

Varmeanlæg til velisolerede bygninger Dimensioneringsprincipper

Bjarne Saxhof og Kim B. Wittchen

**Laboratoriet for Varmeisolering
Meddelelse nr. 244**

**Danmarks Tekniske Højskole
December 1993**

LAVENERGIGRUPPEN:

Bjarne Saxhof, projektleder, forskningslektor, civ.ing.

Mogens Byberg, lektor, civ.ing.

Søren Østergaard Jensen, forskningslektor, civ.ing.

Jørgen M. Schultz, forskningslektor, civ.ing.

Kirsten Engelund Thomsen, forskningslektor, civ.ing.

Kim B. Wittchen, videnskabelig medarbejder, civ.ing. (fratrådt 1992)

FORORD

Projektet "Dimensioneringsprincipper for varmeanlæg til velisolerede bygninger" er gennemført for midler stillet til rådighed af Energistyrelsen som et led i Energiministeriets forskningsprogram EFP-84 (ENS j.nr. 405-04-01) under området Energianvendelse i Bygninger.

Projektet fremkom som resultat af tre forskellige forslag til forskningsprogrammet og er gennemført som et hovedprojekt under ledelse af Laboratoriet for Varmeisolering og to uafhængige delprojekter gennemført af henholdsvis daværende firma Rambøll & Hannemann Rådgivende Ingeniører A/S (nu Rambøll, Hannemann & Højlund A/S), Århus-afdelingen, og Crone & Koch Rådgivende Ingeniørfirma. De tre delemner i projektet er tidligere rapporteret separat ([1], [2], [3] og [4]). Hovedprojektets resultater er blevet præsenteret dels ved 2. Nordiske Symposium i Bygningsfysik, Trondheim 20.-22. august 1990, dels ved IEA Solar Heating and Cooling Systems Programme, Task XIII 3rd experts' meeting, Utrecht 16.-20. oktober 1990.

Nærværende hovedrapport afslutter projektet og indeholder dels en mere detaljeret gennemgang af hovedprojektet end publiceret i symposiepaperet, [4], dels resumeer og hovedkonklusioner af de to delundersøgelser samt samlede konklusioner af projektets undersøgelser.

Lyngby, december 1993

Bjarne Saxhof
Projektleder

INDHOLDSFORTEGNELSE

FORORD

INDHOLDSFORTEGNELSE	4
RESUMÉ	5
SUMMARY	6
1 INDLEDNING	7
1.1 Problemstillingen	7
1.2 De gennemførte undersøgelser	8
2 RAMBØLL & HANNEMANNS DELPROJEKT	9
2.1 Den gennemførte undersøgelse	9
2.2 Hovedresultater og -konklusioner	10
3 CRONE & KOCHS DELPROJEKT	12
3.1 Den gennemførte undersøgelse	12
3.2 Hovedresultater og -konklusioner	12
4 LABORATORIET FOR VARMEISOLERINGS HOVEDPROJEKT	14
4.1 Den gennemførte undersøgelse	14
4.2 Hus G, et 2.-generations lavenergihus i Hjortekær	14
4.3 Afkølings- og opvarmningsforsøg	18
4.3.1 Forsøgsbeskrivelse	18
4.3.2 Udvælgelse af brugbare forsøgsresultater	21
4.3.3 Forsøgsresultater	22
4.4 Termiske simuleringer	24
4.4.1 Baggrund for de termiske simuleringer	24
4.4.2 Skygger på grund af husets specielle geometri	24
4.4.3 Termisk masse af et rum/hus	24
4.4.4 Simulering af afkølings- og opvarmningsforsøg	25
4.5 Kortere opvarmningstid med samme installerede effekt	29
4.5.1 Simuleringer for reduktion af tidskonstanten	29
4.6 Hovedresultater og -konklusioner	33
5 GENERELLE KONKLUSIONER	35
6 LITTERATURLISTER	37
6.1 Referencer	37
6.2 LavEnergi Publikationer fra Laboratoriet for Varmeisolering (LfV), DTH	39
APPENDIKS	49

RESUMÉ

I dette projekt er der gennemført tre forskellige undersøgelser af diskontinuert opvarmning i velisolerede bygninger, hhv. en kontorbygning og en skole isoleret svarende til Bygningsreglementniveau (BR-82) og et enfamilie-lavenergihus med et dimensionerende transmissionstab på 30-35 % af varmetabsrammen efter Bygningsreglementet. Undersøgelserne er foretaget af hhv. de rådgivende ingeniørfirmaer Rambøll & Hannemann (Århus-afdelingen) og Crone & Koch og af Laboratoriet for Varmeisolering, DTH. Laboratoriet for Varmeisolering havde projektledelsen og var dermed ansvarlig for koordinering af delundersøgelserne og udgivelsen af denne slutrapport. De tre delundersøgelser er tidligere rapporteret separat ([1], [2], [3], [4]).

Formålet med projektet var at undersøge, i hvor høj grad krav til en acceptabel genopvarmningstid (især efter natsænkning) burde give sig udslag i krav om større installeret effekt end den p.t. krævede svarende til et dimensionerende varmetab udregnet under stationære temperaturforhold.

Der blev under projektet gennemført forsøg med afkøling og genopvarmning af rum i de tre bygningstyper, og måleresultaterne blev benyttet til at tilpasse edb-modeller til acceptabel overensstemmelse med de målte temperaturforløb. De således underbyggede edb-modeller blev derefter anvendt til at analysere genopvarmningsforløb under forskellige ydre betingelser med forskellige størrelser indbygget effekt for de anvendte varmekilder.

De gennemførte analyser viser klart et behov for at have større effekt til rådighed end den stationært bestemte, typisk mindst 2 gange denne, hvis midlertidig temperatursænkning uden for de egentlige brugsperioder skal udnyttes som energibesparende foranstaltning.

Forholdet er specielt vigtigt i bygninger, der befinder sig i den dårligst isolerede del af "de velisolerede", med andre ord bygninger opført lige præcis efter Bygningsreglementets krav eller ikke ret meget bedre. I sådanne bygninger kan temperaturfaldet under en enkelt natsænkningssperiode nå op på 4-6 K, og den nødvendige genopvarmningstid for igen at nå op på komfortable temperaturer kan blive urimelig lang, hvis varme anlægget ikke overdimensioneres i forhold til de stationære krav.

Selv om der i lavenergihuse let kan blive endnu mindre disponibel effekt til at hæve temperaturen, har forholdet ikke den samme betydning, dels fordi temperaturfaldet under normal drift i løbet af en enkelt natsænkningssperiode sjældent overstiger 1-1,5 K, dels fordi den krævede ekstra effekt under ekstreme genopvarmningssituationer absolut set er så lille, at den kan leveres af en lille transportabel varmluftblæser.

SUMMARY

In this project, funded by the Danish Energy Agency as a part of the Danish Energy Research and Development Programme EFP-84, three different investigations on intermittent heating in well insulated buildings have been carried out, two of them dealing with buildings insulated according to the current Building Regulations BR-82 (a school and an office building) and one dealing with a one-family low-energy house having a transmission heat loss that is only 30-35% of the loss from a similar house insulated according to BR-82.

The investigations were performed by the two consulting engineers companies Rambøll & Hannemann (the Århus department) and Crone & Koch, and by the Thermal Insulation Laboratory at the Technical University of Denmark. The Laboratory was responsible for project management and coordination and subsequently for this final report. However, the three investigations have previously been reported separately ([1], [2], [3], [4]). The larger part of the project, the analyses of low-energy buildings, has been presented at the 2nd Symposium on Building Physics in the Nordic countries, Trondheim 20-22 August 1990, and an off-print of the symposium paper has been included as an appendix to this report.

The main purpose of the project was to examine, to which degree demands to a reasonably short re-heating period (especially after night set-back) should be included in the design criteria for the heating systems. Presently, heating systems in Denmark are designed to meet a steady-state heat load, calculated with a design outdoor temperature of -12°C . Experiments with cooling-off and heating-up periods were carried out in rooms in the three above-mentioned buildings, and the monitoring results were used to adapt computer models to an acceptable agreement between calculated and measured temperatures. Thus checked against reality, the computer models were used to analyze heating-up sequences under different external conditions and heat emitter ratings.

The analyses clearly showed the need for larger power ratings than those specified in the present design rules, meeting the steady-state demand at the set design temperatures, typically at least twice the steady-state value to obtain satisfactory re-heating after night set-back.

This is particularly the case for buildings that just meet the demands in the Building Regulations or are only slightly better insulated. In these buildings, the temperature might drop 4-6 K during the set-back period, and the re-heating period can be unreasonably long, if the heating system is not over-sized compared to the present steady-state design rules.

Even though a low-energy house might easily have even lower re-heating power available (the difference between the power rating and the actual heat loss), the case is not so serious, partly because the temperature drop during a set-back period rarely exceeds 1-1,5 K, and partly because the power requirements for extreme and atypical re-heating situations in absolute terms are modest, so small that they can be supplied by a small portable fan-coil heater.

1 INDLEDNING

1.1 Problemstillingen

Varmeanlæg projekteres i Danmark ud fra et dimensionerende varmetab, beregnet for bygningens enkelte rum under stationære forhold med faste dimensionerende temperaturer inde og ude, normalt hhv. 20°C og -12°C, i henhold til standarden DS 418, [5].

Hverken Bygningsreglementet (BR-82, [6]) eller Bygningsreglementet for småhuse (BR-S 85, [7]) stiller særlige krav til varmeanlæggets kapacitet i forbindelse med diskontinuert opvarmning, fx i form af en mindste genopvarmningstid efter en periode med afbrydelse af opvarmningen eller skift til et lavere temperaturniveau, typisk ved anvendelse af natsænkingsautomatik.

Heller ikke den senere udkomne norm for vandbærende varmeanlæg (DS 469, [8]) stiller egentlige krav til genopvarmningstid, idet normkravet til varmegivere er en ydelse, der mindst svarer til rummets dimensionsgivende varmetab, dvs. varmetabet defineret i henhold til DS 418. Standarden kommer dog ind på problemstillingen i sin vejledende tekst, med en anbefaling af kort genopvarmningstid (ved overdimensionering af varmegiverens, og -kildens, kapacitet) som det driftsforhold, der normalt vil give det laveste energiforbrug til genopvarmningen.

To af bygningskroppens egenskaber spiller en væsentlig rolle ved diskontinuert opvarmning, varmetabet (isoleringsgrad, luftskifte) og den termiske masse. Under afkøling trækker lavt varmetab og stor termisk masse i samme retning, langsommere afkøling, medens et lavt varmetab under opvarmning fremmer opvarmningsforløbet, og den termiske masse forsinket det.

Varmeanlæggets evne til at hæve temperaturen i et rum afhænger af den disponible effekt (forskellen mellem varmegivernes maksimaleffekt og rummets aktuelle varmetab) og rummets termiske træghed.

Rums og bygningers varmeakkumuleringssevne afhænger hovedsagelig af de anvendte byggematerialer inden for klimaskærmens isoleringslag og af disse materials tilgængelighed. Det betyder, at den termiske masse i de fleste tilfælde er stort set uafhængig af bygningens isoleringsgrad.

I velisolerede bygninger vil det dimensionerende (stationære) varmetab, [5], være lavt - i lavenergihuse endda ekstremt lavt - og hvis der installeres varmeanlæg svarende til dette di-

mensioneringsgrundlag, vil selv den installerede effekt være lille i forhold til den effekt, der er nødvendig for at ændre temperaturen af husets termiske masse, og overskuddet under normal drift (dellast), altså den disponible effekt, vil absolut set være en meget lille størrelse.

Derfor er der grund til at betvivle, at det i nye velisolerede boliger eller erhvervslokaler med varmeanlæg dimensioneret strengt efter reglerne er muligt at retablere en acceptabel komforttilstand i løbet af en relativt kort opvarmningsperiode, efter en kold nat, hvor bygningen er blevet afkølet.

Dette projekt søger at klarlægge, hvorvidt der kan og bør opskrives supplerende regler for dimensionering af varmeanlæg til velisolerede bygninger og specielt til lavenergihuse, når der forudsættes rimelige opvarmningstider efter natsækning sammen med et acceptabelt komfortniveau om morgenen. I projektet undersøges desuden, hvilken betydning længere afkølingsperioder, fx under weekend-fravær og ferier, kan have, og om det vil være rimeligt at inddrage sådanne forhold i dimensioneringskriterierne.

Det skal tages i betragtning, at der normalt ønskes en så lille installeret effekt som muligt - dels fordi anlægsprisen i de fleste tilfælde er afhængig heraf, dels fordi flere anlægstyper (især varmekilderne) har betydelig lavere effektivitet under dellast end under fuld belastning. Hvis der i sådanne tilfælde sker en væsentlig overdimensionering af varmeanlægget, går det ud over energiøkonomien under normal drift.

1.2 De gennemførte undersøgelser

De tre projektdeltagere har alle gennemført eksperimentelle undersøgelser og anvendt resultaterne til at underbygge edb-modeller, der så igen - med forsigtighed - er anvendt til at uddrage nogle mere generelt anvendelige konklusioner af undersøgelseerne.

Rambøll & Hannemann og Crone & Koch har foretaget målinger i termisk tunge rum i større bygninger isoleret nogenlunde svarende til Bygningsreglementets (BR-82's) krav, medens Laboratoriet for Varmeisolering har gennemført sine undersøgelser i termisk lette til mideltunge rum i et enfamiliehus projekteret og opført som egentligt lavenergihus, med et dimensionerende transmissionstab på omkring 30-35% af varmetabsrammen efter BR-82.

Ingen af de tre undersøgelser behandler selve varmeanlæggets eller reguleringssystemets dynamik - de viste resultater stammer alene fra vurderinger af forholdet mellem indfyret effekt, bygningens (rummets) øjeblikkelige varmetab og akkumuleringen i bygningskonstruktionerne. Træghed i varme- og reguleringssystemer (på grund af stort vandindhold eller anden termisk masse, fx et tungt gulvvarmeanlæg, eller på grund af uheldig termostatplacering) vil yderligere forøge de i denne rapport viste genopvarmningstider.

2 RAMBØLL & HANNEMANNS DELPROJEKT

Det rådgivende ingeniørfirma Rambøll & Hannemanns Århus-afdeling gennemførte delprojektet "Dimensionering af radiatorer under hensyn til genopvarmning efter natsænkning" og har rapporteret delprojektets resultater i [1] og [2].

2.1 Den gennemførte undersøgelse

Rambøll & Hannemann havde i praksis ved nogle opførte erhvervsbyggerier projekteret strengt efter det nye Bygningsreglement (BR-82) og DS 418 konstateret, at det i flere tilfælde var nødvendigt at sætte den planlagte temperatursænkning uden for brugsperioden ud af kraft, fordi varmeanlæggene ikke havde tilstrækkelig kapacitet til at sikre en tilstrækkelig kort genopvarmningsperiode, når udetemperaturen faldt til under 0°C , specielt i tungt byggeri, fx betonbyggeri.

Rambøll & Hannemann ønskede derfor i sit delprojekt at analysere, hvor stort tillæg til det dimensionerende (stationære) varmetab, der ved radiatoropvarmning bør gives for at sikre acceptable genopvarmningstider efter natsænkning.

Målingerne blev gennemført i et nyt velisoleret kontorhus i Slet i nærheden af Århus, tilhørende Jysk Telefon A/S. Betonbygningen, der blev taget i brug i 1981, er isoleret lidt bedre end krævet efter BR-82 (fx er vinduerne forsynet med trelagsruder). Under normal drift opvarmes kontorerne af et vandvarmeanlæg med termostattyrede konvektorer i et installationspanel under vinduerne, dog suppleret af et ventilationsanlæg, der leverer det ret høje luftskifte (3 h^{-1} i brugstiden) ved rumtemperatur og under genopvarmning yderligere kan levere luften ved en temperatur på $26\text{--}28^{\circ}\text{C}$.

Under målingerne, der blev udført i et 21 m^2 stort nordvestvendt traditionelt kontorlokale, blev det normale varme- og ventilationsanlæg spærret af, og rummet blev opvarmet med 2 on-off styrede el-varmeovne, hver med trinene 500 W, 1000 W og 1500 W. Rummets dimensionerende (stationære) varmetab var ca. 750 W. I løbet af nogle sammenhængende kolde døgn blev der gennemført 4 opvarmningsforløb med 4 timers tilslutning af maksimal effekt på hhv. 3000 W, 2000 W, 1000 W og 0 W.

De målte temperaturforløb blev sammenlignet med temperaturkurver beregnet med edb-modellen Tempfo 3 (Temperaturforløb i bygninger), med parametertilpasning inden for disses usikkerhedsmargen, til opnåelse af rimelig overensstemmelse mellem målinger og beregninger. Modellen anvender tidsskridt på 1 time. Den således tilpassede edb-model blev derefter anvendt til gennemregning af et mindre antal natsænkningstilfælde (forhold på hhv. 1, 1,33 og 2 og 3 mellem radiator effekt og dimensionerende varmetab efter DS 418; let og tungt rum; gennemsnitlig udetemperatur hhv. -9°C og $+3^{\circ}\text{C}$; maksimal natsænkning 3 K og 5 K).

2.2 Hovedresultater og -konklusioner

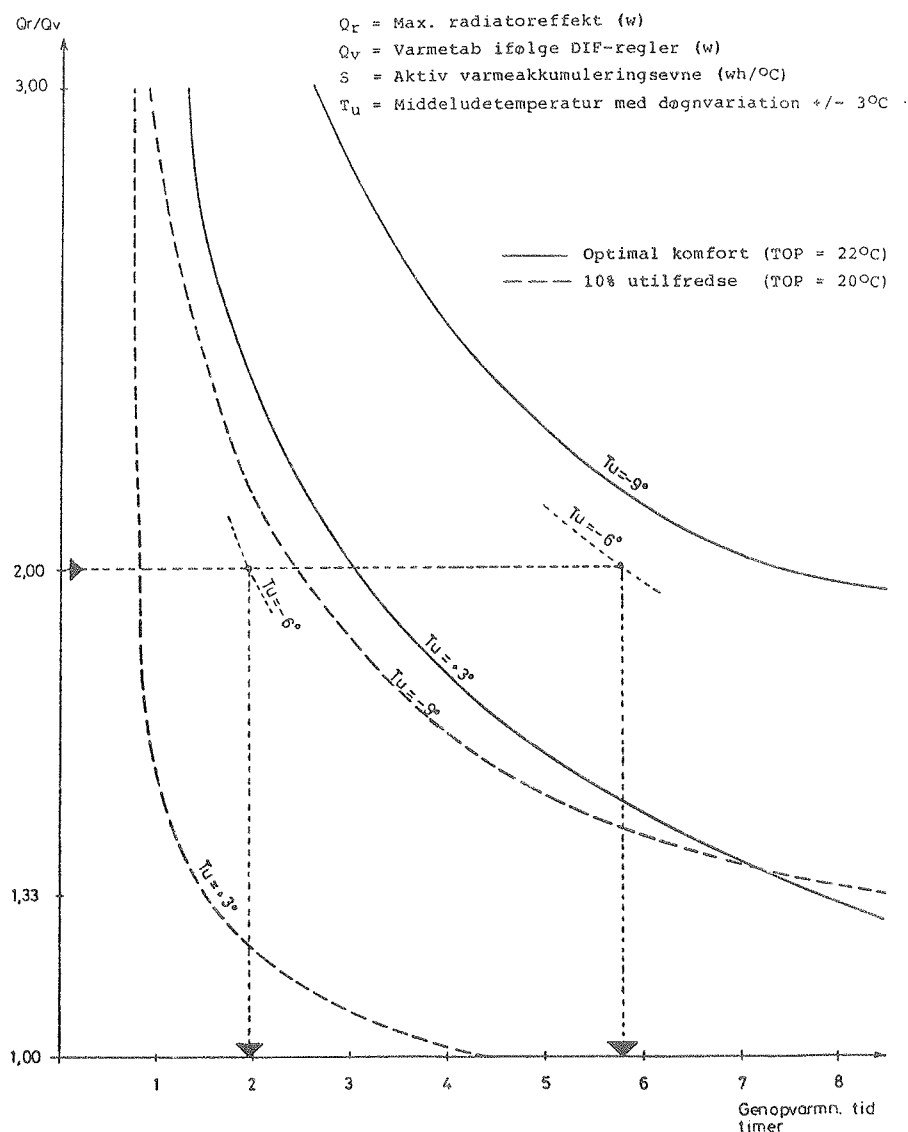
Måleresultaterne blev udelukkende anvendt til at kontrollere, at edb-modellen kunne give en acceptabel beskrivelse af de virkelige forhold, og parametertilpasningen gav en model, som viste god overensstemmelse med de målte temperaturforløb for alle fire undersøgte radiator-effekter. Rambøll & Hannemann konkluderede derfor, at modellen ville give tilstrækkelig nøjagtige resultater til anvendelse ved en foreløbig vurdering af radiator-effektens betydning, dvs. som grundlag for en overslagsmæssig vurdering.

