



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

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



Rapport

R50:1989

**Reglering av
inomhustemperaturen i
flerbostadshus med central
återkoppling**

Björn Hedin

INSTITUTET FOR
BYGGDOKUMENTATION

År: _____

Plac: Ser

R/TZ

Byggeforskningsrådet

R50:1989

REGLERING AV INOMHUSTEMPERATUREN
I FLERBOSTADSHUS MED CENTRAL ÅTERKOPPLING

Björn Hedin

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 830808-5
till Lunds tekniska högskola, Institutionen för byggnads-
konstruktionslära, Lund.

REFERAT

Central återkoppling har använts i fem större flerbostadshus med vattenburen värme och utan radiatortermostatventiler. Frånluftstemperaturen har använts som ett mått på byggnadens genomsnittliga inomhustemperatur.

I omfattande försök har central återkoppling jämförts med reglering med enbart framkoppling från utetemperaturen. Försöken har utförts så att de olika reglersätten har använts samtidigt i likadana hus. Den centrala återkopplingen har fungerat som avsett och byggnadens medeltemperatur har reglerats noggrant.

Utvärderingen av de olika reglersätten har baserats på skillnaden i gratisvärmeutnyttjandet. En ny metod för att bestämma gratisvärmeutnyttjandet från mätdata med regressionsanalys har utvecklats och testas i rapporten. Metoden är en vidare utveckling av energisignaturen. Vidare analyseras hur gratisvärmeutnyttjandet beror på byggnaden, klimatet och reglersättet. Detta görs dels teoretiskt med en enkel statisk modell, dels i datorsimuleringar med en 3:e ordningens dynamisk modell.

Det praktiska gratisvärmeutnyttjandet i försökshuset har bestämts till ca 90% med och 40% utan central återkoppling, vilket överensstämmer väl med den teoretiska analysen. Dessa värden avser byggnaden som helhet och har beräknats med genomsnittliga värden på inomhustemperatur och gratisvärme.

Reglernoggrannheten och gratisvärmeutnyttjandet i de enskilda lägenheterna blir dock betydligt lägre. Även detta utreds teoretiskt och med beräkningar av mätdata.

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

Denna skrift är tryckt på miljövänligt, oblekt papper.

R50:1989

ISBN 91-540-5037-5

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Svenskt Tryck Stockholm 1989

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

| | |
|---|-----|
| BETECKNINGAR | 5 |
| FÖRORD | 9 |
| 1 INLEDNING OCH ÖVERSIKT | 10 |
| Tidigare utfört arbete | 11 |
| Framkoppling, lokal och central återkoppling | 15 |
| Innetemperaturmätning | 27 |
| 2 ENERGIBESPARING VID CENTRAL ÅTERKOPPLING | 30 |
| 2.1 Inledning | 30 |
| 2.2 Energiförbrukningsmodeller | 37 |
| Modell 1 - energisignaturen | 41 |
| Regleringens inverkan | 41 |
| Gratisvärmeutnyttjande | 43 |
| Modell 2 - reglersignaturen | 46 |
| Modell 3 | 47 |
| Differensmodeller | 49 |
| 2.3 Regressionsanalys med simulerade data | 50 |
| Linjär regression | 51 |
| Val av periodlängd | 53 |
| Simulerade mätdata | 55 |
| Skattad modell vid framkoppling | 57 |
| Orsaken till de felaktiga skattningarna | 59 |
| Skattad modell vid återkoppling | 60 |
| Tidskonstanten | 63 |
| En anmärkning | 63 |
| 2.4 Energibesparingen i försökshusen | 64 |
| Resultat för period 1 | 69 |
| Resultat för period 2 | 76 |
| Resultat för period 3 | 78 |
| Resultat för period 4 | 80 |
| Gratisvärmeutnyttjandet i försökshusen | 85 |
| Energibesparingen under ett normalår | 88 |
| Fönstren som passiva solfångare - effektivt k-värde | 94 |
| 3 SIMULERING AV REGLERSYSTEMET VID CENTRAL ÅTERKOPPLING | 97 |
| 3.1 Sambandet reglernoggrannhet - nödvändig medeltemperatur | 98 |
| Normalfördelad innetemperatur | 99 |
| Triangelfördelad innetemperatur | 100 |
| Resultat | 101 |
| 3.2 Simuleringsmodellen | 104 |
| Stationära samband | 107 |
| Dynamiska samband | 108 |
| Klimatdata | 113 |
| Intern värmebelastning | 114 |
| Approximativt värmebehov | 115 |
| Datorprogram | 117 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 3.3 | Regulatorer | 120 |
| | Krav på regleringen | 121 |
| | P-regulator | 123 |
| | PI-regulator | 129 |
| | Integratoruppvridning | 132 |
| | PD-regulator | 138 |
| 3.4 | Simulering av systemet byggnad-värmesystem-reglersystem | 142 |
| | Endast framkoppling | 144 |
| | Optimal reglering | 151 |
| | Återkoppling med P-regulator | 157 |
| | Återkoppling med PI-regulator | 164 |
| | Fel framkopplingskurva | 171 |
| 4 | LÄGENHETSTEMPERATUREN VID CENTRAL ÅTERKOPPLING | 180 |
| 4.1 | Inledning | 180 |
| 4.2 | Lite statistikteori | 182 |
| | Två exempel | 183 |
| 4.3 | Analys av mätdata - frånluftstemperaturer | 189 |
| | Beräkningar | 194 |
| | Resultat | 196 |
| 4.4 | Analys av mätdata - lägenhetstemperaturer | 202 |
| | Hussvalan | 202 |
| | Beräkningar | 206 |
| | Resultat | 207 |
| | Felkällor | 219 |
| | Jämförelse Hussvalan - Tingvallen | 220 |
| 4.5 | Sammanfattning | 221 |
| 5 | SAMMANFATTNING | 225 |
| | REFERENSER | 236 |
| | BILAGA 1 | 237 |
| | BILAGA 2 | 242 |

BETECKNINGAR

| | | | |
|---------------------|--|--|------------------------------|
| A | antagen kvot av korrelationskoefficienter | | 1 |
| A _j | lägenhetstemperatur j i hus A | | °C |
| A _n | regressionsparameter, skattat värde av a _n , n=1,2,2',3 | | W/m ² , lgy |
| a ₁ | parameter i modell 1 = $P_{\text{övr}} - P_{\text{gövr}}$ | | W/m ² , lgy |
| a ₂ | parameter i modell 2 = $P_{\text{övr}} - v_{\text{P}} P_{\text{gövr}} + (1-v_{\text{g}}) k_{\text{dl}}$ | | W/m ² , lgy |
| a _{2'} | parameter i modell 2' = $P_{\text{övr}} - v_{\text{P}} P_{\text{gövr}} + (1-v_{\text{g}}) k_{\text{r}} (\text{dl} + \text{dkT}_{\text{ir}})$ | | W/m ² , lgy |
| a ₃ | parameter i modell 3 = $(1-v_{\text{g}}) (P_{\text{övr}} + k_{\text{dl}})$ | | W/m ² , lgy |
| B _j | lägenhetstemperatur j i hus B | | °C |
| B _n | regressionsparameter, skattat värde av b _n , n=1,2,2',3 | | W/°Cm ² , lgy |
| b ₁ | parameter i modell 1 = k _b | | W/°Cm ² , lgy |
| b ₂ | parameter i modell 2 = k _b | | W/°Cm ² , lgy |
| b _{2'} | parameter i modell 2' = $k_{\text{b}} - (1-v_{\text{g}}) k_{\text{dk}}$ | | W/°Cm ² , lgy |
| C | byggnadens (aktiva) värmekapacitet per lgy | | Wdygn/°Cm ² , lgy |
| C(X,Y) | kovariansen mellan X och Y | | 1 |
| C _j | lägenhetstemperatur j i hus C | | °C |
| C _n | regressionsparameter, skattat värde av c _n , n=1,2,3 | 0.024m ² , fas/m ² , lgy | |
| C _p | C/T per kovarians | | W/°Cm ² , lgy |
| c | parameter i modell 1 = saf | 0.024m ² , fas/m ² , lgy | 1 |
| c ₁ | parameter i modell 2 = v saf | 0.024m ² , fas/m ² , lgy | |
| c ₂ | parameter i modell 3 = $(1-v_{\text{g}}) \text{saf}$ | 0.024m ² , fas/m ² , lgy | |
| c ₃ | | | |
| D _j | lägenhetstemperatur j i hus D | | °C |
| D _n | regressionsparameter, skattat värde av d _n , n=2,3 | | W/°Cm ² , lgy |
| DW | Durbin-Watsons kriterium | | . |
| d,Δ | som prefix: förändring i tid eller rum, differensoperator | | |
| d _j | specifik temperaturstörning i lägenhet j | | °C |
| dk | felaktig lutning i använd framkopplingskurva | | 1 |
| dT | förändring i T _i under en medelvärdesperiod | | °C |
| d ₁ | parameter i modell 2 = $(1-v_{\text{g}}) k_{\text{dk}}$ | | W/°Cm ² , lgy |
| d ₂ | parameter i modell 3 = $-(1-v_{\text{g}}) k_{\text{dk}}$ | | W/°Cm ² , lgy |
| d ₃ | | | |
| E(X) | medelvärde av X | | . |
| E _{gs} | solinstrålning per lgy, tillgodogjord gratisenergi | | kWh/m ² , lgy |
| E _{i(N)} | medeltemperatur i hus N, N=A,B,C,D,E vid tiden i | | °C |
| E _{i(TOT)} | medeltemperatur i husen A-E vid tiden i | | °C |
| E _i | lägenhetstemperatur j i hus E | | °C |
| E _j | | | |

| | | |
|---------------------|--|---------------------------------------|
| E_n | regressionsparameter, skattat värde av $e_n, n=1-3$ | $\text{Wdygn}/\text{Cm}^2, \text{lg}$ |
| E_s | solstrålning per ytenhet, energivärdet | $\text{kWh}/\text{m}^2, \text{fas}$ |
| E_t | total energitillförsel per lgy (jfr P_t) | $\text{kWh}/\text{m}^2, \text{lg}$ |
| ΔE_t | minskning i total energitillförsel per lgy | $\text{kWh}/\text{m}^2, \text{lg}$ |
| $e(t)$ | reglerfelet = $T_{i, \text{ref}}(t) - T_i(t)$ | $^{\circ}\text{C}$ |
| e_i | slumpmässigt fel | $^{\circ}\text{C}$ |
| e_j | total temperaturvariation i lägenhet i | $^{\circ}\text{C}$ |
| e_1 | parameter i modell 1 = C | $\text{Wdygn}/\text{Cm}^2, \text{lg}$ |
| e_2 | parameter i modell 2 = $v^p C$ | $\text{Wdygn}/\text{Cm}^2, \text{lg}$ |
| e_3 | parameter i modell 3 = $(1 - v^g) C$ | $\text{Wdygn}/\text{Cm}^2, \text{lg}$ |
| fas | fasadyta | m^2 |
| FL _j | frånluftstemperatur nr j | $^{\circ}\text{C}$ |
| fy _j | fönsteryta | m^2 |
| hor | horisontell yta | m^2 |
| k | värmeegenomgångskoefficient, k-värde | W/Cm^2 |
| k, k_v | minskad varians vid perfekt återkoppling | 1 eller % |
| k_v | framkopplingskurvas lutning | 1 |
| k_b | specifikt värmebehov per lägenhetsyta | $\text{W}/\text{Cm}^2, \text{lg}$ |
| k_r | värmsystemets värmeöverföringsförmåga per lgy | $\text{W}/\text{Cm}^2, \text{lg}$ |
| k_p | proportionell regulatorförstärkning | 1 |
| k_s | minskad standardavvikelse vid perfekt återkoppling | 1 eller % |
| k_1, k_2, k_3 | förstärkningar i processmodell | 1 |
| l | antal lägenheter per frånluftskanal | 1 |
| l | framkopplingskurvas konstant | $^{\circ}\text{C}$ |
| lgy | lägenhetsyta | m^2 |
| n | totalt antal lägenheter | 1 |
| m | medelvärde | . |
| m | antal frånluftstemperaturer | 1 |
| $p(t)$ | gemensam förändring av lägenhetstemperaturerna vid perfekt återkoppling | $^{\circ}\text{C}$ |
| P_b | värmebehov (=ventilations- och transmissions-förluster) per lägenhetsyta | $\text{W}/\text{m}^2, \text{lg}$ |
| $P_{b, \text{nom}}$ | nominellt värmebehov per lgy, dvs P_b då $T_i = T_{i, \text{ref}}$ | $\text{W}/\text{m}^2, \text{lg}$ |
| $P_{b, \text{err}}$ | avvikande värmebehov per lgy då $T_i \neq T_{i, \text{ref}}$ | $\text{W}/\text{m}^2, \text{lg}$ |
| P_g | gratisvärme eller oreglerad värmeförsel per lgy | $\text{W}/\text{m}^2, \text{lg}$ |
| P_{gs} | gratisvärme per lgy från solinstrålning | $\text{W}/\text{m}^2, \text{lg}$ |
| $P_{g\ddot{o}vr}$ | gratisvärme per lgy som ej härrör från solinstrålning | $\text{W}/\text{m}^2, \text{lg}$ |
| P_l | värmefflöde per lgy som lagras i byggnaden | $\text{W}/\text{m}^2, \text{lg}$ |

| | | |
|--------------|--|--------------------------|
| P_r | styrd/reglerad värmeförsel per lgy | $W/m^2, lgy$ |
| P_{rerr} | avvikande värmeförsel per lgy då $T_i \neq T_{iref}$ | $W/m^2, lgy$ |
| P_{rfk} | avvikande värmeförsel per lgy då $T_f \neq T_{ffk}$ | $W/m^2, lgy$ |
| P_{rnom} | nominell värmeförsel per lgy, dvs P_r då $T_i = T_{iref}$ och $T_f = T_{ffk}$ | $W/m^2, lgy$ |
| P_s | global solstrålning per horisontell ytenhet | $kWh/dygn, m^2, hor$ |
| P_{svikt} | solstrålning per ytenhet fasad, viktat värde för de fyra vädersträcken | $kWh/dygn, m^2, fas$ |
| P_t | total värmeförsel per lgy (jfr E_t) | $W/m^2, lgy$ |
| $P_{övr}$ | effektförbrukning per lgy som ej avser uppvärmning | $W/m^2, lgy$ |
| Q | energiinnehåll i luftflöde (= q_{cqc}) | kJ/Cm |
| R^2 | determinationskoefficienten vid regression | 1 |
| $R(x,y)$ | korrelationen mellan X och Y | 1 |
| r | parvis korrelation | 1 |
| r_{ij} | parvis korrelation mellan frånluftstemperaturerna i och j | 1 |
| r_e | parvis korrelation mellan lägenhetstemperaturer | 1 |
| S_i | gemensam temperaturändring i alla lägenheter under vecka i vid perfekt gemensam återkoppling | $^{\circ}C$ |
| S_{Ni} | gemensam temperaturändring i alla lägenheter i hus N, N=A,B,C,D,E under vecka i vid perfekt separat återkoppling | $^{\circ}C$ |
| s | gemensam temperaturstörning i lägenheter | $^{\circ}C$ |
| s_{std} | standardavvikelse | . |
| $s_X(X)$ | skattad standardavvikelse i X | . |
| saf | "solavskärningsfaktorn", kvoten P_{gs}/P_s | $0.024m^2, fas/m^2, lgy$ |
| | eller vanligare kvoten P_{gs}/P_s | $0.024m^2, hor/m^2, lgy$ |
| T | tidskonstant | h eller dygn |
| T_f | framledningstemperaturen till radiatorerna | $^{\circ}C$ |
| ΔT_f | $\Delta T_f = T_f - T_{fanv}$, dvs normalt lika med regulatorns utsignal | $^{\circ}C$ |
| T_{fanv} | T_f enligt använd framkopplingskurva | $^{\circ}C$ |
| T_{ffk} | T_f enligt korrekt eller teoretisk framkoppl.kurva | $^{\circ}C$ |
| T_{fopt} | optimal framledningstemperaturen enl (2.18) | $^{\circ}C$ |
| T_i | innetemperaturen, även skattad innetemperatur med ledning av frånluftstemperaturen | $^{\circ}C$ |
| T_{iref} | önskad innetemperatur eller regulatorns börvärde | $^{\circ}C$ |
| T_{istat} | total insignal viktad av T_f, T_u, P_g | $^{\circ}C$ |
| T_{per} | periodtid för medelvärdesbildningen i effektbalans. | dygn |
| T_r | returtemperatur från radiatorerna | $^{\circ}C$ |
| T_{rad} | radiatortemperatur | $^{\circ}C$ |
| T_s | samplingstid för regulator, tidssteg i simulering | h |
| T_u | utetemperatur | $^{\circ}C$ |

| | | |
|-----------------|---|-----------|
| T_1, T_2, T_3 | tidskonstanter i processmodell | h |
| t | tid | h |
| t_c | t-fördelningen och t-kvoten för intervallskattning | 1 |
| $u(t), u_{reg}$ | regulatorns utsignal | ° C |
| $V(X)$ | variansen av X | . |
| v | varians | ° C |
| vbd | variationsbredd i T_f under medeldygn/dag | ° C |
| v_g | gratisvärmeutnyttjandet se (2.22) | 1 eller % |
| X, Y | allmän tidsserie | . |
| x, y | allmän lägenhets- respektive frånluftstemperatur | ° C |
| z | allmän medeltemperatur samtliga lägenheter | ° C |
| Δ | som prefix: förändring i tid eller rum, differensoperator | |

INDEX

| | | | |
|----|----------------------------|---|----------------------------|
| d | dimensionerande | j | lägenhet (avsnitt 4.1-4.3) |
| e | efter/med återkoppling | k | hus (avsnitt 2.2) |
| e | avseende variationen e_i | l | hus (avsnitt 2.2) |
| f | före/utan återkoppling | P | avseende P-regulator |
| fk | avseende framkoppling | p | avseende medelvärdesperiod |
| i | tid (avsnitt 4.4) | | |

FÖRKORTNINGAR

| | |
|-----|--|
| FK | reglering med enbart framkoppling från utetemperaturen |
| FÅK | reglering med framkoppling och central återkoppling från innetemperaturen / framledningstemperaturen |
| RoS | rapporten "Regler- och Styrprinciper ... " se referenslista |
| RTV | (reglering med) radiatortermostatventiler |

FÖRORD

Föreliggande rapport utgör en slutrapportering av byggforskningsprojektet "Energisnål reglering av inomhustemperaturen i flerbostadshus" (kapitel 1-3 och bilaga 1), och en delrapportering av byggforskningsprojektet "Reglerteknik för uppvärmningssystem" (kapitel 4 och bilaga 2).

Den första delen behandlar främst energibesparingen vid central återkoppling, uppmätt såväl som simulerad.

Den senare delen tar upp vad central återkoppling betyder för variationen i de enskilda lägenhetstemperaturerna.

För att möjliggöra en så fullständig bedömning som möjligt av central återkoppling så har vi bedömt det som lämpligast att presentera materialet i en samlad rapport, vilket skett på bekostnad av att slutrapporteringen av det första projektet försenats.

1 INLEDNING OCH ÖVERSIKT

Ett grundläggande funktionskrav på en byggnads värmesystem är att det kan anpassa värmeförseln till det rådande värmebehovet. Lyckas inte detta så kan inte innetemperaturen hållas på önskad nivå utan den kommer att variera i takt med variationen i utetemperatur och gratisvärme.

I ett flerbostadshus med vattenburen värme är detta speciellt viktigt eftersom det kan räcka med att några få lägenheter under en kortare tid har för låg innetemperatur för att man ska vara tvungen att permanent höja medeltemperaturen i hela huset. Detta kan också medföra övertemperaturer i de varmare lägenheterna med risk för ökad fönstervädning.

I flerbostadshuset med vattenburen värme måste alltså anpassning mellan värmeförseln och värmebehovet ske i både rum och tid. I det förra fallet gäller det att injustera flödesfördelningen i radiatorsystemet så att varje lägenhet får rätt andel av den totala värmeförseln. I det senare fallet gäller det att styra värmeförseln så att innetemperaturen kan hållas på önskad nivå trots varierande uteklimat och gratisvärme.

Det enklaste och idag vanligaste sättet att styra värmeförseln är med uteklimatkompensering, eller framkoppling från utetemperaturen, då framledningstemperaturen till radiatorerna bestäms av enbart utetemperaturen enligt en så kallad framkopplingskurva.

Styrningen kan förbättras genom att kombinera framkopplingen från utetemperaturen med en återkoppling från innetemperaturen. I så fall mäter man innetemperaturen och styr värmeförseln så att innetemperaturen får önskat värde. Detta kan utföras som en (lokal) återkoppling med radiatortermostatventiler vid varje radiator som reglerar flödet genom radiatorn efter den lokala innetemperaturen. Under de senaste 10-15 åren har installation av radiatortermostatventiler blivit allt vanligare vid nybyggnation och som energibesparande åtgärd.

Men återkopplingen kan också utföras på ett enklare sätt genom att mäta en medeltemperatur för hela huset och styra framledningstempe-

raturen så att denna medeltemperatur får önskat värde. Denna rapport behandlar just denna form av (central) återkoppling. Fördelar med den centrala återkopplingen jämfört med den lokala återkopplingen är enkelhet, flexibilitet och låg kostnad. Nackdelar är att temperaturvariationer mellan olika lägenheter på grund av gratisvärmetillskott eller bristande injustering av flödesfördelningen inte kan påverkas med central återkoppling.

En huvuduppgift i denna rapport är att bestämma vilken energibesparing man kan uppnå genom att komplettera det konventionella styrsättet med enbart framkopplingen med central återkoppling. I det första kapitlet ska vi ge en översikt. Den inleds med en återblick över vilket arbete som tidigare utförts. Därefter introduceras de två reglerprinciperna: framkoppling från utetemperaturen och återkoppling från innetemperaturen. Det som utåt sett skiljer de två reglerprinciperna är mätningen av lägenheternas medeltemperatur. Våra erfarenheter av denna viktiga mätning redovisas avslutningsvis i ett eget avsnitt.

Tidigare utfört arbete

Detta är den fjärde rapporten från institutionen för Byggnadskonstruktionslära vid Tekniska Högskolan i Lund som behandlar reglering av innetemperaturen i flerbostadshus. Arbetet har pågått under de senaste tio åren med professor Lars Jensen som drivande kraft.

Det första huset som studerades var ett 8-vånings höghus i kv Teknikern i Malmö. Ett antal energibesparande åtgärder utfördes i detta hus varav ett var att komplettera den konventionella uteklimatkompenseringen med återkoppling från innetemperaturen. Innetemperaturen skattades med frånluftstemperaturen. Först provades en datoriserad reglering. Institutionsdatorn vid inst för Reglerteknik, LTH, användes för att via telenätet och en lokalt placerad mät- och styrutrustning reglera värmesystemet. Modeller för systemet ventilpådrag-framledningstemperatur-frånluftstemperatur bestämdes i speciella identifieringsexperiment. En slutsats var att husen ur reglerteknisk synpunkt kunde betraktas som en enkel första ordningens modell med snabb dynamik och låg förstärkning. Med hjälp av modellerna kunde enkla P- och PI-regulatorer bestämmas. En poäng var att dessa regulatorer kunde ha hög förstärkning, ett värde på 40 använ-

des i Teknikerhuset, vilket betydde att framledningstemperaturen ändrade sig 40 °C om frånluftstemperaturen ändrade sig 1 °C. Därmed kunde frånluftstemperaturen regleras med hög noggrannhet, normalt inom ± 0.1 °C. Även om det inte är nödvändigt med så hög reglernoggrannhet i bostadshus visar siffrorna att man genom att välja en lägre regulatorförstärkning kan få god marginal mot instabil reglering.

Under tiden som reglerexperimenten pågick blockerades datorn. Experimenten måste därför göras korta, ofta utnyttjades nätter. Försöken finns rapporterade i Apelblat, Jensen och Rydström (1977).

För att kunna jämföra reglersätten under längre tid användes därefter en konventionell analog regulator (egentligen en villaregulator med rumsgivare). Regulatorn var dock inte idealisk. Endast återkoppling med P-reglering kunde användas och regulatorförstärkningen, som var låg och fast, försöktes höjas med hjälp av parallellkoppling av motstånd i elektroniken. En omfattande, separat mätvärdesinsamlare registrerade ett stort antal temperaturer och energiflöden. Resultatet var i alla fall upplyftande. Under en mätperiod av totalt 39 dygn i mars-maj 1980 med gynnsamt väder bestämdes energibesparingen till ca 30%. Jämförelsen gjordes med den befintliga konventionella utekompenseringen under en mätperiod av 79 dygn under våren 1979. Försöken finns rapporterade i Jensen och Lange (1982) (BFR R9:1982).

1980 kom de första mikrodatorbaserade reglercentralerna ut på marknaden. Nästa steg blev att installera sådana i Teknikerhuset. Med visst bistånd av tillverkaren modifierades reglercentralen en del i program- och hårdvara för att kunna utföra enklare bearbetning och lagring av mätdata. Reglercentralen kunde nu användas som en komplett mät- och reglerutrustning. Systemet blev enkelt och billigt och fler hus kunde utrustas.

Totalt sju försökshus utrustades under 1981. En urvalsprincip var att välja flera lika hus för att kunna göra jämförande mätningar med olika reglersätt under lika yttre omständigheter. Detta är enkelt eftersom reglercentralen är programmerbar och via telenätet kan styras från en persondator, som utgör huvudcentral för flera reglercentraler. Däremot kunde inte de nya husen mätas lika inten-

sivt som gjorts med Teknikerhuset. Endast tre frånluftstemperaturer, fram- och returledningstemperaturer, utetemperatur och total energiåtgång har registrerats i form av timmedelvärden för varje hus.

Försökshuset som valdes var ett tvillinghus till det tidigare försökshuset Teknikern, två 8-våningshus vid brf Annesberg i Malmö och tre "försökshus" vid brf Tingvallen i Lund. De sistnämnda består i själva verket av vardera ett kvarter om fem trevåningshus, som betjänas av samma värmecentral.

Med de nya reglercentralerna fanns större frihet att välja regler-sätt och regulatorparametrar. Reglertekniska modeller identifierades även för de nya husen. Dessa skilde sig inte så mycket från de tidigare bestämda, vilket innebar att samma regulatorer kunde användas i de nya husen.

Nu kunde regulatorförstärkningen höjas och inte bara P-regulatorer utan även PI-regulatorer användas igen. Även i de nya försökshusen (ej försökshuset på Anneberg) kunde frånluftstemperaturen regleras med stor noggrannhet, bättre än ± 0.1 °C. Vid stora tillskott av gratisvärme kan dock inte önskad temperatur hållas, vilket är naturligt då detta kan kräva kyla.

Även reglerad nattsänkning provades med gott resultat. Den möjliga temperatursänkningen under natten blev dock liten i försökshuset på grund av husens stora tröghet.

Noggrann reglering av frånluftstemperaturen medför dock att framledningstemperaturen varierar kraftigt under dygnet för att kompensera gratisvärmens och den spontana temperaturvariationen i huset, se FIG.1.5. Framledningstemperaturen ligger därför, då nattsänkning ej används, över den normala framkopplingskurvan på natten och under den på eftermiddagen och kvällen.

De stora variationerna i radiatortemperaturen och att radiatorerna kändes "kalla" fram emot kvällen orsakade en del klagomål. Hyresgästernas inställning kunde enklast sammanfattas till att man besvärades mindre av att innetemperaturen varierade under dygnet än av att radiatortemperaturen varierade under dygnet.

En enkel, men ej idealisk, lösning på detta var att begränsningar infördes på hur mycket framledningstemperaturen fick avvika från den normala framkopplingskurvan.

Problemen pekade på behovet att finna en reglerprincip som klarar av det som är viktigt ur energi- och komfortsynpunkt, nämligen att hålla rätt medeltemperatur på lång sikt. Däremot är det inte så viktigt att hålla rätt temperatur under varje tid på dygnet. I alla fall inte om detta, liksom i de "tunga" försökshusen, är till pris- set' av onödiga besvär och klagomål.

Resultaten finns rapporterade i "Regler- och styrprinciper för inomhustemperaturen i flerbostadshus med vattenburen värme" av Hedin och Jensen (1983). I fortsättningen ska vi förkorta detta till RoS när denna rapport refereras. Rapporten innehåller, förutom beskrivningen av reglerförsöken, en utförlig beskrivning av försökshusen och mät- och reglerutrustningen. Vidare görs även en teoretisk analys av nattsänkning och temperaturreglering i en byggnad med fram- och/eller återkoppling.

Ett grundbegrepp när man analyserar temperaturreglering i en byggnad är gratisvärmeutnyttjandet. Detta anger hur stor andel av ett värmetillskott som kan tillgodogöras genom en minskning av den styrda värmetillförseln. En bra reglering ger ett högt gratisvärmeutnyttjande och därmed lägre energiåtgång och hög reglernoggrannhet.

I RoS beräknades det teoretiska värdet på gratisvärmeutnyttjandet för olika reglersätt. Detta visade att gratisvärmeutnyttjandet i normala hus blir 40-50% vid enbart framkoppling och 90-100% vid återkoppling. Något som saknades i RoS var dock en bestämning av vilket gratisvärmeutnyttjande man ska uppnå vid praktisk reglering under en länge tid.

Föreliggande arbete kan ses som en fortsättning där RoS slutade. En huvuduppgift är att bestämma gratisvärmeutnyttjandet och energibesparingen vid de olika reglersätten. Ett annat syfte är att jämföra olika sätt att utföra återkopplingen.

Framkoppling, lokal och central återkoppling

Vi ska nu kort beskriva de två reglerprinciperna framkoppling från utetemperatur och återkoppling från innetemperaturen. En utförlig genomgång av dessa reglerprinciper återfinns i RoS, kapitel 4. De kommer också att behandlas matematiskt i nästa kapitel.

Värmebehovet för en byggnad bestäms som bekant till största delen av ventilations- och transmissionsförlusterna. Dessa är proportionella mot temperaturskillnaden inne-ute. För att få en konstant innetemperatur är det därför naturligt att även låta värmeförselns storlek bero på utetemperatur. I ett hus med vattenburen värme sker detta genom att framledningstemperaturen styrs efter en funktion av utetemperatur, den s k framkopplingskurvan.

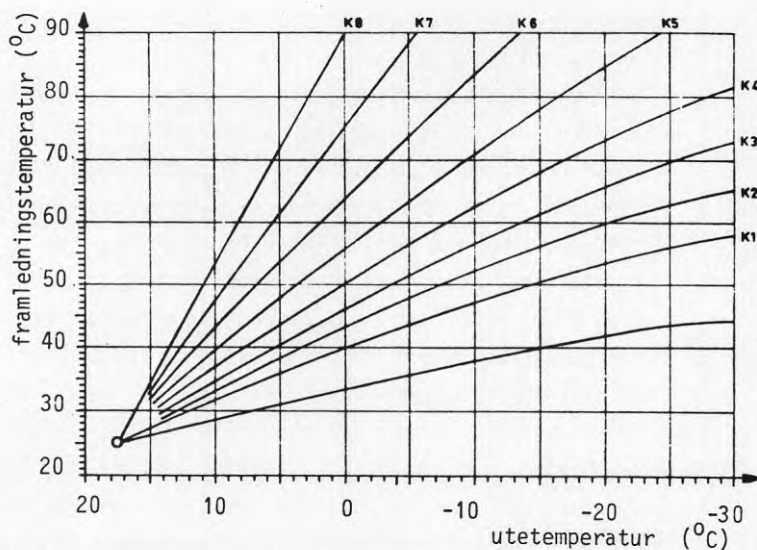


FIG.1.1 Exempel på framkopplingskurvor.

Denna reglerprincip för att hålla önskad innetemperatur kallas framkoppling från utetemperatur, ibland säger vi bara framkoppling eller FK. Andra namn är även uteklimat- eller väderkompensering.

För att få konstant eller önskad innetemperatur krävs att rätt framkopplingskurva väljs. I praktiken är detta en svår uppgift. En

felaktig inställning medför långsamma temperaturvariationer i takt med variationer i utetemperaturen. Likaså medför varierande tillskott av gratisvärme, t ex solinstrålning, att innetemperaturen varierar.

I FIG.1.2 visas några typiska temperaturförlopp för inne-, fram- och utetemperatur då framkoppling används. I FIG.1.3a-c visas enbart innetemperaturen, men för längre tidsperioder, hämtade från några andra BFR-projekt.

I FIG.1.3c har vi även markerat den möjliga temperatursänkningen som en förbättrad reglering hade gett om innetemperaturen hade hållits konstant på årets lägsta nivå. Eventuellt kan en ytterligare sänkning vara befogad eftersom det inte är säkert att just denna nivå hade valts om man enkelt hade kunnat ställa in önskat värde och vetat att detta värde ej underskrids.

Energimässigt kan - vi bortser nu från eventuella konstanta gratisvärmertilskott - den möjliga besparingen ses som den markerade temperatursänkningen jämfört med den totala temperaturskillnaden inne-ute. Detta kan också vara en underskattning eftersom den uppmätta innetemperaturen kanske varit ändå högre om man inte hade vädrat bort övertemperaturer. Figuren ger i alla fall en fingervisning om hur stor energibesparing man kan vänta sig med en förbättrad reglering. För att kunna spara t ex 10% av energiåtgången krävs att framkopplingskurvan är rejält felvald. En rimligare första uppskattning är kanske hälften, eller 5% energibesparing.

I praktiken är det alltså svårt att finna rätt framkopplingskurva. Två regulatorparametrar ska väljas regulatorkurva (lutning) och parallellförskjutning (konstant). Normalt inställningsförfarande är helt enkelt att prova sig fram och justera kurva efter klagomål och kanske några mätningar av innetemperaturen vid olika utetemperaturer. För att vara garanterad att man alltid använder rätt framkopplingskurva skulle det vara nödvändigt att ständigt mäta innetemperaturen och justera kurvvalet.

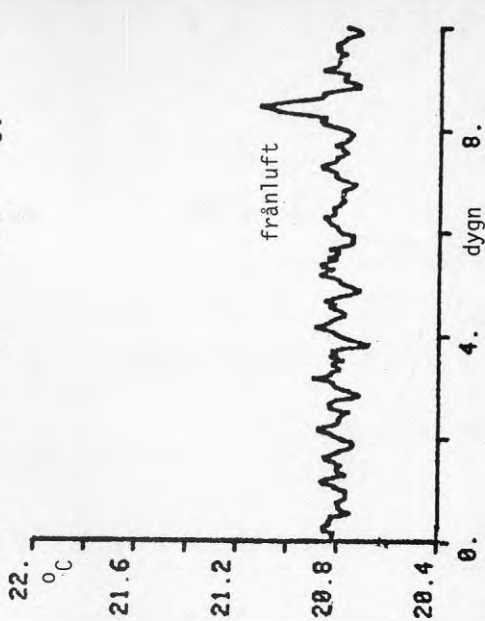
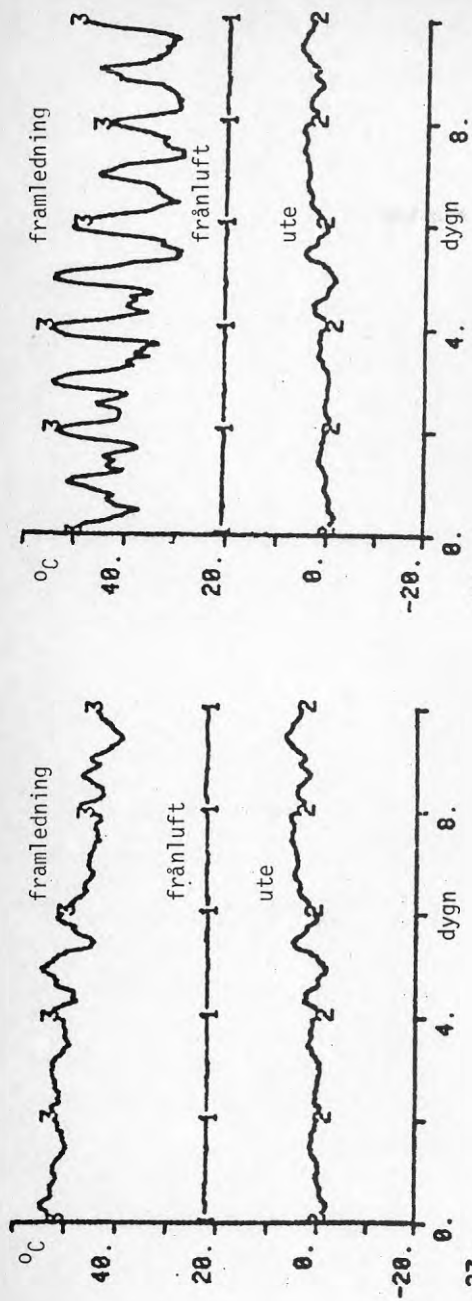


FIG.1.2 Framledningstemperatur, frånluftstemperatur och utetemperatur under 10 dygn med uteklimatkompensering och utan nattsänkning. Till höger motsvarande temperaturer i ett likadant hus men med central återkoppling. (se även FIG.1.5)

Framledningstemperatur, innetemperatur och utetemperatur och därunder innetemperatur med större upplösning under 10 dagar med uteklimatkompensering och utan nattsänkning. Tingvallen, försökshus H5 (Fall 1A).

Framledningstemperatur, innetemperatur och utetemperatur och därunder innetemperatur med större upplösning under 10 dagar med inneklimatkompensering och utan nattsänkning av önskad innetemperatur. Tingvallen, försökshus H6. (Fall 1A, svag begränsning).

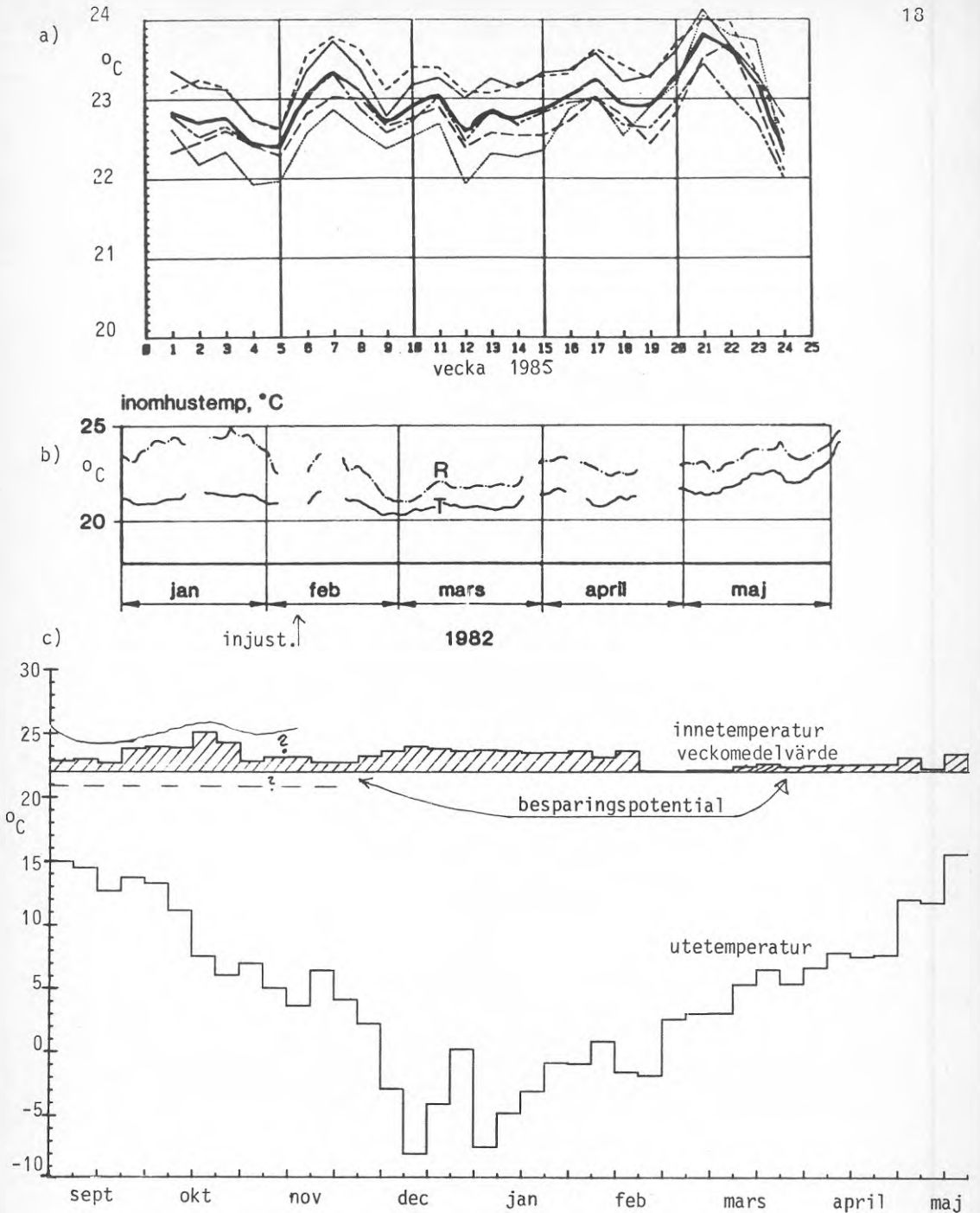


FIG.1.3 a) Husmedeltemperaturer kv Hussvalan från Fredlund och Lange (1985), b) lägenhetstemperaturer uppmätta i Ulvsundaprojektet från Peterson (1984) och c) husmedeltemperatur och utetemperatur kv Hussvalan, 1981 (opublicerad).

Just detta är också kärnpunkten i den andra reglerprincipen: (central) återkoppling från innetemperaturen, ibland säger vi bara återkoppling. Observera att man normalt behåller framkopplingen från utetemperaturen. Reglersättet är därför en fram- och återkoppling (FÅK). Andra namn är inneklimatkompensering och frånluftstemperaturreglering. Den senare beteckningen används eftersom frånluftstemperaturen ofta kan användas som en bra skattning av medeltemperaturen i huset.

Vid återkoppling mäter man innetemperaturen och jämför den med den önskade innetemperaturen (börvärdet). Skillnaden, eller reglerfelet, används för att beräkna hur mycket framledningstemperaturen ska avvika från framkopplingskurvan.

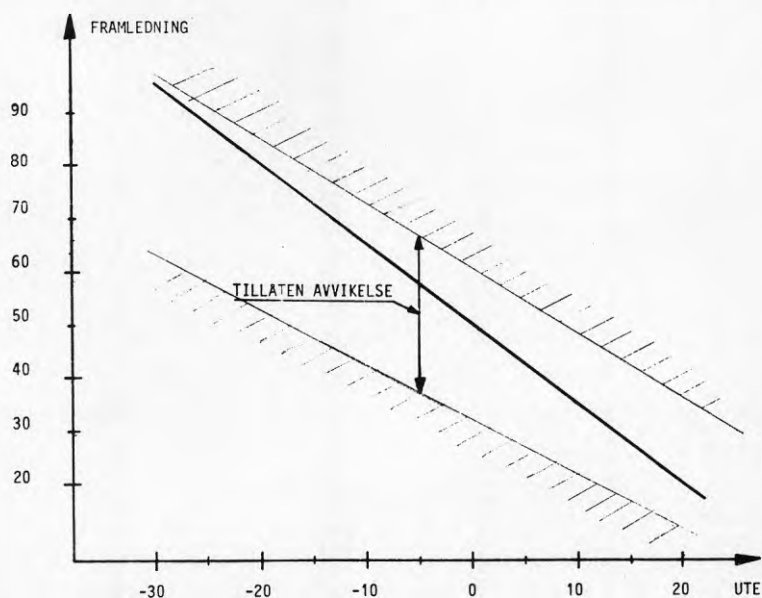


FIG.1.4 Exempel på intervall för framledningstemperaturen vid återkoppling från innetemperaturen då begränsningar används. Den kraftigt ritade linjen anger den normala framkopplingskurvan.

I det enklaste fallet, proportionell återkoppling eller P-reglering, väljs avvikelsen som en konstant regulatorförstärkning multiplicerad med reglerfelet.

I FIG.1.5 visas några typiska temperaturförlopp för inne-, fram- och utetemperatur då framkoppling plus återkoppling används.

Eftersom radiatortermostatventiler (RTV) blir ett allt vanligare komplement till den gängse uteklimatkompenseringen så är det naturligt att jämföra central återkoppling med lokal återkoppling med radiatortermostatventiler.

De använda försökshusen har dock inte haft radiatortermostatventiler. Husen valdes så för att underlätta analysen av försöken. Det hade annars kunnat bli svårt att skilja RTV:s reglerande verkan på innetemperaturen via flödet från den centrala återkopplingens verkan via framledningstemperaturen.

Nu är reglering med radiatortermostatventiler ett komplext område (betydligt mer komplicerat än reglering med central återkoppling). Det finns därför ingen möjlighet att göra någon grundligare jämförelse här utan vi ska nöja oss med att diskutera några likheter och skillnader mellan central och lokal återkoppling med RTV. Först ska vi bara säga en del allmänt om användningen av RTV.

De senaste 10-15 åren har radiatortermostatventiler blivit allt vanligare i såväl småhus som flerbostadshus. Dels byts manuella radiatorventiler ut mot RTV som en energibesparande åtgärd i det befintliga bostadsbeståndet, dels har det i det närmaste blivit standard med RTV vid nyproduktion.

Till en början hade RTV stora brister. Frånvaro av maxbegränsning av flödet och allt för stor värmeöverledning mellan ventilhus och känslkropp var exempel på brister som gjorde att en förväntad energibesparing kunde vändas till sin motsats. För att höja standarden infördes 1978-1979 typgodkännanderegler för RTV och uppfyllande av dessa ställdes som krav för energisparstöd.

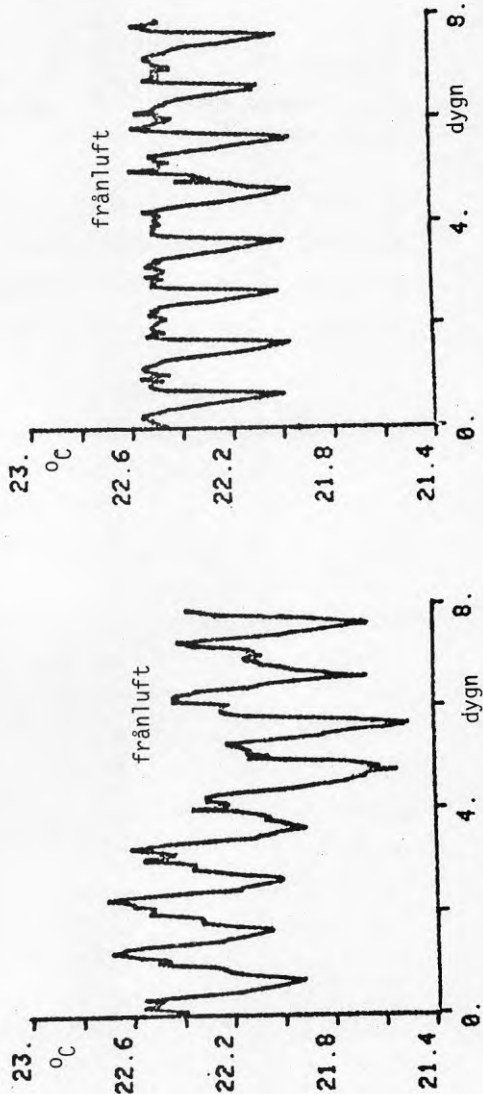
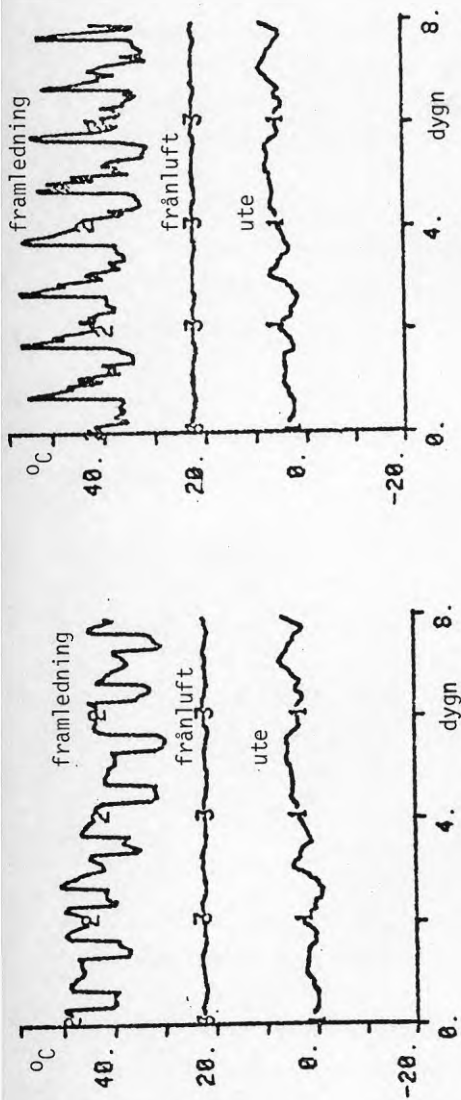


FIG.1.5 Framledningstemperatur, frånluftstemperatur och utetemperatur under 8 dygn med central återkoppling och med nattsänkning (till höger). Till vänster motsvarande temperaturer i ett likadant hus men med uteklimatkompensering. (se även FIG.1.2)

RTV:s energibesparande förmåga skattas ofta som stor vid teoretiska överväganden. I praktiken har det varit svårt att verifiera denna. En större undersökning, Landskronaundersökningen, till exempel som utfördes 1977-1979 av institutionen för Byggnadskonstruktionslära, LTH i samarbete med HSB gav inget entydigt svar om energiförbrukningen ökade eller minskade med RTV, se Lange och Lundgren (1979).

Därefter har RTV förbättrats bl a beroende på kraven på typgodkännande. Men det tycks fortfarande vara oklart om och i så fall hur mycket energi RTV sparar i fältmässig användning. En vanlig uppfattning är dock att många hus med RTV har bristfällig reglering.

Ett exempel ger Fredlund (1985) efter en energiteknisk utvärdering av fem flerbostadshus med (typgodkända) RTV installerade 1983.

Citat från sammanfattningen:

"Från intensivmätningarna har konstaterats att vattenflödet till radiatorsystemet reduceras av radiatortermostatventilerna först då veckomedeltemperaturerna i lägenheterna uppgår till ca 24 °C. Den ojämna temperaturnivån mellan husen resulterar i att då flödet stryps in av termostaterna i de varmare husen så fås en omfördelning så att de svalare husen samtidigt erhåller ökat flöde under t ex soliga perioder. Eftersom termostatventilerna inte har avsedd verkan, t ex för högt satt maxbegränsning, är reglerkurvans inställning helt avgörande för god energianvändning".

I en annan undersökning, en studie av ca 130 flerbostadshus rapporterad i Widegren, Dafgård (1983), har innetemperaturen uppmätts i ett stort antal lägenheter. Ett resultat var att ingen signifikant skillnad i temperaturnivå eller i minskad temperaturspridning kunde påvisas mellan lägenheter som hade eller inte hade RTV, se FIG.1.6. En fördel med RTV var dock möjligheten att påverka innetemperaturen med ventilens handreglage. Denna möjlighet föreföll ge en förbättrad komfortupplevelse. Det senare kan vara värt att beakta vid central återkoppling där man åtminstone på kort sikt faktiskt minskar de boendes förmåga att själva reglera sin värmeförsel, genom en stor och för den boende oförutsebar variation av framledningstemperaturen.

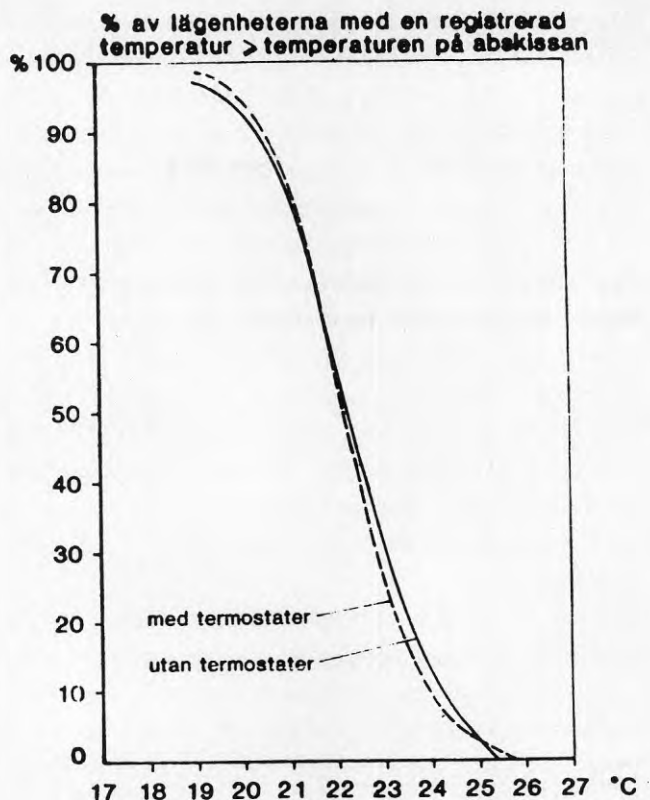


FIG.1.6 Kumulativ fördelning av inomhustemperaturen i flerfamiljs-
hus med respektive utan termostatiska radiatorventiler.
(Från Widegren, Dafgård (1983)).

Eftersom radiatortermostatventilerna i praktiken ofta inte har någon större inverkan på innetemperaturen så kan vi som exempel på typiska temperaturförlopp för innetemperaturen ange samma figurer som för framkoppling. I själva verket regleras också de fem husen i FIG.1.3a och det ena huset (märkt T) i FIG.1.3b med typgodkända RTV. Observera att den konstanta skillnaden mellan de två husen R och T i FIG.1.3b inte är ett tecken på bättre reglering utan enkelt kan elimineras genom en parallellförskjutning av framkopplingskurvan.

En jämförelse mellan lokal återkoppling med RTV och central återkoppling kan innehålla följande punkter:

Princip. Båda reglersätten innebär en återkoppling från innetemperaturen till värmeförseln. Men medan RTV är en lokal mekanisk regulator med lokal återkoppling i rummet så har FÅK en central, eventuellt programmerbar, regulator med global återkoppling från en genomsnittstemperatur i byggnaden. Den lokala verkan är RTV:s stora förtjänst. Lokala värmeöverskott kan tillgodogöras. FÅK, däremot kan endast utnyttja det genomsnittliga värmeöverskottet. En risk föreligger härvid att rum utan värmeöverskott får för låg temperatur medan temperaturen i rum med stora överskott inte sänks tillräckligt.

En nackdel med RTV är att det stora antalet ventiler, en per radiator, gör att den måste byggas enkel och billig. Ett exempel är att RTV med lös känselkropp minskar risken för värmeöverledning från radiatoren, men att det av kostnadsskäl är vanligast att ha en fast känselkropp.

Reglerfunktion. Med en datoriserad reglercentral för FÅK kan många olika reglerteorier utnyttjas t ex proportionell och integrerande reglering, dygnsreglering och varierande börvärde under dygnet. Flexibiliteten är stor. Möjligheten finns även att integrera regleringen med övervakning och larm etc. Även med en enklare reglercentral så kan medeltemperaturens börvärde och kanske regulatorförstärkningen väljas.

RTV, däremot, är en mer statisk regulator. Den är en (olinjär) proportionell regulator och dess förstärkning beror på ventilens dimensionering i förhållande till värmesystemet. Förstärkningen kan normalt inte ändras enkelt utan demontering. Börvärdesinställningen bestäms med ett handreglage som har ett inställbart maxvärde, ej heller detta kan enkelt ändras. Om ett värmesystem med RTV inte fungerar tillfredsställande är det således svårt att justera. Ändrar man förregleringen av framledningstemperaturen för att få en annan temperatur än den förinställda på RTV så sätts RTV:s reglerförmåga ur spel.

Kostnad. En reglercentral för framkoppling från utetemperaturen behövs normalt i båda fallen. Moderna reglercentraler är redan idag ofta förberedda för att kunna återkoppla från en rumsgivare. Däremot är det inte alltid säkert att önskad regulatortyp och regula-

torförstärkning kan ställas in. Att ändra i elektronik eller programvara så att det passar vid central återkoppling är enkelt för fabrikanterna. Kostnaden för ledningsdragnings och temperaturgivare för mätning av lägenhets- eller frånluftstemperaturen kan variera mycket, se även nästa avsnitt om innetemperaturmätning. En uppskattning är en kostnad på 0.5-2 kkr per mätplats. Merkostnaden vid central återkoppling kan uppskattas till 10 kkr, i gynnsamma fall 5 kkr.

Den försöksutrustning i använt sedan 1981 kostade då komplett 15-20 kkr. Dessa reglercentraler har kapacitet även för enklare bearbetning och lagring av mätdata. Alternativt skulle var och en av dessa reglercentraler kunna arbeta som fyra separata regulatorer för central återkoppling.

Kostnaden för installation av RTV är grovt 0.1-0.2 kkr per radiator. Normalt är att utrusta samtliga radiatorer. Total kostnad inkl källare mm blir grovt 0.5-1.0 kkr per lägenhet. För hela området Tingvallen i Lund, som nu är utrustat med tre st datoriserade reglercentraler, skulle kostnaden för installation av RTV enligt ett kostnadsförslag 1983 (som en del i ett större åtgärdsprogram) bli 300 kkr. Detta är drygt 10 ggr mer än vad installation av central återkoppling kostar.

Observera att kostnaden vid central återkoppling blir ungefär densamma oberoende av husets storlek. Med radiatortermostatventiler är kostnaden däremot proportionell mot antalet radiatorer eller lägenheter.

Ekonomi. Eftersom energibesparingen då man använder RTV är okänd så kan vi inte göra någon jämförelse. För central återkoppling gäller att eftersom investeringen är så pass liten räcker det med en mindre energibesparing per år för att investeringen ska bli lönsam. Exempelvis i försökshuset på Tingvallen med (hela) 13800 m² lägenhetsyta per reglercentral är en energibesparing på 3.6 kWh/m², lgy, år tillräcklig för att återbetala en investering på 10 kkr på ett år vid ett fjärrvärmepris på 0.2 kkr per MWh.

Kombinationsmöjligheter. Vi har hittills betraktat central återkoppling och radiatortermostatventiler som alternativa metoder att

reglera innetemperaturen i bostäder. Ett förslag kunde också vara att kombinera reglersättet - förutsatt att man kan visa att RTV ger en kostnadsbesparing. Den centrala återkopplingen sköter då den övergripande regleringen medan radiatortermostatventilerna utnyttjar lokala värmeöverskott. RTV skulle i detta fall bara behöva installeras i de rum som förväntas ha stort tillskott av gratisvärme såsom kök och rum i söderläge. En poäng med att inte ha RTV på alla radiatorer är att förhindra låsningar då de två sätten att återkoppla motarbetar varandra. Dessutom bör kostnaden för det kombinerade systemet bli lägre med enbart RTV på samtliga radiatorer.

Sammanfattningsvis kan sägas att radiatortermostatventiler och central återkoppling är två komplement till den gängse uteklimatkompenseringen. Medan installation av RTV är en omfattande och kostsam åtgärd så är installation av FÅK relativt enkelt och billigt. FÅK kan ge en liten men säker energibesparing. RTV har en större potentiell besparingsmöjlighet som det dock synes svårt att uppnå i praktiken.

Innetemperaturmätning

Nyckeln till framgång med återkoppling är att man direkt eller indirekt kan mäta en rättvisande temperatur i byggnaden.

En rättfram metod är att mäta temperaturen i ett antal lägenheter och bilda medelvärdet. Eventuellt efter att först ha uteslutit de mest extrema värdena för att minska risken vid fel eller manipulation av givare. I hus med självdragsventilation är direkt mätning enda möjligheten. Nackdelen med att mäta direkt är att kabeldragningen kan bli svår och kostsam. Det gäller också att mäta i representativa lägenheter.

I hus med frånluftsventilation är det ofta enklare att mäta temperaturen i frånluften vid frånluftsfläkten. Temperaturen är här ett naturligt medelvärde för alla ventilerade lägenheter. Vi har bra erfarenheter av ventilationskanalerna av plåt (typ SPIRO-rör). De är täta och ofta brandisolerade, vilket minskar deras värmeförluster. Plåtkanalernas temperaturdynamik är snabb och kan försummas i sammanhanget. Ventilationskanaler gjutna i betong, däremot, har en temperaturdynamik som består av en mindre direkt del och en dominerande fördröjd och långsam del. Det är därför inte säkert att lika hög regulatorförstärkning kan användas utan att äventyra stabiliteten. Med sänkt regulatorförstärkning försämras reglernoggrannheten. I stort behöver dock inte betongkanaler utgöra någon större olägenhet.

I sökandet efter försökshus träffade vi även på hus där frånluftstemperaturen vid fläkten inte gick att använda. Ett hus hade stora läckor i frånluftskanalen, ett annat äldre hus hade oisolerade betongkanaler på vindsbjälklaget som gav ett stort temperaturfall.

Att skatta innetemperaturen som frånluftstemperaturen är enkelt och kan ge bra resultat. Flera fallgropar finns dock på vägen. Ett inte ovanligt problem är att ventilationsluften även innehåller luft från trapphus och källarlokalerna med en temperatur som inte samvarierar med bostadstemperaturen. Udda lokaler som torkrum, med tidvis mycket höga frånluftstemperaturer, kan påverka mätresultatet. Andra tänkbara problem, som vi dock inte stött på, är slarv med stängning av rensluckor och skador på givare i samband med

rensning. Fläktstopp behöver inte medföra problem eftersom självdragsventilationen speciellt i höga hus blir betydande. Kombinationen längre fläktstopp och kraftig vind kan dock vara farlig.

Ett mindre problem i sammanhanget är att kontrollventiler ofta finns i badrum och kök och i takhöjd. Man får därför räkna med att frånluftstemperaturen är något högre än bostadstemperaturen. En sådan konstant skillnad är lätt att kompensera i reglercentralen.

En tredje metod att bestämma innetemperaturen är att skatta den från mätningar av fram- och returledningstemperaturen. Denna princip behandlas teoretiskt och experimentellt i RoS kapitel 7, men har inte tillämpats vid reglering.

Reglering med återkoppling står och faller med att korrekt bostadstemperatur kan mätas. Denna praktiska del av reglersystemet är också den som skiljer sig mest från hus till hus. Vi ska därför kort kommentera hur mätningarna av innetemperaturen utförts i de sju försökshusen. En utförlig beskrivning av husen finns i RoS, kap 2.

Alla försökshusen har frånluftsventilation och mätning har skett i frånluften. Erfarenheterna är inte helt entydiga. De två husen på Teknikern har varit nästan helt problemfria. Frånluftstemperaturgivaren placerades till en början efter frånluftsfläkten i utblåset och utan skydd mot det fria. Vid regn kunde givaren bli blöt med mätfel som följde. Givaren fick ersättas med två stycken givare placerade i var sin frånluftskanal före fläkten. En stor fördel i dessa hus är att bostadsventilationen är separerad från ventilation av källarlokalerna och trapphus. Ventilationskanalerna är av plåt och brandisolerade. Ledningsschakt finns till fläktrummet vilket för- enklade ledningsdragningen.

De tre försökshusen på Tingvallen har fördelen av att ventilationsfläktarna finns i källarplanet. Ledningsdragningen blev därför enkel. Ventilationskanalerna är av plåt men ventilationen är inte separerad. En nackdel är vidare att samlingsboxen för frånluft är utförd så att man inte enkelt kan mäta temperaturen i enbart bostadsluften. Bra mätvärde erhöles dock efter avstängning av ventilationen av ej längre använda sopnedkast. Konstruktionen var sådan att ett stort flöde uteluft sögs genom schaktet för sopnedkastet.

Senare har det visat sig att det i vissa mätpunkter fortfarande finns någon mindre felkälla som orsakar viss temperaturdrift. I efterhand kan man konstatera att det bästa varit om flera mätgivare placerats i bostadsfrånluften före samlingsboxen, alternativt att samlingsboxen byggts om så att frånluften från lägenheterna hade separerats.

I de två försökshusen på Anneberg är ventilationsschakten gjutna. Via samlingslådor i vindsplanet går frånluften sedan i isolerade plåtkanaler till frånluftsfläkten. Ledningsdragningen till fläktrummet var inte idealisk. Enda enkla möjligheten var att dra ledning parallellt med centralantennens kabel. Tyvärr gav detta upphov till störningar i temperaturmätningen. Ett annat problem var att varm luft från torkrum påverkade vissa mätpunkter som därför fick uteslutas. Efter lämpliga åtgärder blev mätningarna acceptabla.

2 ENERGIBESPARING VID CENTRAL ÅTERKOPPLING

2.1 Inledning

I tidigare nämnda rapporter (Jensen, Lange (1982) och RoS (1983)) har vi visat att styrning av innetemperaturen med återkoppling har två viktiga fördelar jämfört med enbart framkoppling från utetempe- raturen, nämligen

- kompensering av felaktigt vald framkopplingskurva
- utnyttjande av gratisvärme genom sänkning av fram- ledningstemperaturen

Båda egenskaperna påverkar energiförbrukningen. Den kompenserade framkopplingskurvan kan antingen öka eller minska energiförbruk- ningen beroende på om kurvan är för högt eller för lågt vald medan rätt utnyttjande av gratisvärmern ger en energibesparing.

Syftet med detta kapitel är att bestämma om man kan göra en energi- besparing - och i så fall hur stor besparingen blir - då konventio- nell styrning av framledningstemperaturen med framkoppling från utetemperaturen (FK) kompletteras med återkoppling från innetempe- raturen (FÅK).

Nu är det dock inte helt entydigt vad som ska räknas in i begreppet energibesparing när olika reglersätt jämförs. Vid komplettering av framkoppling med återkoppling så kan eventuellt en lägre energi- förbrukning erhållas genom att

- 1) vädring och invändig skuggning av fönster minskar
- 2) övertemperaturer vid gratisvärmestillskott undviks genom en sänkt framledningstemperatur
- 3) medeltemperaturen kan sänkas eftersom temperaturvariatio- nerna minskar och marginalen mot klagogränsen därmed kan minskas
- 4) medeltemperaturen kan sänkas eftersom man vid återkoppling har kännedom om och enkelt kan påverka temperaturnivån

Av dessa fyra "energibesparingar" är det bara den första som är en äkta energibesparing eftersom den lägre energiförbrukningen inte motsvaras av en sänkning av medeltemperaturen. Beroende på vad man

avser med energibesparing så kan även en eller flera av de övriga sänkningarna av energiförbrukningen räknas med.

Eftersom det finns olika sätt att definiera energibesparingen så finns det också olika metoder att uppmäta dess storlek. Vi ska nu diskutera tre alternativa metoder att bestämma energibesparingen. I grova drag gäller att metod I mäter alla fyra besparingarna ovan, metod II mäter den andra och tredje besparingen och metod III mäter de två första besparingarna.

Genomgången av de tre metoderna är tänkt att belysa vilka svårigheter som finns när det gäller att bestämma ett entydigt mått på vilken energibesparing som en förbättrad reglering kan ge. Den tjänar också som motivering till varför den tredje av dessa metoder har valts i detta kapitel.

(Innan vi går in på de tre metoderna så ska vi först fastlägga vad vi menar med normalt utnyttjande av framkoppling när det gäller val av framkopplingskurva: Att mäta innetemperaturen vid några utetemperaturer och justera framkopplingskurvan herefter kan anses som normalt vid utnyttjandet av framkoppling. En viss (manuell) återkoppling från innetemperaturen finns alltså redan vid konventionell reglering. Men om man justerar framkopplingskurvan varje vecka eller dag så ändras reglerprincipen gradvis mot återkoppling. Med framkoppling förstås i fortsättningen fallet att en bestämd framkopplingskurva utnyttjas hela året.)

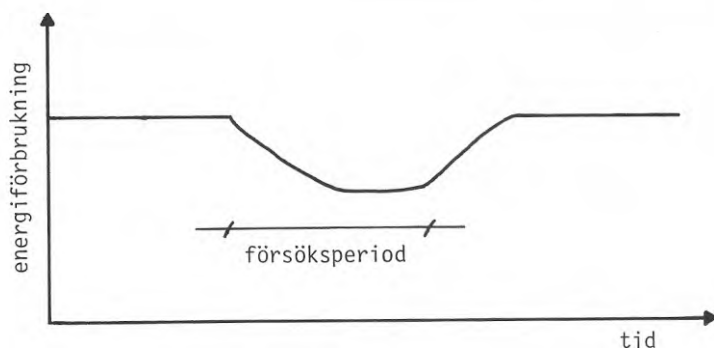
Metod I. En rättfram metod är att gå in i ett befintligt hus som regleras med framkoppling och bestämma energiförbrukningen. Därefter installeras FÅK och den nya energiförbrukningen bestäms. Energibesparingen bestäms som skillnaden efter korrektion för uteklimatet. Ett sådant "före-efter" försök är kanske det som bäst beskriver vilken energibesparing man kan uppnå i praktiken.

Men vilken slutsats ska dras av försöket? Betyder en uppmätt energibesparing att det nya systemet är bättre, eller att det gamla systemet inte utnyttjades på rätt sätt. Man kan, med viss rätt, påstå att fel framkopplingskurva har använts i det första fallet och att samma energibesparing hade kunnat uppnås med en lägre framkopplingskurva, som givit samma genomsnittliga innetemperatur.

Detta är en grundläggande osäkerhet då denna metod används. Frågan är: Vilken framkopplingskurva ska användas och hur ska man veta om man använder bästa möjliga framkopplingskurva? Utan återkoppling så bestäms nämligen energiförbrukningen till stor del av valet av framkopplingskurva men det finns inget enkelt sätt att bestämma korrekt framkopplingskurva. Det är till och med tveksamt om det över huvud taget finns någon "korrekt" framkopplingskurva eftersom det bästa valet av framkopplingskurva varierar med solinstrålningen och därmed med årstiden.

På samma sätt kan man diskutera vilket börvärde som ska användas vid regleringen med återkoppling. Valet av framkopplingskurva och börvärde bestämmer energibesparingens storlek. Med andra ord bestäms uppnådd besparing till stor del redan i planeringen, innan "före-efter"-försöket påbörjas!

En variant av försöksmetoden är att försöka pressa ner energiförbrukningen maximalt med båda reglersätten. Framkopplingskurvan och börvärdet vid återkoppling väljs då så nära "klagogränsen" som möjligt. Detta är en farlig försöksmetod. Många hyresgäster är fördragsamma till en viss gräns. Därefter kan det vara mycket svårt att få slut på klagomålen. Denna metod har vi tidigare använt i försökshuset på Teknikern. Efter försöksperiodens slut är risken sedan stor att förhållandena återgår till det gamla, jämför den s k "badkarskurvan" nedan.



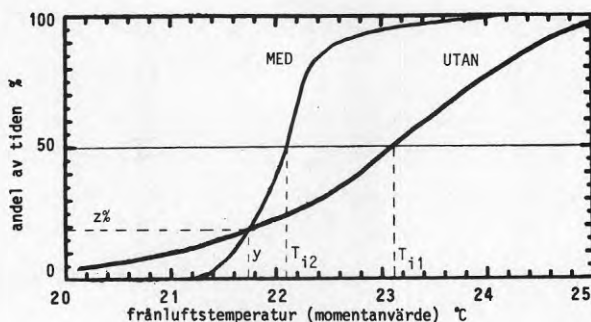
Även i detta fall kan man således diskutera innebörden av en uppmätt energiförbrukning.

Sammanfattningsvis är det med metod I svårt eller omöjligt att bestämma vilken del av en uppmätt energibesparing som specifikt beror på den förbättrade regleringen. Därmed är det också svårt att generalisera resultatet till vilken energibesparing man kan uppnå i ett annat hus.

Metod II. Syftet med återkoppling är att kunna hålla en jämnare innetemperatur. Med mindre temperaturvariationer är det möjligt att sänka medeltemperaturen närmare klagogränsen och därmed erhålla en energibesparing.

Betrakta nedanstående principiella fördelningsdiagram över innetemperaturen. I detta anges hur ofta, i % av totala tiden, som innetemperaturen underskrider det värde som anges av x-axeln. Antag också att medeltemperaturen är lika med mediantemperaturen.

FÖRDELNINGSDIAGRAM FÖR FRÄNLUFTSTEMPERATUREN
MED OCH UTAN ÅTERKOPPLING (princip)



Kvantiteten $k_b t (T_{i1} - T_{i2})$, där k_b är specifika värmebehovet och t är tiden, är ett mått på energibesparingen mellan reglersätten. Av fördelningsdiagrammet framgår också en annan svårighet. Hur mycket är det rimligt att sänka medeltemperaturen när temperaturvariationerna minskar? Upplevelsen av den termiska komforten får här betydelse.

