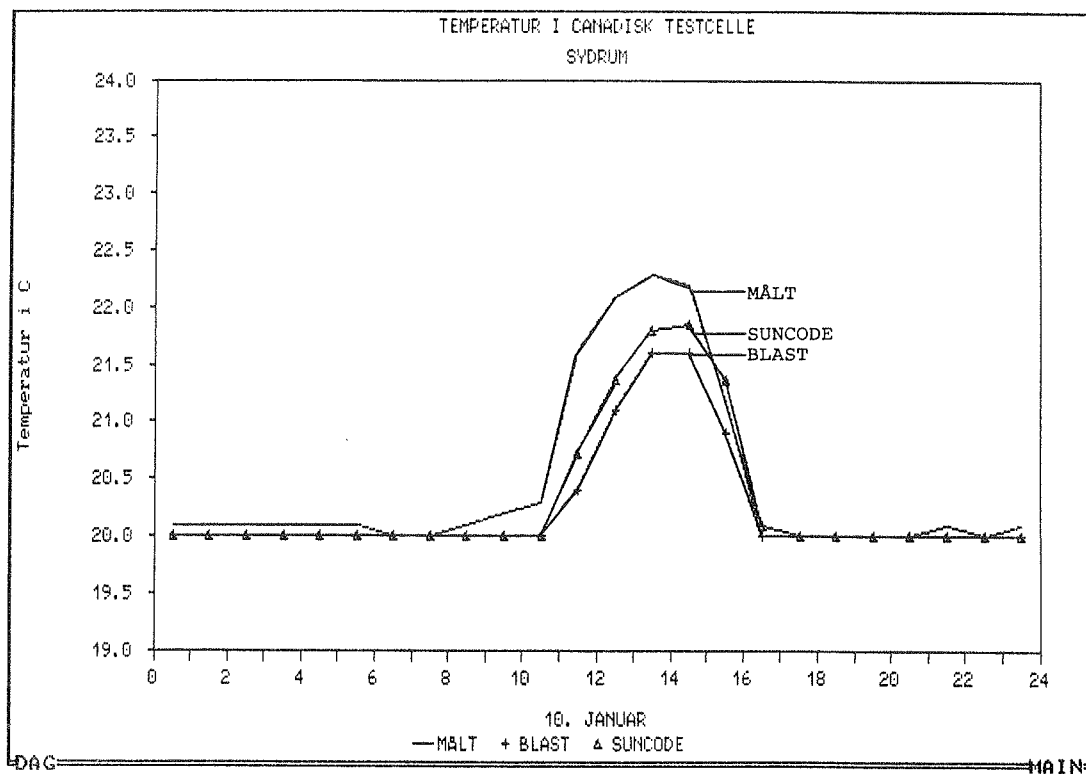
Figur 4.2-4. Beregnede og målte temperaturer i det sydvendte rum for perioden 5.-11. januar 1981.



Figur 4.2-5. Beregnede og målte temperaturer for den 5. januar.



Figur 4.2-6. Beregnede og målte temperaturer for den 8. januar.



Figur 4.2-7. Beregnede og målte temperaturer for den 10. januar.

I tabel 4.2-2 er maksimum-temperaturen, afvigelsen fra denne og den maksimale afvigelse over døgnet for de tre dage vist. Af tabellen kan aflæses, at begge programmer beregner maksimum-temperaturen ret præcist for de to første dage, hvorimod afvigelsen kommer op på  $0,7^{\circ}\text{C}$  for BLAST den tredje dag. Med hensyn til den maksimale afvigelse fra de målte værdier ligger BLAST bedre end SUNCODE.

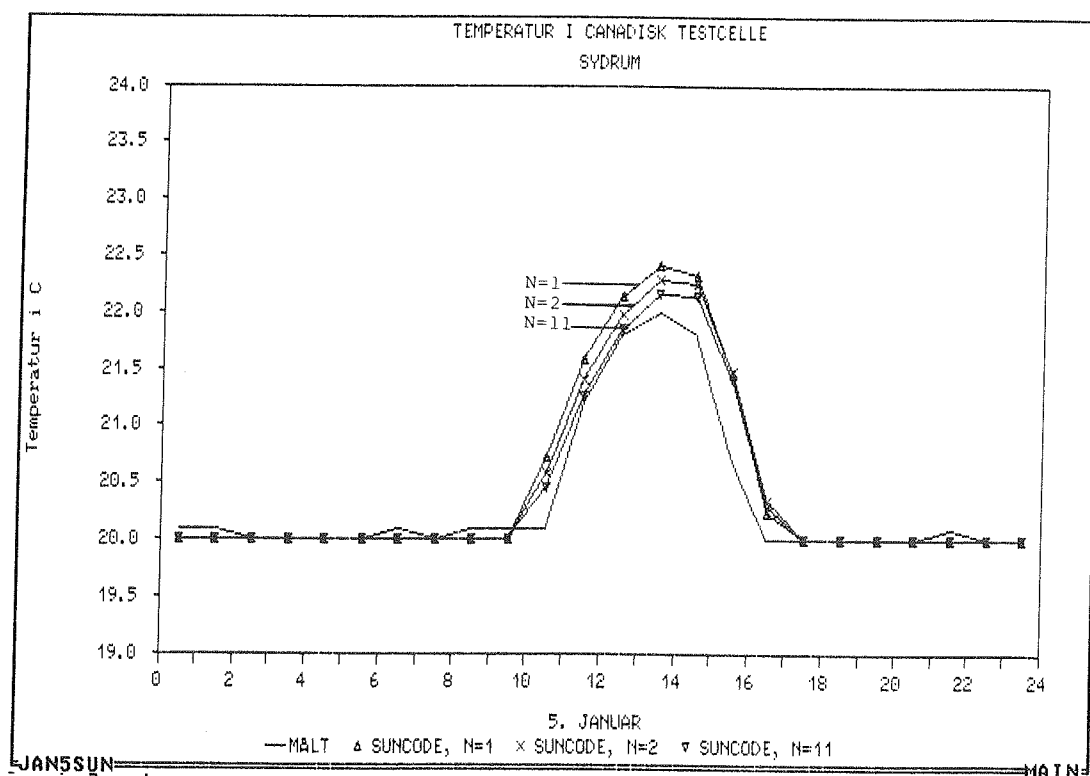
	Dato i januar	Maks. temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	Afgivelse fra målt ( $^{\circ}\text{C}$ )	Maks. afvigelse ( $^{\circ}\text{C}$ )
Målt		22,0	-	
BLAST	5.	21,8	-0,2	-0,2
SUNCODE		22,3	+0,3	+0,8
Målt		22,0	-	
BLAST	8.	21,7	-0,3	-0,3
SUNCODE		22,1	+0,1	+0,7
Målt		22,3	-	
BLAST	10.	21,6	-0,7	-1,2
SUNCODE		21,9	-0,4	-0,7

Tabel 4.2-2. Afvigelser mellem beregnede og målte temperaturer for den 5., 8. og 10. januar.

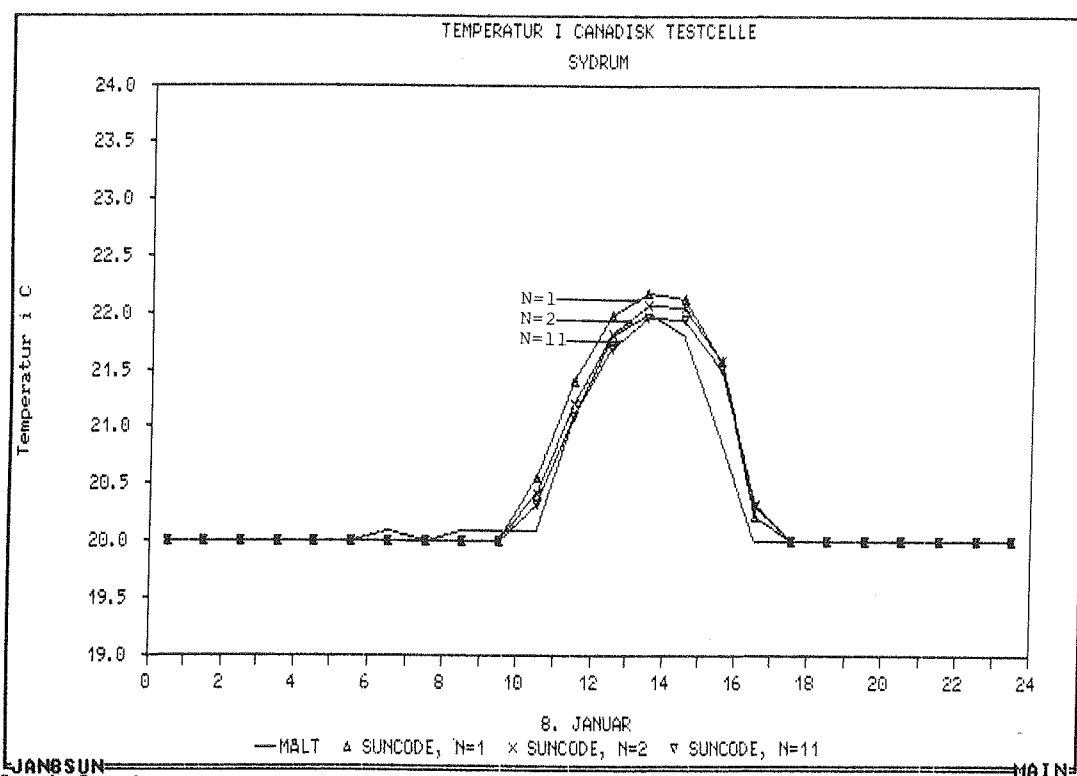
Som nævnt i kapitel 4.2.2 er der ved kørslerne med SUNCODE brugt et tidsstep på en, to og elleve gange pr. time, idet to er benyttet som reference. På figurerne 4.2-8 til 4.2-10 er indflydelsen af tidssteppet vist for den 5., 8. og 11. januar. Figurerne viser at temperaturerne bliver beregnet højere jo færre tidsstep der er pr. time. Eftersom SUNCODE beregner temperaturen for højt den 5. og 8. januar, opnås der den bedste overensstemmelse for kombinationen med elleve tidsstep pr. time. For den 10. januar fås den bedste overensstemmelse med et tidsstep pr. time, hvilket hænger sammen med at den målte temperatur ligger over den beregnede. Det må imidlertid forventes at den mest detaljerede beregningsmodel med de fleste tidsstep giver det bedste resultat.

Antallet af netpunkter i betonlaget på to og fire for varianten elleve tidsstep pr. time betyder i denne sammenhæng næsten intet, idet der kun fås en variation i maks. temperaturen på en tyvendedel grad.

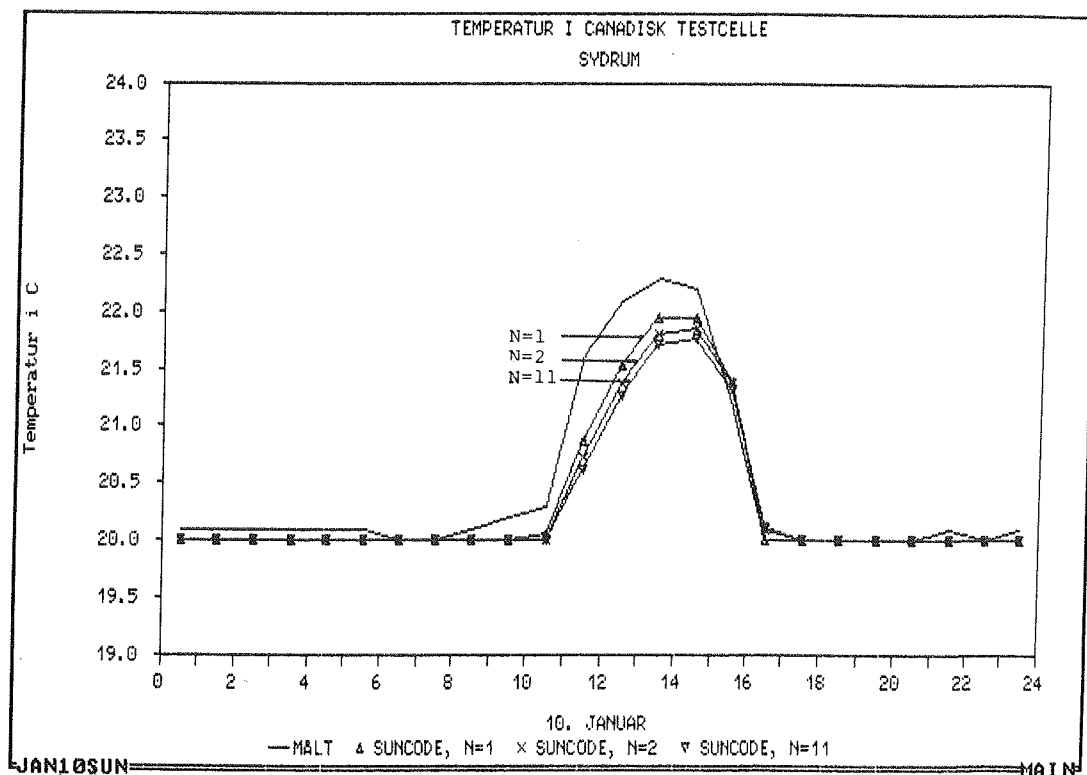




Figur 4.2-8. Beregnede og målte temperaturer med SUNCODE for den 5. januar med tidsstep på en, to og elleve pr. time.



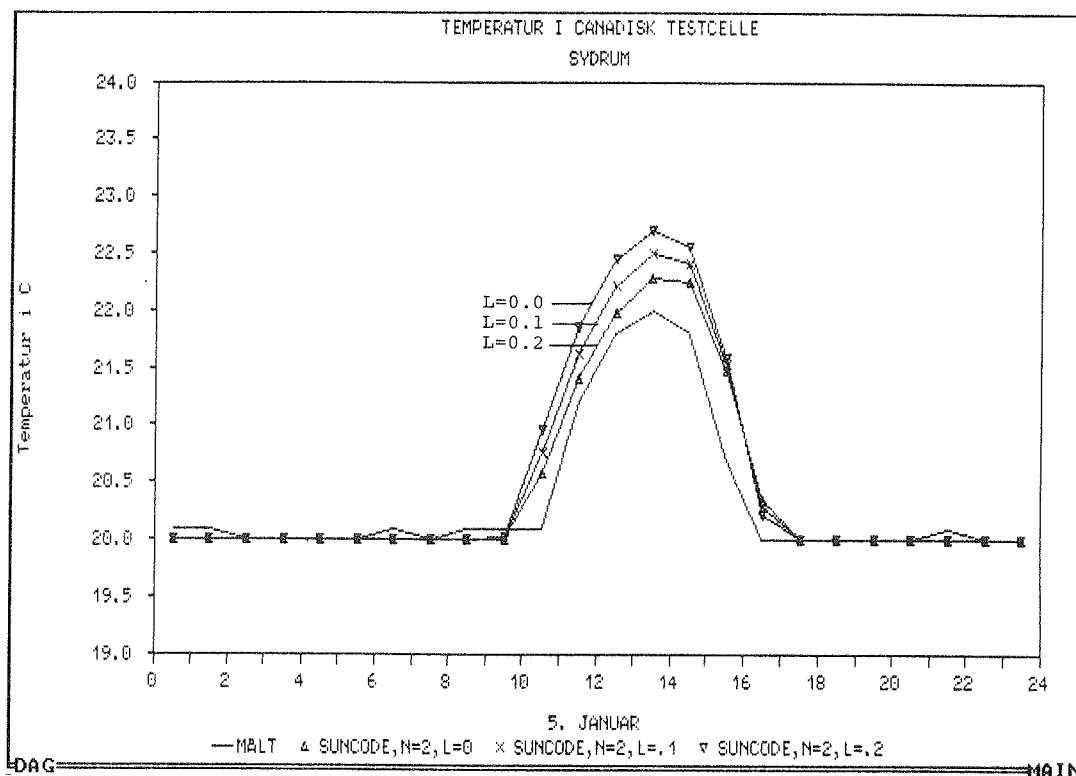
Figur 4.2-9. Beregnede og målte temperaturer med SUNCODE for den 8. januar med tidsstep på en, to og elleve pr. time.



Figur 4.2-10. Beregnede og målte temperaturer med SUNCODE for den 10. januar med tidsstep på en, to og elleve pr. time.

Da undersøgelse af max. temperaturforhold normalt er knyttet til korte tidsperioder (1-2 uger), modsat årsenergiforbrug, er det ikke kritisk for en bruger at vælge mange tidsstep pr. time for at beregne temperaturforholdene med større præcision. Dette er en af fordelene ved SUNCODE.

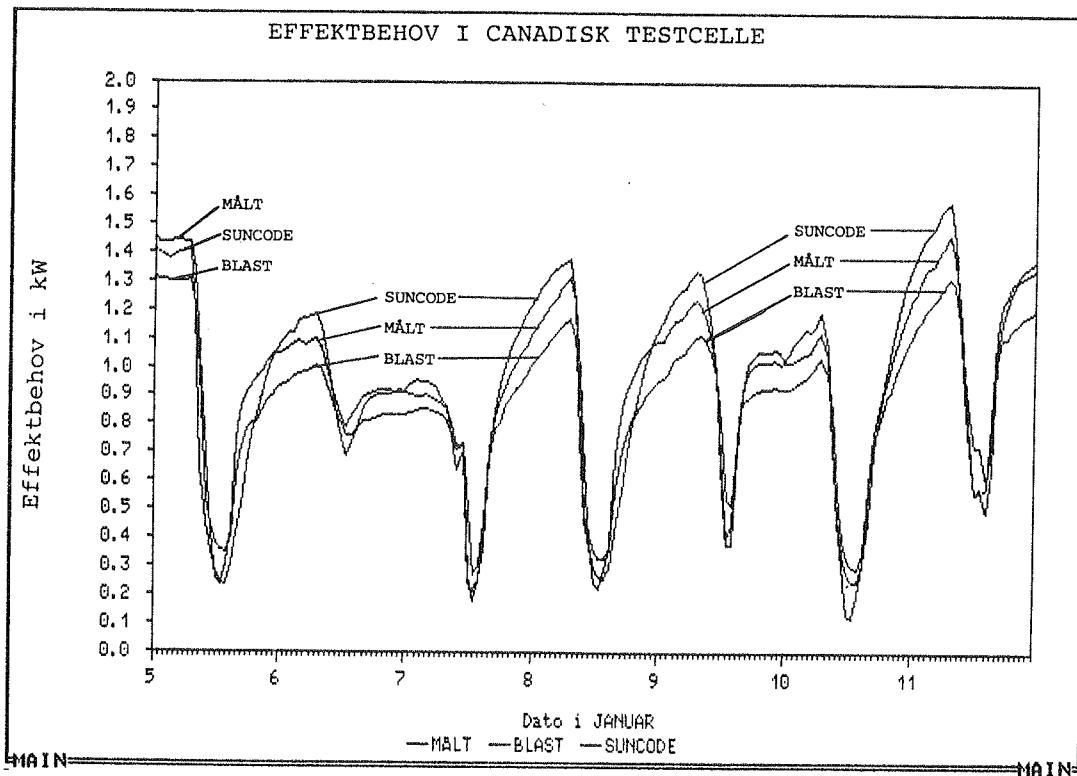
Afslutningsvis er der lavet et par simuleringer med referencemodellen for SUNCODE, hvor henholdsvis 10% og 20% af solindfaldet går direkte til rumluften. På figur 4.2-11 er resultaterne vist for den 5. januar. Som det kunne forventes, giver solindfald direkte til rumluften et højere temperaturforløb. Den maksimale temperatur for henholdsvis referencemodellen (alt solindfald til flader), 10% og 20% af solindfaldet direkte til rumluften bliver 22,3°C, 22,5°C og 22,7°C. Det må imidlertid skønnes for den aktuelle bygning, at kun meget få procent af det indstrålede solindfald går direkte til rumluften, hvorfor referencemodellen er den mest realistiske.



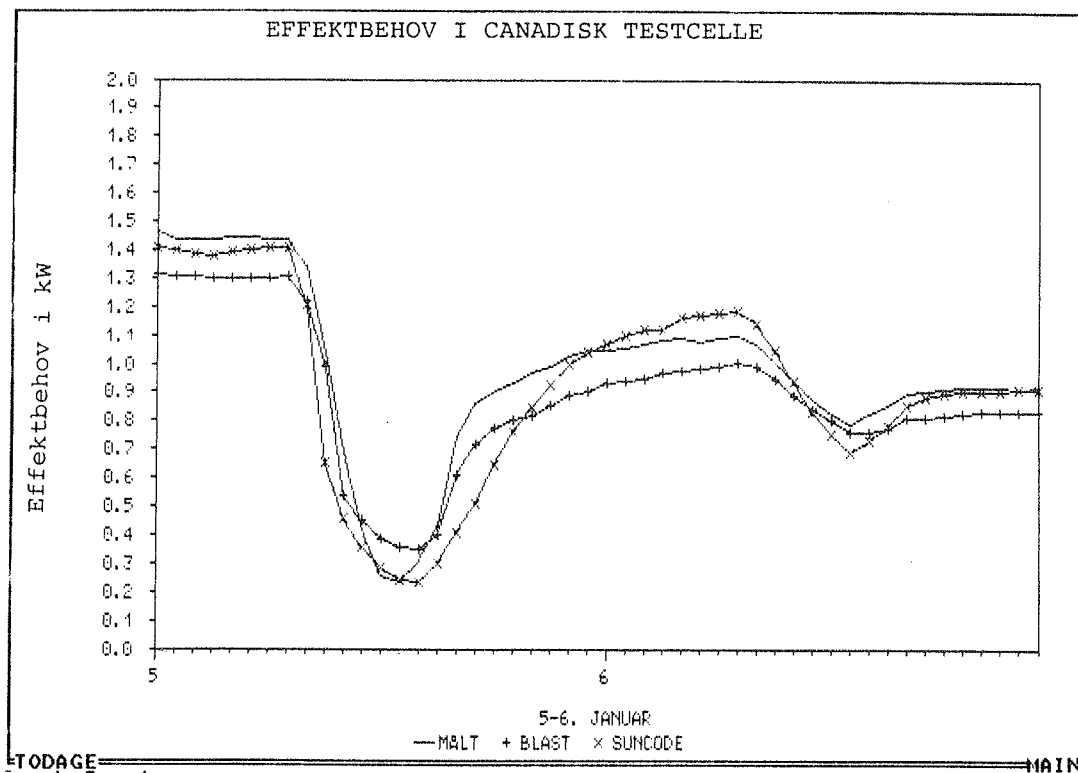
Figur 4.2-11. Sammenligning mellem temperaturniveauer for den 5. januar ved varierende andel af solindfald til rumluften: Uden solindfald til rumluften (referencemodell, ( $L=0$ )), 10% til rumluften ( $L=0,1$ ) og 20% til rumluften ( $L=0,2$ ).