Edb-simuleringerne af temperaturforløb under natsenkning og genopvarmning ved varierende radiator-effekt, akkumuleringssevne i rummet, udetemperatur og maksimal natsenkning gav resultater, der kunne formuleres i overskuelige diagrammer. Af diagrammerne fremgår, at radiatorerne typisk må dimensioneres for mere end 2 gange det efter DS 418 beregnede stationære dimensionerende varmetab for at give termisk komfort (i dette tilfælde defineret som mindre end 10% utilfredse brugere) efter natsenkning i en tung bygning. Ved en gennemsnitlig udetemperatur på -6°C og med en maksimal natsenkning på 5 K opnås tilstanden i så fald efter 2-3 timers genopvarmning. Et eksempel på de udarbejdede diagrammer er vist i figur 2.1.

Der er ved udarbejdelsen af diagrammerne ikke taget hensyn til, om gulvets overfladetemperatur var nået op på et acceptabelt niveau (19°C).

Rambøll & Hannemann har vurderet, at diagrammerne kan anvendes med lineær interpolation såvel med hensyn til udetemperatur (som vist i det indtegnede eksempel på figur 2.1) som med hensyn til aktiv varmeakkumulering.

Rambøll & Hannemann understreger imidlertid, at diagrammerne er opstillet på grundlag af ganske få målinger og beregningstilfælde og derfor må betragtes som et meget foreløbigt materiale, til anvendelse i mangel af bedre.



Figur 2.1 Eksempel på diagram over genopvarmningstider efter natsænkning, i dette tilfælde for et tungt rum (S/Q_v ca. 3 h/°C) med en maksimal natsænkning på 5 K, påbegyndt kl. 17. Q_r angiver den maksimale radiatoreffekt, Q_v det dimensionerende (stationære) varmetab efter DS 418, og T_u en middeludetemperatur (med en døgnvariation på +/- 3 K), fra [1].

På diagrammet er indtegnet et eksempel på anvendelsen for et rum med en indfyret effekt fra radiatorerne på 2 gange det stationære dimensionerende varmetab; ved en udetemperatur på -6°C tager det omkring 2 timer at nå op på acceptable 20°C, men næsten 6 timer at nå op på det egentlig ønskede komfortniveau (operativ temperatur) på 22°C.

3 CRONE & KOCHS DELPROJEKT

Det rådgivende ingeniørfirma Crone & Koch gennemførte delprojektet "Indeklimaproblemer efter natsenkning" og har rapporteret delprojektets resultater i [3].

3.1 Den gennemførte undersøgelse

Crone & Koch råder over en målevogn for indeklima, installationer og energi og havde i en række tilfælde konstateret et væsentligt antal berettigede klager over fodkulde og træk i nye kontorbygninger, der som et led i energibesparende foranstaltninger havde senkning af rumtemperaturen uden for arbejdstiden.

Crone & Koch ønskede derfor i sit delprojekt at analysere denne problematik og om muligt udarbejde praktiske anvisninger for begrænsninger i natsenkningen og genopvarmningsforløbet, så indeklimaproblemer som direkte følge af denne foranstaltning kunne undgås, uden unødigt forøgelse af energiforbruget.

Målingerne blev gennemført i et standard 93,5 m² klasselokale på Roholmskolen i Albertslund. Skolen er ganske vist bygget i 1971, men var velisoleret, således at standarden nogenlunde svarede til isoleringskravene i BR-82. Rummet havde en facadebredde på 8,5 m og blev opvarmet af 2 radiatorer, der strakte sig over ca. 75% af facadebredden, under de vestvendte vinduer. Anlæggets automatik kunne øge både fremløbstemperatur og cirkulerende vandmængde under genopvarmningen om morgenen, så radiatorerne havde mulighed for at afgive en effekt på op til 2,3 gange rummets dimensionerende (stationære) varmetab, svarende til 5 gange det aktuelle stationære varmetab ved en udetemperatur på +5°C.

Under forsøgene blev temperaturen i nabolokalerne styret, så den fulgte temperaturen i forsøgslokalet. Der blev gennemført forsøg med to indstillinger af termostatventilerne, hhv. fuldt åbne, indtil en operativ temperatur på 21°C var opnået, og konstant indstillede på normalt dagsniveau svarende til de 21°C.

Crone & Koch benyttede efter forsøgene beregningsprogrammet *tsbi 2.1* til at analysere forskellige natsenkingsstrategier efter at have benyttet programmet til at simulere de forsøg, som blev gennemført på Roholmskolen. Programmet benytter tidsskridt på 1 time.

3.2 Hovedresultater og -konklusioner

Forsøgene viste, at det var muligt at opvarme lokalet fra en nattilstand med en lufttemperatur på 15°C (altså en ganske voldsom natsenkning) til de ønskede 21°C i løbet af 1 time - under denne genopvarmning leverede radiatorerne en effekt svarende til ca. 4 gange det aktuelle stationære varmetab, dvs. at anlæggets opvarmningsfaktor var 4.

Radiatortermostatventilerne havde ingen indflydelse på genopvarmningstiden, men fik først efter omkring 3 timers opvarmning skabt stabil rumtemperatur.

I selve opvarmningsfasen (indtil den ønskede rumtemperatur første gang er nået) steg gulvtemperaturen og vægtemperaturen med en hastighed på hhv. ca. 2,0 K/h og 2,5 K/h - umiddelbart efter selve opvarmningsfasen fortsatte de to temperaturer med at stige hhv. ca. 0,2 K/h og 0,4 K/h.

Crone & Koch foreslår på grundlag af de gennemførte målinger og sammenligninger med tidligere undersøgelser som håndregel for vurdering af opvarmningsforløbet i en tung bygning isoleret efter reglerne i BR-82, [6], at med en opvarmningsfaktor større end 1,5 vil overfladetemperaturerne af gulv og vægge stige med ca. 1,5 K/h i den første time og derefter med 0,3 K/h. Er opvarmningsfaktoren mindre end 1,5 vil overfladetemperaturerne stige med ca. 0,3 K/h.

Med hensyn til opfyldelse af forskellige krav til termisk komfort under målingerne var der i brugsperioden om dagen kun problemer med gulvtemperaturen, der var nede på 17-18°C, noget under det anbefalede minimum på 19°C - forskellen svarer til, at det forventede antal utilfredse bliver 10-15% i stedet for 6%. Det kunne derfor af denne grund blive nødvendigt at indskrænke natsænkingsperioden, eller at hæve laveste accepterede temperatur i perioden til 16-17°C.

Crone & Koch havde under analysen af måleresultaterne vanskeligheder med at opnå god overensstemmelse mellem målingerne og beregninger med tsbi 2.1. Efter gennemførelse af en serie forskellige beregninger med tilpasning af inddata nåede de frem til en anbefaling af, at der ved beregninger af genopvarmningsforløb med tsbi 2.1 indsættes en værdi af den konvektive varmeovergangskoefficient α på 10,0 W/m²K i stedet for de normalt foreskrevne på 2,0-3,0 W/m²K. Crone & Koch konstaterede dog stadig meget store forskelle på beregnede og målte afgivne radiator effekter, med de beregnede værdier som de største.

En serie beregninger af forskellige natsænkingsstrategier for januar måned viste, at med en radiator effekt på 2,3 gange det dimensionerende (stationære) varmetab kunne genopvarmningen klares på 1 time og termisk komfort opnås, hvis minimumtemperaturen i sænkingsperioden blev holdt på 17°C - varmebesparelsen ved natsænkningen udgjorde så 16%. Med en noget lavere radiator effekt, 1,5 gange det dimensionerende varmetab, måtte varme anlægget sættes i drift 3 timer (efter en weekend 5 timer), før lokalet skulle bruges, og varmebesparelsen udgjorde så kun 8%.

4 LABORATORIET FOR VARMEISOLERINGS HOVEDPROJEKT

Laboratoriet for Varmeisolering har gennemført hovedprojektet, en teoretisk og eksperimentel undersøgelse af dimensioneringskrav til varmeanlæg i lavenergihuse ved diskontinuerlig opvarmning og har tidligere rapporteret resultaterne i [4], der også indgår som appendiks i denne rapport.

4.1 Den gennemførte undersøgelse

Med udgangspunkt i nogle måleserier i en lavenergibolig kalibrerede Laboratoriet en edb-model (tsbi 2.1), så beregninger med denne gav tilfredsstillende overensstemmelse med resultaterne af de udførte målinger. Den kalibrerede edb-model blev derefter benyttet til at analysere afkølings- og opvarmningsforløb, og der blev gennemført en undersøgelse af varmeakkumuleringens indflydelse på genopvarmningstidens længde i et højisoleret rum.

De praktiske forsøg med afkøling og genopvarmning af en lavenergibolig blev gennemført i et nyt ubeboet lavenergihus i Hjortekær, som LfV disponerede over i forbindelse med et andet forskningsprojekt, også finansieret af Energiministeriets forskningsprogrammer. De eksperimentelle undersøgelser er nærmere beskrevet i afsnit 4.3.

4.2 Hus G, et 2. generations lavenergihus i Hjortekær

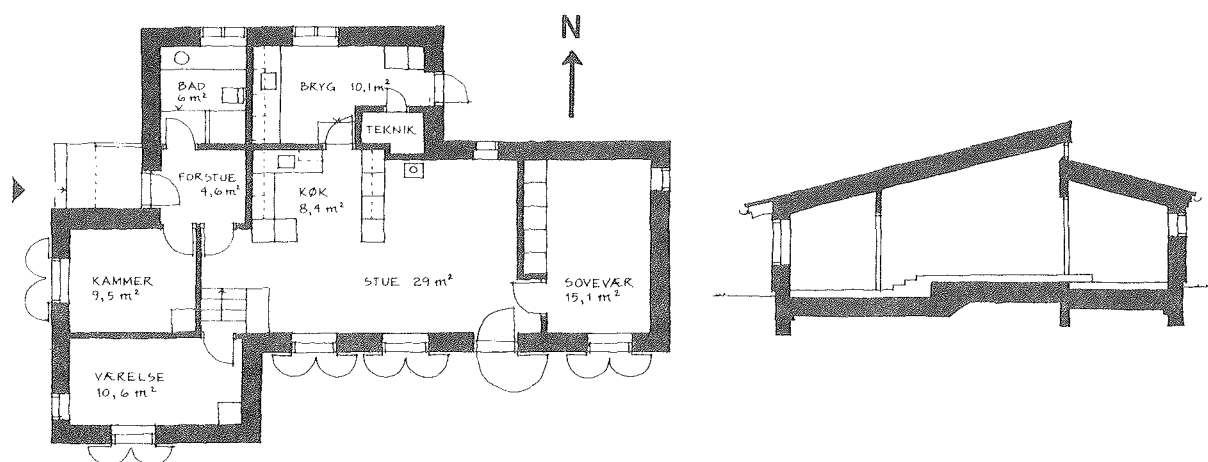
I 1984 blev der i Hjortekær, 20 kilometer nord for København, med støtte fra Energistyrelsen projekteret og opført et såkaldt 2.-generations lavenergihus (hus G), [9] og [10], som en videreførelse af det første store lavenergihusprojekt med projektering og opførelse af 6 forskellige enfamilieboliger i Hjortekær. Hus G blev projekteret i samarbejde med Laboratoriet for Varmeisolering under udnyttelse af de samlede erfaringer, gode såvel som dårlige, som var indhøstet i forbindelse med opførelsen af og målingerne i de seks første-generations lavenergihuse, [11], [12] & [13].

Huset er opført med stor opmærksomhed på isoleringsgrad og lufttæthed, men har ikke anlæg til aktiv udnyttelse af solvarmen. Udnyttelse af den passive solvarme indgik til gengæld i projekteringen ved en hovedsagelig sydvendt orientering af husets vinduer og anvendelse af tolagsruder (høj soltransmittans) i kombination med mobilisolering i form af isolerende skodder, [14], figur 4.1 og 4.2.

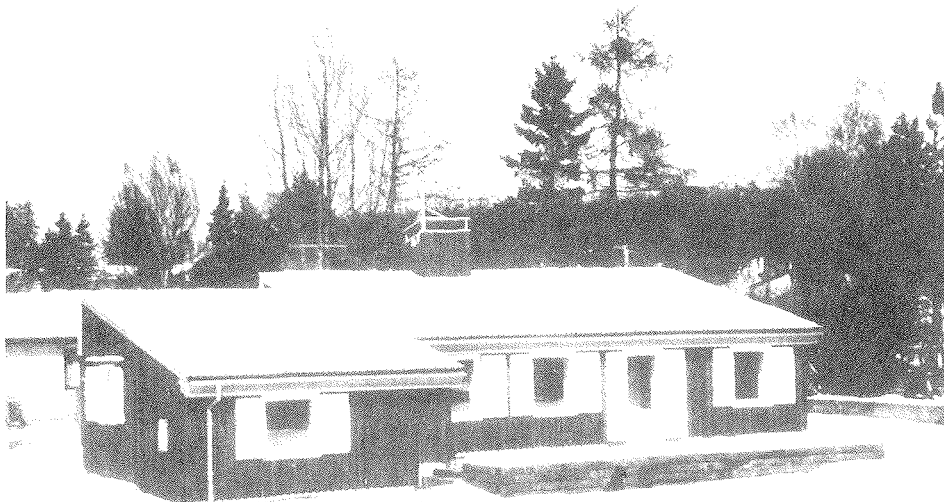
- Vinduerne er hovedsagelig orienteret mod syd (58% af det samlede areal). 12% af vinduesarealet vender mod øst og 12% mod vest, og de resterende 18% vender mod nord (primært som højsiddende vinduesbånd i opholdsstuen). Vinduerne er enten forsynet med 2-lags termoruder og udvendige isolerende skodder eller med 3-lags termoruder; de 3-lags termoruder er dog udelukkende orienteret mod vest, nord og øst.

- Ydervæggene er (regnet indefra) opbygget af; 100 mm gasbetonblokke, 200 mm ubrudt mineraluld i 2 lag, 100 mm mineraluld i et stolpeskelet, afsluttet på den udvendige side med en 1-på-2 brædebeklædning. Den anvendte mineraluld er klasse 36. Konstruktionen har en beregnet U-værdi på 0,12 W/m²K.
- Taget består af en indvendig brædebeklædning efterfulgt af 2 gange 50 mm mineraluld med en dampspærre i midten, derefter 300 mm mineraluld imellem de såkaldte masonite-stolper (i Danmark også i en periode betegnet Rockwool-stolper), afsluttet opadtil med bølgeeternit. Den anvendte mineraluld er klasse 36. Taget har en beregnet U-værdi på 0,09 W/m²K.
- Gulvet i huset er under en 100 mm "flydende" betonplade isoleret med 200 mm polystyrenplader (i 2 lag) over 200 mm leca-nødder, hvilket giver en beregnet U-værdi på 0,12 W/m²K. Der er sikret en effektiv kuldebroafbrydelse mellem gulvets betonplade og fundamentet med en indskudt 75 mm polystyrenplade, placeret på indersiden af fundamentets leca-blokke, [15].
- Den færdige konstruktion er ekstremt lufttæt, og huset har et naturligt luftskifte på blot 0,03 gange i timen ved almindelige tryk- og temperaturforhold. For at sikre en tilstrækkelig god luftkvalitet indendøre med god energiøkonomi er huset forsynet med et mekanisk ventilationsanlæg, som giver et luftskifte på 0,5 gange i timen. Ventilationsanlægget er forsynet med en modstrøms varmeveksler, som i praksis har en effektivitet på ca. 60% (figur 4.3). Med disse foranstaltninger har huset et varmetab til ventilation på ca. 20 W/K.

Huset har et beregnet totalt varmetab på 95 W/K (0,77 W/K pr. m² gulvareal) med åbne skodder og 82 W/K (0,66 W/K pr. m² gulvareal) med lukkede skodder; begge tal er inklusive tab til ventilation og infiltration.



Figur 4.1 Grundplan og lodret snit gennem hus G. Vægge, gulv og tag har praktisk taget ingen kuldebroer.