Man skulle önska att man kunde bestämma en energibesparing vid oförändrad termisk komfort. Detta går inte. Det finns heller inget

entydigt komfortkriterium. Man kan om man önskar jämföra energiförbrukningen under bivillkor. Exempelvis: energibesparingen blir x då innetemperaturen med båda reglersätten underskrider y i högst $z\%$ av tiden. Men x kommer naturligtvis att bero på y och z . Man kan därför inte bestämma ett entydigt värde på energibesparingen vid den bättre regleringen. I stället får man göra en kvalitativ bedömning av fördelningskurvan.

I detta sammanhang är det naturligt att betänka vädringens inverkan vid utvärdering av reglersätt. Betrakta en byggnad som tillförs en värmemängd som precis täcker värmebehovet för den önskade innetemperaturen. Byggnaden är i värmebalans. Innetemperaturen är konstant. Om byggnaden nu tillförs ett extra energitillskott t ex genom solinstrålning så överstiger tillförd värme värmebehovet. Följande tre renodlade fall kan nu inträffa:

- 1) innetemperaturen ökar till balans åter råder mellan tillförd värme och värmebehovet vid den högre temperaturen
- 2) den reglerade värmemängden minskar t ex genom att framledningstemperaturen sänks så att den totalt tillförda värmemängden är konstant
- 3) all överskottsenergi vädras bort

I det första fallet lagras energi i byggnadsstommen vilket ger högre innetemperatur. Härvid ökar ventilations- och transmissionsförlusterna, samtidigt minskar dock värmeöverföringen från radiatorsystemet. Beroende på hur värmesystemet är dimensionerat erhålls normalt ett gratisvärmeutnyttjande (= minskad radiator effekt/tillförd gratisvärme) mellan 40% (högtemperatursystem) och 60% (lågtemperatursystem), se RoS, kap 4.

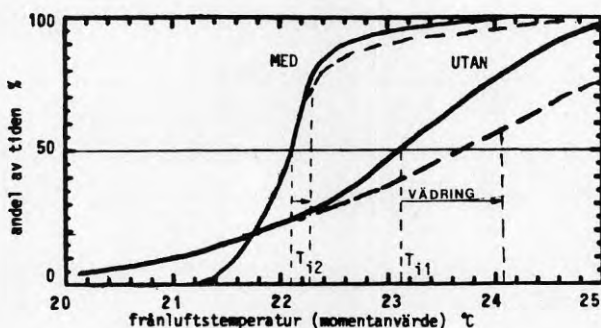
I det andra fallet förblir innetemperaturen och därmed värmeförlusten konstant. All gratisvärme utnyttjas, dvs gratisvärmeutnyttjandet är 100%.

I det tredje fallet utnyttjas ingen gratisvärme. All överskottsenergi vädras bort. Innetemperaturen och radiator effekten påverkas inte. Detta fall är det besvärligaste att analysera eftersom det ej syns i mätdata av inne-, ute- och framledningstemperaturer och energiförbrukning. Gratisvärmens måste mätas och vädringen syns som

frånvaro av innetemperaturhöjning eller framledningstemperatursänkning.

I verkliga mätningar får vi räkna med en blandning av de tre renodlade fallen. I det teoretiska fallet att ingen ökad vädring förekommit skulle fördelningskurvan i det tidigare exemplet blivit enligt följande (streckad linje).

FÖRDELNINGSDIAGRAM FÖR FRANLUFTSTEMPERATUREN
MED OCH UTAN ATERKOPPLING (princip)



Slutsatsen av detta diagram är att energibesparingen underskattas om den bestäms från fördelningsdiagrammet om, vilket är naturligt, vädringen ökar med ökad innetemperatur. Vidare står det klart att man inte utan vidare kan beräkna vilken energibesparing man fått om temperaturnivån varit en annan genom att förskjuta fördelningsdiagrammet i x-led. Vid den nya temperaturnivån hade vädringens inverkan gjort att fördelningsdiagrammets form hade förändrats.

I kapitel 3 återkommer vi till innetemperaturens fördelningskurva.

Metod III. Vår tredje metod att bestämma energibesparingen är att utnyttja modeller för energiförbrukningen. Med linjär regression på mätdata såsom energiförbrukning/mätperiod (P), önskad innetemperatur (T_{iref}), utetemperatur (T_U) och solinstrålning (P_S) kan man skatta modeller av typen

$$P = A + B(T_{iref} - T_U) - C P_S + D T_U$$

där A, B, C och D är parametrar.

Metoden går i stort ut på att dela upp energiförbrukningen i poster: en nominell energiförbrukning, en del som beror av felaktigt vald framkopplingskurva och en del, CP_s , som anger solvärmeutnyttjandet.

Vi kommer att visa att parametern C är större vid återkoppling än vid enbart framkoppling. Parametern C visar sig vara proportionell mot gratisvärmeutnyttjandet som i sin tur beror av reglersättet. Fördelen med att arbeta med gratisvärmeutnyttjandet är att det endast beror av reglersättet och inte av byggnaden och det rådande uteklimatet. Det är därför enklare att generalisera de resultat som baseras på gratisvärmeutnyttjandet till andra hus och andra förhållanden än när det gäller uppmätt energibesparing. Den verkliga energibesparingen beror förutom gratisvärmeutnyttjandet även på det aktuella gratisvärmestillskottet och val av framkopplingskurva.

Det är denna metod att bestämma energibesparingen mellan olika reglersätt som i fortsättningen ska utnyttjas i detta kapitel. En annan fördel med metoden är att den ger möjlighet att kvantitativt jämföra olika reglersätt utan att vara beroende av vilken framkopplingskurva som används och utan att ligga på klagogränsen. Problemen med vädringen kvarstår även om man (teoretiskt) har möjlighet att bestämma även denna.

Under mätningarnas gång har solstrålningens påverkan varit påtaglig. Vid soligt väder har innetemperaturen börjat stiga och i de hus som har haft återkoppling har då framledningstemperaturen sänkts vilket ska ge en energibesparing. Vid en preliminär analys av mätdata med metod tre var det dock svårt att fastställa detta utnyttjande av solinstrålning. Stor variation i framför allt C-parametrarna erhöles. Därför har regressionsmetoden som sådan studerats på simulerade mätdata från kap 3. Fördelen är härvid att de exakta sambanden är kända och man ser vilka modeller och vilka mätdata (timvärden, dygnsmedelvärden etc) som ger bra parameterskattningar. Dessa kunskaper har utnyttjats till att bestämma tillfredsställande modeller från verkliga mätdata.

Resten av kapitel 2 har följande innehåll: I det första avsnittet härledds några energiförbrukningsmodeller med vars hjälp gratisvärmeutnyttjandet vid olika reglersätt kan bestämmas. Det andra avsnittet innehåller en kort beskrivning av regressionsanalys och de härledda modellerna studeras med simulerade mätdata. Den egentliga modellbestämningen för försökshuset och uppskattningen av vilken energibesparing man uppnår med återkoppling presenteras i det tredje avsnittet.

2.2 Energiförbrukningsmodeller

Först ges en genomgång av värmebalansen i en byggnad med vattenburen värme. De olika komponenterna i värmebalansen beskrivs och lagringstermen, framkopplingskurvan och vilka mätdata som finns tillgängliga diskuteras. Därefter omformuleras värmebalansen så att den även beskriver regleringen inverkan.

En enkel värmebalansen för en byggnad kan skrivas som

$$P_l = P_r + P_g - P_b \quad (2.1)$$

där

- P_l = värme(flöde) som lagras i byggnaden
- P_r = styrd/reglerad värmeeffekt
- P_g = oreglerad värmeeffekt och gratisvärme
- P_b = byggnadens värmeeffektbehov

Vidare skriver vi den reglerade värmeeffekten och värmeeffektbehovet som

$$P_r = k_r (T_f - T_i) \quad (2.2)$$

respektive

$$P_b = k_b (T_i - T_u) \quad (2.3)$$

där

- T_i = innetemperatur
- T_u = utetemperatur
- T_f = framledningstemperatur

k_b = byggnadens specifika värmebehov

k_r = radiatorsystemets värmeöverföringsförmåga

Det värmeflöde som lagras i byggnaden kan uttryckas på olika sätt beroende på hur väl vi önskar att modellen ska kunna beskriva det dynamiska förloppet. Enklast är den statiska modellen. I den sätts

$$P_1 = 0 \quad (2.4)$$

och ingen hänsyn tas till den lagrade värmen. Det enklaste sättet att behandla byggnadens värmelagring är att sätta

$$P_1 = C \frac{dT_i}{dt} \quad (2.5)$$

vilket ger en 1:a ordningens dynamisk modell. Här är C (den aktiva) värmekapaciteten för byggnaden.

Dynamiska modeller av högre ordning kan beskrivas antingen med flera termer av typen $C_j dT_j/dt$ i (2.5) avseende lagringen i delkapacitansen j kopplad till rumsluften (tillståndsmodeller) eller med hjälp av värden av T_i , T_u , T_f och P_g i flera tidpunkter (in- utsignalmodeller). Den första metoden kan inte användas här eftersom endast lufttemperaturen har mätts och den andra har praktiska begränsningar eftersom antalet modellparametrar som ska bestämmas snabbt ökar.

Med hjälp av (2.1)-(2.5) kan nu innetemperaturen uttryckas med en 1:a ordningens differentialekvation

$$\frac{C}{k_r + k_b} \frac{d}{dt} T_i + T_i = \frac{k_b}{k_r + k_b} T_u + \frac{k_r}{k_r + k_b} T_f + \frac{1}{k_r + k_b} P_g \quad (2.6)$$

Vid framkoppling styrs framledningstemperaturen som en funktion av utetemperaturen. En enkel styrfunktion eller framkopplingskurva är

$$T_f = kT_u + l \quad (2.7)$$

där konstanterna k och l är regulatorparametrar.

Det bästa valet av regulatorparametrar eller korrekt framkoppling är

$$T_{ffk} = -\frac{k_b}{k_r} T_u + \frac{k_r + k_b}{k_r} T_{iref} \quad (2.8)$$

Om den oreglerade värmeeffekten $P_g = 0$ så ger denna framledningstemperatur en lösning där innetemperaturen, enligt (2.6), svänger in exponentiellt mot den önskade innetemperaturen, T_{iref} . Ingen hänsyn tas till gratisvärmen P_g eftersom den inte mäts. Man kan dock i vissa fall, t ex om en del av gratisvärmen är konstant eller varierar periodiskt, ta hänsyn till detta genom att minska den andra konstanta termen i (2.8). Sådana fall studeras i RoS, kapitel 4, men behandlas ej vidare här.

I praktiken kan man dock inte räkna med att finna den korrekta framledningsskurvan enligt (2.8). Storleken på k_b och k_r är inte exakt kända, dessutom är de bara approximativt konstanta. Normalt finns därför en skillnad mellan den använda framkopplingskurvan, T_{fanv} , och den korrekta framkopplingskurvan. Avvikelsen skriver vi som

$$T_{fanv} - T_{ffk} = dkT_u + dl \quad (2.9)$$

där dk anger felaktig lutning och dl felaktig konstant i den använda framkopplingskurvan.

Den oreglerade värmetillförseln, P_g , inberäknar yttre påverkan från sol och vind och inre värmebelastningar från de boende i form av hushållsel och personvärme. Hit räknas också t ex vvc-förluster och, som i husen på Tingvallen, värme från badrumsradiatorer koplade till varmvattnet.

Några direkta mätningar har inte utförts på några av dessa faktorer men mätdata av global solstrålning, som betecknas med P_g , och beräknad solstrålning på vertikala fasader i de fyra väderstrecken, P_{svikt} , har i efterhand erhållits från SMHI:s mätstation vid Tekniska Högskolan i Lund som är belägen cirka 1 km från husen på Tingvallen. Solinstrålningen är också den faktor som har störst inverkan på P_g . De övriga faktorerna är mer konstanta och kan som påpekats kompenseras till en del vid valet av framkopplingskurva. På grund av detta är det lämpligt att dela upp P_g i en solkomponent P_{gs} och en komponent för det övriga:

$$P_g = P_{gs} + P_{\text{övrig}} \quad (2.10)$$

Observera att P_{gs} avser tillförd solvärme inne i huset, medan SMHI:s mätdata är solinstrålning per ytenhet utanför huset. Kvoten mellan dessa kallar vi solavskärmningsfaktor, saf

$$saf = P_{gs} / P_s \quad (2.11)$$

Energibalansen för en byggnad erhålls genom att integrera komponenterna i värmebalansen (2.1) under en period (timme, dygn etc). Genom att dividera med periodtiden blir modellerna inte beroende av periodvalet. Enheten blir av typ kWh/h, dvs en medeleffekt. Dessutom divideras uppmätta energimängder med husets lägenhetsyta för att förenkla jämförelsen mellan olika stora hus. Enheten blir då kWh/h, m², lgy, dvs medeleffekt per kvadratmeter lägenhetsyta. Temperaturer och solinstrålning beräknas som periodmedelvärden .

I fortsättningen arbetar vi med två typer av samband; dels teoretiska, momentana ekvationer av typen (2.1), dels samband mellan medelvärden av mätdata t ex energibalansen (2.14). Nya beteckningar införs inte utan sammanhanget anger om t ex P_b är momentan- eller medelvärdet av effektbehovet.

Derivatan i uttrycken för det värmefflöde som lagras (2.5) kan i energibalansen approximeras med en differenskvot. Förändringen i lagrad energi per lägenhetsyta och periodtid blir då

$$P_l = (C/T_{\text{per}})(T_i(t+T_{\text{per}}) - T_i(t)) = C_p dT_i \quad (2.12)$$

där momentanvärdet vid periodstart och periodslut utnyttjas. Andra uttryck för den lagrade energin är möjliga, vilket vi återkommer till.

I de mätningar som gjorts har inte den reglerade energiåtgången kunnat mätas utan endast den totala fjärrvärmemängden P_t . Denna inkluderar förutom radiatoreffekten även energiåtgången för produktion av varmvatten, kulvertförluster och uppvärmning av garage. Detta skriver vi som

$$P_t = P_r + P_{\text{övr}} \quad (2.13)$$

Modell 1 (energisignaturen)

Löser vi ut P_t med hjälp av (2.1), (2.3), (2.10) och (2.11)-(2.13) erhålls modell 1 (energisignaturen)

$$P_t = a_1 + b_1(T_i - T_u) - c_1 P_s + e_1 d T_i \quad (2.14)$$

där

$$\begin{aligned} a_1 &= P_{\text{övr}} - P_{\text{gövr}} = \text{övriga värmeeffekter per lgy} \\ b_1 &= k_b = \text{specifika värmebehovet} \\ c_1 &= \text{saf} = \text{solavskärningsfaktorn} \\ e_1 &= C_p = \text{värmekapacitet per lgy och periodtid} \end{aligned}$$

Om vi antar att de fyra parametrarna a_1 , b_1 , c_1 och e_1 är konstanter så kan de bestämmas med linjär regression av mätdata. Vi återkommer till parameterbestämningen i nästa avsnitt.

Energisignaturen är i första hand en modell för byggnaden och dess parametrar ska inte bero på reglersättet. Ett undantag är att parameter c_1 underskattas om vädringen ökar med förhöjd innetemperatur vid solinstrålning.

Regleringens inverkan

En modell som tar hänsyn till reglersättet får man genom att omformulera värmebehovet och reglerad värmeeffekt enligt (2.2) och (2.3) på följande sätt:

$$P_b = P_{b\text{nom}} + P_{b\text{err}} = k_b(T_{i\text{ref}} - T_u) + k_b(T_i - T_{i\text{ref}}) \quad (2.15)$$

och

$$P_r = P_{r\text{nom}} + P_{r\text{fk}} + P_{r\text{err}} = k_r(T_{\text{ffk}} - T_{i\text{ref}}) + \quad (2.16)$$

$$+ k_r(T_f - T_{\text{ffk}}) - k_r(T_i - T_{i\text{ref}})$$

Värmebehovet har delats i två termer: det nominella värmebehovet som åtgår vid önskad innetemperatur och en felterm som är den extra energiåtgången som åtgår om innetemperaturen överstiger önskat värde. Den reglerade effekten har delats upp i tre termer: den nominella värmeåtgången som åtgår för att upprätthålla önskad innetemperatur i frånvaro av gratisvärme, en korrektionsterm som orsakas av att framledningstemperaturen ej överensstämmer med korrekt framkopplingskurva enligt (2.8) och slutligen en felterm som uttrycker minskningen i energiåtgång då innetemperaturen överstiger den önskade på grund av gratisvärmertilskott.

Insättning av (2.5), (2.15) och (2.16) i (2.1) och utnyttjande av att $P_{b\text{nom}} = P_{r\text{nom}}$ ger

$$T_i - T_{i\text{ref}} = (P_g + k_r(T_f - T_{\text{ffk}}) - C \frac{d}{dt} T_i) / (k_r + k_b) \quad (2.17)$$

Regleringens uppgift är att välja framledningstemperaturen T_f så att reglerfelet $T_i - T_{i\text{ref}}$ blir litet. Den optimala styrningen som gör felet till noll fås genom att lösa ut T_f ur högerledet av (2.17)

$$T_{f\text{opt}} = T_{\text{ffk}} - \frac{1}{k_r} P_g + \frac{C}{k_r} \frac{d}{dt} T_i \quad (2.18)$$

För att kunna använda den optimala regulatorn krävs att gratisvärmens P_g mäts, att modellen är korrekt och modellparametrarna kända.

I praktiken är dessa villkor inte uppfyllda. Den använda framkopplingskurvan avviker från den korrekta och gratisvärmens kan ej mätas. Inverkan från gratisvärmens och fel val av framkopplingskurva

kan istället mätas indirekt som reglerfelet, dvs avvikelsen mellan önskad och uppmätt innetemperatur. Framledningstemperaturen beräknas enligt den använda framkopplingskurvan plus en återkoppling från reglerfelet. I fallet med proportionell reglering (P-regulator) med regulatorförstärkningen $k_p (>0)$ blir detta

$$T_f = T_{fanv} + k_p (T_{iref} - T_i) \quad (2.19)$$

Insättning av (2.9) och (2.19) i (2.17) och eliminering av $(T_i - T_{iref})$ i (2.15) ger tillsammans med (2.1) att

$$P_r = k_b (T_{iref} - T_u) - v_g P_g + (1 - v_g) k_r (dI + dk T_u) + v_g C \frac{dT_i}{dt} \quad (2.20)$$

där v_g kallas gratisvärmeutnyttjande och ges av

$$v_{gP} = \frac{(1 + k_p) k_r}{k_b + (1 + k_p) k_r} \quad (2.21)$$

Det andra indexet anger regulatortypen.

Lägg märke till att ett högt gratisvärmeutnyttjande, nära 1, medför att gratisvärmens tillgodogörs och att betydelsen av felaktigt vald framkopplingskurva minskar.

Gratisvärmeutnyttjande

Gratisvärmeutnyttjandet, v_g , är i det allmänna fallet kvoten mellan minskningen i radiator effekt (orsakad av ett gratisvärmestillskott) och gratisvärmens storlek

$$v_g = \frac{P_{rnom} - P_r}{P_g} \quad (2.22)$$

Gratisvärmeutnyttjandet ligger mellan 0 (inget utnyttjande) och 1

(fullt utnyttjande). Det beror som tidigare påpekats på reglersätt och vädring. För den proportionella regulatorn ser vi i (2.21) att v_{gp} blir nära 1 om regulatorförstärkningen k_p är stor. I specialfallet $k_p=0$, dvs ren framkoppling från utetemperaturen så blir

$$v_{gfk} = \frac{k_r}{k_b + k_r} = \frac{T_{id} - T_{ud}}{T_{fd} - T_{ud}} \quad (2.23)$$

Den andra likheten fås ur det dimensionerande fallet, index d står för dimensionerande. För ett värmesystem med $T_{fd}=80$ °C, $T_{ud}=-20$ °C, $T_{id}=20$ °C erhålls $v_{gfk}=40\%$.

I FIG.2.1a,b visas gratisvärmeutnyttjande som funktion av regulatorförstärkningen k_p , för olika värden på T_{fd} och $T_{ud}=-20$ °C, $T_{id}=20$ °C.

Om värmekapacitansen $C=0$ så är (2.20) en statisk modell och ekvationen ger direkt att v_g är kvoten mellan minskad radiatoreffekt och gratisvärme. Man kan även visa att samma gratisvärmeutnyttjande även gäller i det dynamiska fallet och oberoende av tidskonstanten. Skillnaden är att innetemperaturens ökning och radiatoreffektens minskning blir mindre under tiden som gratisvärmens tillförs, men i gengäld kvarstår när gratisvärmestillskottet slutar.

Gratisvärmeutnyttjandet är alltså oberoende av gratisvärmens storlek och husets dynamik. Detta gäller så länge modellen är linjär. Om vädringen används för att minska övertemperaturer gäller detta inte längre. Modellen blir olinjär och gratisvärmeutnyttjandet minskar med gratisvärmens storlek och vid låga tidskonstanter. Gratisvärmeutnyttjandet som funktion av några olika hypotetiska vädringsfunktioner behandlas i RoS, kap 4.

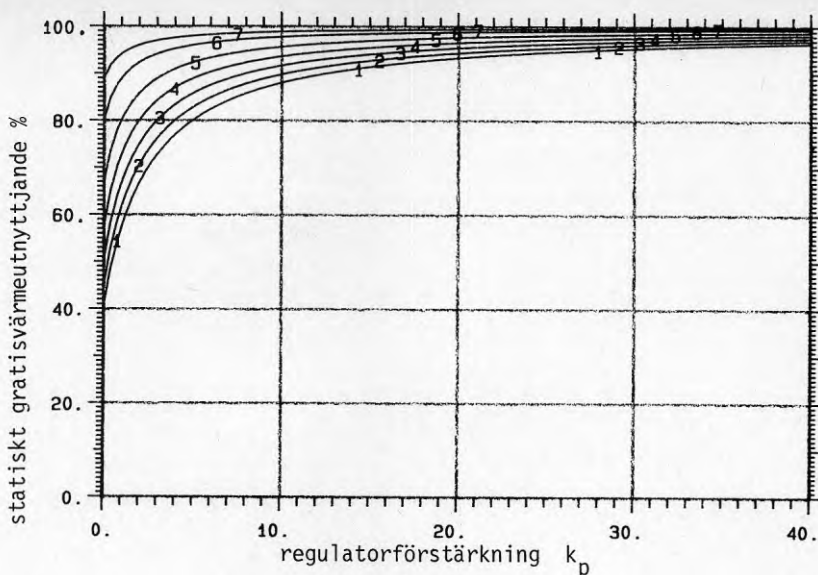


FIG.2.1a Statistiskt gratisvärmeutnyttjande v_{gP} vid proportionell återkoppling som funktion av regulatorförstärkningen f för olika $T_{fd}=25,30,40,50,60,70$ och 80 °C, $T_{id}=20$ °C och $T_{ud}=-20$ °C. (Kurvorna räknade uppifrån)

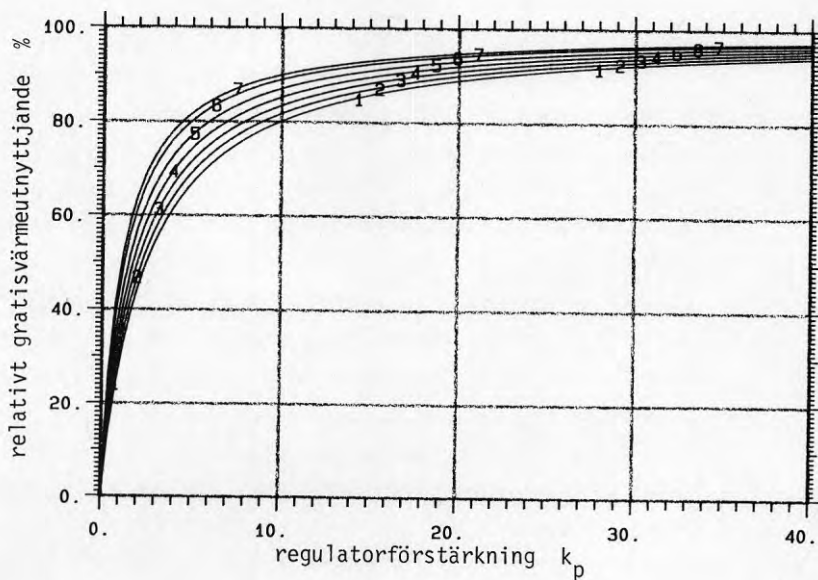


FIG.2.1b Samma som FIG.2.1a men nu det relativa gratisvärmeutnyttjandet $(v_{gP}-v_g)/(1-v_g)$ även kallat godhetstalet. Detta anger hur stor andel av den gratisvärme som inte utnyttjas "passivt" som kan utnyttjas vid en viss regulatorförstärkning.

Modell 2 (reglersignaturen)

Sambandet (2.20) kan med hänsyn till våra mätvärden skrivas om som modell 2:

$$P_t = a_2 + b_2(T_{i\text{ref}} - T_u) - c_2 P_s + d_2 T_u + e_2 d T_i \quad (2.24)$$

där

$$\begin{aligned} a_2 &= P_{\text{övr}} - v_g P_{\text{gövr}} + (1 - v_g) k_r d_l \\ b_2 &= k_b \\ c_2 &= v_g s a f \\ d_2 &= (1 - v_g) k_r d k \\ e_2 &= v_g c_p \end{aligned}$$

I analogi med att modell 1 kallas (byggnadens) energistruktur så kan modell 2 kallas regleringens energisignatur eller kortare reglersignaturen. Modellen delar upp energiförbrukningen i fem termer. Första termen är en konstant som består av medeleffekten för varmvattenberedning mm minus rätt utnyttjad gratisvärme som ej härrör från solinstrålning plus det konstanta felet orsakat av fel framkopplingskurva. Andra termen är den nominella energiförbrukningen. Tredje termen är "rätt" utnyttjad gratisvärme som härrör från solinstrålningen, vilket är lika med den energibesparing vi gör genom att radiatoreffekten har minskat. Resten av gratisvärmens, $(1 - v_g)(c_1 P_s + P_{\text{gövr}})$, åtgår till att täcka det högre värmebehovet på grund av att innetemperaturen ökat. Den fjärde termen är den utetemperaturberoende energiåtgången som orsakas av fel vald framkopplingskurva. Den femte termen, slutligen, anger lagringens inverkan.

Observera att gratisvärmeutnyttjandet fås som kvoten mellan parameter c_1 i modell 1 och c_2 i modell 2. Modell 1 används för att bestämma hur mycket gratisvärme som en viss solinstrålning ger. Modell 2 anger hur stor del av den inkomna solenergin som utnyttjas rätt.

Ett problem med modell 2 är att de två förklarande variablerna T_u och $T_{i\text{ref}} - T_u$ blir linjärt beroende om $T_{i\text{ref}}$ är konstant. Man kan så fall inte bestämma både parametern b_2 och d_2 .

Utesluts T_u som förklarande variabel så ändras parametrarna a_2 och b_2 i modell 2 till

$$a_2' = a_2 + d_2 T_{iref} \quad (2.25)$$

$$b_2' = b_2 - d_2 \quad (2.26)$$

Den modifierade modellen kallar vi modell 2'.

Modell 3

Den ökande svårigheten i tolkningen av parametrarna a_2' och b_2' gör det lämpligare att betrakta följande modell. Genom att bilda differensen mellan modell 1 och modell 2 erhålls:

$$k_b (T_i - T_{iref}) = a_3 + c_3 P_s + d_3 T_u + e_3 d T_i \quad (2.27)$$

där

$$a_3 = (1 - v_g) k_r d_l + (1 - v_g) P_{gövr}$$

$$c_3 = (1 - v_g) s a f$$

$$d_3 = (1 - v_g) k_r d k$$

$$e_3 = (1 - v_g) C_p$$

Detta blir modell 3. Vänsterledet kan tolkas som total extra energiåtgång som skiljer den aktuella regleringen från den optimala. Högerledet är dess uppdelning i delposter. Det över eller underskott i energiförbrukningen som orsakas av felaktig framkopplingskurva återfinns i första och tredje termen. Andra termen anger "ej rätt" utnyttjad solinstrålning. Fjärde termen anger lagringens inverkan.

Modell 1-3 har sammanställts i FIG.2.2.

Modell 1 : ENERGISIGNATUREN

$$P_t = A_1 + B_1(T_i - T_u) - C_1 * P_g - E_1 * \Delta T_i$$

| | | | | |
|--------------------|--------|---------------------|---------------------------|---------------------|
| total värme-effekt | konst1 | verkligt värmebehov | tillgodogjord gratisvärme | lagringens inverkan |
|--------------------|--------|---------------------|---------------------------|---------------------|

Modell 2 : REGLERSIGNATUREN

$$P_t = A_2 + B_1(T_{iref} - T_u) - v_g * C_1 * P_g + D_2 * T_u - v_g * E_1 * \Delta T_i$$

| | | | | | |
|--------------------|--------|-----------------------|-----------------------------|---|---------------------|
| total värme-effekt | konst2 | nödvändigt värmebehov | rätt utnyttjad* gratisvärme | inverkan av fel lutning på framk.kurvan | lagringens inverkan |
|--------------------|--------|-----------------------|-----------------------------|---|---------------------|

Modell 3

$$B_1(T_i - T_{iref}) = A_3 + (1 - v_g) * C_1 * P_g - D_2 * T_u - (1 - v_g) * E_1 * \Delta T_i$$

| | | | | |
|----------------------|--------|-----------------------------------|---|---------------------|
| avvikande värmebehov | konst3 | felaktigt utnyttjad** gratisvärme | inverkan av fel lutning på framk.kurvan | lagringens inverkan |
|----------------------|--------|-----------------------------------|---|---------------------|

Där mätdata består en längre serie av samhörande värden på:

| | | |
|--------------|---|-----------|
| P_t | = effektförbrukning (medelvärde för perioden) | enhet (W) |
| T_{iref} | = önskad innetemperatur | (°C) |
| T_i | = innetemperatur | (°C) |
| ΔT_i | = förändring i innetemperatur under perioden | (°C) |
| T_u | = utetemperatur (medelvärde för perioden) | (°C) |
| P_g | = gratisvärme (solvärme) | (W) |

och $A_1, A_2, A_3, B_1, C_1, D_2, E_1$ och v_g = gratisvärmeutnyttjandet är konstanter som kan bestämmas med regressionsanalys

* "rätt" utnyttjad = den del som utnyttjas till att minska energiförbrukningen
 ** "fel." utnyttjad = den del som ej utnyttjas till att minska energiförbrukningen.

FIG.2.2 Sammanställning av modell 1-3

Differensmodeller

I modell 1-3 utnyttjas enbart mätningar från ett hus samtidigt. En viktig idé vid planeringen av detta projekt var att ha flera lika försökshus och att prova olika reglersätt parallellt i flera hus under samma tidsperiod.

Däremot skulle inte speciellt mycket mätningar göras i varje hus. Vi har därför ingen detaljkunskap om varmvattenförbrukning, hus-hållsel och vädring. Tanken var att utnyttja att dessa störningar, liksom t ex vindbelastning och ändrade vanor efter veckodag eller helger etc varierar i tiden på ett likartat sätt i likadana hus. Mindre störningar resulterar i säkrare modeller. Det bör redan här påpekas att differensmodellerna inte kunde utnyttjas på mätdata i den omfattning det var tänkt.

Vi ska ändå kort uppteckna modellerna 4-6 som bildas genom att i tur och ordning ställa upp modell 1-3 för två olika hus och bilda differensen. En andra injicering k eller l införs för att beteckna husen.

Modell 1 ger differensen mellan modell 1 för hus k och l

$$P_{tk} - P_{tl} = (a_{1k} - a_{1l}) + b_{1k} T_{ik} - b_{1l} T_{il} + (b_{1k} - b_{1l}) T_u + (c_{1k} - c_{1l}) P_s + e_{1k} dT_{ik} - e_{1l} dT_{il} \quad (2.28)$$

För att få en enkel modell måste man anta $b_{1k} = b_{1l} = b_{11}$, dvs att husen har samma specifika värmebehov. Om inte detta gäller (modell 1 ger svaret!) kan man normera husen genom att multiplicera P_{tl} med b_{1k}/b_{1l} .

Inför vi $dP_t = P_{tk} - P_{tl}$ så kan (2.28) nu förenklas till modell 4:

$$dP_t = (a_{1k} - a_{1l}) + b_1 (T_{ik} - T_{il}) + (c_{1k} - c_{1l}) P_s + e_{1k} dT_{ik} - e_{1l} dT_{il} \quad (2.29)$$

Nyttan med modell 4 är att visa att solavskärmningsfaktorerna är lika i husen, dvs att $c_{1k} - c_{1l}$ ej (signifikant) avviker från noll. Vi återkommer till hur detta provas statistiskt. Är solav-

skärningsfaktorerna lika förenklas tolkningen av modell 5 och 6.

Differensen mellan modell 2 uppställd för två hus ger, under samma antaganden, modell 5:

$$dP_t = (a_{2k} - a_{2l}) + (c_{2k} - c_{2l})P_s + (d_{2k} - d_{2l})T_u + e_{2k}dT_{ik} - e_{2l}dT_{il} \quad (2.30)$$

Modell 6, slutligen, lyder

$$k_r(T_{ik} - T_{il}) = (a_{3k} - a_{3l}) + (c_{3k} - c_{3l})P_s + (d_{3k} - d_{3l})T_u + e_{3k}dT_{ik} - e_{3l}dT_{il} \quad (2.31)$$

Observera att beskrivningen av energilagringen i modell 5 och 6 blir mer komplicerad då två hus jämförs. Om det ena huset har enbart framkoppling medan det andra huset även har återkoppling så måste lagringen beskrivas med två termer eftersom de dynamiska förloppen är helt olika i husen.

Tolkningarna av parametrarna överensstämmer med de som har givits för modell 1-3. Om $c_{1k} = c_{1l} = c_1$ så gäller att

$$c_{2k} - c_{2l} = c_{3l} - c_{3k} = (v_{gk} - v_{gl})c_1 \quad (2.32)$$

Det vill säga, skillnaden i gratisvärmeutnyttjande fås som kvoten av parameter c för modell 5 eller 6 och parameter c_1 för modell 1. Detta värde borde vara exaktare än vad man får genom att beräkna de två gratisvärmeutnyttjandena separat med modell 1 och 2.

Om $c_{1k} \neq c_{1l}$ så ger modell 4-6 inget nytt utöver vad modell 1-3 ger. Husen är i så fall inte lika och det är inte meningsfullt att arbeta med differensmodeller.

2.3 Regressionsanalys med simulerade data

Vi ska nu använda den arsenal av modeller som härleddes i förra avsnittet. För att undvika vissa fallgropar och se vilka förväntningar man kan ställa på regressionsanalysen ska vi starta med att

identifiera modeller som är exakt kända. Avsnittet är främst avsett för att ge en fastare grund för skattningarna av de verkliga modellerna.

Men först ges en helt kort beskrivning av linjär regression som är en välkänd statistisk metod.

Linjär regression

Energimodellerna 1-6 är alla på formen

$$y = a + bx_1 + cx_2 + \dots + dx_m \quad (2.33)$$

Där y kallas beroende variabel och x_1, x_2, \dots, x_m kallas oberoende eller förklarande variabler. Vi önskar uppskatta de okända parametrarna a, b, c, \dots, d med hjälp av samhörande mätdata $(y_i, x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{mi}, i=1, n)$ från n st perioder.

Vid linjär regression skattas parametrarna med de konstanter A, B, C, \dots, D som minimerar kvadratsumman av e_i i regressionsekvationen

$$y_i = A + Bx_{1i} + Cx_{2i} + \dots + Dx_{mi} + e_i, \quad i=1, n \quad (2.34)$$

Linjär regression är en statistisk standardmetod och det finns ett flertal statistikpaket för beräkning av regressionssamband med dator. Ett interaktivt statistikpaket, MINITAB, har använts. Det använder minsta kvadratmetoden (MK) för att bestämma parametrarna i regressionsekvationen (2.34).

Som resultat vid en linjär regression ger MINITAB skattningarna (A, \dots, D) och deras uppskattade standardavvikelser (s_A, \dots, s_D) . Med hjälp av kvoten av dessa, den så kallade t-kvoten, t ex

$$t_A = A/s_A \quad (2.35)$$

kan man avgöra om, i detta fall, parametern A är signifikant, dvs med en given sannolikhet $1-c$, ej är lika med noll. Kravet är att $t_A > t_c(f)$, där $t_c(f)$ är t-fördelningsfunktionen med f frihetsgrader, $f = n - (m+1)$.

Vidare så kan vi ange ett konfidensintervall för A som med en given sannolikhet $1-c$ innehåller det sanna värdet a . Intervallet blir

$$A - s_A t_{c/2}(f) < a < A + s_A t_{c/2}(f) \quad (2.36)$$

I vissa fall önskas bara en undre begränsning av intervallet, då gäller

$$A - s_A t_c(f) < a \quad (2.37)$$

Vi ska använda $c=0.01$, vilket ger uttalanden med 99% säkerhet. I TAB.2.1 ges t -fördelningsfunktionen för några värden på c och f .

TAB.2.1 Värdet av t -fördelningen vid olika frihetsgrader f och konfidensgrader c

| | $c=0.1$ | $c=0.01$ | $c=0.001$ |
|----------|---------|----------|-----------|
| $f=10$ | 1.4 | 2.8 | 4.1 |
| 20 | 1.3 | 2.5 | 3.6 |
| 30 | 1.3 | 2.5 | 3.4 |
| ∞ | 1.3 | 2.3 | 3.09 |

Övrig resultatutskrift från MINITAB som skall utnyttjas är residualens standardavvikelse s_e och förklaringsgraden (determinationskoefficienten) R^2 , som är kvoten mellan förklarad och total varians i y . Durbin-Watsons kriterium, DW, är ett mått på autokorrelationen i residualen. DW beräknas som

$$DW = \frac{\sum_{i=2,n} (e_i - e_{i-1})^2}{\sum_{i=1,n} (e_i)^2} \quad (2.38)$$

Ett värde på 2 indikerar att residualen är okorrelerad, se vidare sid 60 där DW används.

Val av periodlängd

Det finns flera delvis motstridiga faktorer att ta hänsyn till när periodlängden för medelvärdesberäkningen ska bestämmas

- modellens ordning
- tillgänglig total mättid
- spridning i mätdata
- noggrannhet i mätdata
- den naturliga dygnsvariationen

Modellens ordning ska vara hög om den ska kunna följa både husets snabba och långsamma dynamik. För att bestämma de (statiska) egenskaper vi är ute efter behövs inte detta. Ska en första ordningens modell användas är det dock önskvärt med en periodtid som klart överstiger den snabbare dynamikens tidskonstant. Om en statisk modell används krävs ännu längre periodtid som klart överstiger den största tidskonstanten. Problem med autokorrelation ger annars dåliga parameterskattningar, vilket vi strax återkommer till.

Om periodtider som är mindre än ett dygn används så får man problem genom att de förklarande variablerna $T_i - T_u$ och P_s nu har olika frekvensinnehåll. Den förra följer i stort sett frekvensinnehållet i utetemperatur, vars dominerande periodtider är ett dygn och högre. Solinstrålningens dominanta frekvensinnehåll har däremot periodtider som är ett dygn och mindre, se FIG.2.3. Detta medför att de två förklarande variablerna kräver olika tidskonstanter för att ge bra anpassning till mätdata. Med periodtider som är en eller flera hela dygn försvinner betydelsen av detta på grund av medelvärdesbildningen.

Av statistiska skäl vill man ha många perioder. Ett riktvärde är 30 st. Residualen kan då betraktas som praktiskt taget normalfördelad och t-fördelningen minskar inte så mycket däröver. Detta är dock inget absolut krav. Det är däremot kravet att antalet frihetsgrader $f = n - (m + 1)$ är större eller lika med ett. I det senare fallet är ekvationssystemet inte längre överbestämt och ingen feluppskattning kan göras. De statistiska kraven ger tillsammans med den totala mättiden en övre gräns på medelvärdesperioden.

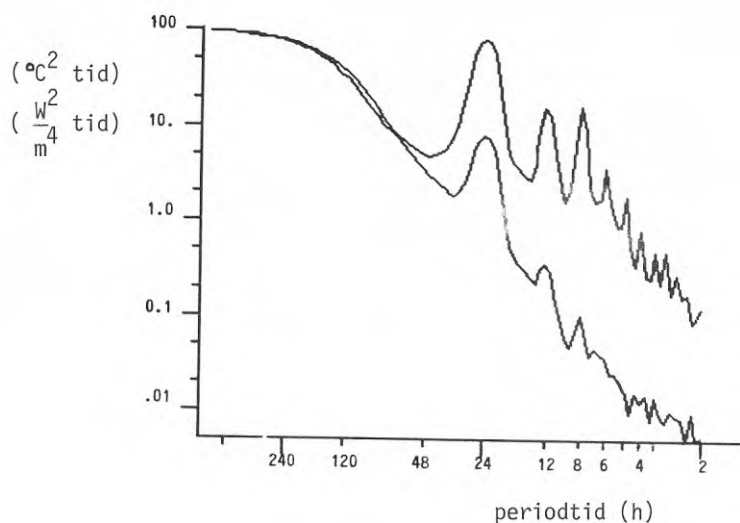


FIG.2.3a Frekvensinnehållet i utetemperatur (undre) och i solinstrålning (övre) till en dubbelfasad i öst/västlig riktning (övre) för Stockholm, januari-mars 1971. (Variansen normerad).

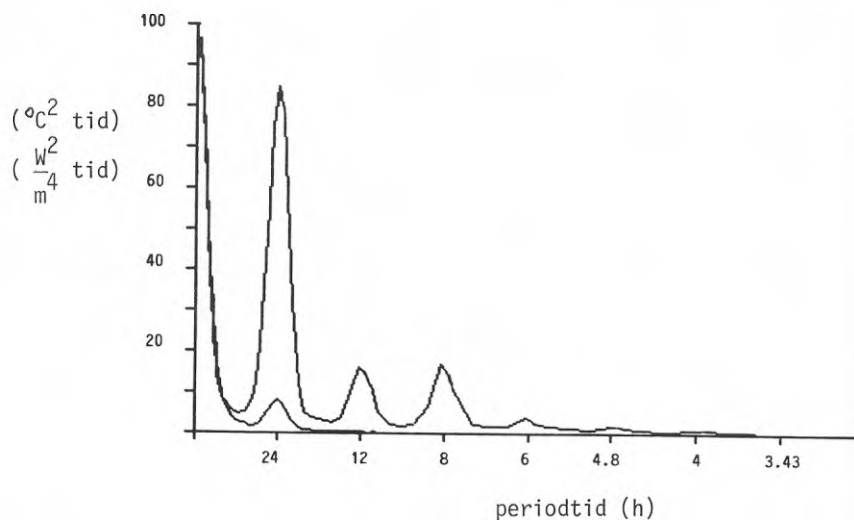


FIG.2.3b Samma som FIG.2.3a men linjär skala på y-axeln.

Det är viktigt att ha stor spridning i mätdata. Med långa medelvärdesperioder minskar spridningen. Höga och låga värden tar ut varandra och modellernas noggrannhet kan försämrans.

Noggrannheten i mätdata är speciellt viktig för att beskriva förändringen i den lagrade energin enligt (2.12) som ju utnyttjar momentanvärden. Till skillnad från övriga mätdata som medelvärdesbildas så minskar inte felet i (2.12) då periodtiden ökar.

Den naturliga dygnsvariationen gör det speciellt lämpligt att låta perioden vara ett jämnt antal dygn. Av samma skäl är en eller flera veckor en lämplig period. Veckovariationen är dock inte lika utpräglad som dygnsvariationen.

Simulerade mätdata

Den modell som används för att simulera data till regressionsmodellerna är densamma som används i kapitel 3 för att simulera det kopplade systemet byggnad-värmesystem-reglersystem, se FIG.2.4. Simuleringsmodellen beskrivs utförligt i kapitel 3. I korthet bildas en total insignal T_{istat} ,

$$T_{istat} = (k_b T_u + k_r T_f + P_g) / (k_r + k_b) \quad (2.39)$$

som är insignal till ett tredje ordningens dynamiskt system med innetemperaturen T_i som utsignal. T_u och P_{sg} är timvärden av utetemperatur resp ett beräknat värde av tillgodogjord solinstrålning för en dubbelfasad riktad mot öst och väst. Klimatdata är från Stockholm 1971. T_f bestäms enligt (2.19) som en framkoppling från utetemperaturen med eller utan proportionell återkoppling. Den totala värmeeffekten sätts till $P_r = k_r (T_f - T_i)$.

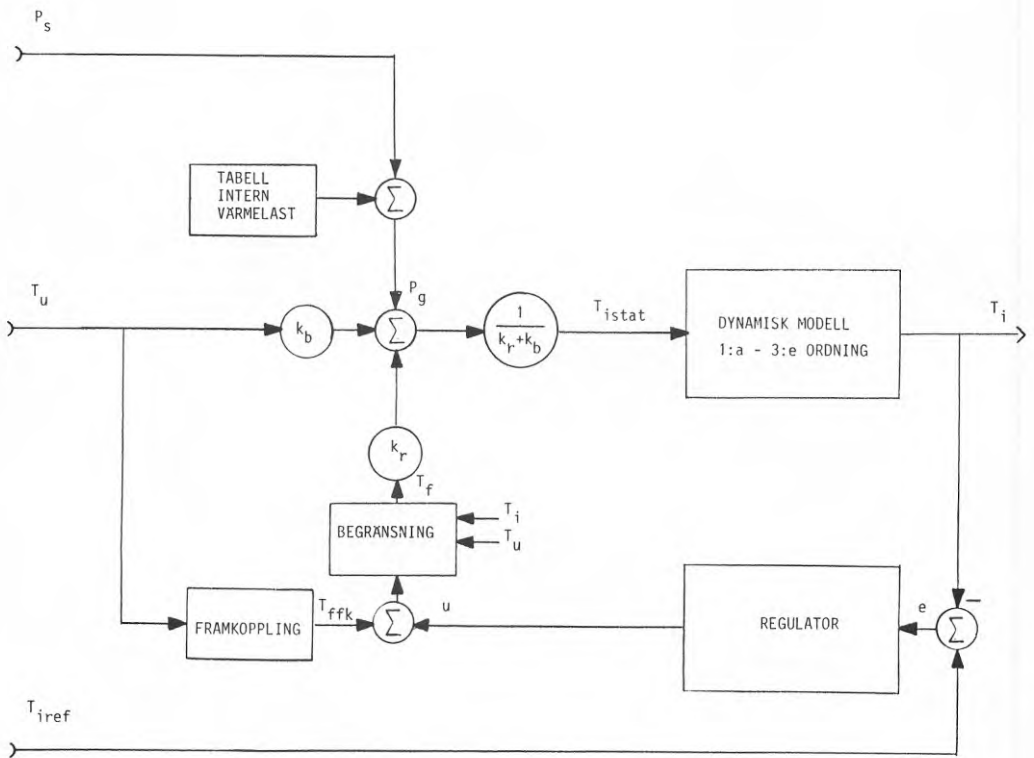


FIG.2.4 Blockschema för simulerade data

Två reglersätt har simulerats: FK och FÅK med en P-regulator med förstärkningen 20. Den simulerade mätdata utgörs av två uppsättningar med värden på T_i , T_u , T_f , P_{sg} och P_r under 744 timmar.

Följande numeriska värden har använts

$$k_b=1.1 \text{ W/}^\circ\text{C,m}^2, k_r=0.733 \text{ W/}^\circ\text{C,m}^2, k_p=20 \text{ ggr,} \\ dk=-0.35, dl=0 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Tidskonstanter och förstärkningar var

$$T_1=96 \text{ h, } k_1=0.831, T_2=8 \text{ h, } k_2=0.099 \text{ och } T_3=0.72 \text{ h,} \\ k_3=0.0070.$$

Simulerad tidsperiod var 1-30 mars och samplingsintervall 1 timme.

Skattad modell vid framkoppling

Vi ska nu empiriskt prova oss fram till en lämplig periodlängd för modell 1 och 2. TAB.2.2 visar de exakta och skattade parametrarna vid periodtider från 1 timme till 10 dygn för modell 1 och 2 då framkoppling användes. Både statistiska modeller (utan lagringsterm) och 1:a ordningens dynamiska modeller har använts.

Följande observationer kan göras:

Parameter B, skattningen av det specifika värmebehovet, blir i stort sett bra. Dess feluppskattning är genomgående något för liten.

Parameter C, skattningen av solavskärmningsfaktorn, blir (knappt) tillfredsställande endast när lagringstermen tas med och $T_{per}=3-5$ dygn. Ingen statistisk modell kommer upp i mer än 40% av korrekt värde! C-parameterns feluppskattning är, utom för $T_{per}=3-5$ dygn alldeles för liten!

Parametern E, som anger lagringens inverkan, är betydelsefull även vid längre periodtider.

Parametern A lider i stort av samma brister som C. A blir det negativa värdet av medelfelen för de övriga parametrarna.

Samma slutsatser gäller modell 2. Skattningarna blir här något bättre. En något förvånande observation är att gratisvärmeutnyttjandet $v_g = c_1/c_2$ skattas mycket bra även när de enskilda modellerna är dåliga. Störst fel ger $T_{per} = 1$ timme med 0.426 mot det exakta 0.4.

Den simulerade modellen är linjär och fullständigt deterministisk. Inga störningar förekommer. Ändå blir parameterskattningarna nästan genomgående dåliga, speciellt för de viktiga C-parametrarna och vad värre är: modellerna ger sken av att vara exakta. Exempelvis skattas C_1 för en statisk modell 1 med $T_{per} = 1$ dygn till 0.17 +/- 0.12 med sannolikheten 99.9%. Men korrekt värde är 0.545.

Orsaken till de felaktiga skattningarna

Om det dynamiska systemet ändras till 1:a ordningen ($k_1=1$, $k_2=k_3=0$) så blir däremot regressionen perfekt. Problemen har alltså samband med att man försöker skatta 1:a ordningens modeller ur ett tredje ordningens system. Inte förrän T_{per} är ca tio gånger den näst högsta tidskonstanten på 8 timmar erhålls bra skattningar med ett 1:a ordningens system. För den statistiska modellen är i detta fall $T_{per} = 10$ dygn inte tillräckligt mycket längre än den långsamma tidskonstanten på 4 dygn.

Närmare bestämt beror svårigheterna på att identifiering av regressionskvationen (2.34) med den (ordinära) minsta kvadratmetoden förutsätter att residualerna $e_i, i=1, \dots, n$ kan ses som normalfördelade, oberoende stokastiska variabler. Kravet på oberoende blir i detta fall inte uppfyllt eftersom residualen även ska modellera inverkan av variablernas värde vid tidigare tidpunkter som inte ingår i modellen. Residualen blir autokorrelerad, dvs e_i är korrelerad med e_j för i skild från j . Observera att eventuell autokorrelation i indata (de förklarande variablerna) inte medför några problem.

Problem med autokorrelation vid skattning av energisparmodeller för bostäder diskuteras i Hammarsten (1984), som även innehåller vidare referenser till facklitteraturen. Sammanfattningsvis ger autokorrelation upphov till följande problem:

- 1) skattningarna av parametrarna är osäkra. De är väntevärdesriktiga men har stor varians
- 2) uppskattningen av parametrarnas osäkerhet underskattas grovt

Durbin-Watson's kriterium är ett mått som skall varna för autokorrelation. Ett värde på DW omkring 2 indikerar att residualen ej är autokorrelerad, värden under 1 anger (signifikant) positiv autokorrelation och värden över 3 negativ autokorrelation allt enligt statistikläroboken Andersson (1983), även snävare gränser förekommer i andra böcker.

Känner man till ovanstående gränser och vet felaktigheternas storlek så kan tendensen följas i TAB.2.2. Det verkar däremot svårare att utifrån Durbin-Watson's kriterium avgöra om en skattad modell är sann eller falsk.

Skattad modell vid återkoppling

Motsvarande regressionsmodeller för FÅK-reglering med en P-regulator med förstärkningen 20 ggr ges i TAB.2.3.

En klar förbättring i skattningarna kan noteras. Förbättringen beror på att dynamiken snabbas upp med återkopplingen, dvs insvängningen mot önskad innetemperatur efter en störning går snabbare. Till skillnad från förra fallet med framkoppling går det därför relativt bra att beskriva det 3:e ordningens systemet med en 1:a ordningens modell, till och med med en statisk modell. Att lagringstermen inte längre har så stor betydelse avspeglas också i den stora feluppskattningen i E-parametern.

TAB.2.3 Exakta parametrar och skattade parametrar vid periodtider från 1 timme till 10 dygn för modell 1 och 2. Simulerade data. Reglering med framkoppling och proportionell återkoppling.

| REGRESSION: PARAMETRAR | | Modell 1 | | | | simulerade data | | | | P-REGULATOR | | | |
|------------------------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|--------|------|------|-------------|--|--|--|
| | | A1 +- s(A1) | B1 +- s(B1) | C1 +- s(C1) | E1 +- s(E1) | R**2 | D.W. | | | | | | |
| Exakta värden | 0.00 | 0.600 | -0.545 | - | - | | | | | | | | |
| Tper=1 tim. | -1.46 | 0.18 | 0.598 | 0.007 | -0.262 | 0.007 | 92.83 | 0.17 | | | | | |
| | -0.74 | 0.07 | 0.583 | 0.003 | -0.332 | 0.003 | 98.93 | 0.17 | 9.51 | 0.14 | | | |
| Tper=1 dygn | -0.31 | 0.11 | 0.596 | 0.005 | -0.465 | 0.013 | 99.84 | 1.38 | | | | | |
| | -0.19 | 0.08 | 0.596 | 0.003 | -0.491 | 0.012 | 99.91 | 1.67 | 1.69 | 0.37 | | | |
| Tper=2 dygn | -0.29 | 0.13 | 0.597 | 0.006 | -0.473 | 0.017 | 99.90 | 1.67 | | | | | |
| | -0.15 | 0.08 | 0.598 | 0.003 | -0.507 | 0.012 | 99.97 | 1.29 | 1.38 | 0.27 | | | |
| Tper=3 dygn | -0.33 | 0.13 | 0.602 | 0.006 | -0.486 | 0.020 | 99.93 | 2.36 | | | | | |
| | -0.12 | 0.16 | 0.599 | 0.005 | -0.516 | 0.025 | 99.96 | 2.20 | 0.81 | 0.45 | | | |
| Tper=5 dygn | -0.11 | 0.17 | 0.599 | 0.005 | -0.514 | 0.030 | 99.97 | 3.07 | | | | | |
| | -0.05 | 0.20 | 0.598 | 0.006 | -0.525 | 0.034 | 99.98 | 2.56 | 0.41 | 0.48 | | | |
| Tper=6 dygn | -0.27 | 0.14 | 0.603 | 0.005 | -0.503 | 0.025 | 99.99 | 2.79 | | | | | |
| | -0.11 | 0.22 | 0.598 | 0.008 | -0.514 | 0.028 | 99.99 | 1.72 | 0.61 | 0.64 | | | |
| Tper=10dygn | -0.33 | * | 0.602 | * | -0.486 | * | 100.00 | * | | | | | |

| REGRESSION: PARAMETRAR | | Modell 2 | | | | simulerade data | | | | P-REGULATOR | | | |
|------------------------|-------|---------------|---------------|-------------|-------------|-----------------|--------|------|------|-------------|--|--|-------|
| | | A2' +- s(A2') | B2' +- s(B2') | C2 +- s(C2) | E2 +- s(E2) | R**2 | D.W. | | | | | | |
| Exakta värden | 0.20 | 0.591 | -0.509 | - | - | | | | | | | | |
| Tper=1 tim. | -1.36 | 0.16 | 0.592 | 0.007 | -0.245 | 0.007 | 92.10 | 0.17 | 8.89 | 0.13 | | | 0.933 |
| | -0.63 | 0.06 | 0.576 | 0.003 | -0.311 | 0.003 | 99.06 | 0.17 | | | | | 0.935 |
| Tper=1 dygn | -0.21 | 0.10 | 0.587 | 0.004 | -0.434 | 0.012 | 99.86 | 1.38 | | | | | 0.933 |
| | -0.09 | 0.08 | 0.587 | 0.003 | -0.459 | 0.011 | 99.92 | 1.67 | 1.58 | 0.34 | | | 0.935 |
| Tper=2 dygn | -0.19 | 0.12 | 0.588 | 0.005 | -0.442 | 0.016 | 99.91 | 1.67 | | | | | 0.935 |
| | -0.06 | 0.07 | 0.589 | 0.003 | -0.473 | 0.011 | 99.97 | 1.30 | 1.28 | 0.25 | | | 0.933 |
| Tper=3 dygn | -0.22 | 0.12 | 0.592 | 0.005 | -0.454 | 0.019 | 99.94 | 2.36 | | | | | 0.934 |
| | -0.03 | 0.15 | 0.590 | 0.005 | -0.482 | 0.023 | 99.96 | 2.20 | 0.75 | 0.42 | | | 0.934 |
| Tper=5 dygn | -0.02 | 0.16 | 0.590 | 0.005 | -0.480 | 0.028 | 99.98 | 3.08 | | | | | 0.934 |
| | 0.04 | 0.18 | 0.589 | 0.005 | -0.490 | 0.031 | 99.98 | 2.56 | 0.38 | 0.44 | | | 0.933 |
| Tper=6 dygn | -0.17 | 0.13 | 0.594 | 0.005 | -0.469 | 0.023 | 99.99 | 2.79 | | | | | 0.932 |
| | -0.02 | 0.21 | 0.589 | 0.007 | -0.480 | 0.026 | 99.99 | 1.72 | 0.57 | 0.60 | | | 0.934 |
| Tper=10dygn | -0.23 | * | 0.592 | * | -0.454 | * | 100.00 | * | | | | | 0.934 |

Tidskonstanten

Tolkningen av parametern e_1 är värmekapaciteten C_p enligt (2.12). Med hjälp av den kan även tidskonstanten skattas. Tidskonstanten T ges av

$$T = C / (k_r + k_b) = T_{per} C_p / (k_r + k_b) \quad (2.40)$$

där k_b skattas av parameter B_1 . Radiatorsystemets värmeöverföringsförmåga, k_r , kan bestämmas på flera sätt. T ex ger (2.1) att $P_r = P_b + P_1 - P_g$. Insättning av (2.2), (2.3) och (2.13) och division med k_r ger

$$T_f - T_i = (k_b / k_r) (T_i - T_v) + (C_p / k_r) dT_i - (P_g / k_r) \quad (2.41)$$

kvoten k_b / k_r kan nu bestämmas med linjär regression av detta samband. Eftersom k_b är känd så kan tidskonstanten beräknas. Exakt värde i de simulerade fallen är $k_r = 0.40$. Modell 1 ger skattningar av tidskonstanten enligt TAB.2.4.

TAB.2.4 Skattad tidskonstant från modell 1
för olika periodlängder från TAB.2.2
och TAB.2.3.

| periodtid (dygn) | framkoppling (dygn) | P-regulator (dygn) |
|---------------------|------------------------|-----------------------|
| 1 | 2.0 +/- 0.2 | 1.7 +/- 0.4 |
| 2 | 2.5 +/- 0.3 | 2.8 +/- 0.5 |
| 3 | 3.1 +/- 0.6 | 2.4 +/- 1.4 |
| 5 | 3.2 +/- 0.3 | 2.0 +/- 2.4 |
| 6 | 2.7 +/- 0.2 | 3.7 +/- 3.8 |

Tidskonstanten skattas till grovt mellan 2 och 3 dygn. Den simulerade 3:e ordningens modell har de exakta tidskonstanterna 4 dygn med 83% av värmekapaciteten, 8 timmar med 10% och 0.72 timmar med 7%.

En anmärkning

En anmärkning i detta sammanhang som egentligen inte berör energibesparingen vid olika reglering, men som är intressant - är att reglering med återkoppling förenklar bestämningen av energibesparing även vid andra energisparande åtgärder.

För att bestämma betydelsen av t ex en byggnadsteknisk åtgärd är det vanligt att utföra ett "före-efter" försök. Man försöker då bevisa att parametern b_1 i energisignaturen (2.14) minskar vid åtgärden.

Om byggnaden regleras med enbart framkoppling så måste framkopplingskurvan ändras efter åtgärden. Annars mäts bara ca 40% ($=v_{gfk}$) av den verkliga energibesparingen, eller lägre om höjd innetemperatur orsakar ökad vädring. Men vilken framkopplingskurva ska väljas? Valet av ny kurva förutsätter egentligen att vi känner till hur mycket just parametern b_1 minskat. Vi hamnar då i samma problematik som beskrevs i kapitlets början. Vi får svårigheter att skilja ut vilken del av energibesparingen som orsakas av den energibesparande åtgärden och vad som orsakas av den ändrade framkopplingskurvan.

Med återkoppling minskas dessa problem betydligt. Man kan se det som att framkopplingskurvan automatiskt anpassas till sitt nya rätta värde eller strax intill. Innetemperaturen kan hållas oförändrad. Vädringsvanorna kommer inte att påverkas. Dessutom blir modellerna även säkrare när dynamiken snabbas upp.

Reglering med FÅK kan alltså rekommenderas som en del av utvärderingsmetoden vid "före-efter" försök.

2.4 Energibesparing vid återkoppling

Vi ska nu analysera mätdata från försökshuset på Tingvallen. De tre husen har datorreglerats under perioden nov -85 till maj -86. Två hus har reglerats med återkoppling utförd på något olika sätt medan ett hus alltid har reglerats med enbart framkoppling. Reglersätten har skiftats mellan husen för de olika perioderna. Framkopplingskurvan och börvärdet vid återkopplingen har man försökt välja så att innetemperaturen ska bli densamma oberoende av reglersätt.

En fråga som inte diskuterats tidigare är vilket mått på solstrålningen som ska användas. Man kan tänka sig att använda globalstrålningen som är summan av den direkta strålningen, vinkelrätt mot solen, och den diffusa strålningen från hela himlen. Alternativt så skulle man kunna använda den beräknade solstrålningen mot en vertikal sydfasad eller ännu bättre det beräknade viktade medelvärdet av solstrålningen mot de fyra fasadriktningarna.

Det viktade värdet av solstrålningen är det som ur fysikalisk synvinkel borde ge bäst resultat. Vikterna ska då ange hur stor andel varje viktning har av den totala fönsterytan. I FIG.2.5 visas skillnaden mellan de olika strålningsvärdena.

Alla tre måtten på solstrålning har provats. Den globala solstrålningen ger de säkraste modellerna följt av den viktade strålningen. En nackdel med att använda den globala strålningen är att skattningen av solavskärmningsfaktorn (C_1 -parametern) kommer att variera över året. Detta beror på att den globala strålningen mäts mot en horisontell yta. C_1 blir därför större på vintern och mindre på sommaren. För att slippa införa korrektionsfaktorer för detta har den viktade strålningen använts vid modellbestämningen. Även med den viktade strålningen kommer dock C_1 -parametern att variera, dock inte så mycket. En orsak till denna variation är skuggning vid balkonger. Fönstren i försökshusens vardagsrum är indragna ca 1.5 m från fasaden, vilket medför att solstrålningen blir mindre ju större solhöjden och horisontalvinkeln är. Detta gäller i högre grad på sommaren än på vintern, varför C_1 -parametern även med viktad solinstrålning blir större på vintern och gradvis mindre framåt sommaren.

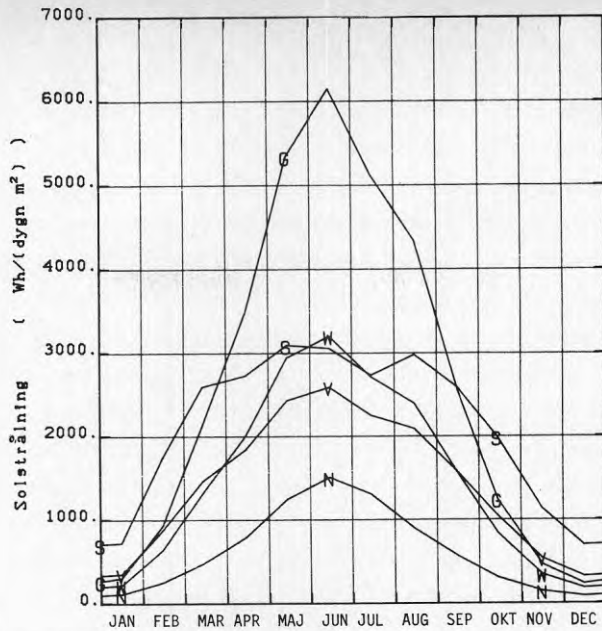


FIG.2.5 Exempel på global solstrålning mot en horisontell yta (G), strålning mot vertikala ytor i de fyra väderstrecken (S,W,N och ett viktat medelvärde av de fyra sistnämnda, V) Dygnsmedelsummor för Stockholm 1971-1980.

Det korrekta hade därför varit att använda variabla vikter som tog hänsyn till skuggningen vid beräkningen av den viktade solstrålningen. Detta har dock ansetts vara för komplicerat. De använda vikterna har istället valts utgående från att den totala fönsterytans fördelning i de fyra väderstrecken är ungefär 45% mot syd, 20% mot väst, 25% mot nord och 10% mot öst. Andelarna mot syd och väst har sedan minskats och de två andra ökats med hänsyn till att 70% av balkongerna är riktade mot syd och 30% mot väst. Efter avrundning har följande viktfunction valts

$$P_{svikt} = 1/3 P_{ssyd} + 1/6 P_{sväst} + 1/3 P_{snord} + 1/6 P_{söst} \quad (2.42)$$

Detta är också en lämplig viktning med tanke på att fyra av sex frånluftsgivare mäter frånluftstemperaturen från lägenheter med syd- och nordfasader.

När måttet på solstrålning är bestämt återstår bara att bestämma om statistiska eller dynamiska modeller ska användas och vilken medelvärdesperiod som ska väljas. Slutsatsen av förra avsnittet var att det

bästa valet är en 1:a ordningens dynamisk modell och en medelvärdesperiod på 3-5 dygn. En del försök att verifiera resultaten med den simulerade mätdatan har gjorts genom att prova olika modelltyper och medelvärdesperioder på verkliga mätdata. Resultatet av detta blev att den dynamiska modellen normalt fungerar klart bättre än den statiska, men undantag finns. I ett fall gav dock den statiska modellen något säkrare parameterskattningar medan den å andra sidan i ett annat fall gav klart felaktiga parameterskattningar, med fel tecken på solavskärmningsfaktorn (C_1). När det gäller medelvärdesperioden står det helt klart att periodtider under ett dygn är olämpliga. Däremot går det inte att bestämt avgöra om periodtider på flera dygn ger bättre resultat än periodtiden ett dygn. Slutligen visar dessa försök att det bästa sättet att erhålla säkrare modeller är att ha långa totaltider i mätperioderna.

Mot denna bakgrund väljer vi att i fortsättningen arbeta med 1:a ordningens dynamiska modeller och en periodtid för medelvärdesbildningen av mätvärdena på tre dygn.

Fyra mätperioder ska utnyttjas från höst/vinter, vinter, tidig vår och sen vår

| Period | tid | dygn | ute- medeltemp | Reglersätt | | |
|--------|---------------|------|-------------------|------------|-------|-------|
| | | | | hus 1 | hus 2 | hus 3 |
| 1 | 851108-860103 | 57 | +1 | FK | FÅK | FÅK |
| 2 | 860104-860202 | 30 | -3 | FK | FÅK | FÅK |
| 3 | 860307-860411 | 36 | +2 | FK | FÅK | FÅK |
| 4 | 860412-860601 | 51 | +10 | FÅK | FÅK | FK |

TAB.2.5 ger en sammanfattning av regressionsvariablernas värden. Här anges antal värden medel, max och minvärden under de fyra perioderna.

TAB.2.5 Regressionsvariablernas värden för period 1 och 2. Alla temperaturer avser periodmedelvärden. Strålningsvärdena är medelstrålning per dygn. Periodtiden är 3 dygn.

| Period 1 | | 851108 - 860103 | 57 dygn | | Reglering: FK DYGN NATT | | | |
|----------|------------------------------------|-----------------|----------------|---------------|-------------------------|-------------|----------------|---------------|
| | Effekt (W/m ² , lgy) | Ti-Tu (°C) | Tir-Tu (°C) | Ps-glob 1) | Tu (°C) | dTi (°C) | Ti-Tir (°C) | Ps-vikt 2) |
| Hus 1 | | | | | | | | |
| antal | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 |
| medel | 37.00 | 21.47 | 21.77 | 0.379 | 0.52 | -0.096 | -0.299 | 0.356 |
| max | 43.71 | 26.11 | 26.31 | 1.120 | 5.27 | 0.328 | 0.845 | 1.337 |
| min | 28.12 | 17.58 | 17.01 | 0.070 | -4.02 | -0.389 | -1.024 | 0.035 |
| Hus 2 | | | | | | | | |
| antal | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 |
| medel | 33.78 | 21.63 | 21.76 | 0.379 | 0.52 | -0.038 | -0.130 | 0.356 |
| max | 39.75 | 26.09 | 26.10 | 1.120 | 5.27 | 0.390 | 0.240 | 1.337 |
| min | 25.47 | 17.53 | 17.29 | 0.070 | -4.02 | -0.552 | -0.467 | 0.035 |
| Hus 3 | | | | | | | | |
| antal | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 |
| medel | 35.02 | 21.70 | 21.71 | 0.379 | 0.52 | -0.037 | -0.0130 | 0.356 |
| max | 41.25 | 26.09 | 26.05 | 1.120 | 5.27 | 0.430 | 0.1355 | 1.337 |
| min | 23.90 | 17.40 | 17.26 | 0.070 | -4.02 | -0.279 | -0.1064 | 0.035 |
| | | | | | | | | |
| Period 2 | | 860104 - 860202 | 30 dygn | | Reglering: FK NATT DYGN | | | |
| | Effekt (W/m ² , lgy) | Ti-Tu (°C) | Tir-Tu (°C) | Ps-glob 1) | Tu (°C) | dTi (°C) | Ti-Tir (°C) | Ps-vikt 2) |
| Hus 1 | | | | | | | | |
| antal | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| medel | 42.69 | 24.10 | 24.53 | 0.447 | -2.52 | -0.005 | -0.430 | 0.390 |
| max | 55.54 | 32.11 | 32.70 | 0.735 | 1.19 | 0.253 | -0.152 | 0.809 |
| min | 36.32 | 20.39 | 20.81 | 0.182 | -10.70 | -0.208 | -0.591 | 0.091 |
| Hus 2 | | | | | | | | |
| antal | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| medel | 39.54 | 24.50 | 24.47 | 0.447 | -2.52 | 0.006 | 0.0237 | 0.390 |
| max | 48.38 | 32.56 | 32.42 | 0.735 | 1.19 | 0.263 | 0.1378 | 0.809 |
| min | 34.90 | 20.89 | 20.95 | 0.182 | -10.70 | -0.319 | -0.0533 | 0.091 |
| Hus 3 | | | | | | | | |
| antal | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| medel | 41.54 | 24.30 | 24.52 | 0.447 | -2.52 | 0.002 | -0.220 | 0.390 |
| max | 51.67 | 32.41 | 32.48 | 0.735 | 1.19 | 0.246 | -0.062 | 0.809 |
| min | 36.91 | 20.66 | 21.00 | 0.182 | -10.70 | -0.255 | -0.412 | 0.091 |

1) enhet (kWh/dygn·m², hor yta)

2) (kWh/dygn·m², fasad)

TAB.2.5 (forts) Regressionsvariablernas värden för period 3 och 4. Alla temperaturer avser periodmedelvärden. Strålningsvärdena är medelstrålning per dygn. Periodtiden är 3 dygn.

| Period 3 | 860307 - 860411 | 36 dygn | Reglering: FK NATT DYGN | | | | | |
|-----------------|------------------------------------|----------------|-------------------------------|---------------|------------|-------------|----------------|---------------|
| endast | 860316 - 860411 | 27 dygn | för hus 1 | | | | | |
| | Effekt (W/m ² , lgy) | Ti-Tu (°C) | Tir-Tu (°C) | Ps-glob 1) | Tu (°C) | dTi (°C) | Ti-Tir (°C) | Ps-vikt 2) |
| Hus 1 | | | | | | | | |
| antal | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| medel | 34.57 | 19.77 | 20.27 | 2.51 | 2.08 | 0.087 | -0.497 | 1.39 |
| max | 37.73 | 22.23 | 22.28 | 5.09 | 4.15 | 0.458 | -0.055 | 2.61 |
| min | 31.75 | 17.62 | 18.20 | 1.02 | 0.06 | -0.379 | -0.905 | 0.53 |
| Hus 2 | | | | | | | | |
| antal | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| medel | 32.09 | 20.78 | 20.70 | 2.04 | 1.53 | 0.041 | 0.076 | 1.12 |
| max | 37.87 | 22.60 | 22.31 | 5.09 | 4.15 | 0.386 | 0.372 | 2.61 |
| min | 27.35 | 18.23 | 18.22 | 0.46 | -0.22 | -0.232 | -0.070 | 0.23 |
| Hus 3 | | | | | | | | |
| antal | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| medel | 32.87 | 20.54 | 20.75 | 2.04 | 1.53 | 0.060 | -0.214 | 1.12 |
| max | 38.20 | 22.34 | 22.36 | 5.09 | 4.15 | 0.381 | 0.072 | 2.61 |
| min | 28.71 | 18.11 | 18.28 | 0.46 | -0.22 | -0.396 | -0.512 | 0.23 |
| Period 4 | 860412 - 860601 | 51 dygn | Reglering: P10s P10 FK | | | | | |
| | Effekt (W/m ² , lgy) | Ti-Tu (°C) | Tir-Tu (°C) | Ps-glob 1) | Tu (°C) | dTi (°C) | Ti-Tir (°C) | Ps-vikt 2) |
| Hus 1 | | | | | | | | |
| antal | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 |
| medel | 19.38 | 13.04 | 12.92 | 4.30 | 9.78 | 0.066 | 0.110 | 1.86 |
| max | 32.93 | 20.99 | 21.02 | 6.99 | 14.10 | 0.610 | 0.387 | 2.82 |
| min | 11.25 | 9.12 | 8.83 | 2.31 | 1.05 | -0.375 | -0.190 | 1.12 |
| Hus 2 | | | | | | | | |
| antal | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 |
| medel | 19.36 | 13.73 | 12.94 | 4.30 | 9.78 | 0.092 | 0.795 | 1.86 |
| max | 30.32 | 21.41 | 21.03 | 6.99 | 14.10 | 0.774 | 1.563 | 2.82 |
| min | 14.28 | 9.94 | 8.85 | 2.31 | 1.05 | -0.650 | 0.180 | 1.12 |
| Hus 3 | | | | | | | | |
| antal | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 |
| medel | 20.30 | 13.85 | 12.91 | 4.30 | 9.78 | 0.115 | 0.939 | 1.86 |
| max | 33.98 | 21.41 | 21.65 | 6.99 | 14.10 | 0.839 | 1.844 | 2.82 |
| min | 13.83 | 9.99 | 8.60 | 2.31 | 1.05 | -0.367 | -0.477 | 1.12 |

1) enhet (kWh/dygn·m², hor yta)

2) (kWh/dygn·m², fasad)

Resultat för period 1

Skattade regressionsmodeller för period 1 redovisas i TAB.2.6. Modellerna benämns Mpmh där p = perioden (i detta fall 1), m = modellnr (1,2,3) och h = husnr (1,2,3). Periodlängden för medelvärdesberäkningen är vald till tre dygn.