### Effektbehov

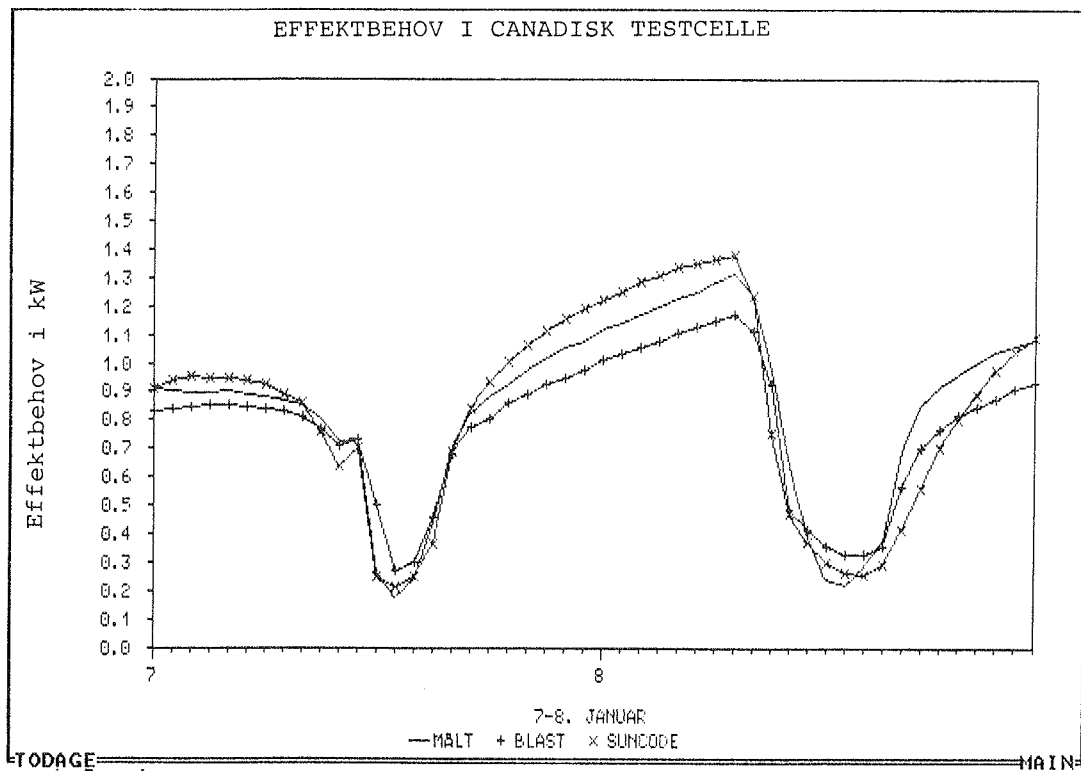
På figur 4.2-12 er effektbehovet for de aktuelle målinger og de beregnede værdier plottet for perioden 5.-11. januar. For at kunne se forløbet lidt bedre er der på figurerne 4.2-13 og 4.2-14 vist behovet for henholdsvis 5.-6. januar og 7.-8. januar. Af figurerne fremgår det at der er fin overensstemmelse mellem de målte og beregnede resultater. SUNCODE ligger generelt lidt over, og BLAST lidt under de målte værdier.



Figur 4.2-12. Målte og beregnede effektbehov for perioden 5.-11. januar.

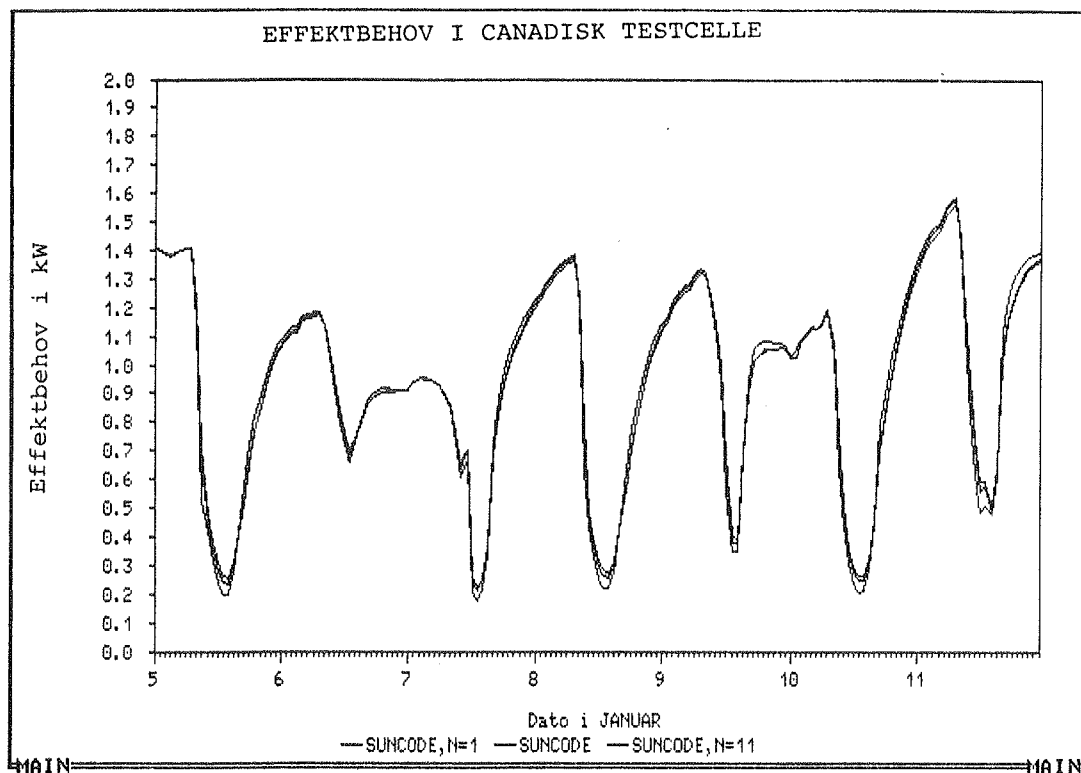


Figur 4.2-13. Målte og beregnede effektbehov for perioden 5.-6. januar.



Figur 4.2-14. Målte og beregnede effektbehov for perioden 7.-8. januar.

For at se indflydelsen af det beregnede effektbehov af SUNCODE i afhængighed af antallet af tidsstep pr. time er dette illustreret på figur 4.2-15 for perioden 5.-11. januar. Af figuren fremgår at det er uden større betydning hvilket tidsstep der benyttes. Dette er i modsætning til hvad der blev fundet for temperaturernes vedkommende. Imidlertid er det også en stor fordel at det forholder sig således, idet der ved undersøgelse af energiforbrug ofte er tale om årssimuleringer, hvor antallet af tidsstep således får stor indflydelse på tidsforbruget for den samlede simulering.



Figur 4.2-15. Beregnede effektbehov med SUNCODE for en, to og elleve tidsstep pr. time.

### Energiforbrug

Til slut er der i tabel 4.2-3 set på det målte energiforbrug sammenlignet med det beregnede for de to programmer. For SUNCODE er det referencemodellen med de to tidsstep pr. time der er medtaget, idet de øvrige varianter kun giver en variation på  $\pm 0,1\%$ . I tabellen er tillige medtaget de resultater som Ron Judkoff er kommet frem til, jf. Mørck, Ove - June 1986.

Model	Udført af	Varmeforbrug (kWh)	Difference fra målt forfatter (%)	(%)
Målt		323	-	
BLAST	Forfatteren	296,5	-8,2	-
BLAST	Ron Judkoff	301,7	-6,7	+1,8
SUNCODE	Forfatteren	326,1	+1,0	-
SUNCODE	Ron Judkoff	322,8	-0,1	-1,0

Tabel 4.2-3. Sammenligninger mellem målinger og beregninger for en to-ugers periode med den canadiske testcelle.

Af tabellen fremgår det at SUNCODE giver det bedste resultat idet beregningerne højst rammer 1% ved siden af det målte resultat. BLAST ligger derimod 6,7-8,2% for lavt. En af de årsager der kan ligge til grund for differencen kan være den måde solindfaldet beregnes på. BLAST har en tendens til at beregne solindfaldet lidt højere end SUNCODE hvilket vil give anledning til et lavere energiforbrug. Det totale solindfald er derfor blevet beregnet for to-ugers perioden for at se forskellen:

Solindfald 29. dec 1980 til 11. jan 1981

	Beregnet (kWh)	Forskel (kWh)	(%)
BLAST	104,1	+4,1	4,1
SUNCODE	100,0		

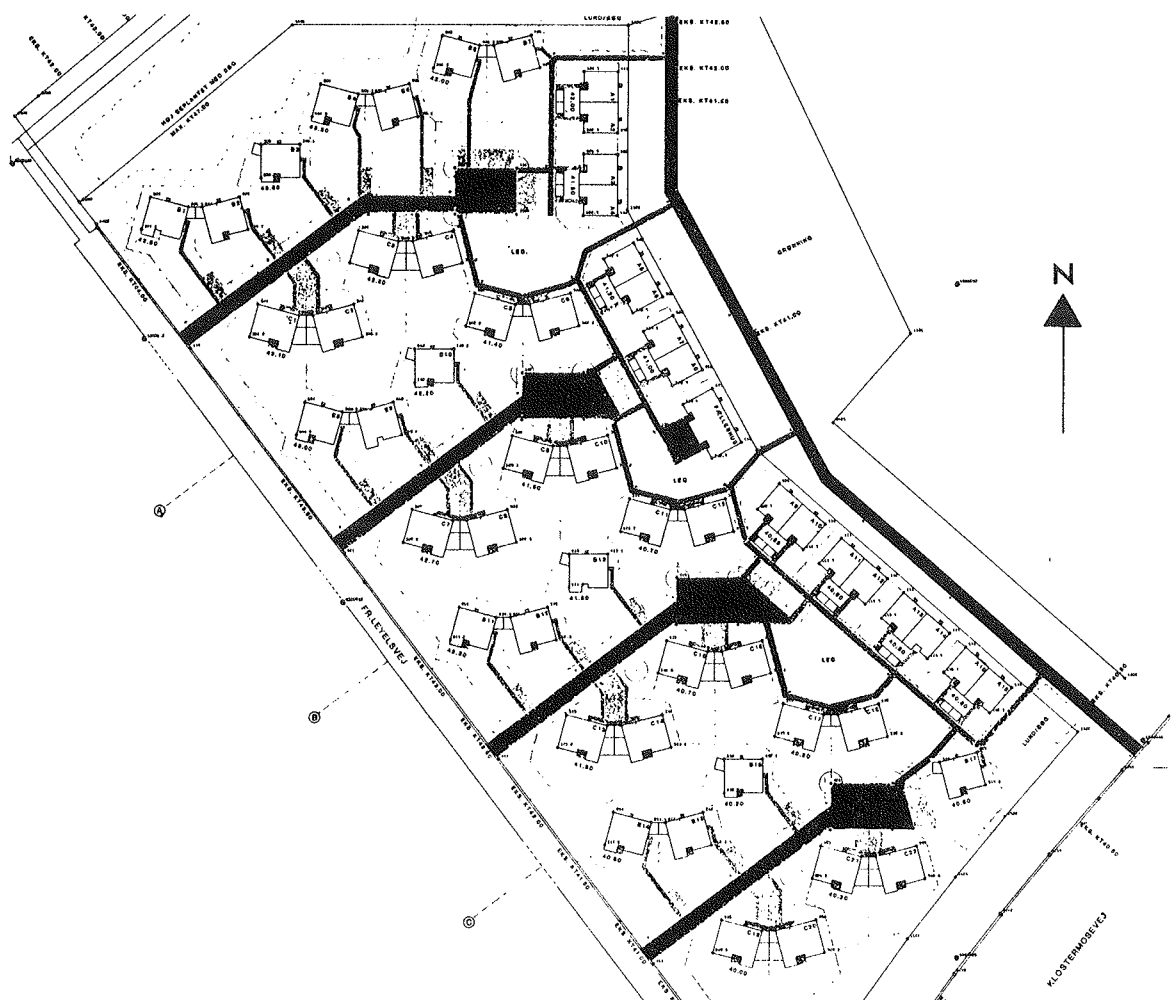
BLAST beregner således solindfaldet 4,1% højere end det bliver gjort i SUNCODE. Dette svarer imidlertid kun til 4,1 kWh i forhold til de 29,6 kWh, forfatteren, og de 24,4 kWh Ron Judkoff, har beregnet forskellen til. Differencen kan derfor ikke alene forklares med den måde solindfaldet bliver beregnet på.

Ifølge konklusionen på det arbejde Judkoff, Ron - 1985 har lavet, har han haft langt større differencer (op til 53%) mellem de to programmer i starten af sit valideringsarbejde med en række lokaliteter. Herefter har han arbejdet sig frem imod bedre overensstemmelse efterhånden som forskelle og fejl i input mellem programmerne er blevet fundet. Afvigelsen er til slut kommet til at ligge på 5-10%.

Forfatteren har sluttet af med en afvigelse på ca. 9% mellem programmerne i forhold til Ron Judkoff, der ligger på ca. 7%. I henhold til Ron Judkoff kan det imidlertid ikke forventes at et detaljeret program som BLAST skal passe bedre overens med et mere simplificeret program som SUNCODE. Normalt vil man forvente at det mest detaljerede program rammer tættest på, men det skete ikke i dette tilfælde.

#### 4.3 Smakkebo

Det danske byggeri "Smakkebo" er beliggende i Snekkersten ved Helsingør og består af 55 rækkehuse. Projektet er det danske bidrag til Task VIII, subtask D: Bygningsdesign, konstruktion og dataopsamling. De 55 rækkehuse er placeret langs fire blinde veje, som vist på bebyggelsesplanen på figur 4.3-1. Opførelsen af bebyggelsen startede den 22. maj 1984 og blev afsluttet den 15. februar 1985, hvorefter rækkehusene blev taget i brug.



Figur 4.3-1. Bebyggelsesplan for de 55 rækkehuse i Smakkebo.  
(Mørck, Ove - Maj 1986).

#### Organisation og støtte til projektet

Projektet blev startet af arkitekt m.a.a. Jørgen Andersen og Ove Mørck, Laboratoriet for Varmeisolering, i efteråret 1983, hvor de første indledende kontakter blev taget til forskellige potentielle bygherrer. Dette resulterede i følgende projektorganisation:

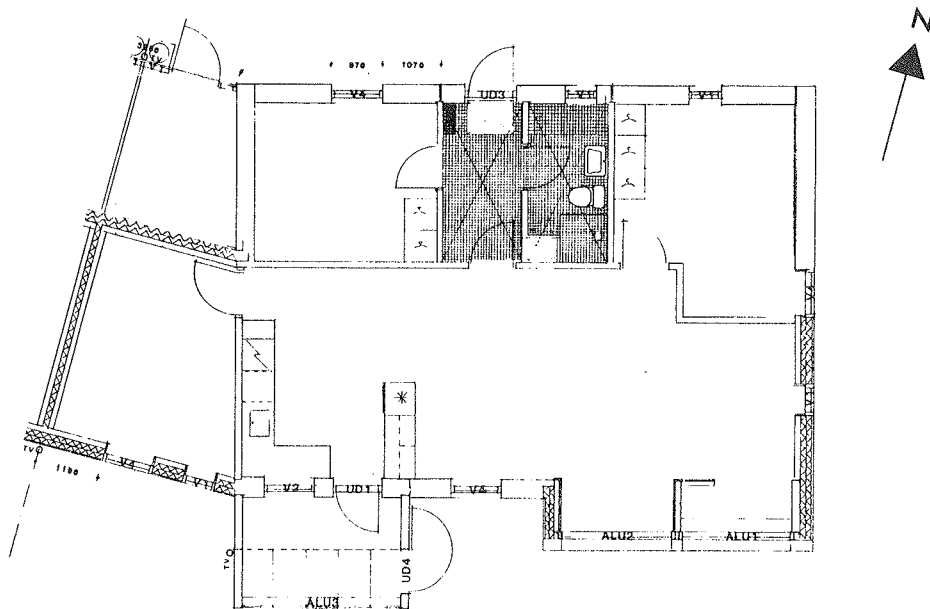
Bygherre:	Boligfonden SDS
Arkitekt:	Jørgen Andersen, m.a.a.
Entreprenør:	Hoffmann & Sønner A/S
Rådgivende Ingeniører:	E. Troelsgårds Tegnastue, Cenergia ApS
Måleprojekt:	Laboratoriet for Varme- isolering, DTH

Projektet har opnået støtte fra Energiministeriet, Teknologirådet og Byggeriets Udviklingsråd (BUR).



### Beskrivelse af husene

Projektet består af fire typer huse, A på 62 m<sup>2</sup>, B på 78 m<sup>2</sup>, C på 85 m<sup>2</sup> og C+ på 97 m<sup>2</sup>, alle arealer eksklusive glastilbygning på 6,1 m<sup>2</sup>. Herudover er der "et fælleshus" bestående af to huse af type A. Det hus, der er blevet målt detaljeret på, er af typen C+ og er orienteret mod syd med en drejning på 15 grader mod øst. En plan for dette er vist på figur 4.3-2, og øst-, nord- og sydfacaden på figurerne 4.3-3, 4.3-4 og 4.3-5. Figurerne er hentet fra Mørck, Ove - May 1986, hvor måleprojektet, konstruktionen og udformningen af Smakkebo er dokumenteret, hvorfor der henvises til denne rapport for en mere detaljeret beskrivelse.

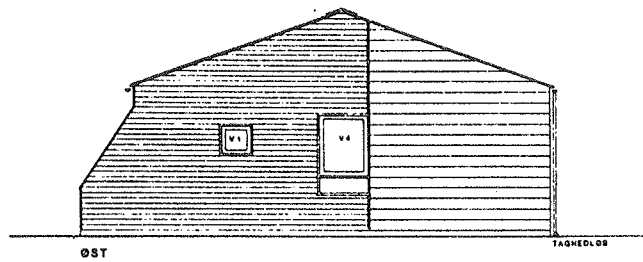


Figur 4.3-2. Gulvplan for hustype C+.  
(Mørck, Ove - May 1986).

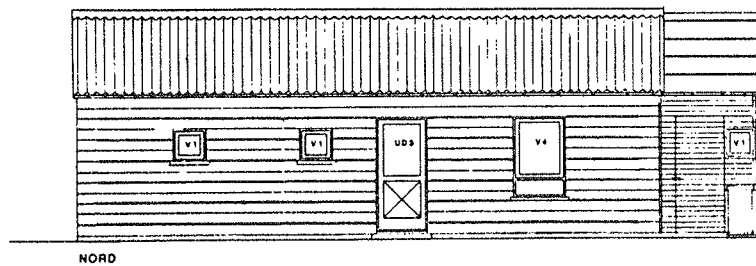
### Det energimæssige design af husene

Husene er designet til at være lavenergi huse og til at udnytte den passive solvarme i størst mulig udstrækning. Herudover er der blevet udviklet et helt nyt, meget kompakt aktivt solvarmeanlæg til varmt brugsvand. Designgrundlaget for husene er beskrevet i det følgende.

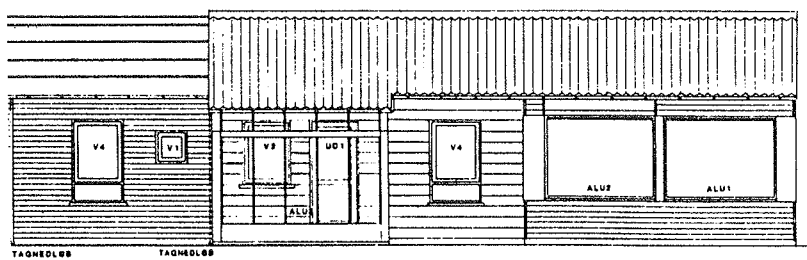
Forøget isolationsniveau. Isoleringen af husene er øget ud over hvad der kræves af bygningsreglementet for at reducere transmissionstab. De benyttede U-værdier for gulvet, taget og væggene ligger således på 0,16 til 0,20 W/m<sup>2</sup> K set i forhold til bygningsreglementets krav på mellem 0,2 og 0,4 W/m<sup>2</sup> K (0,35 W/m<sup>2</sup> K efter 1. april 86). For vinduernes vedkommende er der benyttet tre-lags ruder med undtagelse af vinduerne ud mod glastilbygningen og det skrå vindue, hvor der er benyttet en to-lags rude.



Figur 4.3-3. Østfacaden (endevæg).



Figur 4.3-4. Nordfacaden.



Figur 4.3-5. Sydfacaden.

Vinduesarealer og orientering. Vinduesarealet udgør 14% af bruttoetagearealet, fordelt med 9,5% mod syd, 2% mod øst og 2,5% mod nord.