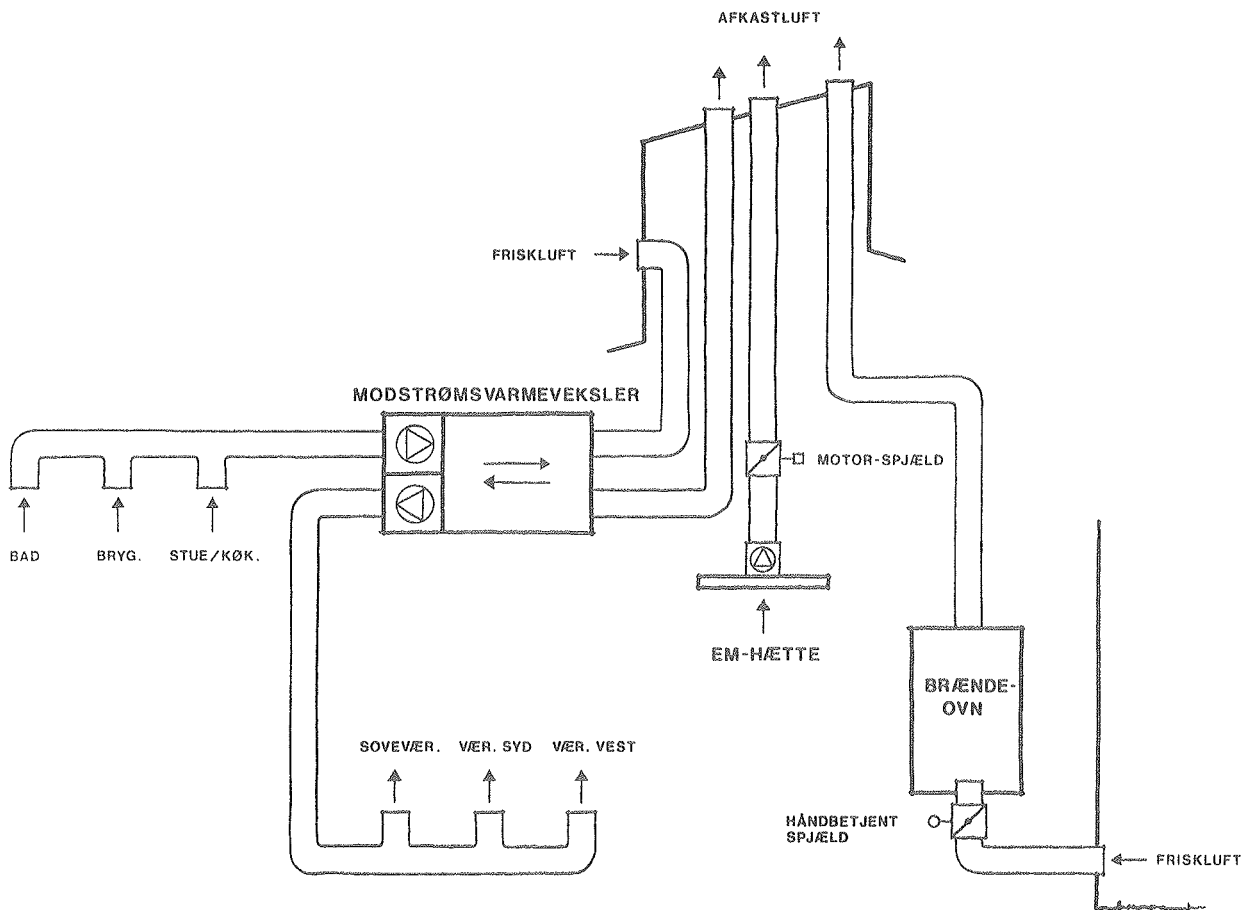


Figur 4.2 Hus G, set fra syd med åbne skodder for vinduer og terrassedør. Udhænget over vinduerne sikrer imod uønsket solindfald om sommeren, men er samtidig designet således, at det ikke afskærer solstrålingen om vinteren, hvor solen står lavt på himlen.

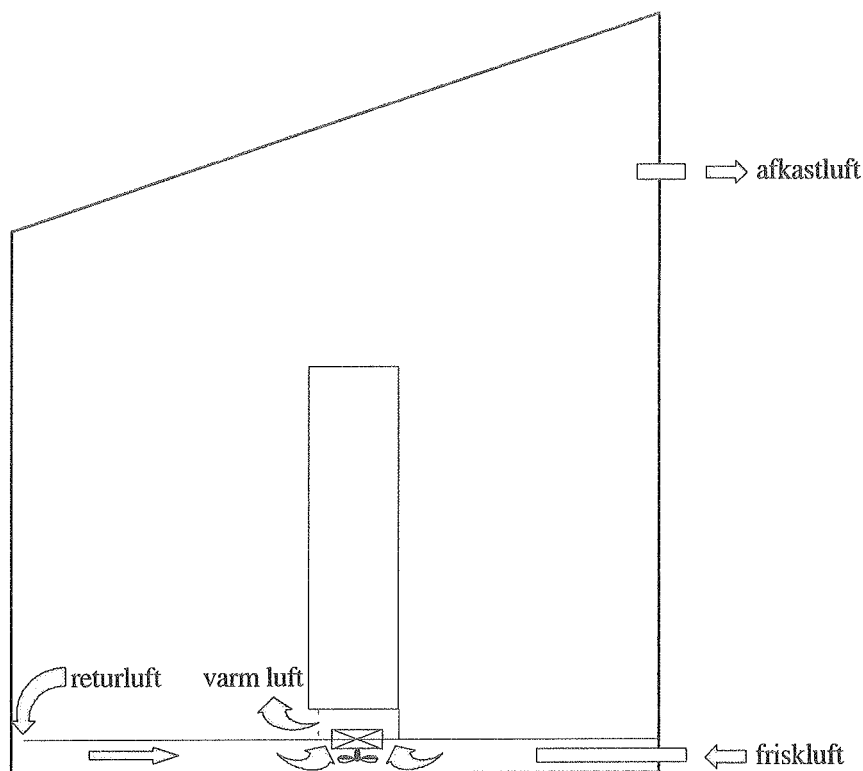
Opvarmningen af huset sker normalt med et "hybrid-varmeanlæg", hvor det varmebærende medium er vand, som bliver varmevekslet med luft i små decentrale varmevekslere (konvektorer forsynet med blæsere) under nogle af de indbyggede skabe i huset.

Luften, der trækkes ind i konvektorerne, suges fra mellemrummet mellem det opklodsede trægulv og det udstøbte betondæk og er i soveværelserne en blanding af returluft og friskluft, i stuen ren returluft. Inden friskluften når varmevekslerne har den således passeret hen over betondækket, der fungerer som en buffer for varmen fra returluften. Den varme luft fra konvektorerne blæses ind i huset via soklerne i de indbyggede skabe og tages retur bag fodpanelerne langs husets ydervægge, hvorved det sikres, at ydervæggene ikke bliver kolde, og især at der ikke bliver kold træk langs gulvet (figur 4.4).

Under normal drift forsynes konvektorerne ventilatorer kun med 55 V og har således både et lavt el-forbrug og meget støjsvag kørsel. Hvis der er behov for forceret opvarmning, kan ventilatorerne med en kontakt på termostaten kobles om til 230 V og give konvektorerne en betydelig større varmeafgivelse end under normal drift. Der er endvidere mulighed for centralt at hæve systemets fremløbstemperatur betydeligt over de 45-50°C, som er det normale.



Figur 4.3 Principdiagram over ventilationssystemet i lavenergihuset, normalt med balanceret ventilation gennem en modstrømsvarmeveksler, suppleret med en uden for driftsperioderne afspærret separat udsugning gennem emhætte. Huset er forsynet med en brændeovn med separat (og normalt afspærret) friskluftforsyning.



Figur 4.4 Skematisk illustration af virkemåden af varme- og ventilationsanlægget i lavenergihus G. Den friske luft blæses via en vand-til-luft varmeveksler ind gennem soklerne i de indbyggede skabe. Returluften passerer bag fodpanelerne langs husets ydervægge ind under trægulvet og blandes med friskluften, som blæses hen over betondækket, der virker som varmeveksler/buffer.

4.3 Afkølings- og opvarmningsforsøg

Forsøgene med opvarmning og afkøling blev gennemført i en periode i vinteren 1985-86, hvor udetemperaturen lå en anelse over det normale, hvilket for øvrigt var tilfældet for hele den pågældende vinter.

4.3.1 Forsøgsbeskrivelse

Der blev under projektet gennemført opvarmnings- og afkølingsforsøg i 4 rum i det senest opførte lavenergihus (hus G) i Hjortekær. Under forsøgene blev temperaturerne i de enkelte rum, samt i enkelte perioder tillige temperaturlagdelingen, registreret på 2-kanals Kipp & Zonen linieskrivere. Forsøgene blev gennemført dels som opvarmnings- og dels som afkølingsforsøg; i begge tilfælde gennemførtes forsøgsserier med husets skodder i såvel åben som lukket position.

Husets almindelige varmeanlæg var koblet fra under forsøgene, og opvarmningen blev alene klaret med et antal 300-1200 W elektriske varmepaneller, som i disse perioder var placeret i rummene. Elforbruget til opvarmning i de enkelte rum blev registreret på lokale el-målere hørende til forsøgsopstillingen, en for hvert rum (figur 4.5). Ved at sætte flere eller færre el-varmeovne op og skifte mellem forskellige ovnstørrelser fra forsøg til forsøg kunne LfV opnå den ønskede installerede effekt i forhold til rummets dimensionerende (stationære) varmetab.



Figur 4.5 Forsøgsopstilling med lokalt opstillede el-varmepaneller til genopvarmningsforsøg. El-forbruget registreres lokalt på en til opstillingen hørende kWh-måler.

I de perioder, hvor forsøgene blev gennemført, blev udeklimaet registreret på en datalogger, fast installeret som en del af husets målesystem. De registrerede udeklimaparametre blev behandlet og separeret, således at det blev muligt at konvertere dem til en af *tsbi version 2.1i*, [16], læsbar vejrdato-fil, der kunne benyttes til simulering af husets temperaturvariationer med reelle klimapåvirkninger. For at skaffe oplysninger nok til *tsbi 2.1* var det nødvendigt at gøre visse antagelser, idet programmet kræver oplysninger om skydækket. Skydækket blev ikke registreret på vejrdato-måleudstyret i Hjortekær, hvorfor det måtte antages, at skydækket (på en skala fra 0=skyfrit, til 8=fuldt overskyet) i dagtimerne kunne bestemmes ud fra den globale solstråling på vandret, i henhold til betingelserne i tabel 4.1.

I_GLOB >	I_GLOB ≤	Skydækkfaktor
0	125	8
125	200	7
200	275	6
275	350	5
350	425	4
425	500	3
500	600	2
600	700	1
700	∞	0

I_GLOB er globalstrålingen på vandret i W/m²

Tabel 4.1 Den benyttede sammenhæng mellem globalstrålingen på vandret i W/m² og skydækket, på en skala fra 0 (skyfrit) til 8 (helt overskyet), efter at solen havde været på himlen i 2 timer. Skydækket om natten angives som middelværdien mellem aftenværdien og morgenværdien.

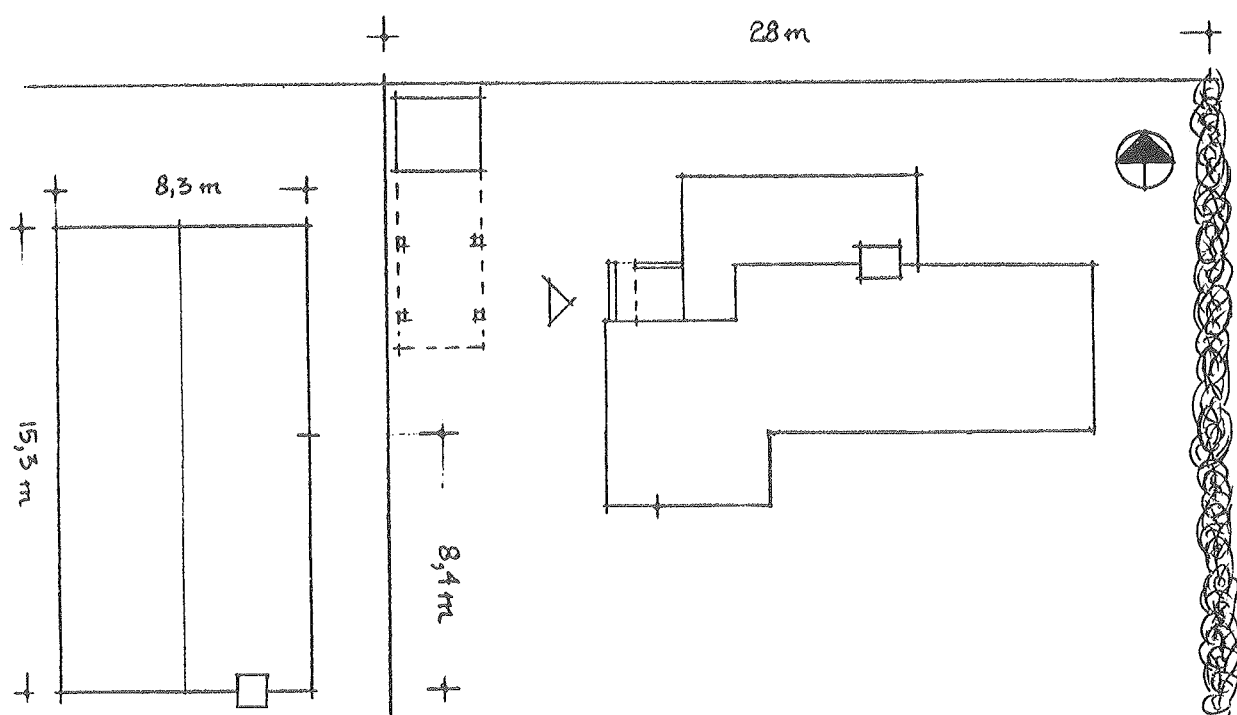
For at sikre en tilstrækkelig stor afkøling af huset i forbindelse med opvarmningsforsøgene blev varmen først tilsluttet efter flere døgn uden varmetilførsel fra radiatorer eller person-/beboelsessimulering. En afkøling af denne størrelse er ikke, hvad der må forventes under normale driftbetingelser, fx som følge af automatisk natsænkning for varme anlægget, men blev valgt for at give huset mulighed for at afkøles mere end de højst 1-2 K, som vil være resultatet af, at varme anlægget kun er slukket en enkelt nat.

Det viste sig i løbet af forsøgsrækken, at det ikke var tilstrækkeligt at slukke for varme anlægget, hvis man ville opnå et større temperaturfald i huset. Den opsamlede varme fra solstråling og den højere udetemperatur i dagtimerne var selv på overskyede dage tilstrækkelig til at forhindre en større afkøling i løbet af den efterfølgende nat. Et temperaturfald af den ønskede størrelse kunne kun opnås ved forøget ventilation (i form af naturlig ventilation: ved at lade et af de højtsiddende vinduer i stue/køkken stå åbent) og ved samtidig at lade vinduesskodderne være trukket til (men ikke lukket lufttæt til) om dagen, for på denne måde at udelukke solindfald, uden at forøge isoleringsevnen af vinduerne væsentligt.

4.3.2 Udvalgelse af brugbare forsøgsresultater

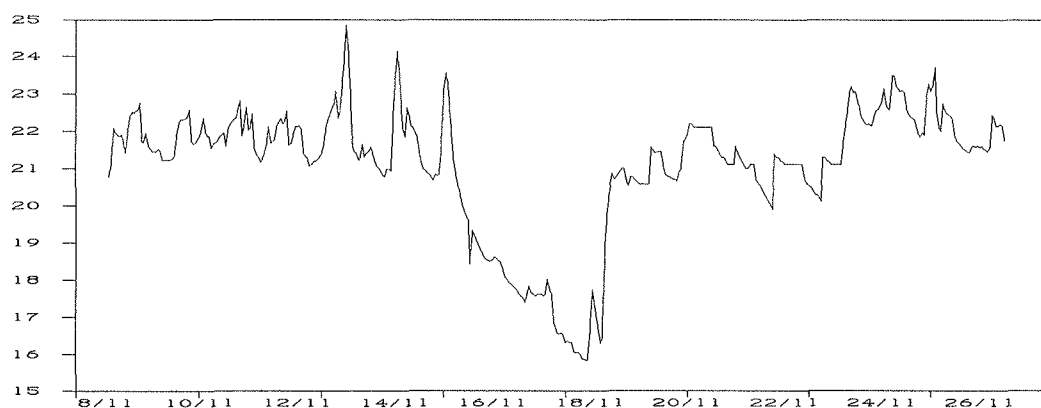
Resultaterne fra de gennemførte afkølings- og opvarmningsforsøg stammer primært fra husets mindre værelser. Forsøgene med afkøling/opvarmning i husets stue/køkken viste sig at være ubrugelige, fordi udsvingene i temperaturer ikke var tydelige nok (0,5 K eller mindre) til at kunne bruges til sammenligning med simuleringer. I flere tilfælde viste afkølingen (og dermed også genopvarmningen) i husets mindre rum sig også at være for lille til at kunne anvendes med den ønskede sikkerhed, hvorfor antallet af velegnede perioder (forsøgsserier) er ret begrænset. Årsagen til de små temperaturfald er husets høje isolerings- og tætningsstandard, de relativt høje udetemperaturer samt et, i forhold til husets varmetab, stort solindfald i dagtimerne.

Det var heldigvis ikke alle målinger, som efter nærmere analyse måtte forkastes; specielt måleresultater fra soveværelset (det østligste værelse, med vinduer mod øst og syd) og vestværelset ("kammeret" på figur 4.1), hvis vinduer udelukkende vender mod vest, viste sig at være velegnede til at analysere afkølings- og opvarmningsforløb, og det er forsøgsresultater fra disse rum, som er medtaget i denne rapport.



Figur 4.6 Plantegning af hus G og dets nærmeste omgivelser.

Grunden til, at soveværelset - på trods af det relativt store sydvendte vindue - sammen med vestværelset viste sig at være det mest egnede rum for sammenligning af målinger og simuleringer, er, at gratisvarmetilskuddet til rummet i form af solvarme ikke er så stort her som i de øvrige rum. Soveværelsets vinduer ligger til langt ud på formiddagen i skygge fra et levende hegn langs skellet mod øst, beliggende blot nogle få meter fra husets østgavl (den 7. maj kommer der fx først sol på syd-vinduet i soveværelset kl 10³⁰). Tilsvarende vender det lille østvendte vindue i soveværelset direkte ud mod det levende hegn, hvorfor der praktisk taget ikke kommer direkte sol gennem dette vindue. For vestværelset gælder, at det lige som soveværelset ikke får et ret stort solbidrag - og under alle omstændigheder først om eftermiddagen. Den lave eftermiddagssol bliver tillige afskåret af nabohuset, et 1½-plans-hus (hus med høj rejsning) beliggende 10 meter fra lavenergihus G's vestgavl (figur 4.6).



Figur 4.7 Eksempel på plot af registrerede temperaturer inde i huset, for udvælgelse af perioder til simulering af husets opvarmnings- og afkølingsforløb.