Parameter B, skattningen av det specifika värmebehovet, blir ungefär densamma i de tre husen: 1.8, 1.7 och 1.8 W/°C,m² för hus 1, 2 och 3. Detta var väntat eftersom det är tre likadana hus.

Parameter C, skattningen av solavskärmningsfaktorn (saf), blir däremot oväntat klart lägre i hus 1, som regleras med enbart framkoppling, än i de två övriga husen som regleras med återkoppling. Värdena på saf blir 2.5, 3.6 respektive 3.9 (0.024 m²,fas/m²,lgy) för de tre husen. Samma tendens finns för de övriga perioderna att framkoppling medför lägre solavskärmningsfaktor. Det är därför inte meningsfullt att gå vidare och använda differensmodellerna, modell 4-6. Husen kan inte längre betraktas som lika. Tanken var ju annars att om de tre husen mottar lika mycket gratisvärme från solinstrålning så skulle regleringens inverkan kunna utläsas av en jämförelse mellan husen: Vilket hus får förhöjd innetemperatur och i vilket hus kompenseras detta med sänkt framledningstemperatur? Verkligheten, eller åtminstone modellens bild av verkligheten, blev istället den att det hus som har sämre reglering inte får in lika mycket solvärme.

En tolkning av detta är att de boende själva reglerar bort de övertemperaturer som uppkommer med ökad vädring och skuggning av fönster med gardiner och persienner. Såsom påpekades i början av kapitlet så kan vi inte mäta detta direkt utan bara indirekt som en förväntad, men utebliven, temperaturhöjning.

Medeltemperaturerna inne var 22.0, 22.2 och 22.2 °C under de 57 dyggen. Det kan först tyckas förvånande att vädringen ökar om medeltemperaturen är 22 °C. Man måste då komma ihåg att temperaturnivåerna mellan olika lägenheter kan skilja sig mycket. Vissa lägenheter har 20 °C, andra har 24 °C. Det är naturligtvis i de senare som gratisvärmen vädras och skuggas bort.

TAB.2.6 Skattade regressionsparametrar för modellerna 1, 2 och 3 med mätdata från försökshus 1, 2 och 3 under period 1.

| REGRESSION: PARAMETRAR | | | modell Mpmh | | | p=period | | | m=modellnr | | | h=husnr | | | enhet: W/m**2, lgy | | |
|------------------------|---------------|----------------|-----------------|----------------|--|----------|--|--|------------|--|--|---------|--|---------------|--------------------|------|--|
| | A +- s(A) | B +- s(B) | C +- s(C) | | | | | | | | | | | E +- s(E) | R**2 | D.W. | |
| Mp1h | A' +- s(A') | B' +- s(B') | C +- s(C) | | | | | | | | | | | E +- s(E) | R**2 | D.W. | |
| Mp2h | A +- s(A) | | | D +- s(D) | | | | | | | | | | E +- s(E) | R**2 | D.W. | |
| Mp3h | | | | | | | | | | | | | | E +- s(E) | R**2 | D.W. | |
| M111 | -0.79 +- 0.87 | 1.814 +- 0.042 | -2.454 +- 0.316 | | | | | | | | | | | 2.89 +- 0.56 | 99.2 | 1.1 | |
| M121 | 1.46 +- 0.50 | 1.660 +- 0.024 | -1.153 +- 0.192 | | | | | | | | | | | 1.95 +- 0.34 | 99.7 | 1.8 | |
| M131 | -1.19 +- 0.14 | | 1.311 +- 0.293 | 0.163 +- 0.036 | | | | | | | | | | -0.96 +- 0.52 | 75.7 | 0.7 | |
| M112 | -1.78 +- 1.08 | 1.712 +- 0.051 | -3.646 +- 0.343 | | | | | | | | | | | 4.27 +- 0.64 | 98.7 | 1.1 | |
| M122 | -1.64 +- 1.27 | 1.687 +- 0.060 | -3.166 +- 0.402 | | | | | | | | | | | 3.98 +- 0.76 | 98.3 | 1.0 | |
| M132 | -0.41 +- 0.07 | | 0.475 +- 0.137 | 0.022 +- 0.019 | | | | | | | | | | -0.28 +- 0.26 | 50.3 | 1.2 | |
| M113 | -2.22 +- 1.91 | 1.785 +- 0.088 | -3.940 +- 0.584 | | | | | | | | | | | 2.59 +- 1.50 | 97.5 | 1.8 | |
| M123 | -2.27 +- 1.76 | 1.782 +- 0.081 | -3.647 +- 0.542 | | | | | | | | | | | 2.70 +- 1.39 | 97.8 | 1.8 | |
| M133 | -0.13 +- 0.03 | | 0.290 +- 0.061 | 0.007 +- 0.009 | | | | | | | | | | 0.07 +- 0.15 | 64.8 | 1.9 | |

En annan möjlig tolkning är att parameterskattningen av C_1 är sämre i huset med enbart framkoppling av statistiska orsaker. En sådan tendens har vi redan sett i TAB.2.2-2.3 med simulerade data. Skillnaderna var dock inte så stora då och de avtog när medelvärdesperioden höjdes från ett dygn till tre dygn.

Gratisvärmeutnyttjandet kan istället bestämmas för ett hus i taget och med den gratisvärme som tillgodogörs i huset. Det beräknas som kvoten av parameter C_2 från modell 2 och C_1 från modell 1. För period 1 får vi följande värden

| Gratisvärmeutnyttjande för period 1 | | |
|-------------------------------------|-------|---|
| Hus nr | v_g | reglersätt |
| 1 | 47% | framkoppling från utetemperatur |
| 2 | 87% | } framkoppling plus återkoppling } från innetemperaturen |
| 3 | 93% | |

Detta överensstämmer bra med vad man kan förvänta sig. Återkopplingen fungerar. Cirka 90% av solvärmen som kommer in kan tillgodogöras i form av sänkt energiåtgång, återstoden ca 10% förloras i ökade förluster på grund av högre innetemperatur. I hus 1, med enbart framkoppling, tillgodogörs knappt hälften av solvärmen passivt eftersom de förhöjda innetemperaturerna minskar värmeavgivningen från radiatorerna.

Ovanstående bestämning av gratisvärmeutnyttjandet grundas alltså på hur mycket solvärme som enligt modellen tillgodogörs i husen. Med detta synsätt så syns ökad fönstervädring och skuggning som en minskning i tillgodogjort solvärme medan gratisvärmeutnyttjandet inte påverkas. Alternativt så kunde det vara naturligt att sätta solvärmertilskottet till samma värde för de tre likadana försökshusen. Eventuell ökad vädring och skuggning kommer då att inkluderas i och minska värdet på gratisvärmeutnyttjandet. Om vi sätter solvärmertilskottet till lika med det som uppmäts i försökshus 3 så blir de nya värdena på gratisvärmeutnyttjandet följande

Gratisvärmeutnyttjande för period 1 (alternativ beräkning)

| Hus nr | v_g | reglersätt |
|--------|-------|---|
| 1 | 29% | framkoppling från utetemperatur |
| 2 | 80% | { framkoppling plus återkoppling från innetemperaturen |
| 3 | 93% | |

Vilket sätt man använder för att bestämma gratisvärmeutnyttjandet är en tolkningsfråga. Vi ska i fortsättningen använda det förra sättet. Ett skäl för detta är att vi inte vet omfattningen av ökad vädring etc i det bäst reglerade huset. Solvärmestillskottet till de tre husen kan ju vara större än det som uppskattas i detta. Om vi t ex antog att solvärmestillskottet vore 20% högre än vad modell 1 anger för hus 3, så får vi värdena $v_g=24\%$, 67% , 77% för hus 1, 2 och 3.

Det ska påpekas att hus 2 och 3, som båda har återkoppling, ändå regleras på helt olika sätt. Hus 2 har en återkoppling som uppdateras endast en gång per dygn, dvs framkopplingskurvan parallellförskjuts en gång per dygn. Detta reglersätt kallar vi dygnsreglering. Hus 3 har återkoppling under sex nattimmar, resten av dygnet används den normala framkopplingskurvan. Detta reglersätt kallar vi nattreglering.

Regressionsmetoden är inte tillräckligt noggrann för att kunna bestämma signifikanta skillnader mellan olika återkopplingsätt. Därför jämför vi i detta kapitel bara fallen med och utan återkoppling. Vi återkommer till en jämförelse mellan olika sätt att utföra återkopplingen i nästa kapitel. Här ska bara påpekas att temperaturförloppen blir mycket olika i de två återkopplingsfallen. Detta framgår också av TAB.2.5 där reglerfelens variation mellan största och minsta värde under de 57 dyggen är 1.4, 0.7 och 0.2 °C. Man behöver alltså inte, som i hus 3, hålla en mycket jämn innetemperatur för att uppnå ett högt gratisvärmeutnyttjande.

Vi kan alltså konstatera att gratisvärmeutnyttjandet ökade betydligt med återkoppling. Vad detta betyder för energiförbrukningen bestämmer vi genom att tillämpa modellerna på de medelvärden som redovisas i TAB.2.5. I TAB.2.7 visas hur effektförbrukningen kan delas upp i poster med hjälp av regressionsmodellerna och medelvärdena.

TAB.2.7 Regressionsmodellerna enligt TAB.2.6 tillämpade på regressionsvariablernas medelvärden under period 1 enligt TAB.2.5.

| REGRESSION: TILLÄMPAD MODELL | | modell Mpmh | | p-period | | m-modellnr | | h-husnr | | enhet: W/m**2, lgy | | | | | | | | |
|------------------------------|-------------------|----------------|---|-------------------|---|-----------------|---|------------------|---|--------------------|---|------------------|---|-----------------|---|------------------|---|-----------------|
| Mplh | Effekt = | A | + | B | * | (Ti-Tu) | - | C | * | Pevikt | + | E | * | dTi | | | | |
| Mp2h | Effekt = | A' | + | B' | * | (Tir-Tu) | - | C | * | Pevikt | + | E | * | dTi | | | | |
| Mp3h | B*(Ti-Tir)= | A | + | | | | + | C | * | Pevikt | + | D | * | Tu | + | E | * | dTi |
| M111 | 37.00 = 100.0% | -0.79 -2.1% | + | 1.814 * 105.2% | + | 21.47 105.2% | - | 2.454 * -2.4% | + | 0.36 -2.4% | + | 2.885 * -0.7% | + | -0.096 -0.7% | | | | |
| M121 | 37.00 = 100.0% | 1.46 3.9% | + | 1.660 * 97.7% | + | 21.77 97.7% | - | 1.153 * -1.1% | + | 0.36 -1.1% | + | 1.953 * -0.5% | + | -0.096 -0.5% | | | | |
| M131 | -0.542 = -1.5% | -1.19 -3.2% | + | | + | | + | 1.311 * 1.3% | + | 0.36 1.3% | + | 0.163 * 0.2% | + | 0.52 0.2% | - | 0.960 * 0.2% | + | -0.096 0.2% |
| M112 | 33.78 = 100.0% | -1.78 -5.3% | + | 1.712 * 109.6% | + | 21.63 109.6% | - | 3.646 * -3.8% | + | 0.36 -3.8% | + | 4.274 * -0.5% | + | -0.038 -0.5% | | | | |
| M122 | 33.78 = 100.0% | -1.64 -4.9% | + | 1.687 * 108.7% | + | 21.76 108.7% | - | 3.166 * -3.3% | + | 0.36 -3.3% | + | 3.976 * -0.4% | + | -0.038 -0.4% | | | | |
| M132 | -0.223 = -0.7% | -0.41 -1.2% | + | | + | | + | 0.475 * 0.5% | + | 0.36 0.5% | + | 0.022 * 0.0% | + | 0.52 0.0% | - | 0.284 * 0.0% | + | -0.038 0.0% |
| M113 | 35.02 = 100.0% | -2.22 -6.3% | + | 1.785 * 110.6% | + | 21.70 110.6% | - | 3.940 * -4.0% | + | 0.36 -4.0% | + | 2.590 * -0.3% | + | -0.037 -0.3% | | | | |
| M123 | 35.02 = 100.0% | -2.27 -6.5% | + | 1.782 * 110.5% | + | 21.71 110.5% | - | 3.647 * -3.7% | + | 0.36 -3.7% | + | 2.698 * -0.3% | + | -0.037 -0.3% | | | | |
| M133 | -0.023 = -0.1% | -0.13 -0.4% | + | | + | | + | 0.290 * 0.3% | + | 0.36 0.3% | + | 0.007 * 0.0% | + | 0.52 0.0% | + | 0.067 * -0.0% | + | -0.037 -0.0% |

Det redovisade materialet i TAB.2.7 ska nu studeras i detalj.

Modell 1 ger

$$\begin{aligned}
 \text{M111 Effekt} &= A_1 + B_1(T_i - T_u) - C_1 P_s + E_1 dT_i \\
 37.0 &= -0.8 + 1.8 \cdot 21.5 - 2.5 \cdot 0.4 + 2.9 \cdot 0.1 \\
 100.0\% &= -2.1\% + 105.2\% - 2.4\% - 0.7\%
 \end{aligned}$$

Den totala effektförbrukningen är 37.0 W/m^2 , lgy vilket sätts till 100%. Om effektförbrukningen endast berott på specifika effektbehovet gånger temperaturskillnaden inne-ute så skulle effektförbrukningen varit större, nämligen 105.2%. Men 2.4% täcks av solinstrålning och 0.7% täcks av att den lagrade värmemängden i byggnadsstommen minskat på grund av minskad innetemperatur under perioden. De sista 2.1% täcks av skillnaden mellan övrig gratisvärme och övrig effektförbrukning (varmvatten mm), dvs $P_{\text{gövr}} - P_{\text{övr}}$ i (2.14). Dessa tar alltså nästan ut varandra.

Effektförbrukningens uppdelning enligt modell 2' lyder

$$\begin{aligned}
 \text{M121 Effekt} &= A'_2 + B'_2(T_{i\text{ref}} - T_u) - C_2 P_s + E_2 dT_i \\
 37.0 &= 1.5 + 1.7 \cdot 21.8 - 1.2 \cdot 0.4 + 2.0 \cdot 0.1 \\
 100\% &= 3.9\% + 97.7\% - 1.1\% - 0.5\%
 \end{aligned}$$

Förändringen i skattad parameter b från $B_1=1.82$ till $B'_2=1.66$ visar att något för stor lutning används på framkopplingskurvan och att regleringen inte kan kompensera detta. Förändringen i skattningen av solavskärmningsfaktorn C från $C_1=2.5$ till $C_2=1.2$ visar att av de 2.4% av den totala effektförbrukningen som solinstrålningen stod för så kan $1.2/2.5=47\%$ utnyttjas rätt. Kvoten anger (återigen) gratisvärmeutnyttjandet, v_g . Skillnaden i de övriga parametrarna beror på inverkan från fel vald framkopplingskurva och på gratisvärmeutnyttjandet. Detta framgår dock bäst av modell 3

$$\begin{aligned}
 \text{M131 } B_1(T_i - T_{i\text{ref}}) &= A_3 + C_3 P_s + D T_u + E dT_i \\
 0.5 &= -1.2 + 1.3 \cdot 0.4 + 0.2 \cdot 0.5 + 1.0 \cdot 0.1 \\
 -1.5\% &= -3.2\% + 1.3\% + 0.2\% + 0.2\%
 \end{aligned}$$

Detta tolkas som att effektförbrukningen är 1.5% mindre än den "optimala". Vi ska då märka att den optimala regleringen (2.18) hade givit en konstant innetemperatur på $T_i = T_{i\text{ref}} = 22.3 \text{ }^\circ\text{C}$ men

att medeltemperaturen under perioden var $T_i=22.0$. Den konstanta delen av framkopplingskurvan är för lågt vald vilket ger 3.2% för låg effektförbrukning. Detta kompenseras till viss del av ej rätt utnyttjad solinstrålning med 1.3% och felaktig lutning på framkopplingskurvan med 0.2% och lika mycket från lagringstermen.

Observera att med rätt vald framkopplingskurva menade vi den framkopplingskurva som givit rätt innetemperatur i frånvaro av solinstrålning. Men vi ser också att det går att kompensera solinstrålningen genom att välja "för låg" konstant i framkopplingskurvan. I detta fall användes dock alltför låg konstant.

För hus 2 med återkoppling, se modell M112, M122 och M132, är den totala effektförbrukningen 33.8 W/m^2 , lgy under period 1. 3.8% av detta består enligt M112 av värme från solinstrålning. Enligt M122 utnyttjas 87% av solinstrålningen rätt, dvs som en sänkt värmeförbrukning på 3.3% av den totala effektförbrukningen. Att parametern b inte ändrar sig så mycket mellan modell 1 och 2 beror på att regleringen kan kompensera för att framkopplingskurvan är fel vald. Del val av framkopplingskurva och lagringens inverkan syns ej i effektförbrukningen. Det senare därför att innetemperaturen ändrar sig mindre och gratisvärmeutnyttjandet är högt vid återkoppling.

För hus 3, modellerna M113, M123 och M133, så gäller samma slutsatser. Gratisvärmeutnyttjandet blir här något högre eller 93%.

Sammanfattningsvis så ger återkoppling högre gratisvärmeutnyttjande och mindre känslighet mot felaktigt vald framkopplingskurva. Detta är vad man kunde vänta sig mot bakgrund av sambandet (2.20). Under period 1, dvs 851108-860104, är storleken på solinstrålningen inte så stor och energibesparingen blir följaktligen ganska blygsam. I stort kunde ca 2.6% av den totala fjärrvärmeåtgången under period 1 sparas till följd av bättre utnyttjande av solinstrålningen. Av detta härrörde ca 70% av det högre gratisvärmeutnyttjandet vid återkoppling och resten av den ökade vädringen och skuggningen i fallet med enbart framkoppling. Nu är solinstrålningen - i alla fall under vintern - troligen en mindre del av det totala gratisvärmestillskottet. Även det övriga gratisvärmestillskottet, $P_{\text{gövr}}$ som inte härrör från solinstrålningen tillgodogörs enligt (2.24) också bättre med återkoppling. Men eftersom detta värmestillskott

(hushållsel, vvc-förluster etc) är relativt konstant från dygn till dygn så kan man även med ren framkoppling tillgodogöra sig denna värme genom en konstant sänkt framkopplingskurva.

Resultat för period 2

Reglersätten under period 2 är desamma som under period 1 förutom att de två sätten att utföra återkopplingen på har skiftats mellan försökshus 2 och 3. Hus 2 har alltså det vi kallar nattreglering och hus 3 har dygnsreglering.

Regressionsparametrarna för period 1 var över lag relativt säkra, vilket framgick av feluppskattningarna i TAB.2.6. Men för period 2, dvs tiden 860104-860202 som presenteras i TAB.2.8, gäller motsatsen. Parameterskattningarna är mycket osäkra och modellerna är i stort sett oanvändbara.

Orsaken till detta är inte känd. Det skulle kunna bero på att inte tillräckligt mycket "händer" under de 30 dagarna. Att solinstrålningen är för liten jämfört med värmebehovet och att spridningen i utetemperatur är för liten. Men skillnaden mellan period 1 och 2 är inte så stor i dessa avseenden. Liknande svårigheter att skatta rimliga modeller visar sig också vid försök med den simulerade mät-datan där i detta fall februari ger dåliga modeller medan januari och mars ger bra modeller.

I ett kommande avsnitt ska vi se att vi trots de dåliga parameterskattningarna kan ha nytta av mät-datan från period 2 genom att slå ihop period 1 och 2.

Att återkopplingen fungerar även under period 2 kan utläsas av TAB.2.5 varur framgår att variationen i innetemperaturen har varit 0.8, 0.2 och 0.3 °C i de tre försökshusen. Detta avser medelvärden för 3-dygnsperioder. Variationen har alltså varit tre till fyra gånger större i försökshus 1 med enbart framkoppling. Med tanke på detta borde gratisvärmeutnyttjandet även under period 2 varit högre i husen med återkoppling. Men detta kan alltså inte visas med energiförbrukningsmodellerna.

TAB.2.8 Skattade regressionsparametrar för modellerna 1, 2 och 3 med mätdata från försökshus 1, 2 och 3 under period 2.

| REGRESSION: PARAMETRAR | | | modell Mp1h | | | p=period | | | m=model1nr | | | h=husnr | | | enhet: W/m**2, lgy | | |
|------------------------|---------------|----------------|-----------------|-----------------|--|----------|--|--|------------|--|--|---------------|------|------|--------------------|--|--|
| Mp1h | A +- s(A) | B +- s(B) | C +- s(C) | | | | | | | | | E +- s(E) | R**2 | D.W. | | | |
| Mp2h | A' +- s(A') | B' +- s(B') | C +- s(C) | | | | | | | | | E +- s(E) | R**2 | D.W. | | | |
| Mp3h | A +- s(A) | | C +- s(C) | D +- s(D) | | | | | | | | E +- s(E) | R**2 | D.W. | | | |
| M211 | 2.01 +- 2.42 | 1.702 +- 0.118 | -0.874 +- 1.588 | | | | | | | | | -0.67 +- 1.65 | 98.8 | 1.5 | | | |
| M221 | 2.63 +- 1.91 | 1.635 +- 0.091 | -0.102 +- 1.246 | | | | | | | | | -0.59 +- 1.33 | 99.2 | 1.9 | | | |
| M231 | -0.88 +- 0.14 | | 0.875 +- 0.438 | 0.077 +- 0.032 | | | | | | | | 0.07 +- 0.47 | 49.8 | 1.2 | | | |
| M212 | 10.56 +- 5.16 | 1.212 +- 0.225 | -1.791 +- 3.147 | | | | | | | | | -0.58 +- 4.84 | 92.3 | 0.8 | | | |
| M222 | 9.97 +- 5.10 | 1.236 +- 0.222 | -1.733 +- 3.054 | | | | | | | | | -0.43 +- 4.72 | 92.7 | 0.7 | | | |
| M232 | -0.05 +- 0.04 | | 0.095 +- 0.096 | -0.017 +- 0.007 | | | | | | | | 0.08 +- 0.15 | 79.6 | 1.3 | | | |
| M213 | 4.63 +- 2.60 | 1.501 +- 0.118 | 1.101 +- 1.309 | | | | | | | | | 8.34 +- 1.78 | 98.6 | 1.4 | | | |
| M223 | 3.53 +- 3.19 | 1.534 +- 0.144 | 0.996 +- 1.555 | | | | | | | | | 8.11 +- 2.10 | 98.0 | 1.3 | | | |
| M233 | -0.37 +- 0.09 | | -0.151 +- 0.272 | -0.040 +- 0.025 | | | | | | | | -0.16 +- 0.37 | 58.6 | 0.7 | | | |

Försöksperiod 2 skulle egentligen ha varat längre. Under februari och mars fortsatte också regleringen i försökshuset och fungerade som avsett. Men en rad datorproblem med huvudcentralen som samlar in mätvärdena från alla försökshus gjorde att uppmätta data inte kunde registreras utan gick förlorade. Inte förrän 860307, dvs efter 4 1/2 vecka, fungerade inläsningen av mätdata igen. För försökshus 1 förlorades ytterligare fem dygn varför period 3 är kortare för detta hus.

Resultat för period 3

För period 3 blir resultaten återigen bättre. Period 3 är tiden 860307-860411, dvs tidig vår, vilket normalt är en gynnsam tid med mycket sol.

Reglersätten är oförändrade från period 2. Parameterskattningarna för energiförbrukningsmodellerna för period 3 redovisas i TAB.2.9. Liksom under period 1 så blir den tillgodgjorda solinstrålningen klart mindre i försökshus 1 med enbart framkoppling. Den blir endast 53% av vad den blir i försökshus 2, som nu har den bättre återkopplingen (nattreglering). Detta kan antas bero på ökad vädring och skuggning på samma sätt som tidigare.

Gratisvärmeutnyttjandet har beräknats till följande värden

| Gratisvärmeutnyttjande för period 3 | | |
|-------------------------------------|-------|---|
| Hus nr | v_g | reglersätt |
| 1 | 64% | framkoppling från utetemperatur |
| 2 | 91% | { framkoppling plus återkoppling från innetemperaturen |
| 3 | 89% | |

Detta överensstämmer med vad som är förväntat för de båda husen med återkoppling medan gratisvärmeutnyttjandet blir högre än väntat i försökshus 1. Teoretiskt blir $v_g = k_b / (k_b + k_r)$ vid framkoppling enligt (2.23) vilket motsvarar knappt 0.5 i detta hus.

TAB.2.9 Skattade regressionsparametrar för modellerna 1, 2 och 3 med mätdata från försökshus 1, 2 och 3 under period 3.

| REGRESSION: PARAMETRAR | | modell Mpmh | | | p=period | | | m=modellnr | | | h=husnr | | | enhet: W/m**2, lgy | | |
|------------------------|---------------|----------------|-----------------|-----------------|----------|--|--|------------|--|---------------|---------|------|--|--------------------|--|--|
| Mp1h | A +- s(A) | B +- s(B) | C +- s(C) | | | | | | | E +- s(E) | R**2 | D.W. | | | | |
| Mp2h | A' +- s(A') | B' +- s(B') | C +- s(C) | | | | | | | E +- s(E) | R**2 | D.W. | | | | |
| Mp3h | A +- s(A) | | C +- s(C) | D +- s(D) | | | | | | E +- s(E) | R**2 | D.W. | | | | |
| M311 | 4.46 +- 6.78 | 1.634 +- 0.374 | -1.808 +- 0.750 | | | | | | | 3.64 +- 1.60 | 80.1 | 1.8 | | | | |
| M321 | 4.60 +- 5.40 | 1.546 +- 0.283 | -1.149 +- 0.537 | | | | | | | 2.56 +- 1.22 | 86.2 | 2.0 | | | | |
| M331 | -2.05 +- 0.34 | | 0.734 +- 0.159 | 0.158 +- 0.084 | | | | | | -1.20 +- 0.36 | 81.8 | 0.9 | | | | |
| M312 | 2.17 +- 3.62 | 1.617 +- 0.172 | -3.437 +- 0.304 | | | | | | | 4.17 +- 1.37 | 96.6 | 2.0 | | | | |
| M322 | 1.55 +- 3.45 | 1.637 +- 0.163 | -3.143 +- 0.289 | | | | | | | 3.97 +- 1.29 | 97.0 | 2.0 | | | | |
| M332 | -0.18 +- 0.04 | | 0.293 +- 0.026 | -0.012 +- 0.013 | | | | | | -0.21 +- 0.11 | 94.4 | 2.4 | | | | |
| M313 | 4.64 +- 5.90 | 1.525 +- 0.285 | -2.952 +- 0.483 | | | | | | | 3.35 +- 1.58 | 89.7 | 1.7 | | | | |
| M323 | 4.64 +- 5.55 | 1.493 +- 0.262 | -2.622 +- 0.467 | | | | | | | 3.08 +- 1.51 | 90.7 | 1.8 | | | | |
| M333 | -0.75 +- 0.05 | | 0.320 +- 0.033 | 0.051 +- 0.017 | | | | | | -0.26 +- 0.11 | 93.8 | 1.3 | | | | |

En möjlig förklaring till denna skillnad vore att de boende under soliga perioder stänger av en del radiatorer. Resultatet av en sådan manuell återkoppling från innetemperaturen skulle resultera i högre gratisvärmeutnyttjande. En troligare förklaring är dock att skattningen är större än det verkliga värdet. Energiförbrukningsmodellerna är ju som vi sett inte så noggranna vid framkoppling.

De tillämpade modellerna som visar vad de skattade modellerna betyder för energiförbrukningen i den aktuella perioden ges i TAB.2.10. Solinstrålningen har som väntat större inverkan i period 3 än i period 1. I de två husen med återkoppling täcks 10.9% och 10.0% av den totala energiåtgången med solstrålning. Motsvarande siffra för försökshus 1 framkoppling är 4.6%. Observera att försöksperiod 3 var något kortare och ca 25% soligare för hus 1 jämfört med de båda andra husen. Korregerar man för detta så att de tre perioderna jämförs för samma uteklimat så ändras de 4.4% till 3.5%.

Resultat för period 4

Period 4 är tiden 860412-860601. Detta är en mycket gynnsam period med mycket sol och hög medeltemperatur ute. Jämfört med period 1 och 2 är det ca 5 ggr mer solinstrålning samtidigt som värmebehovet minskat till knappt hälften.

Försökshus 1, som under period 1-3 styrdes med enbart framkoppling, regleras under period 4 med återkoppling. Även försökshus 2 regleras med återkoppling. För återkopplingen används proportionella regulatorer (P-regulatorer) med förstärkningen 10 ggr. Under denna period är det försökshus 3 som styrs med enbart framkoppling.

Parameterskattningarna för period 4 visas i TAB.2.11. Såsom förväntat får nu försökshus 1 ett högt gratisvärmeutnyttjande ($v_g=81\%$) medan försökshus 3 får ett lågt gratisvärmeutnyttjande ($v_g=30\%$).

Något som vid första anblicken är förvånande är att regleringen med återkoppling i försökshus 2 fungerar betydligt sämre än i försökshus 1. Detta syns redan i TAB.2.5. Här framgår att temperaturvariationen varit 0.5, 1.7 och 2.3 °C i försökshus 1, 2 respektive 3.

TAB.2.10 Regressionsmodellerna enligt TAB.2.9 tillämpade på regressionsvariablernas medelvärden under period 3 enligt TAB.2.5.

| REGRESSION: TILLÄMPAD MODELL | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|-------------------|----------------|---|-------------------|---|----------|---|-------------------|---|--------|--------------------|--------------------|
| | | A | + | B | * | (Ti-Tu) | - | C | * | Psvikt | h=husnr | enhet: W/m**2.lg |
| Mp1h | Effekt = | A' | + | B' | * | (Tir-Tu) | - | C | * | Psvikt | | E * dTi |
| Mp2h | Effekt = | A | + | | | | | | | | | E * dTi |
| Mp3h | B*(Ti-Tir)= | A | + | | | | | C | * | Psvikt | D * Tu | E * dTi |
| M311 | 34.57 = 100.0% | 4.46 12.9% | + | 1.634 * 93.4% | | 19.77 | - | 1.808 * -7.2% | | 1.39 | | + 3.639 * 0.9% |
| M321 | 34.57 = 100.0% | 4.60 13.3% | + | 1.546 * 90.7% | | 20.27 | - | 1.149 * -4.6% | | 1.39 | | + 2.557 * 0.6% |
| M331 | -0.812 = -2.3% | -2.05 -5.9% | | | | | + | 0.734 * 2.9% | | 1.39 | + 0.158 * 0.7% | - 1.203 * -0.3% |
| M312 | 32.09 = 100.0% | 2.17 6.8% | + | 1.617 * 104.7% | | 20.78 | - | 3.437 * -12.0% | | 1.12 | | + 4.172 * 0.5% |
| M322 | 32.09 = 100.0% | 1.55 4.8% | + | 1.637 * 105.6% | | 20.70 | - | 3.143 * -10.9% | | 1.12 | | + 3.972 * 0.5% |
| M332 | 0.123 = 0.4% | -0.18 -0.6% | | | | | + | 0.293 * 1.0% | | 1.12 | - 0.012 * -0.1% | - 0.207 * -0.0% |
| M313 | 32.87 = 100.0% | 4.64 14.1% | + | 1.525 * 95.3% | | 20.54 | - | 2.952 * -10.0% | | 1.12 | | + 3.350 * 0.6% |
| M323 | 32.87 = 100.0% | 4.64 14.1% | + | 1.493 * 94.2% | | 20.75 | - | 2.622 * -8.9% | | 1.12 | | + 3.082 * 0.6% |
| M333 | -0.326 = -1.0% | -0.75 -2.3% | | | | | + | 0.320 * 1.1% | | 1.12 | + 0.051 * 0.2% | - 0.255 * -0.0% |

TAB.2.11 Skattade regressionsparametrar för modellerna 1, 2 och 3 med mätdata från försökshus 1, 2 och 3 under period 4.

| REGRESSION: PARAMETRAR | | | modell Mpmh | | | p=period | | | m=modellnr | | | h=huesnr | | | enhet: W/m**2, lgy | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|---------------|----------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|--------------|------|------------|------|---------------|----------------|-----------------|-----------|--------------------|-----------|--------------|------|------|------|---------------|-----------|----------------|----------------|-----------|-----------|---------------|------|------|
| Mp1h | A +- s(A) | B +- s(B) | C +- s(C) | p +- s(C) | m +- s(C) | D +- s(D) | E +- s(E) | R**2 | D.W. | Mp2h | A' +- s(A') | B' +- s(B') | C +- s(C) | p +- s(C) | m +- s(C) | D +- s(D) | E +- s(E) | R**2 | D.W. | Mp3h | A +- s(A) | B +- s(B) | C +- s(C) | p +- s(C) | m +- s(C) | D +- s(D) | E +- s(E) | R**2 | D.W. |
| M411 | -3.20 +- 3.93 | 2.018 +- 0.164 | -2.174 +- 1.100 | | | | 5.02 +- 1.44 | 96.8 | 1.5 | M421 | -3.19 +- 3.62 | 1.976 +- 0.148 | -1.766 +- 1.039 | | | | 4.87 +- 1.34 | 97.2 | 1.4 | M431 | -0.89 +- 0.17 | | 0.349 +- 0.127 | 0.049 +- 0.017 | | | -0.16 +- 0.16 | 81.7 | 1.8 |
| M412 | -0.76 +- 2.03 | 1.552 +- 0.086 | -0.827 +- 0.558 | | | | 3.80 +- 0.51 | 98.0 | 1.7 | M422 | 1.26 +- 2.32 | 1.425 +- 0.095 | -0.337 +- 0.691 | | | | 3.15 +- 0.61 | 97.2 | 1.5 | M432 | -0.76 +- 0.27 | | 0.535 +- 0.198 | 0.107 +- 0.025 | | | -0.61 +- 0.17 | 86.4 | 1.7 |
| M413 | -2.94 +- 0.88 | 1.802 +- 0.037 | -1.064 +- 0.241 | | | | 2.27 +- 0.26 | 99.7 | 2.5 | M423 | 0.84 +- 0.68 | 1.541 +- 0.026 | -0.314 +- 0.211 | | | | 1.22 +- 0.22 | 99.8 | 2.3 | M433 | -2.13 +- 0.30 | | 0.723 +- 0.224 | 0.266 +- 0.028 | | | -1.04 +- 0.24 | 95.9 | 2.6 |

Temperaturregleringen fungerar alltså inte så bra som förväntat i försökshus 2. Gratisvärmeutnyttjandet blir bara 41% och solavskärmningsfaktorn skattas till och med lägre än i försökshus 3 med framkoppling.

Allt detta har dock sin förklaring. Det beror på att reglerventilen som styr fjärrvärmeförseln till radiatorsystemet i försökshus 2 inte sluter tätt vid stängning. Framledningstemperaturen kan därför inte sänkas under ca 30 °C. Under de tidigare och kallare perioderna har detta fel inte haft någon större betydelse eftersom det då sällan har behövts så pass låga framledningstemperaturer. Under period 4 däremot, med en utetemperatur som ofta legat omkring 10-15 °C och med en hel del sol, så återspeglas ett sådant fel tydligt i energiförbrukningen. Lärodomen av detta är välkänd men tål att upprepas: Man har ingen nytta av avancerade tekniska lösningar om det grundläggande underhållet och skötseln är bristfälligt.

Men även gratisvärmeutnyttjandet på $v_g=81\%$ för försökshus 1 är lägre än väntat. Teoretiskt enligt FIG.2.1 hade man väntat sig att den använda P-regulatorn hade givit ett v_g på ca 90%. Denna skillnad beror på att utetemperaturen är så pass hög och värmebehovet därmed så pass lågt under vissa dagar att solinstrålningen inte kan tillgodogöras genom lägre framledningstemperatur. Regulatorn kan inte göra mer än att stänga av värmeförseln.

De tillämpade regressionsmodellerna visas i TAB.2.12. I försökshus 1 täcks 21% av den totala fjärrvärmeåtgången av solinstrålning. Härav utnyttjas 17% rätt. Motsvarande siffror för försökshus 3 med enbart framkoppling är att 10% av den totala fjärrvärmeåtgången täcks av solinstrålning varav 3% utnyttjas rätt.

TAB.2.12 Regressionsmodellerna enligt TAB.2.11 tillämpade på regressionsvariablernas medelvärden under period 4 enligt TAB.2.5.

| REGRESSION: TILLÄMPAD MODELL | | | | | | | | | |
|------------------------------|-------------------|-----------------|---------------------------|--------------------------|------------|-------------------------|--------------------------|--|--|
| | | modell Mpmh | | p=period | m=modellnr | h=husnr | enhet: W/m**2, lgy | | |
| Mplh | Effekt = | A | + B * (Ti-Tu) | - C * Psvikt | | | + E * dTi | | |
| Mp2h | Effekt = | A' | + B' * (Tir-Tu) | - C * Psvikt | | | + E * dTi | | |
| Mp3h | B*(Ti-Tir)= | A | + C * Psvikt | + D * Tu | | | + E * dTi | | |
| M411 | 19.38 = 100.0% | -3.20 -16.5% | + 2.018 * 13.04 135.8% | - 2.174 * 1.86 -20.9% | | | + 5.017 * 0.066 1.7% | | |
| M421 | 19.38 = 100.0% | -3.19 -16.5% | + 1.976 * 12.92 131.8% | - 1.766 * 1.86 -17.0% | | | + 4.873 * 0.066 1.7% | | |
| M431 | 0.222 = 1.1% | -0.89 -4.6% | | + 0.349 * 1.86 3.4% | | + 0.049 * 9.78 2.5% | - 0.158 * 0.066 -0.1% | | |
| M412 | 19.36 = 100.0% | -0.76 -3.9% | + 1.552 * 13.73 110.1% | - 0.827 * 1.86 -8.0% | | | + 3.802 * 0.092 1.8% | | |
| M422 | 19.36 = 100.0% | 1.26 6.5% | + 1.425 * 12.94 95.3% | - 0.337 * 1.86 -3.2% | | | + 3.152 * 0.092 1.5% | | |
| M432 | 1.234 = 6.4% | -0.76 -3.9% | | + 0.535 * 1.86 5.1% | | + 0.107 * 9.78 5.4% | - 0.612 * 0.092 -0.3% | | |
| M413 | 20.30 = 100.0% | -2.94 -14.5% | + 1.802 * 13.85 122.9% | - 1.064 * 1.86 -9.8% | | | + 2.265 * 0.115 1.3% | | |
| M423 | 20.30 = 100.0% | 0.84 4.2% | + 1.541 * 12.91 98.0% | - 0.314 * 1.86 -2.9% | | | + 1.220 * 0.115 0.7% | | |
| M433 | 1.692 = 8.3% | -2.13 -10.5% | | + 0.723 * 1.86 6.6% | | + 0.266 * 9.78 12.8% | - 1.040 * 0.115 -0.6% | | |

Gratisvärmeutnyttjandet i försökshuset

Vi ska nu sammanställa resultaten för skattat gratisvärmeutnyttjande för de olika reglersätten under de fyra perioderna. Som reglersätt anger vi framkoppling och återkoppling 1 och 2 för den bättre respektive sämre formen av återkoppling. Observera att reglersätten har använts i olika hus enligt följande uppställning

| period | framkoppling | återkoppling 1 | återkoppling 2 |
|--------|--------------|----------------|----------------|
| 1 | försökshus 1 | försökshus 3 | försökshus 2 |
| 2 | försökshus 1 | försökshus 2 | försökshus 3 |
| 3 | försökshus 1 | försökshus 2 | försökshus 3 |
| 4 | försökshus 3 | försökshus 1 | (försökshus 2) |

Eftersom regleringen i försökshus 2 under period 4 stördes av att reglerventilen inte kunde stängas helt så anges dessa skattningar inom parentes och värdena tas inte med i beräkningen av medelvärden nedan.

När gratisvärmeutnyttjandet beräknas som den andel av den tillgodogjorda solinstrålningen som utnyttjas rätt så får vi följande värden enligt TAB.2.13.

TAB.2.13 Sammanställning av skattat gratisvärmeutnyttjande vid olika reglersätt under period 1-4. Ingen hänsyn tagen till vädring och skuggning.

| Period | Gratisvärmeutnyttjande v_g av tillgodogjord solinstrålning | | |
|------------------------|--|----------------|----------------|
| | Framkoppling | Återkoppling 1 | Återkoppling 2 |
| 1 | 47% | 93% | 87% |
| 2 | - | - | - |
| 3 | 64% | 91% | 89% |
| 4 | 30% | 81% | (41%) |
| Medelvärde (viktat) | 44% | 88% | 88% |

Den tillgodogjorda strålningen bestämdes i detta fall enligt den skattade solavskärningsfaktorn för varje hus. Vädring och skugg-

ning påverkar med detta synsätt inte värdet av gratisvärmeutnyttjandet.

För att ange ett värde på gratisvärmeutnyttjandet som påverkas av vädring och skuggning så ska vi anta att den inkommande strålningen är lika i alla tre husen och att den (godtyckligt valt) sätts lika med den tillgodogjorda strålningen i det bäst reglerade huset. Gratisvärmeutnyttjandet kan nu ses som den andel av den inkommande solinstrålningen som utnyttjas rätt.

Följande värden har skattats i period 1-4

TAB.2.14 Sammanställning av skattat gratisvärmeutnyttjande vid olika reglersätt under period 1-4. Med hänsyn tagen till vädring och skuggning.

| Period | Gratisvärmeutnyttjande v_g av inkommande solinstrålning | | |
|------------------------|---|----------------|----------------|
| | Frankkoppling | Återkoppling 1 | Återkoppling 2 |
| 1 | 29% | 93% | 80% |
| 2 | - | - | - |
| 3 | 33% | 91% | 76% |
| 4 | 16% | 81% | (16%) |
| Medelvärde (viktat) | 25% | 88% | 78% |

På grund av osäkerheten i modellerna speciellt vid frankkoppling så kan gratisvärmeutnyttjandet av den inkommande strålningen underskattas något för detta reglersätt.

Ett sätt att få säkrare modeller är normalt att arbeta med längre mätperioder. Eftersom period 2 följer direkt efter period 1 och period 4 följer direkt efter period 3 kan man tänka sig att sammanföra hela mätdatan till två perioder. Sammanslagningen sker då efter reglersätt! Detta medför att i alla fall, utom ett, förs mätdata från olika försökshus samman. De två perioderna blir vardera 87 dagar långa med period 1+2 som ett vinterfall (8 nov - 2 febr) och period 3+4 som ett vårfall (7 mars - 1 juni).

Tabeller med de skattade regressionsparametrarna och de tillämpade

modellerna återfinns i BILAGA 1.

För period 1+2 skiljer sig de nya modellerna endast lite från modellerna för period 1 och de blir inte säkrare utan istället osäkrare eftersom period 2 nu ingår. Å andra sidan är de nya modellerna giltiga för en längre tidsperiod. För modell 3+4 blir skillnaderna större jämfört med de separata modellerna, speciellt vid framkoppling. Skillnaden i skattningen av inkommande solstrålning minskar också betydligt och får ett rimligare värde.

De skattade värdena på gratisvärmeutnyttjandet för de sammanslagna perioderna blir följande, TAB.2.15

TAB.2.15 Sammanställning av skattat gratisvärmeutnyttjande vid olika reglersätt under period (1+2) och (3+4). Ingen hänsyn tagen till vädring och skuggning.

| Period | Gratisvärmeutnyttjande v_g av tillgodogjord solinstrålning | | |
|-----------------|--|----------------|----------------|
| | Framkoppling | Återkoppling 1 | Återkoppling 2 |
| 1+2 | 46% | 93% | 86% |
| 3+4 | 30% | 90% | 83% |
| Medel- värde | 38% | 92% | 85% |

Motsvarande värden med hänsyn till skuggning och vädring blir följande

TAB.2.16 Sammanställning av skattat gratisvärmeutnyttjande vid olika reglersätt under period (1+2) och (3+4). Med hänsyn tagen till vädring och skuggning.

| Period | Gratisvärmeutnyttjande v_g av inkommande solinstrålning | | |
|-----------------|---|----------------|----------------|
| | Framkoppling | Återkoppling 1 | Återkoppling 2 |
| 1+2 | 29% | 93% | 76% |
| 3+4 | 24% | 90% | (66%) |
| Medel- värde | 27% | 92% | 78% |

Energibesparing under ett normalår

Vi ska nu utnyttja de värden som skattats på gratisvärmeutnyttjandet för att bestämma vilken energibesparing det högre gratisvärmeutnyttjandet medför under ett normalår.

Vi kommer härvid att utnyttja månadsvärden av klimatdata för Stockholm istället för Lund eftersom vi saknar normalvärden av strålningensdata för Lund. När det gäller solstrålningen används medelvärden för åren 1971-1980 publicerade i Josefsson (R128:1985) medan normalvärden av utetemperaturen i Stockholm har hämtats från VVS-handboken. Dessa gäller för åren 1931-1960.

Skillnaderna i klimatdata för Lund och Stockholm är inte försumbara. För ett helt normalår är globalstrålningen ca 6% större i Lund och värmebehovet mätt i antalet graddagar ca 13% lägre i Lund (enligt VVS-handboken). Ju större solinstrålning man har i förhållande till värmebehovet desto gynnsammare är det eftersom en större andel av värmebehovet kan täckas av solinstrålning. För ett och samma hus är klimatet därmed 20% gynnsammare i Lund jämfört med Stockholm. Om huset i Stockholm t ex isoleras bättre kan naturligtvis förhållandet mellan solinstrålning och värmebehov bli lika bra eller bättre i Stockholm.

Den gratisvärme eller noggrannare gratisvärmemängd som strålar in i huset under en viss period bestäms med sambandet

$$E_{gs} = \text{saf } E_{svikt} \quad (2.43)$$

Vi betecknar nu värmemängder med E. Detta för att undvika förväxling med värmeeffekter eller värmemängder per tidsenhet vilka betecknats med P.

I TAB.2.17 har vi beräknat hur mycket gratisvärme som solstrålningen bidrar med under normalåret i Stockholm. Samma beräkningar, men för Lund, under det uppmätta året 85/86 redovisas i TAB.2.18. De värden på solavskärmningsfaktorn som används är desamma som skattades under de två sammanslagna mätperioderna för husen med återkoppling 1, se BILAGA 1. För september, oktober och februari används uppskattade värden.

TAB.2.17 Solstrålning i Stockholm, månadssummor 1971-1980 beräknat av dygnsmedelsummor enligt Josefsson (1985) och inkommande solstrålning i försökshuset beräknade med skattade värden på solavskärmningsfaktorn.

| månad | Esglob | Essyd | Esväst | Esnord | Esöst | Esvikt | saf | saf' | Egsol |
|---------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------|-------|--------------------------|
| | kWh/m ² | kWh/m ² | kWh/m ² | kWh/m ² | kWh/m ² | kWh/m ² | 1) | 2) | kWh/m ² , lgy |
| sept | 76.2 | 77.2 | 45.6 | 16.8 | 47.3 | 46.8 | 3.2* | 0.077 | 3.60 |
| okt | 38.2 | 61.3 | 25.5 | 9.3 | 26.0 | 32.1 | 3.2* | 0.077 | 2.47 |
| nov | 13.7 | 33.7 | 9.2 | 4.1 | 10.8 | 15.9 | 4.0 | 0.096 | 1.53 |
| dec | 6.9 | 21.4 | 5.4 | 2.4 | 5.3 | 9.7 | 4.0 | 0.096 | 0.93 |
| jan | 9.2 | 22.1 | 6.7 | 3.3 | 6.4 | 10.6 | 4.0 | 0.096 | 1.02 |
| feb | 26.1 | 49.0 | 18.6 | 6.9 | 17.3 | 24.6 | 4.0* | 0.096 | 2.36 |
| mars | 65.9 | 80.2 | 41.0 | 14.6 | 40.3 | 45.1 | 3.2 | 0.077 | 3.47 |
| apr | 104.4 | 81.6 | 58.6 | 23.7 | 61.3 | 55.1 | 3.2 | 0.077 | 4.23 |
| maj | 165.2 | 95.7 | 91.3 | 38.5 | 90.8 | 75.1 | 3.2 | 0.077 | 5.77 |
| summa | | | | | | | | | |
| sep-maj | 505.9 | 522.2 | 302.0 | 119.6 | 305.4 | 315.2 ³ | 3.4 | 0.081 | 25.4 |
| sep-apr | 340.6 | 426.5 | 210.7 | 81.1 | 214.6 | 240.1 ³ | 3.4 | 0.081 | 19.6 |

* uppskattat värde

1) $(W/m^2, lgy) / (kWh/24h \cdot m^2, fas) = 0.024 m^2, fas/m^2, lgy$

2) $m^2, fas/m^2, lgy$

3) Med viktningen på sid 93-96 blir $E_{svikt} = 355.5$ resp $275.4 kWh/m^2, lgy$

TAB.2.18 Solstrålning i Lund, månadssummor sep -85 - maj -86 enligt SMHI och inkommande solstrålning i försökshuset beräknat med skattade värden på solavskärmningsfaktorn.

| månad | Esglob | Essyd | Esväst | Esnord | Esöst | Esvikt | saf | saf' | Egsol |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|-------|-------------|
| | kWh/m2 | kWh/m2 | kWh/m2 | kWh/m2 | kWh/m2 | kWh/m2 | 1) | 2) | kWh/m2, lgy |
| sept | 73.5 | 66.4 | 38.4 | 19.2 | 40.7 | 41.7 | 3.2* | 0.077 | 3.20 |
| okt | 44.4 | 60.4 | 27.9 | 11.0 | 25.2 | 32.6 | 3.2* | 0.077 | 2.51 |
| nov | 19.8 | 39.7 | 13.9 | 5.7 | 12.9 | 29.6 | 4.0 | 0.096 | 1.88 |
| dec | 6.0 | 7.8 | 3.4 | 2.6 | 3.4 | 4.6 | 4.0 | 0.096 | 0.44 |
| jan | 13.1 | 20.7 | 7.8 | 4.9 | 7.8 | 11.1 | 4.0 | 0.096 | 1.07 |
| feb | 42.7 | 71.7 | 27.4 | 9.4 | 25.6 | 35.9 | 4.0* | 0.096 | 3.44 |
| mars | 47.6 | 51.6 | 27.9 | 12.7 | 27.6 | 30.7 | 3.2 | 0.077 | 2.36 |
| apr | 94.6 | 65.2 | 52.6 | 27.1 | 45.9 | 47.2 | 3.2 | 0.077 | 3.62 |
| maj | 157.5 | 85.2 | 76.0 | 34.7 | 83.8 | 66.6 | 3.2 | 0.077 | 5.12 |
| summa | | | | | | | | | |
| sep-maj | 499.1 | 468.9 | 275.2 | 127.3 | 272.8 | 290.1 | 3.4 | 0.081 | 23.64 |
| sep-apr | 341.6 | 383.6 | 199.2 | 92.6 | 189.1 | 223.5 | 3.5 | 0.083 | 18.52 |

* uppskattat värde

1) $(W/m2, lgy) / (kWh/24h \cdot m2, fas) = 0.024 m2, fas/m2, lgy$

2) $m2, fas/m2, lgy$

Under perioden september - maj blir gratisvärmen från solstrålning-
en 25.4 kWh/m²,lgy i Stockholm och 23.6 kWh/m²,lgy i Lund.

Under det aktuella mätåret 85/86 var alltså solstrålningen i Lund
något mindre än normalstrålningen i Stockholm. Om gratisvärmeut-
nyttjandet kan höjas från grovt 40% till 90% så blir energibespa-
ringen 13 kWh/m²,lgy under perioden september - maj.

Nu bör man observera att en stor del av gratisvärmen kommer husen
tillgodo under maj (23%) och september (14%). Samtidigt har dessa
två månader det lägsta värmebehovet under året. Normaltemperaturen
är 10 °C i maj och 12 °C i september. Möjligheten att rätt
tillgodogöra sig all solvärme är därför betydligt mindre under den-
na tid. Under vår mätperiod 4 var inte detta så påtagligt (gratis-
värmeutnyttjandet minskade från omkring 90% till 80%) men solstrål-
ningen var klart lägre våren -86 jämfört med normalåret. Vill man
göra en försiktig bedömning av energibesparingen under en eldnings-
säsong kan det därför vara klokt att åtminstone inte räkna med den
beräknade besparingen under maj månad. Ytterligare ett skäl till
att inte räkna med energibesparingen under maj är att det finns
andra enklare sätt att minska värmeförbrukningen under denna tid.
Ett exempel är automatiskt pumpstopp vid en viss utetemperatur.

Om vi nu istället betraktar perioden september-april under normal-
året i Stockholm så blir gratisvärmemängden från solinstrålningen
19.6 kWh/m²,lgy, se TAB.2.17. I TAB.2.19 utnyttjar vi de värden
på gratisvärmeutnyttjandet som angavs i TAB.2.15-2.16 för att be-
stämma hur stor andel av denna energimängd som utnyttjas rätt, dvs
med motsvarande sänkning av värmeförbrukningen.

TAB.2.19 Inkommande gratisvärmemängd från solstrålningen i
Stockholm under perioden september-april och därav
rätt utnyttjad värmemängd vid olika reglerlägg.

| | v_g | E_{gg} kWh/m ² ,lgy | ΔE_t kWh/m ² ,lgy |
|--------------------------|-------|-------------------------------------|---|
| återkoppling | 92% | 19.6 | 18.0 |
| framkoppling | | | |
| utan hänsyn till vädring | 38% | 19.6 | 7.5 |
| med hänsyn till vädring | 27% | 19.6 | 5.3 |

Energibesparingen blir nu 10.5 eller 12.7 kWh/m², lgy beroende på hur vi tolkar vädringens och skuggningens inverkan på gratisvärmeutnyttjandet. Detta kan jämföras med de 3.6 kWh/m², lgy som vi på sid 25 uppskattade som tillräckligt för att betala investeringskostnaden på ett år.

För att även sätta energibesparingen i relation till övriga energiflöden i försökshuset så kan vi jämföra med följande siffror i TAB. 2.20. Klimatdata är även från Stockholm. Antalet gradtimmar har beräknats rakt fram som temperaturdifferensen mellan inne- och utetemperaturen multiplicerat med tiden.

TAB.2.20 Energiåtgång och olika former av uppskattad gratisvärme under perioden september-april i försökshuset.

| | | |
|---|--------|--------------------------|
| specifikt värmebehov | 1.8 | W/°Cm ² , lgy |
| antal gradtimmar (T _i =21 °C) | 101500 | °Ch |
| beräknat värmebehov | 183 | kWh/m ² , lgy |
| verklig total fjärrvärmeförbrukning (obs:helår) | 230 | kWh/m ² , lgy |
| övrig gratisvärme | | |
| hushållsel | 20-25 | kWh/m ² , lgy |
| personvärme per person/80m ² , lgy | 8 | kWh/m ² , lgy |

Energibesparingen blir alltså 6-7% av värmebehovet och 5-6% av den totala fjärrvärmeförbrukningen.

Vi ser också att det finns två andra nog så stora gratisvärmestillskott i form av hushållsel och personvärme. En naturlig fråga är då om inte det högre gratisvärmeutnyttjandet vid återkoppling även gör att dessa båda gratisvärmestillskott tillgodogörs bättre. Men hushållsel och personvärme är betydligt mer konstanta från dygn till dygn jämfört med solvärmens. De kan därför till stor del tillgodogöras med en konstant sänkning av framkopplingskurvan. I den mån att medelvärde för den övriga gratisvärmens ändå varierar över året så kan den tillgodogöras bättre med återkoppling.

Fönstren som passiva solfångare - effektivt k-värde

Vi ska avsluta kapitlet med att belysa energibesparingen och regleringens betydelse ur en annan synvinkel, nämligen hur väl fönstren fungerar som passiva solfångare vid olika reglersätt. Samtidigt får vi en klarare fysikalisk tolkning av det vi kallat solavskärningsfaktorn, saf, och en kontroll att de skattade värdena på saf är rimliga. Vi börjar med att bestämma fönsterytans storlek i försöks-husen. Med hjälp av denna kan vi tolka solavskärningsfaktorn. Där-efter bestäms "verkningsgraden" då fönstren betraktas som passiva solfångare och ett effektivt k-värde beräknas för fönstren. Detta kommer att bero på reglersättet.

Försökshuset har en relativt stor fönsteryta i förhållande till lägenhetsytan. Fönsterytan har mätts upp i en typisk 4-rumslägenhet och från dessa fönstermått har fönsterytan i 2-, 3- och 5-rumslägenheterna uppskattats. Uppskattningen bör vara tämligen exakt för 3- och 5-rumslägenheterna som i stort har samma planlösning som 4-rumslägenheterna medan felet kan vara större för 2-rumslägenheterna. Den totala fönsterytan på 1812 m² fördelar sig på följande sätt på olika lägenhetsstorlekar och väderstreck, se TAB.2.21.

TAB.2.21 Fönsterytor i försökshuset

| antal rum | antal lgh | fönsteryta (m ²) | | | | totalt | fönsteryta/ lägenhetsyta |
|--------------|--------------|------------------------------|------|------|-----|--------|-----------------------------|
| | | syd | väst | nord | öst | | |
| 2 | 24+3 | 136 | 17 | 113 | 14 | 280 | 15.0% |
| 3 | 44+22 | 335 | 168 | 191 | 95 | 789 | 12.6% |
| 4 | 34+14 | 340 | 140 | 147 | 61 | 688 | 13.2% |
| 5 | 0+3 | - | 33 | - | 22 | 55 | 13.1% |
| TOTALT | 144 | 811 | 358 | 451 | 192 | 1812 | 13.1% |
| ANDEL | | 45% | 20% | 25% | 11% | 100% | |

Alla fönsterytor avser själva fönsterglaset och inberäknar inte fönsterbågen. Den genomsnittliga fönsterytan är 13% av lägenhetsytan. Till detta kommer en inte försumbar fönsteryta i källarplanet där det finns ett större antal hobbyrum. Denna fönsteryta har inte bestämts.

Vi har tidigare använt en något kryptisk enhet på solavskärmningsfaktorn, saf. Då saf betecknar kvoten mellan gratisvärmens från solinstrålningen, P_{gs} , och den viktade solstrålningen på fasaden, P_{svikt} , har den skattats till ca $3.4 (W/m^2, lgy)/(kWh/24h m^2, fas)$. Detta kan förenklas till att saf skattas till värdet $0.081 (m^2, fas/m^2, lgy)$. Divideras detta med kvoten mellan den totala fönsterytan och den totala lägenhetsytan som är $0.131 (m^2, fas/m^2, lgy)$ så får vi ett dimensionslöst tal med värdet 0.62 . Detta är förhållandet mellan den inkommande solinstrålningen (i huset) och den viktade solstrålningen (utanpå huset).

Ovanstående värde, dvs att 62% av den viktade strålningen mot en oskuggad fasad skulle stråla in i huset är dock högre än vad som är rimligt. För ett 3-glas fönster brukar man räkna med en total strålningstransmission på 72% vid vinkelrätt infall. Den transmitterade strålningen reduceras därefter med uppskattningsvis 25-40% på grund av skuggning med gardiner och persienner. Ett rimligare värde skulle då ligga mellan 43-54%. Därtill kan det komma en ytterligare reduktion på grund av skuggning vid balkonger osv.

Denna avvikelser kan bero på flera faktorer. En orsak kan vara att skuggningens betydelse har överskattats i viktfunktionen (2.42). En annan orsak är att vi inte räknat med fönsterytor i hobbyrum och tvättstugor i källarplanet. En tredje orsak är att all solstrålning inte tillgodosöks genom instrålning genom fönstren. Om vi nu 1) istället för viktfunktionen (2.42) använder en rättfram viktning efter andelen fönsteryta i de fyra väderstrecken, 2) ökar andelen fönsteryta från 13.1% till 15% av den totala lägenhetsytan och 3) antar att 5% av gratisvärmestillskottet beror på minskade ventilations- och transmissionsförluster så får vi ett värde på 45% istället för 62%.

Av den efter fönsterytorna viktade solstrålningen mot de fyra fasadriktningarna skulle alltså 45% stråla in i huset. Detta värde

är fortfarande relativt högt men inte orimligt. De övriga 55% av fasadstrålningen förloras (något förenklat) i transmissionsförluster 28% och skuggning 27%. Den totala skuggningen reducerar då den transmitterade strålningen med 38%.

Vi kan nu betrakta fönstren som passiva solfångare som tar till vara på grovt 45% av den viktade solstrålningen som gratisvärme. Men - och nu kommer regleringens betydelse åter in - hur stor del av denna gratisvärme kan utnyttjas rätt, dvs som en sänkning av värmeförlusten? Detta beror på regleringsätt och gratisvärmeutnyttjande vilket TAB.2.22 visar. Klimatdata kommer från TAB.2.19, men den nya viktningen har använts. Hela energivinsten ΔE_t hänförs något oegentligt till fönstren och E_{svikt} har beräknats som E_{gs}/η .

TAB.2.22 Försökshusens fönster betraktade som passiva solfångare
Approximativ verkningsgrad η vid olika regleringsätt.

| | v_g | E_{svikt} kWh/m ² , lgy | ΔE_t kWh/m ² , lgy | η |
|--------------------------|-------|---|--|--------|
| återkoppling | 92% | 43.6 | 18.0 | 42% |
| framkoppling | | | | |
| utan hänsyn till vädring | 38% | 43.6 | 7.5 | 17% |
| med hänsyn till vädring | 27% | 43.6 | 5.3 | 12% |

Ett annat sätt att belysa regleringens betydelse är att beräkna det effektiva k-värdet för 3-glasfönstren i försökshuset. Det effektiva k-värdet för ett fönster beräknas som skillnaden mellan fönstrets energiförlust och energitillskott dividerat med antalet graddagar. Principen visas också i figurerna överst på sidan 231 i sammanfattningen.

I TAB.2.23 beräknas det effektiva k-värdet med klimatdata från TAB.2.17 för Stockholm under perioden september - april. Observera att eftersom beräkningarna grundas på det relativt osäkra värdet av verkningsgraden $\eta=45\%$, så får de beräknade effektiva k-värdena också denna osäkerhet.

TAB.2.23 Beräkning av fönstrets effektiva k-värde vid olika regleringsätt. Klimatdata för Stockholm, sept-april 1971-80.

| | |
|------------------------------------|--|
| mörker-k-värde | 2.0 W/°C m ² , fy |
| antal gradtimmar | 101500 °Ch |
| energiförlust | 203 kWh/m ² , fy |
| energitillskott (η=45%) | 124 kWh/m ² , fy → k _{eff} =0.78 W/°Cm ² , fy |
| rätt utnyttjat energitillskott vid | |
| återkoppling (η=42%) | 114 kWh/m ² , fy k _{eff} =0.88 W/°Cm ² , fy |
| framkoppling (η=17% resp 12%) | |
| utan hänsyn till vädring | 47 kWh/m ² , fy k _{eff} =1.54 W/°Cm ² , fy |
| med hänsyn till vädring | 33 kWh/m ² , fy k _{eff} =1.67 W/°Cm ² , fy |

Vi ska också göra om samma beräkning för perioden september - maj, se TAB.2.24.

TAB.2.24 Beräkning av fönstrens effektiva k-värde vid olika regleringsätt. Klimatdata för Stockholm sept-maj 1971-80.

| | |
|------------------------------------|--|
| mörker-k-värde | 2.0 W/°C m ² , fy |
| antal gradtimmar | 109200 °Ch |
| energiförlust | 218 kWh/m ² , fy |
| energitillskott (η=45%) | 160 kWh/m ² , fy → k _{eff} =0.53 W/°Cm ² , fy |
| rätt utnyttjat energitillskott vid | |
| återkoppling (η=42%) | 147 kWh/m ² , fy k _{eff} =0.65 W/°Cm ² , fy |
| framkoppling (η=17% resp 12%) | |
| utan hänsyn till vädring | 61 kWh/m ² , fy k _{eff} =1.44 W/°Cm ² , fy |
| med hänsyn till vädring | 43 kWh/m ² , fy k _{eff} =1.60 W/°Cm ² , fy |

Vi ser att värdena på det effektiva k-värdet är starkt beroende av vilken period de avser. Men det står klart att en förutsättning för ett lågt effektivt k-värde är en bra reglering av innetemperaturen.

3 SIMULERING AV REGLERSYSTEMET VID CENTRAL ÅTERKOPPLING

För att öka förståelsen för hur reglersystemet fungerar i en byggnad vid central återkoppling, är det nödvändigt att arbeta med modeller som är mer verklighetstroga än de statiska och första ordningens modeller som vi använt i kapitel 2. Ett exempel på detta har vi redan sett när energi- och reglersignaturerna testades på simulerade mätdata. Med en första ordningens modell av byggnaden så hade vi här kunnat få exakta resultat och inte upptäckt de problem som finns med parameterskattningarna.

På samma sätt är det med uttestning av regulatorparametrar. Med en första ordningens modell av byggnaden är det t ex möjligt att bestämma en regulator som ger en perfekt reglering med rätt temperatur efter endast ett samplingsintervall. Ofta ger därför en sådan överförenklad modell en överskattning av regulatorns förmåga att reglera processen, men den kan också leda fram till större fel.

En enkel simuleringsmodell för det kopplade systemet byggnad-värme och ventilationssystem-reglersystem byggs upp i detta kapitel. Denna har använts för att simulera funktionen av olika regulatorer för att reglera innetemperaturen i en byggnad med central återkoppling. Klimatdata för ett helt år för utetemperatur och solinstrålning har använts i modellen.

Fördelen med att använda simuleringsverktyget är naturligtvis att man kan prova ut olika regulatorer och dess parametrar utan att behöva utföra långa och kanske störande försöksserier i försökshuset. Möjligheter finns också att simulera regulatorer som inte går att realisera i verkligheten eller att simulera regleringen med en störning i taget. Sådana försök kan öka förståelsen för regulatorernas egenskaper vid central återkoppling.

Det första avsnittet har dock ett något avvikande innehåll. Vi ska här inte simulera, utan med en enkel modell försöka beräkna hur mycket man kan sänka medeltemperaturen om man förbättrar reglernoggrannheten. På sätt och vis tjänar detta avsnitt ändå bra som introduktion till de följande avsnitten med simuleringar, eftersom det visar att möjligheterna att enkelt räkna fram användbara resultat är relativt begränsade. Simuleringsverktyget behövs.

3.1 Sambandet reglernoggrannhet - nödvändig medeltemperatur

Som en följd av att innetemperaturen inte kan hållas konstant utan varierar mer eller mindre så måste medeltemperaturen väljas högre än den lägsta acceptabla temperaturnivån ("klagogränsen"). Ju större variationen är desto högre medeltemperatur krävs. En naturlig målsättning är därför att temperaturregleringen förutom att ge rätt medelvärde även ska ge små temperaturvariationer.

Avsikten med detta avsnitt är att bestämma ett samband för hur mycket medeltemperaturen måste höjas över klagogränsen för att inte underskrida denna mer än en viss andel av tiden, givet att temperaturens fördelning och spridningsmått (standardavvikelse) är kända. Vidare ska vi ange hur mycket medeltemperaturen kan sänkas om man kan minska standardavvikelsen med en bättre reglering, jämför även med figuren på sid 33.

Två fall behandlas, nämligen att innetemperaturen är normalfördelad respektive triangelfördelad. Skillnaden mellan dessa är mest påtaglig vid höga och låga temperaturer eftersom man vid triangelfördelning har en viss variationsbredd som aldrig överskrids. Vid normalfördelning finns däremot alltid en viss, om än liten, sannolikhet för mycket höga eller låga temperaturer, se FIG.3.1.

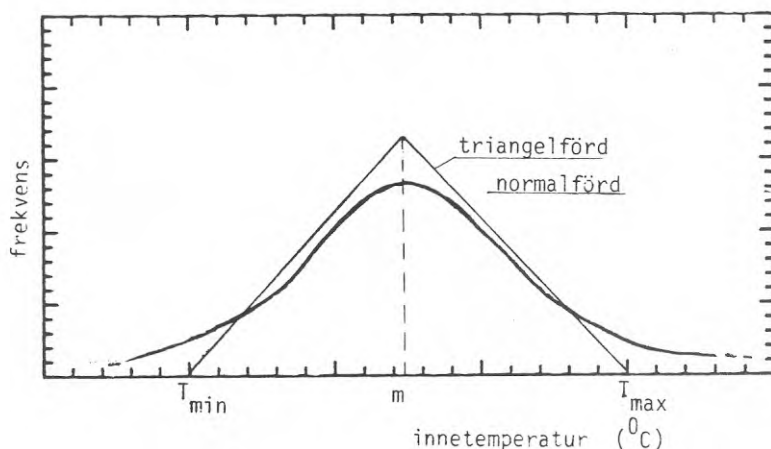


FIG.3.1 Normalfördelad och triangelfördelad innetemperatur

Normalfördelad innetemperatur

Antag att innetemperaturen T_i är normalfördelad med medelvärdet m och standardavvikelsen s . Den sk fördelningsfunktionen för T_i , $F_T(T_0)$, anger hur stor andel, p , av tiden som $T_i < T_0$. Vid normalfördelad innetemperatur gäller att

$$F_T(T_0) = \theta((T_0 - m)/s) \quad -\infty < T_0 < \infty \quad (3.1)$$

där $\theta(\cdot)$ är den standardiserade normalfördelningsfunktionen

$$\theta(u_0) = \int_{-\infty}^{u_0} \exp(-x^2/2) dx / 2 \quad (3.2)$$

med

$$u_0 = (T_0 - m)/s \quad (3.3)$$

Om vi nu kräver att innetemperaturen får understiga klagogränsen, T_0 , under högst andelen p av den totala tiden så blir

$$p = F_T(T_0) = \theta(u_0) \quad (3.4)$$

För ett bestämt värde på p så kan värdet på u_0 erhållas ur tabell för normalfördelningsfunktionen. Det nödvändiga medelvärdet löses enkelt ur (3.3) när u_0 är känt

$$m = T_0 + u_0 s \quad (3.5)$$

Den andra termen i högerledet anger här hur mycket medeltemperaturen måste höjas pga att temperaturregleringen inte är perfekt.