Varmegenvinding på ventilationsluften. Huset er bygget meget tæt, og det naturlige luftskifte er således målt til at ligge helt nede på 0,06 gange i timen. For at etablere det nødvendige komfortmæssige luftskifte på en halv gang i timen på en energiøkonomisk måde er der derfor etableret et ventilationsanlæg med varmegenvinding. Der er benyttet en modstrømsvarmeveksler af mærket Temovex.

Skodder. Foran det store skrå sydvendte vindue er der etableret en udvendig skodde der har to funktioner. Om vinteren kan den if. beregningerne nedbringe U-værdien for dobbeltruden fra 3 W/m<sup>2</sup> K til 2 W/m<sup>2</sup> K når den benyttes. Om sommeren kan den benyttes som solafskærmning for at reducere det store solindfald.

Glastilbygning. Foran indgangspartiet til køkkenet er der etableret en lille glastilbygning på 6,1 m<sup>2</sup> med to-lags ruder. Glastilbygningen er integreret direkte i husets bygningskonstruktion, idet væggene er udført af de samme præfabrikerede leca-elementer.

Aktivt solvarmeanlæg. I forbindelse med projektet er der udviklet et helt nyt kompakt solvarmeanlæg til varmt brugsvand. Anlægget er placeret på en skrå flade ved siden af det skrå vindue. Solfangeren inklusive lagertank og isolering er udført som et vægelement, således at hele anlægget er en integreret del af selve facaden. Absorberen er på 3,5 m<sup>2</sup> med en tilhørende 0,16 m tyk lagertank med et volumen på 150 liter. Anlægget er nærmere beskrevet af Pedersen, Peder Vejsig - august 1986.

### Vejrdata

I tilknytning til måleprojektet blev der etableret en vejrstation, hvor følgende parametre bl.a. blev målt:

Udetemperatur	°C
Vindhastighed	m/s
Total global stråling, horisontal	W/m <sup>2</sup>
Total global stråling, 30° mod syd	W/m <sup>2</sup>
Total global stråling, 60° mod syd	W/m <sup>2</sup>

Af disse data kan de to første parametre benyttes direkte af BLAST og SUNCODE, hvorimod det er nødvendigt at omregne den globale stråling på de tre orienteringer til to af de tre følgende størrelser:

Total global stråling, horisontal	W/m <sup>2</sup>	(kJ/m <sup>2</sup> h)
Direkte himmelstråling	W/m <sup>2</sup>	(kJ/m <sup>2</sup> h)
Diffus stråling	W/m <sup>2</sup>	

Denne omregning blev foretaget af Ove Mørck, der leverede de nødvendige data til SUNCODE bestående af: Total global stråling, horisontal og direkte stråling (begge i kJ/m<sup>2</sup>h). Disse data blev konverteret til BLAST format ved at benytte "OTHER" formatet i WIFE, jf. 3.1.2. Dataene fra Smakkebo omhandlede perioden fra 1. november 1985 til 30. april 1986, mens data fra den øvrige del af året kom fra Det Danske Referenceår - TRY.

Ved en nærmere analyse med de konverterede vejrdata fra Smakkebo blev det imidlertid konstateret, ved at sammenholde den globale, horisontale stråling med målinger fra Hjortekær, at de maksimale værdier for soldata var for lave. Det blev derfor nødvendigt at kassere de omregnede soldata fra Smakkebo og i stedet benytte målte soldata fra et energiminstrielt lavenergihusprojekt i Hjortekær, der er beliggende 24 km derfra. De data der er blevet benyttet for perioden 1. september 1985 til 30. april 1986 er derfor følgende:

Smakkebo:	Udetemperatur	°C
	Vindhastighed	m/s
Hjortekær:	Total global stråling, horisontal	W/m <sup>2</sup>
	Diffus himmelstråling	W/m <sup>2</sup>

Den øvrige del af året er hentet fra Det Danske Referenceår - TRY.

De sammenflettede vejrdata er derpå blevet konverteret til BLAST format. Herefter har det været nødvendigt at benytte både WIFE og JC-WRITER til at oprette SUNCODE vejrdata. Dette er sket ved at lade WIFE udskrive den totale horisontale stråling, udetemperaturen og vindhastigheden, og lade JC-WRITER læse og udskrive den direkte stråling fra BLAST vejrdata. Til slut er de to filer blevet sammenflettet til SUNCODE vejrdata.

#### Måledata (målinger i beboet hus)

Hele måleprojektet for Smakkebo er detaljeret beskrevet i Mørck, Ove - maj 1986, kapitel 6. I denne rapport er det kun de målte temperaturer i de enkelte rum der er blevet benyttet, sammen med de aflæste energiforbrug på ugebasis.

### Beregningsforudsætninger

Ved beregningerne med BLAST og SUNCODE er der gjort en lang række forudsætninger der i størst muligt omfang skal tilnærme den aktuelle brug af huset. Da denne imidlertid varierer for de enkelte rum over året, er det umuligt at fastlægge disse data særlig præcist, hvorfor det er nødvendigt at tage nogle overordnede beslutninger for hvorledes beregningerne skal gennemføres. I det følgende bliver disse kort beskrevet idet de vil blive uddybet i den endelige slutrapport for Smakkebo projektet, der forventes ultimo 1987.

Temperatur i bolig : Beboerne har meddelt at de har natsænkning fra kl. 24 til kl. 16. Ved at betragte de målte lufttemperaturer i rummene og beboernes oplysninger er natsænkningstemperaturen skønnet til  $16^{\circ}\text{C}$ , og dagtemperaturen til  $20^{\circ}\text{C}$ . Da det må forventes at denne lange natsænkning kun gælder mandag til fredag mens beboerne er på arbejde, har forfatteren sat natsænkningen fra kl. 24 til kl. 8 i weekenden.

Opvarmningssæson : Opvarmningssæsonen er sat fra 1. oktober til 30. april. I praksis forekommer der et varmeforbrug på 11 kWh i maj 1986. Dette tal fratrækkes derfor ved sammenligningerne.

Naturligt luftskifte/Tvungen ventilation : Det naturlige luftskifte i boligen er blevet målt til 0,06 gange pr. time.

Der er installeret et ventilationsanlæg med en Temovex modstrømsvarmeveksler der if. Temovex Danmark's katalog er blevet prøvet af Statens Provningsanstalt, Borås, Sverige, og her har vist en temperaturvirkningsgrad på ca. 80% (lige store luftmængder).

Anlægget er dimensioneret med en indblæsningsluftmængde på  $150 \text{ m}^3/\text{h}$  og en udsugningsluftmængde på  $170 \text{ m}^3/\text{h}$ , svarende til luftskifter på henholdsvis 0,56 og 0,63 gange pr. time.

Af støjmessige årsager har en tekniker imidlertid justeret anlægget, uheldigvis kom det derved i ubalance. Dette har medført at den indblæste luftmængde kun har været  $100 \text{ m}^3/\text{h}$ , hvilket har mindsket energivirkningsgraden, men forøget temperaturvirkningsgraden til ca. 90% (målt værdi). I beregningerne er der benyttet en temperaturvirkningsgrad på 87%. De 87% er dog nok lidt for høj en værdi når der sammenlignes med praktiske målinger i

andre projekter hvor effektiviteten i forhold til laboratoriemålinger er lave-re.

Naturligt : Det naturligt luftskifte i glastilbygning-  
luftskifte i gen er sat til 0,5 gange pr. time. Der  
glastilbygning er dog lavet enkelte beregninger med 1,0  
gange pr. time.

Åbning af vinduer: Vinduerne åbnes når temperaturen over-  
stiger  $26^{\circ}\text{C}$  i opvarmningssæsonen og  $23^{\circ}\text{C}$   
udenfor, hvilket i beregningen giver an-  
ledning til et luftskifte på tre gange i  
timen.

Varmetilskud : Størstedelen af el-forbruget i hushold-  
fra elektricitet ningen omsættes til varme som bidrager  
til bygningens opvarmning. For visse  
installationer går den udviklede varme  
dog helt eller delvis tabt.

Det samlede el-forbrug til el og lys  
eksklusive varme er på 4335 kWh, hvoraf  
der bruges 550 kWh til el-patronen som  
back-up i solvarmeanlægget, og andre ca.  
500 kWh tages i vaskemaskine, ventilator  
i varmeveksler og udendørsbelysning. Der  
er derfor regnet med et varmetilskud på  
3300 kWh fra elektricitet.

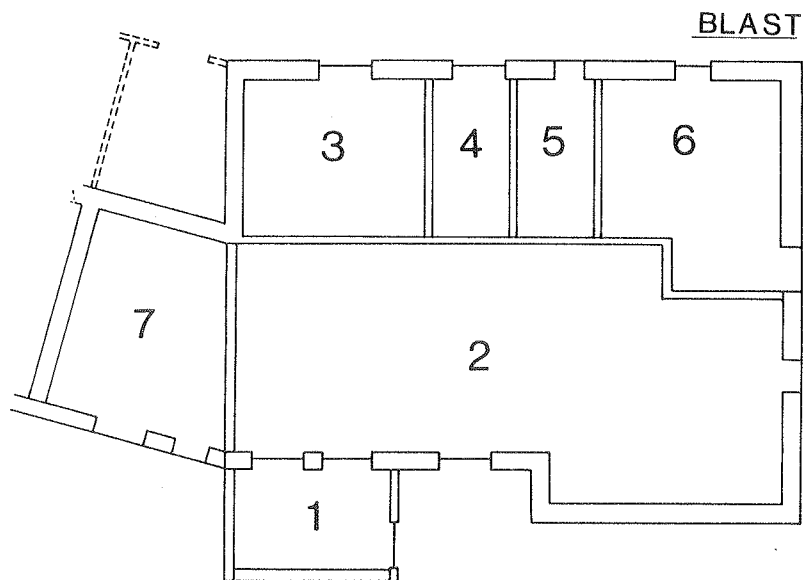
Varmetilskud : Det interne varmetilskud er sat til 3  
fra personer kWh/døgn for de to personer, hvilket gi-  
ver 1095 kWh/år.

### Grundmodel

For det aktuelle hus af type C+ er der opstillet en grundmo-  
del for BLAST og SUNCODE. Modellen i BLAST er lavet meget  
detaljeret, hvorimod dette ikke er muligt i SUNCODE på grund  
af begrænsninger i antallet af vægelementer.

På figur 4.3-6 er grundmodellen i BLAST vist. Den består af  
syv zoner:

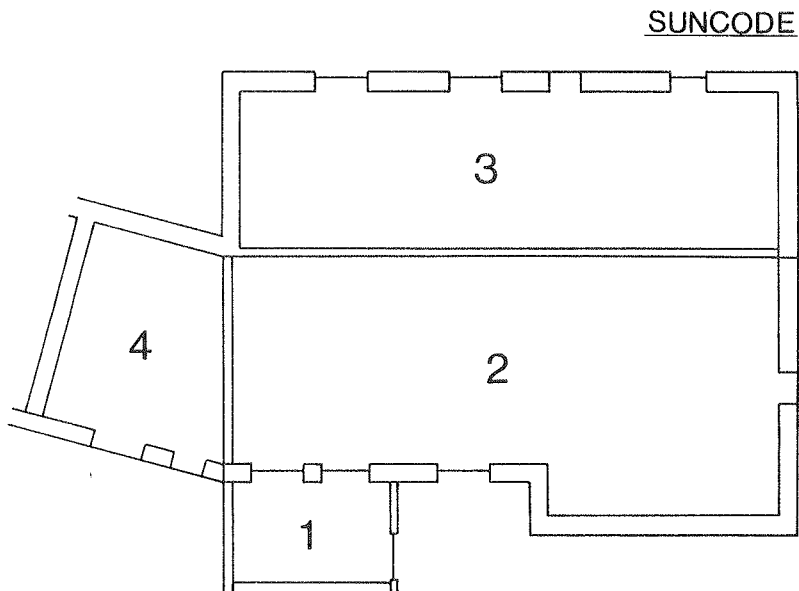
1. Vækstrum
2. Alrum/køkken
3. Værelse 1
4. Gang
5. Bad
6. Værelse 2
7. Værelse 3



Figur 4.3-6. Plan over grundmodel i BLAST.

På figur 4.3-7 er tilsvarende vist grundmodellen i SUNCODE bestående af følgende fire zoner:

1. Vækstrum
2. Alrum/køkken
3. Nordvendte rum
4. Værelse 3



Figur 4.3-7. Plan over grundmodel i SUNCODE.

Efter at have arbejdet med de to modeller må det konstateres at BLAST modellen er blevet lavet alt for detaljeret, og at brugeren let taber overblikket. SUNCODE modellen er lettere at gå til, samtidig med at programopbygningen i SUNCODE er lettere. Det havde derfor været bedre hvis BLAST modellen havde været lavet som en fire-rums model.

#### 4.3.1 Resultater

Sammenligningen mellem målinger og beregninger er sket ved at se på energiforbrug på måneds- og ugebasis. Herudover er der set på temperaturforhold i glastilbygning.

#### Energiforbrug

På baggrund af de givne forudsætninger er energiforbruget for det aktuelle hus i Smakkebo blevet beregnet. Der er selvfølgelig mange usikkerhedspunkter i forbindelse med et beboet hus, så det kan ikke forventes at resultaterne stemmer helt overens. På årsbasis kendes imidlertid det interne varmetilskud fra elektricitet og mennesker, samt det eksterne varmetilskud fra solen relativt godt, så en rimelig god overensstemmelse bør forventes hvis programmerne regner rigtigt.

Energiforbruget i Smakkebo er målt til 5497 kWh for opvarmningssæsonen 1985/86, hvoraf de 11 kWh er i maj måned hvor der beregningsmæssigt ikke er regnet med opvarmning. Resultaterne af beregningerne og målingerne for årsforbruget er vist i tabel 4.3-1. Af denne fremgår det for årsenergiforbruget, at energiforbruget, ekskl. maj, bliver beregnet meget præcist af BLAST med en afvigelse så lavt som på +0,9%, hvorimod SUNCODE ligger på 10,3%.

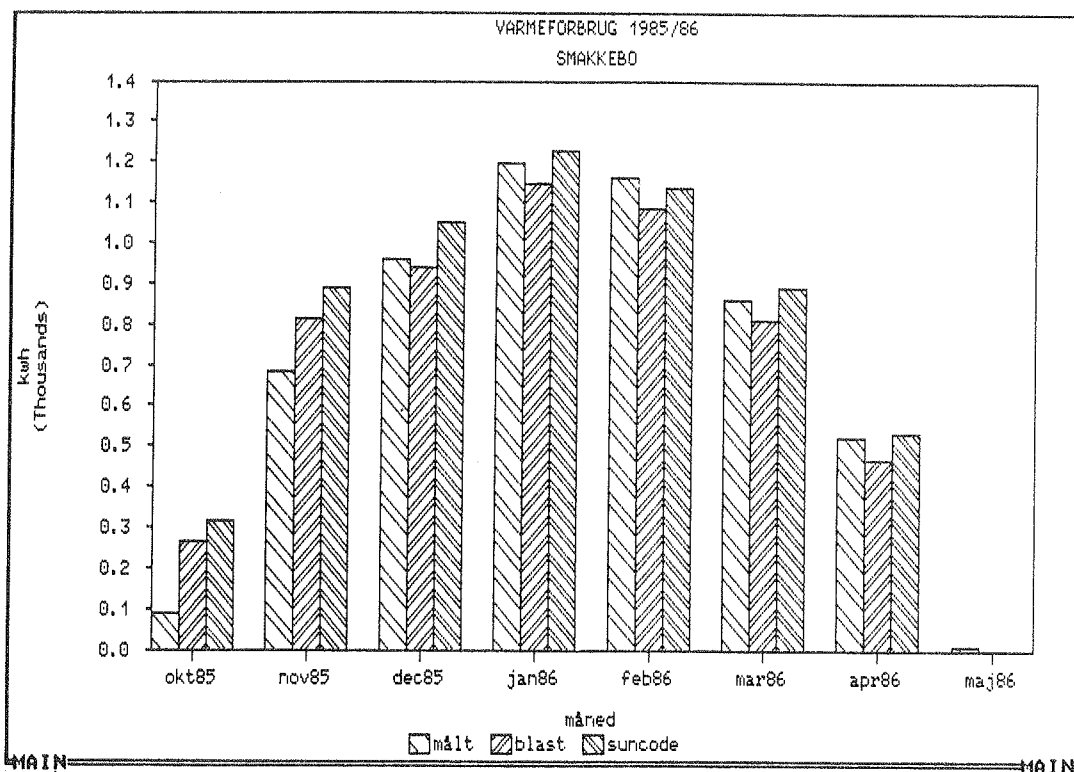
Periode	Målt (kWh)	Beregnet			
		BLAST		SUNCODE	
		(kWh)	(% afvigelse)	(kWh)	(% afvigelse)
År	5497				
1 okt-30 apr	5486	5539	+0,9	6053	+10,3
28 okt-30 apr	5448	5341	-2,0	5818	+6,8

Tabel 4.3-1. Sammenligninger mellem målinger og beregninger på årsbasis.

Det viser sig imidlertid, ud fra ugemålingerne, at opvarmningen først starter i midten af uge 43 (21-27 okt). Der er derfor nederst lavet en mere reel sammenligning mellem målinger og beregninger, gående fra den 28. okt. til den 30. april. Af denne fremgår det at BLAST beregner energiforbruget 2,0% for lavt, og SUNCODE 6,8% for højt. Disse resultater anses for at være meget fine. BLAST rammer særdeles tæt på med en afvigelse så lavt som på 2,0%. Denne lille afvigelse må imidlertid betragtes som et held, da de forskellige indgående usikkerhedsfaktorer ikke berettiger til så præcist et resultat.



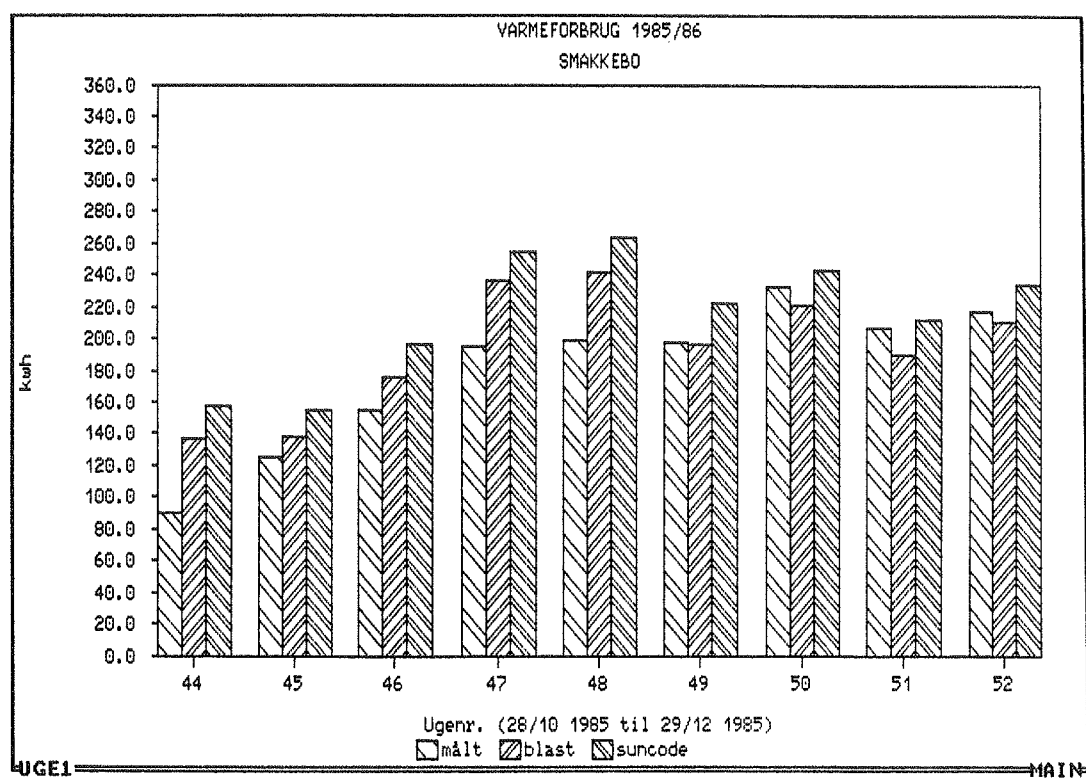
På figur 4.3-8 er månedsenergiforbrugene for målingerne og beregningerne illustreret. Af denne figur fremgår det at der er mindre god overensstemmelse for oktober og november måned, hvilket for oktober måneds vedkommende hænger sammen med de ovenfor nævnte argumenter. For de øvrige måneder ligger den maksimale afvigelse på mindre end 10% for begge programmer. SUNCODE ligger bedst for disse måneder med en gennemsnitlig afvigelse på 4,1% (gående fra 2,3% til 9,4%), mens BLAST ligger lidt højere med 5,9% (gående fra 2,2% til 10,6%). Hvis november måned medtages, bliver de gennemsnitlige afvigelser for SUNCODE og BLAST på henholdsvis 8,3% (med 29,5% for november måned), og 8,1% (med 19,1% for november måned). For månederne december til april regner BLAST gennemgående energiforbruget lidt for lavt og SUNCODE det lidt for højt.



