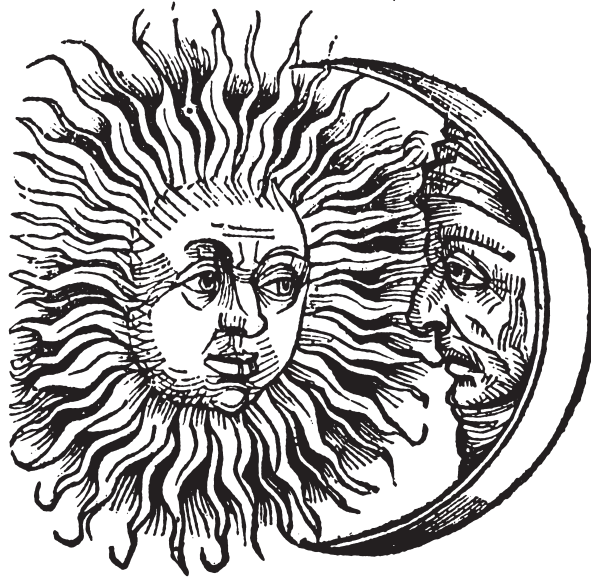


UPPSATS FÖR LICENTIALEXAMEN



Modellbaserad styrning av värmesystem baserat på
prognostiserat väder

En jämförelse med andra reglerstrategier

DANIEL OLSSON



Institutionen för Energi och Miljö
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2014

Modellbaserad styrning av värmesystem baserat på prognostiserat väder

En jämförelse med andra reglerstrategier

Daniel Olsson

© Daniel Olsson

Dokument 2014:01
Institutionen för Energi och Miljö. Avdelningen för Installationsteknik.
Chalmers Tekniska Högskola

SE-412 96 Göteborg
Telefon + 46(0)31-772 1000

Omslag: *Bondepraktikan*, 2010. Med tillstånd från Känguru förlag.
Tryck: Chalmers Reproservice, Göteborg, 2014.

Model based control of heating system, based on weather forecasts

A comparison with other control strategies

Daniel Olsson

Division for Building Services Engineering, Department of Energy and Environment.
Chalmers University of Technology

Abstract

Ever since the Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI) developed and introduced weather forecast control of building heating systems at the end of the eighties, this control principle has gradually become more common. Today, the technique controls over 10 million square meters heated floor area in total, of which Swedish multifamily buildings constitute the lion's share. Many of those who provide the technique claim that it generally reduces the use of heating energy by 10–15 % for a regular Swedish multifamily building. Figures of 10–20 kWh/m² also occur. A fundamental feature of the technique is transformation from a traditional supply temperature to a more demand controlled ditto that is determined with respect to the shape of the building, indoor activity and thermal inertia at the same time as it adjusts for weather forecasts for solar radiation through windows, air temperature, wind and rain.

In this licentiate thesis, the heating energy saving potential for a model based control strategy (with weather forecast) is quantified with a simulated “mirrored” building and put into relation to other central and local control strategies for hydronic heating systems. The control strategies are applied on a typical Swedish multifamily building modelled in the dynamic and well-known simulation software IDA ICE, version 4.6.

The simulation results show that the theoretical saving potential for the model based control strategy, compared to a traditional control strategy, is in the region of 10 kWh/m² heated floor area when applied on a hydronic system with “normal” function (fairly poor). This equals approximately 7 % of the heating energy used in the modelled reference building if the domestic hot water is included or almost 9 % if it is excluded. However, it turns out that the main part of the saving potential derives from the fact that the supply temperature is adjusted to the actual heating need, i.e. the saving is not due to the use of weather forecasts. This saving potential is comparable with the saving achieved in the modelled reference building when all radiator thermostats with normal function are changed to new ones at the same time as the radiator system is adjusted from what can be regarded as “normal” to “very good” balancing.

A fundamental conclusion drawn from this study is that better adapted supply water temperature leads to more stable indoor temperature. Small fluctuations of the indoor temperature enable the average temperature to be decreased without falling below the acceptable minimum value. A centrally applied measure to create a less fluctuating indoor temperature might appear less complicated in many cases compared to certain local measures such as changing all radiator thermostats or balancing of the heating system. The easiness probably contributes to the commercial spreading of the technique.

This licentiate thesis has been financed by the Swedish Energy Agency.