Om ett reglersätt som ger standardavvikelsen s_1 kan ersättas med ett reglersätt som ger en mindre standardavvikelse s_2 , så kan medeltemperaturen sänkas med

$$m_1 - m_2 = u_0 (s_1 - s_2) \quad (3.6)$$

För båda reglersätten understiger då innetemperaturen värdet T_0 i högst andelen p av den totala tiden.

Innan vi ger ett numeriskt exempel så ska samma uttryck bestämmas med antagandet att innetemperaturen istället är triangelfördelad.

Triangelfördelad innetemperatur

För en triangelfördelad innetemperatur i intervallet T_{\min} till T_{\max} gäller att medeltemperaturen är

$$m = (T_{\min} + T_{\max}) / 2 \quad (3.7)$$

Variationsbredden är

$$vb = T_{\max} - T_{\min} \quad (3.8)$$

och standardavvikelsen är

$$s = (T_{\max} - T_{\min}) / \sqrt{24} = vb / \sqrt{24} \quad (3.9)$$

Vidare låter vi u beteckna den normerade avvikelsen från medelvärdet:

$$u = 2(T_i - m) / vb \quad (3.10)$$

vilket medför att $u = -1$ för $T_i = T_{\min}$ och $u = +1$ för $T_i = T_{\max}$

Fördelningsfunktionen för T_i betecknas $F_T(T_o)$. Den uttrycks enklast med hjälp av den normerade klagogränsen u_o

$$F_T(T_o) = F_T(u_o) = \begin{cases} 0 & u_o < -1 \\ u_o(1 + u_o/2) + 0.5 & -1 < u_o < 0 \\ u_o(1 - u_o/2) + 0.5 & 0 < u_o < 1 \\ 1 & 1 < u_o \end{cases} \quad (3.11)$$

där

$$u_o = 2(T_o - m) / vb \quad (3.12)$$

Om vi liksom tidigare kräver att innetemperaturen får underskrida en viss klagogräns, T_o , under högst andelen $p (< 0.5)$ av den totala tiden så blir

$$p = F_T(T_o) = u_o(1 + u_o/2) + 0.5 \quad (3.13)$$

Härur kan u_0 lösas som

$$u_0 = -1 + \sqrt{2p} \quad (3.14)$$

Den nödvändiga medeltemperaturen fås genom att sätta in detta uttryck i (3.12) och lösa ut m

$$m = T_0 + vb(1 - \sqrt{2p})/2 \quad (3.15)$$

eller med variansbredden ersatt med standardavvikelsen

$$m = T_0 + \sqrt{6} (1 - \sqrt{2p})s \quad (3.16)$$

Den andra termen i högerledet anger hur mycket medeltemperaturen måste höjas över klagogränsen. Om $p=0.5$ så behövs ingen höjning vilket är naturligt eftersom klagogränsen då får underskridas halva tiden.

Två reglersätt, som ger temperaturvariationen s_1 respektive s_2 , kan jämföras genom att bilda skillnaden i medeltemperatur

$$m_1 - m_2 = \sqrt{6} (1 - \sqrt{2p})(s_1 - s_2) \quad (3.17)$$

För båda reglersätten gäller då att temperaturen underskrider T_u under andelen p av tiden. Värdet av $m_1 - m_2$ anger liksom tidigare hur mycket medeltemperaturen kan sänkas utan att temperaturen blir lägre under de kallaste p -andelarna av tiden.

När temperaturen är triangelfördelad så är den möjliga temperatur-sänkningen alltid begränsad (till skillnad från fallet med normalfördelning):

$$(m_1 - m_2)_{\max} = \sqrt{6} (s_1 - s_2) = 0.5(vb_1 - vb_2) \quad (3.18)$$

Resultat

Davsett om vi antar att temperaturen är normalfördelad eller triangelfördelad så kan vinsten med bättre reglering uttryckas på samma sätt: Medeltemperaturen kan sänkas med ett värde som är lika med differensen i standardavvikelse multiplicerat med en faktor

utan att klagogränsen underskrids oftare än tidigare. Faktorns storlek beror på hur ofta klagogränsen får underskridas och vilken fördelning temperaturen har. I TAB.3.1 anges faktorns storlek för några olika p vid normal- och triangelfördelning. Här anges också hur många timmar per eldningssäsong med totalt 6000 timmar som ett visst p motsvarar.

TAB.3.1 Faktor som multiplicerad med sänkningen i innetemperaturens standardavvikelse anger möjlig sänkning av medeltemperaturen enligt (3.6) och (3.17). För båda reglersätten underskrids en viss temperatur T_0 i högst andelen p av den totala tiden.

| Andel av tiden, p | tid h | faktor vid | |
|---------------------|---------|----------------|----------------------|
| | | normal-fördeln | triangel-fördeln |
| 0.5 | 3000 | 0 | 0 |
| 0.2 | 1200 | 0.84 | 0.90 |
| 0.1 | 600 | 1.28 | 1.35 |
| 0.05 | 300 | 1.64 | 1.67 |
| 0.02 | 120 | 2.05 | 1.96 |
| 0.01 | 60 | 2.33 | 2.10 |
| 0.005 | 30 | 2.58 | 2.20 |
| 0.002 | 12 | 2.88 | 2.29 |
| 0 | 0 | ∞ | 2.45 ($=\sqrt{6}$) |

Såsom framgår av TAB.3.1 så är skillnaden mellan fördelningarna betydande endast vid mycket små andelar av tiden, p . Samtidigt är det dessa fall som är intressanta eftersom det troligtvis är tillräckligt att temperaturen ligger under klagogränsen en eller ett par dygn per eldningssäsong för att ge upphov till klagomål och en eventuell höjning av medeltemperaturen.

Om vi betraktar ett fall där $T_0=21$ °C, $s=1$ °C och $p=0.01$ (dvs klagogränsen 21 °C får underskridas högst 1% eller 60 timmar av en eldningssäsong) så måste medeltemperaturen enligt TAB.3.1 väljas till mellan 23.1 och 23.3 °C. Med en förbättrad reglering som ger

$s=0.2$ °C så skulle medeltemperaturen kunna sänkas med mellan 1.7 och 1.9 °C beroende på antagen temperaturfördelning.

Man bör observera att i verkligheten så är innetemperaturen ofta snedfördelad kring sitt vanligaste värde. Detta beror på att det är vanligt med stora positiva värmebelastningar från solinstrålning. Den gjorda analysen kan i sådana fall ge en viss överskattning av hur mycket medeltemperaturen kan sänkas, vilket framgår av FIG.3.2.

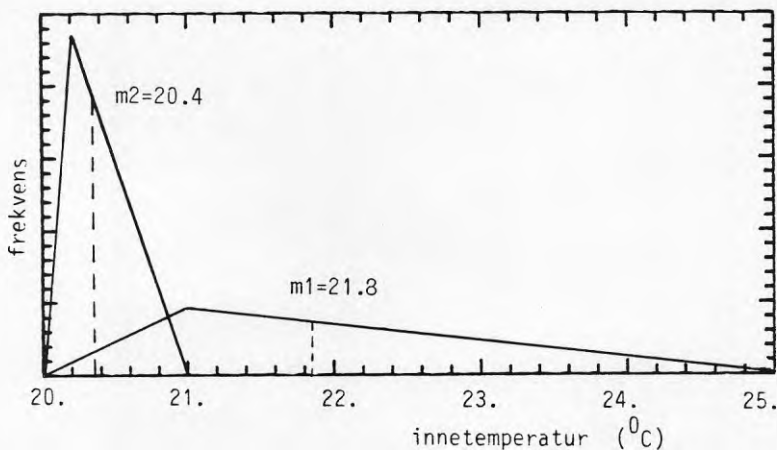


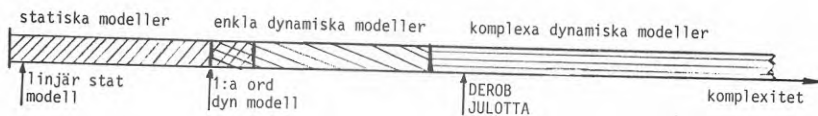
FIG.3.2 Exempel på sned triangelfördelning

Enligt figuren blir $m_1 - m_2 = 1.4$ °C medan enligt (3.18) så blir den möjliga sänkningen $0.5(vb_1 - vb_2) = 2$ °C. (obs, $p=0$ i detta fall).

3.2 Simuleringsmodellen

Vi ska i detta avsnitt beskriva den simuleringsmodell som används i resten av detta kapitel för att simulera temperaturförloppet och energiåtgången i en byggnad när olika reglersätt används. Den byggnad som modellen är avsedd att efterlikna är ett flerbostadshus av samma typ som försökshuset på Tingvallen och Teknikern, dvs ett större flerbostadshus med vattenburen värme. Simuleringsmodellen är tänkt att beskriva det kopplade systemet byggnad-värme och ventilationssystem-reglersystem på ett förenklat sätt. Valet av simuleringsmodell är inte självklart och det ska nu därför motiveras.

En byggnad kan beskrivas på många sätt: från den mycket enkla linjära statiska modellen som vi använde i kapitel 2, se (2.1)-(2.4) över enkla dynamiska modeller till mer komplexa dynamiska modeller som kan användas i större simuleringsprogram som DEROB, JULOTTA med flera.



Skillnaden mellan de dynamiska modellerna är att i de mer komplexa dynamiska modellerna utgår man från de fysikaliska sambanden som gäller i byggnadsdelarna och värme- och ventilationssystemet. Dessa måste därför beskrivas tämligen exakt med storlek, orientering, materialdata etc. Indatamängden blir stor och beräkningarna omfattande. Den fysikaliska tolkningen av modellen är helt klar medan det är svårare att förutsäga hur modellen ska se ut för att ge ett visst förutbestämt dynamiskt uppträdande.

För de enkla dynamiska modellerna är detta förhållande det omvända. Här utgår man från ett önskat dynamiskt uppträdande av modellen, vilket kan specificeras med modellens ordning och dess tidskonstanter och förstärkningar. Det finns systematiska metoder att bestämma dessa modellparametrar från mätdata (processidentifiering). Den fysikaliska tolkningen av modellen blir nu svårare eftersom dynami-

ken beror på sammanlagda effekter från olika byggnadsdelar och värmesystemet. En fördel är dock att beräkningarna blir mycket enkla.

För att kunna simulera reglering av innetemperaturen är det nödvändigt att ha en modell som beskriver tidsförloppet av innetemperaturen i samma tidsintervall som regulatorn arbetar. Rimliga samplingstider för regulatorn ligger i storleksordningen 1 till 10 minuter. Därmed begränsas valet av simuleringsmodell till de dynamiska modellerna och i praktiken även till de enkla dynamiska modellerna om man önskar simulera ett helt år. De komplexa dynamiska modellerna skulle med så stor tidsupplösning ha krävt mycket lång beräkningstid. Det kan också tilläggas att varken DEROB eller JULOTTA i sina grundversioner klarar att behandla reglersystem i simuleringar som kräver att både innetemperaturen och energibehovet är fria variabler som beror av reglersättet. (Den normala problemformuleringen för dessa program är att bestämma energibehovet förutsatt att innetemperaturen är given eller tvärtom att bestämma innetemperaturen om energiförbrukningen är given).

Kraven på simuleringsmodellen är i vårt fall i själva verket ganska begränsade. Eftersom den inte är tänkt att användas för att beräkna byggnadens energiförbrukning i absoluta tal utan snarare hur energiförbrukningen påverkas av olika reglersätt, så kan en starkt förenklad modell användas. De viktigaste kraven på modellen är

- 1) att den uppfyller de statistiska sambanden som behandlas i kapitel 2
- 2) att den dynamiska påverkan från framledningstemperaturen till innetemperaturen är verklighetstrogen
- 3) att relativt realistiska störningar från utetemperatur och solinstrålning kan simuleras

I den använda modellen betraktar vi en fiktiv "lägenhet" som består av ett rum med en öst- och en västfasad. Övriga väggar och golv försummas. Fönsterytan är lika fördelad mellan fasaderna. Följande numeriska värden kan antas gälla för lägenheten, se TAB.3.2.

TAB.3.2 Några numeriska värden för den fiktiva lägenheten

| | |
|------------------|---|
| lägenhetsyta | 80 m ² |
| takhöjd | 2.5 m |
| våningshöjd | 2.8 m |
| rumsvolym | 200 m ³ |
| ventilation | 100 m ³ /h, Q=1.2 kJ/°C,m ³ |
| infiltration | 25 m ³ /h, Q=1.2 kJ/°C,m ³ |
| fasadyta, totalt | 60 m ² |
| fönster | 8 m ² , k=2.5 W/°C,m ² |
| vägg | 52 m ² , k=0.5 W/°C,m ² |

Med dessa värden kan vi beräkna:

| | |
|------------------------------|-------------------------|
| ventilationsförlust (totalt) | 42 W/°C |
| transmissionsförlust | |
| fönster | 20 W/°C |
| väggar | 26 W/°C |
| totalt värmebehov | 88 W/°C |
| specifikt värmebehov | 1.1 W/°C,m ² |

Eftersom vi endast räknar med energi- eller effektbehov per kvadratmeter så är det tillräckligt att veta att det specifika värmebehovet, k_b , är 1.1 W/°C,m² och fönsterandelen 10% av golvytan.

Vi ska nu se närmare på simuleringsmodellen i följande avseenden (de olika regulatorernas funktion återkommer vi till i kommande avsnitt)

- stationära samband
- dynamiska samband
- klimatdata
- inre värmebelastning
- approximativt energibehov
- datorprogram

Först ska bara nämnas några viktiga förenklingar och vad simuleringsmodellen inte beskriver.

- Endast en gemensam innetemperatur för hela huset beaktas, därmed behandlas inte hur värmen fördelas i huset och inte heller sådana effekter som att ytterlägenheter kan få snabbare förändring av innetemperaturen etc.
- Framledningstemperaturen, utetemperaturen och gratisvärmen har samma dynamiska inverkan på innetemperaturen. Detta betyder t ex att en perfekt framkopplingskurva kan bestämmas som helt motverkar inverkan av varierande utetemperatur. Vidare medför detta att en förändring i solinstrålningen ger samma (långsamma) påverkan på innetemperaturen som en förändring i ute- eller framledningstemperaturen.
- Framledningstemperaturen regleras perfekt och kan höjas eller sänkas momentant, dock inte till värden under innetemperaturen. Värmesystemets returtemperatur beräknas inte. Därmed finns heller inte begränsningen att framledningstemperaturen inte kan underskrida returtemperaturen, vilket i verkligheten begränsar hur snabbt framledningstemperaturen kan sänkas. I övrigt ingår värmesystemets dynamik i modellens totala dynamik.
- Någon intern reglering av innetemperaturen i form av vädring, fönsterskuggning eller ändrad radiatorinställning förekommer ej.

Stationära samband

Den enkla statiska värmebalansen (2.1)-(2.4) ska gälla för simuleringsmodellen i stationärt läge. Löser vi ut innetemperaturen ur denna får vi följande samband

$$T_{istat}(t) = (k_r T_f(t) + k_b T_u(t) + P_g(t)) / (k_r + k_b) \quad (3.19)$$

Värmeöverföringsförmågorna antas vara temperaturoberoende konstanter. Sambandet (3.19) är därför ett linjärt samband mellan de oberoende temperaturerna (insignalerna) i högerledet och den beroende

innetemperaturen (utsignalen). Det är uppenbart att (3.19) inte gäller i varje tidpunkt pga systemets tröghet. Index "stat" har därför satts på innetemperaturen för att understryka att sambandet endast gäller i stationärt tillstånd, dvs efter det att insvängningsförloppet, som följer efter en förändring i någon av insignalerna, är slut.

Det specifika värmebehovet har tidigare bestämts till $k_b=1.1$ $W/^\circ C, m^2$. Genom att välja radiatorsystemets värmeöverföringsförmåga k_r till 0.733 $W/^\circ C, m^2$ så kan (3.19) förenklas till

$$T_{istat}(t)=0.4T_f(t)+0.6T_u(t)+0.545P_g(t) \quad (3.20)$$

Den korrekta framkopplingskurvan för en önskad innetemperatur $T_{iref}=21$ $^\circ C$ och utan hänsyn till gratisvärmen kan nu bestämmas med hjälp av (2.8) till

$$T_{ffk}(t)=52.5-1.5T_u(t) \quad (3.21)$$

Framledningstemperaturen begränsas dock alltid så att den är minst lika stor som innetemperaturen. Slutligen beräknas den styrda värmeeffekten enligt (2.2)

$$P_r(t)=k_r(T_f(t)-T_i(t))$$

Dynamiska samband

Det enklaste sättet att beskriva hur innetemperaturen $T_i(t)$ varierar under insvängningsförloppet är med ett första ordningens system

$$T \frac{dT_i(t)}{dt}+T_i(t)=k T_{istat}(t) \quad (3.22)$$

där T är processens tidskonstant och k dess förstärkning. Vid en datorsimulering räcker det att lösa differentialekvationen (3.22) i diskreta tidpunkter med tidssteget T_s . Förutsatt att innetemperaturen är känd vid en viss tidpunkt t_0 och att den totala insignalen T_{istat} är konstant i intervallet (t_0, t_0+T_s) så är det enkelt att beräkna innetemperaturen vid nästa tidpunkt, t_0+T_s . Lösningen ges då av differensekvationen

$$T_i(t_o+T_s) = aT_i(t_o) + bT_{i\text{stat}}(t_o) \quad (3.23)$$

där

$$a = \exp(-T_s/T)$$

$$b = k(1-a)$$

Lösningen för de följande tidpunkterna t_o+2T_2 , t_o+3T_s osv erhålls genom att bestämma innetemperaturen iterativt med (3.23).

De två processparametrarna k och T kan bestämmas med hjälp av modellbygge baserat på de fysikaliska ekvationerna eller med identifiering av in- utsignalmodeller från mätdata (processidentifiering). Den senare metoden används i RoS för att bestämma processparametrarna för Teknikern och Tingvallenhusen. En sammanställning av dessa modeller ges i TAB.3.3. Att dessa modeller skiljer sig åt beror på att i en byggnad finns komponenter med en dynamik som varierar alltifrån minuter till flera dygn. Vilken eller vilka tidskonstanter och samhörande förstärkningar som kan identifieras beror på frekvensinnehållet i den exciterande insignalen, i dessa fall framledningstemperaturen. Därför anges även insignalens grundperioder i tabellen.

TAB.3.3 Identifierade modeller för försökshuset på Teknikern och Tingvallen för sambandet från framledningstemperatur till innetemperatur. Från RoS.

| Mo- dell | Hus | Identifierade parametrar | | | | Beräknade parametrar för stegsvaret | | | Grund- perioder | Modell i RoS |
|-------------|-----------------|-------------------------------------|-------|-------------------------------------|-------|--|--------------------|-----------------------------|--------------------|-----------------|
| | | k_1 | T_1 | k_2 | T_2 | $T_i(\infty)$ | $T_i(5)$ | $dT_i(0)/dt$ | | |
| | | $^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$ | h | $^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$ | h | $^{\circ}\text{C}$ | $^{\circ}\text{C}$ | $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ | h | |
| 1 | Ting- vallen | 0.39 | - | - | - | 0.39 | 0.39 | - | (statisk) | (6.19) |
| 2 | " | 0.017 | 0.77 | - | - | 0.017 | 0.017 | 0.022 | 1,2,3,4 | (6.23) |
| 3 | " | 0.052 | 12. | - | - | 0.052 | 0.018 | 0.0043 | ca 12,24 | (6.27) |
| 4 | " | 0.012 | 1.5 | 0.378 | 210. | 0.39 | 0.021 | 0.0098 | ca 12,24 | (6.28)* |
| 5 | Tekni- kern | 0.034 | 0.72 | - | - | 0.034 | 0.034 | 0.047 | 1,2,3,4 | (6.25) |
| 6 | " | 0.055 | 4.7 | - | - | 0.055 | 0.036 | 0.012 | 6,18,24 | (6.29) |
| 7 | " | 0.017 | 0 | 0.043 | 11. | 0.060 | 0.033 | - | 6,18,24 | (6.30) |

*) approximerat från $T_i(s) = (0.0018/s + 0.012(1+1.5s))T_f(s)$

Modellerna 1 och 5 togs fram i speciella identifieringsexperiment med avsikt att bestämma lämpliga regulatorer. Framledningstemperaturen varierades i dessa experiment med grundperioder från 1-4 h. Modellerna 3, 4 och 6, 7 avsåg att beskriva temperaturförloppen vid nattsänkning. Mätdata togs i dessa fall från perioder med normal reglering. Kvaliteten (förklaringsgraden) var klart lägre på dessa modeller än för modell 1 och 5. Grundperioderna i framledningstemperaturerna var här ca 6-24 h. Till dessa modeller kan läggas en ej identifierad modell som beskriver den långsamma insvängningen mot det stationära värdet. För denna gäller att förstärkningen är 1 och tidskonstanten är ett antal dygn. Detta är den i andra sammanhang vanligaste dynamiska modellen som t ex används i SBN vid beräkning av dimensionerande utetemperatur från lägsta förväntade utetemperatur.

Den dynamiska modellen av första ordningen är alltså mycket användbar, men det är också uppenbart att det inte finns ett fixt parameterintervall så att en första ordningens modell samtidigt kan beskriva temperaturförloppet vid t ex snabb reglering och långsamma störningar från utetemperaturen. För vår simuleringsmodell är det därför nödvändigt att se på högre ordningens dynamiska system som med fixa parametrar kan beskriva både snabba och långsamma förlopp.

En förenklande omständighet är att den högre ordningens modeller av ordning n som beskriver en byggnad och dess värme- och ventilationssystem alltid kan behandlas som n st kopplade 1:a ordningens system. Detta är en följd av att innetemperaturens stegsvar på förändringar i insignalen alltid är monotont ökande eller minskande. (Mer matematiskt uttryckt beror det på att en (passiv) värmeöverföringsprocess aldrig har komplexa rötter i sina överföringsfunktioner).

Ett sätt, av flera möjliga, att ställa upp differensekvationer för ett n :te ordningens system är i detta fall den sk normalformen

$$T_{ij}(t+T_s) = a_j T_{ij}(t) + b_j T_{istat}, \quad j=1, n \quad (3.24)$$

$$T_i(t) = \sum_{j=1, n} T_{ij}(t)$$

där T_s är tidssteget för beräkningen och

$$a_j = \exp(-T_s/T_j)$$

$$b_j = k_j(1-a_j) / \sum_{j=1,n} k_j$$

Lämpliga begynnelsevärden för delekvationerna som ger den totala innetemperaturen $T_i(0) = T_{i0}$ ges av

$$T_{ij}(0) = k_j T_{i0} / \sum_{j=1,n} k_j \quad (3.25)$$

Innetemperaturen är alltså en summa av n st tillstånd som var för sig följer en differensekvation enligt (3.23). Processparametrarna består av n st förstärkningar, k_j , och n st tidskonstanter, T_j . Om modellen ska uppfylla det stationära sambandet så ger detta ett villkor på den totala förstärkningen. I vårt fall gäller

$$\sum_{j=1,n} k_j = 1 \quad (3.26)$$

Processparametrarna har valts på följande sätt: Modellens ordning har valts till 3:e ordningens system. Den snabba dynamiken ska beskrivas av modell 5 i TAB.3.3. Detta ger villkoret

$$k_1/T_1 + k_2/T_2 + k_3/T_3 = dT_i(0)/dt = 0.034/0.4 \quad (3.27a)$$

Den medelsnabba dynamiken ska uppfylla att innetemperaturen efter en "medellång" tid, här vald till 5 timmar, kan beskrivas av modell 6. Detta ger villkoret

$$(k_1(1-a_1') + k_2(1-a_2') + k_3(1-a_3')) / \sum_{j=1,n} k_j = T_i(5) = 0.063/0.4 \quad (3.27b)$$

där

$$a_j' = \exp(-5./T_j)$$

Den långsamma dynamiken ska uppfylla det stationära sambandet. Detta ger villkoret

$$k_1 + k_2 + k_3 = 1 \quad (3.27c)$$

De tre tidskonstanterna har valts till $T_3=0.72$ h efter modell 6, $T_2=8$ h efter bedömning av modellerna 3, 4, 6, 7 och $T_1=96$ h som en uppskattning av den långsamma tidskonstanten. När tidskonstanterna är fastlagda så är även förstärkningarna bestämda genom villkoren (3.27a-c). Enkla beräkningar ger $k_1=0.8310$, $k_2=0.0993$ och $k_3=0.0698$.

I FIG.3.3 jämförs stegsvaret för den använda simuleringsmodellen med de som ges av modell 5 (snabb), modell 6 (medelsnabb) och en modell med $k=1.0$, $T=96$ h (långsam modell). Jämförelsen görs i två tidsskalor, 0-10 dygn och 0-1/2 dygn.

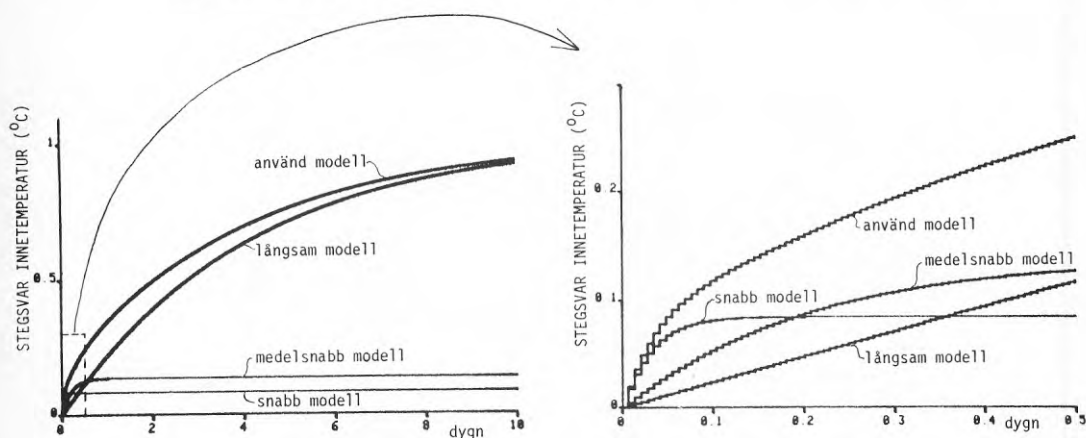


FIG.3.3 Stegsvaret för den använda simuleringsmodellen jämfört med stegsvaret för några 1:a ordningens modeller. Den högra figuren är en förstoring av de första 12 timmarna.

Som framgått ligger det en hel del godtycke bakom parameter valet som är ett försök att skapa en simuleringsmodell med ett rimligt dynamiskt uppträdande vid såväl snabba, medelsnabba och stationära förändringar. Parameter valet är bäst underbyggt när det gäller den snabba dynamiken. Den snabba dynamiken är också den viktigaste när det gäller utprovning av regulatorer.

En parameter som återstår att bestämma är tidssteget, eller samplingsintervallet, T_s . Den har satts till samma värde som regulatorns samplingsintervall, dock högst en timme. Normalt har samplingsintervallet varit 10 minuter. Beräkningsarbetet i varje tids-

steg är litet. För att lösa enbart differensekvationen (3.24) krävs t ex $4n-1$ additioner och multiplikationer per tidssteg.

Man bör observera att vi arbetar med en total insignal som sätts samman av framledningstemperatur, utetemperatur och gratisvärme som på så sätt alla har erhållit samma dynamiska påverkan på innetemperaturen som framledningstemperaturen har. Det hade också varit fullt möjligt att bygga en större modell som tillåtit olika dynamisk påverkan från insignalerna. Underlaget för en sådan förbättrad modell saknas dock. Det är nämligen svårare att bestämma dynamiska modeller från utetemperaturen och olika former av gratisvärme till innetemperaturen. En möjlig metod att bestämma även sådana modeller hade kunnat vara att identifiera enkla modeller med simulerade mätdata från de större simuleringsprogrammen, t ex JULOTTA. Detta har dock inte provats.

Klimatdata

Klimatdata från SMHI för Stockholm 1971 har använts vid simuleringarna. Mätdata består av timvisa registreringar av utetemperatur och solinstrålning (diffus och riktad horisontell instrålning).

Den totala instrålningen genom tvåglasfönster på öst- och västfasaderna har beräknats från registrerad instrålning, soltid, solhöjd och solazimut. För dessa beräkningar har datorprogram som ingår i JULOTTA utnyttjats. En detaljerad beskrivning av dessa beräkningar återfinns i Källblad (1986). Några förenklingar som gjorts är att all solenergi som passerat in genom fönstret tillgodogörs, värmeutstrålning ut genom fönstret eller reflektioner inne beaktas ej. En tredjedel (33%) av fönsterytan anses (totalt) skuggad, i övrigt förekommer ingen riktningsberoende skuggning. Markens reflektivitet är satt till 0.2.

När samplingstiden varit mindre än 1 h så har klimatdata bestämts med linjär interpolation av timvärden.

Intern värmebelastning

Följande interna värmebelastning har använts

TAB.3.4 Intern värmebelastning per lägenhet

| tid (h) | effekt (W) |
|---------|------------|
| 00-06 | 150 |
| 06-10 | 200 |
| 10-16 | 250 |
| 16-18 | 450 |
| 18-19 | 560 |
| 19-21 | 300 |
| 21-24 | 200 |
| medel | 244 |

Avsikten med dygnsvariationen har varit att efterlikna hur hushållselen varierar under dygnet, se FIG.3.4 som visar uppmätta värden för Teknikern hämtade från Jensen, Lange (R9:1982). Den genomsnittliga värmebelastningen har här uppmätts till 2.2-2.4 MWh/lgh,år vilket kan räknas om till 3.2-3.4 W/m²,lgy.

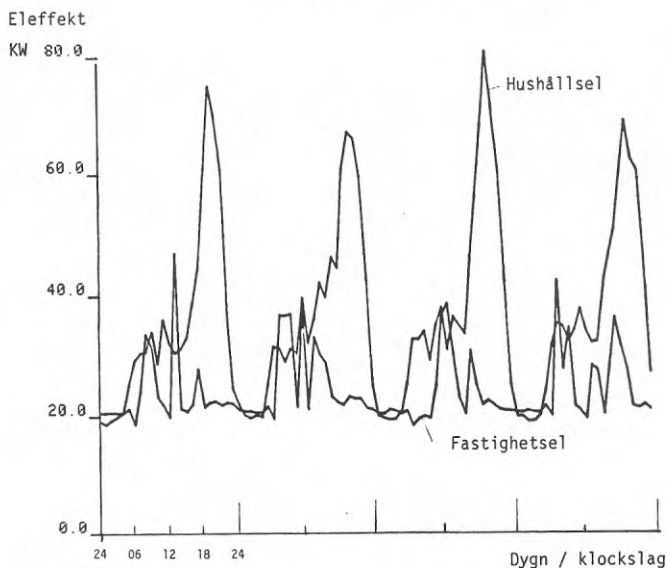


FIG.3.4 Hushållselens dygnsvariation. Uppmätt på Teknikern 21-24/3 1980. (Jensen, Lange,1982)

Den genomsnittliga värmebelastningen i TAB.3.4 är ca 3 W/m^2 , lgy. Utan kompensering i framkopplingskurvan skulle detta ha givit en innetemperaturhöjning enligt (3.20) på ca $1.7 \text{ }^\circ\text{C}$. För att motverka detta så sänks framkopplingskurvan med en konstant P_{gel}/k_r ($^\circ\text{C}$), vilket ger

$$T_{\text{ffk}} = 48.3 - 1.5T_u \quad (3.28)$$

Några andra interna värmebelastningar såsom varmvattencirkulation, varmvattenförbrukning och personvärme har inte beaktats i modellen. Anledningen har varit att bygga simuleringsmodellen så enkel som möjligt. Den använda värmebelastningen har dock behållits för att ge innetemperaturen en viss dygnsvariation även när korrekt framkopplingskurva används och solinstrålningen är marginell. Dygnsvariationen blir dock enligt simulering bara $0.24 \text{ }^\circ\text{C}$ mellan lägsta och högsta innetemperatur om all variation orsakad av utetemperatur och solinstrålning tas bort. En reflektion i efterhand är att det varit lämpligt med en större variation i den inre värmebelastningen.

Approximativt värmebehov

Med hjälp av byggnadens specifika värmebehov och utetemperaturen så kan byggnadens preliminära värmeeffektbehov, P_b , beräknas för årets månader. Detta kan jämföras med den inre värmebelastningen $P_{\text{gö}}$, och gratisvärmen från solinstrålningen P_{gs} , som beräknas från solvärmemängderna på de östra och västra fasaderna, fönsterandelen per golvyta och fönsterskuggningen. Dessa värden har sammanställts i TAB.3.5a. Den sista kolumnen visar att gratisvärmen från solinstrålningen kan täcka en stor del av värmebehovet, speciellt under sen vår och tidig höst. Man bör dock observera att det inte är säkert att all solinstrålning kan utnyttjas. I maj månad t ex så skulle solinstrålningen kunna ha täckt nästan 95% av värmebehovet efter reduktion av den interna värmebelastningen. Men en del av detta förloras genom den ojämna fördelningen. När solinstrålningen är som störst finns inget värmebehov och vice versa.

Sammanställningen i TAB.3.5a av den totala energiåtgången under eldningssäsongen kan också ge en bakgrund till simuleringarna i avsnitt 3.4. Med framkoppling blir den preliminära energiförbrukningen 100 kWh/m^2 , lgy och med en perfekt reglering 90 kWh/m^2 , lgy.

TAB.3.5a Preliminärt värmebehov, P_b , enligt graddagsmetoden för en innetemperatur på $21\text{ }^\circ\text{C}$ jämfört med gratisvärmens från intern värmebelastning, $P_{gö}$, och från solinstrålningen, P_{gs} , under årets månader. Dessutom anges utetemperatur, T_u , och solvärmemängden på de två fasaderna $E_{söst}$ och $E_{sväst}$. Klimatdata från Stockholm 1971.

| Mån | T_u | P_b | $P_{gö}$ | $P_{gö}/P_b$ | $E_{söst}$ | $E_{sväst}$ | P_{gs} | P_{gs}/P_b | $P_{gs}/(P_b - P_{gö})$ |
|-------|------------------|--|--|--------------|---|---|--|--------------|-------------------------|
| | $^\circ\text{C}$ | $\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{lg}}$ | $\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{lg}}$ | % | $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{fas}}$ | $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{fas}}$ | $\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{lg}}$ | % | % |
| Jan | -0.9 | 24.1 | 3.03 | 12.5 | 6.8 | 5.3 | 0.55 | 2.3 | 2.6 |
| Febr | -1.4 | 24.6 | 3.03 | 12.3 | 11.2 | 12.6 | 1.18 | 4.8 | 5.5 |
| Mars | -2.1 | 25.4 | 3.03 | 11.9 | 28.1 | 23.9 | 2.34 | 9.2 | 10.5 |
| Apr | 3.5 | 19.3 | 3.03 | 15.7 | 60.0 | 39.5 | 4.60 | 23.8 | 28.3 |
| Maj | 11.5 | 10.7 | 3.03 | 28.2 | 91.8 | 70.5 | 7.27 | 67.8 | 94.8 |
| Juni | 15.0 | 7.1 | 3.03 | 42.5 | 95.6 | 68.2 | 7.58 | 106.6 | - |
| Juli | 17.7 | 4.9 | 3.03 | 62.2 | 93.8 | 61.7 | 6.97 | 143.5 | - |
| Aug | 16.5 | 5.6 | 3.03 | 54.3 | 73.1 | 51.8 | 5.60 | 100.5 | - |
| Sep | 10.7 | 11.3 | 3.03 | 26.8 | 48.5 | 30.5 | 3.68 | 32.4 | 44.2 |
| Okt | 7.3 | 15.1 | 3.03 | 20.1 | 26.2 | 20.4 | 2.09 | 13.9 | 17.3 |
| Nov | 0.9 | 22.0 | 3.03 | 13.7 | 11.9 | 8.6 | 0.95 | 4.3 | 5.0 |
| Dec | 1.0 | 22.0 | 3.03 | 13.8 | 5.2 | 4.0 | 0.41 | 1.9 | 2.2 |
| år | 6.7 | 15.9 | 3.03 | 19.0 | 552.1 | 397.3 | 4.83 | 30.3 | - |
| elds* | 3.4 | 19.4 | 3.03 | 15.6 | 289.7 | 215.5 | 2.57 | 13.3 | 15.7 |

* eldningssäsongen 1.9-31.5 eller 273 dagar

TAB.3.5b Preliminär energiförbrukning för de simulerade fallen under eldningssäsongen.

| | |
|--|--|
| specifikt värmebehov | $1.1\text{ W}/^\circ\text{C}, \text{m}^2, \text{lg}$ |
| utetemperatur (medelvärde) | $3.4\text{ }^\circ\text{C}$ |
| graddimmar för uppvärmning till $21\text{ }^\circ\text{C}$ | $115300\text{ }^\circ\text{C h}$ |
| energiförbrukning, brutto | $126.8\text{ kWh}/\text{m}^2, \text{lg}$ |
| intern värmebelastning | $19.9\text{ kWh}/\text{m}^2, \text{lg}$ |
| solinstrålning | $16.8\text{ kWh}/\text{m}^2, \text{lg}$ |
| energiförbrukning ($v_g=40\%$) | $100.2\text{ kWh}/\text{m}^2, \text{lg}$ |
| energiförbrukning ($v_g=100\%$) | $90.1\text{ kWh}/\text{m}^2, \text{lg}$ |

Datorprogram

I detta avsnitt görs en översikt över några datorprogram som används vid simuleringarna. Hela simuleringsarbetet kan delas upp i tre steg. I första steget beräknas solinstrålningen och utetempera- turen från klimatdata. Resultatet mellanlagras och kan användas till alla simuleringarna, se FIG.3.5.

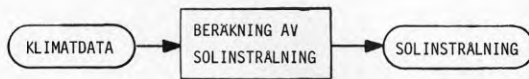


FIG.3.5 Steg 1: beräkning av solinstrålning

Det andra steget är beräkning av innetemperatur och energiförbrukning med hjälp av simuleringsmodellen och därutöver statistikberäkning och beräkning av plottningsfiler. Alla parametrar som beskriver processen, regleringen och önskad utdata ligger i en indatafil. Utdata består av beräknade värden av energiförbrukning, innetemperatur och framledningstemperatur för varje månad (statistiktabellen) och dessutom fyra typer av bildfiler som mellanlagras. De fyra typerna av bildfiler är

| | |
|-------------|---|
| tidsserie | simulerade timvärden av $T_i, T_f, \Delta T_f, P_g$ m fl |
| medeldygn | beräknade medelvärden av $T_i, T_f, \Delta T_f, P_g$ m fl för dygnets 24 timmar |
| fördelning | beräknade fördelningsdiagram av $T_i, T_f, T_f,$ P_g m fl |
| korsdiagram | gruppering av P_r och T_i för 25 intervall i T_i respektive T_u , beräkning av medelvärde och stan- dardavvikelse i varje intervall |

I ett tredje steg används bildfilerna som indata till ett plotprogram som producerar de önskade diagrammen på en penplotter. Ett generellt plotprogram som består av en överbyggnad till ett annat, primitivare, plotprogram GD3, utvecklades för bland annat detta ändamål. Det nya plotprogrammet som heter DIAGRAM finns beskrivet i Hedin (1986).

Det andra och tredje steget beskrivs i FIG.3.6.

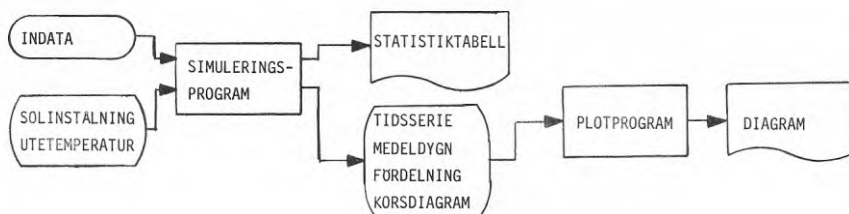


FIG.3.6 Steg 2 och 3: Simulering och plottning.

Den egentliga simuleringsmodellen ska också ges en översiktlig beskrivning i form av följande blockschema, FIG.3.7.

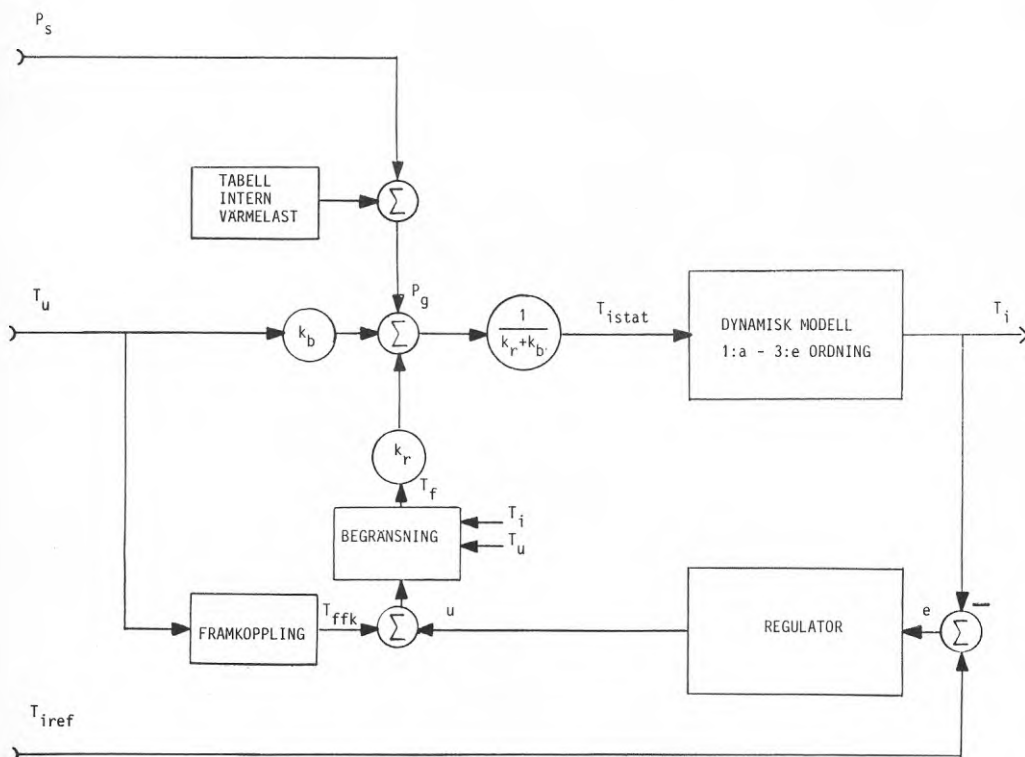


FIG.3.7 Blockschema för simuleringsmodellen

En enklare version av simuleringsmodellen, utan klimatdata och inre värmebelastning, har också använts. Den har programmerats i SIMNON, som är ett generellt simuleringsprogram för dynamiska system. Programmet arbetar interaktivt och har inbyggd plottningsmöjlighet. SIMNON är utvecklat vid inst för Reglerteknik, LTH. I denna version har olika process- och regulatorparametrar testats som en förberedelse till de större simuleringarna. Som ersättning för uteklimatet används artificiella störningar som steg-, ramp- eller sinusfunktioner.

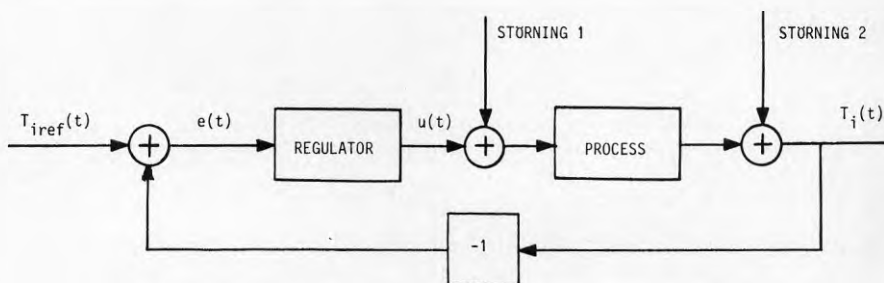


FIG.3.8 Förenklad simuleringsmodell i SIMNON

3.3 Regulatorer

I förra avsnittet beskrev vi en byggnad som ett enkelt dynamiskt system med en eller flera insignaler och innetemperaturen som utsignal. Beräkningar på systemet utfördes lämpligen i tidsdiskret form med tidssteget T_s . Ett krav var då att alla insignaler kunde betraktas som konstanta under varje tidssteg. Även en regulator kan beskrivas som ett dynamiskt system och en digital regulator är definitionsmässigt tidsdiskret, med en utsignal som är konstant mellan samplingstidpunkterna. Den digitala regulatorn passar med andra ord väl in i den övriga simuleringsmodellen.

Vi ska i fortsättningen koncentrera oss på själva regulatoralgoritmen, dvs det samband som bestämmer regulatorns utsignal som funktion av dess insignaler. I vårt fall betraktar vi framkopplingen från utetemperaturen via framkopplingskurvan som liggande utanför regulatorn såsom i FIG.3.7. Regulatorns utsignal $u(t)$ anger då framledningstemperaturens avvikelse från framkopplingskurvan vid aktuell utetemperatur. Den önskade framledningstemperaturen ges alltså av

$$T_f(t) = T_{ffk}(T_u(t)) + u(t) \quad (3.28)$$

Regulatorns utsignal kan också ses som en parallellförskjutning av framkopplingskurvan. I vissa figurer betecknas den därför med ΔT_f

Regulatorns utsignal är i första hand en funktion av reglerfelet $e(t)$, dvs skillnaden mellan den önskade innetemperaturen och den verkliga (här simulerade) innetemperaturen

$$e(t) = T_{iref}(t) - T_i(t) \quad (3.29)$$

Generellt sett så kan hela förhistorien av reglerfelet ($e(t), e(t-T_s), e(t-2T_s), \dots$) användas vid beräkningen av regulatorns utsignal.

Regulatorns utsignal kan även bero på utetemperaturen och tidigare utsignaler, något som är aktuellt vid begränsningar eller på tidpunkten vilket används vid nattsänkning och tidsberoende börvärde. De tre grundformerna vid reglering: proportionell, integrerande och

deriverande reglering behandlas i detta avsnitt. Valet av regulatorparametrar diskuteras och exemplifieras för en enkel störning. Ambitionen är inte att beskriva de olika regulatorerna och dess dimensionering i det allmänna fallet. För detta rekommenderas textboken i reglerteknik, Åström och Wittenmark (1985). Istället ska vi lyfta fram det som är speciellt för regleringen av en tung byggnad: att störningar får innetemperaturen att variera dygnsperiodiskt, att styrvariabeln kan behöva begränsas och blandningen av snabba och långsamma störningar från solinstrålning och utetemperatur.

I två följande avsnitt presenteras längre simuleringar med de behandlade regulatorerna och därefter simuleringar med olika variationer av dessa basregulatorer.

Innan den proportionella regulatorn presenteras ska vi dock diskutera några allmänna krav som kan ställas på regleringen. Detta avsnitt ska bland annat belysa kompromissen mellan jämn innetemperatur och jämn radiatortemperatur.

Krav på regleringen

Några övergripande målsättningar är att värmesystemet i sin helhet, varav regleringen utgör en viktig del, ska ge

- låg energiförbrukning
- hög komfort
- enkel installation och handhavande

För att uppfylla målet på energisnålhet så ska innetemperaturen naturligtvis hållas så låg som möjligt för att minska transmissions- och ventilationsförluster. Dessutom gäller det att minska onödig vädring. Den minskar om innetemperaturen hålls jämn, så att gratisvärmestillskott inte ger upphov till övertemperaturer utan utnyttjas genom minskad värmestillskottsbehov. Vikten av en jämn innetemperatur diskuterades också i detta kapitels första avsnitt.

I vissa fall kan kravet på låg energiåtgång bytas mot krav på låg kostnad såsom vid olika natt- och dagtaxa. Det gäller då att "ladda upp" huset med billig värme. Detsamma är fallet då värmepump och solvärme utnyttjas. Här gäller det att minska eller undvika till-

satsvärme. I sådana fall kan det vara olämpligt att utnyttja tillfälliga gratisvärmertilskott med en sänkt värmertilförsel utan det kan även här vara bättre att "ladda upp" huset. Även i hus anslutna till fjärrvärmesystem kan det vara klokt att prioritera ett jämnt värmeuttag före lägsta energiuttag. Den energibesparing som kan göras i husen (till priset av ett kraftigt varierande värmeuttag) ska då vägas mot den energibesparing som kunde göras i fjärrvärmesystemet om värmeuttaget vore lättare att förutbestämma och marginalen mot toppbelastningar kunde minskas. Vi ska inte gå närmare in på dessa resonemang, men exemplen avser att visa på risken att man gör en suboptimering om man väljer reglersätt endast efter låg energiförbrukning i huset.

I kravet på hög komfort ligger att ha en jämn (och hög) innetemperatur men även en jämn (och hög) radiatortemperatur, åtminstone under dagtid. Att radiatortemperaturen tas med beror på att den påverkar drag, kallstrålning och riktad operativ temperatur men också den psykologiska upplevelsen. För många personer kan en kall radiator vara liktydigt med att det är kallt inne, se RoS kap 8.

En observation som kan vara bra att hålla i minnet är att kraven på hög inne- och radiatortemperatur tycks vara större fram på eftermiddagen och kvällen då många boende är mindre aktiva. Vanlig framkoppling har den, i detta fall, goda egenskapen att innetemperaturen stiger med ca $1/2$ °C under dagens lopp för att åter avta under natten. Detta kan förstärkas med nattsänkning av radiatortemperaturen vilket även tillåter att radiatortemperaturen kan höjas under dagen vid oförändrad medeltemperatur inne. Nattsänkning är därför ett exempel på ett reglersätt som kan ge högre komfort.

Däremot är det inte säkert att återkoppling automatiskt ger högre komfort. Visserligen kan innetemperaturen hållas jämnare, men radiatortemperaturen måste då varieras och för att hålla innetemperaturen konstant så krävs kraftiga variationer i radiatortemperaturen. Erfarenheterna från den praktiska regleringen i försökshuset som redovisas i RoS kapitel 8, visar att dessa variationer i framledningstemperaturen upplevs som störande och att de ger upphov till klagomål. För att ange en gräns för vilken extra variation i framledningstemperaturen - utöver den som framkopplingskurvan normalt orsakar - som kan accepteras under dagtid, kan anges att en

extra variation mindre än 10 °C sällan lett till klagomål medan en extra variation på över 15 °C ofta lett till klagomål. Dessa gränser ska då mer ses som en storleksordning än som några absoluta gränser. Rådande inne- och utetemperatur har givetvis också sin betydelse. Valet av en lämplig återkopplande regulator måste i varje fall bli en kompromiss mellan litet reglerfel (jämn innetemperatur) och liten styrsignal (jämn radiatortemperatur).

När det gäller det tredje kravet på enkel installation och handhavande så är det uppenbart att reglering med återkoppling kompliceras av att innetemperaturen måste mätas, men att själva regulatorinställningen kan förenklas eftersom det inte är lika viktigt att välja rätt framkopplingskurva. För att enkelt kunna kontrollera om framledningstemperaturen överensstämmer med regulatorinställningen är det en fördel om styrsignalen endast beror på aktuella reglerfel som vid proportionell reglering och inte av föregående reglerfel som vid integrerande och deriverande reglering.

P-regulatorn

Den enklaste regulatorn är den proportionella regulatorn eller P-regulatorn. Regulatorns utsignal $u(t)$ är för denna proportionell mot reglerfelet

$$u(t) = k_p (T_{i\text{ref}} - T_i) = k_p e(t) \quad (3.30)$$

P-regulatorns enda parameter är regulatorförstärkningen k_p . När framkoppling och återkoppling kombineras så beräknas framledningstemperaturen som summan av framkopplingstemperaturen och regulatorns utsignal. Storleken på regulatorförstärkningen anger då hur många grader framledningstemperaturen ska avvika från framkopplingskurvan om reglerfelet är 1 °C.

Vi ska i detta avsnitt se närmare på vilka faktorer som styr valet av regulatorförstärkning. Medan man vid regulatordimensionering i allmänhet i första hand ser till processens utsignal och t_{ex} gör en avvägning mellan snabb insvängning och god stabilitet, så måste man vid temperaturreglering av bostadshus begränsa variationen i styrsignalen. En dimensioneringsprincip är därför att göra en lämplig avvägning mellan variationen i innetemperatur och variationen i

framledningstemperatur. Stabiliteten utgör däremot inte några större problem. Ett undantag från detta är när regulatorintervallet görs mycket långt.

Vi ska börja med att se på hur storleken på regulatorförstärkningen påverkar reglernoggrannheten. Redan i förra kapitlet såg vi hur gratisvärmeutnyttjandet kunde höjas med en proportionell återkoppling. Resultatet var att ju större regulatorförstärkning som användes, desto högre blev gratisvärmeutnyttjandet vilket framgick av (2.21) och FIG.2.1. Om vi istället för energiförbrukningen ser på innetemperaturen så motsvarar detta att innetemperaturen kan hållas närmare sitt referensvärde ju högre regulatorförstärkning som används. Ett uttryck för hur innetemperaturen beror av fel vald framkopplingskurva (dkT_U+dI) och gratisvärmertilskott (P_g) erhålls genom en lätt omformulering av (2.27):

$$T_i = T_{iref} + (1 - v_g)(k_r(dkT_U + dI) + P_g) / k_b \quad (3.31)$$

där v_g bestäms enligt (2.21) eller FIG.2.1a.

För att ge en konkret bild av hur regulatorförstärkningen påverkar reglernoggrannheten ska vi nu tillämpa (3.31) på vår simuleringsmodell med de numeriska värdena som angavs i förra avsnittet. I TAB.3.6 har det stationära felet i innetemperaturen beräknats för olika konstanta fel i framledningstemperaturen. Observera att i fallet $k_p=0$ så sker ingen återkoppling utan regleringen är en ren framkoppling.

TAB.3.6 Stationärt fel i innetemperaturen vid visst fel i framledningstemperaturen vid proportionell återkoppling med förstärkningen $k_p=0, 5, 10, 20, 40$ och 80 .

| fel i framkopplingskurva (°C) | stationärt fel i innetemperatur (°C) | | | | | |
|-------------------------------|--------------------------------------|------|------|------|------|------|
| | $k_p=0$ | 5 | 10 | 20 | 40 | 80 |
| 1.0 | 0.40 | 0.13 | 0.08 | 0.04 | 0.02 | 0.01 |
| 2.5 | 1.00 | 0.33 | 0.20 | 0.11 | 0.06 | 0.03 |
| 5.0 | 2.00 | 0.66 | 0.40 | 0.22 | 0.12 | 0.06 |
| 10.0 | 4.00 | 1.33 | 0.80 | 0.44 | 0.24 | 0.12 |
| | 100% | 33% | 20% | 11% | 6% | 3% |

Ur tabellen framgår även hur stor andel av en temperaturavvikelse som kvarstår då proportionell återkoppling används. Om ett gratisvärmertilskott ger en viss temperaturhöjning vid enbart framkoppling ($k_p=0$) så kvarstår exempelvis 20% vid proportionell återkoppling med $k_p=10$ eller 6% vid $k_p=40$. Utgående enbart från det stationära felet så kan följaktligen en hög proportionell förstärkning på t ex 40 eller större vara lämplig.

En annan aspekt på valet av regulatorförstärkning är hur stor temperaturavvikelsen är när värmertilförseln stängs av. Det kan vara rimligt med tanke på komfortkraven att en viss övertemperatur råder innan framledningstemperaturen sänks så mycket att radiatorerna känns kalla vid beröring. Detta sker vid temperaturer som understiger handens hudtemperatur på knappt 30 °C. TAB.3.7 anger övertemperaturer då radiatortemperaturen är 30 °C för olika regulatorförstärkningar.

TAB.3.7 Övertemperatur inne som krävs för att framledningstemperaturen skall sänkas under 30 °C vid proportionell återkoppling med regulatorförstärkningen $k_p=5, 10, 20, 40$ och 80.

| utetemp (°C) | normal framled- ningstemp (°C) | övertemperatur inne (°C) | | | | |
|-----------------|-----------------------------------|--------------------------|------|------|------|------|
| | | $k_p=5$ | 10 | 20 | 40 | 80 |
| 10 | 35 | 1.0 | 0.5 | 0.25 | 0.12 | 0.06 |
| 5 | 42.5 | 2.5 | 1.25 | 0.62 | 0.31 | 0.16 |
| 0 | 50 | 4.00 | 2.00 | 1.00 | 0.50 | 0.25 |
| -5 | 57.5 | 5.50 | 2.75 | 1.38 | 0.69 | 0.34 |
| -10 | 65 | 7.00 | 3.50 | 1.75 | 0.88 | 0.44 |
| -15 | 72.5 | 8.50 | 4.25 | 2.12 | 1.06 | 0.53 |
| -20 | 80 | 10.00 | 5.00 | 2.50 | 1.25 | 0.75 |

Regulatorförstärkningar på högst 20 kan tyckas vara rimliga ur denna synpunkt. Det ger en övertemperatur på 1 °C för upplevd avstängning av värmesystemet vid en utetemperatur på 0 °C.

Ett argument för att välja en proportionell återkoppling kunde vara

att man kan hålla den riktade operativa temperaturen, ROT, konstant vid förändringar i innetemperaturen. En öveslagsberäkning med antagandet att radiatoren upptar $p\%$ av rymdvinkeln och att den övriga strålningsytan till övervägande del är rumstempererad ger

$$ROT = (T_i + (1-p)T_i + pT_{rad}) / 2 \approx T_i + pT_{rad} / 2 \quad (3.32)$$

För att hålla ROT konstant vid en förändring i innetemperaturen så krävs att

$$T_{rad} = -(2/p)\Delta T_i \quad (3.33)$$

Eftersom radiatoren i normala beräkningspunkten endast upptar en liten rymdvinkel så kommer den proportionella förstärkningen $k_p = -\Delta T_f / \Delta T_i = 2/p$ att bli relativt stor. Om radiatoren t ex upptar 5% av rymdvinkeln så blir $k_p = 2/0.05 = 40$. Å andra sidan är detta även ett tecken på att strålningen från radiatoren endast har en mindre betydelse för storleken på ROT. I detta fall är bidraget till ROT från radiatoren 1 °C vid $T_{rad} = 60$ °C.

En viktigare faktor som styr valet av regulatorförstärkningens storlek är vilken variation i framledningstemperaturen som man kan acceptera under dygnet. Om vi för att förenkla antar att innetemperaturen varierar sinusformat med en periodtid på 24 h, sitt lägsta värde 20 °C kl 0600 och sitt högsta värde 21 °C kl 1800 så kan man beräkna eller simulera hur innetemperaturen och framledningstemperaturen varierar under dygnet vid proportionell reglering med olika förstärkningar. Resultatet blir att även med reglering så varierar inne- och framledningstemperaturerna sinusformat, men variationsbredden och fasen beror på förstärkningen. TAB.3.8 anger variationsbredd för inne- och framledningstemperatur och tidpunkten då högsta innetemperatur och lägsta framledningstemperatur uppnås.

TAB.3.8 Variationsbredden på inne- och framledningstemperaturen vid proportionell återkoppling med förstärkningen $k_p=0, 5, 10, 20, 40$ och 80 då innetemperaturen utan återkoppling varierar dygnsperiodiskt enligt $T_i=20.5-0.5 \sin(\omega t)$ °C

| regulatorförstärkning | $k_p=0$ | 5 | 10 | 20 | 40 | 80 |
|-------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| variationsbredd | | | | | | |
| innetemperatur (°C) | 1.00 | 0.84 | 0.72 | 0.55 | 0.36 | 0.22 |
| framledn temp (°C) | 0.0 | 4.2 | 7.2 | 11.0 | 14.6 | 17.2 |
| högsta inne- och lägsta | | | | | | |
| framledningstemp, kl | 18.00 | 17.30 | 17.00 | 16.30 | 16.00 | 15.30 |

Som framgår av tabellen så blir variationen i framledningstemperatur under dygnet relativt stor vid höga regulatorförstärkningar medan nyttan i form av minskad variation i innetemperatur inte blir så imponerande. Detta resultat är typiskt för reglering av "tung" byggnader och överensstämmer med de erfarenheter som den praktiska regleringen i Tingvallen och Teknikerhusen givit, se vidare kap 8 i RoS.

Under några veckor när en proportionell förstärkning på $k_p=40$ användes så gav detta upphov till omfattande klagomål på för låg radiatortemperatur under sen eftermiddag och kväll. Den värme som inte ges på eftermiddagen/kvällen ges istället ut under natten och tidigt på morgonen då innetemperaturen når sitt lägsta värde. Även detta uppfattades, speciellt i varma lägenheter, som en försämring.

Av TAB.3.8 framgår även att tidpunkten för temperaturernas extremvärden förskjuts så att de inträffar upp till några timmar tidigare beroende på förstärkningens storlek. Detta gör att innetemperaturen sjunker lika lång tid tidigare på kvällen, vilket kan ha en viss men troligen mindre betydelse.

Sammanfattningsvis så är valet av regulatorförstärkning till den proportionella regulatorn å ena sidan en kompromiss mellan lågt stationärt fel i innetemperaturen vid störningar som felaktig framkopplingskurva eller gratisvärmestillskott, vilket kräver hög förstärkning och å andra sidan ett krav att radiatortemperaturen inte ska variera för mycket och inte vara för låg under dagtid. Man bör härvid observera att det ur energi- och komfortsynpunkt är viktigt att hålla det stationära felet litet. De långvariga temperaturavvikelserna ska undvikas. Däremot är det inte lika viktigt ur energisynpunkt att hålla en jämn innetemperatur under dygnets timmar och ur komfortsynpunkt kan det alltså medföra en försämring.

Det kan tilläggas att P-regulatorer med en förstärkning på $k_p=10$ har använts under längre tidsperioder helt utan klagomål, t ex under försöksperioderna 1-4 i kapitel 2.

PI-regulatorn

I den proportionella och integrerande regulatorn, PI-regulatorn, beror styrsignalen även på reglerfelets tidsintegral. I den digitala PI-regulatorn beräknas integralen som en summa av tidigare reglerfel och PI-regulatorn får följande form

$$u(t) = k_p \left(e(t) + \sum_{i=0}^{t/T_s} e(t - iT_s) T_s / T_{int} \right) \quad (3.34)$$

Ett vanligt sätt att skriva PI-regulatorn är också

$$u(t) = u(t - T_s) + k_p (e(t) - e(t - T_s) + e(t) T_s / T_{int}) \quad (3.35)$$

där summeringen sker i regulatorns utsignal $u(t)$.

PI-regulatorn har två regulatorparametrar; den proportionella förstärkningen k_p och integraltiden T_{int} . Integraltiden anger hur lång tid det tar innan den integrerande delen blir lika stor som den proportionella om reglerfelet vore konstant.

Karakteristiskt för PI-regulatorn är att den inte ger något stationärt fel. Ett reglerfel kan inte kvarstå eftersom det - även om det är litet - bygger upp integraldelen tills felet regleras bort. PI-regulatorn klarar därför bra av att kompensera den långsamma störning som en felaktigt vald framkopplingskurva utgör. Till skillnad från P-regulatorn måste man alltså inte längre ha en hög proportionell förstärkning för att få ett lågt stationärt fel. Därmed behöver inte heller framledningstemperaturens dygnsvariation bli så stor. När det däremot gäller de snabba störningarna som orsakas av t ex solinstrålningen så är den proportionella delen effektivare för att dämpa avvikelserna. Den integrerande delen arbetar här för långsamt eftersom dess största inverkan ges just innan reglerfelet byter tecken. Den integrerande delen tenderar därför att snarare öka än minska temperaturvariationen vid snabbt övergående störningar.

Något som komplicerar PI-regulatorn är att man normalt inte kan tillåta att framledningstemperaturen avviker alltför mycket från framkopplingskurvan. Därför införs begränsningar på regulatorns utsignal. Ett exempel på detta gavs i FIG.1.4. När begränsningar införs så får PI-regulatorn i detta fall ytterligare fyra parametrar för att ange de övre och undre begränsningarnas lutning och konstant. Av större betydelse är dock de hänsyn som måste tas till s k integratoruppvridding vilket uppstår när regulatorns utsignal inte kan ställas ut utan begränsas. Detta behandlas separat i ett följande avsnitt.

Det finns även några andra nackdelar med PI-regulatorn. En är att det direkta sambandet mellan aktuellt reglerfel och styrsignal försvinner. Med PI-regulatorn är man därför inte längre garanterad att en viss övertemperatur råder vid avstängning av värmeförsejeln såsom vi sett gäller för P-regulatorn.

PI-regulatorn kan även sänka framledningstemperaturen under framkopplingskurvan samtidigt som innetemperaturen är för låg. Den proportionella och integrerande delen i PI-regulatorn arbetar då åt olika håll. Detta inträffar t ex när en lång period med mycket gratisvärme tar slut. Under den varma perioden hinner integratordelen att bli stor (eventuellt begränsas den) och det tar sedan en viss tid att återställa integratorn. Speciellt om integraltiden T_{int} är stor så tar det lång tid och innetemperaturen hinner sjunka långt under sitt börvärde. Av detta skäl kan man inte använda en PI-regulator med en långsam integratordel med baktanken att den klarar av stationära fel men inte påverkas av snabba störningar. Integraltiden ska vara av samma storleksordning eller kortare än den dominerande tidskonstanten för att integratorn ska hinna med.

Integraltiden får å andra sidan inte vara för kort eftersom den då bidrar till att öka dygnsvariationen av framledningstemperaturen. För snabba störningar fungerar, som tidigare påpekats, den proportionella delen bäst. I TAB.3.9 visas variationsdelen för inne- och framledningstemperaturen för olika integraltider, vilket kan jämföras med motsvarande reglerfall för P-regulatorn enligt TAB.3.8. Observera att oändligt stor integraltid motsvarar fallet med enbart proportionell reglering. I TAB.3.8 angavs också tidpunkten när högsta innetemperatur och lägsta framledningstemperatur uppnåddes

vid proportionell reglering. Dessa tidpunkter sammanfaller inte längre, men tidsförskjutningen minskar i jämförelse med P-regulatorn och den får därför mindre betydelse och tas inte med i

TAB.3.9.

TAB.3.9 Variationsbredden på inne- och framledningstemperatur vid PI-reglering med $k_p=10, 20, 40$ vid olika integrationstider T_{int} , då innetemperaturen utan återkoppling varierar dygnsperiodiskt enligt $T_i=20.5-0.5 \sin(\omega t)$ °C.

| integraltid (h) | ∞ | 48 | 24 | 12 | 8 | 4 | 2 | 1 | 0.555 |
|---------------------------------------|----------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| $k_p=10$ | | | | | | | | | |
| variationsbredd innetemperatur (°C) | 0.72 | 0.73 | 0.74 | 0.76 | 0.78 | 0.82 | 0.82 | 0.60 | 0.34 |
| variationsbredd framledningstemp (°C) | 7.2 | 7.3 | 7.5 | 8.0 | 8.6 | 11.4 | 17.7 | 23.7 | 23.9 |
| $k_p=20$ | | | | | | | | | |
| variationsbredd innetemperatur (°C) | 0.55 | 0.56 | 0.56 | 0.58 | 0.59 | 0.59 | 0.49 | 0.29 | 0.16 |
| variationsbredd framledningstemp (°C) | 11.0 | 11.2 | 11.5 | 12.2 | 13.1 | 16.4 | 21.1 | 22.9 | 22.3 |
| $k_p=40$ | | | | | | | | | |
| variationsbredd innetemperatur (°C) | 0.36 | 0.37 | 0.37 | 0.38 | 0.37 | 0.34 | 0.25 | 0.14 | 0.08 |
| variationsbredd framledningstemp (°C) | 14.6 | 14.8 | 15.1 | 15.3 | 16.7 | 19.2 | 21.5 | 21.8 | 21.5 |

Integratoruppvridning

I detta avsnitt behandlas ett ganska speciellt problem, nämligen hur själva regulatoralgoritmen för PI-regulatorn ska utformas för att fungera väl även när framledningstemperaturen är begränsad.

Ett välkänt problem vid integrerande reglering är s k integratoruppvridning (eng reset-windup). Allmänt sett så uppstår integratoruppvridning när processens verkliga insignal är begränsad och regulatorns styrsignal går utanför dessa gränser en längre tid. Eftersom styrsignalen inte påverkar processen fullt ut så kan det ta lång tid innan ett reglerfel regleras bort. Så länge som reglerfelet kvarstår kommer då integratorns utsignal att växa och den kan efter hand bli mycket stor. När sedan reglerfelet minskar och byter tecken kommer styrsignalen fortfarande att ligga kvar på sin begränsning under den tid det tar för reglerfelets integral att bli tillräckligt liten. Processens utsignal hinner nu få ett stort fel "åt andra hållet". Resultatet av detta blir stora överslängar och i värsta fall instabil reglering.

Vid reglering av innetemperaturen med framledningstemperaturen som styrvariabel kan denna effekt bli mycket påtaglig. Begränsningarna på styrvariabeln består i detta fall främst av att framledningstemperaturen inte kan understiga innetemperaturen - kylning finns ej. Men det kan även vara programvarumässiga begränsningar där man endast tillåter en viss avvikelse från framkopplingskurvan. Om inte hänsyn tas till dessa begränsningar i styrvariabeln så blir PI-regulatorn oanvändbar. Som exempel kan tas att efter några varma dagar utan något värmebehov och med hög innetemperatur så kan det ta flera dagar innan värmen slås på igen alltmedan innetemperaturen kan sjunka flera grader under börvärdet.

Det bästa sättet att undvika integratoruppvridning enligt textböcker i reglerteori (t ex Åström och Wittenmark, 1985) är att detektera om styrvariabeln är begränsad och i så fall återställa integratordelen till ett sådant värde att regulatorns totala utsignal kan ställas ut. Integraldelen kan därmed inte bli orealistiskt stor och integratoruppvridningen undviks. Med en programmerbar regulator är detta relativt enkelt i vårt fall eftersom begränsningarna är kända eller kan mätas.

När framkoppling och återkoppling kombineras kan dock nya problem uppstå när detta sätt att undvika integratoruppvridning används. Problemen uppkommer när det sker snabba och återgående ändringar i ute- eller innetemperaturen. Eftersom summan av framkopplingskurvan och den proportionella och integrerande delen av regulatorn ska vara minst lika med innetemperaturen så kan integraldelen vid återställningen komma att nollställas eller till och med få fel tecken när utetemperaturen är hög. När sedan utetemperaturen sjunker igen så måste integraldelen integreras ned igen. Detta tar längre tid ju större integrationstiden är. Under tiden erhålls då en period med onödigt uppvärmning. På liknande sätt kan integraldelen minskas då innetemperaturen är så hög att den proportionella regleringen räcker för att nå begränsningen på styrvariabeln.

Även dessa effekter, som vi kan kalla "integratornedvridning", kan bli mycket påtagliga vid PI-reglering av innetemperaturen i byggnader. För att ytterligare belysa vad som händer vid integratornedvridning vid höga utetemperaturer så ska vi se på följande förenklade exempel: Antag att utetemperaturen varierar sinusformat med sitt lägsta värde 0°C kl 06 och sitt högsta värde 20°C kl 18. Innetemperaturen antas vara konstant 20.5°C medan referensvärdet är 20.0°C . Innetemperaturen regleras med framkoppling från utetemperaturen plus en återkoppling med en PI-regulator med förstärkningen 20 och integrationstiden 12 h.

FIG.3.9 visar hur framledningstemperaturen varierar under ett dygn med början kl 06. Integraldelen antas vara lika med noll vid starten. Under perioden 06-12 sjunker framledningstemperaturen dels på grund av den ökande utetemperaturen, dels på grund av den allt större integraldelen. Något före kl 12 nås begränsningen att framledningstemperaturen inte får understiga innetemperaturen. Integratordelen är då ca -5°C . Därefter, fram till kl 18, återställs integratordelen så att den totala utsignalen kan ställas ut och kl 18 är integratordelen ca $+10^{\circ}\text{C}$. Från kl 18 sjunker utetemperaturen och framledningstemperaturen ökar enligt framkopplingskurvan samtidigt som integratordelen på nytt får integreras ned. Kl 06 är integratordelen åter lika med noll. Ytan mellan kurvsegmentet 18-06 och innetemperaturen utgör ett approximativt mått på den onödiga uppvärmning som integratornedvridningen medför i detta fall.