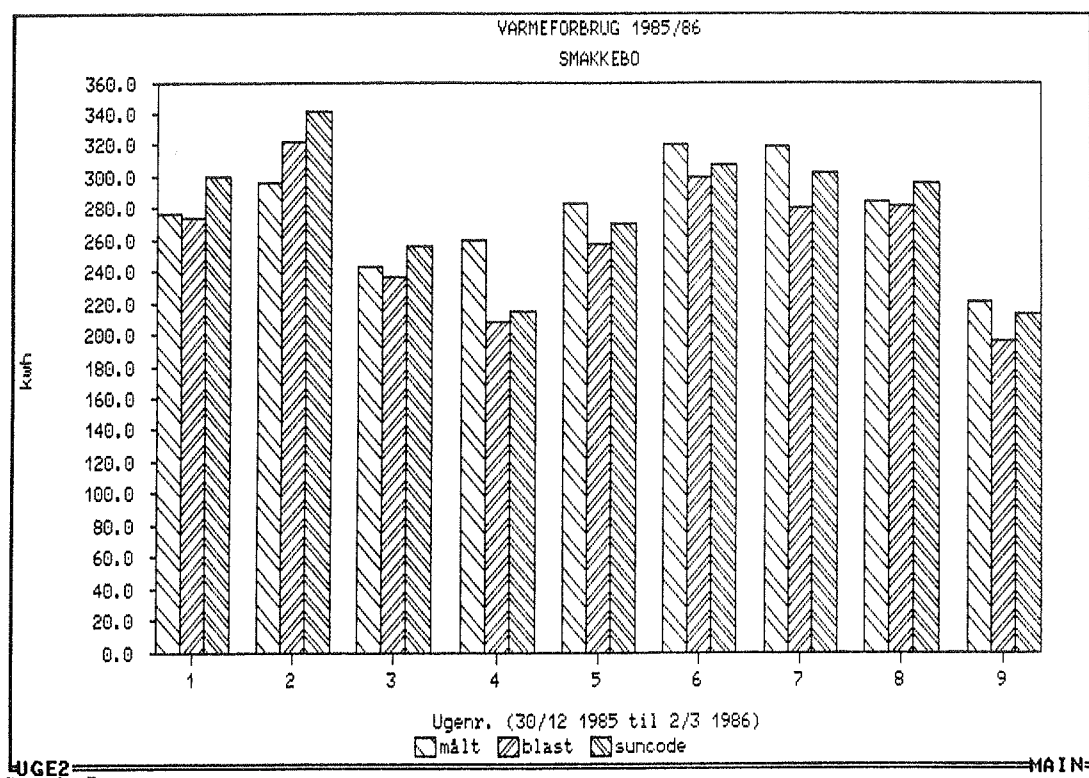
Figur 4.3-8. Energiforbruget på månedsbasis for målinger og beregninger.

Man bør være opmærksom på at de relativt store procentvise afvigelser for november måned absolut set svarer til nogle ret små værdier.

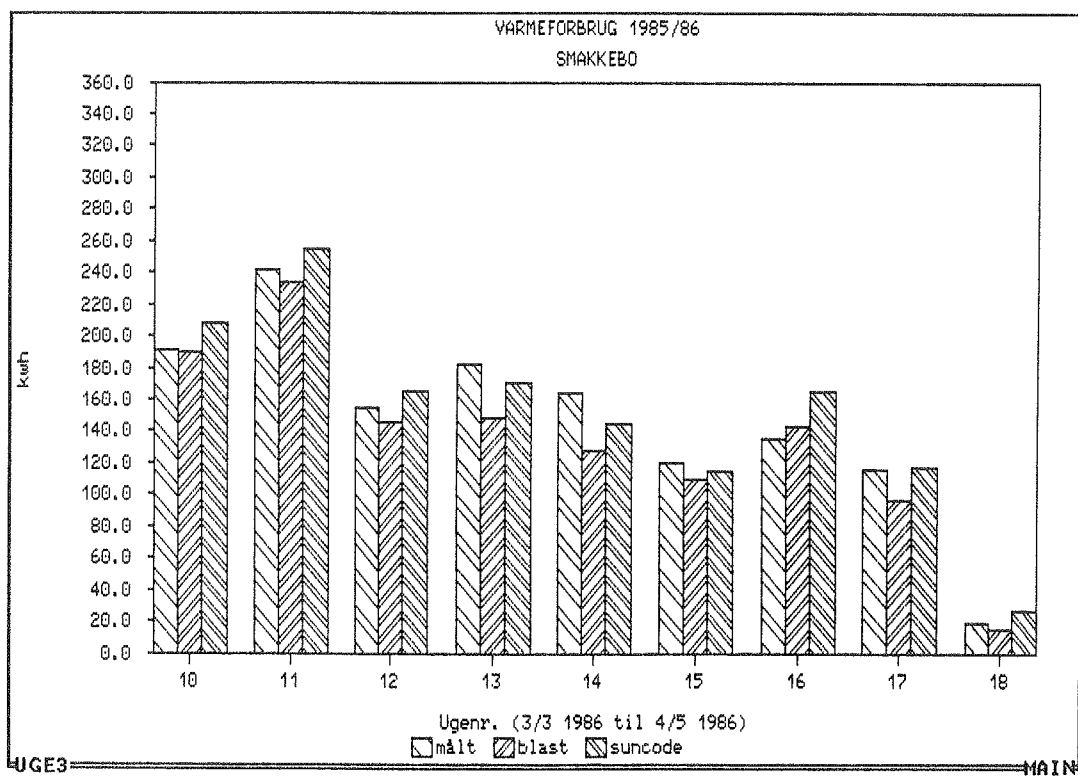
For figurerne 4.3-9 til 4.3-11 er energiforbrugene vist på ugebasis fra den 28. oktober 1985 til den 4. maj 1986, svarende til uge 44 til 18. Når der ses bort fra overgangsugerne 44 og 18 mellem opvarmningssæson/uden for opvarmningssæson, hvor der let kan blive store relative og absolutte afvigelser, bliver den gennemsnitlige afvigelse for BLAST 9,4% (gående fra 0,5% til 22,4%) og for SUNCODE 11,0% (gående fra 1,3% til 32,8%). BLAST giver således en lidt bedre overensstemmelse end SUNCODE.



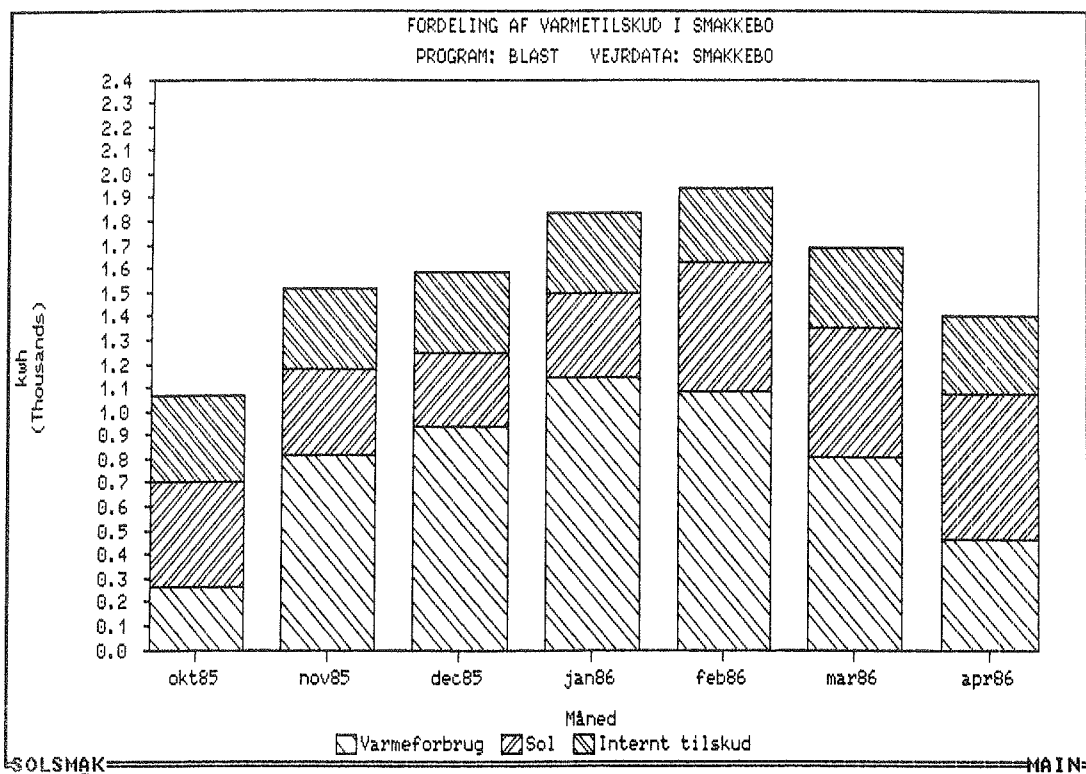
Figur 4.3-9. Energiforbruget på ugebasis for ugerne 44-52 (28. okt. til 29. dec. 1985).



Figur 4.3-10. Energiforbruget på ugebasis for ugerne 1-9 (30. dec. 1985 til 2. marts 1986).



Figur 4.3-11. Energiforbruget på ugebasis for ugerne 10-18 (3. marts til 4. maj 1986).



Figur 4.3-12. Fordelingen af varmetilskud i Smakkebo: Varmeforbrug, solindfald og interne varmetilskud.

På baggrund af sammenligningerne på måneds- og ugebasis må det konkluderes at der er fundet fin overensstemmelse mellem målinger og beregninger, når det tages i betragtning at huset har været beboet. Dette medfører at brugervaner får stor indflydelse på energiforbruget, hvilket har særlig betydning på ugebasis, hvorimod det udjævner sig på årsbasis idet der er rimelig godt hold på de interne varmetilskud.

Ud fra resultaterne giver BLAST den bedste overensstemmelse, men der kan ikke på baggrund af dette konkluderes noget om at BLAST regner bedre end SUNCODE. Hertil er de eksterne fejlkilder for store, jf. kapitel 4.1.

Eksterne fejlkilder. For at vurdere størrelsen af de eksterne fejlkilder er der lavet en række edb-simuleringer med SUNCODE, hvor temperaturniveauet, det interne varmetilskud og det effektive luftskifte er blevet varieret.

Temperaturen i boligen er skønnet ud fra målingerne til en dagtemperatur kl. 16-24 (mandag-fredag) og 8-24 (weekend) på  $20^{\circ}\text{C}$  og en natsænkningstemperatur på  $16^{\circ}\text{C}$  (begge setpunkter for opvarmning). Setpunkttemperaturerne varierer imidlertid for de enkelte rum og over året. De er derfor forbundet med nogen usikkerhed. For at vurdere hvilken indflydelse en hævnning af temperaturniveauet vil have er der blevet lavet et par kørsler med  $20,5^{\circ}\text{C}/16,5^{\circ}\text{C}$  og  $21^{\circ}\text{C}/17^{\circ}\text{C}$ , hvilket har forøget energiforbruget med henholdsvis 4,8% og 9,7%.

Det interne varmetilskud for hele året kendes rimelig præcist da elforbruget er målt og huset bebos af to personer. Usikkerheden på dette tal er derfor skønnet til  $\pm 10\%$ , hvilket giver en ændring på energiforbruget på  $\pm 3,5\%$ . En ændring af det interne varmetilskud slår således kun igennem med ca. en tredjedel på energiforbruget til opvarmning (Opvarmningssæsonen er kun på 7 måneder).

Den udsugede luftmængde vides at være ca.  $170 \text{ m}^3/\text{h}$ , hvoraf  $100 \text{ m}^3/\text{h}$  går igennem varmeveksleren. Temperaturvirkningsgraden svinger lidt over året, men er sat til en gennemsnitsværdi på 87%. For at vurdere temperaturvirkningsgradens indflydelse på energiforbruget er denne nedsat til 75%, hvilket har forøget energiforbruget med 5,6%.

For at se betydningen af den samlede virkning af de eksterne fejlkilder er der afslutningsvis lavet nogle kørsler hvor usikkerhederne trækker i hver sin retning. Hvis det interne varmetilskud øges med 10% og temperaturniveauet sættes til  $19,5^{\circ}\text{C}/15,5^{\circ}\text{C}$ , giver det anledning til en reduktion i energiforbruget på 8,3%. Hvis derimod temperaturvirkningsgraden for modstrømsvarmeveksleren nedsættes til 75%, den interne belastning mindskes med 10% og temperaturniveauet sættes til  $21^{\circ}\text{C}/17^{\circ}\text{C}$ , forøges energiforbruget med 18,9%. Usikkerheden på beregningerne kan derfor, med hensyn til de eksterne fejlkilder, skønnes at ligge imellem -8,3% og 18,9%.

## Varmetilskud

Efter at have set på energiforbruget alene er der afslutningsvis set på fordelingen af solindfald og interne varmetilskud i relation til energiforbruget. På figur 4.3-12 er dette vist på månedsbasis. Af figuren fremgår det at i overgangsmånederne oktober og april dækker gratisvarmen den helt overvejende del af husets samlede varmetab (april = 66,8%, okt. = 75,3%). For hele året dækker gratisvarmen halvdelen af husets varmetab.

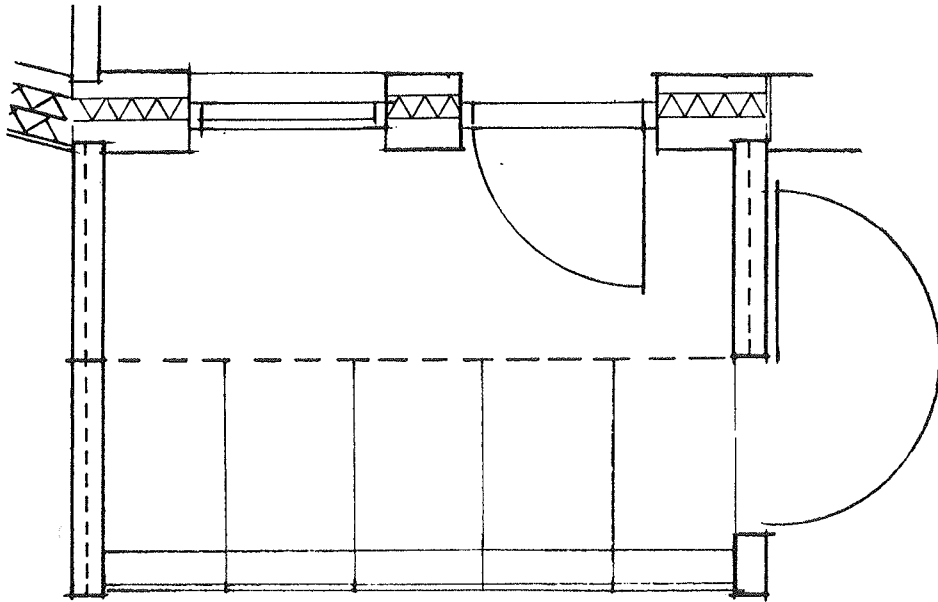
## Temperaturer

Målingerne af temperaturforholdene i Smakkebo er ikke sket under de samme veldokumenterede forhold som det var tilfældet med den canadiske testcelle. Beboervanerne har således stor indflydelse på temperaturerne på timebasis, hvortil kommer at solstrålingsdata er målt på en anden lokalitet, hvilket samlet betyder en stor usikkerhed på resultaterne på timebasis. Der har således været problemer med at få de aktuelle temperaturforhold i beboelsen til at stemme overens med beregninger, hvilket primært hænger sammen med at fordelingen af de interne varmetilskud over døgnet i de enkelte rum ikke kendes. Det er selvfølgelig muligt på baggrund af de målte temperaturer at skønne de aktuelle interne varmetilskud over døgnet i de enkelte rum og herefter foretage beregninger med disse data.

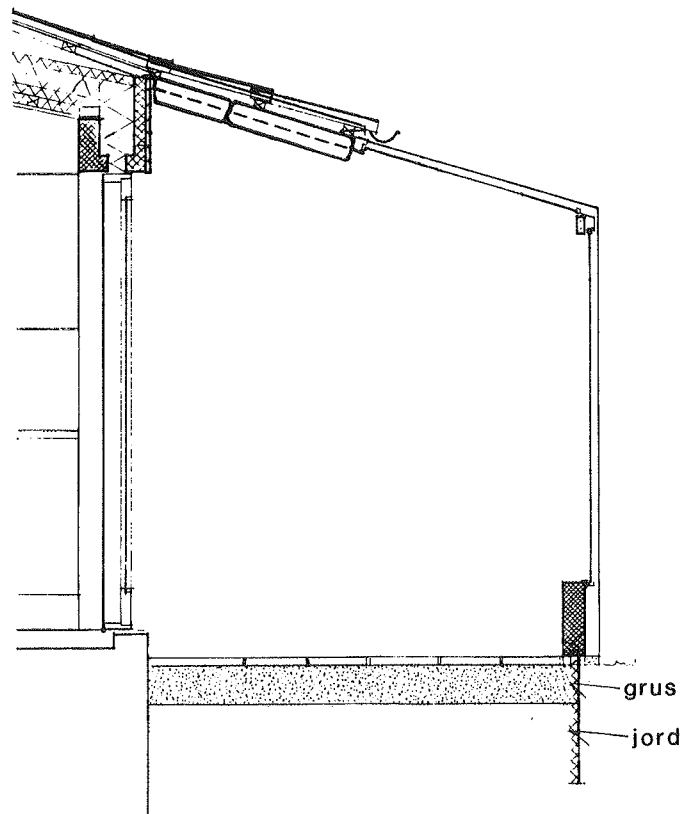
For at undgå dette problem er der i stedet set på temperaturforholdene i glastilbygningen for en vinter- og forårsperiode hvor indflydelsen fra beboerne har været minimal.

Glastilbygningen er på 6,1 m<sup>2</sup> og er som vist på figur 4.3-2 placeret i den vestlige ende af huset og er sydligt orienteret (15 grader i østlig retning). Vinduerne består af to lag glas, og den termiske masse i glastilbygningen består af vægge af lecabeton og gulv af beton. På figur 4.3-13 er der vist en plan over glastilbygningen, og på figur 4.3-14 et snit gennem den. På figur 4.3-15 er der vist et billede af glastilbygningen set fra syd med angivelse af hvor globe- og lufttemperaturen er blevet målt. Da målingen er sket i to tredjedele højde, er den ikke helt repræsentativ for lufttemperaturen i glastilbygningen. Den målte lufttemperatur vil derfor blive højere end de beregnede gennemsnitslufttemperaturer.

Luftskiftet i glastilbygningen er ikke blevet målt, men ud fra erfaringer fra andre nyopførte glastilbygninger ligger luftskiftet på mellem en halv og én gang pr. time. For at se hvilken indflydelse denne usikkerhed har på de beregnede resultater er der for perioden 25.-28. februar på figur 4.3-16 optegnet værdier med BLAST for et luftskifte på henholdsvis en halv og en gang pr. time. Af figuren ses at denne usikkerhed har en beskeden indflydelse på resultatet. Da glastilbygningen er en integreret del af huset og har to-lags ruder, er der i det følgende antaget et luftskifte på en halv gang i timen.

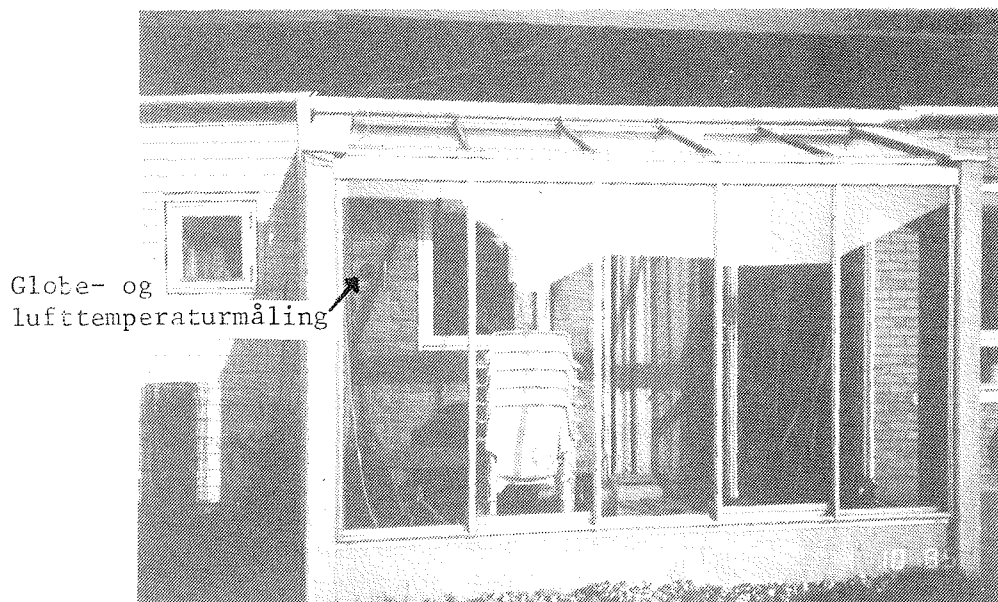


Figur 4.3-13. Plan over glastilbygningen.

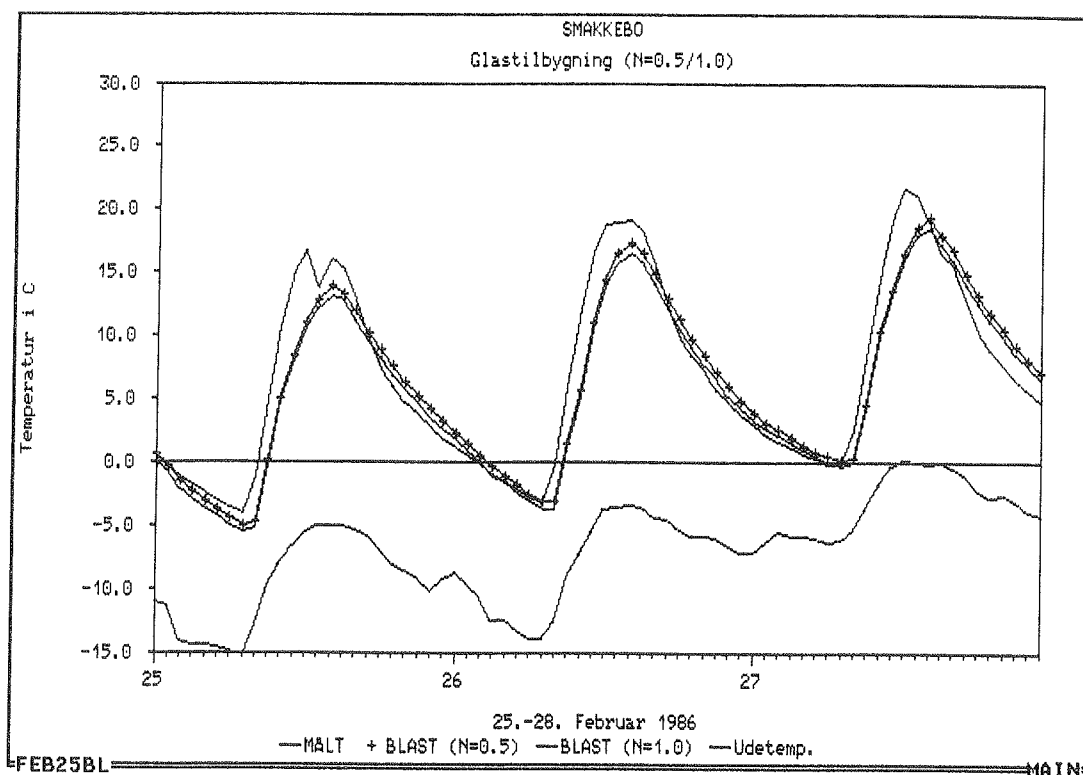


Figur 4.3-14. Snit gennem glastilbygningen.