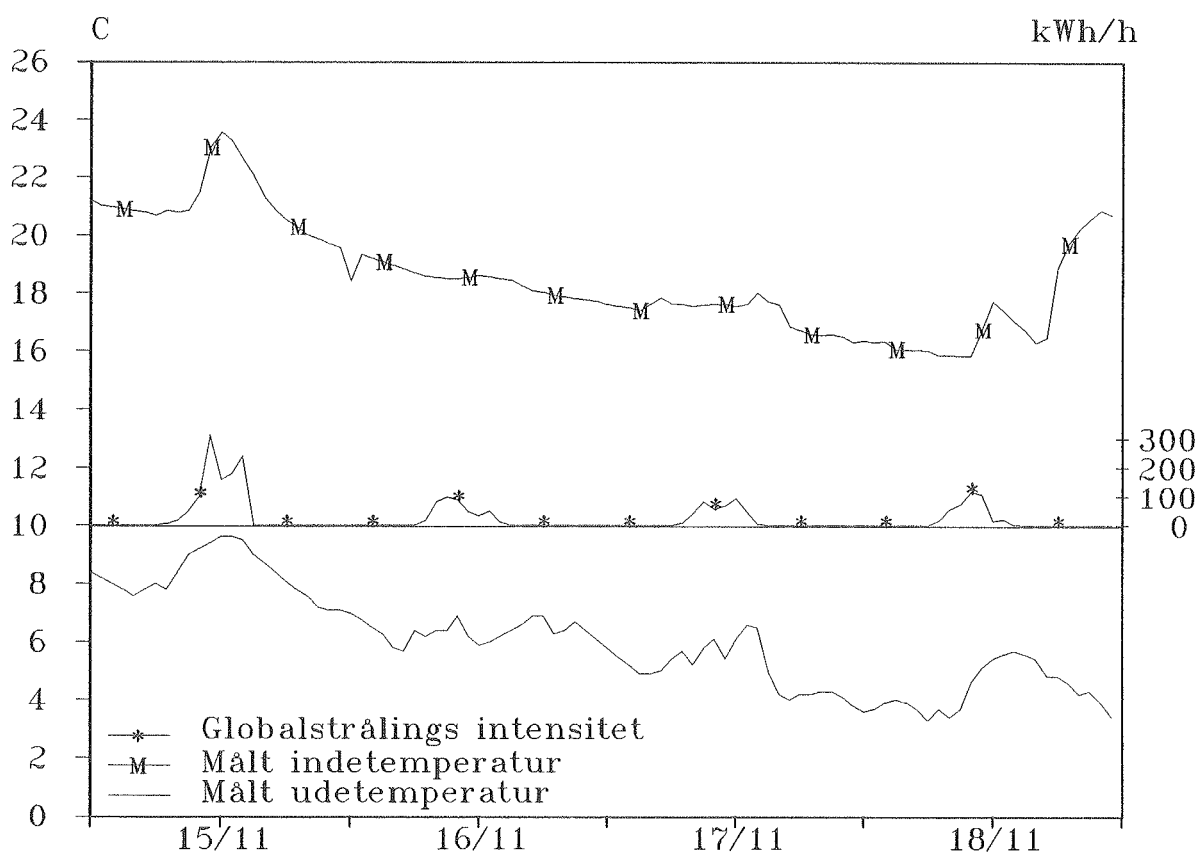
Temperaturforløbene er efter forsøgene blevet aflæst fra skriverstrimlerne for hvert 10. minut, svarende til den 10-minutters registrering, som blev foretaget på husets dataloggere, og plottet i et XY-diagram for på denne måde at kunne udvælge perioder, som ville være af særlig interesse at simulere med en edb-model (figur 4.7). De perioder, som var af interesse for vurdering af opvarmning/afkøling, blev derefter simuleret med tsbi 2.1, og resultaterne af disse simuleringer indført i de samme diagrammer som de registrerede temperaturer.

4.3.3 Forsøgsresultater

Det har under projektet vist sig, at faldet i rumtemperatur i løbet af en nat, når skodderne er lukket for vinduerne, er så lille, at der ikke er behov for ekstra effekt for at opnå en acceptabel opvarmningstid om morgenen. Dog skal det nævnes, at opvarmningstiden med lukkede skodder ikke afviger væsentligt fra opvarmningstiden med åbne skodder, når huset har fået

lov til at afkøles ned til samme niveau, fx efter en vinterferie. Årsagen hertil er, at tilstedeværelsen af skodder ikke forandrer rummets varmeakkumuleringssevne, men kun det i forvejen lille varmetab. Man kan på denne måde ikke benytte opsætning af udvendige skodder som et argument for en mindre installeret varmeeffekt, hvis man stiller krav til genopvarmningstiden, idet husets termiske masse ikke er afhængig af tilstedeværelsen af skodder. Tilsvarende er temperaturfaldet i et lavenergihus i løbet af en nat ikke så stort, at det vil volde nogen væsentlige problemer at genopvarme boligen om morgenen. Temperaturfaldet i løbet af en kold nat vil typisk ligge på 1-2 K, eller mindre.

I de afkølingsperioder, hvor skodderne for vinduerne har været åbne, viser temperaturkurverne udtegnet på linieskriverne logaritmisk faldende kurver, kun forstyrret af pukler forårsaget af solindfald i dagtimerne (figur 4.8).



Figur 4.8 Afkølingsperiode med åbne skodder; afvigelserne fra den perfekte logaritmiske kurve skyldes solindfaldet i dagtimerne og deraf følgende lokalt stigende ude-temperaturer.

4.4 Termiske simuleringer

4.4.1 Baggrund for de termiske simuleringer

Simuleringerne af opvarmnings- og afkølingsperioderne blev foretaget med det PC-baserede simuleringsprogram tsbi 2.1, med målte vejrdata for de aktuelle perioder som inddata. Programmet benytter tidsskridt på 1 time.

Konstruktionernes isoleringsevne samt rummets ventilations- og infiltrationstab er beregnet i henhold til DS 418, [5].

4.4.2 Skygger på grund af husets specielle geometri

På grund af hus G's specielle grundplan var det nødvendigt at lave en række korrektioner i inddata, for med tsbi 2.1 at kunne simulere hele huset på én gang (varierende skyggeforhold for de ellers ens vinduer). Vinduerne og terrassedøren i stuen er blevet forsynet med en ekstra individuel imaginær skyggegivende kant langs siderne af vinduerne/døren, samtidig med at vinduerne/døren er blevet drejet individuelt, for at opnå det rette solindfald gennem de enkelte vinduer/døre (tabel 4.2). Resultatet af simuleringer med disse modificerede inddata er blevet sammenlignet med resultater fra et avanceret skyggeberegningsprogram, som er udviklet ved LfV, [17].

	drejning (grader)	imaginær skygge giver (centimeter)
vestlige vindue	-19°	48
vindue ved dør	-5°	28

Tabel 4.2 Tabel over imaginære drejninger (syd = 0°, øst = -90°) og skyggegivere langs siderne af vinduerne i hus G, indsat som inddata til tsbi 2.1 for at sikre en korrekt beregning af solindfaldet i det berørte rum.

Med de ovenfor nævnte modifikationer af inddata i forhold til de virkelige forhold beregner tsbi 2.1 stort set det rigtige solindfald - sammenlignet med LfV's skyggeberegningsprogram - for samtlige husets vinduer og døre.

4.4.3 Termisk masse af et rum/hus

For at tsbi 2.1 skal kunne beregne de transiente opvarmnings- og afkølingsforløb, må den del af husets/rummets termiske masse, der tager aktivt del i varmelagringen, (TC) beregnes, [16]. Tykkelsen af de varmeakkumulerende lag må for lette konstruktioner ikke overstige 5 centimeter og for tunge konstruktioner ikke 10 centimeter. Ud over denne generelle regel for

estimering af aktiv lagtykkelse skal den termiske masse ikke regnes tykkere end til det første isolerende lag regnet fra væggen inderside. Den samlede termiske masse kan beskrives ud fra formelen:

$$TC = \sum A_i e_i \rho_i c_i \quad (4.1)$$

hvor A er det eksponerede areal af de varmeakkumulerende konstruktioner, [m²]

e er tykkelsen af det varmeakkumulerende lag, [m]

ρ er massefylde af det varmeakkumulerende materiale, [kg/m³]

c er varmekapaciteten af det varmeakkumulerende materiale, [MJ/kg K]

For eksempel er summen af TC produkterne for soveværelset i hus G beregnet til 3,4 MJ/K (0,945 kWh/K), inklusive bidrag fra indbyggede skabe, parketgulv, halvdelen af de indvendige skillevægge samt betonpladen under gulvet (rummet var umøbleret under forsøgene).

4.4.4 Simulering af afkølings- og opvarmningsforsøg

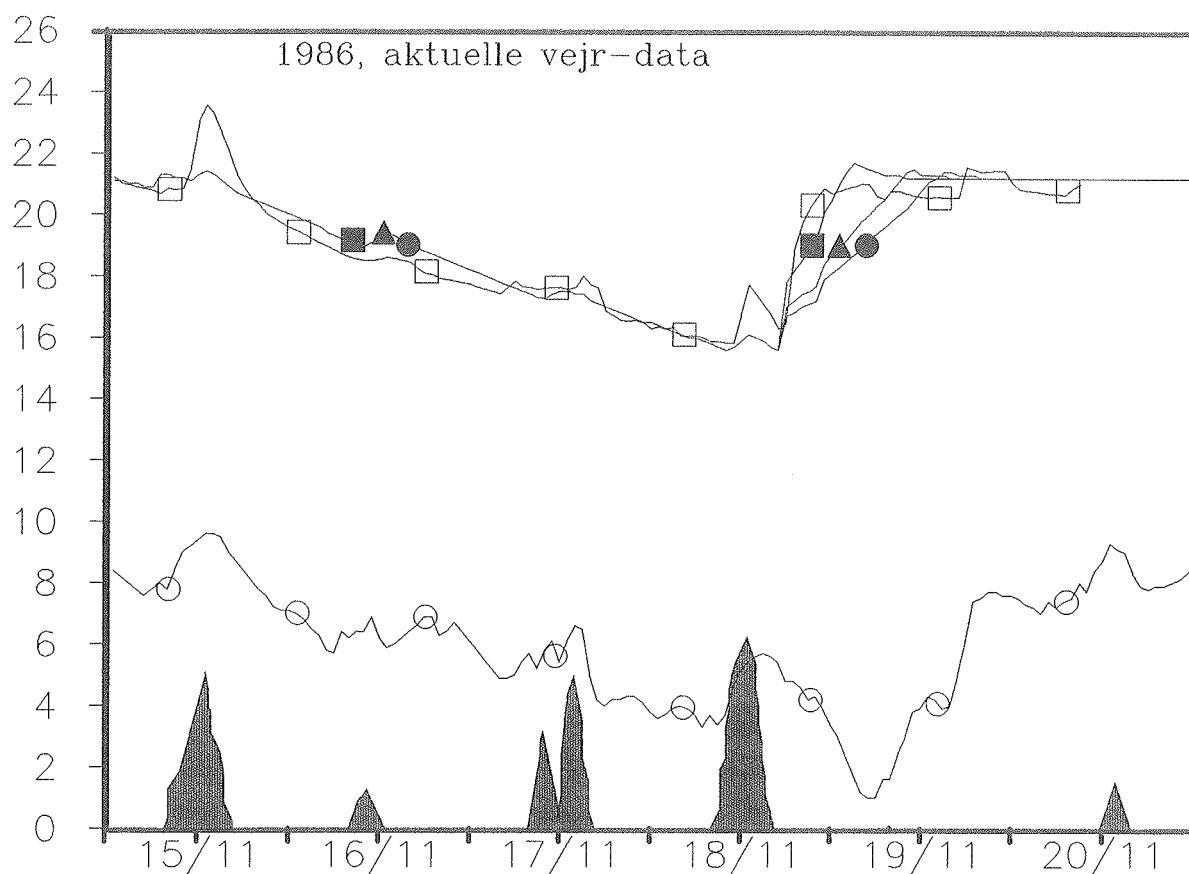
En serie af førstegangs-simuleringer blev gennemført for at konstatere, om de valgte husdata gav rimelige resultater, i forhold til de registrerede temperaturer. Disse første simuleringer viste tydelige afvigelser fra de registrerede værdier, hvorfor visse ændringer af husets materialedata - inden for usikkerheden på data - var nødvendige. Efter disse justeringer viste simuleringer og måleresultater i det store og hele god overensstemmelse.

Stigninger i de registrerede indetemperaturer er tydeligt korrelerede med en stigning i solindfaldet. Når den samme kraftige stigning ikke kan registreres i simuleringer med *tsbi version 2.1i*, skyldes det formodentlig en træghed i beregningsrutinerne (med tidsskridt på 1 time) over for hurtigt fluktuerende energitilførsler, herunder solindfald, eller at den anvendte tilnærmelse for beregning af solindfaldet ved nogle indfaldsvinkler giver forkerte timeværdier. Når varmeanlægget igen tilsluttes på et solfattigt tidspunkt efter en afkølingsperiode, svarer den simulerede forsinkelse i temperaturstigningen til den målte forsinkelse, hvilket bekræfter denne formodning.

Det må understreges, at beregningernes tidsskridt på 1 time i denne sammenhæng er stort, og egentlig også for stort, men der var ikke mulighed for at arbejde med kortere tidsskridt i *tsbi 2.1*.

De til programmet indlæste data for rummets/husets varmeakkumuleringssevne er forsøgsvis ændret inden for nogle rammer, som er acceptable ud fra usikkerheden på materialeværdierne, således at det simulerede temperaturforløb blev i så god overensstemmelse som muligt med det registrerede temperaturforløb, ved den samme indfyrede effekt. Disse justeringer udgjorde kalibreringen af simuleringens husmodel, og efter at den var foretaget,

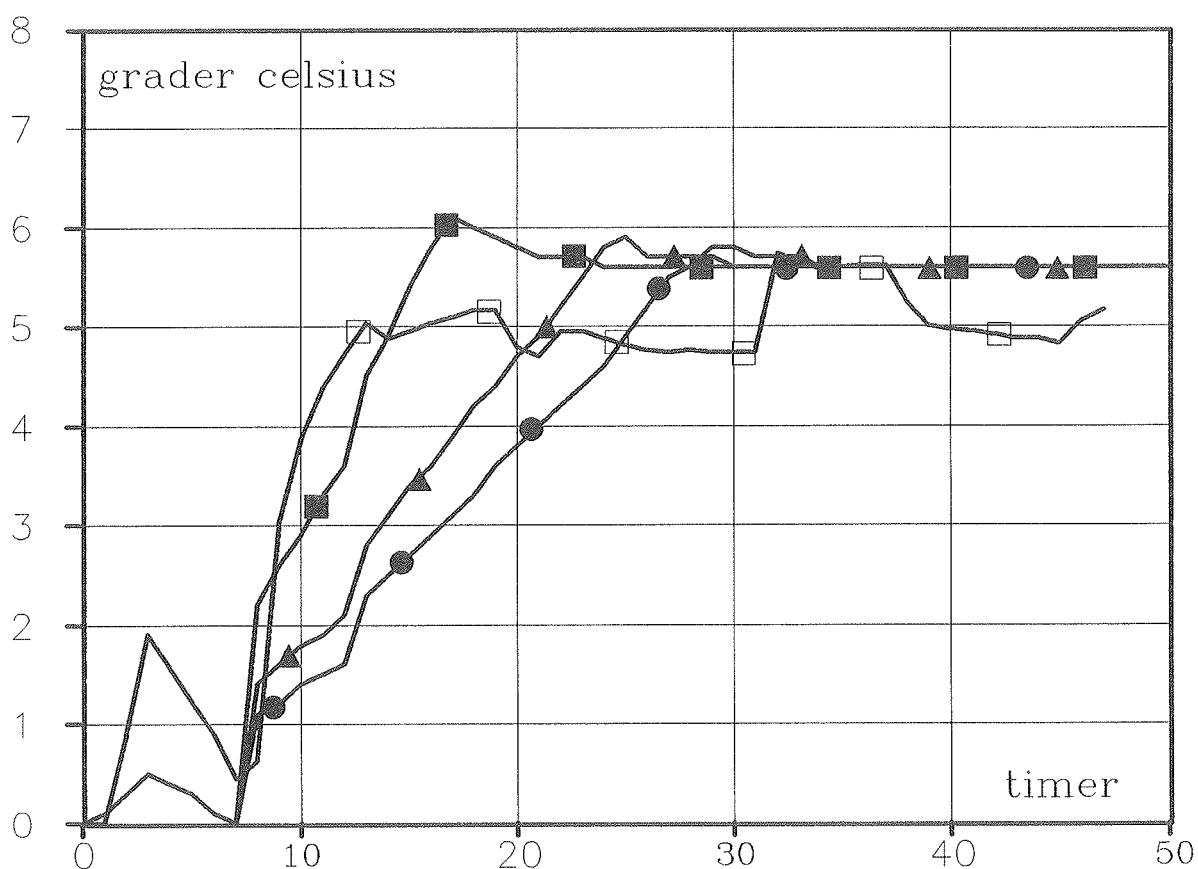
ændredes kun den indfyrede effekt fra simulering til simulering. Når de ved disse simuleringer fremkomne opvarmnings-/afkølingsprofiler sammenlignes med de registrerede profiler, ses, at der kun i den sidste del af opvarmningsfasen er en markant forskel mellem målte og simulerede temperaturer (figur 4.9). Den største forskel ses i den forsinkelse, der opstår fra opvarmningen er startet, til rummet når den ønskede temperatur.



Figur 4.9 Afkølings- og opvarmningsanalyser for soveværelset i hus G. Sammenligning mellem beregnede og registrerede temperaturer i °C for forskellige størrelser af indfyret effekt (1-2 gange det dimensionerende varmetab: (●) 400 W; (▲) 500 W; (■) 800 W, og (□) de målte temperaturer med en installeret effekt 800 W svarende til 2 gange det dimensionerende varmetab, men i gennemsnit 4 gange varmetabet igennem perioden). Det mørkt skraverede areal angiver solindfaldet og (○) udetemperaturen i °C.)

Er der tale om en væsentlig reduktion (50%) af den indfyrede effekt i forhold til den oprindelige (2 gange det dimensionerende varmetab), vil opvarmningstiden blive forlænget med op til 130%, dvs. langt ud over den tid man normalt vil acceptere som en genopvarmningsperiode.

Ved maksimalt installeret effekt (800 W) er genopvarmningstiden for et temperaturfald på 4 K ca. 4 timer, hvilket må betragtes som på kanten af det acceptable - det skal understreges, at 4 K i dette hus er et meget stort temperaturfald, som selvsagt ikke vil forekomme i løbet af én nat, selv med varmeanlægget afbrudt. En reduktion af den installerede effekt vil naturligvis forlænge genopvarmningstiden; i dette tilfælde bevirker en reduktion fra 800 W til 400 W, at genopvarmningstiden stiger fra 4 timer til ca. 14 timer (figur 4.10). De 400 W svarer til det dimensionerende varmetab, og det er i gennemsnit dobbelt så stort som varmetabet i den betragtede periode. En genopvarmningstid af denne længde er alt for lang og slet ikke acceptabel set ud fra et komfortmæssigt hensyn. Det vil sige, at en installeret effekt lig med det stationære dimensionerende varmetab slet ikke er tilstrækkelig til at sikre en hurtig genopvarmning af rummene i en højisoleret bygning.



Figur 4.10 Opvarmning af soveværelset i hus G, startende klokken 7, simuleret indfyret effekt: (•) 400 W, (▲) 500 W, (■) 800 W, (som figur 4.9), (□) angiver de målte temperaturer med 800 W indfyret effekt.

Ud over simuleringer af opvarmnings- og afkølingsforsøg svarende til forsøgsbetingelserne, er der gennemført simuleringer med mere beboerrealistiske betingelser. Når der her tales om realistiske betingelser, er der tale om afkølingsperioder af ikke mere end én nats længde, fra

varmeanlægget kobles fra klokken 21, til det tilkobles om morgenen klokken 6, dog med den forudsætning, at varmeanlægget vil blive tilsluttet, hvis temperaturen falder til under 17°C i rummene (hvilket den slet ikke kan i dette hus, med mindre beboerne åbner et eller flere vinduer). Med disse betingelser viser simuleringer med tsbi 2.1, at temperaturen ikke falder til under 19°C , ved udetemperaturer i løbet af natten på $0-4^{\circ}\text{C}$. En temperaturstigning af denne størrelse (1-2 K) volder det ikke det installerede varmeanlæg nogen problemer at klare i løbet af en kort genopvarmningsperiode om morgenen; typiske genopvarmningstider med denne effekt installeret er ved forskellige simuleringer fundet til ca. 1 time.