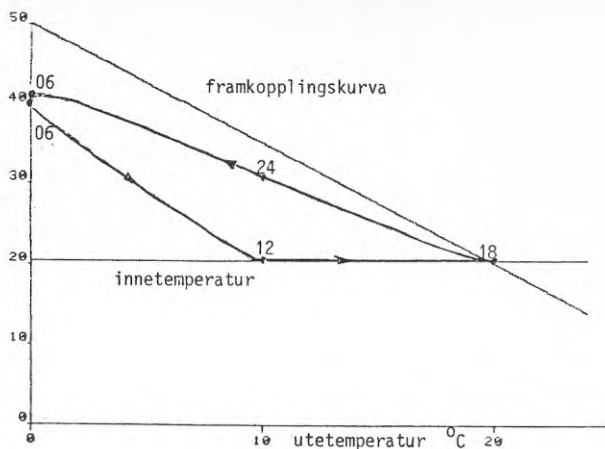


FIG.3.9 Principen för integratornedvridning vid varierande utetemperatur och framledningstemperaturen nedåt begränsad av innetemperaturen. PI-regulator med $k_p=20$, $T_{int}=12$ h.

En enkel, men kanske inte helt lyckad, lösning på problemet med integratornedvridning som använts i praktiken är att ersätta den nedre begränsningen

$$T_f > T_i \quad (3.36)$$

med

$$T_f > T_i - T_{marg} \quad (3.37)$$

där T_{marg} är en konstant. Härvid minskar eller upphör den integratornedvridning som uppstår när framledningstemperaturen begränsas av innetemperaturen. I FIG.3.10a,b visas framledningstemperaturen i föregående exempel då T_{marg} är 10 resp 20 °C. Den streckade kurvan är regulatorns utsignal som nu tillåts gå under innetemperaturen. Valet av storleken på T_{marg} blir en kompromiss mellan integratoruppvriddningen som tilltar och integratornedvridningen som avtar med ökande värde på T_{marg} . Ett värde på $T_{marg}=10$ °C har använts i praktiken.

KP=20. TI=0.5 YMARG=10.

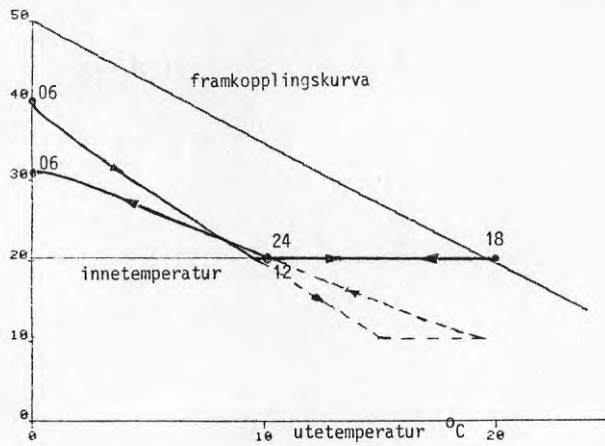


FIG. 3.10a Minskning av integratornedvridningen i FIG. 3.9.
 $T_{\text{marg}}=10^{\circ}\text{C}$.

KP=20. TI=0.5 YMARG=20.

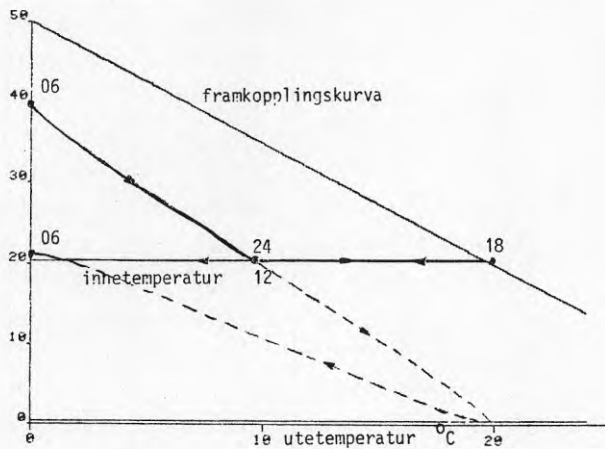


FIG. 3.10b Minskning av integratornedvridningen i FIG. 3.9.
 $T_{\text{marg}}=20^{\circ}\text{C}$.

Integratornedvridningen kan dock även uppkomma på andra sätt och då hjälper inte ovanstående metod. I FIG.3.11 visas ett exempel när programvarumässiga begränsningar används.

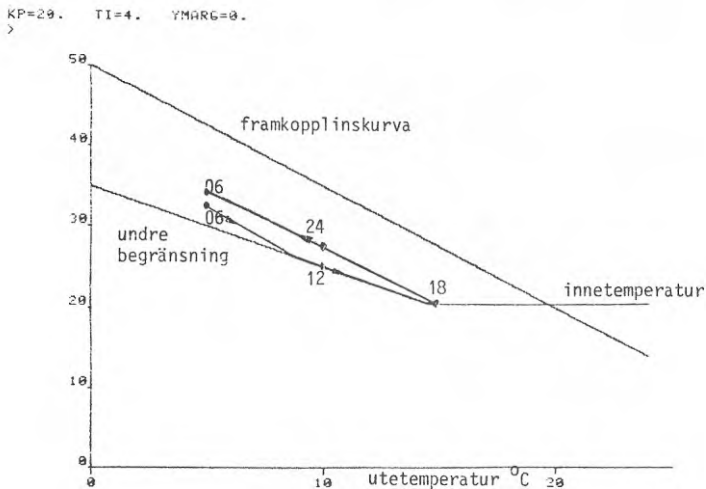


FIG.3.11 Integratornedvridning vid varierande utetemperatur och framledningstemperatur nedåt begränsad (programvarumässigt).

Även i detta fall är utetemperaturen sinusformad, nu med sitt lägsta värde 5 °C kl 06 och sitt högsta 15 °C kl 18. Integratornedvridning uppstår i detta fall endast då framkopplingskurvan och den undre begränsningen har olika lutningar. Integratornedvridningen blir normalt mindre i detta fall.

Principen för en tredje form av integratornedvridning visas i FIG.3.12. I detta fall antas utetemperaturen vara konstant medan innetemperaturen antas variera sinusformat. Integratornedvridningen beror i detta fall på att den proportionella delen ensam blir större än den tillåtna sänkningen. Integratordelen kommer då att återsättas till ett positivt värde trots att reglerfelet hela tiden är negativt.

KP=20, T1=0.5 YHARG=0.

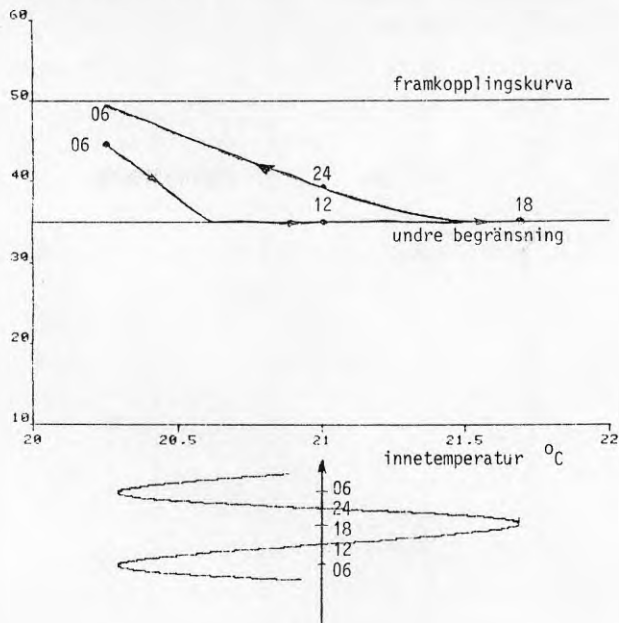


FIG.3.12 Integratornedvridning till följd av stor variation i innetemperaturen

En lösning för att undvika även dessa former av integratornedvridning bygger på att återställa integratordelen först när reglerfelet byter tecken, se FIG.3.13a. Så länge som reglerfelet och integraldelen har samma tecken så gör ju integratoruppvriddningen ingen skada. Det är först när reglerfelet byter tecken som det är viktigt att integraldelen återställs till ett rimligt värde. På detta sätt undviks onödig integratornedvridning.

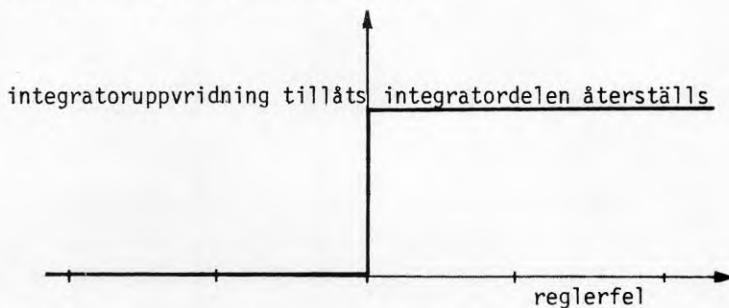


FIG.3.13a Principen för en förbättrad återställning av integraldelen för att undvika integratoruppvriddning vid den nedre begränsningen.

Regulatorns styrsignal ändras språngvis när reglerfelet byter tecken. Observera dock att den begränsade styrsignalen, dvs framledningstemperaturen inte ändras språngvis utan ligger kvar på sin begränsning och sedan gradvis kan integreras bort när reglerfelet byter tecken.

Sammanfattningsvis kan sägas att då en PI-regulator används så är det nödvändigt att förhindra obegränsad integratoruppvridning. Det normala sättet att undvika sådan är att återställa integraldelen till ett värde så att den lokala utsignalen alltid kan ställas ut. Vid snabba variationer i ute- eller innetemperaturen kan denna lösning medföra att integraldelen får oönskade värden som tar lång tid att integrera bort. Detta fenomen har vi kallat för "integratornedvridning". Två sätt att kompromissa mellan integratoruppvridning och -nedvridning har prövats. En nackdel är att PI-regulatorn med dessa lösningar får ytterligare minst en regulatorparameter för att klara integratoruppvridningen.

PD-regulatorn

Som ett komplement till P- eller PI-regulatorerna kan man även utnyttja en deriverande regulator eller D-regulator. Idén bakom den deriverande regulatorn är att göra en prediktion av det framtida reglerfelet e_{pred} vid tiden $t+T_D$ med extrapolering enligt

$$e_{\text{pred}}(t+T_D) = e(t) + T_D \dot{e}(t) \quad (3.38)$$

Genom att låta den proportionella regulatorn reglera på $e_{\text{pred}}(t)$ istället för $e(t)$ så kan reglerfelet motverkas innan det hunnit att utvecklas fullt ut. Ju långsammare störningarna är desto längre "prediktionshorisont" T_D kan man välja och fortfarande få en bra prediktion.

Normalt gör man två ändringar av den enkla prediktionen i (3.38). Dels utnyttjas derivatan av processens utsignal istället för derivatan av reglerfelet, dels filtreras derivatan för att undvika stora variationer på grund av snabba störningar eller mätbrus. Den digitala D-regulatorn kan efter dessa modifieringar skrivas på följande form

$$u_D(t) = a u_D(t - T_s) - T_D / T_s (y(t) - y(t - T_s)) \quad (3.39)$$

där $a = \exp(-T_D / T_d)$

Normalt kombineras D-regulatorn med P- eller PI-regulatorerna och bildar då PD- respektive PID-regulatorer. Regulatoralgoritmen för PD-regulatorn är t ex

$$u(t) = k_p (e(t) + u_D(t)) \quad (3.40)$$

D-regulatorn ovan har två regulatorparametrar T_D och T_d . Den diskreta derivatatiden T_D anger hur kraftigt D-regulatorn svarar momentant på en ändring i processens utsignaler medan prediktionshorisonten T_d anger storleken på den totala utsignalen från D-regulatorn som en ändring i processens utsignal medför. FIG.3.14 illustrerar inverkan av regulatorparametrarna efter en stegändring i processens utsignal.

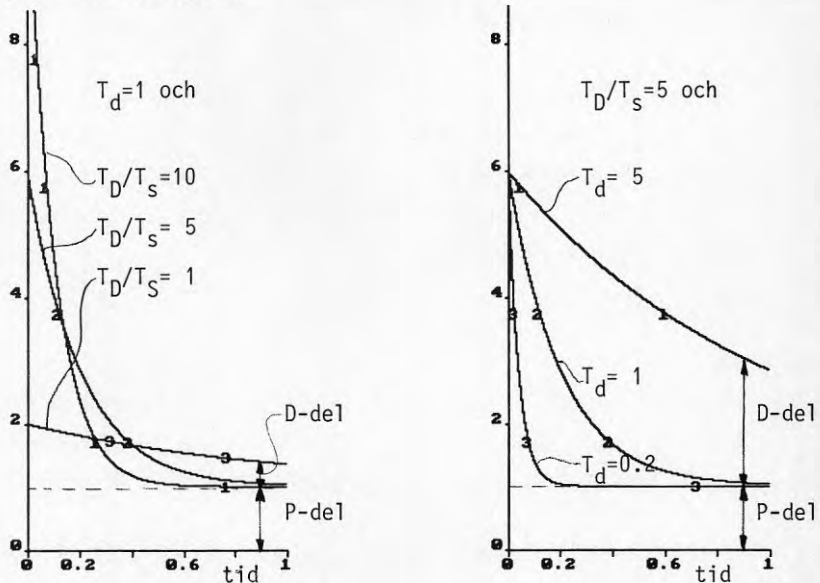


FIG.3.14 Stegsvår för D-regulatorn

Allmänt sett passar D-regulatorn bra vid reglering av tröga system där en störning snabbt syns medan det tar lång tid innan den orsakar ett stort fel i utsignalen. Detta är fallet vid reglering av innetemperaturen i byggnader.

D-regulatorn anses normalt vara svårare att dimensionera än de proportionella och integrerande regulatorerna. Några riktlinjer är att T_D kan väljas större ju långsammare störningarna är och att T_D ska väljas så stort som möjligt. Om ett litet T_D väljs, så fördelas regulatorns utsignal över en längre tid och dess utsignal hin- ner inte byggs upp för att dämpa snabba störningar. Med ett stort T_D så kan D-regulatorns snabbhet att motverka störningar utnytt- jas bättre. En faktor som begränsar hur stort T_D kan väljas, är att styrsignalen direkt efter en ändring i processens utsignal änd- rar sig en faktor $(1+T_D/T_S)$ mer än med enbart en P-regulator. Processen måste därför klara en sådan större återkoppling utan att bli instabil, annars kommer D-regulatorn att ge en instabil regle- ring.

Av ovanstående resonemang följer att D-regulatorn i vårt fall med reglering av inomhustemperaturen kan göra störst nytta som komple- ment till P- och PI-regulatorer med relativt låg proportionell förstärkning.

I TAB.3.10 redovisas, på samma sätt som för P- och PI-regulatorer- na, variationsbredd på inne- och framledningstemperaturerna vid reglering med en PD-regulator med några olika val av regulatorpara- metrar. För $T_D=0$ så nollställs derivatadelen, vilket ger en ren P-regulator.

TAB.3.10 Variationsbredden på inne- och framledningstemperatur vid PD-reglering med $k_p=10$ och 40 , derivatitiden $2.5T_s$ och $10T_s$ och olika prediktionshorisonter, T_D . Innetemperaturen varierar utan återkoppling dygnsperiodiskt enligt $T_i=20.5-0.5 \sin(\omega t)$ °C. Samplingsintervallet $T_s=10$ minuter.

| prediktionshorisont, T_D (dygn) | 0.0 | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 1.0 | 2.0 |
|---------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $k_p=10, T_D=10$ | | | | | | | |
| variationsbredd innetemperatur (°C) | 0.72 | 0.60 | 0.52 | 0.40 | 0.33 | 0.25 | 0.19 |
| variationsbredd framledningstemp (°C) | 7.2 | 8.2 | 9.8 | 12.3 | 13.9 | 15.4 | 16.7 |
| $k_p=10, T_D=2.5$ | | | | | | | |
| variationsbredd innetemperatur (°C) | 0.72 | 0.61 | 0.53 | 0.44 | 0.41 | 0.40 | 0.39 |
| variationsbredd framledningstemp (°C) | 7.2 | 8.1 | 9.8 | 11.6 | 12.4 | 13.1 | 13.6 |
| $k_p=40, T_D=2.5$ | | | | | | | |
| variationsbredd innetemperatur (°C) | 0.36 | 0.28 | 0.22 | 0.16 | 0.15 | 0.14 | 0.13 |
| variationsbredd framledningstemp (°C) | 14.6 | 15.0 | 16.2 | 17.3 | 17.7 | 18.1 | 18.3 |

3.4 Simuleringar

I detta avsnitt redovisas simuleringar som gjorts med den presenterade simuleringssmodellen. Avsikten är att jämföra olika enkla regulatorer under samma betingelser. Samma processparametrar, inre värmebelastning och klimatdata används för alla simuleringar. Det som skiljer simuleringarna åt är enbart valet av framkopplingskurva och regulator.

Ett helt år simuleras med början i januari. Regulatorernas börvärde är valt till 21 °C. Simuleringarna startar dock med 10 "insvängningsdygn" för att ge ett riktigare begynnelsevärde på innetemperaturen. Under insvängningsperioden används klimatdata från årets slut (22/12-31/12). Eldningssäsongen är vald till 1/1-31/5 och 1/9-31/12. Under de tre sommarmånaderna antas värmeförlusten vara avstängd och framledningstemperaturen antar samma värde som innetemperaturen. Eftersom ingen extra vädring eller skuggning antas förekomma, så blir innetemperaturen tidvis hög under sommarmånaderna.

Varje simulering redovisas i form av en sammanställande tabell och i de flesta fallen av fyra diagramsidor. I sammanställningen anges för varje månad energiförbrukningen samt medelvärdet och spridningen för inne- och framledningstemperaturer samt regulatorns utsignal. Som spridningsmått används standardavvikelsen samt högsta och lägsta värdet för innetemperaturen medan den genomsnittliga dagliga variationsbredden vbd anges för framledningstemperaturen och regulatorns utsignal. vbd är ett mått på dygnsvariationer i styrvariabeln. Energiförbrukningen E jämförs också med den energiförbrukning E_{fk} som erhålls vid reglering med enbart framkoppling med korrekt framkopplingskurva. Den relativa skillnaden eller vinsten beräknas enligt

$$\text{vinst} = 100(E_{fk} - E) / E_{fk} \% \quad (3.41)$$

De tre första diagramsidorna presenterar innetemperaturen, regulatorns utsignal och framledningstemperaturen på olika sätt. Regulatorns utsignal representeras här med skillnaden mellan den verkliga framledningstemperaturen och framledningstemperaturen enligt framkopplingskurvan

$$T_f = T_f - T_{ffk} \quad (3.42)$$

Därmed inkluderas, förutom regulatorns utsignal, även effekten av begränsningar som gör att den verkliga framledningstemperaturen skiljer sig från den önskade framledningstemperaturen enligt regulatorn och framkopplingskurvan.

Först visas temperaturförloppen under åtta dygn i mars (dygn 68-75). Denna period kännetecknas av klart och kallt väder i början, speciellt under dygn 69-71, och en mulen och mildare avslutning. Medeltemperaturen ute är ca -5°C . Den andra diagramsidan visar medeldygn kl 00-24 beräknade för månaderna mars och april. Den tredje diagramsidan visar fördelningsfunktionerna som är beräknade från timvärden för hela eldningsssäsongen för innetemperaturen, regulatorns utsignal och den dagliga variationsbredden i framledningstemperaturen. De tre variablerna har här klassindelats i 50 st klasser, vilket givit en upplösning på 0.1, 1.0 resp 0.5°C .

Den fjärde diagramsidan består av tre variabel mot variabel-diagram vilka vi med en hemmagjord beteckning kallar för "korsdiagram". Först är det radiatoreffekten som funktion av innetemperaturen. För en bra reglering bör radiatoreffekten avta snabbt när innetemperaturen överstiger referensvärdet. Därefter visas innetemperaturen som funktion av utetemperaturen. Innetemperaturen bör ej bero på utetemperaturen. Finns det ett linjärt samband mellan dessa så kan det elimineras genom att ändra framkopplingskurvan. Sist visas radiatoreffekten som funktion av utetemperaturen. Vid ren framkoppling är detta samband nästan linjärt men vid återkoppling uppkommer en större spridning eftersom även gratisvärmen påverkar värmeförselns storlek.

Korsdiagrammen har bildats genom att variabeln på y-axeln har klassindelats i 25 klasser beroende på den just då aktuella storleken av variabeln på x-axeln. För varje klass ritas en linje från lägsta till högsta värde av y-variabeln. Medelvärdena för varje klass har därefter förbundits med en streckad linje. Det förekommer även en äldre version där medelvärdena är förbundna med en linje och den lodräta linjen anger storleken på standardavvikelsen. Denna variant känns igen genom att medelvärdena alltid är symmetriskt placerade.

Endast framkoppling

Först ser vi på reglerfallet med korrekt framkoppling från utetemperaturen men utan återkoppling från innetemperaturen. Detta kan ses som ett referensfall till de följande simuleringarna med olika regulatorer.

Framkopplingskurvan ges av (3.28). Eftersom framkopplingen är perfekt så bidrar inte utetemperaturen till variationen i innetemperaturen utan denna orsakas av solinstrålningen och den interna värmebelastningen. Utan solinstrålningen så hade medeltemperaturen inne varit precis $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($=T_{\text{iref}}$).

Simuleringen redovisas i TAB.3.11 och FIG.3.15a-d. Den totala energiåtgången på 100.7 kWh/m^2 , lgy motsvarar en effektåtgång på $P_r = 100.7 \times 1000 / (273 + 24)\text{ W/m}^2$, lgy $= 15.4\text{ W/m}^2$, lgy. Ett värde på det genomsnittliga gratisvärmeutnyttjandet v_g kan beräknas med hjälp av sambandet

$$P_r = P_b - P_{g0} - v_g P_{gs} \quad (3.43)$$

Numeriska värden enligt TAB.3.5 ger $v_g = 28.9\%$ vilket kan jämföras med förväntade 40% enligt (2.23). Skillnaden uppstår under varma perioder då framledningstemperaturen inte kan sänkas mer utan sammanfaller med innetemperaturen.

Några ytterligare kommentarer är att innetemperaturens medelvärde, som väntat, ökar mot sommaren till följd av större solinstrålning. Även spridningen ökar eftersom skillnaden mellan solinstrålningen under soliga och molniga perioder ökar. Tidsserien visar en typisk uppåtgående trend under de soliga dygnen och därefter en avtagande trend under den mer solfattiga avslutningen. Eftersom korrekt framkopplingskurva används så kommer hela störningen från solinstrålningen och inom varje dygn med en mindre del (ca $1/4\text{ }^{\circ}\text{C}$) från den interna värmebelastningen. Variationen i utetemperaturen kompenseras däremot helt. Medeldygnen har sitt lägsta värde kl 05 och sitt högsta värde kl 17. Skillnaden är ca $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Husens orientering med sol på öst- och västfasader orsakar en liten nedgång i innetemperaturen mitt på dagen.

Av fördelningsdiagrammen framgår att innetemperaturen ca 50% av tiden ligger mer än 1°C för högt, men att den även faller ner mot önskade 21°C under ca 2% eller grovt 120 timmar per eldningssäsong. En enkel sänkning av framkopplingskurvan är således inte lämplig.

Korsdiagrammen visar att radiatoreffekten kan vara stor även när innetemperaturen är betydligt större än referensvärdet. Innetemperaturen som funktion av utetemperaturen visar att man inte direkt kan välja en bättre framkopplingskurva som tar hänsyn till solinstrålningen. En möjlighet vore att istället använda en bruten framkopplingskurva med större lutning då utetemperaturen överstiger till exempel 5°C . Den stora spridningen minskas dock inte av detta. Återkoppling är därför en bättre metod eftersom både medelvärde och spridning kan minskas.

TAB.3.11 Sammanställning av några viktigare variabler för varje månad.

Reglersätt: framkoppling med korrekt framkopplingskurva

simu 1 Framkoppl. K= -1.50 L= 48.34 Teamp= 1.00

Hela dygnet:

| Månad | ENERGI kWh/m**2 | vinst % | Tinne C | +std C | Timin C | Timax C | Tfram C | /vbd/ C | Ureg C | Tfk C |
|-------|--------------------|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|-----------|----------|
| jan | 15.51 | .0 | 21.27 | .16 | 21.02 | 22.04 | 49.7 | 7.3 | .0 | 49.7 |
| feb | 14.19 | .0 | 21.62 | .25 | 21.21 | 22.49 | 50.4 | 7.9 | .0 | 50.4 |
| mars | 15.96 | .0 | 22.20 | .40 | 21.50 | 23.52 | 51.5 | 8.8 | .0 | 51.5 |
| apr | 10.48 | .0 | 23.32 | .82 | 21.82 | 25.28 | 43.2 | 11.7 | .0 | 43.2 |
| maj | 4.05 | .0 | 25.35 | .94 | 23.25 | 27.74 | 32.8 | 11.2 | .0 | 31.2 |
| juni | .00 | .0 | 24.88 | 1.69 | 22.14 | 29.22 | 24.9 | .0 | .0 | 26.0 |
| juli | .00 | .0 | 26.54 | 2.18 | 22.43 | 31.32 | 26.5 | .0 | .0 | 21.7 |
| aug | .00 | .0 | 25.12 | 1.68 | 21.31 | 28.88 | 25.1 | .0 | .0 | 23.6 |
| sep | 4.89 | .0 | 23.03 | .60 | 21.64 | 24.48 | 32.3 | 11.1 | .0 | 32.2 |
| okt | 8.31 | .0 | 22.14 | .33 | 21.51 | 23.12 | 37.4 | 9.9 | .0 | 37.4 |
| nov | 13.35 | .0 | 21.60 | .24 | 21.15 | 22.33 | 46.9 | 8.5 | .0 | 46.9 |
| dec | 13.96 | .0 | 21.22 | .11 | 21.05 | 21.53 | 46.8 | 7.9 | .0 | 46.8 |
| elde | 100.71 | .0 | 22.42 | .00 | 21.02 | 27.74 | 43.4 | 9.4 | .0 | 43.2 |

Endast dagtid:

| Månad | ENERGI kWh/m**2 | vinst % | Tinne C | +std C | Timin C | Timax C | Tfram C | /vbd/ C | Ureg C | Tfk C |
|-------|--------------------|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|-----------|----------|
| jan | 10.25 | .0 | 21.31 | .17 | 21.03 | 22.04 | 49.5 | 5.2 | .0 | 49.5 |
| feb | 9.34 | .3 | 21.67 | .26 | 21.21 | 22.49 | 50.1 | 6.1 | .0 | 50.1 |
| mars | 10.25 | .0 | 22.30 | .41 | 21.52 | 23.52 | 50.5 | 7.6 | .0 | 50.5 |
| apr | 6.25 | .0 | 23.51 | .83 | 21.86 | 25.28 | 41.3 | 9.2 | .0 | 41.3 |
| maj | 1.79 | .0 | 25.64 | .91 | 23.33 | 27.74 | 30.5 | 7.2 | .0 | 28.1 |
| juni | .00 | .0 | 25.21 | 1.67 | 22.17 | 29.22 | 25.2 | .0 | .0 | 23.3 |
| juli | .00 | .0 | 26.86 | 2.18 | 23.34 | 31.32 | 26.9 | .0 | .0 | 19.3 |
| aug | .00 | .0 | 25.38 | 1.68 | 21.48 | 28.88 | 25.4 | .0 | .0 | 21.5 |
| sep | 2.61 | .0 | 23.19 | .61 | 21.89 | 24.48 | 30.6 | 8.9 | .0 | 30.5 |
| okt | 5.13 | .0 | 22.24 | .34 | 21.52 | 23.12 | 36.3 | 8.2 | .0 | 36.3 |
| nov | 8.76 | .0 | 21.65 | .25 | 21.16 | 22.33 | 46.5 | 6.3 | .0 | 46.5 |
| dec | 9.20 | .0 | 21.25 | .11 | 21.06 | 21.53 | 46.5 | 5.8 | .0 | 46.5 |
| elde | 63.57 | .0 | 22.54 | .00 | 21.03 | 27.74 | 42.4 | 7.2 | .0 | 42.1 |

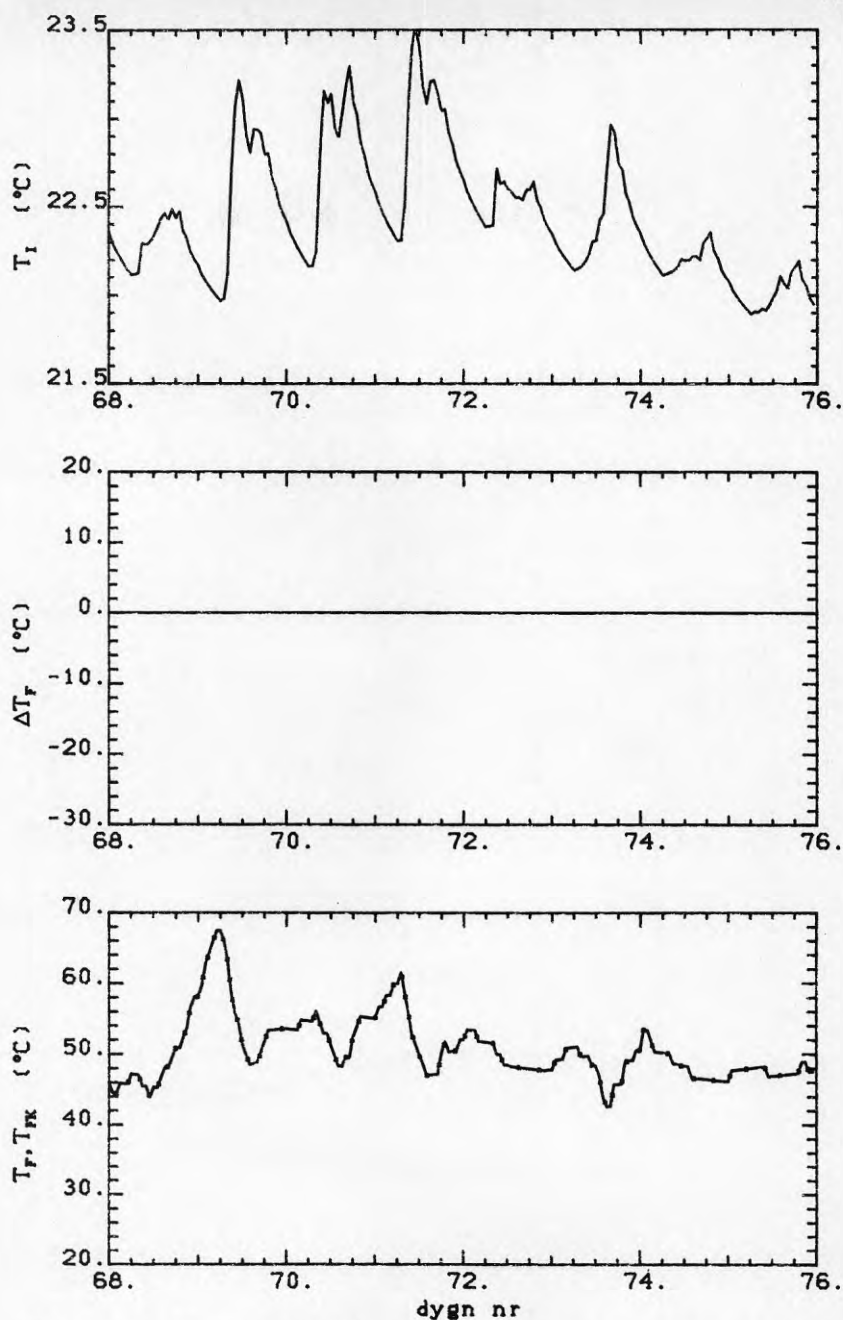


FIG.3.15a Temperaturförloppet under åtta dygn i mars (dygn 68-75) för innetemperaturen, regulatorns utsignal och underst framledningstemperaturen och framledningstemperatur enligt framkopplingskurvan (prickad linje).
Reglersätt: framkoppling med korrekt framkopplingskurva

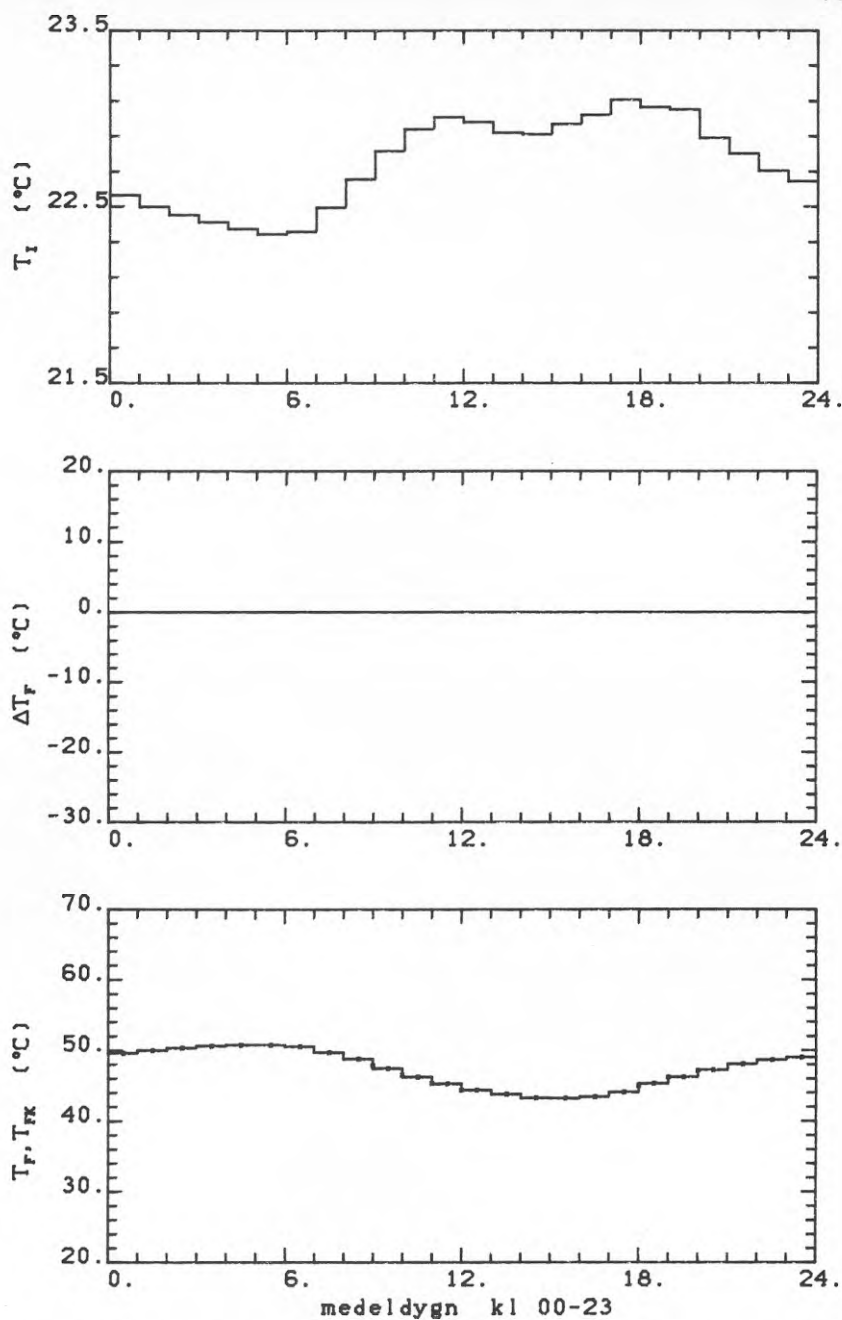


FIG.3.15b Medeldygn för mars och april för innetemperaturen, regulatorns utsignal och underst framledningstemperaturen och framledningstemperatur enligt framkopplingskurvan (prickad linje).

Reglersätt: framkoppling med korrekt framkopplingskurva

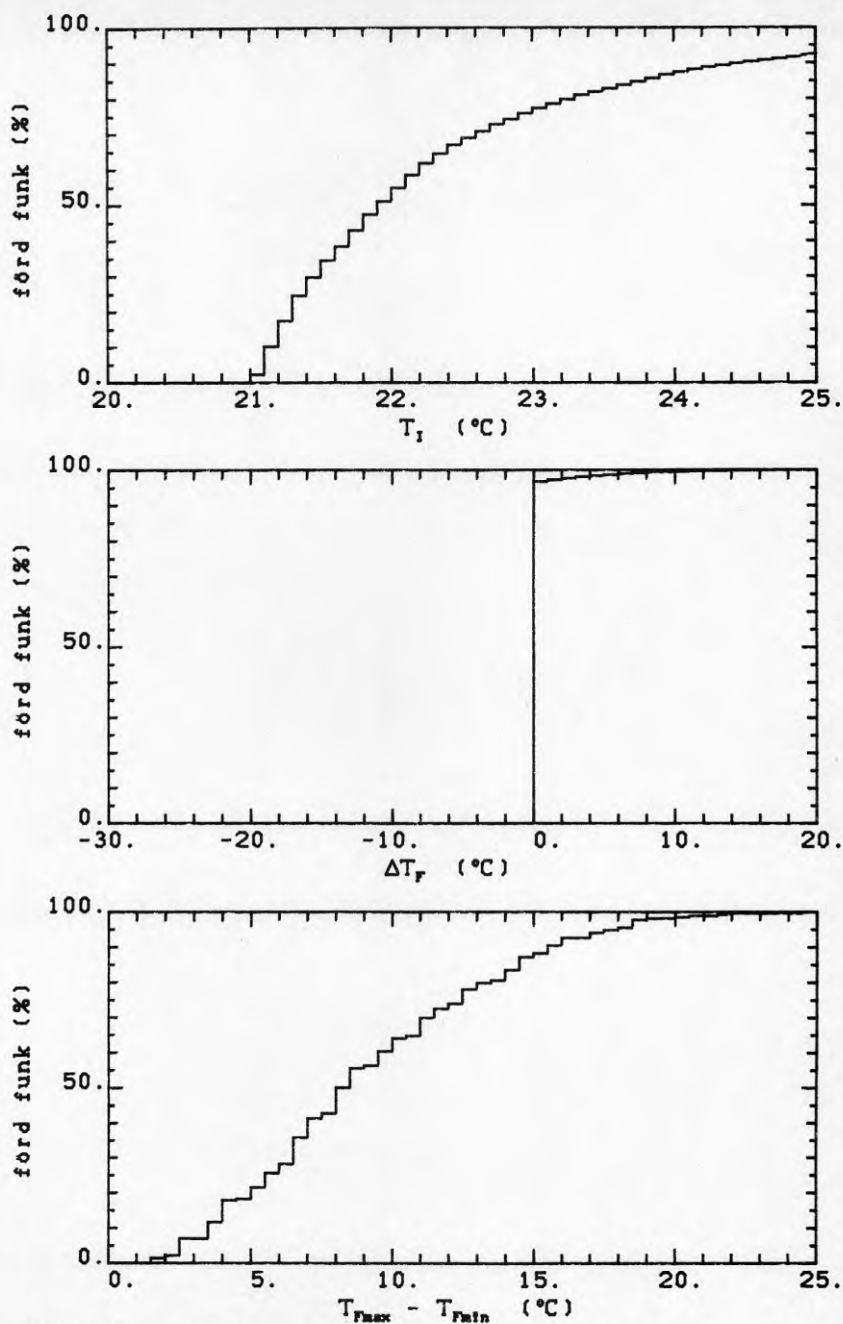


FIG.3.15c Fördelningsfunktionen beräknad för hela eldnings säsongen för innetemperaturen, regulatorns utsignal och den dagliga variationsbredden i framledningstemperaturen. Reglersätt: framkoppling med korrekt framkopplingskurva

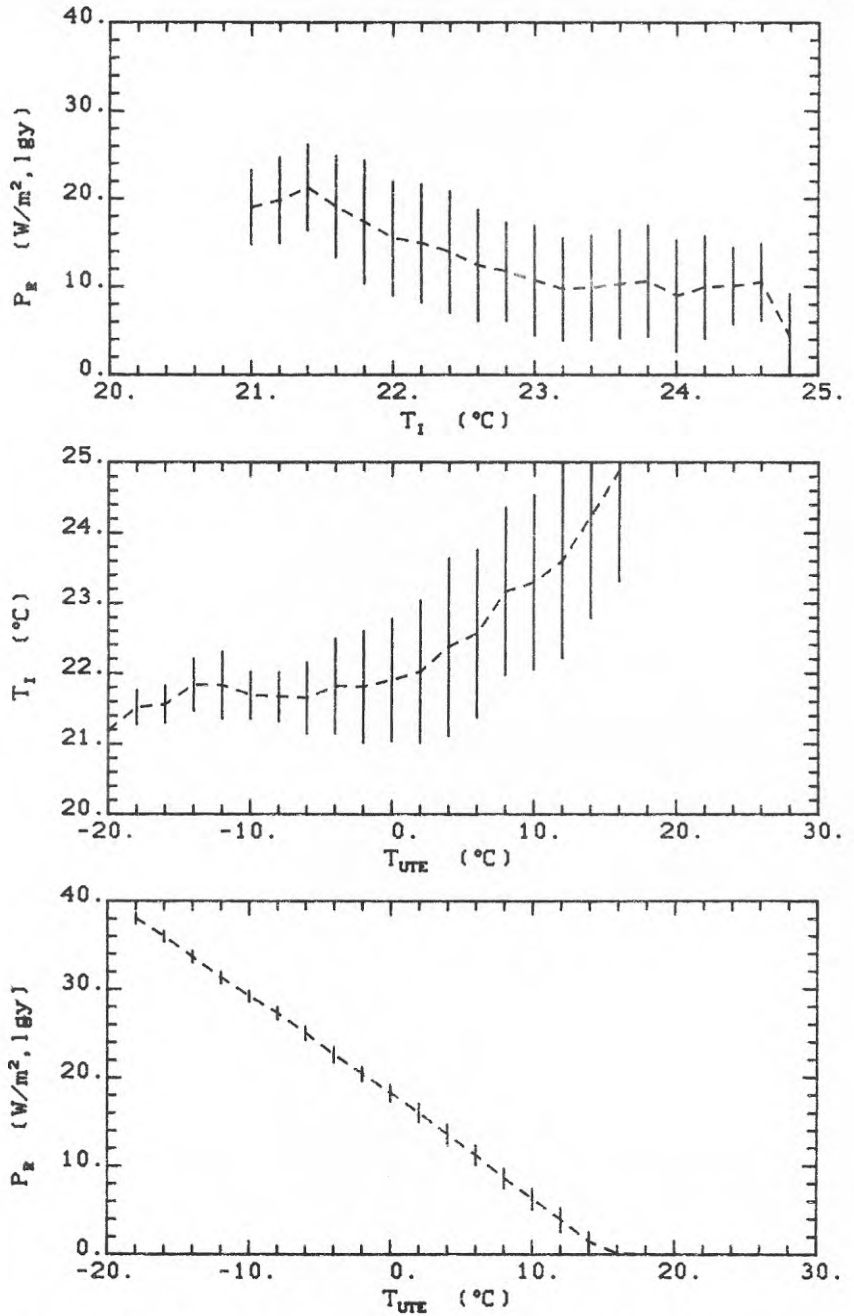


FIG.3.15d Radiatoreffekten som funktion av innetemperaturen, innetemperaturen som funktion av utetemperaturen och radiatoreffekten som funktion av utetemperaturen. Reglersätt: framkoppling med korrekt framkopplingskurva

Optimal reglering

Innan vi behandlar de återkopplande regulatorerna så ska vi se var den övre gränsen går för vad regleringen kan åstadkomma. Detta sker genom att simulera en "optimal regulator" som känner alla störningar i förväg och kompenserar dessa så att innetemperaturen om möjligt hålls konstant lika med börvärdet. Observera att denna regulator inte kan realiseras i verkligheten eftersom den förutsätter att alla störningars storlek och inverkan är helt kända.

Simuleringen redovisas i TAB.3.12 och FIG.3.16a-d. Det genomsnittliga gratisvärmeutnyttjandet blir 94.5% mot förväntade 100%. Skillnaden orsakas av att en del av gratisvärmerna inte kan utnyttjas fullt ut när inget värmebehov föreligger. Tillförd energimängd minskar med $9.3 \text{ kWh/m}^2, \text{1gy}$ eller med 9.3% under eldnings säsongen jämfört med ren framkoppling.

Inte heller nu kan innetemperaturen hållas nere under april, maj och september beroende på att värmebehovet tidvis är mindre än gratisvärmerna. Regulatorn kan i detta läge bara strypa all värmeförsel, men inte begära kylning.

Priset för att hålla den jämna innetemperaturen är att regulatorns utsignal måste varieras kraftigt, vilket vi mäter med den dagliga variationsbredden vbd. I mars och april månad fördubblas vbd från ca $10 \text{ }^\circ\text{C}$ vid ren framkoppling till 20-25 $^\circ\text{C}$.

Gratisvärmerna tillgodogörs direkt när den uppkommer, dvs huvudsakligen under dagtid då framledningstemperaturen kan sjunka upp till $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (i genomsnitt $15 \text{ }^\circ\text{C}$). Under natten är framledningstemperaturen däremot något högre än vid normal framkoppling eftersom det inte "laddats upp" under dagen.

Fördelningsdiagrammet visar att i ca 15% av tiden så är värmebehovet mindre än tillgänglig gratisvärme och innetemperaturen stiger. Detta kan alltså inte avhjälpas med bättre reglering. Radiatoreffekt som funktion av utetemperaturen visar att värmeförseln stängs av vid utetemperaturer över $14 \text{ }^\circ\text{C}$. Skillnaden är i detta avseende inte så stor mot fallet med ren framkoppling där värmeförseln upphör vid $16 \text{ }^\circ\text{C}$.

TAB.3.12 Sammanställning av några viktigare variabler för varje månad.

Reglersätt: optimal reglering

simu 10 OPTreg Kp= .00 Tint= .00 Teamp= .17

Hela dygnet:

| Månad | ENERGI kWh/m**2 | vinst % | Tinne C | +std C | Timin C | Timax C | Tfram C | /vbd/ C | Ureg C | /vbd/ C |
|-------|--------------------|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|
| jan | 15.28 | 1.5 | 21.00 | .00 | 21.00 | 21.00 | 49.0 | 13.1 | -.7 | 8.7 |
| feb | 13.70 | 3.5 | 21.00 | .00 | 21.00 | 21.00 | 48.8 | 16.6 | -1.6 | 11.1 |
| mars | 14.88 | 6.8 | 21.00 | .00 | 21.00 | 21.00 | 48.3 | 20.6 | -3.2 | 15.1 |
| apr | 8.36 | 20.3 | 21.04 | .14 | 21.00 | 22.04 | 36.9 | 25.5 | -7.8 | 25.7 |
| maj | 1.73 | 57.3 | 22.36 | 1.21 | 21.00 | 25.92 | 25.5 | 10.3 | -13.2 | 21.2 |
| juni | .00 | .0 | 24.52 | 1.35 | 22.01 | 27.94 | 24.5 | .0 | .0 | .0 |
| juli | .00 | .0 | 26.53 | 2.19 | 22.42 | 31.32 | 26.5 | .0 | .0 | .0 |
| aug | .00 | .0 | 25.12 | 1.69 | 21.31 | 28.89 | 25.1 | .0 | .0 | .0 |
| sep | 3.27 | 33.1 | 21.26 | .42 | 21.00 | 22.86 | 27.5 | 15.1 | -9.0 | 19.3 |
| okt | 7.36 | 11.4 | 21.02 | .08 | 21.00 | 21.72 | 34.5 | 19.4 | -3.5 | 17.1 |
| nov | 12.98 | 2.8 | 21.00 | .00 | 21.00 | 21.06 | 45.6 | 15.0 | -1.3 | 10.3 |
| dec | 13.78 | 1.3 | 21.00 | .00 | 21.00 | 21.00 | 46.2 | 12.2 | -.6 | 7.7 |
| elde | 91.34 | 9.3 | 21.19 | .00 | 21.00 | 25.92 | 40.2 | 16.4 | -4.6 | 15.1 |

Endast dagtid:

| Månad | ENERGI kWh/m**2 | vinst % | Tinne C | +std C | Timin C | Timax C | Tfram C | /vbd/ C | Ureg C | /vbd/ C |
|-------|--------------------|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|
| jan | 9.70 | 5.4 | 21.00 | .00 | 21.00 | 21.00 | 47.7 | 11.1 | -1.8 | 7.8 |
| feb | 8.53 | 8.9 | 21.00 | .00 | 21.00 | 21.00 | 47.0 | 15.1 | -3.1 | 10.3 |
| mars | 8.75 | 14.7 | 21.00 | .00 | 21.00 | 21.00 | 45.1 | 17.8 | -5.4 | 14.2 |
| apr | 3.94 | 36.9 | 21.06 | .16 | 21.00 | 22.04 | 32.3 | 21.7 | -11.2 | 24.4 |
| maj | .56 | 68.6 | 22.65 | 1.25 | 21.00 | 25.92 | 24.2 | 5.6 | -12.4 | 15.6 |
| juni | .00 | .0 | 24.86 | 1.32 | 22.04 | 27.94 | 24.9 | .0 | .0 | .0 |
| juli | .00 | .0 | 26.86 | 2.18 | 23.33 | 31.32 | 26.9 | .0 | .0 | .0 |
| aug | .00 | .0 | 25.38 | 1.68 | 21.47 | 28.89 | 25.4 | .0 | .0 | .0 |
| sep | 1.19 | 54.5 | 21.37 | .46 | 21.00 | 22.86 | 24.7 | 9.7 | -11.2 | 16.0 |
| okt | 3.79 | 26.1 | 21.02 | .09 | 21.00 | 21.72 | 31.4 | 16.0 | -5.9 | 16.0 |
| nov | 8.06 | 8.0 | 21.00 | .00 | 21.00 | 21.06 | 43.9 | 13.2 | -2.7 | 9.4 |
| dec | 8.73 | 5.1 | 21.00 | .00 | 21.00 | 21.00 | 45.0 | 10.2 | -1.5 | 6.8 |
| elde | 53.25 | 16.2 | 21.24 | .00 | 21.00 | 25.92 | 37.9 | 13.3 | -6.1 | 13.4 |

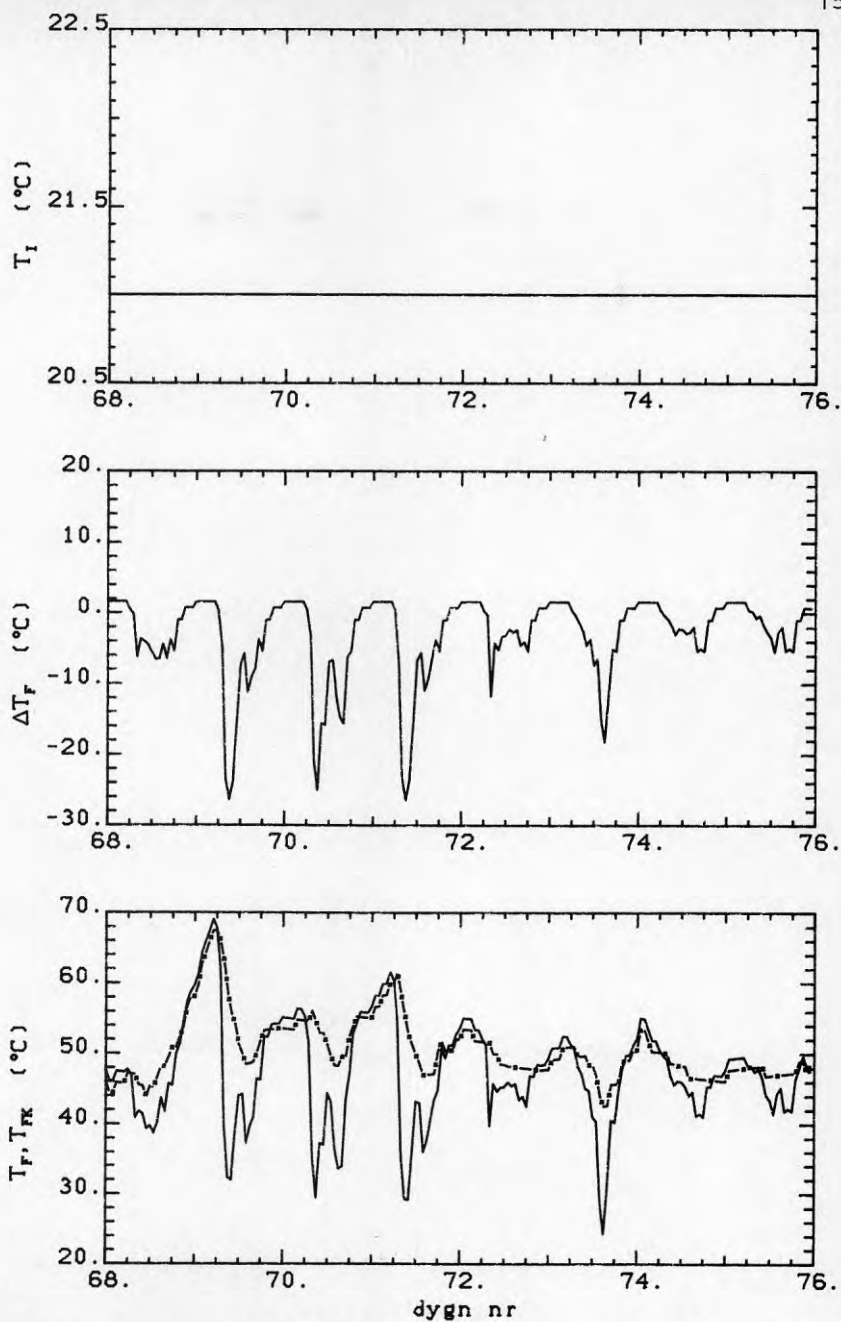


FIG.3.16a Temperaturförloppet under åtta dygn i mars (dygn 68-75) för innetemperaturen, regulatorns utsignal och underst framledningstemperaturen och framledningstemperatur enligt framkopplingskurvan (prickad linje).
Reglersätt: optimal reglering

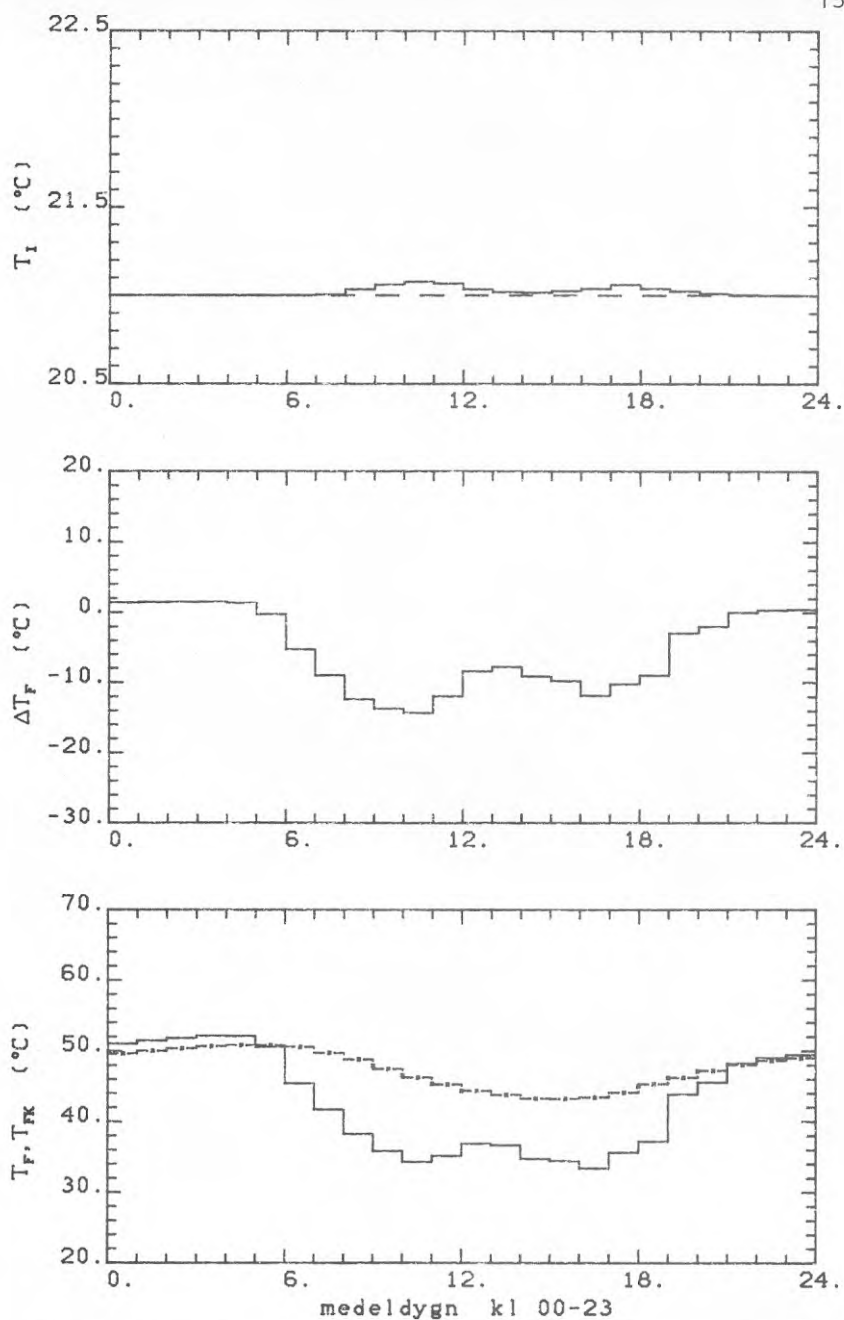


FIG.3.16b Medeldygn för mars och april för innetemperaturen, regulatorns utsignal och underst framledningstemperaturen och framledningstemperatur enligt framkopplingskurvan (prickad linje).

Reglersätt: optimal reglering

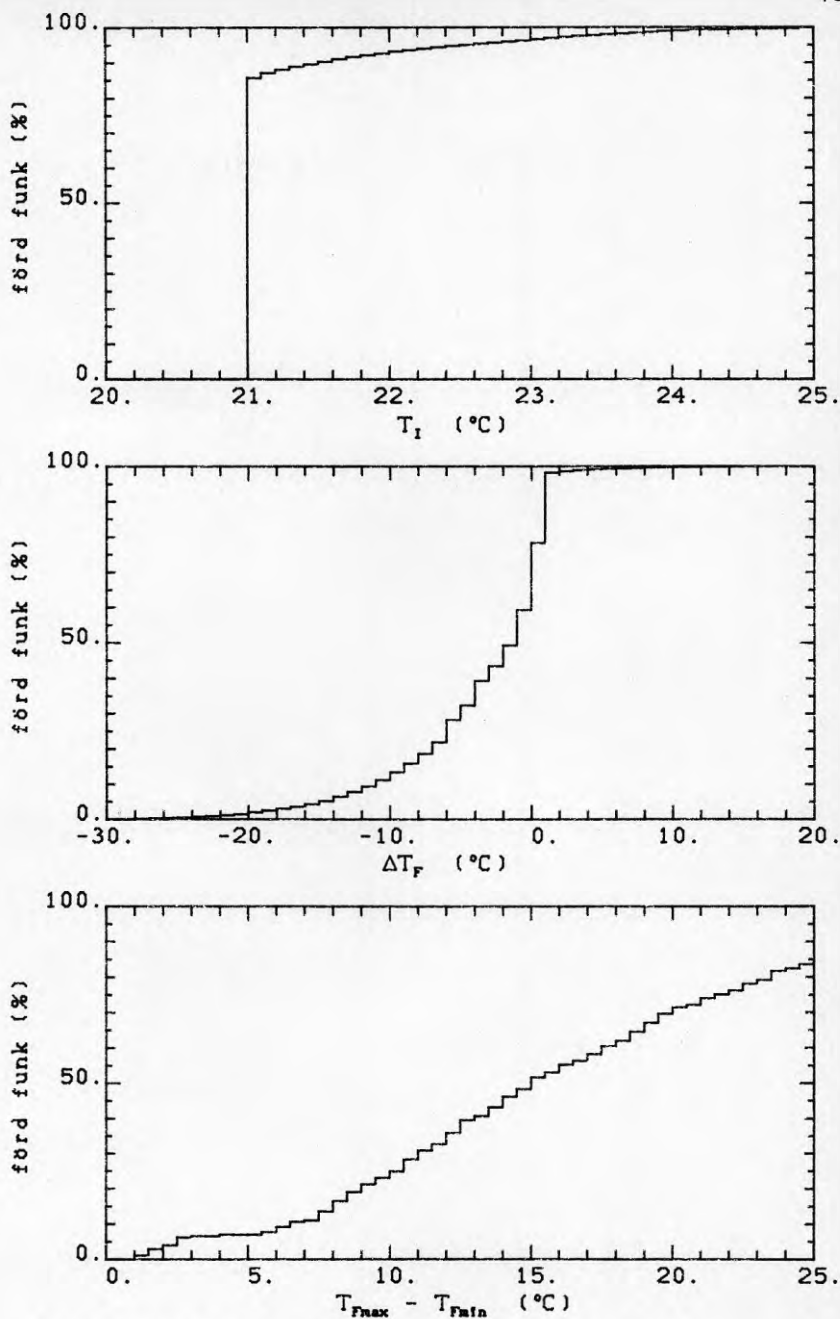


FIG.3.16c Fördelningsfunktionen beräknad för hela eldningssäsongen för innetemperaturen, regulatorns utsignal och den dagliga variationsbredden i framledningstemperaturen.
Reglersätt: optimal reglering

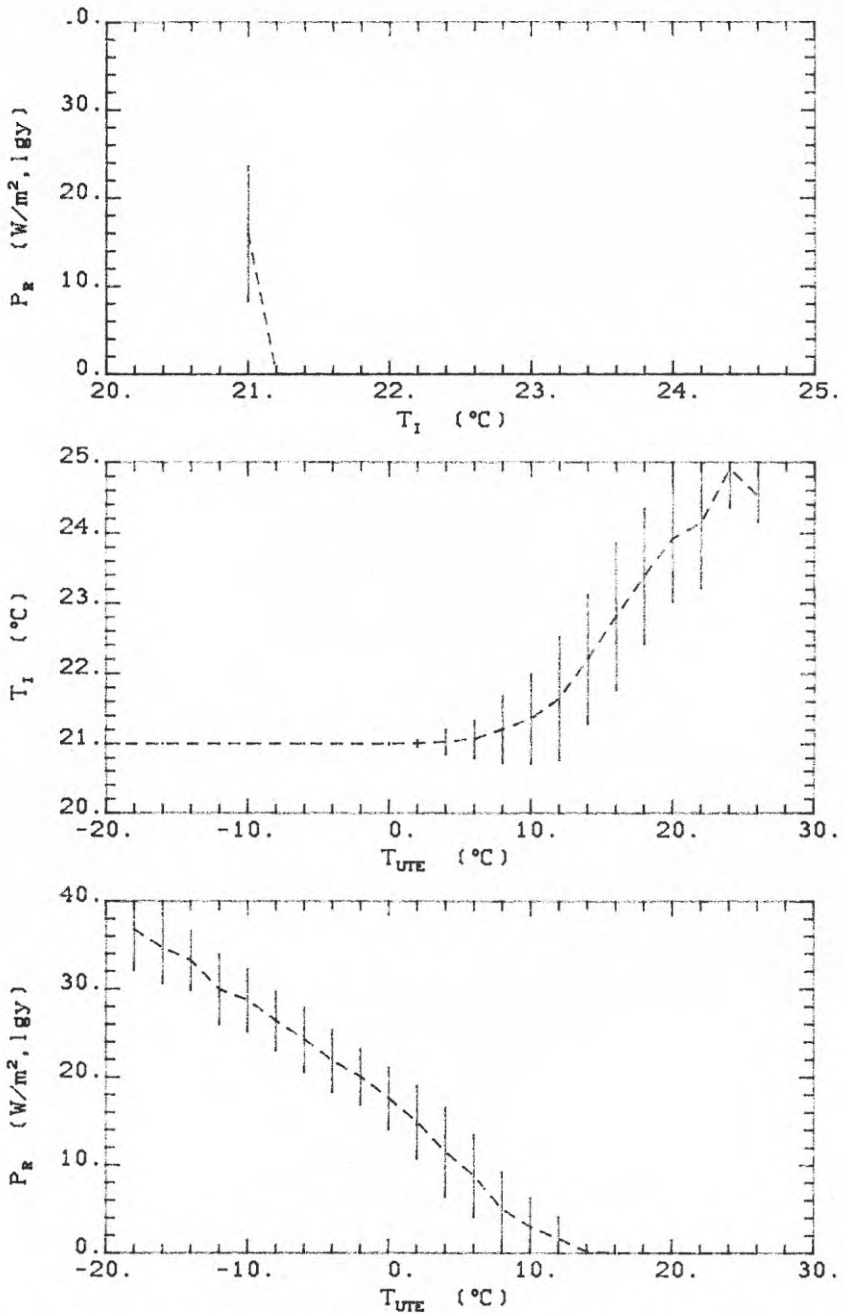


FIG.3.16d Radiatoreffekten som funktion av innetemperaturen, innetemperaturen som funktion av utetemperaturen och radiatoreffekten som funktion av utetemperaturen. Reglersätt: optimal reglering

Återkoppling med P-regulator

Vi ska i denna simulering komplettera den rena framkopplingen med en återkoppling från innetemperaturen i form av en proportionell regulator. Regulatorförstärkningen är vald till $k_p=20$. Börvärdet är som förut 21 °C. Sammanställning och diagram redovisas i TAB.3.13 och FIG.3.17a-d.

Det genomsnittliga gratisvärmeutnyttjandet under eldnings säsongen blir 87.8% mot förväntade 93.3% (beräknade med hjälp av (3.43) respektive (2.21)). Tillförd energimängd minskar med 8.2 kWh/m², lgy eller med 8.2% jämfört med fallet med framkoppling. Detta är knappt 90% av sänkningen med den optimala regulatorn.

Vinsten i energiförbrukningen ökar som synes kraftigt mot sommaren från blygsamma 1-3% under vintermånaderna till drygt 50% under maj. Detta återspeglar återigen solinstrålningens fördelning under året. Uttryckt i absoluta tal är vinsten för de olika månaderna följande (enhet kWh/m², lgy)

| | | | | | | | | | | |
|-----|-----|------|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|
| jan | feb | mars | apr | maj | juni | juli | sep | okt | nov | dec |
| 0.2 | 0.4 | 1.0 | 1.8 | 2.1 | - | - | 1.4 | 0.8 | 0.3 | 0.2 |

Man kan också lägga märke till att energibehovet, liksom för den optimala regulatorn, omfördelas under dygnet. Med återkoppling så utnyttjas en större andel av gratisvärmen direkt medan den utnyttjas under en längre tid vid framkoppling. För april t ex visar siffrorna att energiåtgången minskar 30.6% under dagtid kl 07-22 och 17.5% i genomsnitt under hela dygnet. Detta betyder att energiförbrukningen under natten (kl 23-06) ökat med 8.7% jämfört med ren framkoppling!

Regulatorförstärkningen är inte högre än att innetemperaturen varierar en del under dygnet. Variationen har minskat till ca hälften jämfört med ren framkoppling. Den stora skillnaden är istället att regulatorn kan reglera bort störningen. Regleringreppen är inte så kraftiga att innetemperaturen återgår till önskade 21 °C direkt men väl under följande natt. Med den proportionella regulatorn så ligger innetemperaturen mellan 21 och 21.5 °C 85% av tiden. De återstående 15% av tiden när innetemperaturen är högre kan inte

påverkas.

Korsdiagrammen visar att värmeförseln stängs av vid innetemperaturen över 22 °C och uttemperaturen över 14 °C.

TAB.3.13 Sammanställning av några viktigare variabler för varje månad.