Modellbaserad styrning av värmesystem baserat på prognostiserat väder

En jämförelse med andra reglerstrategier

Daniel Olsson

Avdelningen för Installationsteknik, Institutionen för Energi och Miljö,
Chalmers tekniska högskola

Sammanfattning

Sedan konceptet med lokal väderprognosstyrning av byggnaders värmesystem utvecklades och introducerades av SMHI i slutet på 80-talet har det blivit allt mer vanligt förekommande och är idag installerat i byggnader med sammanlagt mer än 10 miljoner m² uppvärmd golvarea. Tekniken har hittills framförallt fått fotfäste i svenska flerbostadshus och av de som tillhandahåller tjänsten uppges ofta att konceptet normalt sett reducerar värmeenergianvändningen med 10 - 15 % för ett vanligt flerbostadshus. Även 10 - 20 kWh/m² nämns. Konceptet bygger på att framledningstemperaturen beräknas och behovsanpassas med hjälp av en så kallad ekvivalent utomhustemperatur, som tar hänsyn till byggnadens utformning, användning och termiska tröghet och väger in prognoser för solstrålning genom fönster, vind, lufttemperatur och nederbörd.

I föreliggande licentiatrapport har värmebesparingspotentialen för modellbaserad reglering med väderprognos kvantifierats med hjälp av en simulerad ”spegelbyggnad” och satts i relation till ett antal andra mer eller mindre vanligt förekommande lokala och centrala reglerstrategier för vattenburen värme. I analysarbetet appliceras de olika reglerstrategierna på ett typiskt flerbostadshus som modelleras i det svenska väletablerade och dynamiska energiberäkningsprogrammet IDA ICE, version 4.6.

Simuleringsresultaten visar att den teoretiska besparingspotentialen för den modellbaserade regleringen med väderprognos är i storleksordningen 10 kWh/m² jämfört med traditionell reglering av ett normalfungerande värmesystem. Detta motsvarar ungefär 7 % av referensbyggnadens värmeenergianvändning om tappvarmvattnet inkluderas och ungefär 9 % om det exkluderas. Besparingen visar sig dock främst bero på att framledningstemperaturen då anpassas efter byggnadens aktuella värmebehov, alltså inte för att väderprognoser används. Besparingspotentialen är jämförbar med den besparing som erhålls när ”normalfungerande” termostater byts mot nya välfungerande samtidigt som värmesystemet injusteras.

En av de fundamentala slutsatser som dras i arbete är att ju bättre framledningstemperaturen behovsanpassas och värmesystemet injusteras desto jämnare blir inomhustemperaturen, vilket i sig är en förutsättning för att reducera medeltemperaturen (utan att underskrida börvärdet) och därmed spara värmeenergi. Att praktiskt skapa en jämnare och lägre rumsmedeltemperatur centralt kan nog i många stycken uppfattas som enklare än att genomföra vissa lokala åtgärder, så som att byta termostater och injustera radiatorer i alla lägenheter. Enkelheten är sannolikt en bidragande orsak till den kommersiella väderprognosstyrningens popularitet.

Detta licentiatarbete har finansierats av Energimyndigheten.

Förord

Licentiatprojektet som beskrivs i denna rapport har finansierats av Energimyndigheten och utförts för avdelningen Installationsteknik på institutionen Energi och Miljö på Chalmers. Arbetsgivare har varit teknikkonsultföretaget CIT Energy Management AB.

Med tiden har listan över personer att tacka för inblandning och hjälp kommit att bli ganska lång och eftersom den tyvärr aldrig nedtecknats är risken överhängande att någon eller några glöms bort. På så vis kanske det mest rättvisa vore att här inte lyfta några namn alls, men det finns ett antal personer som trots allt måste nämnas, vars hjälp förutom detta projekt inte kunnat genomföras. Jag tänker särskilt på handledarna Anders Trüschel och Jan-Olof Dalenbäck som gång på gång visat sig besitta rikliga mått kunskap, intresse och inte minst tålamod. Mina kollegor på CIT Energy Management har också varit ett stort stöd i dagligarbetet och modelleringsmässigt hade allt hopp varit ute om det inte vore för den hjälp EQAU Simulation och framförallt Jörgen Eriksson bistått med. Jag vill även tacka den referensgrupp som tidigt knöts till projektet och som kommit med värdefulla inspel, särskilt Cari Andersson på SMHI som tillsammans med Stefan Berglund på eGain hjälpsamt sammanställde en historisk tillbakablick över väderprognosstyrningens utveckling från start till nutid.