Simuleringer med de samme realistiske betingelser og blot mindre installeret effekt giver naturligvis længere genopvarmningstider, afhængig af den til rådighed værende effekt (overskudseffekten, dvs. den totale installerede effekt minus det aktuelle effektbehov til dækning af det stationære varmetab). Resultaterne viser, at genopvarmningstiden i en højisoleret bolig er mere afhængig af rummets varmekapacitet end af husets nøjagtige isoleringsgrad og af forskellen mellem inde- og udetemperatur. Derudover spiller den hastighed, hvormed den varmeakkumulerende masse kan/skal opvarmes, en stor rolle for genopvarmningstiden - hvis den termiske masse holdes konstant, men fordeles over et større overfladeareal, forlænges genopvarmningsperioden.

Når der er tale om lavenergihuse, vil forholdet mellem termisk masse (TC) for et rum og den installerede effekt (P) være af større betydning for genopvarmningstiden end det dimensionerende varmetab, [4]. Under typiske vinterbetingelser med en udetemperatur på $0-5^{\circ}\text{C}$, vil soveværelset i lavenergihus G fx have et varmetab på 200-250 W, hvilket skal sammenlignes med de ca. 800 W, der kræves for at hæve den operative temperatur med 4 K i løbet af 4 timer. Der kræves således ca. 950 W for at hæve temperaturen af den aktive varmeakkumulerende masse med 4 K i løbet af 4 timer. Da det dimensionerende varmetab for et lavenergi-rum på denne måde ikke synes at have en afgørende indflydelse på genopvarmningstiden (så længe rummet er højisoleret), kan TC/P forholdet anvendes til at give et fingerpeg om den hastighed, hvormed rummet/huset kan opvarmes 1 K, og dermed om den nødvendige installerede effekt.

Af simuleringresultaterne ses forholdet TC/P at ligge meget tæt på den simulerede opvarmningstid i soveværelset i hus G. Årsagen hertil er, at varmetabet ved transmission og ventilation i et lavenergihus er forsvindende i forhold til den mængde varme, der skal til for at opvarme den varmeakkumulerende masse i rummet, hvorfor varmetabets størrelse ikke får nogen mærkbar indflydelse på opvarmningstiden.

4.5 Kortere opvarmningstid med samme installerede effekt

I løbet af projektet blev det besluttet at undersøge mulighederne for at nedbringe genopvarmningstiden uden samtidig at skulle forøge den installerede effekt i boligen/rummet. Hvis opvarmningen af den varmeakkumulerende masse i boligen kan forsinkes, vil det på denne måde blive muligt at opnå en hurtig opvarmning af rummet, som så vil klinge af i takt med, at der transporteres varme ind i den varmeakkumulerende masse. En sådan forsinkelse betyder, at rummets tidskonstant formindskes, [18], [19], [20].

Forsinkelsen af temperatursvingningen ind gennem vægkonstruktionen vil for eksempel kunne ske ved at placere et tyndt lag isolering på indersiden af væggen frem for uden for den tunge, bærende del af væggen. Ved på denne måde at flytte en del af isoleringen fra ydersiden af væggen til indersiden opretholdes væggens samlede U-værdi, samtidig med at tidskonstanten for rummet reduceres.

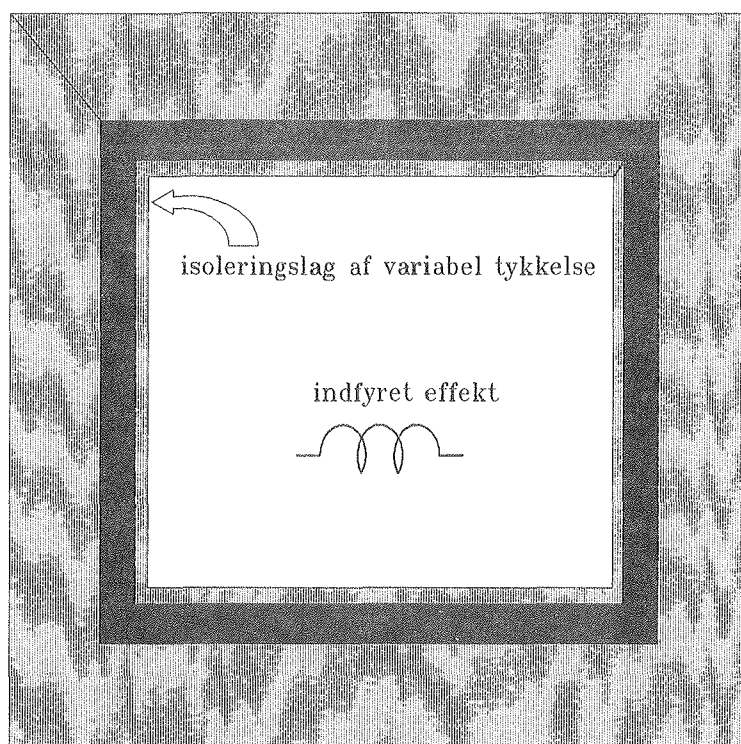
Det var på daværende tidspunkt ikke muligt at simulere dette fænomen ved hjælp af de eksisterende PC-baserede bygningssimuleringsprogrammer, men det kunne lade sig gøre at lave de ønskede simuleringer ved at redigere et på LfV udviklet specialdesignet program for beregninger af transiente temperaturfelter i bygningskonstruktioner. Det krævede dog en separat beregning af rummets varmeakkumuleringssevne.

Senere kom den nye udgave af tsbi, flerzoneprogrammet tsbi3, [21], og hermed blev det muligt direkte at simulere bygningskonstruktionerne, som de er opbygget (lag for lag), og derved bl.a. slippe for håndberegning af varmeakkumuleringssevnen.

4.5.1 Simuleringer for reduktion af tidskonstanten

Der blev opbygget en simpel rummodel i tsbi3, bestående af et i udeluften fritsvævende rum på 4 gange 4 gange 4 meter modelleret som én enkelt zone. Rummets ydervægge, loft og gulv bestod (regnet indefra) af 100 mm beton og 400 mm isolering. Varmeanlæggets installerede effekt på 650 W svarede til det dimensionerende varmetab udregnet efter DS 418, [5]. For ikke at ændre det dimensionerende varmetab blev den samlede isoleringstykkelse på 400 mm fastholdt, og der blev gennemført 4 simuleringer med hhv. 0, 10, 15 og 20 mm isolering flyttet ind på indersiden af den tunge væg i lavenergikonstruktionen.

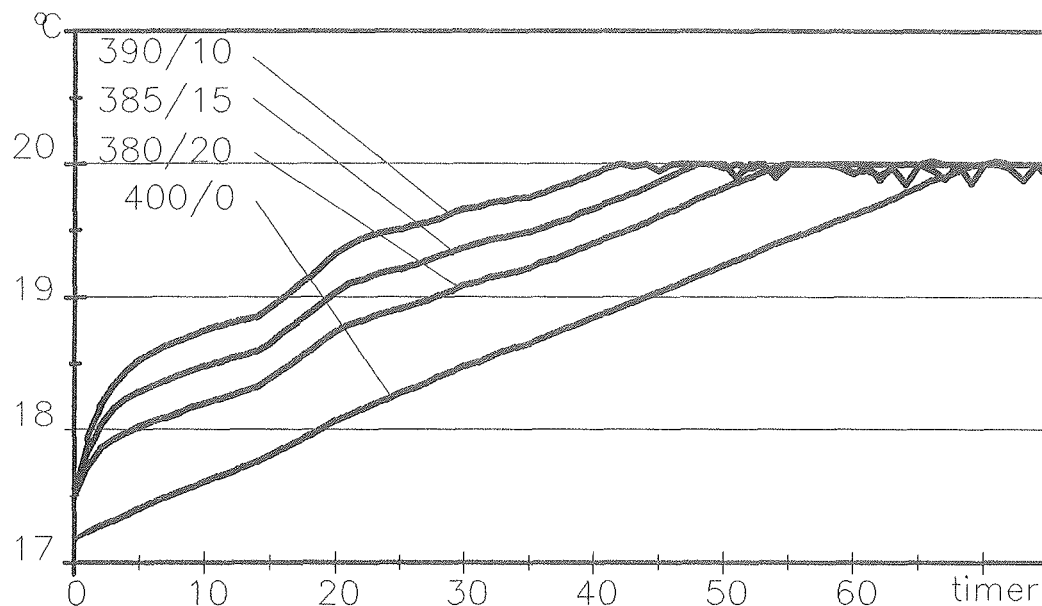
Rummet var i første omgang ikke forsynet med døre eller vinduer, for på denne måde at opnå den enklest mulige simuleringssituation. Varmetabet til ventilation/infiltration blev sat til nul. Inden genopvarmningen var rumluften og alle konstruktionerne kølet ned til 17°C. Udetemperaturen i den undersøgte 3-døgnperiode var i gennemsnit i de enkelte døgn 0,8°C, 1,6°C og 1,4°C og svingede mindre end 1 grad inden for det enkelte døgn - altså ganske typisk vintervejr.



Figur 4.11 Principskitse af den simple rumkonstruktion, brugt til simulering af reducerede opvarmningstider, som følge af en lille isoleringsmængde placeret på indersiden af den varmeakkumulerende bærende beton-vænge.

Simuleringerne med den simple konstruktion viste klart, at det var muligt at reducere opvarmningstiden betydeligt ved blot at flytte en ganske lille del af den isolering, som i første omgang var placeret udvendig på betonen, ind på den indvendige side. Det er ikke store isoleringstykkelser, som der er behov for at flytte; i første simulering blev 10 mm isoleringsmateriale flyttet fra den udvendige side af betonen til den indvendige, hvilket resulterede i en kraftig reduktion af opvarmningstiden, figur 4.12. Figuren viser også opvarmningskurverne (operativ temperatur) for flytning af 15 og 20 mm isolering.

For de tre simulerede tilfælde med et tyndt lag isoleringsmateriale på indersiden af væggen blev beregningerne gentaget, blot med en reduceret indfyret effekt i rummet. Reduktionen af den indfyrede effekt blev valgt afhængig af reduktionen i den simple tidskonstant i forhold til tilfældet uden isolering på den indvendige overflade. Reduktionerne i den indfyrede effekt i anden simuleringsrunde for 10, 15 og 20 mm isolering inderst udgjorde hhv. 12%, 18% og 20%, figur 4.13. Kurverne for temperaturforløbet under genopvarmning i de tre tilfælde er næsten sammenfaldende. Til sammenligning er der på figuren indtegnet forløbet for genopvarmning af rummet uden isolering på væggens inderside, med indfyret effekt svarende til det dimensionerende varmetab.



Figur 4.12 Opvarmningstider med uændret indfyret effekt svarende til det dimensionerende varmetab efter DS 418, og hhv. 10, 15 og 20 mm mineraluld flyttet fra ydersiden af betonen til indersiden. Kurverne viser den operative temperatur.

Tidskonstanten for et dynamisk system kan defineres som den tid, det efter en momentan ændring af driftsforholdene tager systemet at nå fra en vilkårlig udgangstilstand til en tilstand, hvor differensen mellem systemets øjeblikkelige tilstand og ligevægtstilstanden er e^{-1} af samme differens i udgangstilstanden, hvor e er grundtallet for den naturlige logaritme, eller mere populært udtrykt: den tid det tager systemet at gennemløbe 63% af ændringen fra udgangstillingen til ligevægtsstillingen (figur 4.14).

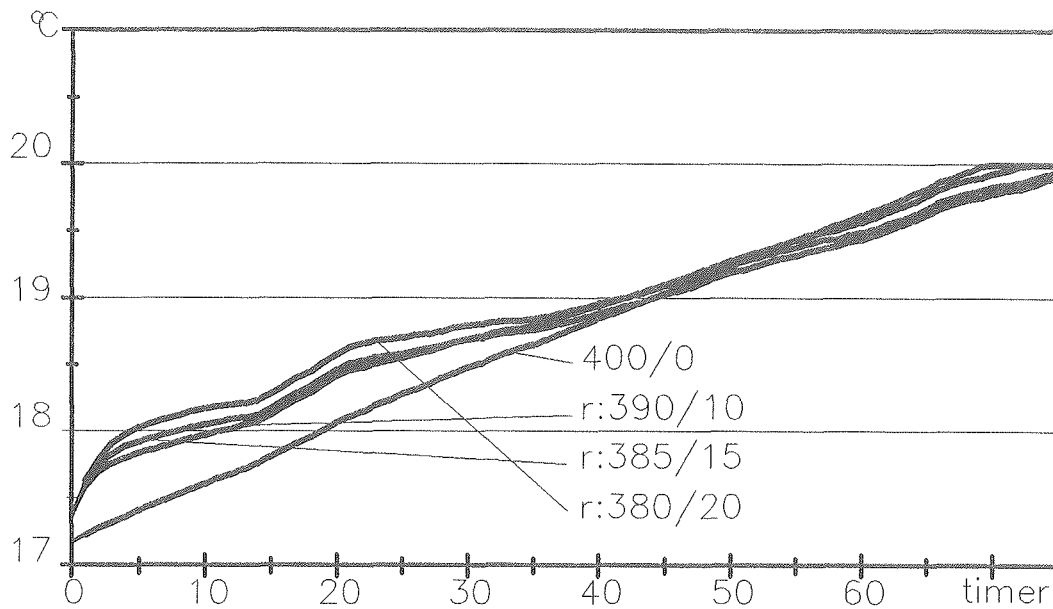
Tidskonstanten τ kan findes af udtrykket:

$$\ln \Delta t(s) = -\tau^{-1}s + \ln \Delta t(0) \quad (4.2)$$

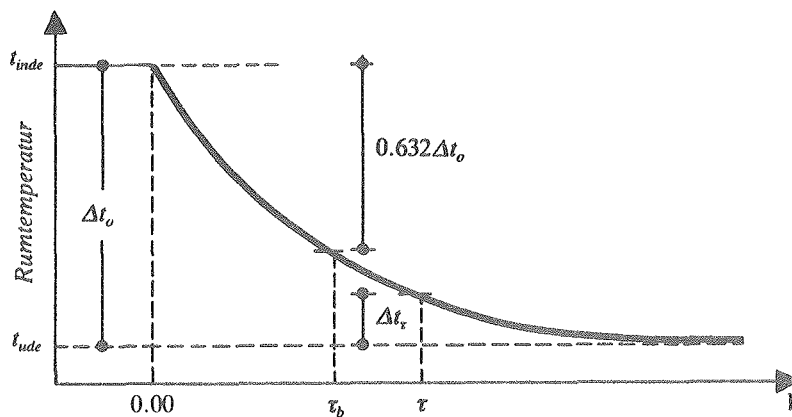
hvor $t(s)$ er rumtemperaturen til tiden s

$$\Delta t(s) = t(\infty)$$

Den beregnede tidskonstant for de fire tilfælde af isolering på indersiden af beton-vangen er et udtryk for effektiviteten af opvarmningen. Ved at reducere den indfyrede effekt i forhold til de beregnede tidskonstanter er det muligt at undersøge muligheden for en mindskelse af den installerede effekt i en lavenergibolig.



Figur 4.13 Opvarmningstider med reduceret indfyret effekt i forhold til den første simuleringsrunde (figur 4.12), med varierende isolering flyttet ind på den indvendige side af beton-vangen og indfyret effekt reduceret i samme forhold som reduktionen i rummets tidskonstant. Kurverne viser den operative temperatur.



Figur 4.14 Eksempel på temperaturforløb og tilhørende tidskonstant. Al varmetilførsel til bygningen afbrydes momentant til tiden 0.00, og dermed er ligevægtstilstanden udetemperaturen, og tidskonstanten bliver τ_b (fra [8]).

De lovende resultater tilskyndede til undersøgelser af opvarmningsforløbet i et mere realistisk rum. For at opnå dette blev der "installeret" et vindue i den ene væg i rummet. Det valgte vindue var forsynet med en trelags rude, som typisk ville være mindstekravet i et lavenergi-hus.

Simuleringerne med de varierende isoleringstykkelser på indersiden af væggen blev gentaget for rummet med vindue, for at undersøge, om tilstedeværelsen af et vindue har nogen betydning for muligheden for at reducere tidskonstanten og dermed genopvarmningstiden eller den installerede effekt for et rum/hus.

Indsættelsen af et vindue i rummodellen gav ingen mærkbare ændringer i mulighederne for at ændre rummets genopvarmningstid ved at reducere tilgængeligheden af den termiske masse som beskrevet ovenfor.

4.6 Hovedresultater og -konklusioner

Temperaturfaldet i en lavenergibolig uden isolerende skodder for vinduerne vil - i løbet af selv en meget kold nat - ikke blive større end 1-2 K. Er vinduerne yderligere forsynet med isolerende skodder, vil temperaturfaldet blive endnu mindre med deraf følgende mindre effektkrav til genopvarmning.

Den varmeafgivelse, som er nødvendig for at opvarme en lavenergibolig til en acceptabel tilstand af termisk komfort om morgenen efter en almindelig natsækning af temperaturen, er ikke af en sådan størrelse, at det foranlediger til specielle forholdsregler ved dimensionering af varmeanlægget.

Hvis der af en eller anden grund lejlighedsvis forventes større temperatursænkninger (over 2 K), bør dimensioneringen af varmeanlægget efter DS 418 suppleres med vurdering af en højeste tilladelige genopvarmningstid for en given temperaturændring.

Forholdet mellem den aktive akkumulerende masse (TC) og den installerede effekt (P) giver et godt bud på denne genopvarmningstid. Årsagen hertil er, at lavenergiboliger normalt ikke har en termisk masse, som adskiller sig væsentligt fra den termiske masse i dårligere isolerede boliger, og at det er varmekapaciteten af boligen, som er den dominerende faktor for opvarmningstiden, medens både isoleringsgrad og varmekapacitet har væsentlig indflydelse på afkølingshastigheden.

Simuleringer af temperaturforholdene i en enkel højisoleret betonkonstruktion viste klart, at det var muligt at reducere opvarmningstiden betydeligt ved blot at flytte en ganske lille del af den isolering, som i første omgang var placeret udvendig på betonen, ind på den indvendige side.

Det kan i høj grad diskuteres, hvor skrappe krav der skal stilles til genopvarmningstiden, men som en tommelfingerregel opstillet ud fra projektets analyser kan siges, at forholdet TC/P ikke bør overstige 1,2 timer pr. grad Kelvin.

Det største problem ved dimensioneringen af et varmeanlæg til en lavenergibolig vil normalt være at finde anlæg med effekter, som er små nok. Er det lykkedes at fremskaffe et varmeanlæg til en lavenergibolig, som har en ydelse, der er tilfredsstillende lille, kan det selvfølgelig blive et problem at opvarme boligen efter en længere afkølingsperiode, fx en sparebevidst families vinterferie. Afkøling over en periode af mange døgn vil sænke temperaturen af rummene og den varmeakkumulerende masse så væsentligt, at opvarmningsperioden derefter vil blive uacceptabelt lang (hvis beboerne skal opholde sig i rummene i denne periode), da effekten pr. "varmeakkumuleringssevne-enhed" ikke er tilstrækkelig stor til at sikre en hurtig opvarmning.