Reglersätt: proportionell reglering med $k_p=20$

simu 2 PI-reg $K_p=20.00$ $T_{int}=.00$ $T_{smp}=1.00$

Hela dygnet:

| Månad | ENERGI kWh/m**2 | vinst % | Tinne C | +std C | Timin C | Timax C | Tfram C | /vbd/ C | Ureg C | /vbd/ C |
|-------|--------------------|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|
| jan | 15.31 | 1.3 | 21.03 | .08 | 20.95 | 21.40 | 49.1 | 9.9 | -7.7 | 4.9 |
| feb | 13.76 | 3.1 | 21.07 | .11 | 20.96 | 21.49 | 49.0 | 11.6 | -1.4 | 6.3 |
| mars | 15.00 | 6.0 | 21.14 | .16 | 20.97 | 21.75 | 48.6 | 14.8 | -2.8 | 8.5 |
| apr | 8.64 | 17.5 | 21.29 | .27 | 20.97 | 22.23 | 37.7 | 20.7 | -5.8 | 13.1 |
| maj | 1.96 | 51.7 | 22.61 | 1.16 | 21.02 | 26.05 | 26.2 | 9.4 | -11.4 | 16.2 |
| juni | .00 | .0 | 24.55 | 1.37 | 22.02 | 28.01 | 24.6 | .0 | .0 | .0 |
| juli | .00 | .0 | 26.53 | 2.18 | 22.43 | 31.31 | 26.5 | .0 | .0 | .0 |
| aug | .00 | .0 | 25.12 | 1.68 | 21.31 | 28.88 | 25.1 | .0 | .0 | .0 |
| sep | 3.49 | 28.7 | 21.44 | .45 | 20.98 | 22.96 | 28.1 | 13.3 | -6.7 | 11.5 |
| okt | 7.49 | 9.9 | 21.14 | .15 | 20.96 | 21.81 | 34.9 | 15.1 | -2.7 | 8.6 |
| nov | 13.02 | 2.5 | 21.06 | .09 | 20.96 | 21.40 | 45.7 | 11.1 | -1.2 | 5.6 |
| dec | 13.80 | 1.2 | 21.02 | .06 | 20.95 | 21.24 | 46.3 | 9.6 | -5.5 | 4.4 |
| elds | 92.47 | 8.2 | 21.31 | .00 | 20.95 | 26.05 | 40.6 | 12.8 | -3.7 | 8.8 |

Endast dagtid:

| Månad | ENERGI kWh/m**2 | vinst % | Tinne C | +std C | Timin C | Timax C | Tfram C | /vbd/ C | Ureg C | /vbd/ C |
|-------|--------------------|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|
| jan | 9.90 | 3.4 | 21.06 | .08 | 20.97 | 21.40 | 48.3 | 8.3 | -1.2 | 4.6 |
| feb | 8.79 | 6.1 | 21.11 | .11 | 20.96 | 21.49 | 47.9 | 10.4 | -2.2 | 6.0 |
| mars | 9.16 | 10.6 | 21.20 | .16 | 20.99 | 21.75 | 46.4 | 13.5 | -4.1 | 7.9 |
| apr | 4.34 | 30.6 | 21.40 | .26 | 21.00 | 22.23 | 33.7 | 16.7 | -7.9 | 11.5 |
| maj | .64 | 64.0 | 22.91 | 1.18 | 21.04 | 26.05 | 24.7 | 5.2 | -10.9 | 12.8 |
| juni | .00 | .0 | 24.88 | 1.34 | 22.06 | 28.01 | 24.9 | .0 | .0 | .0 |
| juli | .00 | .0 | 26.86 | 2.18 | 23.34 | 31.31 | 26.9 | .0 | .0 | .0 |
| aug | .00 | .0 | 25.38 | 1.68 | 21.48 | 28.88 | 25.4 | .0 | .0 | .0 |
| sep | 1.42 | 45.4 | 21.58 | .47 | 21.01 | 22.96 | 25.6 | 9.5 | -8.5 | 9.3 |
| okt | 4.17 | 18.5 | 21.20 | .15 | 20.99 | 21.81 | 32.7 | 13.3 | -3.9 | 8.1 |
| nov | 8.29 | 5.3 | 21.09 | .09 | 20.97 | 21.40 | 44.7 | 9.5 | -1.9 | 5.2 |
| dec | 8.91 | 3.1 | 21.05 | .06 | 20.97 | 21.24 | 45.6 | 7.8 | -1.0 | 4.1 |
| elds | 55.64 | 12.5 | 21.40 | .00 | 20.96 | 26.05 | 38.8 | 10.4 | -4.6 | 7.7 |

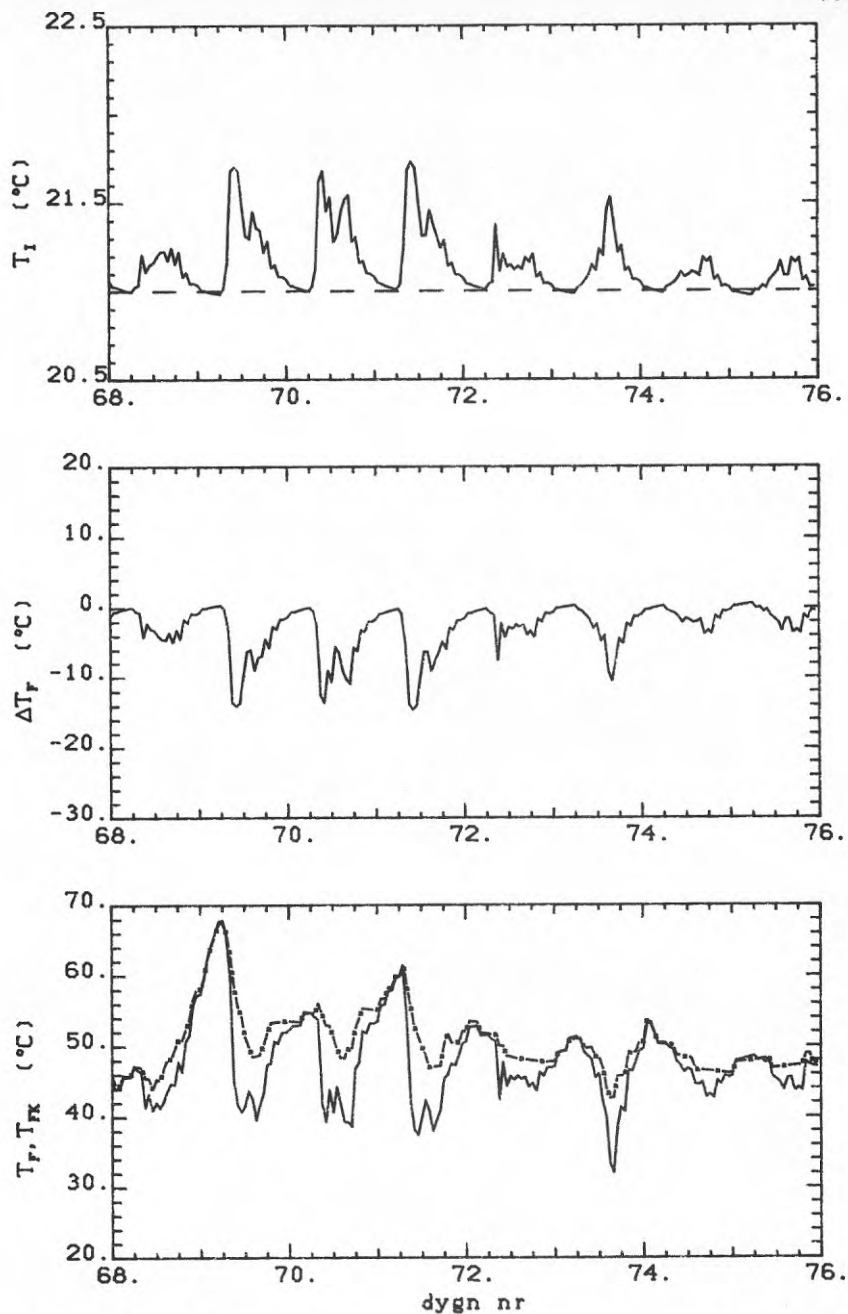


FIG.3.17a Temperaturförloppet under åtta dygn i mars (dygn 68-75) för innetemperaturen, regulatorns utsignal och underst framledningstemperaturen och framledningstemperatur enligt framkopplingskurvan (prickad linje).
Reglersätt: proportionell reglering med $k_p=20$

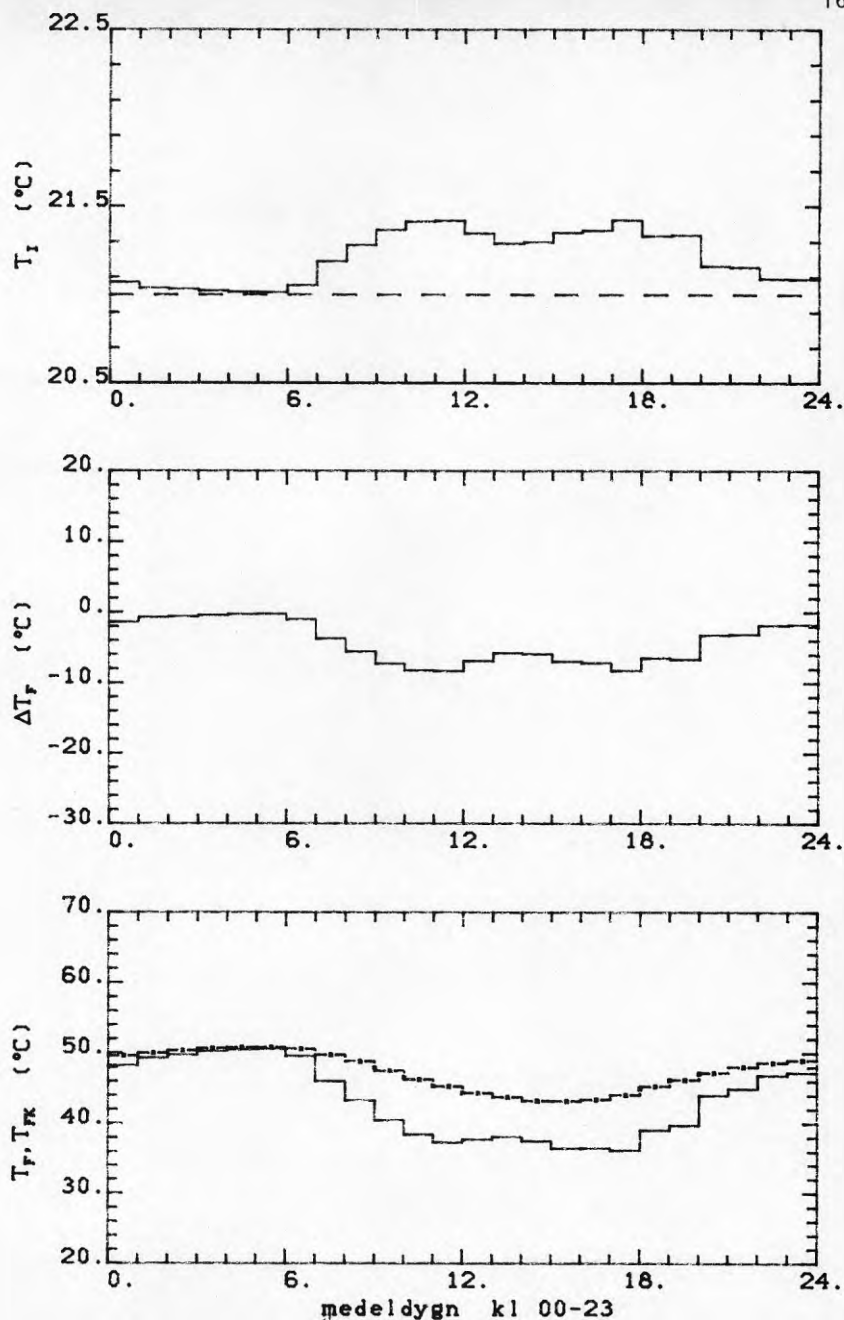


FIG.3.17b Medeldygn för mars och april för innetemperaturen, regulatorns utsignal och underst framledningstemperaturen och framledningstemperatur enligt framkopplingskurvan (prickad linje).

Reglersätt: proportionell reglering med $k_p=20$

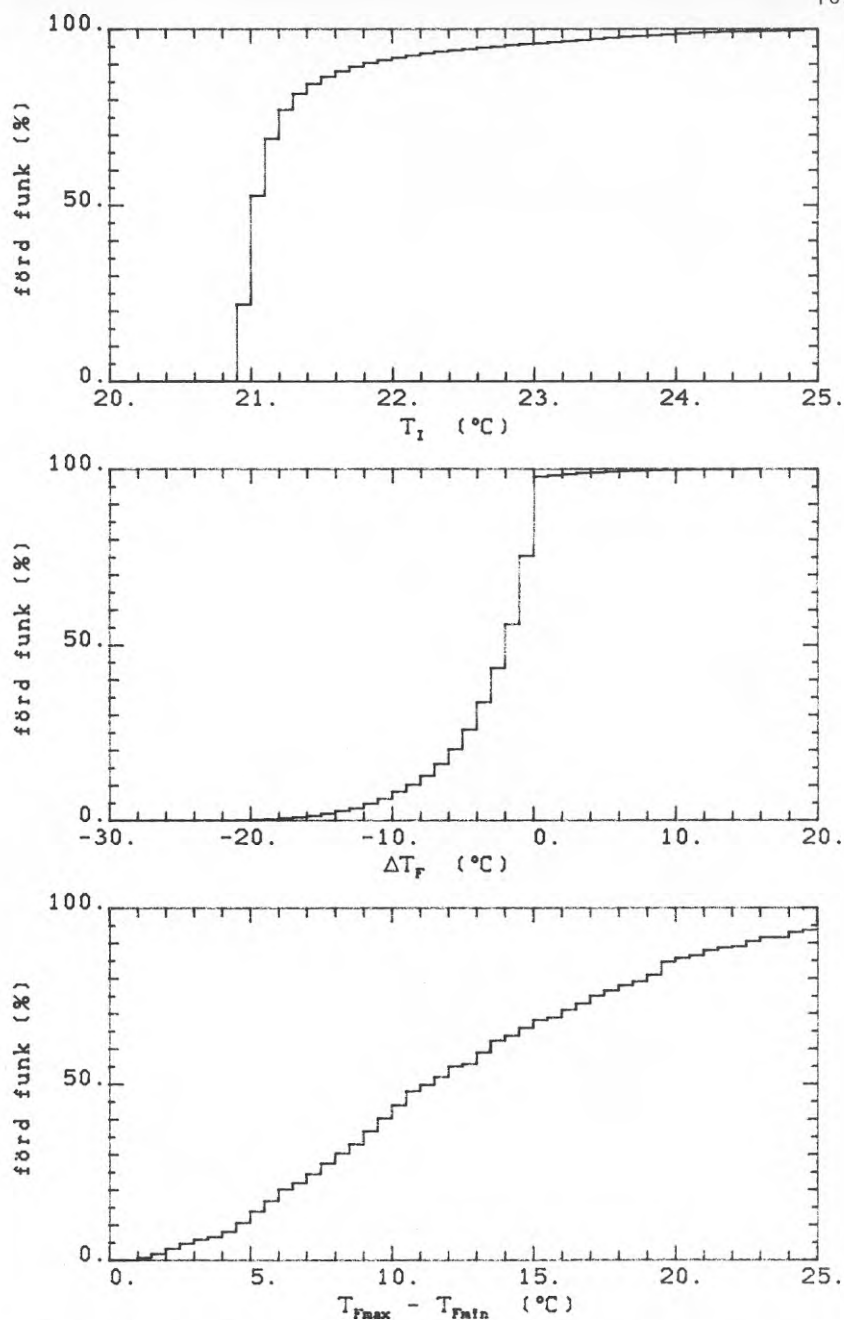


FIG.3.17c Fördelningsfunktionen beräknad för hela eldnings säsongen för innetemperaturen, regulatorns utsignal och den dagliga variationsbredden i framledningstemperaturen. Reglersätt: proportionell reglering med $k_p=20$

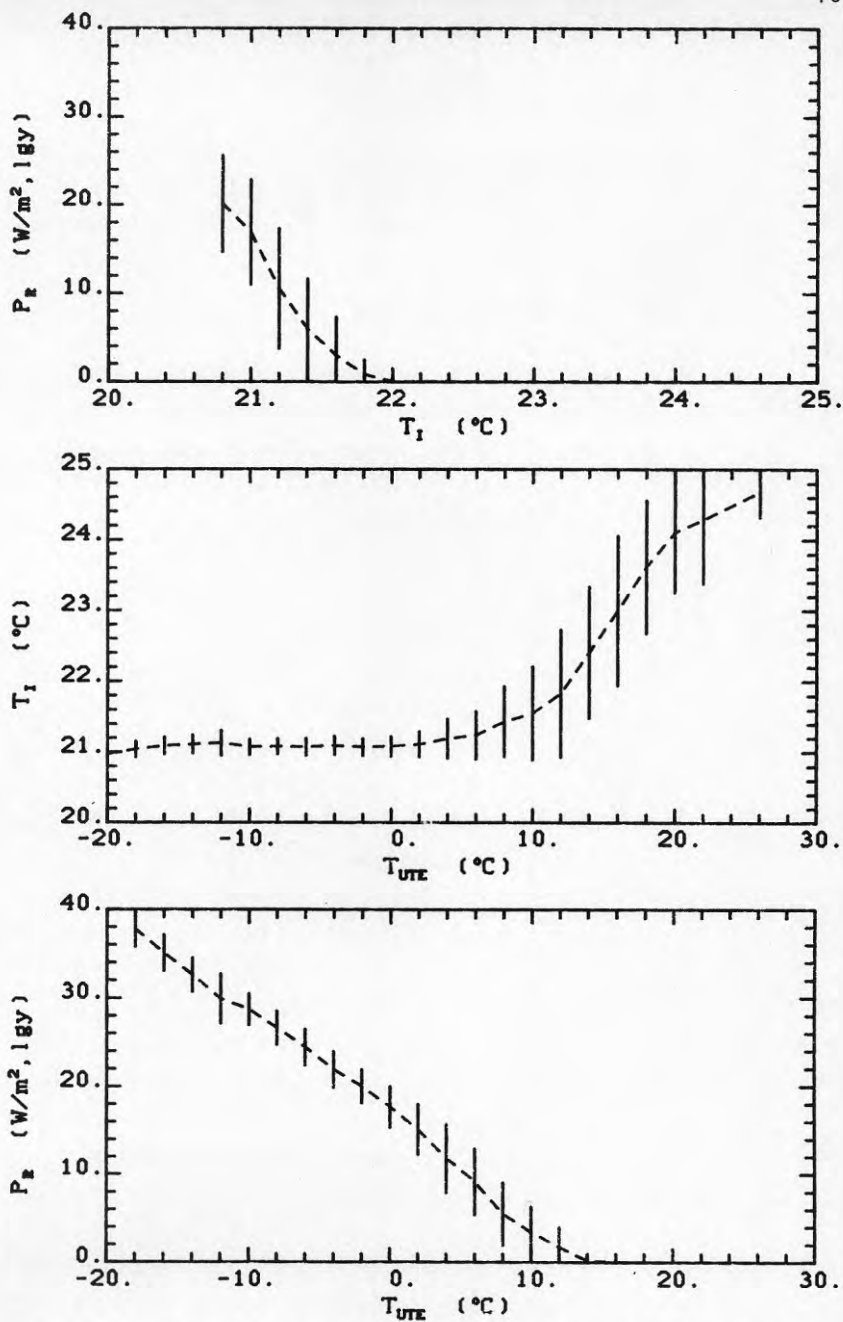


FIG.3.17d Radiatoreffekten som funktion av innetemperaturen, innetemperaturen som funktion av utetemperaturen och radiatoreffekten som funktion av utetemperaturen.

Reglersätt: proportionell reglering med $k_p=20$

Återkoppling med PI-regulator

I denna simulering byts P-regulatorn mot en PI-regulator. Regulatorförstärkningen är 40 och integraltiden 0.555 timmar. Dessa regulatorparametrar är desamma som använts i försökshuset i kv Teknikern (RoS kapitel 7). Sammanställning och diagram redovisas i TAB.3.14 och FIG.3.18a-d.

Det genomsnittliga gratisvärmeutnyttjandet under eldningssäsongen blir 92% mot förväntade 100%. Tillförd energimängd minskar med 8.9 kWh/m², lgy eller med 8.9%. Frågan är dock om det inte är rimligt att korrigera dessa siffror med hänsyn till att PI-regulatorn inte är lika bra som den optimala regulatorn och P-regulatorn kan hålla innetemperaturen på 21 °C. I ca 1% av tiden ligger den mellan 20.8 och 20.9 °C. Om börvärdet därför hade höjts med 0.1 °C till 21.1 °C så hade energibehovet höjts något (0.72 kWh/m²) och då hade energivinsten och lägsta innetemperaturen blivit likvärdigt med det som gällde för P-regulatorn i förra simuleringen.

Förutom att börvärdet underskrids lite för mycket och lite för ofta, så är PI-regulatorns uppträdande mycket nära den optimala regulatorns. Att innetemperaturen varierar lite kring sitt börvärde och att regulatorns utsignal är något större är naturligt eftersom störningarna måste slå igenom innan regulatorn kan kompensera för dem.

Av det goda resultatet kan vi dra slutsatsen att det knappast finns något att vinna på att använda en mer avancerad typ av regulator än PI-regulatorn om syftet är att hålla temperaturavvikelserna så små som möjligt. Att t ex försöka mäta eller prediktera störningarna är därför knappast meningsfullt.

Det bör också påpekas att det aktuella parametervalet inte är optimalt för att passa vår simuleringsmodell. Snarare är det valt för att just dessa regulatorparametrar har använts i praktisk reglering och att de givit tillräckligt noggrann reglering, simulerat och i verkligheten. Det är därför relativt lätt att förbättra det här angivna parametervalet. Simuleringar visar att även en komplettering med en deriverande regulator ger klara förbättringar. Ett skäl till att inte arbeta vidare med detta och finna de bästa regulator-

parametrarna är att man i verkligheten sällan känner de verkliga modellparametrarna, vilket krävs för att bestämma de bästa regulatorparametrarna.

TAB.3.14 Sammanställning av några viktigare variabler för varje månad.

Reglersätt: PI-regulator med $k_p=40$ och $T_{int}=0.555$ h

simu 4 PI-reg Kp= 40.00 Tint= .56 Teamp= .17

Hela dygnet:

| Månad | ENERGI kWh/m**2 | vinst % | Tinne C | +std C | Timin C | Timax C | Tfram C | /vbd/ C | Ureg C | /vbd/ C |
|-------|--------------------|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|
| jan | 15.28 | 1.5 | 21.00 | .02 | 20.94 | 21.09 | 49.0 | 14.3 | -7 | 9.1 |
| feb | 13.70 | 3.5 | 21.00 | .02 | 20.90 | 21.11 | 48.8 | 17.3 | -1.6 | 11.8 |
| mars | 14.88 | 6.8 | 21.00 | .03 | 20.91 | 21.17 | 48.3 | 22.1 | -3.2 | 16.0 |
| apr | 8.52 | 18.7 | 21.05 | .16 | 20.83 | 22.07 | 37.2 | 26.2 | -7.6 | 25.5 |
| maj | 1.82 | 55.0 | 22.37 | 1.21 | 20.85 | 25.92 | 25.7 | 10.5 | -13.1 | 21.1 |
| juni | .00 | .0 | 24.52 | 1.35 | 22.01 | 27.94 | 24.5 | .0 | .0 | .0 |
| juli | .00 | .0 | 26.53 | 2.19 | 22.42 | 31.32 | 26.5 | .0 | .0 | .0 |
| aug | .00 | .0 | 25.12 | 1.69 | 21.31 | 28.89 | 25.1 | .0 | .0 | .0 |
| sep | 3.44 | 29.7 | 21.27 | .43 | 20.85 | 22.91 | 27.8 | 15.3 | -8.8 | 19.4 |
| okt | 7.41 | 10.8 | 21.01 | .08 | 20.86 | 21.73 | 34.6 | 20.7 | -3.5 | 17.4 |
| nov | 12.98 | 2.7 | 21.00 | .02 | 20.89 | 21.12 | 45.6 | 16.0 | -1.3 | 10.9 |
| dec | 13.78 | 1.3 | 21.00 | .01 | 20.96 | 21.07 | 46.2 | 13.1 | -6 | 8.1 |
| elds | 91.82 | 8.8 | 21.19 | .00 | 20.83 | 25.92 | 40.3 | 17.2 | -4.5 | 15.5 |

Endast dagtid:

| Månad | ENERGI kWh/m**2 | vinst % | Tinne C | +std C | Timin C | Timax C | Tfram C | /vbd/ C | Ureg C | /vbd/ C |
|-------|--------------------|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|
| jan | 9.68 | 5.6 | 21.00 | .02 | 20.94 | 21.09 | 47.6 | 12.1 | -1.9 | 8.4 |
| feb | 8.51 | 9.1 | 21.00 | .02 | 20.90 | 21.11 | 46.9 | 15.7 | -3.2 | 11.1 |
| mars | 8.71 | 15.0 | 21.00 | .04 | 20.91 | 21.17 | 44.9 | 19.2 | -5.5 | 15.3 |
| apr | 3.82 | 38.9 | 21.07 | .19 | 20.83 | 22.07 | 31.9 | 22.4 | -11.7 | 24.7 |
| maj | .53 | 70.5 | 22.66 | 1.25 | 20.85 | 25.92 | 24.1 | 5.5 | -12.5 | 15.6 |
| juni | .00 | .0 | 24.86 | 1.32 | 22.04 | 27.94 | 24.9 | .0 | .0 | .0 |
| juli | .00 | .0 | 26.86 | 2.18 | 23.33 | 31.32 | 26.9 | .0 | .0 | .0 |
| aug | .00 | .0 | 25.38 | 1.68 | 21.47 | 28.89 | 25.4 | .0 | .0 | .0 |
| sep | 1.21 | 53.6 | 21.38 | .48 | 20.85 | 22.91 | 24.8 | 9.8 | -11.3 | 16.2 |
| okt | 3.81 | 25.7 | 21.02 | .10 | 20.86 | 21.73 | 31.5 | 17.1 | -5.9 | 16.5 |
| nov | 8.04 | 8.2 | 21.00 | .02 | 20.89 | 21.12 | 43.9 | 14.1 | -2.7 | 10.2 |
| dec | 8.71 | 5.3 | 21.00 | .02 | 20.96 | 21.07 | 45.0 | 11.1 | -1.6 | 7.3 |
| elds | 53.02 | 16.6 | 21.24 | .00 | 20.83 | 25.92 | 37.8 | 14.1 | -6.3 | 13.9 |

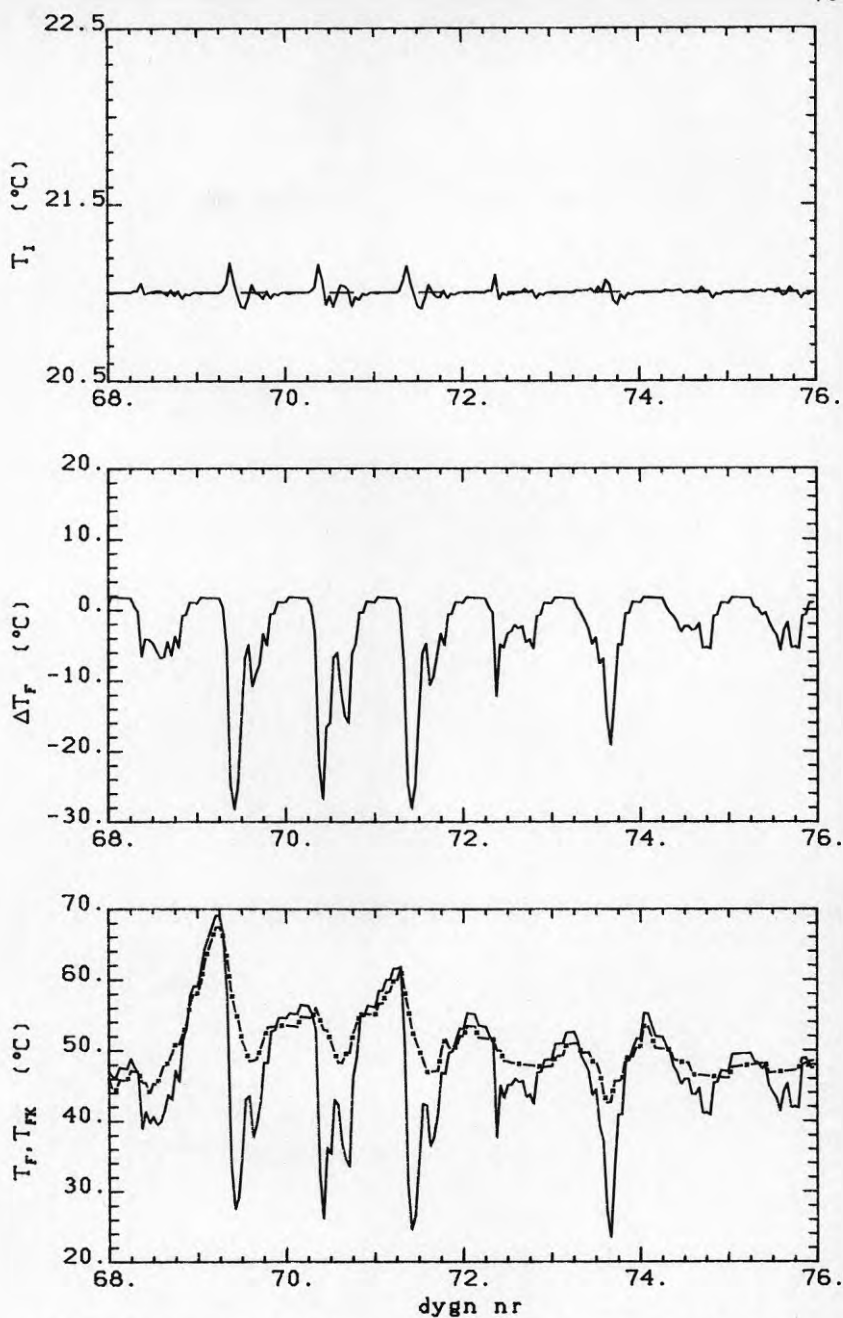


FIG.3.18a Temperaturförloppet under åtta dygn i mars (dygn 68-75) för innetemperaturen, regulatorns utsignal och underst framledningstemperaturen och framledningstemperatur enligt framkopplingskurvan (prickad linje).

Reglersätt: PI-regulator med $k_p=40$, $T_{int}=0.555$ h

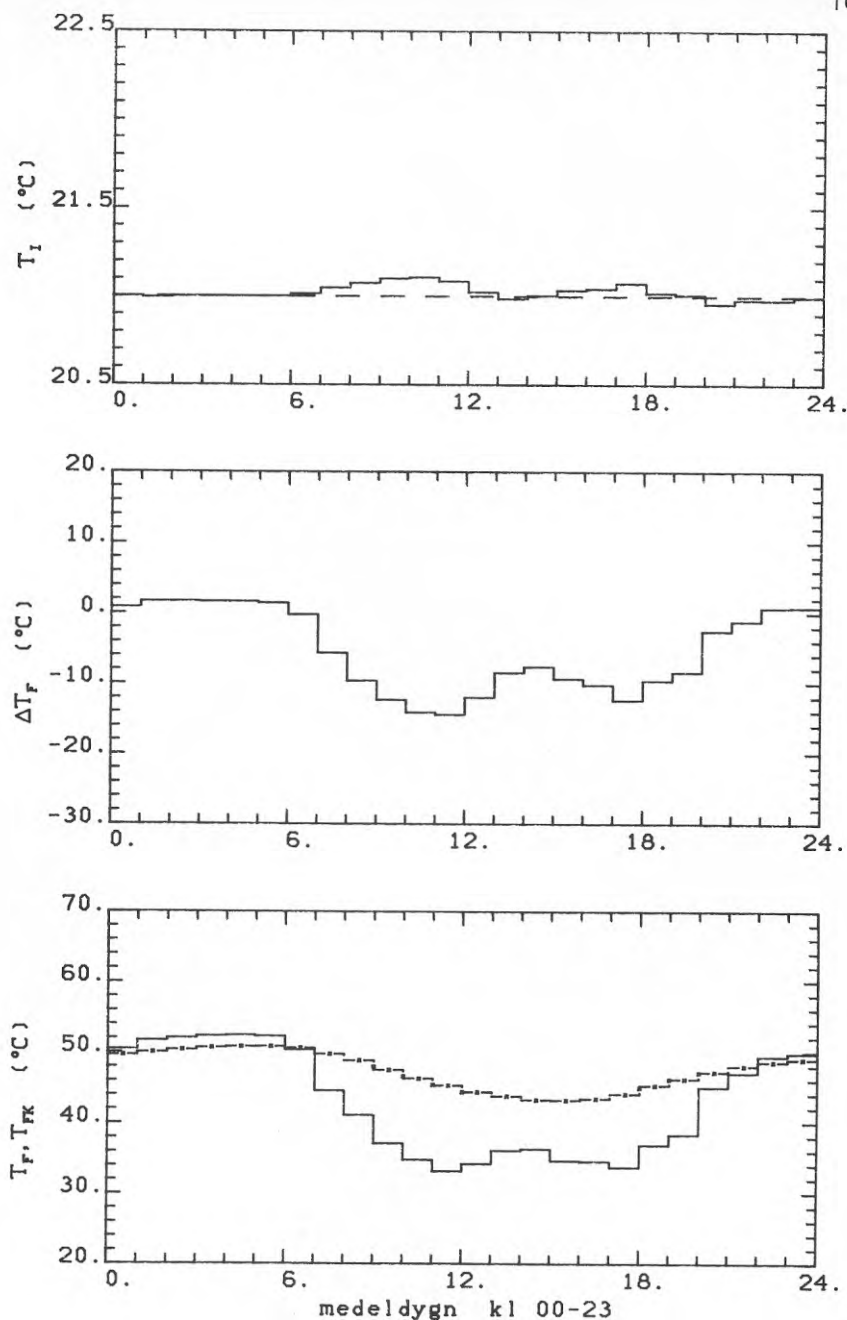


FIG.3.18b Medeldygn för mars och april för innetemperaturen, regulatorns utsignal och underst framledningstemperaturen och framledningstemperatur enligt framkopplingskurvan (prickad linje).

Reglersätt: PI-regulator med $k_p=40$, $T_{int}=0.555$ h

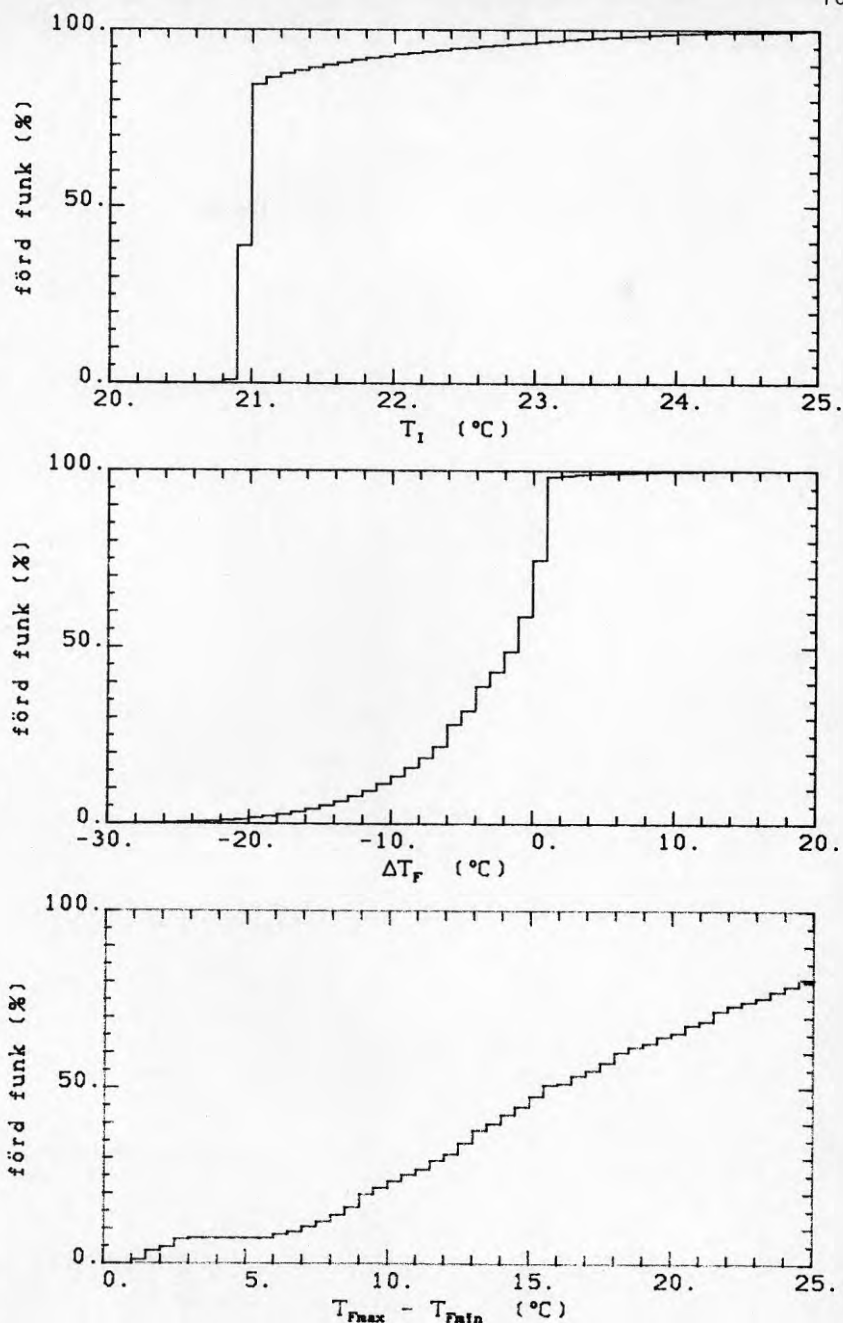


FIG.3.18c Fördelningsfunktionen beräknad för hela eldningssäsongen för innetemperaturen, regulatorns utsignal och den dagliga variationsbredden i framledningstemperaturen. Reglersätt: PI-regulator med $k_p=40$, $T_{int}=0.555$ h

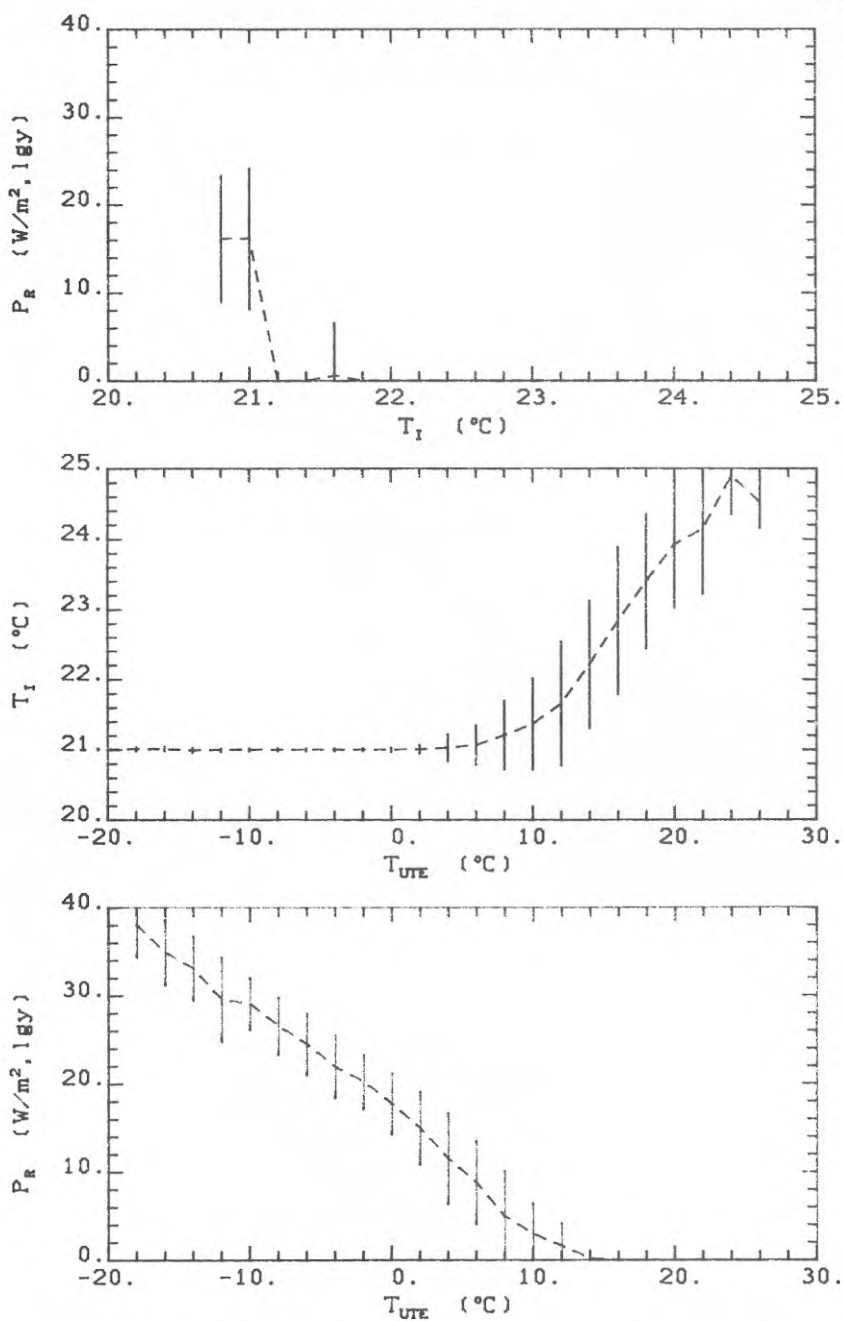


FIG.3.18d Radiatoreffekten som funktion av innetemperaturen, innetemperaturen som funktion av utetemperaturen och radiatoreffekten som funktion av utetemperaturen. Reglersätt: PI-regulator med $k_p=40$, $T_{int}=0,555$ h

Fel framkopplingskurva

I de hittills presenterade simuleringarna så har korrekt framkopplingskurva använts. Därmed har variationen i utetemperaturen inte bidragit till att störa regleringen av innetemperaturen, utan hela störningen har orsakats av solinstrålningen och den interna värme-lasten. De två senare är exempel på snabba störningar.

I detta avsnitt ska vi istället simulera den långsammare störningen som utetemperaturen orsakar när felaktig framkopplingskurva används. För att renodla simuleringen så sätts solinstrålningen till noll och det interna värmebehovet sätts konstant lika med sitt tidigare medelvärde.

Framkopplingskurvan enligt (3.28) ersätts nu med

$$T_{\text{ffk}} = 48.3 - 1.15T_u \quad (3.44)$$

Denna kurva ger oförändrad framledningstemperatur vid $T_u = 0$ °C, för låg framledningstemperatur för $T_u < 0$ °C och för hög framledningstemperatur för $T_u > 0$ °C. Det stationära felet i innetemperaturen som uppstår vid olika konstanta utemperaturer om återkoppling ej används framgår av följande tabell.

TAB.3.15 Skillnad i framkopplingskurva och därav följande felaktig innetemperatur vid användning av framkopplingskurvan (3.44) vid några konstanta utemperaturer. Reglering utan återkoppling.

| T_u (°C) | T_{ffk} (°C) | T_i (°C) | $T_i - T_{\text{iref}}$ (°C) |
|---------------|--------------------------|---------------|---------------------------------|
| 20 | 7.0 | 23.8 | 2.8 |
| 10 | 3.5 | 22.4 | 1.4 |
| 0 | 0 | 21.0 | 0 |
| -10 | -3.5 | 19.6 | -1.4 |
| -20 | -7.0 | 17.2 | -2.8 |

Simuleringarna för ren framkoppling, P-regulator med $k_p=20$ och PI-reglering med $k_p=40$, $T_{int}=0.56$ h redovisas i sammanställningarna i TAB.3.16-3.18. Motsvarande diagramlistor redovisas ej. Ett par kommentarer är att på grund av modellens tröghet så hinner inte så stora avvikelser i innetemperaturen uppträda som tabellen ovan anger. Den lägsta medeltemperaturen ute under ett dygn är t ex -15 °C den 6 januari, vilket skulle ge en stationär innetemperatur på 17.9 °C medan den simulerade innetemperaturen som lägst blir 19.7 °C. De låga värdena på T_{min} i september kan man bortse ifrån eftersom de inträffar den 1 september kl 00 respektive kl 07 och beror på att värmesystemet som just kopplats in inte hunnit värma upp byggnaden ännu.

I detta reglerfall kommer PI-regulatorerna fullt till sin rätt. Inverkan av den varierande utetemperaturen är så pass långsam att den integrerande delen praktiskt taget hinner kompensera den felaktiga framkopplingskurvan fullt ut till rätt framkopplingskurva. Detta syns också på energiförbrukningen som blir 107.3 kWh/m², lgy dvs nästan samma som förväntat 106.9 kWh/m², lgy enligt TAB.3.5b (bruttoförbrukning - intern värme). Att T_{min} blir något låg i maj beror på att integratoruppvidningen slår igenom här efter en period med hög utetemperatur. Förutom detta så ger PI-regulatorn nästan precis samma resultat som den (ej redovisade) optimala regulatorn i detta reglerfall.

För P-regulatorn så kompenseras i stationärt tillstånd ca 89% (= relativa gratisvärmeutnyttjandet enligt FIG.2.1b) av den felaktiga framkopplingskurvan. Resten slår igenom som en störning på innetemperaturen. Av TAB.3.18 framgår dock att störningen inte reduceras så mycket som till 11% utan snarare till mellan 15-25% av storleken vid enbart framkoppling. Skillnaden beror på att det återkopplade systemet reagerar snabbare (har kortare tidskonstanter) än det ej återkopplade systemet. Reduktionen av störningen till 11% stämmer däremot bättre med TAB.3.15.

En annan slutsats av dessa simuleringar är att eftersom utetemperaturen varierar långsamt så bidrar en felaktig framkopplingskurva endast lite till att öka den dagliga variationsbredden i framledningstemperaturen (vbd).

TAB.3.16 Sammanställning av några viktigare variabler för varje månad. Simulerat utan solinstrålning och med konstant inre värmebelastning.

Reglersätt: framkoppling med framkopplingskurva enligt (3.44)

simu 21 Framkoppl. K= -1.15 L= 48.34 T_{amp}= 1.00

Hela dygnet:

| Månad | ENERGI kWh/m**2 | vinet % | Tinne C | +std C | Timin C | Timax C | Tfram C | /vbd/ C | Ureg C | Tfk C |
|-------|--------------------|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|-----------|----------|
| jan | 15.55 | .0 | 20.87 | .35 | 19.87 | 21.40 | 49.4 | 5.6 | .0 | 49.4 |
| feb | 14.32 | .0 | 20.87 | .25 | 20.19 | 21.18 | 49.9 | 6.0 | .0 | 49.9 |
| mars | 16.42 | .0 | 20.63 | .41 | 19.69 | 21.16 | 50.7 | 6.7 | .0 | 50.7 |
| apr | 12.11 | .0 | 21.44 | .22 | 21.03 | 22.02 | 44.4 | 8.9 | .0 | 44.4 |
| maj | 6.98 | .0 | 22.44 | .46 | 21.30 | 23.40 | 35.2 | 11.8 | .0 | 35.2 |
| juni | .00 | .0 | 18.49 | 2.03 | 15.84 | 23.46 | 18.5 | .0 | .0 | 31.2 |
| juli | .00 | .0 | 20.07 | 1.44 | 17.38 | 22.74 | 20.1 | .0 | .0 | 27.9 |
| aug | .00 | .0 | 19.89 | 1.35 | 17.30 | 22.55 | 19.9 | .0 | .0 | 29.4 |
| sep | 7.41 | .0 | 21.97 | .87 | 17.35 | 22.68 | 36.0 | 8.9 | .0 | 36.0 |
| okt | 9.74 | .0 | 22.08 | .26 | 21.64 | 22.57 | 39.9 | 7.6 | .0 | 39.9 |
| nov | 13.74 | .0 | 21.20 | .45 | 20.41 | 22.15 | 47.2 | 6.5 | .0 | 47.2 |
| dec | 14.18 | .0 | 21.18 | .21 | 20.68 | 21.59 | 47.2 | 6.0 | .0 | 47.2 |
| elde | 110.45 | .0 | 21.41 | .00 | 17.35 | 23.40 | 44.4 | 7.6 | .0 | 44.4 |

Endast dagtid:

| Månad | ENERGI kWh/m**2 | vinet % | Tinne C | +std C | Timin C | Timax C | Tfram C | /vbd/ C | Ureg C | Tfk C |
|-------|--------------------|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|-----------|----------|
| jan | 10.31 | .0 | 20.88 | .34 | 19.87 | 21.40 | 49.2 | 4.0 | .0 | 49.2 |
| feb | 9.46 | .0 | 20.87 | .25 | 20.20 | 21.18 | 49.7 | 4.6 | .0 | 49.7 |
| mars | 10.68 | .0 | 20.64 | .41 | 19.69 | 21.16 | 50.0 | 5.8 | .0 | 50.0 |
| apr | 7.55 | .0 | 21.46 | .22 | 21.06 | 22.02 | 42.9 | 7.1 | .0 | 42.9 |
| maj | 3.82 | .0 | 22.47 | .46 | 21.32 | 23.40 | 33.0 | 8.5 | .0 | 32.8 |
| juni | .00 | .0 | 18.56 | 2.01 | 15.99 | 23.46 | 18.6 | .0 | .0 | 29.2 |
| juli | .00 | .0 | 20.15 | 1.44 | 17.43 | 22.74 | 20.1 | .0 | .0 | 26.1 |
| aug | .00 | .0 | 19.93 | 1.36 | 17.31 | 22.55 | 19.9 | .0 | .0 | 27.8 |
| sep | 4.46 | .0 | 22.00 | .81 | 18.44 | 22.68 | 34.7 | 7.1 | .0 | 34.7 |
| okt | 6.20 | .0 | 22.09 | .26 | 21.64 | 22.57 | 39.1 | 6.3 | .0 | 39.1 |
| nov | 9.07 | .0 | 21.20 | .45 | 20.41 | 22.15 | 47.0 | 4.8 | .0 | 47.0 |
| dec | 9.38 | .0 | 21.18 | .21 | 20.68 | 21.59 | 47.0 | 4.4 | .0 | 47.0 |
| elde | 70.92 | .0 | 21.42 | .00 | 18.44 | 23.40 | 43.6 | 5.9 | .0 | 43.6 |

TAB.3.17 Sammanställning av några viktigare variabler för varje månad. Simulerat utan solinstrålning och med konstant inre värmebelastning.

Reglersätt: proportionell reglering med $k_p=20$,

simu 22 PI-reg Kp= 20.00 Tint= .00 Tsamp= 1.00

Hela dygnet:

| Månad | ENERGI kWh/m**2 | vinst % | Tinne C | +std C | Timin C | Timax C | Tfram C | /vbd/ C | Ureg C | /vbd/ C |
|-------|--------------------|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|
| jan | 15.66 | -.7 | 20.98 | .07 | 20.75 | 21.10 | 49.7 | 6.5 | .3 | 1.1 |
| feb | 14.47 | -1.0 | 20.98 | .06 | 20.81 | 21.07 | 50.3 | 7.0 | .4 | 1.1 |
| mars | 16.61 | -1.2 | 20.97 | .06 | 20.76 | 21.07 | 51.4 | 7.7 | .7 | 1.2 |
| apr | 11.75 | 3.0 | 21.05 | .04 | 20.95 | 21.19 | 43.3 | 10.3 | -1.1 | 1.5 |
| maj | 5.82 | 16.7 | 21.22 | .18 | 21.01 | 22.27 | 31.9 | 12.4 | -4.0 | 3.5 |
| juni | .00 | .0 | 18.23 | 1.74 | 15.79 | 22.51 | 18.2 | .0 | .0 | .0 |
| juli | .00 | .0 | 20.06 | 1.44 | 17.38 | 22.74 | 20.1 | .0 | .0 | .0 |
| aug | .00 | .0 | 19.89 | 1.35 | 17.30 | 22.55 | 19.9 | .0 | .0 | .0 |
| sep | 6.56 | 11.5 | 21.12 | .21 | 17.35 | 21.25 | 33.5 | 11.9 | -2.5 | 3.5 |
| okt | 9.02 | 7.4 | 21.11 | .05 | 20.95 | 21.25 | 37.6 | 8.8 | -2.3 | 1.4 |
| nov | 13.67 | .5 | 21.02 | .07 | 20.80 | 21.19 | 46.9 | 7.6 | -.3 | 1.3 |
| dec | 14.08 | .7 | 21.02 | .05 | 20.90 | 21.12 | 46.8 | 6.9 | -.3 | 1.1 |
| elde | 107.62 | 2.6 | 21.05 | .13 | 17.35 | 22.27 | 43.5 | 8.8 | -1.0 | 1.8 |

Endast dagtid:

| Månad | ENERGI kWh/m**2 | vinst % | Tinne C | +std C | Timin C | Timax C | Tfram C | /vbd/ C | Ureg C | /vbd/ C |
|-------|--------------------|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|
| jan | 10.36 | -.5 | 20.99 | .07 | 20.75 | 21.10 | 49.5 | 4.6 | .3 | .8 |
| feb | 9.55 | -1.0 | 20.98 | .06 | 20.81 | 21.07 | 50.1 | 5.3 | .4 | .8 |
| mars | 10.76 | -.8 | 20.97 | .06 | 20.76 | 21.07 | 50.6 | 6.8 | .6 | 1.1 |
| apr | 7.24 | 4.1 | 21.06 | .04 | 20.96 | 21.19 | 41.6 | 8.2 | -1.3 | 1.4 |
| maj | 2.99 | 21.8 | 21.25 | .20 | 21.04 | 22.27 | 29.5 | 8.7 | -4.4 | 3.1 |
| juni | .00 | .0 | 18.30 | 1.73 | 15.94 | 22.51 | 18.3 | .0 | .0 | .0 |
| juli | .00 | .0 | 20.15 | 1.44 | 17.43 | 22.74 | 20.1 | .0 | .0 | .0 |
| aug | .00 | .0 | 19.93 | 1.36 | 17.31 | 22.55 | 19.9 | .0 | .0 | .0 |
| sep | 3.75 | 15.9 | 21.14 | .12 | 20.21 | 21.25 | 31.8 | 8.6 | -2.9 | 1.8 |
| okt | 5.68 | 8.4 | 21.12 | .05 | 20.95 | 21.25 | 36.7 | 7.3 | -2.4 | 1.2 |
| nov | 9.01 | .7 | 21.02 | .07 | 20.80 | 21.18 | 46.6 | 5.5 | -.4 | .9 |
| dec | 9.31 | .8 | 21.02 | .05 | 20.91 | 21.12 | 46.6 | 5.2 | -.4 | .9 |
| elde | 68.65 | 3.2 | 21.06 | .13 | 20.21 | 22.27 | 42.5 | 6.7 | -1.2 | 1.3 |

TAB.3.18 Sammanställning av några viktigare variabler för varje månad. Simulerat utan solinstrålning och med konstant inre värmebelastning.

Reglersätt: PI-regulator med $k_p=40$, $T_{int}=0.555$ h.

simu 24 PI-reg Kp= 40.00 Tint= .56 Ttemp= .17

Hela dygnet:

| Månad | ENERGI kWh/m**2 | vinst % | Tinne C | + -std C | Timin C | Timax C | Tfram C | /vbd/ C | Ureg C | /vbd/ C |
|-------|--------------------|------------|------------|-------------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|
| jan | 15.69 | -.9 | 21.00 | .00 | 20.99 | 21.02 | 49.7 | 7.2 | .3 | 1.7 |
| feb | 14.50 | -1.2 | 21.00 | .00 | 20.99 | 21.01 | 50.4 | 7.9 | .5 | 1.9 |
| mars | 16.62 | -1.2 | 21.00 | .00 | 20.99 | 21.01 | 51.5 | 8.8 | .7 | 2.1 |
| apr | 11.70 | 3.4 | 21.00 | .00 | 20.99 | 21.01 | 43.2 | 11.7 | -1.2 | 2.8 |
| maj | 5.63 | 19.3 | 21.05 | .16 | 20.89 | 22.07 | 31.4 | 13.5 | -5.4 | 7.8 |
| juni | .00 | .0 | 18.18 | 1.69 | 15.77 | 22.34 | 18.2 | .0 | .0 | .0 |
| juli | .00 | .0 | 20.07 | 1.44 | 17.37 | 22.75 | 20.1 | .0 | .0 | .0 |
| aug | .00 | .0 | 19.89 | 1.35 | 17.30 | 22.55 | 19.9 | .0 | .0 | .0 |
| sep | 6.45 | 12.9 | 20.99 | .15 | 17.34 | 21.13 | 33.2 | 13.4 | -2.8 | 4.9 |
| okt | 8.93 | 8.3 | 21.00 | .00 | 20.99 | 21.01 | 37.4 | 10.0 | -2.6 | 2.4 |
| nov | 13.66 | .5 | 21.00 | .00 | 20.99 | 21.01 | 46.9 | 8.4 | -.3 | 2.0 |
| dec | 14.08 | .7 | 21.00 | .00 | 20.99 | 21.01 | 46.8 | 7.8 | -.4 | 1.8 |
| elds | 107.27 | 2.9 | 21.00 | .07 | 17.34 | 22.07 | 43.3 | 9.9 | -1.3 | 3.0 |

Endast dagtid:

| Månad | ENERGI kWh/m**2 | vinst % | Tinne C | + -std C | Timin C | Timax C | Tfram C | /vbd/ C | Ureg C | /vbd/ C |
|-------|--------------------|------------|------------|-------------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|
| jan | 10.36 | -.5 | 21.00 | .00 | 20.99 | 21.01 | 49.5 | 5.2 | .3 | 1.3 |
| feb | 9.56 | -1.0 | 21.00 | .00 | 20.99 | 21.01 | 50.1 | 6.1 | .4 | 1.5 |
| mars | 10.73 | -.5 | 21.00 | .00 | 20.99 | 21.01 | 50.5 | 7.7 | .5 | 1.9 |
| apr | 7.13 | 5.5 | 21.00 | .00 | 20.99 | 21.01 | 41.3 | 9.3 | -1.6 | 2.3 |
| maj | 2.79 | 27.0 | 21.07 | .18 | 20.91 | 22.07 | 28.7 | 9.3 | -6.4 | 6.6 |
| juni | .00 | .0 | 18.25 | 1.68 | 15.93 | 22.34 | 18.3 | .0 | .0 | .0 |
| juli | .00 | .0 | 20.15 | 1.44 | 17.43 | 22.75 | 20.1 | .0 | .0 | .0 |
| aug | .00 | .0 | 19.93 | 1.36 | 17.31 | 22.55 | 19.9 | .0 | .0 | .0 |
| sep | 3.56 | 20.3 | 21.00 | .01 | 20.98 | 21.06 | 31.1 | 9.8 | -3.6 | 2.8 |
| okt | 5.58 | 10.0 | 21.00 | .00 | 20.99 | 21.01 | 36.3 | 8.3 | -2.8 | 2.0 |
| nov | 8.99 | .9 | 21.00 | .00 | 20.99 | 21.01 | 46.5 | 6.3 | -.4 | 1.5 |
| dec | 9.29 | .9 | 21.00 | .00 | 20.99 | 21.01 | 46.6 | 5.8 | -.4 | 1.4 |
| elds | 67.99 | 4.1 | 21.01 | .06 | 20.91 | 22.07 | 42.2 | 7.6 | -1.6 | 2.4 |

Eftersom återkoppling och speciellt integrerande återkoppling så väl kan reglera bort inverkan av en felaktigt vald framkopplingskurva, så kan en naturlig fråga vara om man inte helt kan ta bort framkopplingen från utetemperaturen när återkoppling används.

I fallet med P-reglering så kan reglerfallet analyseras enkelt med ekvation (3.31). Antag att framkopplingskurvan ersätts med ett konstant värde t ex $T_{ffk}=48.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, vilket ger rätt innetemperatur vid $T_u=0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Då kan (3.31) förenklas till

$$T_i = T_{iref} + (1 - v_g) T_u \quad (3.45)$$

där vi utnyttjat att $k_r/k_b=0.666$, $dk=1.5$, $dI=0$ och $P_g=0$. I följande tabell anges den stationära avvikelser $T_i - T_{iref}$ för några olika regulatorförstärkningar, k_p . Observera att för $k_p=0$ så är framledningstemperaturen konstant lika med $48.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ oberoende av ute- och innetemperaturen.

TAB.3.19 Det stationära felet i innetemperaturen då framkopplingskurvan ersätts med ett konstant värde vid olika konstanta utetemperaturer. Reglering med proportionell återkoppling med olika val av regulatorförstärkningen, k_p .

| T_u $^{\circ}\text{C}$ | stationärt fel i innetemperaturen | | | |
|-----------------------------|-----------------------------------|------|------|------|
| | $k_p=0$ | 10 | 20 | 40 |
| | $v_g=0.40$ | 0.88 | 0.93 | 0.96 |
| 20 | 12 | 2.4 | 1.3 | 0.7 |
| 10 | 6 | 1.2 | 0.7 | 0.4 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0 |
| -10 | -6 | -1.2 | -0.7 | -0.4 |
| -20 | -12 | -2.4 | -1.3 | -0.7 |

Liksom i förra avsnittet kan man räkna med att de verkliga felen blir något mindre än de i tabellen angivna på grund av husets tröghet. Siffrorna visar att det stationära felet kan bli litet, men att detta kräver (opraktiskt) hög förstärkning.

Den naturliga regulatorn om man vill slopa framkopplingskurvan är annars PI-regulatorn. I TAB.3.20 visas resultatet då $k_p=40$ och $T_{int}=0.555$ h. Av tabellen framgår att det går bra att slopa framkopplingskurvan i detta fall. Med lägre regulatorförstärkning och större integraltid kommer dock felen att tillta. Detta framgår av TAB.3.21 där $k_p=20$ och $T_{int}=12$ h.

Sammanfattningsvis är det troligtvis klokt att behålla framkopplingskurvan och låta återkopplingen ge avvikelsen från kurvan på det sätt som vi gjort i detta kapitel. Framkopplingskurvan har också en viktig funktion som startvärde och referensvärde om återkopplingen måste kopplas ur.

TAB.3.20 Sammanställning av några viktiga variabler för varje månad.

Reglersätt: PI-regulator med $k_p=40$, $T_{int}=0.555$ h
och slopad framkopplingskurva.

simu 14 PI-reg Kp= 40.00 Tint= .56 Tsamp= .17

Hela dygnet:

| Månad | ENERGI kWh/m**2 | vinet % | Tinne C | +std C | Timin C | Timax C | Tfram C | /vbd/ C | Ureg C | /vbd/ C |
|-------|--------------------|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|
| jan | 15.26 | 1.6 | 21.00 | .02 | 20.91 | 21.11 | 49.0 | 13.5 | 49.0 | 13.5 |
| feb | 13.69 | 3.5 | 21.00 | .02 | 20.87 | 21.14 | 48.8 | 17.3 | 48.8 | 17.3 |
| mars | 14.89 | 6.7 | 21.00 | .03 | 20.89 | 21.20 | 48.3 | 21.5 | 48.3 | 21.5 |
| apr | 8.48 | 19.1 | 21.04 | .16 | 20.84 | 22.07 | 37.1 | 26.2 | 35.5 | 32.3 |
| maj | 1.82 | 55.1 | 22.36 | 1.21 | 20.83 | 25.93 | 25.7 | 10.4 | 18.1 | 14.5 |
| juni | .00 | .0 | 24.53 | 1.35 | 22.01 | 27.94 | 24.5 | .0 | .0 | .0 |
| juli | .00 | .0 | 26.53 | 2.19 | 22.42 | 31.32 | 26.5 | .0 | .0 | .0 |
| aug | .00 | .0 | 25.12 | 1.69 | 21.31 | 28.89 | 25.1 | .0 | .0 | .0 |
| sep | 3.42 | 30.1 | 21.27 | .44 | 20.82 | 22.91 | 27.8 | 15.2 | 23.4 | 22.2 |
| okt | 7.40 | 10.9 | 21.01 | .09 | 20.86 | 21.74 | 34.6 | 20.0 | 33.9 | 23.1 |
| nov | 12.98 | 2.7 | 21.00 | .02 | 20.89 | 21.15 | 45.6 | 15.7 | 45.6 | 16.0 |
| dec | 13.77 | 1.4 | 21.00 | .02 | 20.95 | 21.08 | 46.2 | 12.4 | 46.2 | 12.4 |
| elde | 91.71 | 8.9 | 21.19 | .00 | 20.82 | 25.93 | 40.3 | 16.9 | 38.7 | 19.2 |

Endast dagtid:

| Månad | ENERGI kWh/m**2 | vinet % | Tinne C | +std C | Timin C | Timax C | Tfram C | /vbd/ C | Ureg C | /vbd/ C |
|-------|--------------------|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|
| jan | 9.67 | 5.6 | 21.00 | .02 | 20.91 | 21.11 | 47.6 | 11.6 | 47.6 | 11.6 |
| feb | 8.51 | 8.9 | 21.00 | .03 | 20.87 | 21.14 | 46.9 | 15.7 | 46.9 | 15.7 |
| mars | 8.74 | 14.8 | 21.00 | .04 | 20.89 | 21.20 | 45.0 | 18.8 | 45.0 | 18.8 |
| apr | 3.79 | 39.4 | 21.07 | .19 | 20.84 | 22.07 | 31.8 | 22.6 | 29.5 | 28.7 |
| maj | .52 | 71.1 | 22.66 | 1.25 | 20.83 | 25.93 | 24.1 | 5.5 | 15.6 | 7.9 |
| juni | .00 | .0 | 24.86 | 1.32 | 22.04 | 27.94 | 24.9 | .0 | .0 | .0 |
| juli | .00 | .0 | 26.87 | 2.18 | 23.33 | 31.32 | 26.9 | .0 | .0 | .0 |
| aug | .00 | .0 | 25.38 | 1.68 | 21.47 | 28.89 | 25.4 | .0 | .0 | .0 |
| sep | 1.20 | 53.9 | 21.38 | .48 | 20.82 | 22.91 | 24.8 | 9.9 | 19.3 | 15.4 |
| okt | 3.82 | 25.4 | 21.02 | .10 | 20.86 | 21.74 | 31.5 | 16.7 | 30.5 | 19.9 |
| nov | 8.04 | 8.2 | 21.00 | .03 | 20.89 | 21.15 | 43.8 | 13.9 | 43.8 | 14.2 |
| dec | 8.72 | 5.2 | 21.00 | .02 | 20.95 | 21.08 | 45.0 | 10.6 | 45.0 | 10.6 |
| elde | 53.01 | 16.6 | 21.24 | .00 | 20.82 | 25.93 | 37.8 | 13.9 | 35.8 | 15.8 |

TAB.3.21 Sammanställning av några viktiga variabler för varje månad.

Reglersätt: PI-regulator med $k_p=20$, $T_{int}=12$ h
och slopad framkopplingskurva

simu 16 PI-reg Kp= 20.00 Tint= 12.00 Ttemp= 1.00

Hela dygnet:

| Månad | ENERGI kWh/m**2 | vinst % | Tinne C | +std C | Timin C | Timax C | Tfram C | /vbd/ C | Ureg C | /vbd/ C |
|-------|--------------------|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|
| jan | 15.32 | 1.3 | 21.00 | .17 | 20.38 | 21.52 | 49.1 | 8.8 | 49.1 | 8.8 |
| feb | 13.67 | 3.7 | 20.99 | .17 | 20.39 | 21.64 | 48.7 | 10.4 | 48.7 | 10.4 |
| mars | 14.90 | 6.7 | 21.01 | .22 | 20.35 | 21.67 | 48.3 | 13.1 | 48.3 | 13.1 |
| apr | 8.40 | 19.8 | 21.02 | .33 | 20.34 | 22.01 | 36.9 | 18.7 | 36.7 | 19.7 |
| maj | 1.95 | 51.8 | 22.54 | 1.31 | 20.33 | 26.07 | 26.1 | 8.9 | 20.9 | 15.5 |
| juni | .00 | .0 | 24.56 | 1.38 | 22.03 | 28.02 | 24.6 | .0 | .0 | .0 |
| juli | .00 | .0 | 26.53 | 2.18 | 22.43 | 31.31 | 26.5 | .0 | .0 | .0 |
| aug | .00 | .0 | 25.12 | 1.68 | 21.31 | 28.88 | 25.1 | .0 | .0 | .0 |
| sep | 3.41 | 30.3 | 21.35 | .65 | 20.42 | 23.63 | 27.8 | 12.5 | 25.6 | 17.5 |
| okt | 7.37 | 11.2 | 21.00 | .23 | 20.45 | 21.79 | 34.5 | 12.6 | 34.4 | 13.4 |
| nov | 12.97 | 2.8 | 20.99 | .17 | 20.58 | 21.46 | 45.6 | 9.8 | 45.6 | 9.8 |
| dec | 13.76 | 1.4 | 20.99 | .13 | 20.64 | 21.38 | 46.2 | 7.9 | 46.2 | 7.9 |
| elds | 91.76 | 8.9 | 21.22 | .00 | 20.33 | 26.07 | 40.3 | 11.4 | 39.4 | 12.9 |

Endast dagtid:

| Månad | ENERGI kWh/m**2 | vinst % | Tinne C | +std C | Timin C | Timax C | Tfram C | /vbd/ C | Ureg C | /vbd/ C |
|-------|--------------------|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|
| jan | 9.91 | 3.3 | 21.04 | .16 | 20.45 | 21.52 | 48.3 | 7.6 | 48.3 | 7.6 |
| feb | 8.78 | 6.0 | 21.05 | .17 | 20.39 | 21.64 | 47.8 | 9.7 | 47.8 | 9.7 |
| mars | 9.21 | 10.1 | 21.10 | .20 | 20.41 | 21.67 | 46.4 | 12.3 | 46.4 | 12.3 |
| apr | 4.36 | 30.2 | 21.18 | .28 | 20.53 | 22.01 | 33.6 | 14.0 | 33.2 | 15.0 |
| maj | .64 | 64.2 | 22.85 | 1.32 | 20.69 | 26.07 | 24.6 | 4.7 | 17.9 | 10.0 |
| juni | .00 | .0 | 24.89 | 1.34 | 22.06 | 28.02 | 24.9 | .0 | .0 | .0 |
| juli | .00 | .0 | 26.86 | 2.18 | 23.34 | 31.31 | 26.9 | .0 | .0 | .0 |
| aug | .00 | .0 | 25.38 | 1.68 | 21.48 | 28.88 | 25.4 | .0 | .0 | .0 |
| sep | 1.45 | 44.4 | 21.51 | .65 | 20.61 | 23.63 | 25.6 | 8.5 | 22.5 | 13.2 |
| okt | 4.25 | 17.1 | 21.09 | .21 | 20.46 | 21.79 | 32.8 | 11.9 | 32.6 | 12.6 |
| nov | 8.29 | 5.3 | 21.04 | .16 | 20.58 | 21.46 | 44.6 | 8.6 | 44.6 | 8.6 |
| dec | 8.95 | 2.7 | 21.03 | .13 | 20.68 | 21.38 | 45.6 | 7.0 | 45.6 | 7.0 |
| elds | 55.84 | 12.2 | 21.33 | .00 | 20.39 | 26.07 | 38.8 | 9.4 | 37.6 | 10.7 |

4 LÄGENHETSTEMPERATUREN VID CENTRAL ÅTERKOPPLING

4.1 Inledning

Vid central återkoppling från innetemperaturen kan endast medelvärdet av lägenheternas gratisvärme tillgodogöras. Däremot kan rätt fungerande radiatortermostatventiler utnyttja lokala värmeöverskott. En intressant fråga är därför: Hur stor del av gratisvärmen är gemensam för alla lägenheter och hur stor del kommer bara enskilda lägenheter tillgodo?

I ytterlighetsfallet, att gratisvärmen är helt lika i alla lägenheter, har man inget att vinna på att ha en lokal återkoppling jämfört med en central återkoppling. I det andra ytterlighetsfallet, att alla lägenheter har totalt oberoende gratisvärme, så gör den centrala återkopplingen nytta endast då antalet lägenheter är litet. Extremfallet är en lägenhet med ett rum.

Nu kan vi dock inte mäta gratisvärmertilskottet annat än indirekt som ändringen i innetemperaturen. Vi ska därför studera hur stor del av variationen i innetemperaturen som är gemensam. Detta är något generellare eftersom innetemperaturen varierar med samtliga variationer i värmebelastningen som inte regleringen av värmeförseln tar hänsyn till. Ju större den gemensamma temperaturvariationen är desto större möjlighet har man att minska den totala variationen med central återkoppling.

Syftet med detta kapitel är att försöka bestämma en teoretisk gräns för hur mycket variationen i lägenheternas temperatur kan minskas vid återkoppling från lägenheternas medeltemperatur. Detta uttrycker vi med kvoten

$$k_s = (s_f - s_e) / s_f = 1 - s_e / s_f$$

där s_f och s_e anger standardavvikelsen i lägenhetstemperaturerna före respektive efter man inför återkoppling. Värdet på kvoten anger sålunda hur stor del av temperaturvariationen som kan regleras bort. I bästa fall, om all variation kan regleras bort, blir $k_s = 1$. Detta kan bara uppnås då hela variationen i innetemperaturerna är gemensam för alla lägenheter.

Problemet ska angripas på två sätt, dels med rättframma beräkningar utgående från uppmätta lägenhetstemperaturer, dels med statistiska metoder. Det senare är den enda möjligheten om lägenhetstemperaturerna inte är kända, vilket är fallet i våra försökshus.

Den statistiska metoden går ut på att bestämma hur pass lika, eller korrelerade som den statistiska termen lyder, olika lägenhetstemperaturer är. Detta kan bestämmas med enkla statistiska samband om man först har beräknat hur korrelerade olika frånluftstemperaturer är. Detta angreppssätt ska behandlas först teoretiskt i form av två exempel och sedan tillämpat på mätdata från försökshuset. Vi ska även bestämma vilken korrelation mellan lägenhets- eller frånluftstemperaturer som krävs för att kunna uppnå en viss kvot k_s . I detta sammanhang ska vi använda - det godtyckligt valda - kravet att $k_s > 0.5$, dvs att åtminstone hälften av variationen kan regleras bort.

I dessa avsnitt utnyttjas alltså de uppmätta frånluftstemperaturerna för att uppskatta variationen i lägenhetstemperaturerna. Sambanden blir emellertid både enklare och klarare om man istället kan utnyttja mätdata av lägenhetstemperaturer. Några sådana har dock inte uppmätts i försökshuset. Därför kommer även mätdata från ett annat BFR-projekt "Energimätning i flerbostadshus" rapporterad i Fredlund (1987) att analyseras. I dessa hus har veckomedelvärden av lägenhetstemperaturerna registrerats. Dessa lägenhetstemperaturer används i följande avsnitt för att beräkna medeltemperaturen och hur mycket variationen i lägenhetstemperaturerna minskar om man kan reglera medeltemperaturen perfekt. Detta är det andra sättet att bestämma kvoten k .

Innan vi i det första avsnittet presenterar några grundläggande samband för beräkning av varians och korrelation ska här bara understrykas att vi i detta kapitel endast ska bestämma en övre gräns för hur mycket temperaturvariationerna teoretiskt kan minskas med central återkoppling. Om detta kan uppnås i praktiken och hur det i så fall ska gå till är en annan fråga. Man bör också ha i minnet att förutom temperaturvariationen i tiden som kan minskas med bättre reglering så finns normalt även temperaturvariationer i rummet. Ty om flödesfördelningen i radiatorsystemet inte är korrekt så kommer olika lägenheter att få olika medeltemperaturer. Detta

kan naturligtvis inte kompenseras med den centrala regleringen utan kräver en injustering av värmesystemet eller en fungerande lokal återkoppling.

4.2 Lite statistikteori

Den bakomliggande teorin för detta kapitel bygger till stor del på hur variansen beräknas för summan av flera variabler. De grundläggande sambanden för detta ska nu presenteras. Variansen för en linjär kombination av två variabler X och Y beräknas enligt

$$V(aX+bY)=a^2V(X)+b^2V(Y)+2abC(X,Y) \quad (4.1)$$

där $V(\cdot)$ anger variansen och $C(\cdot, \cdot)$, anger kovariansen och a, b är konstanter. Variansen och kovariansen beräknas med hjälp av väntevärdet $E(\cdot)$ enligt

$$V(X)=E(X^2)-E(X)^2 \quad (4.2)$$

$$C(X,Y)=E(XY)-E(X)E(Y) \quad (4.3)$$

I stället för kovariansen mellan två variabler är det vanligt att ange korrelationen $R(\cdot, \cdot)$. Det gäller att

$$R(X,Y)=C(X,Y)/(V(X)V(Y))^{1/2} \quad (4.4)$$

Korrelationen är ett normerat mått och ligger mellan -1 och 1 . Oberoende variabler har korrelationen noll medan korrelationen ± 1 endast gäller mellan variabler som är linjärt beroende.

Vid medelvärdesbildning av flera variabler X_1, X_2, \dots, X_n gäller

$$\begin{aligned} V(Z) &= V((X_1+X_2+\dots+X_n)/n) \\ &= (V(X_1)+V(X_2)+\dots+V(X_n)+2\sum_{i<j} C(X_i, X_j))/n^2 \end{aligned} \quad (4.5)$$

Om alla varianser $V(X_i)=v$ och alla parvisa kovarianser

$C(X_i, X_j) = c$ så förenklas detta till

$$V(z) = v/n + (n-1)c/n \quad (4.6)$$

eller med den parvisa korrelationen $r = c/v$

$$V(z) = (1 + (n-1)r)v/n \quad (4.7)$$

Sambanden gäller allmänt. Något krav på att variablerna ska vara normalfördelade finns ej.