Sist, men inte minst, ett stort tack till min förstående och kära familj som trots tillökningar, flytt, renoveringar och mycket mera stod ut!

Daniel Olsson, december 2014

Till minne av pappa Stefan som fick se arbetet inledas men aldrig avslutas.

Innehållsförteckning

Abstract	iii
Sammanfattning	v
Förord	vii
Beteckningslista	xii
Indexförteckning.....	xiii
1 Inledning	1
2 Bakgrund	2
3 Syfte, hypotes och projektupplägg	4
3.1 Hypotes	4
3.2 Projektmetod.....	7
3.3 Litteraturutblick	8
3.4 Prognosstyrning – en svensk historisk tillbakablick	13
3.4.1 Tillbakablick – en sammanställning av SMHI	13
3.4.2 Några milstolpar.....	15
3.4.3 Referenser till sammanställningen av SMHI	16
3.5 Väderprognosstyrning – inte bara i bostäder	17
4 Värmesystem – grunder om uppbyggnad och funktion	19
4.1 Värmesystemets uppdelning och komponenter.....	20
4.1.1 Övergripande om värmeproduktion	20
4.1.2 Övergripande om värmedistribution och pumpar	22
4.1.3 Övergripande om radiatorers kopplingsprinciper	23
4.1.4 Övergripande om värmeavgivning från radiatorer	25

4.2	Reglersystem och reglering	30
4.2.1	Värmesystemets uppbyggnad för reglering av framledningstemperatur.....	31
4.2.2	Central reglering av framledningstemperatur	33
4.2.3	Återkopplad reglering av framledningstemperatur	36
4.2.4	Lokal reglering med termostatventiler	39
4.3	Framledningstemperatur	42
5	Fiktiv temperatur och värmetröghet – några grunder.....	48
5.1	Fiktiv temperatur med avseende på termisk tröghet.....	50
5.2	Central reglering med fiktiv utomhustemperatur	53
5.3	Sammanfattat underlag för alternativ beräkning av framledningstemp	56
6	Referensbyggnaden.....	57
6.1	Övergripande simuleringsförutsättningar.....	59
6.2	Fönstervädring	61
6.2.1	Vädringsvaraktighet.....	62
6.2.2	Fönsteröppning	67
6.3	Solavskärmning - användning av persienner	70
6.4	Luftläckage	72
6.4.1	Tilluftdon och spaltventiler	74
6.4.2	Luftläckagemodeller i IDA.....	75
7	Metoder för värmereglering	77
7.1	Traditionellt.....	79
7.1.1	Fall 1A – Helt utan termostatventiler	79
7.1.2	Fall 1B – Normalfungerande termostatventiler	80
7.1.3	Fall 1C – Perfekt fungerande termostatventiler	82

7.2	Återkopplat	82
7.2.1	Fall 2A – Rumsgivare med P-reglering.....	82
7.2.2	Fall 2B – Rumsgivare med PI-reglering.....	83
7.3	Modellbaserat	84
7.3.1	Fall 3A – Modellbaserad behovsstyrd framledningstemperatur	84
7.3.2	Fall 3B – Prognostiserad framledningstemperatur	88
7.4	Teoretiskt perfekt	91
8	Tillvägagångssätt vid simuleringar i IDA ICE	92
8.1	Simulering av "traditionella" system.....	97
8.1.1	Fall 1A – Utan termostatventiler	97
8.1.2	Fall 1B – Med normalfungerande termostatventiler	97
8.1.3	Fall 1C – Med perfekt fungerande termostatventiler	98
8.2	Simulering av "återkopplade" system.....	98
8.2.1	Fall 2A – Rumsgivare med P-reglering.....	98
8.2.2	Fall 2B – Rumsgivare med PI-reglering.....	101
8.3	Simulering av "modellbaserade" system.....	102
8.3.1	Fall 3A – Modellbaserad styrning	103
8.3.2	Fall 3B – Prognostiserad behovsstyrd framledningskurva	107
8.4	Simulering av ett "perfekt" system.....	110
9	Resultat och analys	111
9.1	Resultatsammanställning för de ordinarie reglerstrategierna.....	111
9.2	Analys av de ordinarie reglerstrategierna.....	113
9.2.1	Analys – Fall 1 ("traditionellt")	114
9.2.2	Analys – Fall 2 ("återkopplat")	114