Om det er rimeligt at dimensionere varmeanlægget i en lavenergibolig efter så specielle brugssituationer som beboernes eventuelle vinterferieplaner er et andet spørgsmål. Det installerede varmeanlæg bør kunne sikre et godt komfortniveau under normal drift, inklusive eventuelle natsænkingsperioder, selv om der i absolutte tal ikke er særlig store besparelser at hente med denne styringsstrategi i en lavenergibolig.

Da en situation med afkøling af boligen til langt under det normale, i forhold til en almindelig temperatursænkning som følge af en afbrydelse af varmetilførslen om natten, typisk kun vil optræde 1-2 gange i løbet af en fyringssæson og næsten aldrig for hele boligen på én gang, kunne problemet let løses ved hjælp af en eller to billige elektriske varmeblæsere, som kan placeres individuelt efter behov. Selv ret store rum i en lavenergibolig, fx en opholdsstue, vil sjældent have et varmetab større end 2000 W, hvorfor en varmeblæser af denne størrelse vil have væsentlig indflydelse på genopvarmningstiden. På denne måde vil det være muligt, selv med en meget lille fast installeret effekt i et effektivt varmesystem, at sikre en hurtig genopvarmning af den eller de boligzoner, som for den enkelte familie er mest kritiske af hensyn til den termiske komfort.

5 GENERELLE KONKLUSIONER

De to delundersøgelser af tungt kontor- og skolebyggeri isoleret svarende til BR-82 niveau viser samstemmende, at der bør installeres 2-2,5 gange det efter DS 418 udregnede (stationære) dimensionerende varmetab, hvis der med fordel skal kunne anvendes temperatursænkning uden for brugsperioderne, uden at det skal gå ud over den termiske komfort i brugsperioden efter temperatursænkningen.

Rambøll & Hannemann har udviklet nogle overskuelige diagrammer, [1] og [2], der i hvert fald i BR-82 lignende byggeri kan benyttes til et hurtigt overslag over sammenhængen mellem installeret effekt og genopvarmningstid. Det understreges imidlertid, at grundlaget for diagrammerne er et begrænset antal målinger og beregninger, og at materialet derfor må betragtes som foreløbigt, til brug i mangel af bedre.

Resultaterne af projektet som helhed viser, at genopvarmningstiden i en højisoleret bolig er mere afhængig af rummets varmekapacitet end af de eksterne temperaturforhold og husets nøjagtige isoleringsgrad. Tillige spiller den hastighed, hvormed den varmeakkumulerende masse kan/skal opvarmes, en stor rolle for genopvarmningstiden - den samme termiske masse fordelt over et større overfladeareal giver længere genopvarmningsperiode. Selv en beskedent isolering af den varmeakkumulerende masses overflade har en kraftig (reducerende) indflydelse på opvarmningshastigheden af rummet.

Simuleringsresultaterne viser, at for lavenergihuse vil forholdet mellem termisk masse (TC) for et rum og den installerede effekt (P) være af større betydning for genopvarmningstiden end det dimensionerende varmetab, [4]. Årsagen hertil er, at varmetabet ved transmission og ventilation i et lavenergihus er forsvindende i forhold til den mængde varme, der skal til for at opvarme den varmeakkumulerende masse i rummet, hvorfor varmetabets størrelse ikke får nogen mærkbar indflydelse på opvarmningstiden. Derfor kan TC/P forholdet anvendes til at give et overslag over den hastighed, hvormed rummet/huset kan opvarmes 1 K. Som tommelfingerregel anbefales, at forholdet ikke overstiger 1,2 h/K.

Undersøgelserne har givet interessante resultater og udmærkede overslag over sammenhængen mellem dimensioneringen af varmeanlæg og den nødvendige genopvarmningstid ved diskontinueret opvarmning, men det må understreges, at problemstillingen er så kompleks, at opstilling af præcise dimensioneringskriterier kræver en mere dybtgående undersøgelse af forskellige typer varmeanlæg, med fuldskalet målinger i klimakamre under helt kontrollerede betingelser. En sådan undersøgelse bør bl.a. omfatte analyse af komfortkriterierne i forbindelse med genopvarmning, varmeovergangen mellem varmegiver, indeluft og overflader under genopvarmningen, indflydelsen af varmegivernes type, placering og dynamik og endelig reguleringssystemets (forsinkende) indflydelse.

For egentlige lavenergihuse kan man imidlertid sige, at problemet er beskedent. Dimensioneringen bør lægges an på at opnå det mest energiøkonomiske anlæg under normal drift, defineret som opretholdelse af konstante temperaturer, altså dimensionering efter stationære forhold ifølge DS 418. Hvis det kan gøres uden negativ virkning for driftseffektiviteten under normale forhold og uden væsentlige ekstraomkostninger (fx ved direkte el-varme), kan installation af 2 gange den stationært bestemte nødvendige effekt anbefales. Ekstra effekt til unormale driftssituationer kan købes for 200-300 kr. - en lille el-drevet varmluftblæser til dette beløb kan levere op til 2500 W, hvor beboerne har et behov, svarende til 2-5 gange det dimensionerende varmetab i et rum i et lavenergihus.

En helt anden sag er, at der ofte i et centralvarmeanlæg dimensioneret strengt efter DS 418 kan ligge en kapacitetsreserve, som kan udnyttes ved genopvarmning, fx i mulighed for i kortere perioder at forhøje fremløbstemperaturen over den normale driftstemperatur, at benytte den til rådighed værende effekt koncentreret i et eller to rum, eller i kombinerede anlæg ved tvangsstyring at udnytte opvarmningseffekt beregnet til varmt brugsvand til genopvarmningen af bygningen. Sidstnævnte løsning er velegnet i boliger, især i enfamiliehuse - i et lavenergihus kan brugsvandsopvarmningen sagtens være dimensioneret for større effekt end husopvarmningen efter DS 418.

6 LITTERATURLISTER

6.1 Referencer

- [1] Peer Therkelsen: Dimensionering af radiatorer under hensyn til genopvarmning efter natsænkning. Rambøll & Hannemann Rådgivende Ingeniører A/S. Århus, juni 1985.
- [2] Peer Therkelsen: En undersøgelse af sammenhæng mellem radiatoreffekt og genopvarmningstid. VVS-bladet nr. 11, 1985, pp. 15-17.
- [3] Jørgen Thorshauge: Indeklimaproblemer efter natsænkning. Crone & Koch Rådgivende Ingeniørfirma K/S. København, december 1985.
- [4] Kim B. Wittchen & Bjarne Saxhof: Dimensioning Heating Systems for Low-Energy Buildings, Considering the Influence of Fluctuating Temperatures. Proceedings of the 2nd Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, Trondheim Norway 20-22 August 1990 (Jan Vincent Thue, editor). Tapir Publishers. ISBN 82-519-0941-4, pp. 171-177, 1990.
- [5] DS 418. Dansk Standard, Dansk Ingeniørforenings regler for beregning af bygningers varmetab. 5. udgave. Normstyrelsens Publikationer NP-186-S. ISBN 87-571-0967-2. København, december 1986.
- [6] BR-82. Bygningsreglement 1982. Byggestyrelsen. Publikation nr. 54. ISBN 87-503-4205-3. København, december 1982.
- [7] BR-S 85. Bygningsreglement for småhuse. Byggestyrelsen. Publikation nr. 75. ISBN 87-503-5381-0. København, marts 1985.
- [8] DS 469. Dansk Standard, Dansk Ingeniørforenings norm for varmeanlæg med vand som varmbærende medium. 1. udgave. Normstyrelsens Publikationer NP-205-N. ISBN 87-571-1311-4. København, januar 1991.
- [9] 2.-generations lavenergihus i Hjortekær. Folder om Hus G. Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole. 1984.
- [10] Bjarne Saxhof & Kim B. Wittchen: Om Energiministeriets lavenergihusprojekter, specielt Hus G i Hjortekær, et 2. generations lavenergihus. Supplerende materiale til Energiministeriets plakat-vandreudstilling. Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole. 1986.
- [11] Mogens R. Byberg & Bjarne Saxhof: 6 Lavenergihuse i Hjortekær, Konstruktioner - arbejdsudførelse og erfaringer. Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole. ISSN 0905-1511, Meddelelse nr. 120, november 1982.

- [12] Bjarne Saxhof & Allan Aasbjerg Nielsen: Insulation and Air Tightness of six Low-Energy Houses at Hjortekær, Denmark. Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole. ISSN 0905-1511, Meddelelse nr. 121, november 1982.
- [13] Niels Henrik Rasmussen & Bjarne Saxhof: 6 Lavenergihuse i Hjortekær, Effektiviteter og tomgangstab for varme- og brugsvandsanlæg. Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole. ISSN 0905-1511, Meddelelse nr. 152, juni 1984.
- [14] Bjarne Saxhof & Kim B. Wittchen: Low Energy House G, Hjortekaer, Denmark. Project Monitor, Issue 41. Commission of the European Communities, February 1989.
- [15] Bjarne Saxhof & Kirsten Engelund Poulsen: Projektering af lavenergihus G i Hjortekær: Analyse af en række fundamentskonstruktioner. Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole. Rapport nr. 83-45, december 1983.
- [16] Bo Andersen, Karl Grau & Kjeld Johnsen: Brugervejledning for edb-programmet tsbi, termisk simulering af bygninger og installationer, version 2.1. Statens Byggeforskningsinstitut. ISBN 87-563-0611-3, 1985.
- [17] Jørgen M. Schultz: Generelt edb-program til beregning af skyggearealer på plane flader. Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole. Rapport nr. 87-26, december 1987.
- [18] Rolf G. Djurtoft: Tidskonstanter for huse. Artikel i Aktuel energiforskning, Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984 (redaktion Bjarne Saxhof). Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole. ISSN 0905-1511, Meddelelse nr. 150, pp. 40-56, maj 1984.
- [19] Allan Aasbjerg Nielsen: En dynamisk test-metode til bestemmelse af småhuses termiske respons. Artikel i Aktuel energiforskning, Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984 (redaktion Bjarne Saxhof). Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole. ISSN 0905-1511, Meddelelse nr. 150, pp. 57-72, maj 1984.
- [20] Rolf G. Djurtoft: Tidskonstantens betydning for husets energiforbrug. Artikel i Aktuel energiforskning, Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984 (redaktion Bjarne Saxhof). Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole. ISSN 0905-1511, Meddelelse nr. 150, pp. 73-82, maj 1984.
- [21] Kjeld Johnsen, Karl Grau & Jørgen Erik Christensen: tsbi3 - Edb-program til termisk simulering af bygninger og installationer - Brugervejledning. Statens Byggeforskningsinstitut. ISBN 87-563-0836-1, 1993.

6.2 LavEnergi Publikationer fra Laboratoriet for Varmeisolering (LfV), DTH

- 1 Bolet, B., Rasmussen, N.H. & Korsgaard, V.: Ressourcebesparende kassettebyggesystem til lavenergi huse. LfV, Meddelelse nr. 197, ISSN 0905-1511, december 1988.
- 2 Byberg, M.R.: Fremtidens lavenergi huse, XII Nordiske VVS Kongres i København, VVS Vision 82, 2/6-4/6 1982, Særtryk. LfV, Rapport nr. 82-26, juni 1982.
- 3 Byberg, M.R.: Do Conservation Houses Require Sophisticated Technical Installations? LfV, Meddelelse nr. 127, ISSN 0905-1511, november 1982.
- 4 Byberg, M.R.: Forbedret bearbejdning af måledata fra nyt lavenergi hus, LfV, artikel i Meddelelse nr. 150, ISSN 0905-1511, (Aktuel energiforskning - Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984), pp. 125-133, maj 1984.
- 5 Byberg, M.R., Djurtoft, R.G. & Saxhof, B.: 6 Lavenergi huse i Hjortekær, Kort beskrivelse af husene. LfV, Meddelelse nr. 83, ISSN 0905-1511, maj 1979.

Byberg, M.R., Djurtoft, R.G. & Saxhof, B.: 6 Low-Energy Houses at Hjortekær - Description of the Houses. LfV, Meddelelse nr. 83, ISSN 0905-1511, maj 1979.

Byberg, M.R., Djurtoft, R.G. & Saxhof, B.: 6 Niedrigenergiehäuser in Hjortekær, Dänemark - Kurze Beschreibung der Häuser. LfV, Meddelelse nr. 83, ISSN 0905-1511, maj 1979.
- 6 Byberg, M.R. & Saxhof, B.: 6 Lavenergi huse i Hjortekær, Konstruktioner - arbejdsudførelse og erfaringer. LfV, Meddelelse nr. 120, ISSN 0905-1511, november 1982.
- 7 Djurtoft, R.G.: Monitoring Energy Conservation Houses, ENERGEX 82. LfV, Rapport nr. 82-28, juni 1982.
- 8 Djurtoft, R.G.: Beregning og måling af mekanisk luftskifte i lavenergieksperimenthuset. LfV, Rapport nr. 82-65, december 1982.
- 9 Djurtoft, R.G.: Nordiske retningslinier for evaluering af byggeeksperimenter - Er noget sådant muligt?, Utvärdering av Experimentbyggnadsprojekt inom Energiområdet, Nordiskt Expertseminarium 6/9-7/9 1983 i Esbo, Finland, Særtryk. LfV, oktober 1983.
- 10 Djurtoft, R.G.: Tidskonstanter for huse, LfV, artikel i Meddelelse nr. 150, ISSN 0905-1511, (Aktuel energiforskning - Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984), pp. 40-56, maj 1984.

- 11 Djurtoft, R.G.: Tidskonstantens betydning for husets energiforbrug, LfV, artikel i Meddelelse nr. 150, ISSN 0905-1511, (Aktuel energiforskning - Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984), pp. 73-82, maj 1984.
- 12 Djurtoft, R.G.: Must Energy Conservation Houses be Designed for Maximum Utilization of Solar Heat Gain? CLIMA 2000 Copenhagen 1985, Proceedings, Volume 5, pp. 167-173.
- 13 Engelund Poulsen, K.: Isolerende vinduesskodder, LfV, artikel i Meddelelse nr. 150, ISSN 0905-1511, (Aktuel energiforskning - Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984), pp. 83-90, maj 1984.
- 14 Engelund Thomsen, K.: IEA Task 13 Summary Report of the Technology: Solar heating systems for domestic hot water. LfV, august 1991.
- 15 Engelund Thomsen, K.: Kuldebroers indflydelse på bygningers varmetab. LfV, Meddelelse nr. 225, ISSN 0905-1511, november 1991.
- 16 Engelund Thomsen, K.: Energy Efficient Lights and Appliances. LfV, Rapport nr. 92-15, juli 1992.
- 17 Engelund Thomsen, K.: Water Saving In Buildings. LfV, Rapport nr. 92-17, september 1992.
- 18 Engelund Thomsen, K., Jensen, S. Østergaard & Saxhof, B.: Optimization of a Danish 3rd Generation Low-Energy House Concept. Proceedings of the 5th International Conference North Sun '92 - Solar Energy at High Latitudes, pp. 65-71, Trondheim, Off-print. LfV, Juni 1992.
- 19 Engelund Thomsen, K. & Jensen, S. Østergaard: Spar på vandet - og spar energi. Sun Media, 1992. Energi & Planlægning nr. 4, pp. 8-9.
- 20 Engelund Thomsen, K. & Jensen, S. Østergaard: Vinduer - nu og i fremtiden. Sun Media, 1992. Energi & Planlægning nr. 3, pp. 11-13.
- 21 Engelund Thomsen, K. & Saxhof, B.: Advanced Danish Low-Energy House, IEA Task 13 Project Summary. IEA SHC Task 13, 6th Experts' Meeting, Wadahl, Harpefoss, Norge, 1992. LfV, marts 1992.
- 22 Engelund Thomsen, K. & Schultz, J.M.: Målinger og beregninger af solindfald gennem glaspartier under hensyntagen til skyggende genstande for lavenergihus G i Hjortekær. LfV, Rapport nr. 87-24, december 1987.
- 23 Engelund Thomsen, K. & Schultz, J.M.: Optimal vinduesudformning - en varmeteknisk undersøgelse. LfV, Meddelelse nr. 201, ISSN 0905-1511, december 1990.

- 24 Engelund Thomsen, K., Wittchen, K.B. & Saxhof, B.: Advanced Solar Low-Energy Buildings - Danish Work within IEA Task 13. Proceedings fra ASHRAE/DOE/BTECC Conference Thermal Performance of the Exterior Envelope of Buildings - Thermal Envelopes V, Clearwater Beach, Florida, USA, pp. 614-620. Off-print. LfV, december 1992.
- 25 Engelund Thomsen, K., Wittchen, K.B., Saxhof, B. & Lundgaard, B.: Design Summaries and Drawings for Two Danish IEA Task XIII Houses, paper til IEA Task XIII Fourth Experts' Meeting, Toronto 1991. LfV, februar 1991.
- 26 Engelund Thomsen, K., Wittchen, K.B., Saxhof, B. & Lundgaard, B.: Parametric Studies for Two Danish IEA Task XIII Houses, paper til IEA Task XIII Fourth Experts' Meeting, Toronto 1991. LfV, februar 1991.
- 27 Gullev, J.: Lavenergihuse i Hjortekær, Byggeindustrien nr. 1, 1979, pp. 9-15.
- 28 Huusom, J. & Lund Madsen, T.: The Thermal Indoor Climate in six Low-Energy Houses, 7th International Congress of Heating and Air Conditioning, "CLIMA-2000", Budapest 1980, Off-print. LfV, 1980.
- 29 Jensen, S. Østergaard: Roof Space Collector System for Low Energy Houses. Paper til IEA Task XIII 2nd Experts' Meeting, Bregenz, Østrig, 1990. LfV, marts 1990.
- 30 Jensen, S. Østergaard: Solar Heating System for Space Heating and Domestic Hot Water Production for Low Energy Houses. Paper til IEA Task XIII 2nd Experts' Meeting, Bregenz, Østrig, 1990. LfV, marts 1990.
- 31 Korsgaard, V., Byberg, M.R. & Hendriksen, P.: Experiences and Results from 2 Years Monitoring of the Energy Balance for Six Solar Assisted Low-Energy Houses in Denmark, Solar 83 Conference, Palma de Mallorca 2/10-6/10 1983, Off-print. LfV, oktober 1983.
- 32 Kristensen, P.E.: Performance of Hjortekær House D and F - Internal report within the Performance Monitoring Group. LfV, Rapport nr. 83-48, december 1983.
- 33 Madsen, H. & Schultz, J.M.: Short Time Determination of the Heat Dynamics of Buildings. LfV, Meddelelse nr. 243, ISSN 0905-1511, november 1993.
- 34 Rasmussen, N.H.: En analyse af energibesparelser i etageejendom fra 1940 - foranstaltningernes energi- og pengeøkonomiske konsekvenser. LfV, Meddelelse nr. 111, ISSN 0905-1511, juli 1981.
- 35 Rasmussen, N.H.: Trykprøvning af seks lavenergihuse i Hjortekær. LfV, Rapport nr. 82-69, december 1982.