Två exempel

I det första exemplet ska vi anta att den parvisa korrelationen mellan två lägenhetstemperaturer är konstant och given. Vi har n st lägenhetstemperaturer x_1, x_2, \dots, x_n som kan skrivas som

$$x_i = p(t) + e_i(t) \quad (4.8)$$

$p(t)$ anger påverkan från återkopplingen och sätts till att börja med lika med noll. $e_i(t)$ är temperaturvariationen i lägenhet i . Variansen av $e_i(t)$ är $V(e_i(t)) = v_e$ och korrelationen mellan två olika lägenhetstemperaturer är $R(e_i, e_j) = r_e$.

Den genomsnittliga lägenhetstemperaturen, z , blir

$$z = (x_1 + x_2 + \dots + x_n)/n = p(t) + (e_1 + e_2 + \dots + e_n)/n \quad (4.9)$$

och dess varians blir enligt (4.7)

$$V(z) = (1 + (n-1)r_e) v_e/n \quad (4.10)$$

Vid återkoppling styrs $p(t)$ så att $z=0$ och ekv (4.9) ger då att

$$p(t) = -(e_1 + e_2 + \dots + e_n)/n \quad (4.11)$$

Lägenhetstemperaturerna blir nu

$$x_i = (-e_1 - e_2 - \dots + (n-1)e_i - \dots - e_n)/n \quad (4.12)$$

och dess varians blir efter förkortning

$$V(x_i) = (1-1/n)(1-r_e)v_e \quad (4.13)$$

Kvoten

$$k = \frac{(V(x_i))_{\text{före}} - (V(x_i))_{\text{efter}}}{(V(x_i))_{\text{före}}} \quad (4.14)$$

anger hur stor andel av lägenhetstemperaturens varians som teoretiskt är möjlig att reglera bort med en central återkoppling. I detta fall blir

$$k = (1+(n-1)r_e)/n = 1/n + (1-1/n)r_e \quad (4.15)$$

eller approximativt för stora n : $k = r_e$

Tidigare har vi definierat kvoten k_s som den andel av standardavvikelsen (istället för variansen) som kan regleras bort. Sambandet mellan de två kvoterna är

$$1-k = (1-k_s)^2 \quad (4.16)$$

För att minska standardavvikelsen i lägenhetstemperaturen till minst hälften vid central återkoppling så ska variansen minska till en fjärdedel, dvs $k > 0.75$. Kravet på korrelationen mellan lägenhetstemperaturer kan med hjälp av ekv (4.15) formuleras som

$$r_e > (nk-1)/(n-1) = (0.75n-1)/(n-1) \quad (4.17)$$

för $n > 1$ eller approximativt för stora n

$$r_e > 0.75 \quad (4.18)$$

Om nu den genomsnittliga temperaturen, z , bestäms som medelvärdet av m st frånluftstemperaturer y_1, y_2, \dots, y_m där varje y_i är ett medelvärde av l st lägenhetstemperaturer så kan kravet på korrelationen mellan lägenhetstemperaturer överföras i ett krav på korrelationen mellan olika frånluftstemperaturer. I fallet med två frånluftstemperaturer y_1 och y_2 gäller

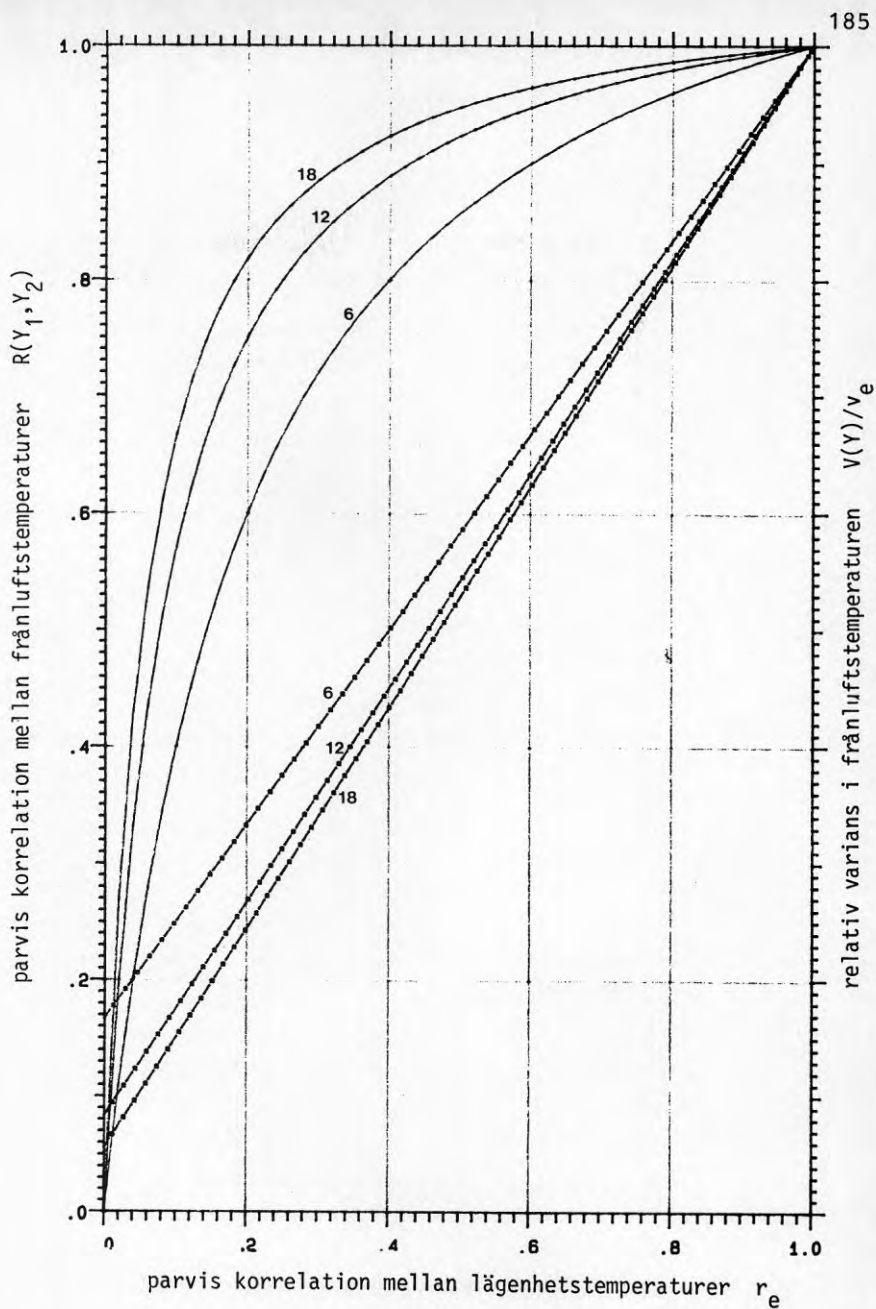


FIG.4.1 Parvis korrelation enligt (4.24) (heldragen linje) och relativ varians $V(y_1)/v_e$ enligt (4.19) (streck-prickad linje) efter medelvärdesbildning av $l=6, 12, 18$ lägenhetstemperaturer med den parvisa korrelationen r_e .

$$V(y_1) = (1 + (1-1)r_e)v_e/1 \quad (4.19)$$

$$V(y_2) = (1 + (1-1)r_e)v_e/1 \quad (4.20)$$

$$V(z) = (1 + (n-1)r_e)v_e/n \quad (4.21)$$

Det totala antalet lägenheter $n = m_1 = 21$. Det allmänna sambandet (4.1) lyder i detta fall

$$V(z) = V(y_1)/4 + V(y_2)/4 + C(y_1, y_2)/2 \quad (4.22)$$

där $C(y_1, y_2)$ är kovariansen mellan y_1 och y_2 . Nu kan kovariansen lösas genom insättning av ekv (4.19)–(4.21) i (4.22)

$$C(y_1, y_2) = r_e v_e = C(x_i, x_j) \quad (4.23)$$

Kovariansen förblir alltså oförändrad vid medelvärdesbildningen. Variansen minskar dock enligt ekv (4.19) med en faktor $1/(1 + (1-1/1)r_e)$ och därmed ökar korrelationen med samma faktor

$$R(y_1, y_2) = r_e / (1 + (1-1/1)r_e) \quad (4.24)$$

FIG.4.1 visar hur varians och korrelation ändras vid medelvärdesbildning som funktion av korrektionen r_e vid några olika värden på antalet lägenheter n .

Det motsatta uttrycket för r_e som funktion av $R(y_1, y_2)$ kan lösas ur (4.24) som

$$r_e = 1 / (1 + (1/R(y_1, y_2) - 1)) \quad (4.25)$$

Med detta uttryck insatt i (4.15) så kan kravet på $R(y_1, y_2)$ för att minska standardavvikelsen i lägenhetstemperaturerna till hälften formuleras som

$$R(y_1, y_2) < (nk-1)/(nk+1-2k) = (0.75n-1)/(0.75n-0.5) \quad (4.26)$$

Följande tabell visar kraven på korrelationen enligt (4.17) och (4.26) för att ge $k_s > 0.5$

TAB.4.1 Lägsta tillåtna korrelation mellan lägenhetstemperaturer (r_{emin}) och mellan två frånluftstemperaturer ($R_{min}(y_1, y_2)$) som krävs för att (teoretiskt) kunna minska standardavvikelsen i lägenhetstemperaturerna till hälften vid central återkoppling. Vardera frånluftstemperatur är ett medelvärde av 1 st lägenhetstemperaturer.

| l | n | r_{emin} | $R_{min}(y_1, y_2)$ |
|----------|----------|------------|---------------------|
| 1 | 2 | 0.50 | 0.50 |
| 2 | 4 | 0.67 | 0.80 |
| 3 | 6 | 0.70 | 0.87 |
| 4 | 8 | 0.71 | 0.91 |
| 6 | 12 | 0.73 | 0.94 |
| 12 | 24 | 0.74 | 0.97 |
| 24 | 48 | 0.74 | 0.99 |
| ∞ | ∞ | 0.75 | 1.00 |

Ju större antal lägenhetstemperaturer som ingår i frånluftstemperaturerna desto högre blir korrelationen mellan frånluftstemperaturerna och därmed ökar kravet på $R_{min}(y_1, y_2)$ mot 1.

Omvänt så kan man i princip bestämma en teoretisk gräns för hur stor del av lägenhetstemperaturernas varians som kan regleras bort genom att beräkna $R(y_1, y_2)$ i mätdata och bestämma motsvarande k med (4.15) och (4.25). Detta görs i nästa avsnitt.

Det andra exemplet

Ett resultat av det första exemplet var att kvoten k blev ett om korrelationen mellan lägenhetstemperaturerna var ett. I det andra exemplet ska vi visa att detta normalt är en överskattning. Att korrelationen mellan två variabler är ett behöver ju inte innebära att de är lika utan bara att de är linjärt beroende. Om exempelvis två lägenhetstemperaturer skiljer sig åt med en konstant positiv faktor så är korrelationen lika med ett. Men det är lätt att inse att variation inte kan regleras bort genom att hålla medeltemperaturen konstant.

Detta ska nu visas matematiskt i ett allmännare fall med n st lägenhetstemperaturer som vi antar kan skrivas som

$$x_i = p(t) + (1 + a_i)e(t) \quad (4.27)$$

där störningen $e(t)$ är gemensam för alla lägenheter och $(1 + a_i)$ är en konstant skalfaktor som anger om lägenheten i är mer eller mindre känslig för störningen $e(t)$. Medelvärdet av a_i är noll och variansen $V(a_i) = v_a$. Korrelationen mellan olika lägenhetstemperaturer blir ett eftersom de är lika förutom en konstant faktor

$$R(x_i, x_j) = 1 \quad (4.28)$$

Utan återkoppling är $p(t) = 0$. Då blir variansen i lägenhetstemperaturen x_i

$$V(x_i) = (1 + a_i)^2 v_e \quad (4.29)$$

och den genomsnittliga variansen för lägenhetstemperaturerna blir

$$E(V(x_i)) = v_e E((1 + a_i)^2) \quad (4.30)$$

Den andra termen kan utvecklas till

$$E((1 + a_i)^2) = 1 + 2E(a_i) + E(a_i)^2 = 1 + v_a \quad (4.31)$$

där vi utnyttjat definitionen av v_a och att $E(a_i) = 0$. Lägenhetstemperaturernas genomsnittliga varians utan återkoppling blir alltså

$$V(x_i) = (1 + v_a)v_e \quad (4.32)$$

Den genomsnittliga innetemperaturen, z , blir

$$z = p(t) + (1 + (a_1 + a_2 + \dots + a_n)/n)e(t) \quad (4.33)$$

Vid återkoppling styrs $p(t)$ så att $z = 0$, dvs

$$p(t) = -(1 + (a_1 + a_2 + \dots + a_n)/n)e(t) \quad (4.34)$$

Lägenhetstemperaturen x_i blir nu

$$x_i = (-a_1 - a_2 - \dots + (n-1)a_i - \dots - a_n)e(t)/n \quad (4.35)$$

och dess genomsnittliga varians

$$V(x_i) = ((n-1)v_a/n^2 + (n-1)^2v_a/n^2)v_e = (1-1/n)v_a v_e \quad (4.36)$$

Kvoten k enligt (4.14) bestäms nu med hjälp av ekv (4.32) och (4.36)

$$k = (1 + v_a/n) / (1 + v_a) \quad (4.37)$$

Endast då alla a_i är lika, dvs $v_a = 0$, så kan all variation regleras bort trots att korrelationen är ett mellan olika lägenhetstemperaturer. I fortsättningen kommer vi, liksom i det första exemplet, endast att betrakta korrelationer mellan olika temperaturer och bortse från eventuellt olika "skalfaktorer". Slutsatsen av det andra exemplet blir då att vi därmed kommer att överskatta regleringens förmåga att dämpa variationen i lägenheternas temperatur.

4.3 Analys av mätdata - frånluftstemperaturer

All information vi har om innetemperaturen finns i frånluftstemperaturen. Vi ska därför kort beskriva vilka frånluftstemperaturer som har mätts. En utförlig beskrivning av försökshuset finns i RoS, kapitel 2.

I husen på Tingvallen finns 24 frånluftsfläktar som vardera ventilerar sex lägenheter. Sex sådana frånluftstemperaturer har mätts per försökshus. Dessa har parats ihop till tre registrerade frånluftstemperaturer som således är medeltemperaturer för vardera 12 lägenheter. Två av dessa frånluftstemperaturer gäller lägenheter som har fasader i syd och nord medan den tredje gäller lägenheter med fasader i öst och väst. Samtliga lägenheter är genomgående.

I Teknikerhusen finns fyra stycken frånluftsfläktar per hus där frånluftstemperaturen mäts. Tre av frånluftsfläktarna ventilerar 16 lägenheter var medan den fjärde ventilerar 24 något mindre lägenheter.

ter. Frånluftstemperaturerna kan ses som medeltemperaturen för de ventilerade lägenheterna. Nu finns dock bara två av dessa frånluftstemperaturer registrerade. De gäller 16 respektive 24 lägenheter. Dessutom finns medelvärdet för de två övriga frånluftstemperaturerna, som således är medeltemperaturen för 32 lägenheter. Fasaderna ligger i syd-öst och nord-väst.

FIG.4.2-4.3 visar tre frånluftstemperaturer för Teknikern respektive Tingvallen. Frånluftstemperaturerna är som synes mycket lika frånsett en konstant nivåskillnad. Som vi såg i det första exemplet så måste frånluftstemperaturerna också vara mycket lika. De är ju i dessa fall medeltemperaturer för 18 respektive 12 lägenheter. Frågan i detta avsnitt är alltså: Är frånluftstemperaturerna tillräckligt lika?

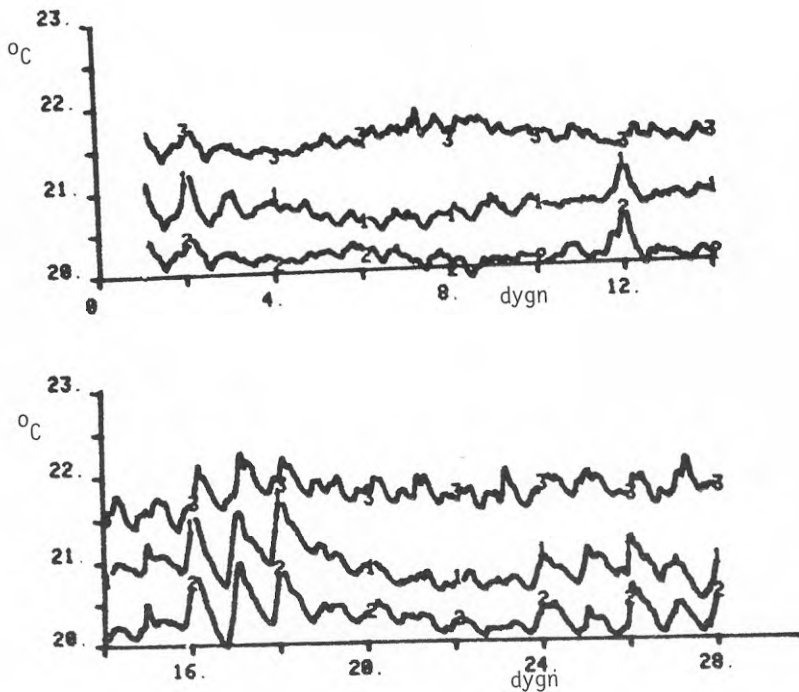


FIG.4.2 Tre frånluftstemperaturer i försökshus H6 under 69 dygn.
Del 1: återkoppling från medelvärdet av de tre frånluftstemperaturerna.

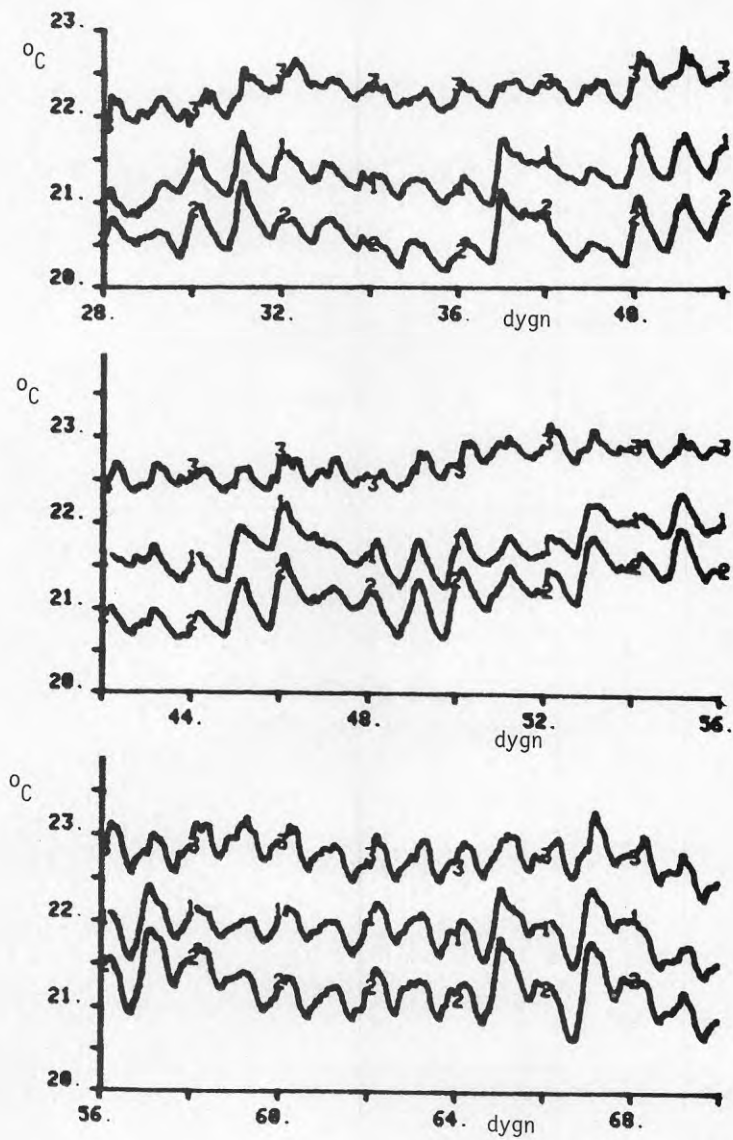


FIG.4.2 (forts) Del 2: svag återkoppling från medelvärdet av de tre frånluftstemperaturerna.

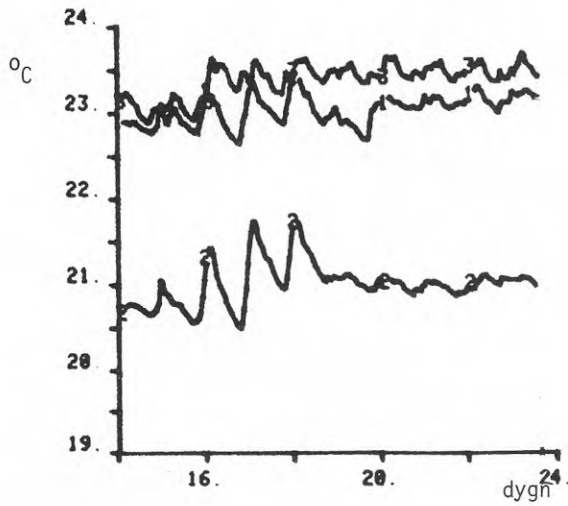
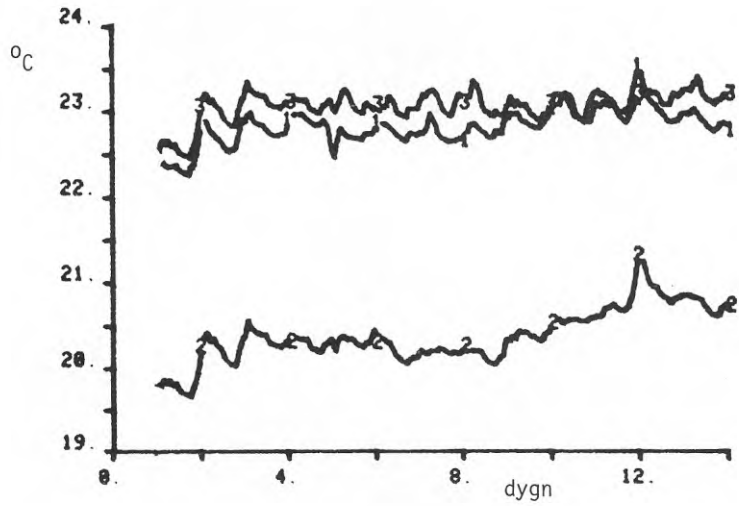


FIG.4.3 Tre frånluftstemperaturer i försökshus H5.
Del 1: enbart uteklimatkompensering.

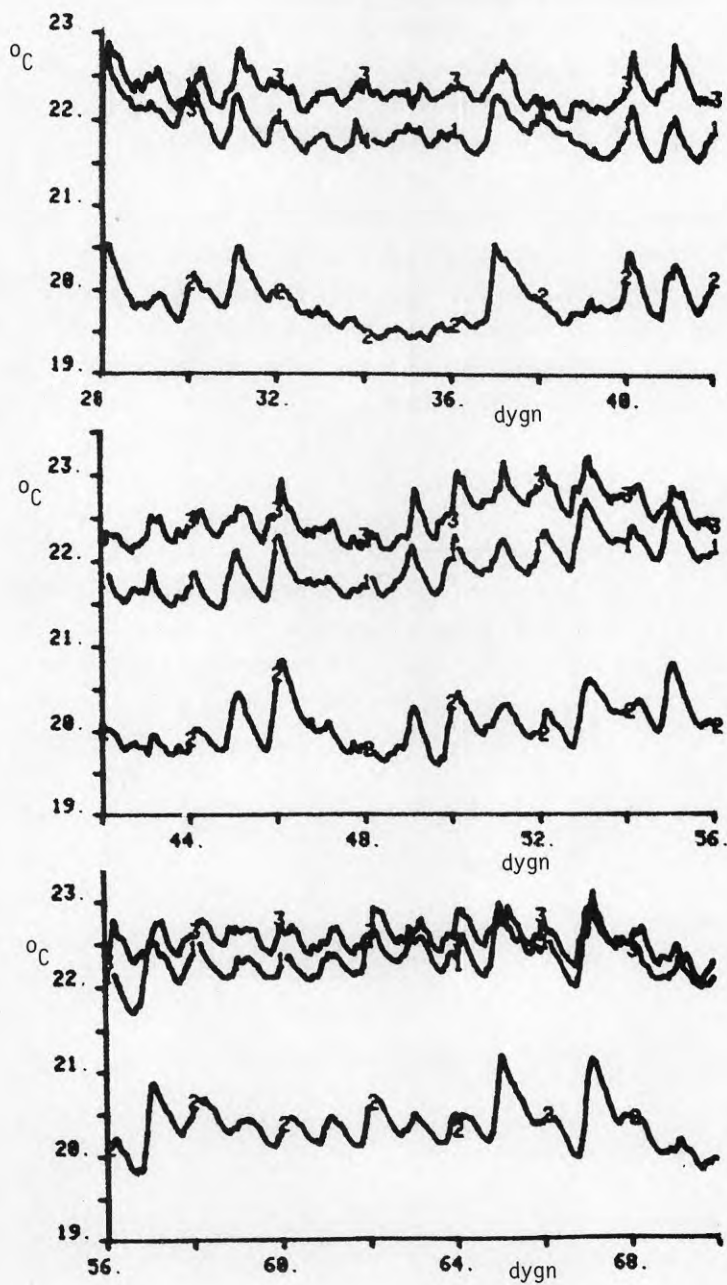


FIG.4.3 (forts) Del 2: enbart uteklimatkompensering.

Det gäller nu att gå motsatt väg jämfört med det första exemplet då vi bestämde frånluftstemperaturens varians- och korrelation givet alla lägenhetstemperaturers varians och korrelation. Från mätdata av frånluftstemperaturer så kan dess varians och korrelation enkelt beräknas och med hjälp av dessa så kan lägenhetstemperaturernas genomsnittliga varians och korrelation bestämmas.

Till skillnad från exemplet så kan vi i verkligheten dock inte förutsätta att samtliga lägenhetstemperaturer kan beräknas med samma varians. Ett skäl är att lägenheterna ligger på olika fasader. Men mätdata visar att variansen ibland måste vara olika även med samma fasadriktning. Detta kommer att försvåra analysen något jämfört med det första exemplet.

Beräkningar

Antag att n st lägenheter med temperaturerna $x_{m1}, x_{m2}, \dots, x_{mn}$ har den genomsnittliga frånluftstemperaturen y_m . (Observera: n används nu i samma betydelse som l gjorde tidigare). Vi betraktar först fallet $m=2$, dvs att vi mäter två frånluftstemperaturer y_1 och y_2 . Förutsatt att luftflödena är desamma så är

$$y_1 = (x_{11} + x_{12} + \dots + x_{1n}) / n \quad (4.38)$$

$$y_2 = (x_{21} + x_{22} + \dots + x_{2n}) / n \quad (4.39)$$

Medelvärde av dessa, z , är

$$z = (y_1 + y_2) / 2 = (x_{11} + \dots + x_{1n} + x_{21} + \dots + x_{2n}) / 2n \quad (4.40)$$

och medeldifferensen är

$$q = (y_1 - y_2) / 2 = (x_{11} + \dots + x_{1n} - x_{21} - \dots - x_{2n}) / 2n \quad (4.41)$$

Varianserna $V(y_1), V(y_2), V(z)$ och $V(q)$ kan beräknas om frånluftstemperaturerna y_1 och y_2 är kända. Variationen i lägenhetstemperaturerna kan naturligtvis inte bestämmas i detalj med hjälp av några värden på variansen av medeltemperaturen. Däremot kan den genomsnittliga variationen bestämmas. Den ges av variansen av lägenhetstemperaturerna $V(x_{1i}) = v_1, V(x_{2i}) = v_2$ och

kovariansen mellan olika lägenhetstemperaturer

$$c_{11}=C(x_{1i},x_{1j}), c_{22}=C(x_{2i},x_{2j}) \text{ och } c_{12}=C(x_{1i},x_{2j}).$$

I stället för kovariansen kan korrelationen användas. Korrelationerna mellan lägenhetstemperaturerna betecknar vi med r_{11} , r_{22} och r_{12} och beräknas enligt (2.4).

Variationen i lägenhetstemperaturer karakteriseras således av fem okända parametrar. Endast tre parametrar kan bestämmas i fallet med två mätta frånluftstemperaturer eftersom $V(y_1)$, $V(y_2)$, $V(z)$ och $V(q)$ inte är linjärt oberoende. Det gäller att $V(y_1)+V(y_2) = V(z)+V(q)$. Det kan dock vara rimligt att anta att korrelationen mellan olika lägenheter är densamma i de två grupperna, dvs $r_{11}=r_{22}$. Om vi nu gör förutsättningen att

$$r_{11}=r_{22}=Ar_{12} \quad \text{där } 1 < A < 1/r_{12} \quad (4.42)$$

så har vi tre okända parametrar v_1 , v_2 , r_{12} att bestämma om konstanten A är vald. Genom att prova olika värden på A ser vi dess betydelse. Rimliga värden på A är 1 eller något större. Om till exempel y_1 och y_2 mäts från olika fasadriktningar kan det vara rimligt att anta att korrelationen mellan temperaturer på samma fasad är högre än den korsvisa korrelationen. Värdet på A blir då större än 1. Observera att Ar_{12} aldrig får vara större än 1. A måste alltså vara mindre eller lika med $1/r_{12}$.

Härledningen för att uttrycka varians och korrelation i lägenhetstemperaturerna (ekv 4.43-4.90) är inte svår men relativt omfattande. Den har därför flyttats till Bilaga 2. I korthet går det ut på att dela upp variationen, e_i , i lägenhetstemperaturen i två delar. Den ena delen, s , är gemensam för alla lägenheter och den andra är en individuell del, d_i , som är specifik för den aktuella lägenheten

$$e_i = s + d_i \quad (4.91)$$

I bästa fall så kan den gemensamma delen s regleras bort helt. Kvoten, k (se 4.14), som anger hur stor del av variansen i lägenhetstemperaturerna som teoretiskt kan regleras kan nu även skrivas som

$$k=1-v_d/v_e \quad (4.92)$$

där v_e och v_d är den genomsnittliga totala respektive individuella variansen i lägenhetstemperaturerna. Förhållandet mellan dessa avgör om central återkoppling är en bra reglerprincip. En stor gemensam del och en liten individuell del är önskvärd.

Resultat

Frånluftstemperaturerna som visas i FIG.4.2-4.3 har använts i datorberäkningar för att bestämma kvoten k . Mätdata täcker två tidsperioder

| | | | |
|----------|--------------|---------|-------|
| period 1 | försökshus 6 | FIG.4.3 | del 2 |
| | försökshus 5 | FIG.4.2 | del 2 |
| period 2 | försökshus 6 | FIG.4.3 | del 1 |
| | försökshus 5 | FIG.4.2 | del 1 |

Period 1 är ett vårfall med mycket sol och period 2 är ett vintervinterfall med mulet väder, vilket avspeglar sig i temperaturvariationens storlek.

Det mest gynnsamma fallet ska studeras genom att bara utgå från två frånluftstemperaturer och dessutom de två mest lika (med samma fasadriktning). För varje period redovisas resultatet på följande sätt som förklaras nedan

TAB.4.2 Datorberäkning av möjlig minskning av temperaturvariationer mm för försökshus 6, period 1.

| Period 1 | försökshus 6 | | längd 1008 timmar | | -1.3 < Tute < 16.7 | | | | |
|----------------------------------|---------------|-------|-------------------|-------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------------------|
| reglering baserad på FL1 och FL2 | förutsättning | | n=12 | r11=r22=1.000*r12 | | | | | |
| Ber korrelationskoefficienter: | | | R(FL1,FL2) = | 0.967 | | | | | |
| | R(e1i, e2j) = | 0.707 | R(d1i, d1j) = | -0.044 | | | | | |
| | R(e2i, e2j) = | 0.707 | R(d2i, d2j) = | -0.038 | | | | | |
| | R(e1i, e2i) = | 0.707 | R(d1i, d2i) = | -0.045 | | | | | |
| | R(s, d1i) = | 0.046 | R(s, d2i) = | -0.048 | | | | | |
| | FL1 | FL2 | FLmed | FLdiff | e1i | e2i | d1i | d2i | kvot _v |
| medel | 22.01 | 20.07 | 21.04 | 0.97 | | | | | |
| var | 0.575 | 0.513 | 0.534 | 0.009 | 0.786 | 0.701 | 0.221 | 0.198 | 71.9 |
| stand | 0.758 | 0.716 | 0.731 | 0.097 | 0.887 | 0.837 | 0.470 | 0.445 | 47.0 |

Mätperiodens längd är 1008 h = 42 dygn. Utetemperaturen har under perioden legat mellan -1 och 17 °C. Beräkningarna har genomförts under förutsättningarna att frånluftstemperaturen är ett medelvärde av 12 lägenhetstemperaturer och att parameter A=1. Korrelationen mellan frånluftstemperaturerna är 0.97 och mellan lägenhetstemperaturerna 0.70. De individuella störningarna är i stort okorrelerade med varandra och med den gemensamma variationen s. Medelvärde, varians och standardavvikelse anges därefter för frånluftstemperaturer och störningar. I detta fall kan 72% av variansen i lägenhetstemperaturerna regleras bort, vilket motsvarar att 47% av standardavvikelsen kan regleras bort, se ekv (4.16).

Motsvarande beräkningar för försökshus 5 och period 2 (båda försökshusen) presenteras i TAB.4.3-4.5. I period 2 med mindre sol (= mindre gemensam störning) så sjunker kvoten betydligt till under 20% i möjlig sänkning av standardavvikelsen i lägenhetstemperaturerna. Samtidigt är också temperaturvariationerna mindre.

Om konstanten A tillåts vara större än 1 så ökar kvoten. För period 1, försökshus 5 och A=1.05 respektive 1.073, så ges resultatet i TAB.4.6-4.7. Även dessa måttliga höjningar av A ger stort utslag i de beräknade korrelationerna mellan olika lägenhetstemperaturer. Kvoten höjs från 33% för A=1 till 53% respektive 96%. Det sista värdet då A=1.073 är ytterlighetsfallet med $r_{11}=r_{22}=1$. Större värde på A kan alltså inte användas.

Metoden att beräkna lägenhetstemperaturernas variation på grundval av frånluftstemperaturernas variation är sålunda numeriskt mycket känslig med avseende på om korrelationen mellan olika lägenhetstemperaturer är densamma inom en grupp som mellan olika grupper av lägenheter.

En annan osäkerhetsfaktor är förutsättningen att frånluftstemperaturerna är ett medelvärde av 12 lägenhetstemperaturer. Bristfällig injustering av ventilationssystemet kan göra att frånluftstemperaturen huvudsakligen är ett medelvärde av färre lägenhetstemperaturer. Fallet att antalet lägenhetstemperaturer halveras till 6 visas i TAB.4.8. Möjlig minskning av standardavvikelsen höjs nu från 33% till knappt 50%.

TAB.4.3-4.5 Resultat av datorberäkningar för period 1, försökskus 5, och period 2, försökskus 6 och 5.

| | | | | | | | | | |
|----------------------------------|---------------|-------|--------|-------------------|---------------|-------|--------------------|-------|-------------------|
| ----- | | | | | | | | | |
| Period 1 | försökskus 5 | | | längd 1008 timmar | | | -1.0 < Tute < 17.0 | | |
| reglering baserad på FL1 och FL2 | | | | förutsättning | | n=12 | r11=r22=1.000*r12 | | |
| Ber korrelationskoefficienter: | | | | R(FL1, FL2) = | | 0.930 | | | |
| | R(e1i, e2j) = | | 0.531 | | R(d1i, d1j) = | | -0.031 | | |
| | R(e2i, e2j) = | | 0.531 | | R(d2i, d2j) = | | -0.043 | | |
| | R(e1i, e2i) = | | 0.531 | | R(d1i, d2i) = | | -0.047 | | |
| | R(s, d1i) = | | -0.076 | | R(s, d2i) = | | 0.067 | | |
| ----- | | | | | | | | | |
| | FL1 | FL2 | FLmed | FLdiff | e1i | e2i | d1i | d2i | kvot _v |
| medel | 21.66 | 21.02 | 21.34 | 0.32 | | | | | |
| var | 0.117 | 0.150 | 0.128 | 0.005 | 0.205 | 0.263 | 0.093 | 0.118 | 54.8 |
| stand | 0.342 | 0.387 | 0.358 | 0.070 | 0.453 | 0.513 | 0.305 | 0.344 | 32.8 |
| ----- | | | | | | | | | |
| ----- | | | | | | | | | |
| Period 2 | försökskus 6 | | | längd 544 timmar | | | -5.6 < Tute < 9.6 | | |
| reglering baserad på FL1 och FL2 | | | | förutsättning | | n=12 | r11=r22=1.000*r12 | | |
| Ber korrelationskoefficienter: | | | | R(FL1, FL2) = | | 0.840 | | | |
| | R(e1i, e2j) = | | 0.304 | | R(d1i, d1j) = | | 0.096 | | |
| | R(e2i, e2j) = | | 0.304 | | R(d2i, d2j) = | | -0.033 | | |
| | R(e1i, e2i) = | | 0.304 | | R(d1i, d2i) = | | -0.095 | | |
| | R(s, d1i) = | | -0.326 | | R(s, d2i) = | | 0.182 | | |
| ----- | | | | | | | | | |
| | FL1 | FL2 | FLmed | FLdiff | e1i | e2i | d1i | d2i | kvot _v |
| var | 0.049 | 0.180 | 0.097 | 0.018 | 0.135 | 0.497 | 0.104 | 0.335 | 30.5 |
| stand | 0.221 | 0.424 | 0.311 | 0.133 | 0.368 | 0.705 | 0.323 | 0.579 | 16.7 |
| ----- | | | | | | | | | |
| ----- | | | | | | | | | |
| Period 2 | försökskus 5 | | | längd 648 timmar | | | -5.3 < Tute < 9.6 | | |
| reglering baserad på FL1 och FL2 | | | | förutsättning | | n=12 | r11=r22=1.000*r12 | | |
| Ber korrelationskoefficienter: | | | | R(FL1, FL2) = | | 0.835 | | | |
| | R(e1i, e2j) = | | 0.300 | | R(d1i, d1j) = | | -0.047 | | |
| | R(e2i, e2j) = | | 0.300 | | R(d2i, d2j) = | | -0.027 | | |
| | R(e1i, e2i) = | | 0.300 | | R(d1i, d2i) = | | -0.047 | | |
| | R(s, d1i) = | | 0.066 | | R(s, d2i) = | | -0.079 | | |
| ----- | | | | | | | | | |
| | FL1 | FL2 | FLmed | FLdiff | e1i | e2i | d1i | d2i | kvot _v |
| var | 0.047 | 0.032 | 0.036 | 0.003 | 0.132 | 0.090 | 0.088 | 0.061 | 32.6 |
| stand | 0.217 | 0.180 | 0.190 | 0.059 | 0.363 | 0.300 | 0.297 | 0.248 | 17.9 |
| ----- | | | | | | | | | |

TAB.4.6-4.7 Resultat av datorberäkningar för
period 1, försökshus 5 med konstanten
A=1.05 respektive 1.073.

| | | | | |
|----------------------------------|-------------------|---------------|--------------------|--|
| Period 1 försökshus 5 | längd 1008 timmar | | -1.0 < Tute < 17.0 | |
| reglering baserad på FL1 och FL2 | förutsättning | n=12 | r11=r22=1.050*r12 | |
| Ber korrelationskoefficienter: | R(FL1, FL2) = | 0.930 | | |
| R(e1i, e2j) = | 0.788 | R(d1i, d1j) = | 0.078 | |
| R(e2i, e2j) = | 0.788 | R(d2i, d2j) = | 0.045 | |
| R(e1i, e2i) = | 0.751 | R(d1i, d2i) = | -0.133 | |
| R(s, d1i) = | -0.126 | R(s, d2i) = | 0.114 | |

| | FL1 | FL2 | FLmed | FLdiff | e1i | e2i | d1i | d2i | kvot _v |
|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------------------|
| medel | 21.66 | 21.02 | 21.34 | 0.32 | | | | | |
| var | 0.117 | 0.150 | 0.128 | 0.005 | 0.145 | 0.186 | 0.033 | 0.041 | 77.5 |
| stand | 0.342 | 0.387 | 0.358 | 0.070 | 0.381 | 0.431 | 0.182 | 0.203 | 52.6 |

| | | | | |
|----------------------------------|-------------------|---------------|--------------------|--|
| Period 1 försökshus 5 | längd 1008 timmar | | -1.0 < Tute < 17.0 | |
| reglering baserad på FL1 och FL2 | förutsättning | n=12 | r11=r22=1.073*r12 | |
| Ber korrelationskoefficienter: | R(FL1, FL2) = | 0.930 | | |
| R(e1i, e2j) = | 1.000 | R(d1i, d1j) = | 1.000 | |
| R(e2i, e2j) = | 1.000 | R(d2i, d2j) = | 1.000 | |
| R(e1i, e2i) = | 0.932 | R(d1i, d2i) = | -0.958 | |
| R(s, d1i) = | -0.321 | R(s, d2i) = | 0.321 | |

| | FL1 | FL2 | FLmed | FLdiff | e1i | e2i | d1i | d2i | kvot _v |
|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------------------|
| medel | 21.66 | 21.02 | 21.34 | 0.32 | | | | | |
| var | 0.117 | 0.150 | 0.128 | 0.005 | 0.117 | 0.150 | 0.005 | 0.005 | 96.1 |
| stand | 0.342 | 0.387 | 0.358 | 0.070 | 0.342 | 0.387 | 0.072 | 0.072 | 80.3 |

Däremot har det ingen betydelse om beräkningarna, som hittills, utgår från timmedelvärden eller om exempelvis dygnsmedelvärden används. Fallet med dygnsmedelvärden visas i TAB.4.9. Frånluftsoch lägenhetstemperaturernas varians minskar något men värdet på den möjliga minskningen av standardavvikelsen är oförändrad. Detta ska utnyttjas i nästa avsnitt när veckomedelvärden ska användas.

Tidigare påpekades att förhållandet mellan gemensam och individuell variation naturligt beror på de gemensamma störningarna, såsom solinstrålning. En annan sådan faktor är valet av framkopplingskurva. Ett sämre val av framkopplingskurva hade givit större gemensam variation och därmed ett större värde på k .

Sammanfattningsvis så gav detta avsnitt inget slutgiltigt besked om hur mycket lägenhetstemperaturernas variation kan minska vid central återkoppling. Mot bakgrund av att det var ett gynnsamt fall som analyserats så gav det dock en indikation på att det i början av kapitlet uppställda kravet, att åtminstone hälften av variationen ska kunna regleras bort, inte kan uppfyllas. De individuella störningarna tycks alltså vara för stora, vilket medför att temperaturvariationerna i olika lägenheter inte blir tillräckligt lika.

TAB.4.8 Samma som FIG.4.4a, men med förutsättningen att från-
luften kommer från 6 lägenheter istället för 12 lägenheter

| Period 1 | försökshus 5 | längd 1008 timmar | | -1.0 < Tute < 17.0 | | | | | |
|----------------------------------|---------------|-------------------|---------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------------------|
| reglering baserad på FL1 och FL2 | | förutsättning | n= 6 | r11=r22=1.000*r12 | | | | | |
| Ber korrelationskoefficienter: | | R(FL1, FL2) = | | 0.930 | | | | | |
| | R(e1i, e2j) = | 0.694 | R(d1i, d1j) = | -0.063 | | | | | |
| | R(e2i, e2j) = | 0.694 | R(d2i, d2j) = | -0.091 | | | | | |
| | R(e1i, e2i) = | 0.694 | R(d1i, d2i) = | -0.098 | | | | | |
| | R(s, d1i) = | -0.109 | R(s, d2i) = | 0.097 | | | | | |
| | FL1 | FL2 | FLmed | FLdiff | e1i | e2i | d1i | d2i | kvot _v |
| medel | 21.66 | 21.02 | 21.34 | 0.32 | | | | | |
| var | 0.117 | 0.150 | 0.128 | 0.005 | 0.157 | 0.201 | 0.045 | 0.057 | 71.6 |
| stand | 0.342 | 0.387 | 0.358 | 0.070 | 0.396 | 0.449 | 0.213 | 0.238 | 46.7 |

TAB.4.9 Samma som FIG.4.4a, men beräknat från dygnsmedelvärden
av frånluftstemperaturerna istället för som tidigare
timmedelvärden

| Period 1 | försökshus 5 | längd 42 dygn | | 0.2 < Tute < 10.0 | | | | | |
|----------------------------------|---------------|---------------|---------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------------------|
| reglering baserad på FL1 och FL2 | | förutsättning | n=12 | r11=r22=1.000*r12 | | | | | |
| Ber korrelationskoefficienter: | | R(FL1, FL2) = | | 0.930 | | | | | |
| | R(e1i, e2j) = | 0.527 | R(d1i, d1j) = | -0.033 | | | | | |
| | R(e2i, e2j) = | 0.527 | R(d2i, d2j) = | -0.044 | | | | | |
| | R(e1i, e2i) = | 0.527 | R(d1i, d2i) = | -0.048 | | | | | |
| | R(s, d1i) = | -0.071 | R(s, d2i) = | 0.063 | | | | | |
| | FL1 | FL2 | FLmed | FLdiff | e1i | e2i | d1i | d2i | kvot _v |
| medel | 21.66 | 21.02 | 21.34 | 0.32 | | | | | |
| var | 0.097 | 0.123 | 0.106 | 0.004 | 0.171 | 0.216 | 0.078 | 0.098 | 54.5 |
| stand | 0.311 | 0.350 | 0.325 | 0.064 | 0.413 | 0.465 | 0.280 | 0.313 | 32.6 |

4.4 Analys av mätdata - lägenhetstemperaturer

Att försöka bestämma variationen i lägenhetstemperaturen utifrån frånluftstemperaturens variation är som vi såg i förra avsnittet en ganska bakvänd metod. Det är betydligt enklare att gå motsatt väg: att utifrån lägenhetstemperaturerna bilda ett medelvärde som med hjälp av regleringen ska hållas konstant. För att klara detta antar vi att det finns ett perfekt reglersystem som kan öka eller minska lägenhetstemperaturerna - lika mycket i alla lägenheter - så att medelvärdet hålls konstant.

Minskningen av variationerna i lägenhetstemperaturerna, med och utan reglering, blir olika för olika lägenheter men den genomsnittliga minskningen beräknas som tidigare med kvoten k enligt ekv (4.14). Detta ger den teoretiska gränsen för vilken förbättring central återkoppling kan ge.

Nu har dock inga lägenhetstemperaturer mätts i försökshuset. De lägenhetstemperaturer som ska användas i detta avsnitt kommer från kvarteret Hussvalan i Malmö, som nu ska beskrivas närmare.

Hussvalan

Malmö Kommunala Bostadsaktiebolag förvaltar 5 st 3-våningshus i kvarteret Hussvalan i Malmö. Husen, som kommer att benämnas hus A, B, C, D och E, innehåller tillsammans 88 lägenheter. Byggår är 1950-52. Fyra av huskropparna, A-D, är orienterade i samma riktning och vinkelrätt mot det femte huset, E, se FIG.4.4.

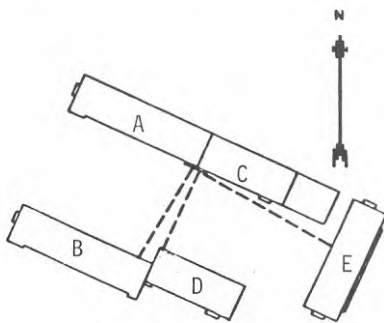


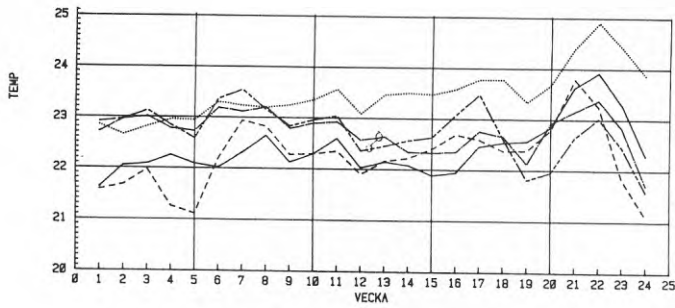
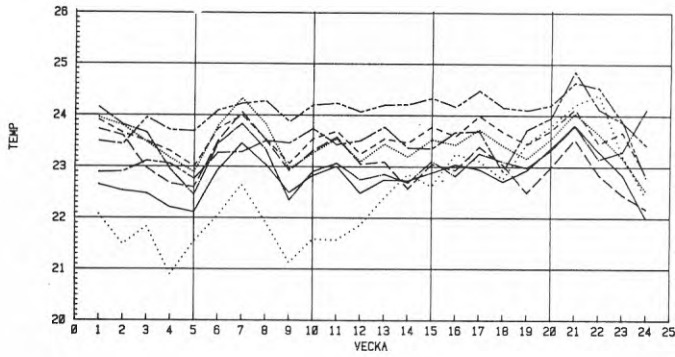
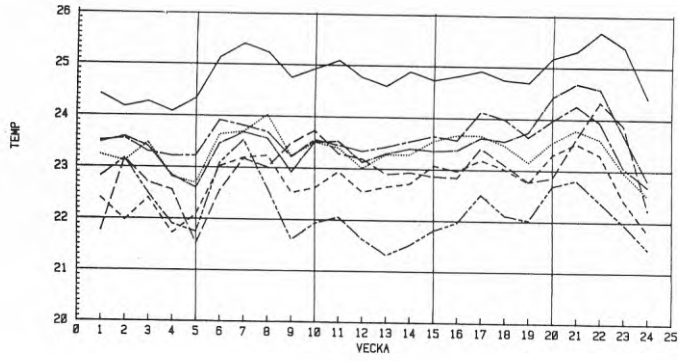
FIG.4.4 Situationsplan för kvarteret Hussvalan (från Fredlund (1985)).

De fem husen har en gemensam värmecentral som är ansluten till fjärrvärmenätet. Uppvärmningssystemet är ett tvårörs radiatorsystem med gemensam shuntning för alla fem husen. Radiatortermostatventiler installerades 1983 på samtliga radiatorer och samtidigt utfördes en injustering av radiatorsystemet. En konventionell reglercentral för utetemperaturkompensering styr framledningstemperaturen. Ventilationssystemet är av självdragstyp.

Kvarteret Hussvalan har tidigare varit försöksobjekt i ett byggforskningsprojekt "Energimätning i flerbostadshus", rapporterat i Fredlund (1985), (1987). Dessa rapporter innehåller en utförlig beskrivning av husen.

I samband med det nämnda forskningsprojektet mättes lägenhetstemperaturen i 35 lägenheter, vilket utgör 40% av samtliga lägenheter. Det är dessa mätdata vi ska använda i detta avsnitt. Endast veckomedelvärden registrerades och mätdata finns tillgängligt för 29 veckor (vecka 8448-8524). FIG.4.5 visar samtliga lägenhetstemperaturer. FIG.4.6 visar medeltemperaturen för varje hus. De fyra första veckorna saknas i dessa figurer.

Som väntat är medeltemperaturerna relativt lika medan de olika lägenhetstemperaturerna kan skilja sig mycket från varandra.



HUSSVALAN
85. 01. 01-85. 06. 17

FIG.4.5 Samtliga mätta lägenhetstemperaturer för hus A, B och C (från Fredlund (1985)).

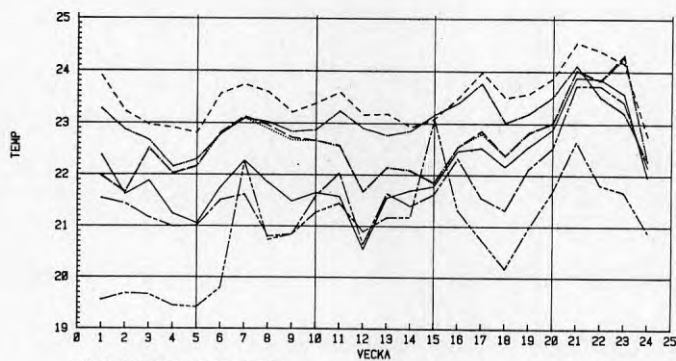
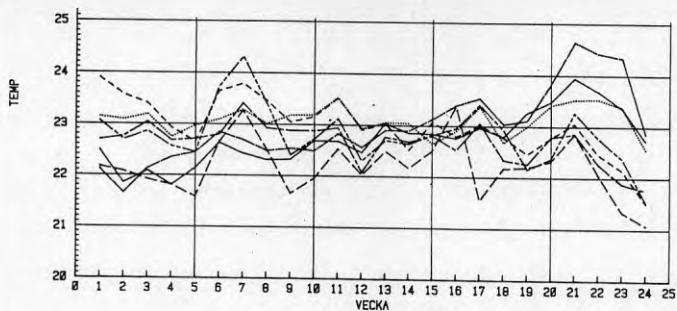
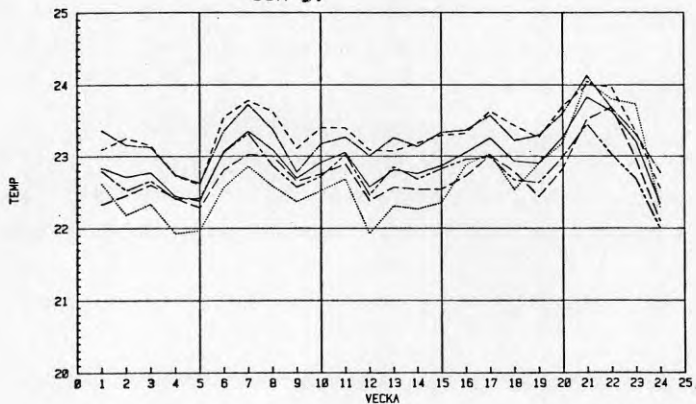


FIG.A5 Lägenhetstemperaturer i hus E

HUSSVALAN
85. 01. 01-85. 06. 17

FIG.4.5 (forts) Samtliga mätta lägenhetstemperaturer för hus D och E.



HUSSVALAN
85. 01. 01-85. 06. 17

FIG.4.6 Medeltemperaturerna för hus A-E och totalmedeltemperatur.

Beräkningar

Beräkningarna blir enkla. De sju lägenhetstemperaturerna i hus A betecknas med A1-A7, de åtta i hus B betecknas B1-B8 osv för de 35 lägenhetstemperaturerna. För varje hus beräknas en medeltemperatur för var och en av de 29 veckorna. Dessa betecknas med $E_i(A)-E_i(E)$ för de fem husen. Där index i anger veckan. Även totalmedeltemperaturerna för de fem husen beräknas för varje vecka. Denna betecknas $E_i(TOT)$. Slutligen beräknas tidsmedelvärden av de 29 veckovärdena för husmedeltemperatur och totalmedeltemperatur. Dessa sex värden betecknas med TMA-TME och TMTOT.

Den centrala återkopplingen sker normalt från totalmedeltemperaturen. Rätt regleringrepp, S_i , håller den förra konstant, dvs gör $E_i(TOT)=\text{konstant}$. Eftersom vi nu bara är intresserade av variationens storlek kan vi välja samma nivå som utan reglering

$$E_i(TOT)+S_i=TMTOT \quad (4.93)$$

Rätt regleringrepp ska då ge en temperaturändring i alla lägenheter som är

$$S_i=TMTOT-E_i(TOT) \quad (4.94)$$

Detta värde beräknas för varje vecka i och adderas till samtliga lägenhetstemperaturer. De nya lägenhetstemperaturerna och husmedelvärdena kan nu jämföras med de gamla utan återkoppling och kvoten (4.14) som angav möjlig minskning av variansen i lägenhetstemperaturerna kan beräknas.

Vi ska också se på fallet att varje hus återkopplas separat från husmedelvärdet. Rätt regleringrepp, med oförändrad nivå, ska för exempelvis hus A medföra att husmedeltemperaturen är konstant

$$E_i(A)+SA_i=TMA \quad (4.95)$$

För att uppnå detta ska temperaturändringen för varje vecka beräknas som

$$SA_i=TMA-E_i(A) \quad (4.96)$$

Resultat

De totalt knappt tusen lägenhetstemperaturerna (veckomedelvärden) från Hussvalan som delvis visas i FIG.4.9 har utgjort indata för datorberäkningar.

Tre reglerfall behandlas

- 1) Ingen central återkoppling
(verkliga värden)
- 2) Central återkoppling från husmedeltemperaturen
(beräknade värden)
- 3) Central återkoppling från totalmedeltemperaturen
(beräknade värden)

Exempel på temperaturförloppen för de tre fallen utan och med återkoppling visas i FIG.4.7-4.9. Fyra av de sju mätta lägenhetstemperaturerna i hus A har valts ut och visas tillsammans med husmedelvärdet A. Av diagrammen framgår tydligt att förbättringen blir stor i husmedeltemperaturen men klart mindre i lägenhetstemperaturerna.

Ett annat sätt att presentera lägenhetstemperaturerna är att rita deras fördelningsfunktioner. I FIG.4.10 visas de tre fallen med och utan återkoppling för de fyra utvalda lägenhetstemperaturerna i hus A.

I FIG.4.11 visas även de fem husmedeltemperaturerna och totalmedeltemperaturen för fall 1 och 3. Det framgår återigen att variationen i husmedeltemperaturerna kan minskas betydligt medan minskningen av variationerna i lägenhetstemperaturerna blir måttlig.

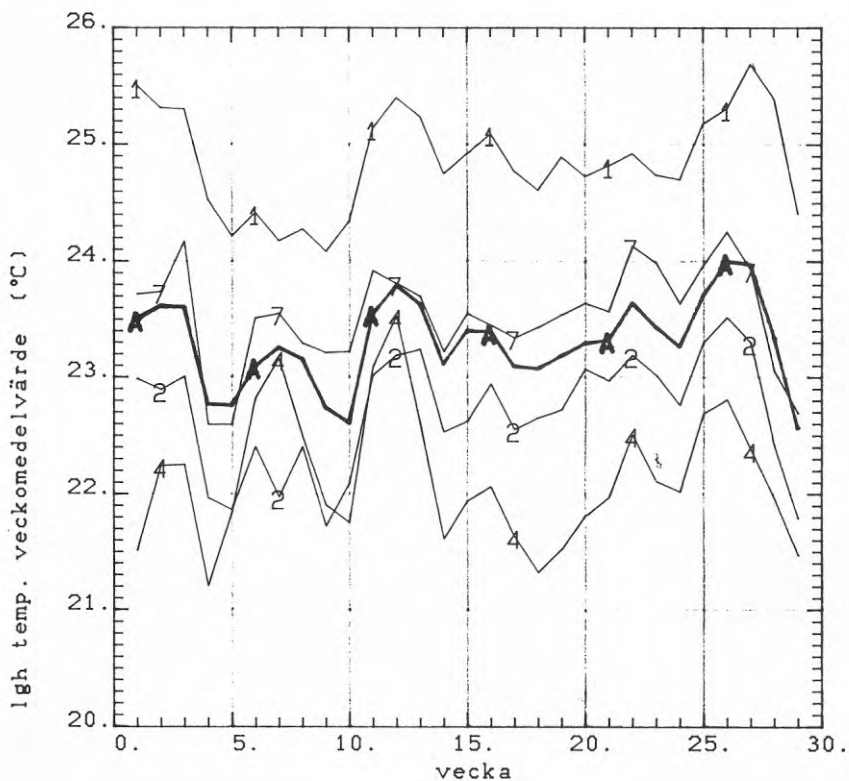


FIG.4.7 Fyra av de sju mätta lägenhetstemperaturerna och husmedeltemperaturen (A) för Hussvalan, hus A. (Veckonumereringen är löpande från 1 till 29 och stämmer därför inte med veckonumereringen i FIG.4.5 och 4.6).
Uppmätta temperaturer.

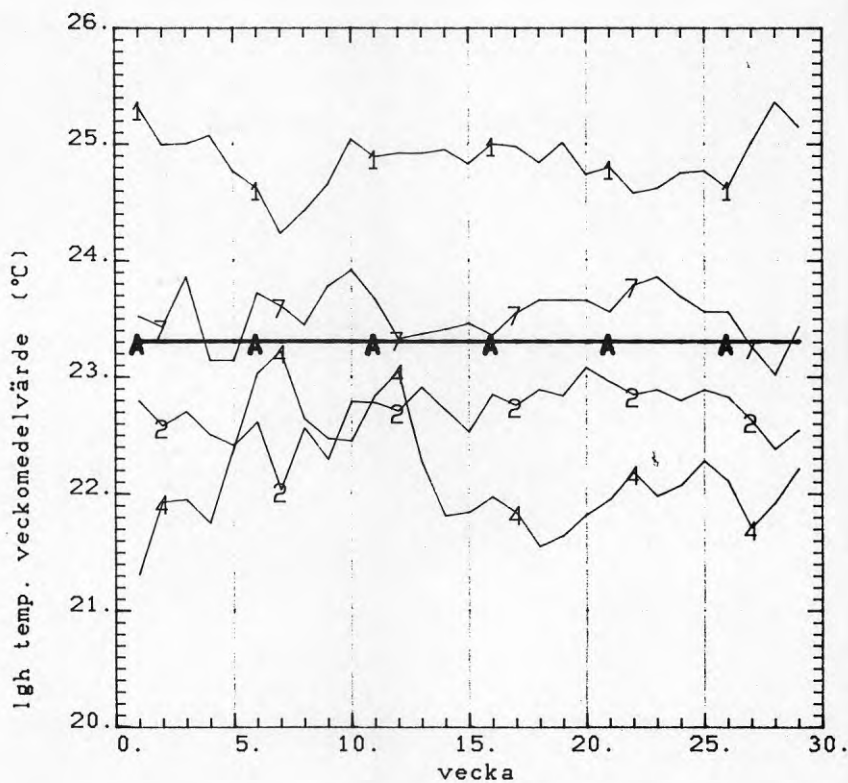


FIG.4.8 Fyra av de sju mätta lägenhetstemperaturerna och husmedeltemperaturen (A) för Hussvalan, hus A. (Veckonumereringen är löpande från 1 till 29 och stämmer därför inte med veckonumereringen i FIG.4.5 och 4.6).
Beräknade temperaturer för fall 2: återkoppling från husmedeltemperatur.

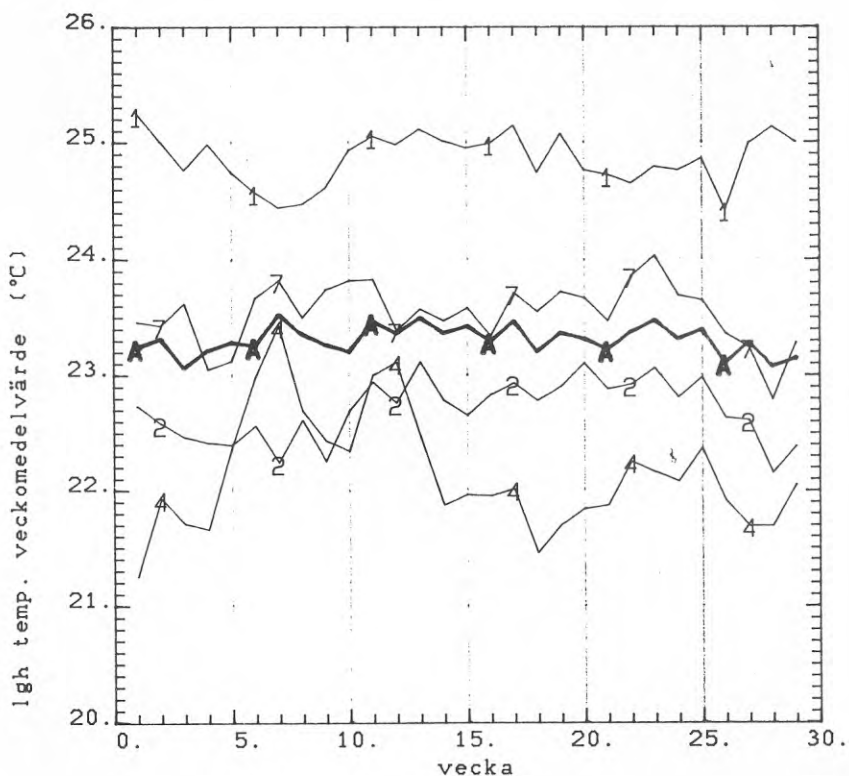


FIG.4.9 Fyra av de sju mätta lägenhetstemperaturerna och husmedeltemperaturen (A) för Hussvalan, hus A. (Veckonumereringen är löpande från 1 till 29 och stämmer därför inte med veckonumereringen i FIG.4.5 och 4.6).
Beräknade temperaturer för fall 3: återkoppling från totalmedeltemperaturen.

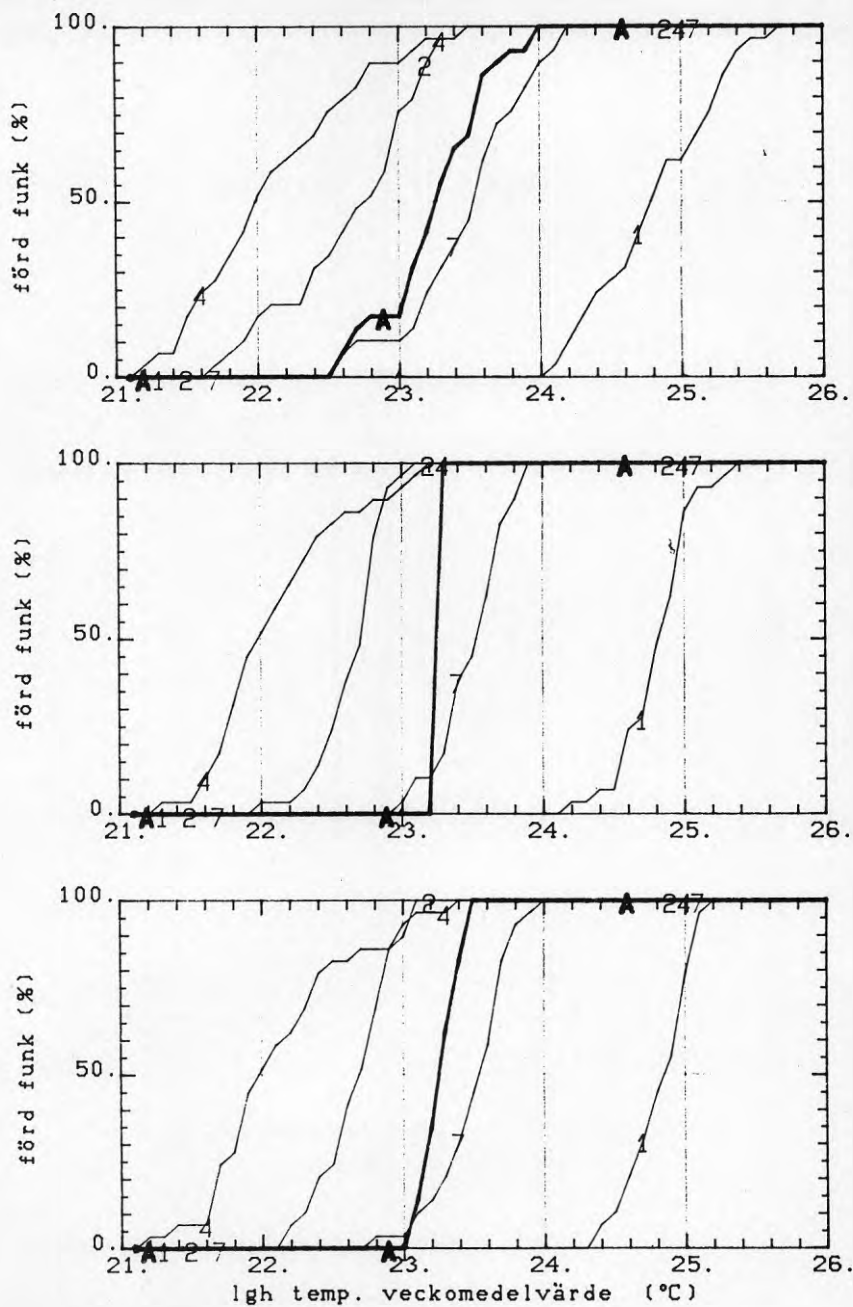


FIG.4.10 Fördelningsfunktioner för temperaturförloppen i
FIG.4.7-4.9.

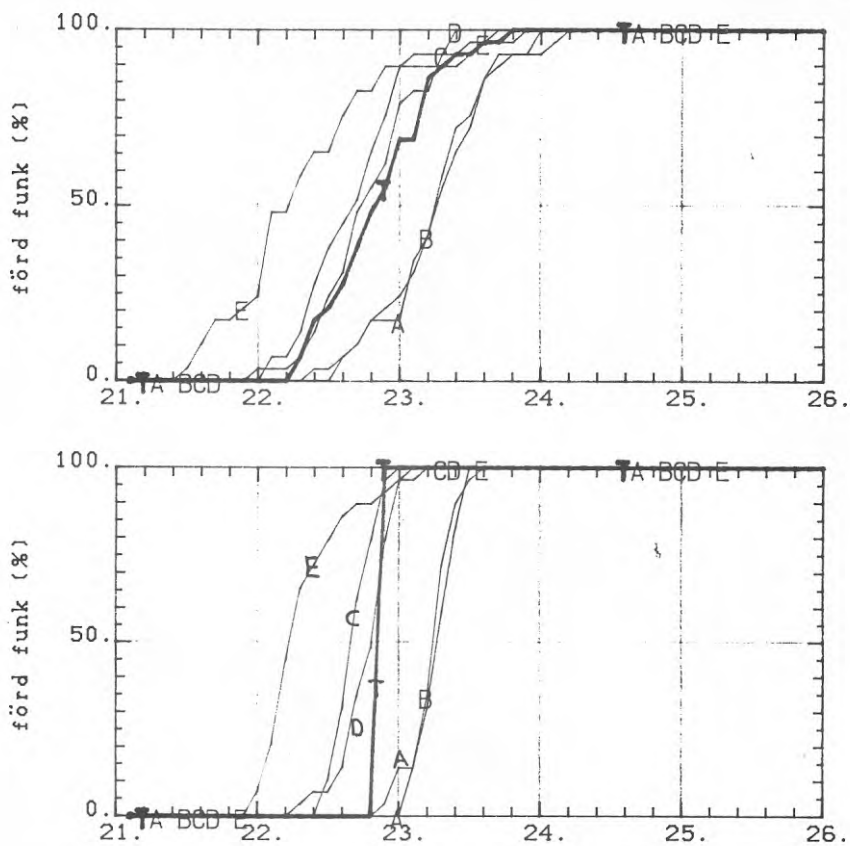


FIG.4.11 Fördelningsfunktionen för husmedeltemperaturerna A,B,C,D och E utan central återkoppling (överst) och med central återkoppling från totalmedeltemperaturen (underst). Även totalmedeltemperaturen (markerad med T) har ritats.

Den teoretiskt möjliga minskningen av lägenheternas standardavvikelse för de två reglerfallen har också beräknats och framgår av tabellredovisningen nedan. För samtliga lägenheter har innetemperaturens medelvärde, standardavvikelse, max- och minimivärde beräknats för de tre reglerfallen. TAB.4.10 nedan visar beräkningsresultaten för hus A. Observera att kvoten avser här värdet k_s , dvs minskningen i standardavvikelse.

TAB.4.10 Beräknade statistikuppgifter för Hussvalan, hus A, med och utan central återkoppling.