På figur 4.3-17 er der for den samme periode som figur 4.3-16 optegnet temperaturforløbet for målinger og beregninger med BLAST og SUNCODE. Perioden er for tre kolde, klare dage med stort solindfald. Af figuren fremgår det at der er rimelig god overensstemmelse. Kurverne for beregningerne ligger lavere end målingerne i opvarmningsfasen, og højere i afkølingsfasen. Herudover når de beregnede resultater ikke et maksimum der er lige så højt som det målte. BLAST beregner temperaturen lidt højere end SUNCODE for den viste periode.

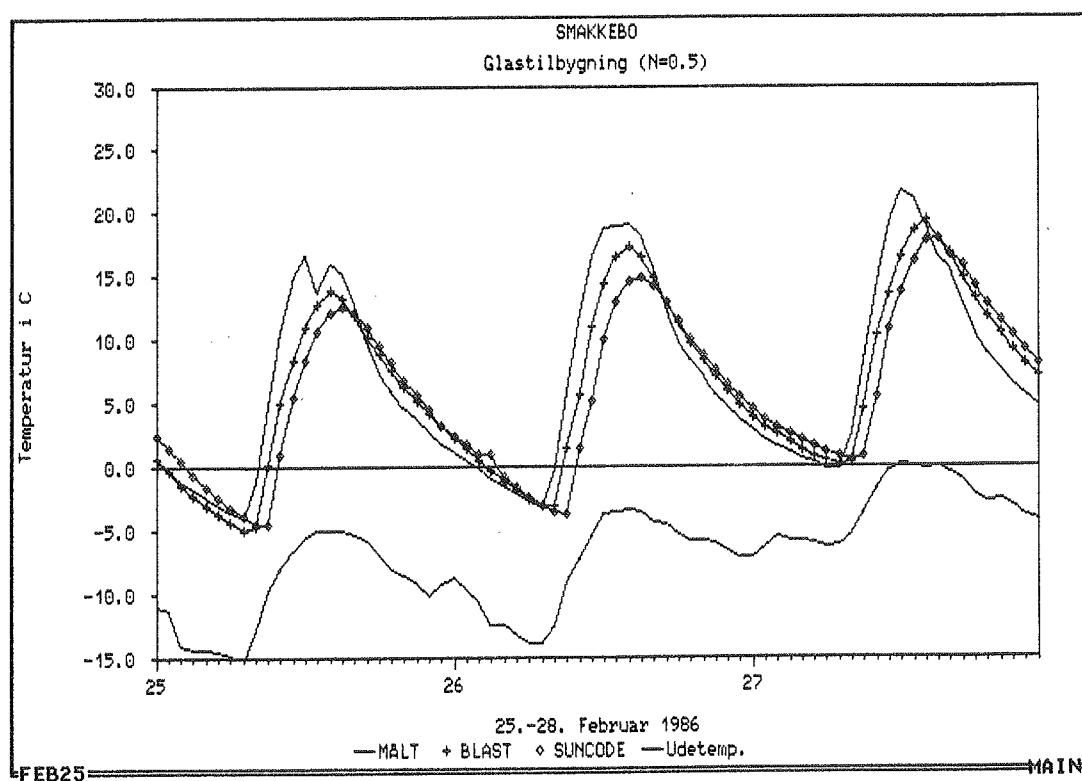


Figur 4.3.15. Glastilbygningen set fra syd med angivelse af hvor globe- og lufttemperaturen måles.



Figur 4.3-16. Luftskiftets indflydelse på de beregnede værdier med BLAST, for et naturligt luftskifte på henholdsvis en halv og én gang pr. time.

Uoverensstemmelserne kan primært forklares med følgende forhold: At temperaturmålingen er registreret højere oppe end den halve gennemsnitshøjde, og at programmerne akkumulerer det indstrålede solindfald bedre end det sker i virkeligheden. Det første forhold medfører at den maksimale tempera-



Figur 4.3-17. Beregnede og målte temperaturer i glastilbygningen for perioden 25.-27. februar 1986.

tur ved målingerne bliver højere end de beregnede. Det andet medfører at solindfaldet i højere grad går direkte til rumluften end det er beregnet med BLAST og SUNCODE.

I SUNCODE er der gjort den antagelse at 10% af solindfaldet går direkte til rumluften. Muligvis er denne værdi vurderet for lavt. Der er imidlertid ikke lavet mere detaljerede analyser med denne eller andre parametre, da dette til dels er gjort under den canadiske testcelle, og da der er for mange andre usikkerhedspunkter i denne sammenligning.

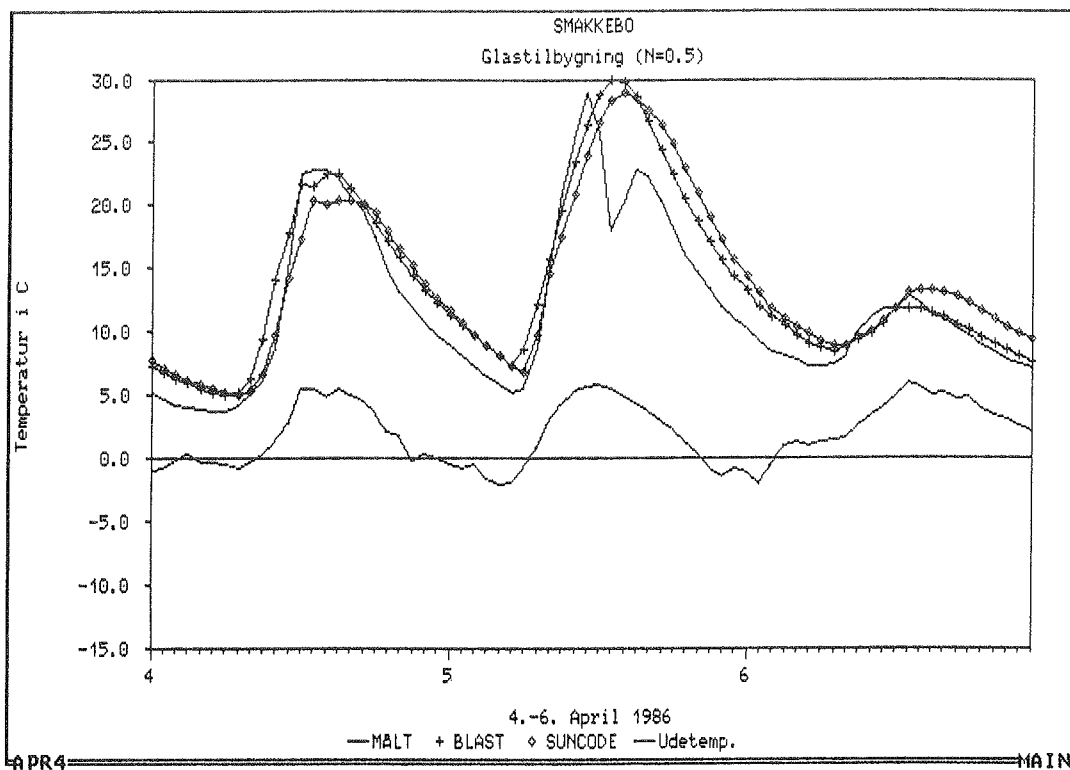
Ved at solindfaldet i højere grad går direkte til rumluften end det er forudsat i beregningerne, vil den målte temperatur stige hurtigere i opvarmningsforløbet end de beregnede. Til gengæld vil den målte temperatur falde hurtigere i afkølingsfasen.

Dykket i den målte temperatur midt på dagen den 25. februar kan forklares med at døren har stået åben, hvilket har bevirket at kold luft er kommet ind i glastilbygningen. Det kan også forklares med at der måske har været skyet lokalt i nogle timer over Smakkebo i forhold til de målte data i Hjortekær. Sidstnævnte forklaring kan imidlertid nok udelukkes i dette tilfælde, da temperaturdykket sker meget brat.

På figurerne 4.3-18 og 4.3-19 er tilsvarende vist temperaturforløbet i to solrige forårsperioder fra henholdsvis



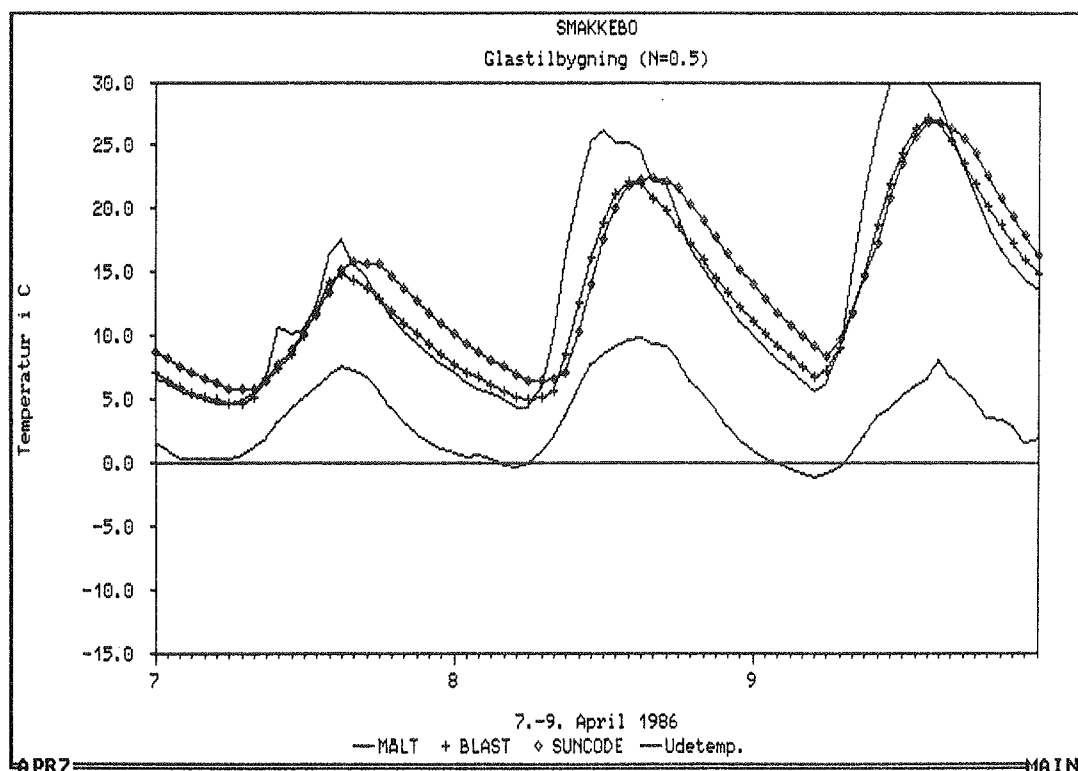
4.-6. april og 7.-9. april. Til disse figurer kan der knyttes analoge kommentarer. På figur 4.3-18 er der relativ god overensstemmelse for den 4. og den 6. april, hvorimod det stemmer meget dårligt overens for den 7. april, hvilket igen kan forklares med at døren eller et vindue har stået åbent i en længere periode. Dette er nok meget sandsynligt eftersom temperaturen er på vej op mod de 30 grader.



Figur 4.3-18. Beregnede og målte temperaturer i glastilbygningen for den 4.-6. april 1986.

På figur 4.3-19 er der ikke så god overensstemmelse. Den målte temperatur ligger en hel del højere end de beregnede, hvilket måske kan forklares med forskelle i de lokale vejrforhold.

Når de tre kurver betragtes under ét, ser det ud som om BLAST giver en lidt bedre overensstemmelse end SUNCODE ved beregningen af temperaturforløbet. Det er imidlertid relativt let at ændre på parametrene i SUNCODE med hensyn til fordeling af solindfald til luft og de enkelte flader således at et bedre resultat kan opnås. Hvis dette blev gjort i dette tilfælde, ville SUNCODE utvivlsomt give et bedre resultat end BLAST. Forfatteren har imidlertid undladt dette da det betragtes som værende uden mening specielt med henblik på de mange andre usikkerhedsmomenter målingerne er forbundet med.



Figur 4.3-19. Beregnede og målte temperaturer i glastilbygningen for den 7.-9. april 1986.

#### 4.4 Sammenfatning

I kapitel 4.1 er beskrevet hvad en valideringsproces bør indeholde for at et program kan siges at være valideret. Dette er en meget stor proces der kræver flere forskellige veldokumenterede måledata fra testceller/bygninger, og herudover en dyb indsigt i flere programmer.

Da validering kun er en lille del af det samlede arbejde med denne afhandling, er der kun blevet foretaget nogle få analytiske test, to empiriske test med to modeller, og et litteraturstudium over andre forskeres valideringsarbejde. Dette vil kort blive summeret i det følgende.

#### Analytiske test

Under arbejdet med BLAST har forfatteren lavet en række test for at undersøge forskellige ting ved programmet. Dette arbejde har omfattet kontrol af solindfald, skyggeforhold for bygningen/de enkelte rum, luftudveksling mellem rum, orientering af bygning, design dage etc. Dette arbejde resulterede i at der blev fundet en række fejl ved den første version af programmet "BLAST, Version 3:0 level 000". Med "version 3:0 level 107" blev resultaterne checket og fundet i orden. Der blev imidlertid fundet en enkelt fejl vedrørende fremspring ved siden af vinduer (kommandoen

"WINGS"), idet denne ikke fungerede helt korrekt. Fejlen blev dokumenteret med en række eksempler og sendt til BLAST Support Office, der rettede fejlen og beskrev det i BLAST News vol. 4 no. 8 - august 1986.

Ron Judkoff har i sit valideringsarbejde med den canadiske testcelle (beskrevet i Judkoff, Ron - 1985) bl.a. undersøgt luftudveksling mellem rum i BLAST ved brug af kommandoen "MIXING". Her fandt Ron Judkoff frem til at den ikke virkede korrekt. Forfatteren har i denne forbindelse undersøgt algoritmen nærmere ved at opstille en analytisk test bestående af to rum med henholdsvis 20°C og 30°C med et luftskifte på 0,14 m<sup>3</sup>/s, hvilket er dokumenteret i et brev af 7. maj 1985 fra forfatteren til Ron Judkoff. Ved at specificere kommandoen "MIXING" i begge rum blev den korrekte luftmængde udvekslet, og luftbalancen var således i orden. Ron Judkoff havde kun specificeret den i det ene rum, hvorved BLAST producerede eller mistede energi fordi luftbalancen ikke var i orden.

Dette lille eksempel viser hvor vanskeligt det kan være at bruge et stort program som fx BLAST. I dette tilfælde var det BLAST-manualen der var uklart formuleret, hvorfor den ellers meget rutinerede forsker Ron Judkoff misforstod manualen. Dette er en af svaghederne ved de store programmer. Der er mange størrelser at holde rede på, og brugeren har vanskeligt ved at opdage fejl.

#### Empiriske test med de to modeller

Af beregningerne for effektbehovet for den canadiske testcelle i kapitel 4.2 fremgår det at der er et fint sammenfald mellem målinger og beregninger for BLAST og SUNCODE. BLAST ligger generelt lidt under, og SUNCODE lidt over de målte værdier.

Med hensyn til energiforbruget er der også fundet god overensstemmelse mellem målinger og beregninger med de to programmer for både den canadiske testcelle og Smakkebo. For den canadiske testcelle blev den bedste overensstemmelse fundet for SUNCODE, der kun lå 1% over den målte værdi, hvorimod BLAST regnede 8% for lavt.

For Smakkebo er der også opnået meget god overensstemmelse mellem målinger og beregninger både på uge- og månedsbasis, jf. kapitel 4.3.

På baggrund af de to valideringer må det konkluderes at begge programmer under disse forhold har givet tilfredsstillende resultater med hensyn til effektforbrug og energiforbrug. Med henblik på temperaturforholdene har de to valideringseksempler ikke opfyldt de krav der kunne ønskes med hensyn til stor temperaturvariation og præcise målinger.

Den canadiske testcelle har ganske vist præcise målinger, men temperaturvariationen er for lille. For glastilbygningen i Smakkebo er der tale om en stor temperaturvariation,

men til gengæld er solstrålingsdata hentet 24 km væk i Hjortekær, og måling af lufttemperatur i glastilbygning sker i for stor højde. Alligevel kan sammenligningerne godt give et indtryk af at dynamikken i programmerne er tilfredsstillende, men der er behov for yderligere valideringsarbejde på dette punkt. Dette er også af interesse for rådgivende ingeniørfirmaer da indeklimaforholdene i projekteringsfasen i mange tilfælde vurderes ud fra edb-beregninger, og det er derfor ønskeligt at vide hvor præcist programmerne regner.

#### Andre valideringer

Der har tidligere været refereret til et par andre valideringsundersøgelser: Judkoff, Ron - 1985 og Mørck, Ove - 1986.

Den første undersøgelse omfattede individuelle sammenligninger mellem edb-programmer og empiriske test med den canadiske testcelle. Undersøgelsen omfattede de tre amerikanske edb-programmer BLAST 3:0, SERI-RES 1.0 (SUNCODE) og DOE-2.1A. Af resultaterne fremgår det, at for sammenlignende årssimuleringer mellem SERI-RES 1.0 og BLAST for Denver, USA, beregner SERI-RES 1.0 varmebehovet 10% højere. For Københavns vedkommende fås tilsvarende et varmebehov der er 6% højere. Disse tal svarer ganske godt til de tal forfatteren har beregnet i Smakkebo på 9%, og med den canadiske testcelle tilsvarende 9% (Ron Judkoff 7%).

Den anden undersøgelse er en del af det tidligere omtalte IEA samarbejde og omfatter validering med forskellige testbygninger, herunder den canadiske testcelle. Da denne undersøgelse allerede er blevet udførligt omtalt i kapitel 4.2, vil den ikke blive uddybet her.

Ron Judkoff har i et tidligere arbejde, Judkoff, Ron et al. - May 1983, beskæftiget sig med validering af de tre amerikanske programmer ved brug af et enfamilie-testhus. Denne undersøgelse viste meget dårlig overensstemmelse i det første forsøg med standardmaterialeparametre etc., idet programmerne beregnede energiforbruget ca. 60% for højt. Dette skyldtes bl.a. forkerte naturlige luftskifter, temperatursetpunkter og U-værdier. De indsatte U-værdier svarede fx til det dobbelte af de målte værdier, hvilket må skyldes at den generelle kontrol med varmeledningsevner for materialer i USA ikke er god, hvorfor tabelværdier er for meget på den sikre side. Efter at alle inputfejlene var blevet rettet med til dels målte værdier, blev de beregnede forbrug ca. 15% lavere end de målte. De beregnede energiforbrug for de tre programmer lå i alle beregningstilfælde inden for 7% fra hinanden.

Temperaturforholdene er kun behandlet i begrænset omfang for det sydvendte opholdsrum. Af dette fremgår det at BLAST giver det bedste resultat med en spredning på 0,4 K i forhold til SERI-RES på 0,85 K (DOE-2,1A 1,6 K).

I Judkoff, Ron - April 1986 er der igen blevet lavet en validering med de tre amerikanske programmer. Denne gang er der benyttet en tre-rums testcelle i Los Alamos National Laboratory, USA. Det var oprindeligt hensigten at benytte målte data for at sammenligne med beregningerne, men mangler ved måledata medførte at det blev besluttet at opgive denne del og kun beskæftige sig med individuelle sammenligninger.

Årssimuleringerne viser at energiforbruget bliver beregnet 8% lavere med SERI-RES end BLAST for Denver, USA, og 2% højere for København. Dette er den første simulering forfatteren har set hvor BLAST giver et større energibehov end SERI-RES. Med hensyn til det maksimale effektforbrug er det det samme for Denver, USA, hvorimod SERI-RES giver et resultat der er 4% højere for København.

Herudover er der lavet nogle sammenligninger indbyrdes med temperaturforhold. Af disse fremgår det at temperaturamplituderne er større for SERI-RES end for BLAST. For et par varme dage i juli for det sydvendte solrum med vejrdato fra København svinger temperaturen fx mellem 27 og 56°C med amplituder for SERI-RES på 26 K og BLAST på 18 K. For det tilstødende nordrum er temperaturvariationen nogenlunde den samme for begge programmer gående fra 19 til 26°C. Eftersom der imidlertid ikke er nogen måledato at sammenligne med, er det vanskeligt at vurdere resultaterne.

Et par andre undersøgelser kunne inddrages, men da disse er udført med enten BLAST eller SERI-RES/SUNCODE hver for sig, er disse udeladt.