- 36 Rasmussen, N.H.: Simultaneous Testing of Small Heat Pumps Under Actual Climate Conditions, CLIMA 2000 Copenhagen 1985, Proceedings, Volume 6, pp. 147-153.
- 37 Rasmussen, N.H. & Saxhof, B.: Experimental Low-Energy House at the Technical University of Denmark, description of a system for simultaneous testing of heating systems for conservation houses under actual climate conditions. LfV, Meddelelse nr. 128, ISSN 0905-1511, november 1982.
- 38 Rasmussen, N.H. & Saxhof, B.: 6 Lavenergihuse i Hjortekær, Effektiviteter og tomgangstab for varme- og brugsvandsanlæg. LfV, Meddelelse nr. 152, ISSN 0905-1511, juni 1984.
- 39 Saxhof, B.: Transmissionskoefficienter og dimensionerende varmetab for seks lavenergihuse i Hjortekær. LfV, Rapport nr. 82-11, juni 1982.
- 40 Saxhof, B.: Varmetabsramme og isoleringsgrad for seks lavenergihuse i Hjortekær. LfV, Rapport nr. 82-12, juni 1982.
- 41 Saxhof, B.: Skøn over følsomhed af målte og beregnede transmissionstab for seks lavenergihuse i Hjortekær. LfV, Rapport nr. 82-56, oktober 1982.
- 42 Saxhof, B.: External Insulating Shutters in Energy Conservation Houses. LfV, Meddelelse nr. 129, ISSN 0905-1511, november 1982.
- 43 Saxhof, B.: Målesystemer for seks lavenergihuse i Hjortekær: Vejrstation. LfV, Rapport nr. 83-5, april 1983.
- 44 Saxhof, B.: Målesystemer for seks lavenergihuse i Hjortekær: Måling af rum- og jordtemperaturer. LfV, Rapport nr. 83-15, september 1983.
- 45 Saxhof, B.: Målesystemer for seks lavenergihuse i Hjortekær: Målinger i varme- og ventilationsanlæg m.v. LfV, Rapport nr. 83-16, september 1983.
- 46 Saxhof, B.: Skitse til målesystem til lavenergihus G i Hjortekær. LfV, Rapport nr. 83-27, oktober 1983.
- 47 Saxhof, B.: Opstilling af nettoenergiregnskab efter BES-metoden for Lavenergihus G i Hjortekær (skitseprojekt). LfV, Rapport nr. 83-47, december 1983.
- 48 Saxhof, B.: Utilsigtede varmetab fra installationer i lavenergihuse, LfV, artikel i Meddelelse nr. 150, ISSN 0905-1511, (Aktuel energiforskning - Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984), pp. 91-102, maj 1984 (optrykt i VVS nr. 9, september 1985, pp. 17-21).

- 49 Saxhof, B.: Installationers betydning for klimaskærmens lufttæthed, LfV, artikel i Meddelelse nr. 150, ISSN 0905-1511, (Aktuel energiforskning - Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984), pp. 103-115, maj 1984.
- 50 Saxhof, B.: The Seventh Low-Energy House at Hjortekær, Denmark, CLIMA 2000 Copenhagen 1985, Proceedings, Volume 5, pp. 255-262.
- 51 Saxhof, B.: Efficient Heating and Domestic Hot Water Systems: A Must for Low-Energy Houses, CLIMA 2000 Copenhagen 1985, Proceedings, Volume 5, pp. 319-324.
- 52 Saxhof, B.: A Second Generation Low-Energy House at Hjortekær, Denmark. Paper til Building Physics in the Nordic Countries, Symposium i Lund august 1987. Proceedings pp. 291-296. Off-print. LfV, Rapport nr. 87-8, 1987.
- 53 Saxhof, B.: Low-Energy Houses, 1st International Symposium on Energy Savings - Focussing on electricity savings, Copenhagen 1/9-4/9 1987, Off-print. LfV, Rapport nr. 87-21, september 1987.
- 54 Saxhof, B.: Summary on new materials, components and system concepts - Denmark, Monograph Part 2, IEA Workshop on Advanced Solar Building Design and Analysis, Watsonville, California, February 3-6 1988. LfV, januar 1988.
- 55 Saxhof, B.: Designing Detailed Monitoring Programmes (Questions and some Answers). Off-print af paper til IEA Workshop: Field Monitoring - For a Purpose. Göteborg 2-5 april 1990. LfV, marts 1990.
- 56 Saxhof, B.: Field Monitoring - For A Purpose. IEA Task 13 Summary Report. LfV, august 1991.
- 57 Saxhof, B.: The Thermal Envelope - An Integrated Part of the Heating System? Science and Technology at the Service of Architecture. 2nd European Conference on Architecture (SECA), Paris 1989. LfV, Meddelelse nr. 222, ISSN 0905-1511, oktober 1991.
- 58 Saxhof, B.: Energy Conservation - The Building Envelope. Inviteret nøgleartikel til "European Directory of Energy Efficient Building 1993", pp. 77-81. James & James Science Publishers, London, december 1992.
- 59 Saxhof, B.: IEA Task 13 Component and System Testing. Paper til IEA og CIB W67 International Symposium, Energy Efficient Buildings, Stuttgart. Off-print. LfV, marts 1993.
- 60 Saxhof, B. (editor): Component and System Testing. IEA Task 13: Advanced Solar Low Energy Buildings/Subtask B: Testing and Data Analysis. IEA Working Document indeholdende 14 papers, heraf 6 fra LfV. LfV, maj 1993.

- 61 Saxhof, B.: A Nordic Competition on Low Energy Building 1991. Paper til Innovative Housing '93 Conference, Vancouver, Canada, 20.-26. juni 1993. Off-print, LfV, juni 1993.
- 62 Saxhof, B., Byberg, M.R., Engelund Thomsen, K. & Wittchen, K.B.: Low-Energy House G at Hjortekær, a 2nd Generation House: A Collection of 5 Papers on Monitoring. LfV, Rapport nr. 91-23, november 1991.
- 63 Saxhof, B., Djurtoft, R.G., Byberg, M.R. & Aasbjerg Nielsen, A.: Six Low-Energy Houses at Hjortekær, Denmark, Description of the Houses and Presentation of Energy Measurements during the first Winter, 7th International Congress of Heating and Air Conditioning, "CLIMA-2000", Budapest 1980, Off-print. LfV, 1980.
- 64 Saxhof, B. & Engelund Poulsen, K.: Foundations for Energy Conservation Houses. LfV, Meddelelse nr. 130, ISSN 0905-1511, november 1982.
- 65 Saxhof, B. & Engelund Poulsen, K.: Projektering af lavenergihus G i Hjortekær: Analyse af en række fundamentskonstruktioner. LfV, Rapport nr. 83-45, december 1983.
- 66 Saxhof, B. & Engelund Poulsen, K.: Projektering af lavenergihus G i Hjortekær: Analyse af varmebehov. LfV, Rapport nr. 83-46, december 1983.
- 67 Saxhof, B., Engelund Thomsen, K. & Wittchen, K.B.: Parametric Studies and Monitoring Results from a Danish 2nd Generation Low-Energy House Project. CIB W67 Workshop: Low-Energy-Buildings 2nd generation. Heidenheim, 31 May-1 June, 1990. Proceedings pp. 9-1 - 9-9. Off-print. LfV, maj 1990.
- 68 Saxhof, B., Engelund Thomsen, K. & Wittchen, K.B.: IEA Task 13 Summary Report of the Technology: Heating Systems. LfV, september 1991.
- 69 Saxhof, B., Schultz, J.M. & Wittchen, K.B.: From the Zero Energy House to the 1st and 2nd Generation Houses at Hjortekær, Denmark. LfV, Meddelelse nr. 200, ISSN 0905-1511, december 1988.
- 70 Saxhof, B., Schultz, J.M. & Engelund Thomsen, K.: Two Danish Task 13 Low-Energy Houses - Designs and Parametric Studies. Paper til IEA og CIB W67 International Symposium, Energy Efficient Buildings. Proceedings pp. 211-225, Stuttgart, marts 1993.
- 71 Saxhof, B., Schultz, J.M. & Engelund Thomsen, K.: Thermal Analyses of Danish Low Energy Rowhouses for IEA SHC Task 13 'Advanced Solar Low Energy Buildings'. Paper til Innovative Housing '93 Conference, Vancouver, Canada, 20.-26. juni 1993. Off-print. LfV, juni 1993.

- 72 Saxhof, B., Schultz, J.M. & Englund Thomsen, K.: 2- and 3-Dimensional Heat Losses in Superinsulated Buildings. Proceedings of the 3rd Symposium on Building Physics in the Nordic Countries: Building Physics '93 (Bjarne Saxhof, editor) pp. 109-116. Laboratoriet for Varmeisolering, Lyngby, september 1993. ISBN 87-984610-0-1 (Bind 1).
- 73 Saxhof, B. & Wittchen, K.B.: Om Energiministeriets lavenergihusprojekter, specielt Hus G i Hjortekær, et 2.-generations lavenergihus, Supplerende materiale til Energi-ministeriets plakat-vandreudstilling. LfV, 1986.
- 74 Saxhof, B. & Wittchen, K.B.: Project Monitor: Low Energy House G, Hjortekaer, Denmark. Commission of the European Communities. Nr. 41, februar 1989.
- 75 Saxhof, B. & Wittchen, K.B.: A Second Generation Low-Energy House at Hjorte-kær, Denmark, i "Examples from Task XIII Experts, IEA SH&CS Task XIII Work-ing Document", (Proceedings from the 1st Workshop, Hinterzarten, Vesttyskland, 30 jan.-1 febr. 1989) pp. 4-11, EMPA, Dübendorf, Schweiz, januar 1990.
- 76 Saxhof, B. & Wittchen, K.B.: Draft Monitoring System for the Danish IEA Task 13 Houses, paper til IEA Task XIII Fifth Experts' Meeting, Monitoring Workshop, Kandersteg, Schweiz, 1991. LfV, september 1991.
- 77 Saxhof, B. & Wittchen, K.B.: IEA SHC Task 13 Advanced Solar Low Energy Build-ings - Common Basic Measurements. LfV, marts 1993.
- 78 Saxhof, B. & Aasbjerg Nielsen, A.: Insulation and Air Tightness of six Low-Energy Houses at Hjortekær, Denmark. LfV, Meddelelse nr. 121, ISSN 0905-1511, novem-ber 1982.

Kongresbidraget, som dannede grundlaget for Meddelelse nr. 121, er udgivet på en-gelsk og fransk i Building Research & Practice, May/June 1983, pp. 142-153.
- 79 Schultz, J.M.: Analysis of Insulating Window Shutters. Paper til Building Physics in the Nordic Countries, Symposium i Lund august 1987. Proceedings pp. 17-23. Off-print. LfV, Rapport nr. 87-9, 1987.
- 80 Schultz, J.M.: Generelt edb-program til beregning af skyggearealer på plane flader. LfV, Rapport nr. 87-26, december 1987.
- 81 Schultz, J.M.: Effektiv brugsvandsopvarmning. LfV, Meddelelse nr. 226, ISSN 0905-1511, december 1991.
- 82 Schultz, J.M.: Ramme-/karmkonstruktioner til højisolerede vinduer. LfV, Medde-lelse nr. 237, ISSN 0905-1511, september 1992.

- 83 Schultz, J.M.: Isolerende Skodder. LfV, Meddelelse nr. 202, ISSN 0905-1511, december 1990.
- 84 Schultz, J.M.: Insulating shutters with granular silica aerogel. Fifth International Meeting on Transparent Insulation Technology, Freiburg, Tyskland, 1992, Proceedings pp. 97-100. Off-print. LfV, april 1993.
- 85 Schultz, J.M.: Frames for Superinsulating Windows. Proceedings of the 3rd Symposium on Building Physics in the Nordic Countries: Building Physics '93 (Bjarne Saxhof, editor) pp. 65-72. Laboratoriet for Varmeisolering, Lyngby, september 1993. ISBN 87-984610-0-1 (Bind 1).
- 86 Schultz, J.M.: Insulating Shutters with Granular Silica Aerogel. LfV, Meddelelse nr. 242, ISSN 0905-1511, November 1993.
- 87 Schultz, J.M. & Engelund Thomsen, K.: Thermal Analysis of Window Design. Paper til symposiet: Building Physics in the Nordic Countries. Trondheim 20-22 august 1990. Proceedings pp. 101-107. Off-print. LfV, juni 1990.
- 88 Wittchen, K.B.: Air-Supply in Airtight, Highly Insulated Buildings. Paper til Building Physics in the Nordic Countries, Symposium i Lund august 1987. Proceedings pp. 241-246. Off-print. LfV, Rapport nr. 87-10, 1987.
- 89 Wittchen, K.B.: Friskluftforsyning til tætte, velisolerede huse. LfV, Meddelelse nr. 192, ISSN 0905-1511, december 1988.
- 90 Wittchen, K.B.: IEA Task 13 Summary Report of the Technology: Comfort control of heating systems. LfV, august 1991.
- 91 Wittchen, K.B.: Simulation Technology set: Multi-Layered Glazing - IEA task XIII Advanced Solar Low-Energy Buildings. LfV, Rapport nr. 91-26, december 1991.
- 92 Wittchen, K.B.: Technology Simulation Set: Multi-Layered Glazing. Working Document. LfV, Rapport nr. 92-40, august 1992.
- 93 Wittchen, K.B. & Saxhof, B.: Dimensioning Heating Systems for Low-Energy Buildings, Considering the Influence of Fluctuating Temperatures. Paper til symposiet: Building Physics in the Nordic Countries. Trondheim, 20-22 august 1990. Proceedings pp. 171-177. Off-print. LfV, juni 1990.
- 94 Wittchen, K.B. & Saxhof, B.: Monitoring Advanced Solar Low-Energy Houses - Introduction for Discussion, paper til IEA Task XIII Fifth Experts' Meeting, Monitoring Workshop, Kandersteg, Schweiz, 1991. LfV, september 1991.
- 95 Zachariassen, H.: H&S lavenergihus i Hjortekær, Arkitekten nr. 17, 1982, pp. B5-B8.

- 96 Aasbjerg Nielsen, A.: Energy Consumption in Buildings, Regression Models, Six Low-Energy Houses at Hjortekær. LfV, Rapport nr. 82-68, december 1982.
- 97 Aasbjerg Nielsen, A.: To Økonomiprogrammer til TI-59. LfV, Rapport nr. 83-9, maj 1983.
- 98 Aasbjerg Nielsen, A.: En dynamisk test-metode til bestemmelse af småhuses termiske respons, LfV, artikel i Meddelelse nr. 150, ISSN 0905-1511, (Aktuel energiforskning - Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984), pp. 57-72, maj 1984.
- 99 Aasbjerg Nielsen, A.: A Dynamic Test Method for the Energy Consumption of Small Houses, CLIMA 2000 Copenhagen 1985, Proceedings, Volume 2, pp. 533-541.
- 100 Aasbjerg Nielsen, A.: Dynamisk trykprøvning - En infrasonisk metode til måling af småhuses tæthed. LfV, Rapport nr. 87-1, 1987.
- 101 Aasbjerg Nielsen, A., Byberg, M.R., Djurtoft, R.G. & Saxhof, B.: 6 Lavenergihuse i Hjortekær - Statusrapport 1. LfV, Meddelelse nr. 84, ISSN 0905-1511, juni 1979.
- 102 Aasbjerg Nielsen, A. & Kjær Nielsen, B.: A Dynamic Test Method for the Thermal Performance of Small Houses, ACEEE Summer Study, Santa Cruz 1984. LfV, Rapport nr. 84-19, juli 1984.
- 103 Aasbjerg Nielsen, A., Madsen, H. & Saxhof, B.: Identification of Models for the Heat Dynamics of Buildings. LfV, Meddelelse nr. 240, ISSN 0905-1511, November 1993.
- 104 2.-generations lavenergihus i Hjortekær, folder, LfV, 1984. Findes også på engelsk: A Second-Generation Low-Energy House at Hjortekær.

Laboratoriets meddelelsseserie, ISSN 0905-1511, forhandles gennem Byggecentrums Boghandel, Dr. Neergaardsvej 15, DK-2970 Hørsholm, Telefon: 45 76 73 73, Fax 45 76 76 69.

Yderligere oplysninger kan fås ved henvendelse til:

Laboratoriet for Varmeisolering
Danmarks Tekniske Højskole
Bygning 118, DK-2800 Lyngby
Telefon (+45) 45 93 44 77
Fax (+45) 45 93 17 55

DIMENSIONING HEATING SYSTEMS FOR LOW-ENERGY BUILDINGS, CONSIDERING THE INFLUENCE OF FLUCTUATING TEMPERATURES

Kim B. Wittchen & Bjarne Saxhof

**Off-print of paper for the Symposium: Building Physics in the Nordic Countries
Trondheim 20-22 August 1990**

**Thermal Insulation Laboratory
Technical University of Denmark
June 1990**



DIMENSIONING HEATING SYSTEMS
FOR LOW-ENERGY BUILDINGS, CONSIDERING
THE INFLUENCE OF FLUCTUATING TEMPERATURES

Kim B. Wittchen
Bjarne Saxhof
Civil Engineers, M Sc

Thermal Insulation Laboratory
Technical University of Denmark
Building 118, DK-2800 LYNGBY

DENMARK

ABSTRACT

Normally, dimensioning of heating systems for low-energy buildings is based on stationary temperature conditions (as required by code). Therefore, the heating systems will have very small power ratings, which might not be large enough to ensure reasonably quick reheating after a cold night, let alone a longer period of reduced heating (vacation etc). To ensure an appropriate size of the heating system for a low-energy building, it is necessary to take an acceptable reheating time into account, on a room or house basis.

In a low-energy house the thermal inertia is usually about the same as in a more traditional house, built according to prevailing building codes (as the interior materials and surfaces are normally very similar). Though the thermal mass and the overall heat loss from the room/house are both of significant importance to the speed with which the room/house can be reheated after a cooling down period, thermal mass is the dominant factor.

This paper discusses results from a number of simulation runs, analysing the relation between installed power and reheating time in highly insulated buildings; the results have been evaluated and validated through measurements in a superinsulated house at Hjørtetekær, north of Copenhagen. Based on this discussion the paper gives a rule of thumb for sizing a heating system for a low-energy house - and suggests an alternative solution to the problem.

1. INTRODUCTION

Room temperature fluctuations depend strongly on the thermal inertia of the building, often characterized through a time constant found from analyses of cooling down periods. It is important to realize that a long such time constant can be the result of either dominant large thermal mass or dominant super insulation (DJURTOFT 1984 a, b). Though two different rooms may perform almost identically during cooling down periods, they can behave quite differently during heating up periods, and thus present different demands on the heating system. Empirical thermal characterization of rooms must thus be based on a combination of heating up and cooling down experiments (MADSEN and SCHULTZ 1988).

As the heating demand in a low-energy house is so very low (35-40% of the energy consumption in a house built according to the strict Danish building code, or even less) traditional dimensioning for steady state conditions will give heating systems with a very small power rating. Reheating of the house after a cooling period (night setback or a longer period, eg a winter vacation) will then take unacceptably long time. The length of the heating up period will be dominated by the thermal mass in the room, which will usually be about the same as in a traditional house. The purpose of the following analyses is to indicate and quantify the need for installed power on top of the steady state requirements. The problem has been analyzed through computer simulations in combination with experiments in a full-scale low-energy house.