 HUSSVALAN HUS A (7 LGH) 841127-850617 29 veckomedelvärden

- 1) Uppmätta lägenhetstemperaturer (utan återkoppling)
 2) Beräknade lägenhetstemperaturer vid återkoppling från husmedelvärdet
 3) Beräknade lägenhetstemperaturer vid återkoppling från totalmedelvärdet
 kvot = minskad standardavvikelse vid återkoppling
-

1) utan återkoppling

| | husmedel | lägenhetstemperaturer | | | | | | |
|--------|----------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | E(A) | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | A7 |
| antal | 29 | 29 | 29 | 29 | 29 | 29 | 29 | 29 |
| medel | 23.30 | 24.86 | 22.69 | 23.55 | 22.15 | 22.94 | 23.39 | 23.53 |
| st.av. | 0.38 | 0.44 | 0.50 | 0.50 | 0.58 | 0.60 | 0.37 | 0.43 |
| max | 24.00 | 25.69 | 23.52 | 24.68 | 23.53 | 24.33 | 24.03 | 24.25 |
| min | 22.56 | 24.08 | 21.72 | 22.60 | 21.20 | 21.52 | 22.51 | 22.59 |

2) Återkoppling som ger $E_i(A)=$ konstant

| | E(A)-SA | A1-SA | A2-SA | A3-SA | A4-SA | A5-SA | A6-SA | A7-SA | |
|-------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| st.av. | 0.00 | 0.24 | 0.23 | 0.26 | 0.47 | 0.45 | 0.23 | 0.23 | |
| max | 23.30 | 25.36 | 23.08 | 24.02 | 23.22 | 23.84 | 23.94 | 23.92 | |
| min | 23.30 | 24.23 | 22.03 | 23.12 | 21.31 | 21.98 | 22.93 | 23.02 | |
| kvot _s | 100% | 45% | 54% | 48% | 19% | 25% | 38% | 45% | medel=39% |

3) Återkoppling som ger $E_i(TOT)=$ konstant

| | E(A)-S | A1-S | A2-S | A3-S | A4-S | A5-S | A6-S | A7-S | |
|-------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| st.av. | 0.12 | 0.22 | 0.26 | 0.23 | 0.52 | 0.48 | 0.26 | 0.27 | |
| max | 23.52 | 25.24 | 23.11 | 24.10 | 23.43 | 23.76 | 23.89 | 24.03 | |
| min | 23.06 | 24.42 | 22.15 | 23.18 | 21.25 | 21.93 | 22.70 | 22.79 | |
| kvot _s | 68% | 50% | 48% | 54% | 10% | 20% | 30% | 36% | medel=35% |

Hus A har fem stycken mätta lägenheter. Husmedelvärdet $E_i(A)$ visas i kolumnen längst till vänster. I fall 2 med återkoppling från just husmedelvärdet så hålls detta värde konstant vilket motsvarar att 100% av standardavvikelsen regleras bort. Temperatur-

variationen i lägenheterna minskar däremot inte speciellt mycket. I genomsnitt regleras 39% av variationen bort medan 61% kvarstår. Fall 3 med återkoppling från totalmedelvärdet är inte så mycket sämre, 35% av variationen regleras bort.

Motsvarande beräkningar för husen B, C, D och E redovisas i TAB.4.11-4.14. Liknande resultat uppnås. Genomsnittet för hur mycket standardavvikelsen minskar har sammanställts i TAB.4.15.

TAB.4.11 Beräknade statistikuppgifter för Hussvalan, hus B, med och utan central återkoppling.

 HUSSVALAN HUS B (8 LGH) 841127-850617 29 veckomedelvärden

- 1) Uppmätta lägenhetstemperaturer (utan återkoppling)
 2) Beräknade lägenhetstemperaturer vid återkoppling från husmedelvärdet
 3) Beräknade lägenhetstemperaturer vid återkoppling från totalmedelvärdet
 kvot = minskad standardavvikelse vid återkoppling
-

1) utan återkoppling

| | husmedel | lägenhetstemperaturer | | | | | | | |
|---------|----------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | E(B) | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 | B7 | B8 |
| antal | 29 | 29 | 29 | 29 | 29 | 29 | 29 | 29 | 29 |
| medel | 23.27 | 22.79 | 23.60 | 23.30 | 23.98 | 23.15 | 23.50 | 23.49 | 22.38 |
| st. av. | 0.40 | 0.42 | 0.32 | 0.49 | 0.39 | 0.46 | 0.41 | 0.51 | 0.89 |
| max | 24.18 | 23.81 | 24.28 | 24.15 | 24.64 | 24.06 | 24.32 | 24.86 | 24.40 |
| min | 22.42 | 22.00 | 22.83 | 22.34 | 22.80 | 22.18 | 22.52 | 22.54 | 20.90 |

2) återkoppling som ger $E_i(B)=\text{konstant}$

| | E(B)-SB | B1-SB | B2-SB | B3-SB | B4-SB | B5-SB | B6-SB | B7-SB | B8-SB | |
|-------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| st. av. | 0.00 | 0.23 | 0.26 | 0.48 | 0.37 | 0.41 | 0.28 | 0.35 | 0.70 | |
| max | 23.27 | 23.22 | 24.30 | 24.60 | 24.37 | 23.95 | 24.25 | 24.00 | 23.99 | |
| min | 23.27 | 22.03 | 23.00 | 22.72 | 22.90 | 22.42 | 23.01 | 22.81 | 21.43 | |
| kvot _s | 100% | 45% | 19% | 2% | 5% | 11% | 31% | 31% | 21% | m. =21% |

3) återkoppling som ger $E_i(TOT)=\text{konstant}$

| | E(B)-S | B1-S | B2-S | B3-S | B4-S | B5-S | B6-S | B7-S | B8-S | |
|-------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| st. av. | 0.16 | 0.15 | 0.28 | 0.53 | 0.32 | 0.44 | 0.30 | 0.31 | 0.68 | |
| max | 23.64 | 23.04 | 24.09 | 24.70 | 24.44 | 23.89 | 24.12 | 24.02 | 23.71 | |
| min | 22.87 | 22.40 | 22.76 | 22.46 | 23.26 | 22.16 | 22.91 | 22.86 | 21.38 | |
| kvot _s | 60% | 64% | 12% | -8% | 18% | 4% | 27% | 39% | 24% | m. =22% |

TAB.4.12 Beräknade statistikuppgifter för Hussvalan, hus C,
med och utan central återkoppling.

| | | | |
|-----------|-----------------|---------------|---------------------|
| HUSSVALAN | HUS C (5 LGH) | 841127-850617 | 29 veckomedelvärden |
|-----------|-----------------|---------------|---------------------|

1) Uppmätta lägenhetstemperaturer (utan återkoppling)
 2) Beräknade lägenhetstemperaturer vid återkoppling från husmedelvärdet (SC)
 3) Beräknade lägenhetstemperaturer vid återkoppling från totalmedelvärdet (S)
 kvot = minskad standardavvikelse vid återkoppling

1) utan återkoppling

| | husmedel | lägenhetstemperaturer | | | | |
|---------|----------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|
| | E(C) | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 |
| antal | 29 | 29 | 29 | 29 | 29 | 29 |
| medel | 22.72 | 22.45 | 22.24 | 22.67 | 22.78 | 23.47 |
| st. av. | 0.37 | 0.53 | 0.63 | 0.42 | 0.47 | 0.51 |
| max | 23.69 | 23.91 | 23.78 | 23.38 | 23.54 | 24.90 |
| min | 22.10 | 21.63 | 21.09 | 21.71 | 21.58 | 22.65 |

2) återkoppling som ger C=konstant

| | E(C)-SC | C1-SC | C2-SC | C3-SC | C4-SC | C5-SC | |
|-------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| st. av. | 0.00 | 0.33 | 0.36 | 0.32 | 0.44 | 0.35 | |
| max | 22.72 | 23.05 | 22.99 | 23.22 | 23.30 | 24.47 | |
| min | 22.72 | 21.93 | 21.54 | 22.13 | 21.84 | 22.91 | |
| kvot _S | 100% | 38% | 43% | 24% | 6% | 31% | medel=28% |

3) återkoppling som ger S=konstant

| | E(C)-S | C1-S | C2-S | C3-S | C4-S | C5-S | |
|-------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| st. av. | 0.13 | 0.36 | 0.33 | 0.38 | 0.48 | 0.36 | |
| max | 23.00 | 23.22 | 22.89 | 23.32 | 23.37 | 24.44 | |
| min | 22.49 | 21.79 | 21.56 | 22.03 | 21.63 | 22.81 | |
| kvot _S | 65% | 32% | 48% | 10% | -2% | 29% | medel=23% |

TAB.4.13 Beräknade statistikuppgifter för Hussvalan , hus D,
med och utan central återkoppling.

HUSSVALAN HUS D (7 LGH) 841127-850617 29 veckomedelvärden

- 1) Uppmätta lägenhetstemperaturer (utan återkoppling)
 2) Beräknade lägenhetstemperaturer vid återkoppling från husmedelvärdet
 3) Beräknade lägenhetstemperaturer vid återkoppling från totalmedelvärdet
 kvot = minskad standardavvikelse vid återkoppling
-

1) utan återkoppling

| | husmedel E(D) | lägenhetstemperaturer | | | | | | |
|---------|------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 | D6 | D7 |
| antal | 29 | 29 | 29 | 29 | 29 | 29 | 29 | 29 |
| medel | 22.81 | 22.81 | 23.08 | 22.95 | 22.85 | 22.14 | 23.16 | 22.68 |
| st. av. | 0.35 | 0.56 | 0.56 | 0.73 | 0.58 | 0.54 | 0.36 | 0.38 |
| max | 23.45 | 23.94 | 24.12 | 24.64 | 24.31 | 23.38 | 23.92 | 23.41 |
| min | 22.00 | 21.81 | 21.51 | 21.65 | 21.53 | 21.07 | 22.55 | 21.76 |

2) återkoppling som ger $E_i(D)$ =konstant

| | E(D)-SD | D1-SD | D2-SD | D3-SD | D4-SD | D5-SD | D6-SD | D7-SD | |
|-------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| st. av. | 0.00 | 0.44 | 0.46 | 0.61 | 0.36 | 0.39 | 0.23 | 0.31 | |
| min | 22.81 | 21.93 | 22.24 | 21.94 | 22.18 | 21.37 | 22.63 | 22.00 | |
| kvot _s | 100% | 21% | 18% | 16% | 38% | 28% | 36% | 18% | medel=25% |

3) återkoppling som ger $E_i(TOT)$ =konstant

| | E(D)-S | D1-S | D2-S | D3-S | D4-S | D5-S | D6-S | D7-S | |
|-------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| st. av. | 0.17 | 0.38 | 0.59 | 0.49 | 0.47 | 0.46 | 0.27 | 0.43 | |
| max | 23.07 | 23.32 | 24.06 | 24.07 | 23.89 | 23.29 | 23.57 | 23.30 | |
| min | 22.33 | 22.00 | 21.76 | 21.92 | 22.04 | 21.07 | 22.63 | 21.57 | |
| kvot _s | 51% | 32% | -5% | 33% | 19% | 15% | 25% | -13% | medel=15% |

TAB.4.14 Beräknade statistikuppgifter för Hussvalan, hus E,
med och utan central återkoppling.

 HUSSVALAN HUS E (7 LGH) 841127-850617 29 veckomedelvärden

- 1) Uppmätta lägenhetstemperaturer (utan återkoppling)
 2) Beräknade lägenhetstemperaturer vid återkoppling från husmedelvärdet
 3) Beräknade lägenhetstemperaturer vid återkoppling från totalmedelvärdet
 kvot = minskad standardavvikelse vid återkoppling
-

1) utan återkoppling

| | husmedel | lägenhetstemperaturer | | | | | | |
|---------|----------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | E(E) | E1 | E2 | E3 | E4 | E5 | E6 | E7 |
| antal | 29 | 29 | 29 | 29 | 29 | 29 | 29 | 29 |
| medel | 22.36 | 22.14 | 23.50 | 23.08 | 20.95 | 22.55 | 22.54 | 21.77 |
| st. av. | 0.58 | 0.79 | 0.47 | 0.45 | 0.95 | 0.68 | 0.67 | 0.79 |
| max | 23.85 | 23.88 | 24.54 | 24.11 | 23.09 | 24.32 | 24.27 | 23.73 |
| min | 21.54 | 20.55 | 22.76 | 22.15 | 19.42 | 21.66 | 21.64 | 20.65 |

2) återkoppling som ger $E_i(E)$ =konstant

| | E(E)-SE | E1-SE | E2-SE | E3-SE | E4-SE | E5-SE | E6-SE | E7-SE | |
|-------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| st. av. | 0.00 | 0.34 | 0.29 | 0.37 | 0.67 | 0.33 | 0.32 | 0.37 | |
| max | 22.36 | 22.66 | 24.17 | 23.62 | 23.11 | 23.16 | 23.11 | 22.52 | |
| min | 22.36 | 21.27 | 23.00 | 22.06 | 19.84 | 21.87 | 21.85 | 20.90 | |
| kvot _s | 100% | 57% | 38% | 18% | 29% | 51% | 52% | 53% | medel=44% |

3) återkoppling som ger $E_i(TOT)$ =konstant

| | E(E)-S | E1-S | E2-S | E3-S | E4-S | E5-S | E6-S | E7-S | |
|-------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| st. av. | 0.29 | 0.54 | 0.21 | 0.24 | 0.76 | 0.46 | 0.45 | 0.59 | |
| max | 23.25 | 23.31 | 24.06 | 23.50 | 23.12 | 24.05 | 24.00 | 23.14 | |
| min | 22.00 | 20.92 | 23.10 | 22.67 | 19.71 | 21.76 | 21.81 | 20.67 | |
| kvot _s | 50% | 32% | 55% | 47% | 20% | 32% | 33% | 25% | medel=35% |

TAB.4.15 Möjlig minskning i temperaturernas standardavvikelse
 I. Vid central återkoppling från totalmedeltemperaturen
 II. Vid central återkoppling för varje hus från hus-
 medeltemperaturen.

| Hus | I. | | II. | |
|-------|---------------|--------------|---------------|--------------|
| | lägenhetstemp | husmedeltemp | lägenhetstemp | husmedeltemp |
| A | 35% | 68% | 39% | 100% |
| B | 22% | 60% | 21% | 100% |
| C | 28% | 65% | 23% | 100% |
| D | 15% | 51% | 25% | 100% |
| E | 35% | 50% | 44% | 100% |
| Medel | 26% | 59% | 30% | 100% |

I medeltal kan bara en fjärdedel av variationen i lägenhetstemperaturerna regleras bort med central återkoppling från totalmedelvärdet. Med separat återkoppling från husmedeltemperaturerna blir motsvarande andel en knapp tredjedel. Detta avser då den teoretiskt sett största variationsminskningen. Det är inte heller säkert att detta går att uppfylla i praktiken.

Dessutom tillkommer variationen mellan olika lägenheters medeltemperatur. Denna spridning påverkas inte primärt av den centrala återkopplingen utan måste åtgärdas med injustering av flödesfördelningen i radiatorsystemet eller lokal återkoppling i lägenheten/ rummet. Slutsatsen måste bli att totalt sett så kan central återkoppling endast ge en marginell minskning av temperaturvariationen i tid och rum.

För att nå bättre resultat krävs en fungerande lokal återkoppling i lägenheten eller rummet.

Felkällor

I det förra avsnittet konstaterades att det saknar betydelse om beräkningarna grundar sig på timme- eller dygnsmedelvärden när det gäller att bestämma kvoten för variationsminskningen. Vad som ändras vid långa perioder för tidsmedelvärdet är att variansen minskar. Men den minskar lika mycket för den gemensamma och den individuella störningen. Resonemanget torde kunna utsträckas för att gälla även veckomedelvärden.

Som tidigare nämnts finns radiatortermostatventiler i kvarteret Hussvalan sedan 1983. Hur påverkar detta de beräknade kvoterna? Svaret är att påverkan är ringa. Först och främst därför att dessa radiatortermostatventiler inte tycks ha någon större temperaturreglerande inverkan. Detta är också en slutsats i Fredlund (1985), där även värmesystemets flödesfördelning mellan husen har studerats.

Men även med fungerande radiatortermostatventiler skulle kvoterna inte förändras eftersom den totala återkopplingen har ungefär samma inverkan på gemensamma som individuella störningar. Den skillnad som kan finnas i detta avseende är i så fall att de gemensamma störningarna dämpas mindre. Detta eftersom en samtidig stryprning av många termostatventiler på grund av pumpkurvans karakteristik resulterar i högre tryckstegring i pumpen. Termostatventilens reglerande inverkan blir sålunda mindre vid gemensamma än individuella störningar och kvoten k kommer då att överskattas.

Vädringens inverkan är däremot svår att bedöma. Om inte vädringen hade ökat när innetemperaturen stigit så skulle den gemensamma andelen av variationen ökat. Med en bättre reglering hade även denna del tillgodogjorts. Vädring medför alltså att kvoten k underskattas. Eftersom vi nu inte kan bestämma vädringens omfattning med kännedom om enbart innetemperaturerna så kan vi inte bestämma hur mycket k underskattas.

I detta sammanhang kan vi också se på hur vädring påverkar lokal respektive central återkoppling från innetemperaturen. Båda sätten att återkoppla syftar ju till att ge en jämnare innetemperatur utan onödiga övertemperaturer vilket bör ge en lägre vädring. Den vädring som ändå finns påverkar regleringen på något olika sätt.

Vid lokal återkoppling (utan begränsningar) ger vädring upphov till en kraftig höjning av värmeavgivningen i det aktuella rummet. Vid central återkoppling, däremot, så minskar husets totala medeltemperatur endast lite och ger då bara en liten höjning i framledningstemperaturen. Men denna lilla temperaturhöjning kommer alla lägenheter tillgodo. För den totala värmeförseln blir resultatet detsamma.

En fördel med central återkoppling kan ändå vara att de lägenheter som vädras mycket får lägre temperatur än i fallet med lokal återkoppling. Detta skulle kunna minska långtidsvädring. Å andra sidan är det lättare att begränsa värmeförseln vid lokal återkoppling. Ett exempel på detta är maxbegränsning på radiatortermostatventiler. Att begränsa värmeförseln vid vädring i fallet med central återkoppling är däremot praktiskt omöjligt.

Jämförelse Hussvalan - Tingvallen

För att kunna jämföra resultatet för Hussvalan med resultaten från försökshuset på Tingvallen i förra avsnittet så har även korrelationskoefficienterna mellan husmedelvärdena för Hussvalan bestämts. Följande värden har beräknats

TAB.4.16 Parvisa korrelationskoefficienter mellan husmedelvärdena $E(A)$ - $E(E)$ och totalmedelvärdet $E(TOT)$

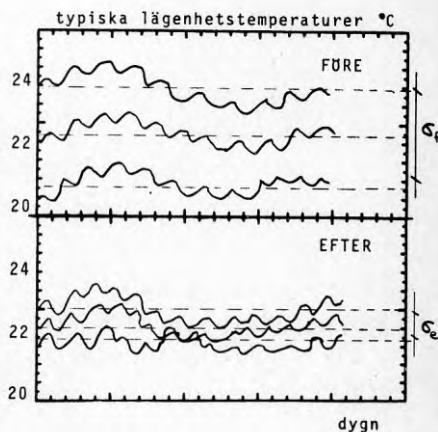
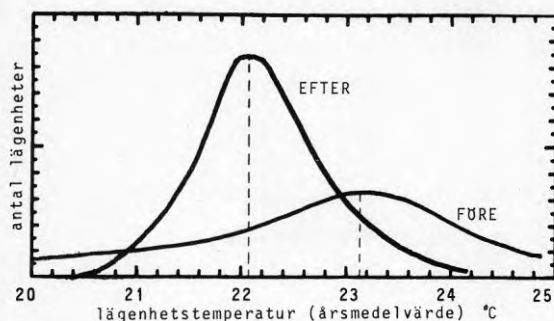
| | $E_i(A)$ | $E_i(B)$ | $E_i(C)$ | $E_i(D)$ | $E_i(E)$ |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $E_i(A)$ | 1.00 | | | | |
| $E_i(B)$ | 0.87 | 1.00 | | | |
| $E_i(C)$ | 0.91 | 0.78 | 1.00 | | |
| $E_i(D)$ | 0.85 | 0.86 | 0.80 | 1.00 | |
| $E_i(E)$ | 0.76 | 0.75 | 0.65 | 0.89 | 1.00 |
| $E_i(TOT)$ | 0.95 | 0.92 | 0.94 | 0.89 | 0.90 |

Det (aritmetiska) medelvärdet för korrelationerna är 0.80. I dessa medelvärden ingår i genomsnitt 6.8 lägenheter. För att direkt kunna jämföra detta värde med de från Tingvallen, som var medelvärden av 12 lägenheter, måste det korrigeras. Med hjälp av FIG.4.1 ser vi att korrelationskoefficienten 0.8 för 6 lägenheter motsvarar ca 0.88 för 12 lägenheter. Värdet 0.88 ska nu jämföras med korrelationskoefficienterna 0.97, 0.93, 0.83 och 0.84 mellan frånluftstemperaturerna på Tingvallen. Slutsatsen blir att husen på Hussvalan och Tingvallen är ganska lika när det gäller hur pass lik temperaturvariationen är mellan olika lägenheter. De beräknade kvoterna skulle kanske blivit något större på Tingvallen.

4.5 Sammanfattning

I samband med injustering av värmesystem finns en principbild som visar hur spridningen mellan olika lägenheters medeltemperatur minskar efter en injustering av flödesfördelningen i radiatorsystemet.

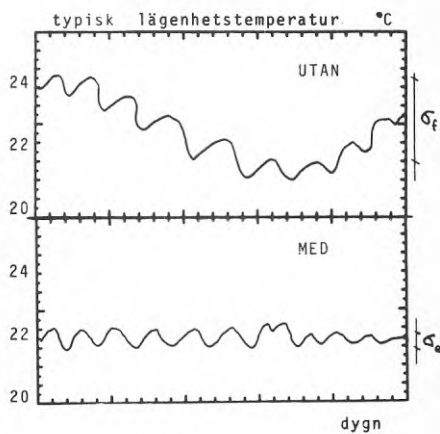
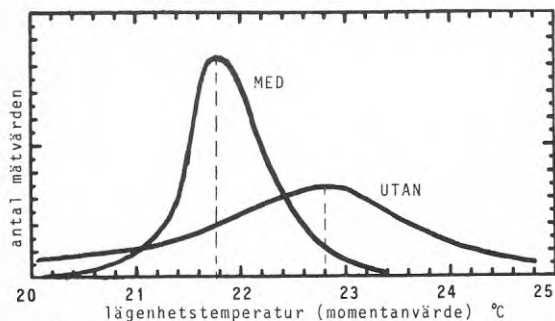
TEMPERATURSPRIDNING I LÄGENHETSTEMPERATUR
FÖRE OCH EFTER INJUSTERING.



Efter injusteringen kan man sänka framledningstemperaturen och därmed innetemperaturen. Vinsten kan ses som differensen mellan medelvärdena före och efter multiplicerad med antalet graddagar. Lägenhetstemperaturernas spridning i tiden däremot påverkas primärt inte av injusteringen utan beror på reglersystemet.

Central återkoppling har de komplementära egenskaperna. Temperaturspridningen i tiden kan minskas, men att olika lägenheter har olika medeltemperaturer påverkas ej. En motsvarande principbild för central återkoppling skulle intuitivt kunna se ut på följande sätt

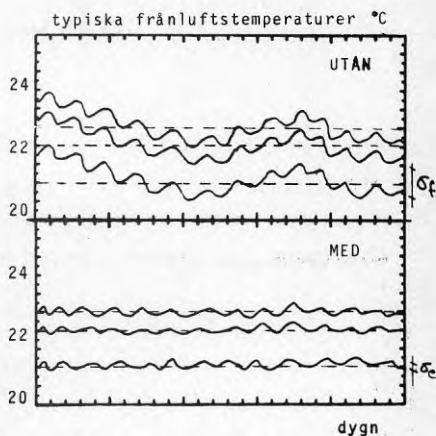
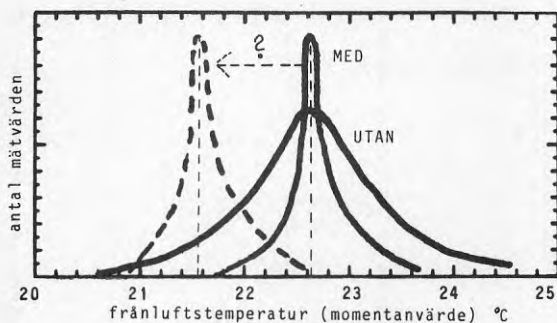
TEMPERATURSPRIDNING I LÄGENHETSTEMPERATUR
MED OCH UTAN CENTRAL ÅTERKOPPLING (INTUITIVT)



Med central återkoppling kan den önskade innetemperaturen väljas lägre utan att riskera att innetemperaturen under de kallaste dagarna (inne) blir lägre än tidigare. Vinsten kan liksom vid injustering bestämmas som medeltemperaturdifferensen multiplicerat med antalet graddagar.

I detta projekt har av ekonomiska och tekniska skäl inga lägenhetstemperaturer uppmätts i försökshusen. Den genomsnittliga lägenhetstemperaturen har istället skattats som medelvärdet av några frånluftstemperaturer. Med central återkoppling så har variationen i frånluftstemperaturerna kunnat minskats betydligt (se även RoS, kap 8). Principbilden för hur temperaturspridningen i frånluftstemperaturen minskar får följande utseende

TEMPERATURSPRIDNING I FRÅNLUFTSTEMPERATUR
MED OCH UTAN CENTRAL ÅTERKOPPLING

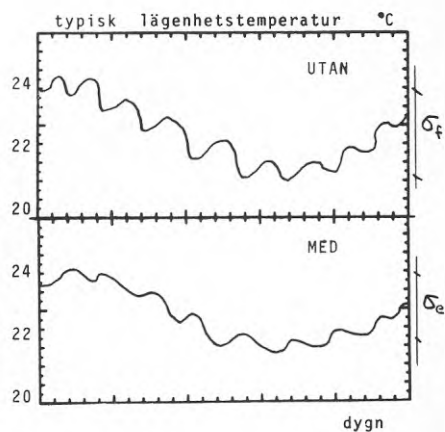
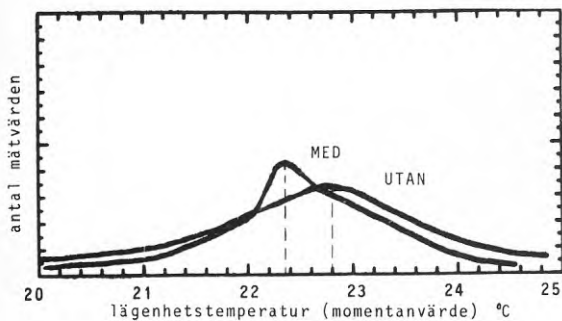


Frågan som ställts i detta kapitel är nu om man kan göra temperatursänkningen som markerats i figuren utan att öka antalet dagar med för låg lägenhetstemperatur? Intuitivt kan svaret tyckas bli ja! Eftersom de olika frånluftstemperaturerna är mycket lika kunde man tro att även alla lägenhetstemperaturer är mycket lika. Om så vore fallet skulle det vara möjligt att reglera bort denna gemensamma variation såsom angavs i den andra principbilden.

I detta kapitel har visats att den intuitiva bilden är felaktig. Att frånluftstemperaturens variation kan minskas mycket beror på att andelen av den gemensamma variationen ökar och andelen av den individuella variationen minskar när ett antal lägenhetstemperaturer medelvärdesbildas i en gemensam frånluftstemperatur. FIG.4.1 är en bra illustration av detta.

Den andra principbilden ovan bör istället ersättas med följande bild som visar att temperaturspridningen i lägenhetstemperaturen endast kan minskas mer marginellt.

TEMPERATURSPRIDNING I LÄGENHETSTEMPERATUR
MED OCH UTAN CENTRAL ÅTERKOPPLING



Beräkningen som gjorts visar att cirka en fjärdedel av temperaturvariationen i lägenheterna kan regleras bort med central återkoppling. I gynnsamma fall och under kortare tider kan kanske hälften av variationen regleras bort. För att minska temperaturvariationerna utöver detta krävs en lokal återkoppling i lägenheten eller rummet.

5 SAMMANFATTNING

Problemställning

Temperaturen i våra bostäder varierar. Dels varierar den mellan olika rum och lägenheter, dels varierar den i tiden i takt med förändringar i utetemperatur och gratisvärmestillskott. För att få god energianvändning och hög komfort är det nödvändigt att hålla de önskade temperaturvariationerna på en låg nivå.

I ett flerbostadshus med vattenburen värme är detta speciellt viktigt eftersom det kan räcka med att några få lägenheter under en kortare tid har för låg innetemperatur för att man ska vara tvungen att permanent höja medeltemperaturen i hela huset. Detta kan också medföra övertemperaturer i de varmare lägenheterna med risk för ökad fönstervädning.

Det enklaste och idag vanligaste sättet att styra värmestillskottet är med uteklimatkompensering, eller framkoppling från utetemperaturen. Härvid utnyttjas att värmebehovet är ungefär proportionellt mot temperaturskillnaden inne-ute och att det vattenburna värmesystemets värmeavgivning är ungefär proportionellt mot temperaturskillnaden framledning-inne. Om innetemperaturen ska hållas konstant måste därför framledningstemperaturen höjas i proportion till hur mycket utetemperaturen sjunker och vice versa. Detta sker enligt den s k framkopplingskurvan eller reglerkurvan i reglercentralen.

Anpassningen mellan värmestillskottet och rådande värmebehov kan förbättras genom att kombinera framkopplingen från utetemperaturen med en återkoppling från innetemperaturen. I detta fall mäter man innetemperaturen och styr värmestillskottet så att innetemperaturen får önskat värde. Ofta utförs detta som en lokal återkoppling med radiatortermostatventiler vid varje radiator. Dessa reglerar då flödet genom radiatorn efter den lokala innetemperaturen.

Men återkopplingen kan också utföras på ett enklare sätt som en central återkoppling. Med central återkoppling menar vi att värmestillskottet till en större grupp, eller alla, lägenheter regleras gemensamt så att den genomsnittliga lägenhetstemperaturen hålls på

önskad nivå. Fördelar med central återkoppling gentemot lokal återkoppling är enkelheten, den låga kostnaden och möjlighet att utnyttja nya reglerprinciper. Två väsentliga nackdelar är att lokala temperaturöverskott inte kan utnyttjas och att temperaturskillnader mellan olika rum och lägenheter inte påverkas.

Försökshus, mätdatainsamling och praktisk reglering

Vid institutionen för Byggnadskonstruktionslära, LTH startades 1980 ett forskningsprojekt, Regler- och styrprinciper för inomhustemperaturen i flerbostadshus med vattenburen värme, förkortat RoS. En av uppgifterna var att utvärdera om temperaturregleringen i bostäder kan utföras med central återkoppling. Resultaten finns rapporterade i Hedin och Jensen (1983) och sammanfattas i kapitel 1.

Föreliggande forskningsprojekt utgör en fristående fortsättning på detta arbete. I vissa delar hänvisar vi dock helt till nämnda rapport. Det gäller främst beskrivningen av försökshuset, mät- och reglerutrustningen och erfarenheter från den praktiska regleringen.

Två flerbostadshus i Malmö och tre grupper om vardera fem flerbostadshus i Lund har använts som försökshus. Samtliga försökshus har vattenburen värme och frånluftsventilation och saknar termostatventiler. Totalt finns knappt 600 lägenheter i försökshuset.

Försökshuset är instrumenterade med var sin datoriserad reglercentral. Dessa sköter självständigt reglering och mätinsamling inklusive enklare statistisk bearbetning. Med en persondator på institutionen kan man via telenätet övervaka undercentralerna och läsa in lagrade mätdata från dem.

Erfarenheterna från de gångna eldningssäsongerna är goda. Frånluftstemperaturen, som utnyttjas som ett naturligt medelvärde på innetemperaturen, kan regleras med stor noggrannhet. Verkan av felaktigt vald framkopplingskurva kan i det närmaste elimineras och gratisvärmeutnyttjandet blir högt. Ett problem är att central återkoppling medför en kraftig variation i framledningstemperaturen till radiatorerna.

Framkoppling, lokal och central återkoppling

Rapporten inleds med en översikt över de idag vanligaste sätten att reglera värmeförseln till en byggnad. Speciellt diskuteras för- och nackdelar med lokal kontra central återkoppling. En slutsats är att central återkoppling är relativt enkelt och billigt att installera jämfört med radiatortermostatventiler och att den ger en "liten men säker" energibesparing. Radiatortermostatventiler har en större potentiell besparingsmöjlighet som det dock synes svårt att uppnå i praktiken.

Inledningsvis diskuteras också hur byggnadens medeltemperatur kan bestämmas. Att mäta en representativ innetemperatur är i själva verket en av de viktigaste delarna i ett fungerande reglersystem för central återkoppling, liksom det är vid lokal återkoppling.

Energibesparing vid central återkoppling

För att få konstant eller önskad innetemperatur vid enbart framkoppling krävs att rätt framkopplingskurva väljs. Normalt finns här två regulatorparametrar att ställa in. Dessa är kurvans lutning som beror på byggnadens specifika värmebehov och dess parallellförskjutning som beror på önskad innetemperatur och tillgodogjord gratisvärme. I praktiken är det en svår uppgift att ställa in den bästa framkopplingskurvan beroende på att det tar lång tid att se resultatet av en kurvändring och att innetemperaturen hela tiden varierar i takt med varierande gratisvärme. En felaktig inställning medför långsamma temperaturvariationer i takt med utetemperaturen. Likaså medför varierande tillskott av gratisvärme, t ex solinstrålning, att innetemperaturen varierar.

Vid central återkoppling är inställningen enklare. Då har man primärt bara en inställning: den önskade medeltemperaturen. Bara detta faktum att man mäter medeltemperaturen och enkelt kan ställa in rätt nivå på medeltemperaturen kan i många fall ge en betydande energibesparing. Hur mycket beror på hur bra eller dåligt man tidigare lyckats ställa in framkopplingskurvan. Denna del av energibesparingen vill vi dock inte räkna med, dels eftersom den är olika från fall till fall och därför är svår att generalisera, men fram-

för allt för att den i första hand inte beror på återkopplingen utan mer på en ej optimal användning av framkopplingen.

För att bestämma energibesparingen utgår vi istället från att gratisvärmeutnyttjandet beror på reglersättet. Gratisvärmeutnyttjandet anger hur stor andel av ett värmetillskott som kan tillgodogöras genom en minskning av den styrda värmetillförseln. En bra reglering ger ett högt gratisvärmeutnyttjande och därmed lägre energiåtgång och hög reglernoggrannhet. Det teoretiska värdet på gratisvärmeutnyttjandet i normala hus är 40-50% vid enbart framkoppling och 90-100% vid återkoppling (utan hänsyn till vädring).

Fördelen med att arbeta med gratisvärmeutnyttjandet är att det endast beror av reglersättet och inte av byggnaden och det rådande uteklimatet. Det är därför enklare att generalisera de resultat som baseras på gratisvärmeutnyttjandet till andra hus och andra förhållanden än när det gäller uppmätt energibesparing. Den verkliga energibesparingen beror förutom gratisvärmeutnyttjandet även på det aktuella huset och det aktuella värmetillskottet.

En ny metod att skatta gratisvärmeutnyttjandet ur mätdata med regressionsanalys har tagits fram och använts i detta projekt. Den är en vidareutveckling av metoden att bestämma energisignaturen för ett hus. Metoden bygger på att man förutom den välkända "energisignaturen" även bestämmer en snarlik modell som fått arbetsnamnet "reglersignaturen". Modellerna som hittills avsett system med vattenburen värme har följande utseende:

ENERGISIGNATUREN:

$$P_t = A_1 + B_1(T_i - T_u) - C_1 * P_g - E_1 * \Delta T_i$$

värme- konst1 verkligt tillgodogjord lagringens
effekt värmebehov gratisvärme inverkan

REGLERSIGNATUREN:

$$P_t = A_2 + B_1(T_{iref} - T_u) - v_g * C_1 * P_g + D_2 * T_u - v_g * E_1 * \Delta T_i$$

värme- = konst2 nödvändigt rätt utnyttjad inverkan av lagringens
effekt värmebehov gratisvärme fel lutning på inverkan
framk.kurva

där T_i = innetemp, T_u = utetemp, P_g = gratisvärme, T_{iref} = önskad innetemp, v_g = gratisvärmeutnyttjandet och $A_1, A_2, B_1, C_1, D_2, E_1$ är konstanter som identifieras

Metoden har också utprovats med simulerade mätdata och i avsnitt 2.3 redovisas hur den ska användas för att ge korrekt resultat.

Det praktiska gratisvärmeutnyttjandet har bestämts i tre av försökshusen under ca 6 månader av eldningssäsongen 85/86. Gratisvärmeutnyttjandet är i dessa fall lika med solvärmeutnyttjandet eftersom solinstrålningen är den form av gratisvärme som vi har mätdata på. Försöksserien har gjorts så att försökshus med olika reglersätt kan jämföras under samma yttre betingelser och att försökshusen byter reglersätt så att inte ett försökshus har samma reglersätt hela tiden. Följande värden har därvid erhållits:

| Period | Gratisvärmeutnyttjande v_g av tillgodogjord solinstrålning | | |
|------------|--|----------------|----------------|
| | Frankoppling | Återkoppling 1 | Återkoppling 2 |
| 1+2 | 46% | 93% | 86% |
| 3+4 | 30% | 90% | 83% |
| Medelvärde | 38% | 92% | 85% |

Dessa värden överensstämmer väl med förväntade värden enligt den teoretiska analysen om man räknar med det värde på inkommande gratisvärme som anges av mätdata. Ett problem med denna - och andra - metoder att bestämma gratisvärmeutnyttjandet är dock att eventuellt ökad vädring, till följd av dålig reglering, och fönsterskuggning inte syns direkt i mätdata utan endast som frånvaro av en förväntad innetemperaturhöjning.

Att få ett begrepp om omfattningen av de boendes fönstervädring och fönsterskuggning är därför svårt. Ett försök - som kanske inte är utan invändningar - att bestämma gratisvärmeutnyttjandet med hänsyn till fönstervädring och fönsterskuggning har gjorts genom att försätta att försökshusen rimligtvis har samma solinstrålning oberoende av reglersätt. Då erhålls följande värden:

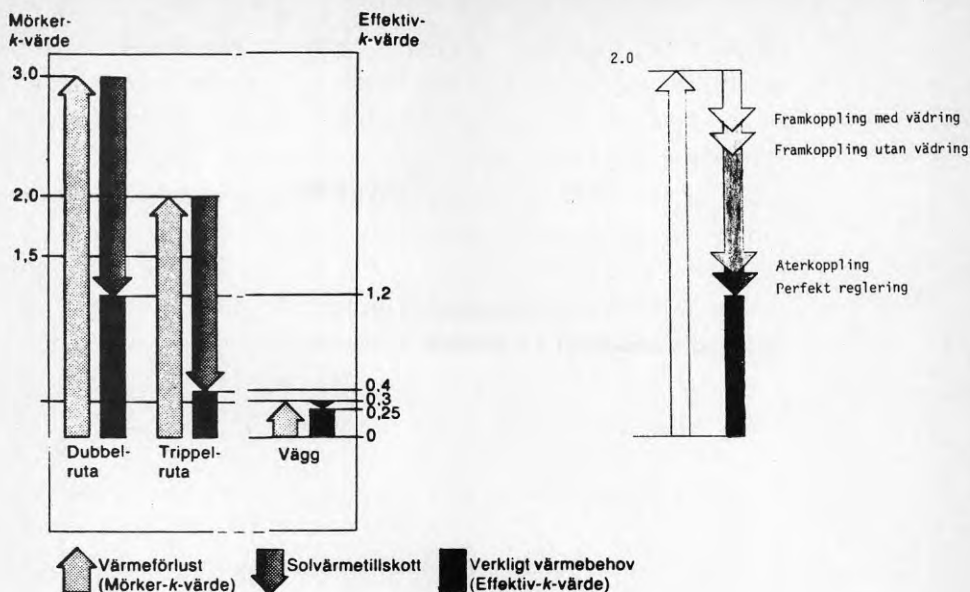
| Period | Gratisvärmeutnyttjande v_g av inkommande solinstrålning | | |
|------------|---|----------------|----------------|
| | Frankoppling | Återkoppling 1 | Återkoppling 2 |
| 1 | 29% | 93% | 76% |
| 3 | 24% | 90% | 66% |
| Medelvärde | 27% | 92% | 78% |

Med hjälp av dessa värden på gratisvärmeutnyttjandet så har energibesparingen i försökshuset beräknats för ett normalår i Stockholm. I maj, och i mindre omfattning september, så är gratisvärmens tidvis så stor att den under längre tid överstiger värmebehovet. Gratisvärmens kan då inte tillgodogöras. För att inte överskatta besparingen så tar vi därför inte med maj månad i följande beräkning. Under perioden september - april ges följande värden på den inkommande gratisvärmemängden från solstrålningen, E_{gs} och därav rätt utnyttjad värmemängd (= minskad fjärrvärmeförbrukning), ΔE_t .

| | v_g | E_{gs} kWh/m ² , lgy | ΔE_t kWh/m ² , lgy |
|--------------------------|-------|--------------------------------------|--|
| återkoppling | 92% | 19.6 | 18.0 |
| framkoppling | | | |
| utan hänsyn till vädring | 38% | 19.6 | 7.5 |
| med hänsyn till vädring | 27% | 19.6 | 5.3 |

Med dessa siffror blir energibesparingen lite drygt 10 kWh/m², lgy under perioden september - april. Detta utgör 5-6% av den totala fjärrvärmeförbrukningen för ett helår och 6-7% av värmebehovet i försökshuset under nämnda period. Observera att dessa värden inte kan generaliseras till ett annat hus eller annat klimat på samma sätt som gratisvärmeutnyttjandet.

Ett annat sätt att presentera ovanstående resultat är att betrakta fönstren som passiva solfångare. Ett effektivt k-värde för ett fönster kan bestämmas genom att utgå från det normala mörker-k-värdet och reducera detta värde med hänsyn till hur mycket solvärme som passerar in genom det. Principen visas till vänster i följande figur. (Figuren är hämtad från "Spara energi" av Hans Lönn, utgiven 1984 av Svensk Byggtjänst).



Men det är först när solvärmestillskottet utnyttjas genom en lägre energiförbrukning som det kommer till nytta. I principfiguren förutsätts därför en perfekt reglering med 100% gratisvärmeutnyttjande. I figuren till höger - däremot - har vi beräknat det effektiva k-värdet under september-april för ett treglasfönster med de värden på gratisvärmeutnyttjandet som bestämts för försökshuset. Numeriska värden återfinns i slutet av kapitel 2. Slutsatsen blir att ett lågt effektivt k-värde förutsätter en bra reglering.

Simulering av reglersystemet vid central återkoppling

Ett problem med central återkoppling som diskuterades redan i RoS-rapporten är att det är önskvärt att ha en hög regulatorförstärkning eftersom detta ger bra reglernoggrannhet och högt gratisvärmeutnyttjande. En förstärkning på upp till 40 har använts, vilket medför att framledningstemperaturen ändras 40 °C för ett fel i innetemperaturen på 1 °C.

Detta kommer dock att resultera i att framledningstemperaturen varierar kraftigt och speciellt kommer den att ha en dygnsvariation som inte är så lämplig ur komfortsynpunkt. Högsta framledningstem-

peratur fås på natten och lägsta under sen eftermiddag. Detta har lett till en del klagomål när central återkoppling använts, trots att husets medeltemperatur har hållits nästan konstant. Det finns även en positiv sida av detta i och med att brister i t ex fönstrens täthet avslöjas (och kan rättas till) när radiatortemperaturen inte alltid är jämn och hög.

Detta och en del andra problem av reglerteknisk karaktär diskuteras i kapitel 3. Här byggs också en simuleringsmodell upp för det kopplade systemet byggnad-värmesystem-reglersystem. Med simuleringsmodellens hjälp har olika typer av regulatorer provats ut och några simuleringar redovisas för de vanliga standardregulatorerna. För att inte tynga denna rapport med alltför många simuleringar, så kommer en del av det material som tagits fram att redovisas i en separat rapport i BKL's rapportserie.

Någon perfekt lösning på kompromissen mellan hög regulatorförstärkning med stor variation i framledningstemperaturen och låg regulatorförstärkning med varierande innetemperatur, har vi inte fått fram trots en hel del försök.

En regulator som är tillräckligt bra ur flera synpunkter är den enkla P-regulatorn med en måttlig förstärkning på drygt 10. Med en sådan blir det relativa gratisvärmeutnyttjandet över 80% (se FIG. 2.16) och dygnsvariationen i framledningstemperaturen ganska måttlig. Ett komplement för att minska den senare är också att variera börvärdet över dygnet eller att ha fasta styrningar av framledningstemperaturen (nattsänkning, eftermiddagshöjning etc).

En metod som använts är också att ha låg regulatorförstärkning på dagtid och mycket hög på natten. På detta sätt startar man varje dag med rätt temperatur t ex kl 06.

Lägenhetstemperaturerna vid central återkoppling

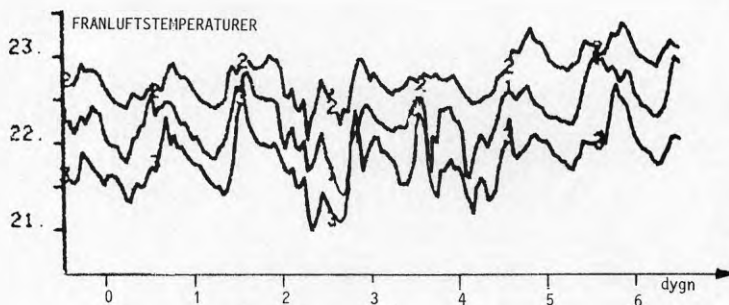
När vi använt begreppet innetemperatur har vi hittills menat byggnadens (rumsmässiga) medeltemperatur. Detta är naturligt eftersom det är just medeltemperaturen som mäts och regleras vid central återkoppling.

I rapportens tre första kapitel har vi visat att central återkoppling ger ett högt gratisvärmeutnyttjande och på grundval av detta har vi beräknat den specifika energibesparingen i försökshuset. Vi har också visat - vilket även följer av det höga gratisvärmeutnyttjandet - att medeltemperaturen kan regleras med stor noggrannhet.

Den felande länken i beviskedjan, som ska visa om central återkoppling är en bra reglerprincip, är att visa att den goda reglerförmågan som vi har på medeltemperaturerna även gäller de enskilda lägenhets- och rumtemperaturerna.

Om vi jämför central och lokal återkoppling, så kan vi se på två ytterlighetsfall. Om gratisvärmen (eller allmännare temperaturvariationen) är helt lika i alla lägenheter, har man inget att vinna på att ha en lokal återkoppling jämfört med en central återkoppling. I det andra ytterlighetsfallet, att alla lägenheter har totalt oberoende gratisvärme, så gör den centrala återkopplingen nytta endast då antalet lägenheter är litet.

Intuitivt kan man tro att variationerna i lägenhetstemperaturerna är mycket lika, eftersom variationerna i frånluftstemperaturerna är mycket lika. Se t ex FIG.4.2-4.3 eller följande figur som visar tre frånluftstemperaturer från försökshus 3 under en vecka med normal framkoppling.



Samvariationen mellan de tre frånluftstemperaturerna är påfallande, och denna kan som vi sett regleras bort nästan helt.

I kapitel 4 visas att den intuitiva föreställningen är felaktig!

Först visas teoretiskt vad som händer med variationen i medeltemperaturer när flera lägenhetstemperaturer med viss samvariation medelvärdesbildas, se TAB.4.1 och FIG.4.1. Den gemensamma variationen förstärks relativt den individuella variationen. Därefter utförs en statistisk analys med de uppmätta frånluftstemperaturerna i försökshuset. Slutsatsen av denna analys är inte helt entydig, men den indikerar att den möjliga minskningen i lägenhetstemperaturernas variation inte uppfyller uppställda mål.

En statistisk analys av uppmätta lägenhetstemperaturer från ett annat byggforskningsprojekt har också utförts. Analysen blir nu betydligt enklare och lättare att tyda. Slutsatsen är att central återkoppling inte kan minska lägenhetstemperaturernas variation tillräckligt mycket, se avsnitt 4.4.

Variationen i lägenhetstemperaturerna minskar alltså inte med 85-95% bara för att variationen i frånluftstemperaturerna gör det. Snarare stannar reduktionen i lägenhetstemperaturernas variation på blygsamma 20-30%. Denna förbättring är klart mindre än vad man kan kräva av ett modernt reglersystem! För att vara tydlig: Gratisvärmeutnyttjandet kan göras stort för den gemensamma variationen, men denna utgör inte en så stor del av den totala variationen. Gratisvärmeutnyttjandet i de enskilda lägenheterna blir lågt. Man bör komma ihåg att det trots allt finns andra hus där den gemensamma variationen är större. Små värmeförluster, mycket fönster och naturligtvis fel vald framkopplingskurva är faktorer som ger stor gemensam variation.

För att få bättre reglering av rums- och lägenhetstemperaturerna krävs en fungerande lokal återkoppling. Slutsatsen, med den andra delen av rapporten som underlag, är därför att central återkoppling inte kan konkurrera med en fungerande lokal återkoppling när det gäller att reglera rumstemperaturerna.

Nyttan med central återkoppling reduceras därmed till en hjälp att automatiskt ställa in rätt framkopplingskurva. Detta är visserligen en viktig uppgift men av lägre dignitet än planerat. Observera att denna användning dock fortfarande är betydelsefull. Detta gäller

framför allt i den stora gruppen befintlig bebyggelse där radiatortermostatventiler inte installerats eller där de fungerar dåligt. Temperaturregleringen är då helt beroende av valet av framkopplingskurva.

Ett användningsområde är också som komplement till radiatortermostatventiler med tanken att dessa är bäst på att ta tillvara lokala gratisvärmertilskott medan motsatsen gäller central återkoppling. Detta diskuteras mer i kapitel 1.

En felkälla i ovanstående resonemang som bör nämnas är vädringens inverkan. Om vädringen tilltar kraftigt med ökande innetemperatur, så faller den statistiska analysen till en del eftersom vädringen reducerar den gemensamma störningen, se avsnittet om felkällor, kapitel 3.4. Samma sak gäller för ökad fönsterskuggning och nedläggning av termostatinställningen vid ökande innetemperatur. Storleken på dessa faktorer är dock okänd. Man kan notera att lägenhetstemperaturerna i genomsnitt är så pass höga som 23 °C, se TAB.4.10-1.14.

REFERENSER

- Andersson, G., Jorner, U., Ågren, A., 1983, Regressions- och tids-serieanalys med och utan datorstöd. (Studentlitteratur, Lund).
- Apelblat, J., Jensen, L., Rydström, P., 1977, Frånluftstemperatur-reglering av flerfamiljshus. (Inst för Byggnadskonstruktionslära, LTH). Rapport BKL 1977:12.
- Blom, G., 1970, Statistikteori med tillämpningar. (Studentlitteratur, Lund).
- Brown, G., Isfält, E., 1974, Solinstrålning och solavskärmning. (Statens Råd för Byggnadsforskning). Rapport R19:1974.
- Fredlund, B., Lange, E., 1985, Energiteknisk utvärdering av kv Hus-svalan; Uppdrag av Malmö Kommunala Bostads AB. (Inst för Byggnadskonstruktionslära, LTH). Uppdrag BKL 1985:2.
- Fredlund, B., 1987, Energimätning i flerbostadshus. Installationer. (Statens råd för Byggnadsforskning). Rapport R59:1987.
- Hammarsten, S., 1984, Estimation of Energy Balances for Houses. (Inst för Uppvärmnings- och Ventilationsteknik, KTH). A4-serien nr 110.
- Hedin, B., Jensen, L., 1983, Regler- och styrprinciper för inomhus-temperaturen i flerbostadshus med vattenburen värme. (Inst för Byggnadskonstruktionslära, LTH). Rapport BKL 1983:6 (två delar).
- Hedin, B., 1986, DIAGRAM - ett programpaket för plottning av diagram. (Inst för Byggnadskonstruktionslära, LTH). Opublicerad rapport och datorprogram.
- Jensen, L., Lange, E., 1982, Energianvändning och energibesparing i Malmö; Undersökning av ett höghus. (Statens Råd för Byggnadsforskning). Rapport R9:1982.
- Josefsson, W., 1985, Solstrålning mot lutande ytor i Stockholm. (Statens Råd för Byggnadsforskning). Rapport R128:1985.
- Källblad, K., 1986, Datorprogram för beräkning av värmebalans i rum och byggnader. (Inst för Byggnadskonstruktionslära, LTH). Rapport BKL 1986:28 (två delar).
- RoS, se Hedin, B., Jensen, L., 1983
- Ryan, T.A., Joiner, B.L., Ryan, B.F., 1985, Minitab Reference Manual (Pennsylvania State University, USA).
- Åström, K.J., Wittenmark, B., 1985, Computer Controlled Systems - Theory and Design. (Prentice-Hall, New York).

BILAGA 1

Fyra tabeller med skattade regressionsparametrar och tillämpade modeller för de sammanslagna perioderna 1+2 och 3+4.

- 1 Skattade regressionsparametrar, period 1+2
- 2 Tillämpad regressionsmodell, period 1+2
- 3 Skattade regressionsparametrar, period 3+4
- 4 Tillämpad regressionsmodell, period 3+4

| REGRESSION: | | PARAMETRAR | | | | | | | | | | enhet: W/m**2, lgy | |
|-------------|---------------|----------------|-----------------|-----------------|--|-----------|--|--------------|--|---------------|------|--------------------|--|
| | | modell Mpmh | | p=period | | m=modelnr | | r=reglersätt | | | | | |
| | | reglersätt | | i:frank | | 2:äteri | | 3:äter2 | | | | | |
| Mp1r | A +- s(A) | B +- s(B) | C +- s(C) | | | | | | | E +- s(E) | R**2 | D.W. | |
| Mp2r | A' +- s(A') | B' +- s(B') | C +- s(C) | | | | | | | E +- s(E) | R**2 | D.W. | |
| Mp3r | A +- s(A) | | C +- s(C) | D +- s(D) | | | | | | E +- s(E) | R**2 | D.W. | |
| M(1+2)11 | -1.45 +- 1.02 | 1.855 +- 0.048 | -2.547 +- 0.486 | | | | | | | 2.59 +- 0.74 | 98.5 | 0.6 | |
| M(1+2)21 | 0.15 +- 0.86 | 1.733 +- 0.039 | -1.169 +- 0.412 | | | | | | | 2.05 +- 0.65 | 98.8 | 0.8 | |
| M(1+2)31 | -1.12 +- 0.11 | | 1.401 +- 0.244 | 0.126 +- 0.023 | | | | | | -0.51 +- 0.39 | 70.0 | 1.1 | |
| M(1+2)12 | 1.81 +- 1.74 | 1.601 +- 0.077 | -4.018 +- 0.764 | | | | | | | 1.45 +- 1.62 | 95.4 | 1.1 | |
| M(1+2)22 | 1.44 +- 1.66 | 1.613 +- 0.074 | -3.751 +- 0.725 | | | | | | | 1.65 +- 1.55 | 95.8 | 1.1 | |
| M(1+2)32 | -0.10 +- 0.02 | | 0.271 +- 0.051 | -0.007 +- 0.005 | | | | | | 0.16 +- 0.11 | 61.1 | 1.8 | |
| M(1+2)13 | -6.21 +- 2.41 | 1.958 +- 0.111 | -3.539 +- 1.005 | | | | | | | 7.74 +- 1.72 | 92.9 | 0.5 | |
| M(1+2)23 | -6.33 +- 2.34 | 1.941 +- 0.106 | -3.051 +- 0.968 | | | | | | | 7.31 +- 1.66 | 93.3 | 0.5 | |
| M(1+2)33 | -0.50 +- 0.07 | | 0.502 +- 0.143 | 0.023 +- 0.015 | | | | | | -0.46 +- 0.25 | 43.6 | 1.1 | |

REGRESSION: TILLAMPAD MODELL m=modellnr r=reglersätt enhet: W/m**2, lgy
 reglersätt 1:framk 2:äter1 3:äter2

| Mp1r | Effekt = | A | + | B | * | (Ti-Tu) | - | C | * | Psvikt | + | E | * | dTi |
|----------|-------------------|-----------------|---|-------------------|---|----------|---|------------------|---|--------|---|------------------|---|------------------|
| Mp2r | Effekt = | A' | + | B' | * | (Tir-Tu) | - | C | * | Psvikt | + | E | * | dTi |
| Mp3r | B*(Ti-Tir)= | A | + | | | | + | C | * | Psvikt | + | D | * | Tu |
| M(1+2)11 | 38.96 = 100.0% | -1.45 -3.7% | + | 1.855 * 106.6% | + | 22.38 | - | 2.547 * -2.4% | + | 0.37 | + | 2.589 * -0.4% | + | -0.064 |
| M(1+2)21 | 38.96 = 100.0% | 0.15 0.4% | + | 1.733 * 101.1% | + | 22.72 | - | 1.169 * -1.1% | + | 0.37 | + | 2.047 * -0.3% | + | -0.064 |
| M(1+2)31 | -0.638 = -1.6% | -1.12 -2.9% | + | | + | | + | 1.401 * 1.3% | + | 0.37 | + | 0.126 * -0.2% | - | 0.513 * 0.1% |
| M(1+2)12 | 36.58 = 100.0% | 1.81 4.9% | + | 1.601 * 99.2% | + | 22.66 | - | 4.018 * -4.0% | + | 0.37 | + | 1.448 * -0.1% | + | -0.022 |
| M(1+2)22 | 36.58 = 100.0% | 1.44 3.9% | + | 1.613 * 99.9% | + | 22.66 | - | 3.751 * -3.8% | + | 0.37 | + | 1.651 * -0.1% | + | -0.022 |
| M(1+2)32 | -0.001 = -0.0% | -0.10 -0.3% | + | | + | | + | 0.271 * 0.3% | + | 0.37 | + | 0.007 * 0.0% | - | 0.157 * -0.0% |
| M(1+2)13 | 36.46 = 100.0% | -6.21 -17.0% | + | 1.958 * 121.1% | + | 22.55 | - | 3.539 * -3.6% | + | 0.37 | + | 7.736 * -0.5% | + | -0.024 |
| M(1+2)23 | 36.46 = 100.0% | -6.33 -17.4% | + | 1.941 * 120.9% | + | 22.71 | - | 3.051 * -3.1% | + | 0.37 | + | 7.310 * -0.5% | + | -0.024 |
| M(1+2)33 | -0.315 = -0.9% | -0.50 -1.4% | + | | + | | + | 0.502 * 0.5% | + | 0.37 | + | 0.023 * -0.0% | - | 0.460 * 0.0% |

| REGRESSION: | | PARAMETRAR | | | | | | | | | | enhet: W/m**2.lgy | |
|-------------|---------------|----------------|-----------------|----------------|----------|--|--|------------|--|--|---------------|-------------------|------|
| | | modell Mpmh | | | p-period | | | m=modellnr | | | r-reglersätt | | |
| | | reglersätt | | | 1:framk | | | 2:åter1 | | | 3:åter2 | | |
| Mp1r | A +- s(A) | B +- s(B) | C +- s(C) | | | | | | | | E +- s(E) | R**2 | D.W. |
| Mp2r | A' +- s(A') | B' +- s(B') | C +- s(C) | | | | | | | | E +- s(E) | R**2 | D.W. |
| Mp3r | A +- s(A) | | C +- s(C) | D +- s(D) | | | | | | | E +- s(E) | R**2 | D.W. |
| M(3+4)11 | -0.07 +- 0.82 | 1.849 +- 0.045 | -2.537 +- 0.400 | | | | | | | | 2.97 +- 0.94 | 98.5 | 0.6 |
| M(3+4)21 | 0.11 +- 0.61 | 1.701 +- 0.031 | -0.766 +- 0.292 | | | | | | | | 1.48 +- 0.70 | 99.2 | 0.6 |
| M(3+4)31 | -1.36 +- 0.30 | | 0.286 +- 0.235 | 0.273 +- 0.032 | | | | | | | -1.01 +- 0.43 | 86.4 | 0.9 |
| M(3+4)12 | 4.57 +- 2.25 | 1.528 +- 0.093 | -3.187 +- 0.606 | | | | | | | | 3.74 +- 1.42 | 96.4 | 1.0 |
| M(3+4)22 | 4.05 +- 2.08 | 1.539 +- 0.085 | -2.868 +- 0.567 | | | | | | | | 3.70 +- 1.30 | 97.0 | 1.0 |
| M(3+4)32 | -0.27 +- 0.08 | | 0.269 +- 0.060 | 0.001 +- 0.008 | | | | | | | -0.06 +- 0.14 | 58.7 | 1.0 |
| M(3+4)13 | 2.02 +- 1.73 | 1.603 +- 0.073 | -2.526 +- 0.440 | | | | | | | | 4.21 +- 0.72 | 97.7 | 1.2 |
| M(3+4)23 | 4.52 +- 1.64 | 1.449 +- 0.067 | -2.108 +- 0.456 | | | | | | | | 3.58 +- 0.72 | 97.7 | 1.2 |
| M(3+4)33 | -0.91 +- 0.12 | | 0.408 +- 0.092 | 0.145 +- 0.013 | | | | | | | -0.59 +- 0.15 | 93.6 | 1.4 |

| REGRESSION: TILLÄMPAD | | MODELL | modell Mpmh | p=period | m=modellnr | r=reglersätt | enhet: W/m**2.lgy |
|-----------------------|-------------------|---|-------------|----------|------------|--------------|--------------------------|
| | | reglersätt | 1:framk | 2:återl | 3:åter2 | | |
| Mp1r | Effekt = | A + B * (Ti-Tu) - C * Psvikt | | | | | + E * dTi |
| Mp2r | Effekt = | A' + B' * (Tir-Tu) - C * Psvikt | | | | | + E * dTi |
| Mp3r | B*(Ti-Tir)= | A + B * (Ti-Tu) + C * Psvikt + D * Tu | | | | | + E * dTi |
| M(3+4)11 | 22.60 = 100.0% | -0.07 + 1.849 * 14.26 - 2.537 * 1.70 -0.3% 116.7% -19.0% | | | | | + 2.966 * 0.094 1.2% |
| M(3+4)21 | 22.60 = 100.0% | 0.11 + 1.701 * 13.86 - 0.766 * 1.70 0.5% 104.3% -5.7% | | | | | + 1.480 * 0.094 0.6% |
| M(3+4)31 | 0.732 = 3.2% | -1.36 + 0.286 * 1.70 + 0.273 * 7.12 -6.0% 2.1% 8.6% | | | | | - 1.008 * 0.094 -0.4% |
| M(3+4)12 | 24.64 = 100.0% | 4.57 + 1.528 * 16.24 - 3.187 * 1.55 18.5% 100.7% -20.1% | | | | | + 3.745 * 0.055 0.8% |
| M(3+4)22 | 24.64 = 100.0% | 4.05 + 1.539 * 16.14 - 2.868 * 1.55 16.4% 100.8% -18.1% | | | | | + 3.701 * 0.055 0.8% |
| M(3+4)32 | 0.147 = 0.6% | -0.27 + 0.269 * 1.55 + 0.001 * 6.37 -1.1% 1.7% 0.0% | | | | | - 0.063 * 0.055 -0.0% |
| M(3+4)13 | 24.95 = 100.0% | 2.02 + 1.603 * 16.55 - 2.526 * 1.55 8.1% 106.3% -15.7% | | | | | + 4.209 * 0.079 1.3% |
| M(3+4)23 | 24.95 = 100.0% | 4.52 + 1.449 * 16.17 - 2.108 * 1.55 18.1% 93.9% -13.1% | | | | | + 3.581 * 0.079 1.1% |
| M(3+4)33 | 0.606 = 2.4% | -0.91 + 0.408 * 1.55 + 0.145 * 6.37 -3.6% 2.5% 3.7% | | | | | - 0.594 * 0.079 -0.2% |

BILAGA 2

Härledning av beräkningar för att från mätvärden av frånluftstemperaturer skatta den genomsnittliga gemensamma och individuella variationen i lägenhetstemperaturerna.

De kända varianserna kan skrivas som

$$V(y_1) = v_1/n + (n-1)c_{11}/n = (1+(n-1)r_{11})v_1/n \quad (4.43)$$

$$V(y_2) = v_2/n + (n-1)c_{22}/n = (1+(n-1)r_{22})v_2/n \quad (4.44)$$

$$V(z) = v_1/4n + (n-1)c_{11}/4n + c_{12}^2/2 + (n-1)c_{22}/4n + v_2/4n \quad (4.45)$$

$$V(q) = v_1/4n + (n-1)c_{11}/4n - c_{12}^2/2 + (n-1)c_{22}/4n + v_2/4n \quad (4.46)$$

Differensen mellan ekv (4.45) och (4.46) ger

$$c_{12} = V(z) - V(q)$$

Kvoten mellan ekv (4.43) och (4.44) betecknas med B^2

$$V(y_1)/V(y_2) = v_1/v_2 = B^2 \quad (4.47)$$

Sambandet mellan korrelationerna (4.42) kan nu skrivas om som ett samband mellan kovarianserna

$$c_{11}/v_1 = c_{22}/v_2 = A c_{12}/(v_1 v_2)^{1/2} \quad (4.48)$$

eller om vi utnyttjar att $B = (v_1/v_2)^{1/2}$

$$c_{11} = AB c_{12} \quad (4.49)$$

$$c_{22} = A/B c_{12} \quad (4.50)$$

Insättning i ekv (4.43) och (4.44) ger nu slutligen

$$V_1 = nV(y_1) - (n-1)AB(V(z) - V(q)) \quad (4.51)$$

$$V_2 = nV(y_2) - (n-1)A/B(V(z) - V(q)) \quad (4.52)$$

Vid reglering försöker man minska variationen i den genomsnittliga frånluftstemperaturen z . Vi ska nu bestämma hur mycket variationen i lägenhetstemperaturerna minskar om z kan hållas konstant lika med noll. Vi skriver om alla lägenhetstemperaturer som summan av en gemensam del, s , och en individuell del, d .

$$x_{1i} = s + d_{1i} \quad (4.53)$$

$$x_{2i} = s + d_{2i} \quad (4.54)$$

Den gemensamma delen är lika i alla lägenheter och den individuella delen kan betraktas som en störning som man önskat hade varit noll. Storleken på den gemensamma variansen $V(s) = v_s$ i förhållande till den totala variansen är avgörande för en framgångsrik reglering av frånluftstemperaturen.

Några nya beteckningar behövs nu.

Variansen för de individuella störningarna

$$V(d_{1i}) = v_{d1}$$

$$V(d_{2i}) = v_{d2}$$

Kovarianserna

$$C(d_{1i}, d_{2j}) = c_{d11}$$

$$C(d_{2i}, d_{2j}) = c_{d22}$$

$$C(d_{1i}, d_{2i}) = c_{d12}$$

$$C(s, d_{1i}) = c_{s1}$$

$$C(s, d_{2i}) = c_{s2}$$

Variansen för lägenhetstemperaturerna kan nu uttryckas på ett nytt sätt

$$v_1 = v_s + v_{d1} + 2c_{s1} \quad (4.55)$$

$$v_2 = v_s + v_{d2} + 2c_{s2} \quad (4.56)$$

På samma sätt kan uttrycken för $V(y_1)$ och $V(y_2)$ ekv (4.43) - (4.44) också skrivas som

$$V(y_1) = v_s + v_{d1}/n + (n-1)c_{d1}/n + 2c_{s1} \quad (4.57)$$

$$V(y_2) = v_s + v_{d2}/n + (n-1)c_{d22}/n + 2c_{s2} \quad (4.58)$$

Parametrarna v_s , v_{d1} , v_{d2} , c_{d11} , c_{d12} , c_{d22} , c_{s1} och c_{s2} kan bestämmas om v_1 , v_2 , c_{11} , c_{12} och c_{22} är kända. Vi kan skriva

$$y_1 = s + (d_{11} + d_{12} + \dots + d_{1n})/n = s + q \quad (4.59)$$

$$y_2 = s + (d_{21} + d_{22} + \dots + d_{2n})/n = s - q \quad (4.60)$$

$$z = s \quad (4.61)$$

Varianserna för dessa tre är

$$V(y_1) = v_s + v_q + 2C(s, q) \quad (4.62)$$

$$V(y_2) = v_s + v_q - 2C(s, q) \quad (4.63)$$

$$V(z) = v_s \quad (4.64)$$

Skillnaden mellan de två första ger att

$$C(s, q) = (V(y_1) - V(y_2))/4 \quad (4.65)$$

Utnyttjas nu att

$$C(s, q) = C(s, d_1) = -C(s, d_2) \quad (4.66)$$

så ger insättning i ekv (4.55) och (4.56) att

$$vd_1 = v_1 - v_s - (V(y_1) - V(y_2))/2 \quad (4.67)$$

$$vd_2 = v_2 - v_s + (V(y_1) - V(y_2))/2 \quad (4.68)$$

Kovarianserna c_{d11} och c_{d22} kan nu lösas ur ekv (4.57) och (4.58) som

$$c_{d11} = (n(V(y_1) - v_s - 2C(s, q)) - vd_1) / (n-1) \quad (4.69)$$

$$c_{d22} = (n(V(y_2) - v_s + 2C(s, q)) - vd_2) / (n-1) \quad (4.70)$$

Kovariansen c_{d12} löses ur

$$V(z) - V(q) = v_s + c_{d12} \quad (4.71)$$

vilket ger

$$c_{d12} = -V(q) \quad (4.72)$$

Motsvarande korrelationer fås efter division av kovarianserna med lämpliga (rötter av) varianser enligt 4.4.

Den möjliga minskningen i lägenhetstemperaturernas varians blir

$$k = 1 - vd_1/v_1 = 1 - vd_2/v_2 \quad (4.73)$$

Ju mindre den individuella störningen vd_1 är desto större del av den genomsnittliga variationen i lägenhetstemperaturen kan regleras bort.

Tre frånluftstemperaturer

Alla försökshusen har tre registrerade frånluftstemperaturer. På Tingvallen är temperaturerna mätta i tre olika hus. Två av dessa ligger med fasaderna i syd- och nordriktning medan det tredje har fasader i öst och väst. Ett rimligt antagande i detta fall är att $r_{11} = r_{12} = r_{22} = r_{33}$ och eventuellt $r_{13} = r_{23}$.

Lösningen i detta fall blir den samma som tidigare för två frånluftstemperaturer när det gäller att bestämma v_1 , v_2 och $r_{11}=r_{12}=r_{22}$. Analogt med tidigare beräkningar gäller vidare att

$$c_{13}=C(e_{1i}, e_{3i})=V(y_1/2+y_3/2)-V(y_1/2-y_3/2) \quad (4.74)$$

$$c_{23}=C(e_{2i}, e_{3i})=V(y_2/2+y_3/2)-V(y_2/2-y_3/2) \quad (4.75)$$

$$v_3=nV(y_3)/(1+(n-1)r_{33}) \quad (4.76)$$

Vid uppdelningen av temperaturerna i gemensam och individuell del har vi nu en ny gemensam del s

$$y_1=s+(d_{11}+d_{12}+\dots+d_{1n})/n=s+q_1 \quad (4.77)$$

$$y_2=s+(d_{21}+d_{22}+\dots+d_{2n})/n=s+q_2 \quad (4.78)$$

$$y_3=s+(d_{31}+d_{32}+\dots+d_{3n})/n=s+q_3 \quad (4.79)$$

där

$$q_1=(2y_1-y_2-y_3)/3 \quad (4.80)$$

$$q_2=(2y_2-y_1-y_3)/3 \quad (4.81)$$

$$q_3=(2y_3-y_1-y_2)/3 \quad (4.82)$$

$$z=(y_1+y_2+y_3)/3=s \quad (4.83)$$

Variansen av ekv (4.77) är

$$V(y_1)=v_s+V(q_1)+2c_{s1} \quad (4.84)$$

Härur löses

$$c_{s1}=(V(y_1)-V(q_1)-v_s)/2 \quad (4.85)$$

På motsvarande sätt erhålls

$$c_{s2} = (V(y_2) - V(q_2) - v_s) / 2 \quad (4.86)$$

$$c_{s3} = (V(y_3) - V(q_3) - v_s) / 2 \quad (4.87)$$

Det gäller även att $c_{s1} + c_{s2} + c_{s3} = 0$, vilket kan utnyttjas som kontroll.

De tre varianserna v_{d1} , v_{d2} och v_{d3} av de individuella störningarna ges av (jämför ekv (4.67))

$$v_{d1} = v_1 - v_s - 2c_{s1} \quad (4.88)$$

$$v_{d2} = v_2 - v_s - 2c_{s2} \quad (4.89)$$

$$v_{d3} = v_3 - v_s - 2c_{s3} \quad (4.90)$$

Därefter återstår att bestämma c_{d11} , c_{d22} , c_{d33} och på samma sätt som tidigare, se ekv (4.69).

Även de korsvisa kovarianserna c_{d12} , c_{d13} , c_{d12} kan lösas på liknande sätt som tidigare, se (4.71), men det avstår vi från här.

**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 830808-5
till Lunds tekniska högskola, Institutionen för
byggnadskonstruktionslära, Lund.**

R50: 1989

ISBN 91-540-5037-5

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6709050

**Abonnemangsgrupp:
W. Installationer**

**Distribution:
Svensk Byggtjänst
171 88 Solna**

Cirka pris: 73 kr exkl moms