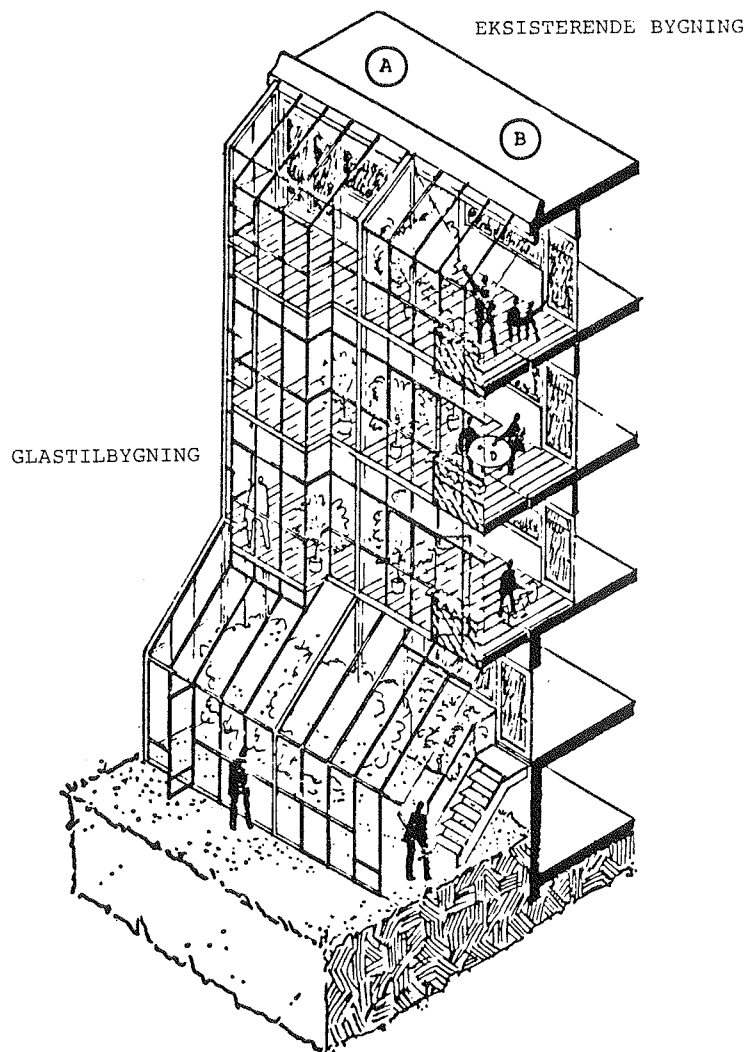
Resultaterne for DOE-2.1A er ikke omtalt i det forrige da dette program ikke indgår i afhandlingen. Generelt kan det imidlertid konstateres ud fra alle de nævnte undersøgelser at programmet adskiller sig markant i negativ retning fra de to andre programmer ved beregning af energiforbrug, effektbehov og temperaturforhold. Hvor der er sammenlignet med målinger, giver DOE-2.1A de dårligste resultater.

## 5. AKTUELLE PROJEKTER

BLAST er blevet anvendt i forbindelse med en række byggeprojekter af rådgivende ingeniørfirmaer, studerende ved Laboratoriet for Varmeisolering og andre undervisningsinstitutioner og af forfatteren. Projekterne har haft til formål at belyse de energimæssige og indeklimatiske forhold ved forskellige alternative udformninger. I det følgende vil nogle få af dem kort blive beskrevet med tilhørende reference, således at interesserede kan indhente nærmere oplysninger.

### Vesterbo Langhus

Udgangspunktet for dette projekt var en international præmieret konkurrence fra 1982 om udnyttelse af passiv solvarme i eksisterende etagebyggeri. Projektet mundede ud i en rapport af Falck, Ulla et al. - 1985, hvor et forprojekt til et demonstrationsprojekt blev udarbejdet for Vesterbo Langhus.



Figur 5-1. Isometrisk snit i glastilbygning.  
(Falck, Ulla, et al. - 1985).

Bebyggelsen ligger i Værløse og er et af de første betonelementbyggerier i Danmark. Byggeriet er nord/sydvendt orienteret med store glasarealer mod syd og uden nogen skyggegi-vere fra omgivelser, hvorfor det er meget velegnet til udnyttelse af passiv solvarme.

Demonstrationsprojektet blev færdigt 1. april 1987 og omfatter to opgange med i alt 17 lejligheder og består af følgende foranstaltninger:

Opførelse af to glastilbygninger på sydfacade ud for altan og fransk dør.

Installation af ventilationsanlæg med varmegenvindingsaggregat.

Opbygning af solvæg på den mellemliggende sydvendte betonfacade.

Et isometrisk snit i glastilbygningen er vist på figur 5-1.

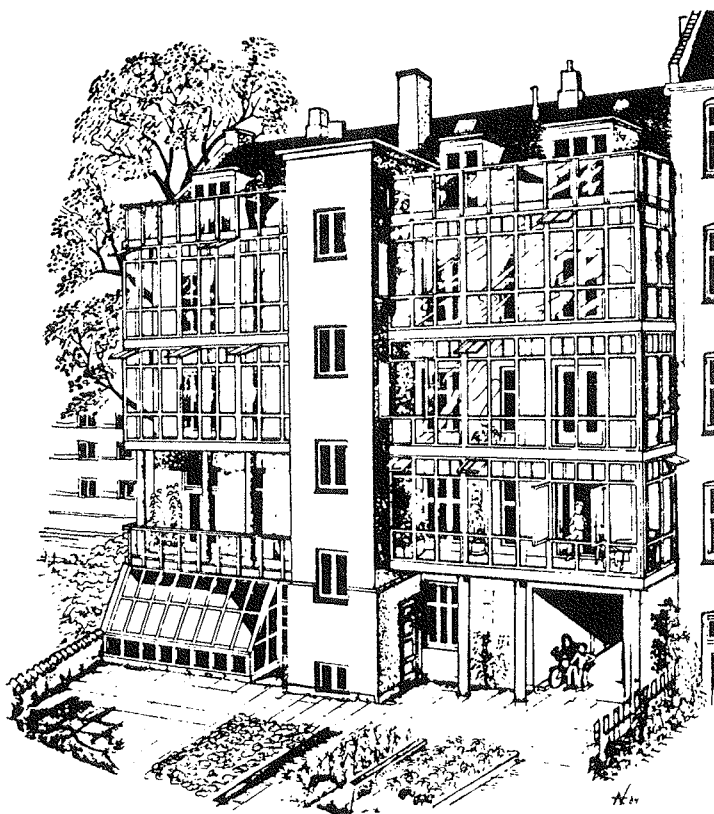
Projektet er med støtte fra Byggeriets Udviklingsråd (BUR) blevet analyseret nærmere med BLAST for at vurdere temperaturforholdene og energiforbruget ved forskellige energimæssige tiltag. Resultaterne fra disse beregninger er beskrevet af forfatteren - november 1985 og viste besparelser på mellem 15 og 38% afhængigt af hvilke energimæssige foranstaltninger der blev foretaget.

### Baggesensgade

Baggesensgade 5 ligger på Nørrebro og er opført i 1890 i et tæt bebygget område med flere baggårde. I forbindelse med en sanering af området har der fundet en gårdrydning sted, så der er frit udsyn over et grønt område. Dette bevirker at sydfacaden, bortset fra om formiddagen, er solbeskinnet hele dagen.

Ejendommen er blevet forsynet med en glastilbygning foran hele den sydvendte facade, hvilket er illustreret på figur 5-2. Glastilbygningens primære formål er, foruden energibesparelsen, at tilføre boligen nogle brugsmæssige kvaliteter i form af øget boligareal i en del af året.

Projektet er blevet analyseret ved brug af BLAST af akademiingeniør Lars Ørtoft i afgangsprojektet "Passiv Solvarme" fra Danmarks Ingeniørakademi - Bygningsafd. i foråret 1985 med forfatteren som medvejleder. Beregningerne viste en energibesparelse på op til 30%, udvidet brugstid af glastilbygning og overensstemmelse mellem måleresultater og BLAST simulering. Resultaterne er beskrevet af Ørtoft, Lars - 1985 og Ørtoft, Lars - 1986.



Figur 5-2. Forsøgshus i Baggesensgade 5 med glastilbygning på den sydvendte facade.  
(Tegnet af arkitekt Niels Herskind fra firmaet BY-BYG-Aps).

#### Analyse af varmeakkumuleringssevne for boliger (igangværende projekt)

Under Energiministeriets Forskningsprogram (EFP) for 1986 under programområdet Energianvendelse i Bygninger har Laboratoriet for Varmeisolering og Teknologisk Institut - Varmeteknik et projekt i gang angående varmeakkumuleringssevnen i boliger.

Projektets formål er at udarbejde et grundlag for praktisk projekteringsvejledning om de energi- og temperaturmæssige konsekvenser af ændringer i bygningskonstruktionernes termiske masse, under hensyntagen til indboets varmeakkumuleringssevne.

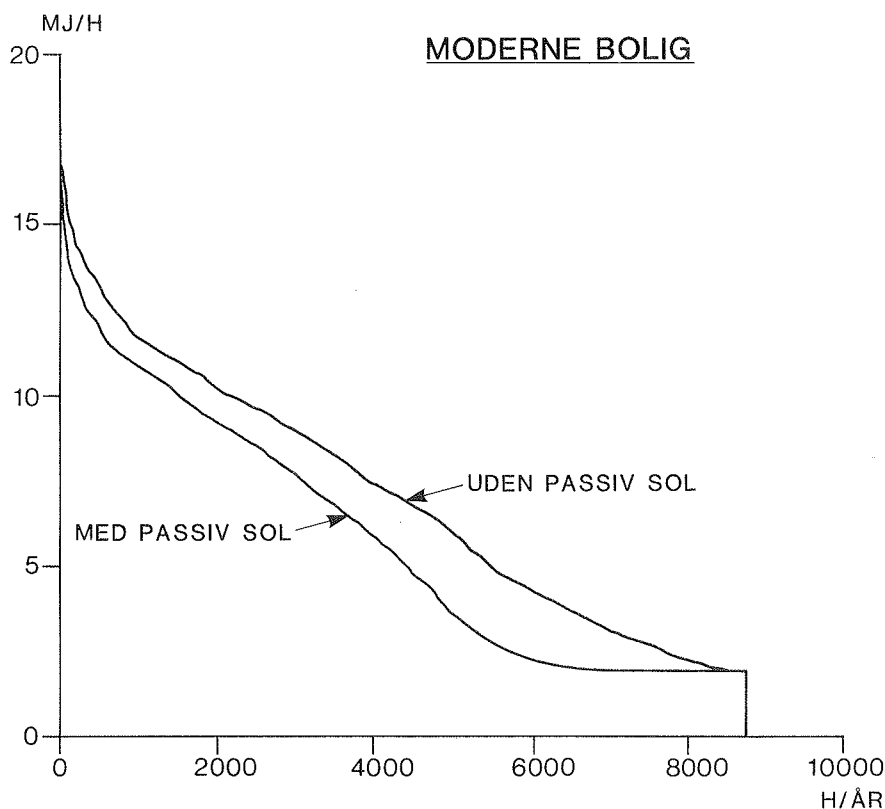
Efter et litteraturstudium inden for området foretages der en systematisk opstilling og vurdering af de faktorer, som er bestemmende for varmeakkumuleringsens størrelse og indflydelse på varmebehov og temperaturforløb. Beregningerne foretages hovedsagelig med BLAST, og resultaterne forventes publiceret i slutningen af 1987.



### Matematisk modelbeskrivelse og simulering af varighedskurver

I erkendelse af varighedskurvens store betydning for både planlægning og styring af produktion og distribution af rørbunden energi er der et behov for bedre at kunne beskrive og forstå varighedskurvens udseende. For at få en større forståelse for denne er der i et eksamensprojekt af Hansen, Jørgen - juni 1987 udviklet et edb-program der kan simulere timeværdier for et fjernvarmeværks belastning.

Grundbestanddelen i dette edb-program er en anvendelse af en endelig differensmetode til beregning af varmetabet for en typisk rørstrækning i et fjernvarmenet. Herudover benyttes resultater fra et tidligere eksamensprojekt af Pedersen, Jørgen Holm - 1986, hvor timeværdier for varfeforsyningsbehovet for et BR-S 85 hus og et med det dobbelte varmetab er blevet beregnet med BLAST og udskrevet uformateret med JC-WRITER. Varmeværkets varighedskurve er herefter blevet beregnet ved at addere bidrag fra tabet i fjernvarmerørene og fra husene plus forbruget til varmt brugsvand.



Figur 5-3. Varighedskurve for fjernvarmeværkets belastning idet der er benyttet en moderne bolig som belastning. I den nederste kurve er varmebidraget fra passiv solvarme medregnet, og i den øverste er det uden.

På baggrund af disse beregninger er varighedskurven blevet optegnet ud fra både time- og døgnmiddelværdier for udetemperatur og forbrug. Det er herigennem blevet påvist at et fjernvarmeværks kapacitet kan mindskes ved brug af døgnvarmelagring.

Andre beregninger har påvist indvirkningen af fjernvarmenettets transmissionstab og gratisvarmens indflydelse på varighedskurvens udseende. Specielt har den passive solvarme den største andel i årsagen til varighedskurvens "skæve" udseende, figur 5-3. Til gengæld har transmissionstabet fra fjernvarmenettet ikke nogen betydning for det "skæve" udseende.

Resultaterne af projektet er sammenfattet i en artikel af Jørgen Hansen & Preben Nordgaard Hansen og forventes publiceret i efteråret 1987.

### Tubberupvænge II

I løbet af 1988 skal der etableres 70 almennyttige boliger for KAB i Herlev. Der er opnået støtte fra EF's energidemonstrationsprogram til etablering af ca. 1000 m<sup>2</sup> solfanger og et sæsonvarmelager på 3000 m<sup>3</sup> til byggeriet. Der er også lagt op til brug af passiv solvarme i byggeriet i form af store glastilbygninger, men dette er kun en begrænset del af selve EF-projektet, idet dette primært omfatter den aktive side.

Baggrunden for brugen af glastilbygninger er at disse også anvendes i den tidligere fase, Tubberupvænge I (hvor indflytning er sket i foråret 1987), med 27 boliger, og at det hele tiden har været meningen at udnytte det samme boligdesign for 2. fase.

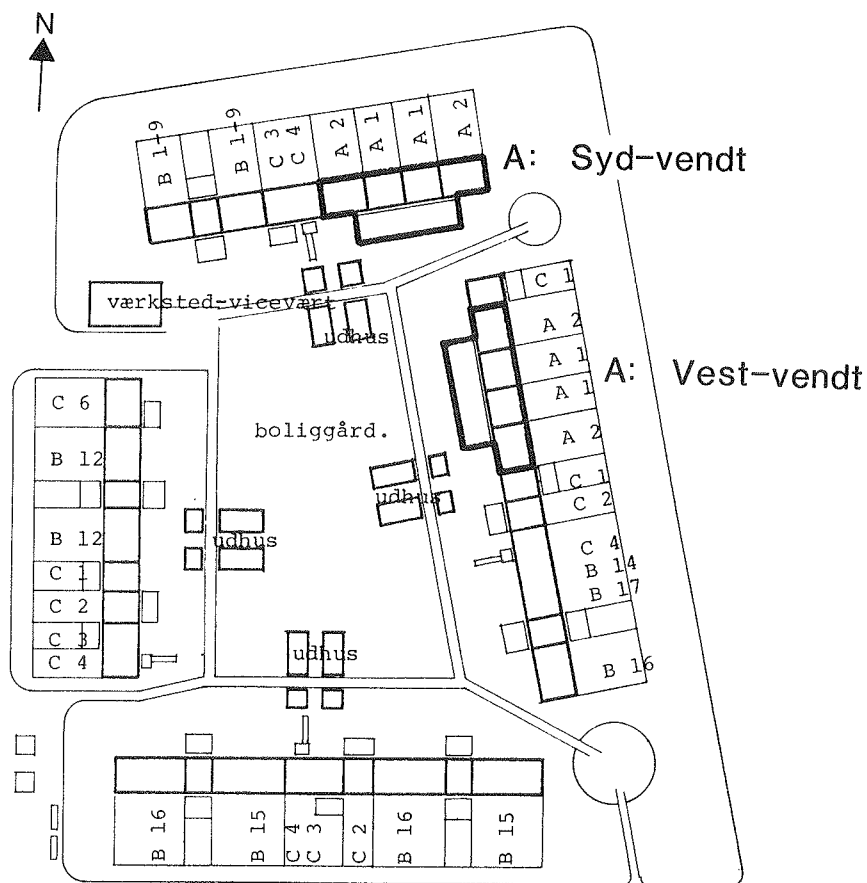
Som vist på figur 5-4 og 5-5 er Tubberupvænge II to-etages rækkehuse der omgiver en fælles gård, således at orienteringen af glastilbygningerne er mod både syd, øst, vest og nord. Der er derfor i projekteringen af byggeriet ikke lagt vægt på at den ene facade skal have et markant større vinduesareal end den anden.

Det er meningen at Tubberupvænge II skal bestå af følgende tre boligtyper:

- A: Normalboliger med stor fælles glastilbygning og individuelle glastilbygninger.
- B: Ungdomsboliger og ældrevenlige boliger med fælles glastilbygning.
- C: Normalboliger med private glastilbygninger.

Boligerne er zoneopdelte med en indre zone bestående af selve boligen og en ydre bestående af glastilbygningen. Den ydre zone fungerer således som en overgang mellem udeklimaet og selve boligen.

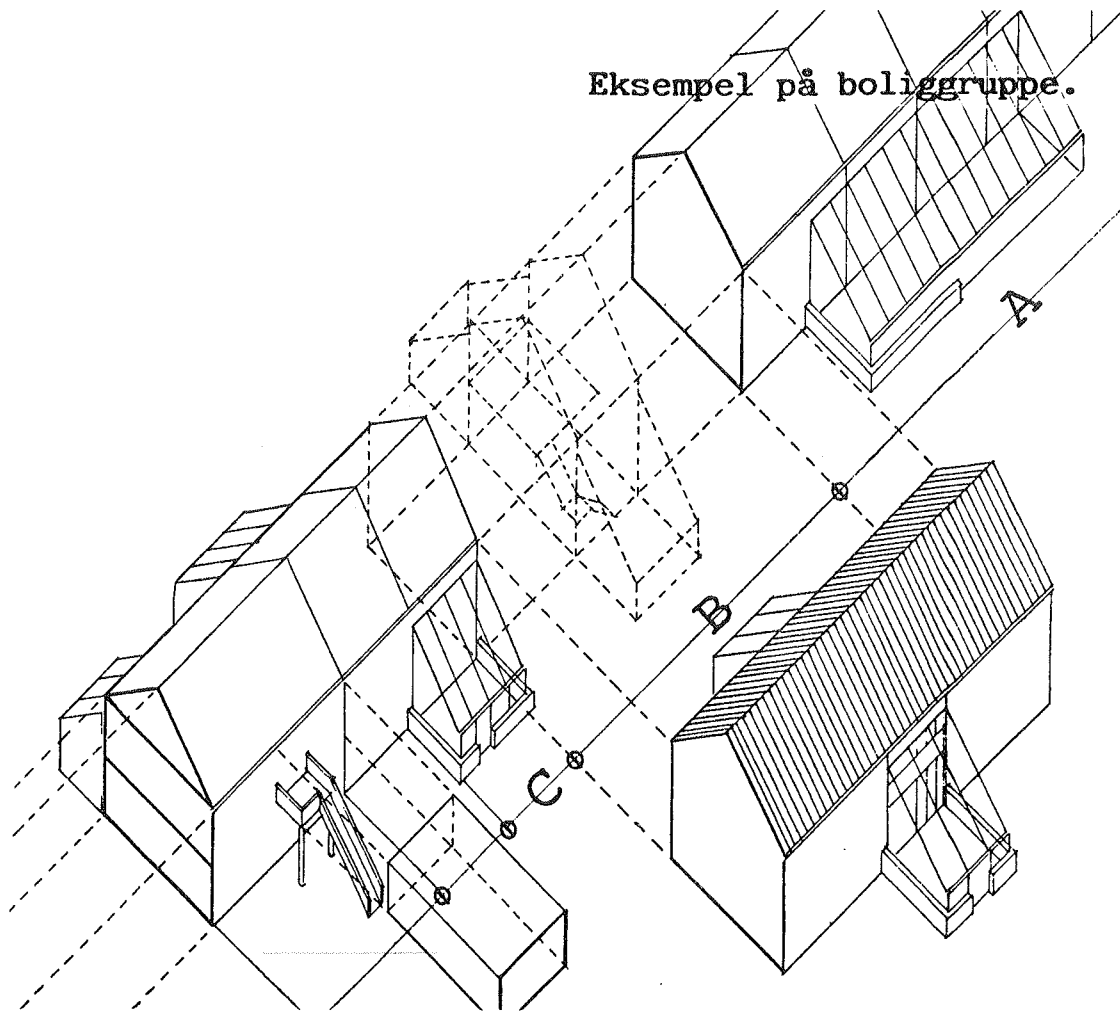
Fællesområdet ligger i forbindelse med indgangen til boligerne og er glasoverdækket med en drivhuskonstruktion bestående af ét lag glas. Bebyggelsens store glasoverdækkede partier giver den et karakteristisk præg. Den fælles boligård udformes som et lege- og opholdsområde.



Figur 5-4. Eksempel på fordeling af boligtyper i Tubberupvænge II.  
(Storgaard, Jens Peter - Juni 1986).

I tilknytning til projekteringen af Tubberupvænge II, som blev igangsat i efteråret 1986, blev det besluttet at få udført beregninger med BLAST for at undersøge energibesparelsen ved glastilbygningerne og betydningen af orientering, tyngde af bolig, vinduesstørrelse mod glastilbygning og de indeklimatiske forhold i såvel boligen som glastilbygningen. Denne beslutning blev taget, dels fordi der er tale om forhold som ikke er undersøgt til bunds tidligere, og dels fordi der eventuelt kan opnås offentlige tilskud hvis en god funktion kan dokumenteres. Resultaterne af beregningerne er beskrevet af forfatteren i marts 1987. Desuden bliver beregningerne benyttet af stud. lic. Peter Berg til at dimensionere sæsonvarmelageret. Dette sker ved benyttelse af timeværdier for varmekonsumet for hele bebyggelsen.