2. DESCRIPTION OF LOW-ENERGY HOUSE G

The investigated house (Low-Energy House G, figure 1) a detached Danish single family house, is highly insulated with a minimum of 200 mm unbroken high quality insulation material in all external walls, roof and floor. The windows are mainly orientated directly towards south and have either double glazing with external insulating shutters (all larger windows) or triple glazing without external shutters ("daylighting" windows).

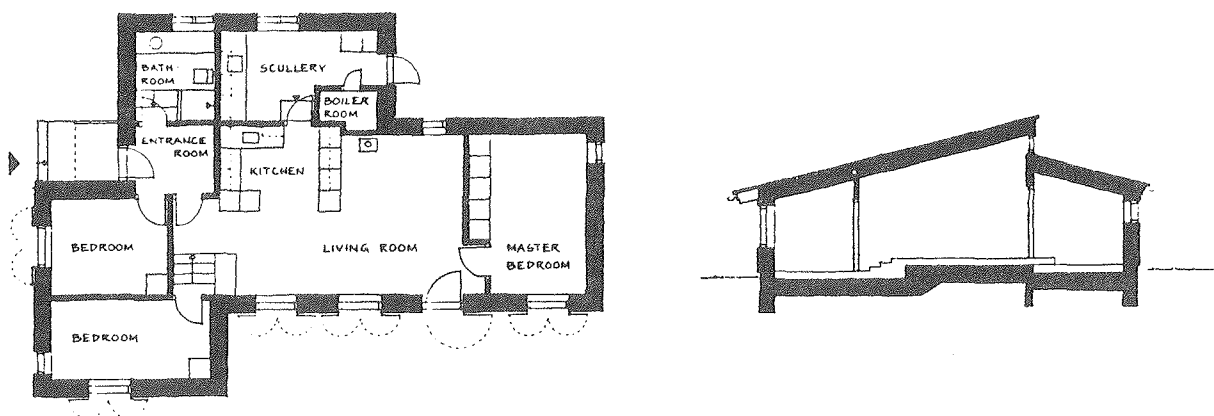


Figure 1 Ground plan and cross section of investigated house, Low-Energy House G.

The thermal envelope is extremely airtight and the house is equipped with a mechanical ventilation system with a counterflow air-to-air heat exchanger (efficiency approx 60%). Exhaust air is sucked from the house in the kitchen, bathroom and scullery, and fresh air is injected under the wooden floors in the bedrooms. The heating system (figure 2) is a hydronic system, where room air is being heated via a convector unit under the base of fixed cupboards in each room. Return air is sucked through an 8 mm wide slot behind the skirting boards along the external walls down between the floor boards and the below-mentioned concrete slab to re-enter the room through the convectors (TIL-folder 1984).

The inner side of the external walls as well as all internal walls are made of 100 mm lightweight concrete. Under the wooden floor boards there is an air space and a 100 mm concrete slab "floating" on polystyrene insulation. These surfaces make up the major thermal mass in the house. The other constructions are quite light (SAXHOF and WITTCHEN 1986) and contribute very little to the thermal inertia of the house.

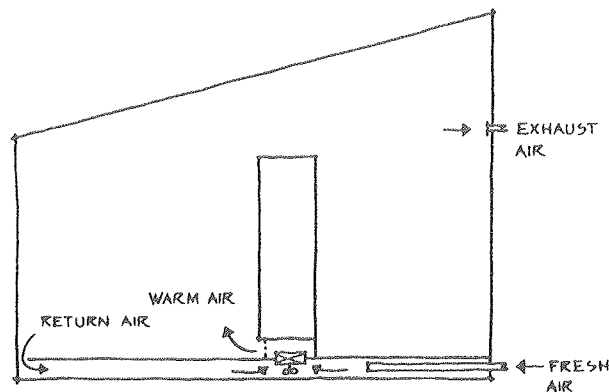


Figure 2 Simplified diagram of heating system (left). Air movement in heating and ventilation system (right).

The calculated overall heat loss from the house is 95 W/K (0.77 W/K per m²) with open shutters and 82 W/K (0.66 W/K per m²) with closed shutters, both including heat loss due to infiltration and ventilation (SAXHOF and WITTCHEN 1989).

3. COOLING DOWN AND HEATING UP EXPERIMENTS

Cooling down and heating up experiments were carried out in House G during the winter 1985-86, with ambient temperatures a couple of degrees above the normal temperature level for Denmark (WITTCHEN and SAXHOF 1990).

The combination of a mild winter and the high degree of insulation is to blame for some lack of measuring data of a quality good enough to be used for evaluation of computer simulations. Experiments were carried out in four different rooms, but only data from two of the rooms was selected for use, namely from the master bedroom with partly shadowed east and south facing windows (from a quickset hedge to the east of the house), and from a west facing room also with partly shadowed windows (from the neighbour house, in the afternoon). Results and simulations from the master bedroom are presented in this paper.

Because of the mild weather (and the very efficient insulation) the decrease in room temperature during the night was small, only about 0.5°C or less - values much too small and too uncertain to use for comparison with calculated values.

In order to obtain a suitable temperature difference to investigate the thermal behaviour during a re-heating period, a special cooling down experiment with a long cooling period (4-5 days) was designed. A window was left open and furthermore the sun was shut out by using the shutters as blinds

(almost closed, but allowing air to ventilate through). This latter cooling experiment gave a satisfactory decrease in the indoor temperature (3-4°C), figure 3. Before reheating the room the window was closed and the shutters were opened.

During these experiments the normal heating system in the house was shut off and heating was managed by transportable electric resistance heaters. In this way it was easy to change the "installed" heating capacity in every room and measure the energy consumption for each room individually by local kWh-meters. The indoor room temperature, in different locations, was measured continuously in order to determine the time needed to reheat the room. Besides these special measurements the normal data logging in the ongoing monitoring programme of, among other parameters, the temperature in each room and the outdoor weather data, was continued, data being recorded every 10 minutes.

4. THERMAL SIMULATIONS OF HOUSE G

Weather data for the periods with usable indoor data, plus start-up periods, was compiled to a format which could be understood by a Danish thermal building simulation program, tsbi version 2i, and a room model was set up for performing simulations under actual weather conditions. In this room model the total thermal capacity (TC) is used to evaluate the transient behaviour of the room.

4.1. Thermal mass of a room/house

For this simulation program the total thermal capacity (TC) of a room/house must be calculated as the part of the total thermal capacity that is positioned on the inside of the building components (ie inside the insulation layer) together with all internal constructions (eq. 4.1). The thickness of these layers used in the calculations should not exceed 0.10 m for heavy constructions and 0.05 m for light constructions, counted from the inner surface.

These limitations on layer thickness and insulation boundary are specified to ensure that only those layers that are taking active part in the thermal accumulation are taken into account.

$$TC = \sum A_i e_i \rho_i c_i \quad (4.1)$$

where A_i is the internal area of the accumulating construction, [m²]
 e_i is the thickness of the accumulating layer, [m]
 ρ_i is the density of the accumulating layer, [kg/m³]
 c_i is the thermal capacity of the accumulating layer, [MJ/kg°C]

The TC product for the master bedroom in house G is 3.4 MJ/°C (0.945 kWh/°C), taking into account all internal walls, the concrete slab under the floor, as well as floor boards, ceiling and fixed cupboards (wood). The room was unfurnished during the experiments.

APPENDIKS

4.2. Computer simulation of cooling and heating experiments

Simulations were performed for the same room and weather data with different values of heating power ratings, starting out with 800 W which equals the installed power (twice the rating required to maintain a stationary temperature difference of 32°C, which is the design temperature difference in the Danish building code). The installed power was successively reduced to 500 and 400 W.

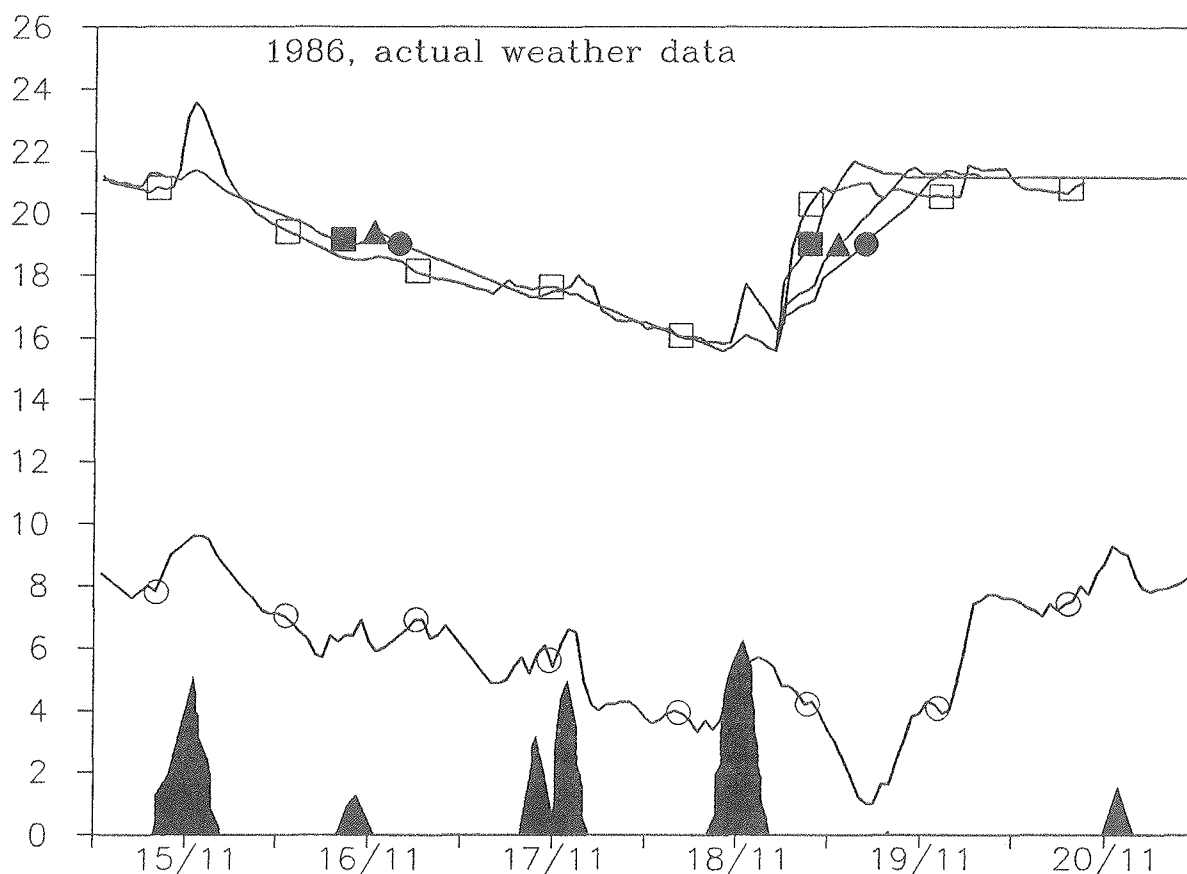


Figure 3 Cooling down and heating up analysis for the master bedroom of House G. Comparison between calculated room temperatures in °C for different power ratings (1-2 times the design heat loss: (●) 400 W; (▲) 500 W; (■) 800 W), and (□) the measured room temperature (installed power 800 W = 2 times the design heat loss, on the average about 4 times the actual heat loss) during the same period, after a four-day cooling down period with deliberately increased heat loss. The shaded areas indicate solar irradiation and (○) the ambient temperature in °C.

For the maximum installed power (800 W) the reheating time for a temperature decrease of 4°C was about four hours. This reheating time must be considered to be somewhat near the longest acceptable, although a 4°C temperature decrease will be rare, and certainly not occur from night setback. A decrease of the installed power will increase the time needed for reheating the house and in this case a reduction of the installed power to 400 W (equal to the design heat loss, but on the average about 2 times the actual heat loss) resulted in a reheating time of about 14 hours (figure 4). This is far too long and not acceptable from a comfort point of view. The steady state design power rating is thus not sufficient.

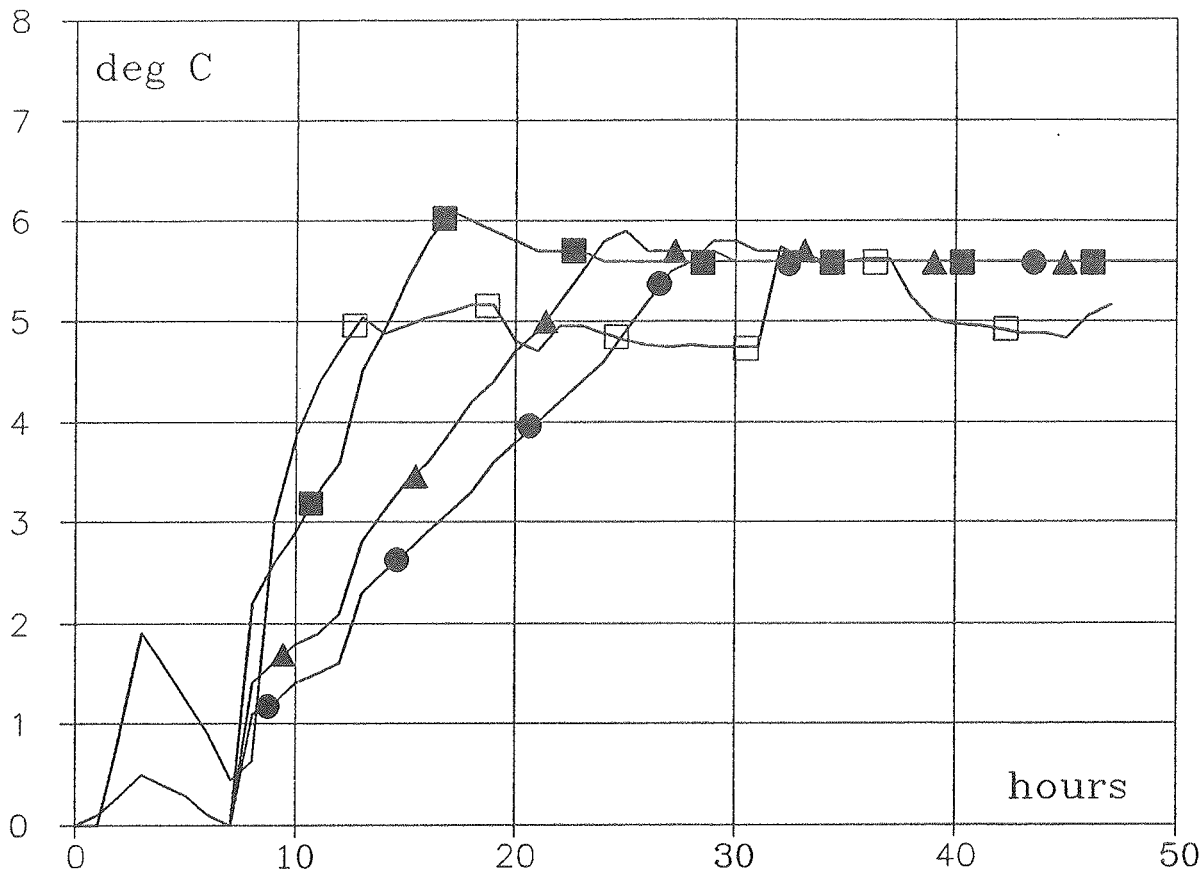


Figure 4 Heating up of master bedroom in House G, starting at hour 7, power rating 400 W (●), 500 W (▲) and 800 W (■) respectively, curves of calculated values, cf figure 3. (□) identifies the curve of measured values, power rating 800 W.

In low-energy houses the ratio between the thermal capacity (TC) and the installed power (P) is of greater importance to the reheating time than the overall heat loss. Under normal winter conditions the heat loss will be about 200-250 W (outdoor temperature 0-5°C), compared to the about 800 W needed to increase the operating room temperature (ie a weighted temperature of the surfaces and the air) 4°C in 4 hours. About 950 W is required to raise the temperature of the thermal mass in the room 4°C in 4 hours. As a rule of thumb, the time needed to heat up a "low-energy room" 1°C can be estimated as the TC/P ratio.

5. CONCLUSIONS

As the thermal mass is normally approximately the same in a low-energy house as in a house built according to the prevailing building codes, the installed power will have to be rather high to heat up the room within an acceptably short time, compared to the standard design rating needed to meet a stationary temperature difference of 32°C. Normally the temperature decrease overnight with the heat supply shut off, will not be more than 1-2°C, but during a longer period with no heat on (eg winter vacations, or break down of heat supply unit) the temperature might fall several degrees. In this case it is important to have the possibility of reheating the house in a short period of time.

APPENDIKS

Normal stationary dimensioning of heating systems to low-energy houses will, because of the very low heat losses, result in heating systems with very small installed power, not at all sufficient for quick reheating of the house. A rule of thumb could be that the ratio between the thermal capacity (TC) and the installed power (P), should not exceed 1.2 hours per deg C.

Installing an "oversized" heating system that can meet severe comfort demands to heating up time may give other problems such as increased capital cost and, even worse, lower energy efficiency, caused by the big difference between the normal load and the peak capacity and the problems of operating efficiently under extreme part-load conditions.

However, as the additional power is needed only occasionally, and hardly ever in the whole house at one time, oversizing the heating system to 2-3 times the steady state size hardly seems justifiable - especially considering that the additional power needed for even a fairly large room, eg a living room, will rarely exceed 2000 W and may be supplied from a transportable inexpensive electric fan heater.

REFERENCES

- DJURTOFT R.G. (1984a) Tidskonstantens betydning for husets energiforbrug (Time Constant vs Heat Demand for a House). In *Aktuel Energiforskning - Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984*, pp 73-82. In Danish, with an English Summary. Thermal Insulation Laboratory. Technical University of Denmark.
- DJURTOFT R.G. (1984b) Tidskonstanter for huse (Time Constants for Houses). In *Aktuel Energiforskning - Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984*, pp 40-56. In Danish, with an English Summary. Thermal Insulation Laboratory. Technical University of Denmark.
- MADSEN H. and SCHULTZ J.M. (1988) A Method for Identification of Continuous Time Models for Heat Dynamics of Buildings. Experimental Design and Test Results. CEC PASSYS, 052-88-PASSYS-TME-WD-015. Thermal Insulation Laboratory. Technical University of Denmark.
- SAXHOF B. and WITTCHEN K.B. (1989) Project Monitor, Commission of the European Communities, Low Energy House G, Hjortekær, Denmark. Issue 41.
- SAXHOF B. and WITTCHEN K.B. (1986) Om Energiministeriets lavenergiprojekter, specielt Hus G i Hjortekær, et 2. Generations lavenergihus - Supplerende materiale til Energiministeriets plakat vandre-udstilling (About Low-Energy Projects Funded by the Ministry of Energy, Specifically House G at Hjortekær, a 2nd Generation Low-Energy House - Supplementary Information Material for the Travelling Poster Exhibition of the Ministry of Energy). In Danish. Thermal Insulation Laboratory. Technical University of Denmark.
- WITTCHEN K.B. and SAXHOF B. (1990) Dimensioneringsprincipper for varmeanlæg til lavenergiboliger (Dimensioning Principles for Heating Systems for Low-Energy Houses). In preparation, in Danish, with an English Summary. Thermal Insulation Laboratory. Technical University of Denmark.
- TIL-folder (1984) A Second-Generation Low-Energy house at Hjortekær. Thermal Insulation Laboratory. Technical University of Denmark.