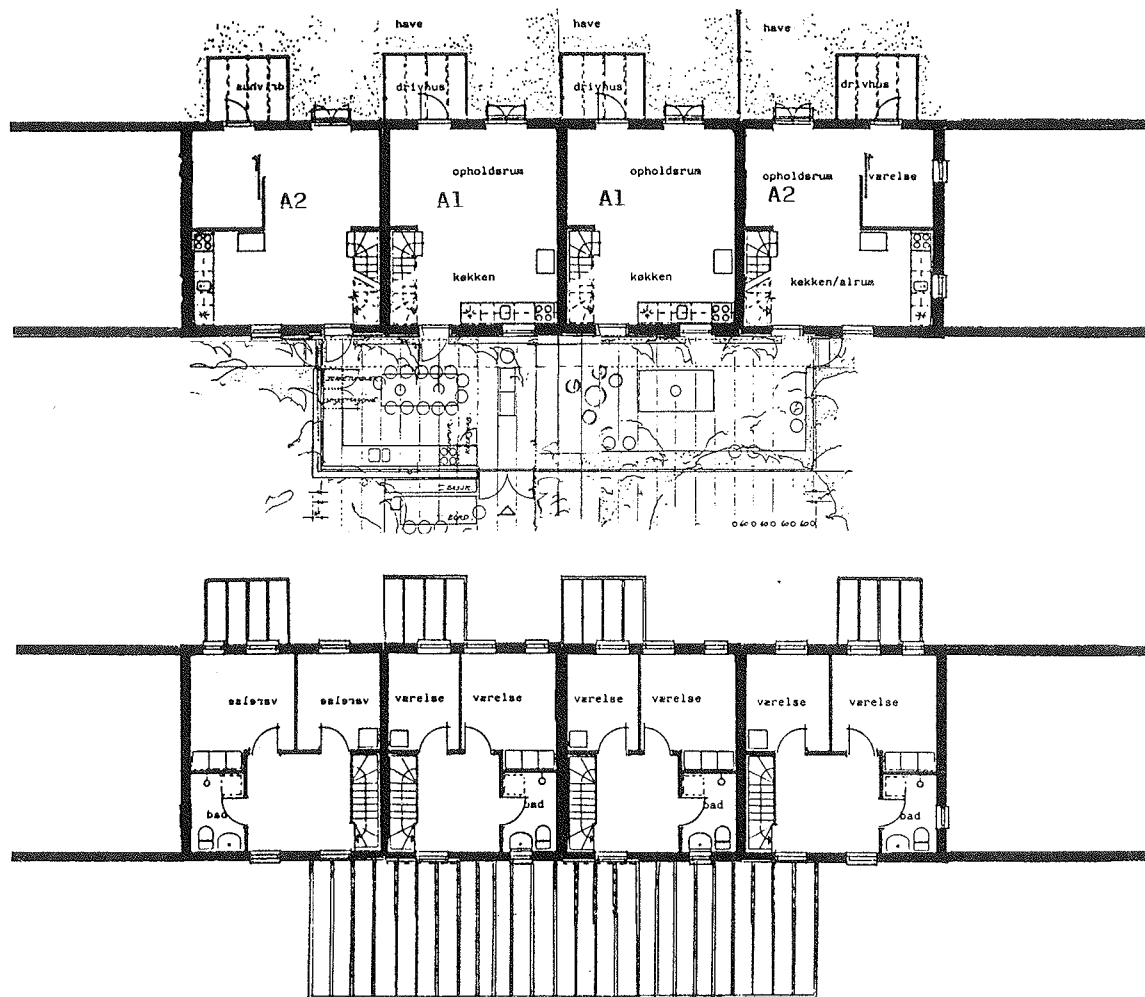
I projektet er det boligtype A der er blevet analyseret detaljeret, da denne type markant adskiller sig fra traditionelle boliger med glastilbygninger. A består af fire boliger - to tre-rums og to to-rums med et samlet bruttoetageareal på 250 m<sup>2</sup>. Herudover kommer der en fælles glastilbygning på 51 m<sup>2</sup> og fire private drivhuse på hver 5 m<sup>2</sup>. En plan over stuen og første sal er vist på figur 5-6.



Figur 5-5. Eksempel på boliggruppe bestående af de tre boligtyper A, B og C.  
(Storgaard, Jens Peter - Juni 1986).

Beregningerne viser at etablering af glastilbygninger i forbindelse med Tubberupvænge II kan forventes at give en energibesparelse på op til 13%, og at tyngden kun spiller en beskeden rolle idet energibesparelsen ved en tung løsning kontra en let kun bliver 3-3,5%. Grunden til denne beskedne forskel hænger sammen med de små vinduesarealer. Hvis disse forøges til det dobbelte mod den fælles glastilbygning, bliver energibesparelsen op til 7% for den tunge løsning i forhold til den lette. Komforten bliver imidlertid også bedre i den tunge løsning da temperaturudsvingene blive mindre og overtemperaturerne lavere.

Orienteringen betyder kun 3-4% på energiforbruget, hvilket hænger sammen med at vinduesarealet i begge facader er nogenlunde det samme.



Figur 5-6. Stue (øverst) og førstesalsplan for boligtype A.  
(Storgård, Jens Peter - Juni 1986).

## 6. KONKLUSION

Her i landet er der udviklet flere edb-programmer beregnet for simulering af bygningers energiforbrug og indeklima. Imidlertid kan disse programmer kun regne på ét rum og tager ikke i så høj grad hensyn til den termiske effekt af den varmeakkumulerende masse i boligen. De er derfor mindre brugbare til undersøgelse af passiv solvarme. For at overvinde disse mangler har det været hovedsigtet i licentiatprojektet at udvælge egnede programmer og eventuelt omarbejde dem så de blev velegnede til simulering af passiv solvarme.

Ved projektets start i 1982 samlede interessen sig kun om programmer til de store computere, da personal computere ikke havde vundet almindeligt indpas, og da der derfor ikke fandtes detaljerede programmer på PC-niveau. Ved en række analyser af ca. 40 edb-programmer blev det amerikanske program BLAST valgt som et af de bedst egnede.

Efter valget af BLAST er der gjort et stort arbejde for at gøre BLAST systemet mere fleksibelt ved at opbygge en styreprocedure til at håndtere de indgående filer og udvikle et selvstændigt program, JC-WRITER, således at BLAST-systemet har fået flere output-faciliteter. Disse nye faciliteter har gjort det muligt at få beregnet fraktiler, antal timer i forskellige intervaller og få udskrevet timeværdier for 23 parametre for udvalgte perioder. Resultater kan også overføres uformateret til videre grafisk bearbejdning med et spreadsheet-program: Symphony eller tilsvarende.

Desuden er JC-WRITER relativt let at videreudvikle, da det er et mindre program og er overskueligt bygget op. BLAST-systemet er herved blevet mere velegnet til undersøgelse af passiv solvarme og indeklima.

Ved udviklingen af JC-WRITER er der gjort et omfattende arbejde for at gøre programmet interaktivt, således at brugeren bliver guided ved hjælp af menuer til at opstille en inputfil, der herefter kan benyttes i en batch-kørsel.

Til gengæld har tidsforbruget med at udvikle JC-WRITER været stort, da det har været nødvendigt at sætte sig ind i hele programstrukturen for BLAST-systemet. Det har således været vanskeligere end først antaget og har derfor taget en stor del af projektets tid.

Med den store udvikling der er sket inden for edb-området siden projektets start har personal computere (PC) vundet stigende indpas, samtidig med at de er blevet større og hurtigere. Udviklingen har også slået igennem inden for edb-programmer til beregning af bygningers energiforbrug og indeklima, hvor stadig flere programmer er omskrevet til PC-niveau. Interessen samler sig derfor i dag i højere grad om disse programmer, fremfor dem der ligger på de store computere.

Et af de andre amerikanske programmer, SERI-RES, er således blevet videreudviklet til PC-programmet SUNCODE. Dette program har ikke så højt et detaljeringsniveau som BLAST, men er til gengæld mere brugervenligt i sin opbygning og har simplere inddata. Da programmet herudover er velegnet til passiv solvarme, er det blevet medtaget i den sidste del af projektet.

For at få en idé om hvor godt de to programmer regner har forfatteren benyttet to empiriske modeller til at validere programmerne med, bestående af den canadiske testcelle fra Ottawa, Canada, og et beboet hus i Smakkebo, Snekkersten ved Helsingør. For testcellens vedkommende er der set på temperaturforhold, effektbehov og energiforbrug, hvorimod der kun er set på temperaturforhold og energiforbrug i Smakkebo.

Beregningerne viser at der er fint sammenfald mellem målinger og beregninger af effektbehovet for den canadiske testcelle for begge programmer.

Der er også fundet god overensstemmelse for energiforbruget for både den canadiske testcelle og Smakkebo. SUNCODE giver den bedste overensstemmelse for den canadiske testcelle med en afvigelse på kun 1% i forhold til BLAST der regner 8% for lavt i forhold til måleresultaterne. I Smakkebo er BLAST i bedre overensstemmelse med måleresultaterne under de givne forudsætninger end SUNCODE, men da huset er beboet, er der en række eksterne fejlkilder der gør det vanskeligt at vurdere programmerne indbyrdes.

Med hensyn til temperaturforholdene er der fundet rimelig overensstemmelse i begge tilfælde, men valideringseksemplerne har ikke opfyldt de krav der kunne ønskes med hensyn til stor temperaturvariation og præcise målinger. I den canadiske testcelle er der præcise målinger, men for lille temperaturvariation, og i Smakkebo er der godt nok stor temperaturvariation, men dataene indeholder flere usikkerhedsfaktorer.

Efter hvad valideringen med den canadiske testcelle og Smakkebo viser har det forøgede detaljeringsniveau i BLAST kun mindre betydning, hvorfor det i de fleste tilfælde er tilstrækkeligt at anvende SUNCODE. Ifølge personlig samtale med Michael Holtz benytter hans firma normalt SUNCODE til almindelige beregninger, og BLAST til at efterkontrollere indflydelsen af forskellige parametervariationer i SUNCODE når der opstår tvivlstilfælde. Der er således behov for begge programmer.

Det vil imidlertid i mange tilfælde være mere attraktivt at benytte SUNCODE, da det er simplere i sin opbygning og ligger på en personal computer. Dette gør også videre bearbejdning med spreadsheetprogrammer som fx Symphony meget lettere.

Til gengæld har BLAST et højere detaljeringsniveau og flere faciliteter end SUNCODE i form af fx temperaturstyret luftudveksling mellem rum etc. og det af forfatteren udviklede software.

## Videre arbejde

I det videre arbejde fremover er der behov for en yderligere validering af edb-programmerne, specielt med hensyn til hvor præcist temperaturforholdene bliver beregnet. Dette har også stor interesse for rådgivende ingeniørfirmaer, da indeklimateforholdene i projekteringsfasen i mange tilfælde vurderes ud fra edb-beregninger.

Med hensyn til BLAST bør brugervenligheden forbedres yderligere. Dette kan ske ved at introducere en nyudviklet tekst preprocessor til BLAST, kaldet BTEXT, der har større fleksibilitet end den nuværende preprocessor og giver mulighed for at vælge flere detaljeringsniveauer. Denne tekst preprocessor er if. BLAST News, vol. 5, no. 8 - august 1987, kommet i en PC-version, PC-BTEXT. Dette vil gøre det muligt at opstille inputfilen på en PC'er og derefter overføre den til CYBER for at køre selve simuleringerne.

Da datakraften fremover vil blive stadig større, vil der ikke være nogen problemer med at anvende detaljerede programmer, og det forventes således også at BLAST vil komme i en PC-version i løbet af et par år. Dette vil forøge brugervenligheden for programmet ganske betragteligt.

Herudover er der etableret et samarbejde med Statens Byggeforskningsinstitut (SBI), der har udviklet et interaktivt menu-drevet program, tsbi, der kan køre på en personal computer. Dette program er en videreudvikling af TEMPFO4, der er baseret på en simpel termisk model for et rum udarbejdet af Bo Adamson, Lunds tekniske Højskole. I forbindelse med Energiministeriets Forskningsprogram for 1987 har SBI fået en bevilling til at udarbejde en ny version af tsbi så det kan regne på flere rum, herunder glastilbygninger.

Forfatteren vil også deltage i dette arbejde, således at de mange erfaringer kan samles i det videre forløb med udviklingen af tsbi. I denne forbindelse påtænkes det at ændre grundmodellen i programmet så det bliver muligt at beregne den instationære varmeledning i de enkelte vægge efter de principper der er beskrevet i kapitel 2.2.1 om differensmetoder. Programmet vil således blive velegnet til en lang række formål, herunder beregning af passiv solvarme.



ORDLISTE

AHLDFL	: Se "Air Handling Loads data file"	DOE 2.1 A	: DOE 2.1. Department of Energy Edb-program til beregning af bygningers energiforbrug og indeklime. (Programmet er en videreudvikling af NECAP) Building Energy Use Analysis program Building Energy Analysis Group Energy and Environment Division Lawrence Berkeley Laboratory Berkeley, California, USA
Air Handling Loads data file	: AHLDFL: Fil der oprettes i forbindelse med beregningen af ventilationsanlægget i den 2. del af BLAST beregningen. Filen indeholder data på timebasis.		
Air Handling System	: Ventilationssystem (2. del af BLAST-programmet)		
Attached Sunspace	: Glastilbygning	Economic	: Økonomiberegning (3. del af BLAST-programmet efter beregningen af centralvarme/køleanlægget)
Batch job	: Kørsel af et job der ikke tillader nogen vekselvirkning mellem bruger og jobafvikling, når jobbet først er blevet sendt til computeren.	EFP	: Energiministeriets Forskningsprogram
BLAST	: The Building Loads Analysis & System Thermodynamics program Program til beregning af bygningers energiforbrug og indeklime. (Programmet er en videreudvikling af NBSLD og NECAP) U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory (CERL), Champaign, Illinois, USA.	ESP	: Environmental System Performance Program til beregning af bygningers energiforbrug og indeklime University of Strathclyde Rotten Row, Glasgow G4 ONG, Storbritannien
BLAST Report file	: Se "Report file"	Fraktil	: Varighed angivet i procent (fx hvis temperaturen er under 26,3°C i august måned i 90% af tiden, vil de 26,3°C blive betegnet som 90%'s fraktilen for august måned).
BLAST Weather file	: Se "Weather file"		
BLDFL	: Se "Building Loads data file"	Hybrid system	: Et hybrid system kan defineres som et system, der behandler både naturlig og tvungen energitransport.
BR-S 85 hus	: Hus der opfylder kravene til "Bygningsreglementet for småhuse, BR-S 85" fra Byggestyrelsen - 1985.	IEA	: International Energy Agency Det Internationale Energi Agentur
Building Loads	: Temperatur og energiforbrug (1. del af BLAST-programmet)	Interaktiv session	: Interaktiv kørsel
Building Loads data file	: BLDFL: Fil der oprettes i forbindelse med beregningen af temperatur og energiforbrug i den 1. del af BLAST-beregningen. Filen indeholder data på timebasis.	JC-WRITER	: Outputprogram der benyttes efter kørsel med BLAST. JC-WRITER er udviklet af forfatteren
BUR	: Byggeriets Udviklingsråd	Kartesisk koordinatsystem	: Retvinklet koordinatsystem
CDC	: Control Data Corporation	Kermit	: Program der kan overføre filer/data mellem forskellige computere
Central Plant Simulation Subprogram	: 3. del af BLAST-programmet	LFBI	: Program til beregning af bygningers energiforbrug og indeklime Laboratoire de Physique du Batiment Université de Liège Liège, Belgien
CERL	: Construction Engineering Research Laboratory. Udvikler af BLAST, jf. BLAST.	Lokal fil	: Fil, brugeren umiddelbart har adgang til at arbejde med - også kaldet arbejdsfil
CYBER 170 model 825	: Stor datamat leveret af CDC. UNI-C, Århus har denne datamat, og BLAST er implementeret på den.	Main frame computer	: Stor computer
DATSAV	: USAFETAC data save (Vejrdata der kan anvendes som input til WIFE)	Mini computer	: Mellemstor computer
Default value	: Den værdi en parameter får når intet andet specificeres.	MORE	: Program til beregning af bygningers energiforbrug og indeklime FIAT Engineering Torino, Italien
DEFU	: Danske Elværkers Forenings Udredningsafdeling	NBS	: National Bureau of Standards, Washington, D.C., USA
DEROB	: Dynamic Energy Response Of Buildings Program til beregning af bygningers energiforbrug og indeklime University of Texas at Austin Austin, TX 78712, USA	NBSLD	: National Bureau of Standards Load Determination program Program til beregning af bygningers energiforbrug og indeklime Building Environment Division Center for Building Technology Institute for Applied Technology National Bureau of Standards Washington, D.C., USA
Direct Gain	: Direkte tilskud (solindfald gennem vinduer)		
DOE	: U.S. Department of Energy. USA's energiministerium	NECAP	: NASA Energy Calculation Program Program til beregning af bygningers energiforbrug og indeklime NASA, Langley Research Center Hampton, VA, USA

NOAA	: National Oceanic and Atmospheric Administration	Timefordeling	: Antal timer en parameter ligger i forskellige intervaller. Fx hvor mange timer temperaturen ligger mellem 24,00 og 24,99°C i maj måned
Optimal Report file	: Se "Report file"		
OTHER	: Brugerdefineret vejrdata der kan benyttes som input til WIFE	TMY	: NOAA Test Meteorological Year (Vejrdata der kan anvendes som input til WIFE og SUNCODE)
PC	: Personal computer	Trombe Wall	: Trombevæg - Solvæg
Plant	: Centralvarme/køleanlæg (3. del af BLAST-programmet)	TRY	: NOAA Test Reference Year (Vejrdata der kan anvendes som input til WIFE)
PREPROCESSOR	: Interaktivt program, der fremstiller inputfilen til BLAST udviklet af BLAST Support Office	Tsbi	: Termisk simulering af bygninger og installationer Program til beregning af bygningers energiforbrug og indeklime. (Statens Byggeforskningsinstitut)
RECAU	: Tidligere navn for "Det Regionale edb-Center ved Århus Universitet". Nu UNI-C, Århus	UNI-C, Århus	: Danmarks edb-center for forskning og uddannelse, Region Århus (Tidligere RECAU)
Report file	: RPTFILE: Fil der oprettes i forbindelse med BLAST-simuleringen. Filen indeholder special-rapporter fra BLAST på timebasis. I alt kan der specificeres 143 brugervalgte parametre, hvoraf der imidlertid højst kan specificeres 11 i én simulering.	UNI-C, København	: Danmarks edb-center for forskning og uddannelse, Region København (Tidligere RECKU)
REPORT-WRITER	: REPORT-WRITER anvendes i forbindelse med BLAST og gør det muligt at få et stort antal specialrapporter fra BLAST.	UNI-C, Lyngby	: Danmarks edb-center for forskning og uddannelse, Region Lyngby (Tidligere NEUCC)
RPTFILE	: Se "Report file"	USAFETAC	: US Air Force Environmental Technical Applications Center
SBI	: Statens Byggeforskningsinstitut	Weather file	: WTHRFL: Vejrdatabil i BLAST-format, som er fremkommet på baggrund af rå-vejrdataba, der er konverteret ved hjælp af WIFE-programmet
SERI	: Solar Energy Research Institute, USA		
SERI-RES	: Solar Energy Research Institute - Residential Energy Simulator Program til beregning af bygningers energiforbrug og indeklime Solar Energy Research Institute (SERI) Ecotope Group Seattle, WA, USA	WIFE	: The Weather Information File Encoder (Fremstiller vejrdata til BLAST-programmet)
Slave	: En enhed der arbejder under kontrol af en anden enhed	WTHRFL	: Se "Weather file"
Slaveprinter	: En printer der arbejder under kontrol af en skærmterminal, hvilket i praksis betyder at brugeren kun kan printe begrænsede mængder ud ad gangen, afhængigt af bufferen i printeren		
Solar Wall	: Solvæg		
SOLAR 280	: Solar Radiation (280) (Vejrdata der kan anvendes som input til WIFE)		
SOLMET	: NOAA Solar Radiation (Vejrdata tape der kan anvendes som input til WIFE)		
SUNCODE	: Program til beregning af bygningers energiforbrug og indeklime (Programmet er en videreudvikling af SERI-RES) Larry Palmiter Ecotope Group Seattle, WA, USA		
Symphony	: Grafik program Lotus Development Corporation.		
TARP	: Thermal Analysis Research Program Program til beregning af bygningers energiforbrug og indeklime (Programmet er en videreudvikling af Space Load Predicting Subprogram BLAST. TARP er et forskningsprogram) National Bureau of Standards Washington, D.C., USA		
TDF-14	: TDF-14 NOAA raw data (Vejrdata der kan anvendes som input til WIFE)		

SYMBOLLISTE

<u>Notation</u>	<u>Enhed</u>	<u>Beskrivelse</u>
A	m <sup>2</sup>	Areal
c	J/kg K	Varmefylde, specifik varmekapacitet
q	W	Varmestrøm
R	m <sup>2</sup> K/W	Isolans
R <sub>i</sub>	m <sup>2</sup> K/W	Indvendig overgangsisolans
R <sub>u</sub>	m <sup>2</sup> K/W	Udvendig overgangsisolans
R	-	Fourier-tallet
T	K	Temperatur
t	°C	Temperatur
U	W/m <sup>2</sup> K	Transmissionskoefficient
x, y, z	m	Stedkoordinater
X, Y, Z	-	Responsfaktorer

Græske bogstaver

$\alpha$	-	Absorptionsforhold
$\alpha$	m <sup>2</sup> /s	Temperaturledningstal
$\lambda$	W/m K	Varmeledningsevne
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Densitet, massefylde
$\rho$	-	Refleksionsforhold
$\tau$	-	Transmissionsforhold
$\tau$	s	Tid
$\Delta\tau$	s eller h	Tidsinterval

## REFERENCELISTE

- Adamson, Bo  
Byggnadskonstruktion  
Lunds tekniske Højskole  
Sverige
- Andersen, Jørgen  
Kunstakademiets Arkitektskole  
København
- Barakat, S.A. - 1982:  
"Passive Solar Heating Studies at the Division of Building Research, Note 188"  
National Research Council Canada  
Ottawa, Canada
- Berg, Peter  
Laboratoriet for Varmeisolering  
Danmarks tekniske Højskole
- BLAST Support Office  
Department of Mechanical and Industrial Engineering  
University of Illinois at Urbana-Champaign  
USA
- BLAST Support Office:  
"BLAST News"  
BLAST Support Office  
Department of Mechanical and Industrial Engineering  
University of Illinois at Urbana-Champaign  
USA
- BLAST Support Office - 1984:  
"The TARP Algorithms - chapter 3"  
Intern rapport skrevet af folk der arbejder med BLAST.  
Rapporten er modtaget fra BLAST Support Office i 1984.  
Department of Mechanical and Industrial Engineering  
University of Illinois at Urbana-Champaign  
USA
- BLAST Support Office - April 1986:  
"BLAST 3:0, Users' Manual"  
Department of Mechanical and Industrial Engineering  
University of Illinois at Urbana-Champaign  
USA
- BLAST, Version 2:0, User's Manual, Volume one  
(Se Hittle, Douglas C. - 1979, Report CERL-TR-E-153)
- BLAST, Version 2:0, User's Manual, Volume two  
(Se Hittle, Douglas C. - 1979, Report CERL-TR-E-153)
- BLAST, Version 2:0, Input Booklet  
(Se Hittle, Douglas C. - 1979, Report CERL-TR-E-154)
- BLAST, Version 3:0, User's Manual, Volume one - supplement  
(Se Herron, Dale L. & George N. Walton & Linda Lawrie - 1981)
- Byggestyrelsen - 1985.  
"Bygningsreglement for småhuse, BR-S 85"  
Byggestyrelsen, København den 1. marts 1985
- Christensen, Jørgen Erik - November 1983 til februar 1984:  
Studierejse til:  
"BLAST Support Office"  
Department of Mechanical and Industrial Engineering  
University of Illinois at Urbana-Champaign  
USA
- Christensen, Jørgen Erik - October 1984:  
"BLAST - Description of the Subroutines in the BLAST program"  
Thermal Insulation Laboratory  
Technical University of Denmark  
Report No 84-32
- Christensen, Jørgen Erik - November 1984:  
"BLAST - edb-program til beregning af passiv solvarme"  
Laboratoriet for Varmeisolering  
Danmarks tekniske Højskole  
Meddelelse nr. 165
- Christensen, Jørgen Erik - December 1984:  
"BLAST - Description of the Subroutines in the REPORT-WRI-TER program"  
Thermal Insulation Laboratory  
Technical University of Denmark  
Report No 84-33
- Christensen, Jørgen Erik - January 1985:  
"BLAST - Description of the Subroutines in the WIFE program"  
Thermal Insulation Laboratory  
Technical University of Denmark  
Report No 85-1
- Christensen, Jørgen Erik - Maj 1985:  
Brev til Ron Judkoff  
Laboratoriet for Varmeisolering  
Danmarks tekniske Højskole
- Christensen, Jørgen Erik - August 1985:  
"BLAST - Introduktion til RECAU og BLAST"  
Laboratoriet for Varmeisolering  
Danmarks tekniske Højskole  
Rapport nr. 85-12
- Christensen, Jørgen Erik - November 1985:  
"BLAST - Beregning af temperaturforhold og energiforbrug i Vesterbo"  
Laboratoriet for Varmeisolering  
Danmarks tekniske Højskole  
Rapport nr. 85-16
- Christensen, Jørgen Erik - November 1986:  
"BLAST - JECJOB"  
Laboratoriet for Varmeisolering  
Danmarks tekniske Højskole  
Rapport nr. 86-6
- Christensen, Jørgen Erik - December 1986:  
"BLAST - JC-WRI-TER"  
Laboratoriet for Varmeisolering  
Danmarks tekniske Højskole  
Rapport nr. 86-11
- Christensen, Jørgen Erik - Marts 1987:  
"Forudsætninger og beregninger for Tubberupvænge II til mødet den 26. november 1986"  
Laboratoriet for Varmeisolering  
Danmarks tekniske Højskole  
Rapport nr. 87-14
- De La Hunt, Mary Jane - 1985:  
"SUNCODE-PC"  
Users' Manual  
Ecotope, Inc.  
Seattle, Washington, USA
- Eidorff, Stig:  
"Personlig samtale"  
Laboratoriet for Varmeisolering  
Danmarks tekniske Højskole, indtil foråret 1983
- Espensen, Frede:  
"Personlig samtale"  
UNI-C, Århus  
Århus Universitet
- Falck, Ulla & Troels Lergård & Erik Nielsen & Dorthe Hendriksen - 1985:  
"Passiv Solvarme i etagebyggeri"  
Projektbeskrivelse  
Passiv solvarmegruppen i samarbejde med Boliglab., (Kunstakademiets Arkitektskole) og Organisationen for Vedvarende Energi
- Hansen, Jørgen - Juni 1987:  
"Matematisk beskrivelse og simulering af varighedskurven"  
Laboratoriet for Varmeisolering  
Danmarks tekniske Højskole  
Eksamensprojekt
- Hansen, Preben Nordgaard - 1978:  
"Termiske beregningsmetoder", forelæsningsnotat  
Laboratoriet for Varmeisolering  
Danmarks tekniske Højskole
- Herron, Dale L. & George N. Walton & Linda Lawrie - 1981:  
"BLAST - The Building Loads Analysis & System Thermodynamics Program"  
Version 3:0, Volume one - Supplement  
U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory  
Champaign, Illinois, USA  
Report CERL-TR-E-171

Herron, Dale L.:  
 "Personlig samtale"  
 U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory  
 Champaign, Illinois, USA

Herskind, Niels  
 Arkitekt i firmaet BY-BYG-Aps  
 København

Hittle, Douglas C. - 1979:  
 "BLAST - The Building Loads Analysis & System Thermodynamics Program"  
 Version 2:0, User's Manual, Volume one  
 U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory  
 Champaign, Illinois, USA  
 Report CERL-TR-E-153

Hittle, Douglas C. - 1979:  
 "BLAST - The Building Loads Analysis & System Thermodynamics Program"  
 Version 2:0, User's Manual, Volume two  
 U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory  
 Champaign, Illinois, USA  
 Report CERL-TR-E-153

Hittle, Douglas C. - 1979:  
 "BLAST - The Building loads Analysis & System Thermodynamics Program"  
 Version 2:0, Input Booklet  
 U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory  
 Champaign, Illinois, USA  
 Report CERL-TR-E-154

Hittle, Douglas C. - 1981:  
 "Calculating Building Heating and Cooling Loads using the Frequency Response of Multilayered Slabs"  
 U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory  
 Champaign, Illinois, USA  
 Report CERL-TM-E-169

Hittle, Douglas C.:  
 "Personlig samtale"  
 U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory  
 Champaign, Illinois, USA

Holmgård, Ove:  
 "Personlig samtale"  
 Danske Elværkers Forenings Udredningsafdeling (DEFU)  
 Lyngby

Holtz, Michael:  
 (leder af IEA, Task VIII)  
 "Personlig samtale"  
 Architectural Energy Corporation  
 Boulder, Colorado, USA

Johnsen, Kjeld:  
 "Personlig samtale"  
 Afd. for Indeklimateknik  
 Statens Byggeforskningsinstitut

Judkoff, Ron & D. Wortman & B. O'Doherty & J. Burch - 1983:  
 "A Methodology for Validating Building Energy Analysis Simulations"  
 Solar Energy Research Institute  
 Golden, Colorado, USA  
 Report No SERI/TR-254-1508

Judkoff, Ron & D. Wortmann & J. Burch - May 1983:  
 "Measured Versus Predicted Performance of the SERI Test House: A Validation Study"  
 Solar Energy Research Institute  
 Golden, Colorado, USA

Judkoff, Ron - 1985:  
 "A Comparative Validation Study of the BLAST 3:0, SERI-RES-1.0 and DOE-2.1A Computer programs using the Canadian Direct Gain Test Building"  
 Solar Energy Research Institute  
 Golden, Colorado, USA

Judkoff, Ron - April 1986:  
 "International Energy Agency Sunspace Intermodel Comparison"  
 Solar Energy Research Institute  
 Golden, Colorado, USA

Jørgensen, Ove - 1983:  
 "Analysis Model Survey"  
 Task 8 - Passive and Hybrid Solar Low Energy Buildings  
 International Energy Agency - Solar Heating and Cooling programme  
 Thermal Insulation Laboratory  
 Technical University of Denmark  
 Report No 143

Kommissionen for de Europæiske Fællesskaber - 1983:  
 "Europæisk Passiv Solvarme håndbog"  
 Generaldirektorat XII for Videnskab, Forskning og Udvikling  
 EKSF, EØF, EURATOM, Bruxelles og Luxemburg

Littler, J.G.F. - 1982:  
 "Overview of Some Available Models for Passive Solar Design"  
 Computer-Aided Design, vol. 14, side 15-18

Lund, Hans  
 "Personlig samtale"  
 Laboratoriet for Varmeisolering  
 Danmarks tekniske Højskole

Mitalas, G.P. & D.G. Stephenson - 1967:  
 "Room Thermal Response Factors"  
 ASHRAE Transactions, Volume 73, Part 1, No 2019  
 USA

Mørck, Ove - May 1986:  
 "The IEA Project - Smakkebo"  
 Documentation of Design, Construction, Monitoring Programme"  
 Thermal Insulation Laboratory  
 Technical University of Denmark  
 Report No 86-9

Mørck, Ove:  
 "Personlig samtale"  
 Laboratoriet for Varmeisolering  
 Danmarks tekniske Højskole, indtil 31. august 1986

Mørck, Ove - June 1986:  
 "Simulation Model Validation using Test Cell Data"  
 IEA, Task VIII  
 Thermal Insulation Laboratory  
 Technical University of Denmark  
 Report No 176

Passive Solar Modelling Sub Group - 1983:  
 "Final report of the Passive Solar Modelling Sub Group to the Commission of the European Communities"  
 The Commission of the European Communities

Pedersen, C.O. - professor:  
 "Personlig samtale"  
 Department of Mechanical and Industrial Engineering  
 Urbana, Illinois, USA

Pedersen, Jørgen Holm - 1986:  
 "Analyse af boligens varmemforsyningsbehov"  
 Laboratoriet for Varmeisolering  
 Danmarks tekniske Højskole  
 Eksamensprojekt

Pedersen, Peder Vejsig - August 1986:  
 "Kompakte solvandvarmere i nybyggeri"  
 CENERGIA Aps, Ballerup

SERI - 1980:  
 "Analysis Method for Solar Heating and Cooling Applications, Passive and Active Systems"  
 3rd edition  
 Solar Energy Research Institute  
 Report No SERI/SP-35-232 R

Smith, G.D. - 1974:  
 "Numerical Solution of Partial Differential Equations"  
 Oxford Mathematical Handbooks  
 Oxford University Press  
 England

Stephenson, D.G. & G.P. Mitalas - 1967:  
 "Cooling Load Calculations by Thermal Response Factor Method"  
 ASHRAE Transactions, Volume 73, Part 1, No 2018  
 USA

Storgaard, Jens Peter - Juni 1986:  
 "Tubberupvænge II - Eksempel på boliggruppe"  
 Arkitekttegnestuen Aps  
 København

Energiministeriets solvarmeprogram - 1985:  
 "Passiv solvarme - Projekteringsvejledning"  
 Teknologisk Institut - Varmeteknik  
 Laboratoriet for Varmeisolering  
 Danmarks tekniske Højskole  
 Energiministeriets solvarmeprogram - Rapport nr. 30

Temovex Danmark  
 Skævinge

Ørtoft, Lars - 1985:  
 "Passiv Solvarme. Energibesparelse og brugsværdi bestemt  
 udfra målinger og edb-simuleringer"  
 Dokumentationsrapport  
 Danmarks Ingeniørakademi, Bygningsafdelingen  
 Rapport Afgangsprojekt BIT 076

Ørtoft, Lars - 1986:  
 "Passiv Solvarme"  
 VVS-bladet nr. 4, 1986

PUBLIKATIONSLISTE FOR JØRGEN ERIK CHRISTENSEN

Bøger: Vejledning i brug af terminal til NEUCC - MVS/TSO, Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks tekniske Højskole, Rapport nr. 83-3.

Bygningsbeskrivelse til BLAST, Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks tekniske Højskole, Rapport nr. 83-34.

Varmeisolering I - Bind II, Varmetransmission, Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks tekniske Højskole.

BLAST - Description of the Subroutines in the BLAST program, Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark, Report No 84-32.

BLAST - Edb-program til beregning af passiv solvarme, Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks tekniske Højskole, Meddelelse nr. 165.

BLAST - Description of the Subroutines in the REPORT WRITER program, Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark, Report no. 84-33.

BLAST - Description of the Subroutines in the WIFE program, Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark, Report no. 85-1.

BLAST - Introduktion til RECAU og BLAST, Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks tekniske Højskole, Rapport nr. 85-12.

BLAST - Beregning af temperaturforhold og energiforbrug i Vesterbo, Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks tekniske Højskole, Rapport nr. 85-16.

BLAST - JECJOB, Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks tekniske Højskole, Rapport nr. 86-6.

Forudsætninger og beregninger for Tubberupvænge II til mødet den 26. november 1986, Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks tekniske Højskole, Rapport nr. 87-14.

BLAST - JC-WRITER, Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks tekniske Højskole, Rapport nr. 86-11.

EDB-programmer for energi og indeklima, Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks tekniske Højskole, Meddelelse nr. 177.

Computerized Heat Balance Calculations. Danish Building Abroad, Danish Ministry of Housing and

Building. International Relations Division, 1987, (medforfatter).

Kapitel 4 - Bygningers varmebalance, Varme og Ventilation 1, Poul Becher, Teknisk Forlag, ultimo 1987, (medforfatter).

Noter til kursus i edb-beregninger af bygningers varmebalance, Instituttet for Bygningsteknik - AUC, Laboratoriet for Varmeisolering - DtH og Crone & Koch, primo 1988, (medforfatter).

Artikler: EDB-programmer for energi og indeklime, VVS nr. 1, januar 1987.



FIGURLISTE

1.1-1.	Illustration af direkte tilskud (Direct Gain).	3
1.1-2.	Eksempel på glastilbygning.	5
1.1-3.	Illustration af Trombevæg.	7
2-1.	Skematisk figur der illustrerer de forskellige kilder som indgår i varmembalancen.	9
2.2-1.	Væg hvor der er indlagt netpunkter i en indbyrdes afstand $\Delta x$ . "i" betegner den diskrete stedkoordinat.	20
2.2-2.	Den ukendte temperatur i det næste tidsstep $j+1$ findes på baggrund af de kendte temperaturer i tidssteppet $j$ .	21
2.2-3.	Sammenligning mellem en analytisk løsning (korrekt) og en endelig differensløsning.	22
2.2-4.	Mur med ensformigt fordelt temperatur $T_0$ , hvor den udvendige overfladetemperatur momentant forøges en grad til tiden nul, hvilket giver anledning til en varmestrøm gennem den indvendige overflade.	23
2.2-5.	Enheds-trekantimpuls med højden én grad og bredden to tidsintervaller.	24
2.2-6.	Kontinuert funktion angivet ved funktionsværdierne svarende til fremadskridende ækvidistante tidsintervaller.	25
2.2-7.	Tidsserie af trekantimpulser tilnærmende et kontinuerligt funktionsforløb.	25
2.2-8.	Væg med de fire variabler der har interesse: to overfladetemperaturer og to varmestrømme.	26
2.2-9.	Skematisk illustration af varmestrømme ved hjælp af superpositionsprincippet.	27
2.3-1.	Priseksempler på årssimuleringer med BLAST på den laveste prioritet - P1.	29
3.1-1.	Skematisk oversigt over det danske modificerede BLAST-system.	34
3.1-2.	Skematisk oversigt over BLAST-programmet.	36
3.1-3.	BLAST med tilhørende filer.	36
3.1-4.	Eksempel på nødvendige parametre til beskrivelse af 100 mm tykt betonlag.	37

3.1-5.	Eksempel på beskrivelse af en bygningskonstruktion bestående af tre lag.	38
3.1-6.	Eksempel på hvorledes et parcelhus kan simplificeres.	38
3.1-7.	Skematisk oversigt over REPORT-WRITER programmet.	39
3.1-8.	Skematisk oversigt over brugen af WIFE programmet.	40
3.2-1.	Skematisk oversigt for JC-WRITER.	43
3.2-2.	Inputfil til JC-WRITER.	45
3.2-3.	Udskrift af fraktiler og timefordelinger for indelufttemperaturen i zone 1.	46
3.2-4.	Udskrift af timeværdier for perioden 19.-20. februar.	46
3.2-5.	Temperaturforløbet for en bolig med tilhørende glastilbygning sammen med udetemperaturen for en 14-dages periode.	47
4.2-1.	Plan over den 3. og 4. enhed i den canadiske "Direct Gain" testbygning.	54
4.2-2.	Snit gennem konstruktionerne i den tredje enhed.	55
4.2-3.	Beregnete temperaturer med ENCORE, Canada, for det sydvendte rum plottet op mod de aktuelle målinger.	60
4.2-4.	Beregnete og målte temperaturer i det sydvendte rum for perioden 5.-11. januar 1981.	61
4.2-5.	Beregnete og målte temperaturer for den 5. januar.	61
4.2-6.	Beregnete og målte temperaturer for den 8. januar.	62
4.2-7.	Beregnete og målte temperaturer for den 10. januar.	62
4.2-8.	Beregnete og målte temperaturer med SUNCODE for den 5. januar med tidsstep på en, to og elleve pr. time.	64
4.2-9.	Beregnete og målte temperaturer med SUNCODE for den 8. januar med tidsstep på en, to og elleve pr. time.	64
4.2-10.	Beregnete og målte temperaturer med SUNCODE for den 10. januar med tidsstep på en, to og elleve pr. time.	65

4.2-11.	Sammenligning mellem temperaturniveauer for den 5. januar ved varierende andel af solindfald til rumluften: Uden solindfald til rumluften (referencemodel), 10% til rumluften og 20% til rumluften.	66
4.2-12.	Målte og beregnede effektbehov for perioden 5.-11. januar.	67
4.2-13.	Målte og beregnede effektbehov for perioden 5.-6. januar.	67
4.2-14.	Målte og beregnede effektbehov for perioden 7.-8. januar.	68
4.2-15.	Beregnede effektbehov med SUNCODE for et, to og elleve tidsstep pr. time.	69
4.3-1.	Bebyggelsesplan for de 55 rækkehus i Smakkebo.	71
4.3-2.	Gulvplan for hustype C+.	72
4.3-3.	Østfacaden (endevæg).	73
4.3-4.	Nordfacaden.	73
4.3-5.	Sydfacaden.	73
4.3-6.	Plan over grundmodel i BLAST.	78
4.3-7.	Plan over grundmodel i SUNCODE.	78
4.3-8.	Energiforbruget på månedsbasis for beregninger og målinger.	80
4.3-9.	Energiforbruget på ugebasis for ugerne 44-52.	81
4.3-10.	Energiforbruget på ugebasis for ugerne 1-9.	81
4.3-11.	Energiforbruget på ugebasis for ugerne 10-18.	82
4.3-12.	Fordelingen af varmetilskud i Smakkebo: Varmeforbrug, solindfald og interne varmetilskud.	82
4.3-13.	Plan over glastilbygningen.	85
4.3-14.	Snit gennem glastilbygningen.	85
4.3-15.	Glastilbygningen set fra syd med angivelse af hvor globe- og lufttemperaturen måles.	86
4.3-16.	Luftskiftets indflydelse på de beregnede værdier med BLAST for et naturligt luftskifte på henholdsvis en halv og en gang pr. time.	86
4.3-17.	Beregnede og målte temperaturer i glastilbygningen for perioden 25.-27. februar 1986.	87

4.3-18.	Beregnete og målte temperaturer i glastilbygningen for den 4.-6. april 1986.	88
4.3-19.	Beregnete og målte temperaturer i glastilbygningen for den 7.-9. april 1986.	89
5-1.	Isometrisk snit i glastilbygning i Vesterbo Langhus.	93
5-2.	Forsøgshus i Baggesensgade 5 med glastilbygning på den sydvendte facade.	95
5-3.	Varighedskurve for fjernvarmeværkets belastning idet der er benyttet en moderne bolig som belastning.	96
5-4.	Eksempel på fordeling af boligtyper i Tubberupvænge II.	98
5-5.	Eksempel på boliggruppe bestående af de tre boligtyper A, B og C.	99
5-6.	Stue - (øverst) og førstesalsplan for boligtype A.	100

TABELLISTE

2.1-1. Resultatet af undersøgelse af egnede programmer til passiv solvarme.	12
2.1-2. Oversigt over resultaterne fra de tre beskrevne undersøgelser.	14
2.1-3. Aktuelle oplysninger om hvilke computere de fem programmer kan anvendes på.	16
4.1-1. Fordele og ulemper ved forskellige valideringsteknikker.	52
4.2-1. Karakteristika for testenheden.	56
4.2-2. Afvigelser mellem beregnede og målte temperaturer for den 5., 8. og 10. januar.	63
4.2-3. Sammenligninger mellem målinger og beregninger for en to ugers periode med den canadiske testcelle.	69
4.3-1. Sammenligninger mellem målinger og beregninger på årsbasis.	79