9.2.3	Analys – Fall 3 ("modellbaserat").....	115
9.2.4	Analys – Fall 4 ("perfekt")	119
9.3	Känslighetsanalyser.....	119
9.3.1	Inverkan av termisk massa.....	119
9.3.2	Utökat utrymme för prognoser och förstärkning	120
9.3.3	Inverkan av förhöjd internvärme i spegelbyggnaden.....	122
9.3.4	Inverkan av injustering.....	125
10	Erfarenheter från användare.....	127
10.1	Flerbostadshus i Borås.....	127
10.2	Flerbostadshus och radhus i Tyresö.....	128
10.3	Flerbostadshus i Köping	128
10.4	Äldreboende i Göteborg	128
11	Slutsatser och diskussion	129
12	Referenser	132
	Bilaga 1 – Referensbyggnaden i ett nötskal.....	138
	Bilaga 2 – Förångning från fasad	144

Beteckningslista

A	area	m^2
c	flödeskonstant (luftläckage)	$\text{m}^3/(\text{s Pa}^n)$
c	värmekapacitet	$\text{J}/(\text{kg } ^\circ\text{C})$
d	diameter	m
f	relativt effektbehov	-
g	fuktflödesdensitet	$\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$
H	radiatorhöjd	m
I_{sol}	solintensitet	W/m^2
K	värmekonduktivitet	$\text{W}/^\circ\text{C}$
K	radiatorkonstant (geometri och material)	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$
m	massa	kg
n	radiatorexponent	-
n	tryckexponent (luftläckage)	-
P	tryck	Pa
$\dot{Q}$	värmeeffekt	W
R	reduktionsfaktor för sol	-
r	ångbildningsvärme	J/kg
T	temperatur	K
t	temperatur	$^\circ\text{C}$
T^*	tidskoefficient	h
ΔT	tidssteg	h
v	vindhastighet	m/s
U	värmegenomgångskoefficient	$\text{W}/(\text{m}^2 ^\circ\text{C})$
$\dot{V}$	volymflöde	m^3/s
x	luftens absoluta vatteninnehåll	$\text{kg}_{\text{vatten}}/\text{kg}_{\text{luft}}$
α	värmeöverföringskoefficient	$\text{W}/(\text{m}^2 ^\circ\text{C})$
ε	emissivitet	-
σ	Stefan-Boltzmanns konstant	$\text{W}/\text{m}^2 \text{ K}^4$
k_{radiator}	radiatorkonstant (strålning och konvektion)	$\text{W}/(\text{m}^2 ^\circ\text{C})$
ρ	densitet	kg/m^3
λ	värmeledningsförmåga	$\text{W}/(\text{m } ^\circ\text{C})$

Indexförteckning

<i>c</i>	konvektion
<i>e</i>	ekvivalent
<i>i</i>	inomhus
<i>l</i>	luft
<i>L</i>	läckage (area)
<i>m</i>	mättad
<i>r</i>	strålning
<i>v</i>	vatten
<i>u</i>	ute

1 Inledning

Den totala köpta energin för uppvärmning och tappvarmvatten i svenska flerbostadshus, exklusive upptagen värmeenergi från värmepumpar, uppgick under år 2011 till 24,3 TWh. I genomsnitt användes motsvarande 10 200 kWh per lägenhet [Energimyndigheten 2011].

Allt sedan 1700-talets vedbrist i städerna ledde till att kakelugnar introducerades och började användas i stor skala, har det i Sverige funnits ett intresse för att minska värmeenergianvändningen i våra byggnader. Lite förenklat kanske man kan säga att energibesparingsivern resulterat i åtgärder inom framförallt fyra områden: *värmeproduktion* (eller hellre: omvandling av energi), *klimatskal och ventilation* samt *värmereglering*. När det gäller värmeproduktion har det bland annat lett till utvecklingen av värmepumpar och solvärmeanläggningar, mm och vad värmeisolering av klimatskal beträffar har det sedan ganska många år tillbaka funnits ett stort intresse för så kallade passivhus. Ventilationen tog det stora energieffektiviseringssteget då värmeåtervinning började användas, och på senare tid med införandet av behovsstyrt variabelt luftflöde. Även på reglersidan finns flera landvinningar, med introduktionen av termostatventilen som ett exempel. Andra exempel är återkoppling och väderprognosstyrning.

I föreliggande rapport beskrivs och analyseras ett antal olika reglerstrategier för styrning av värmesystem, där ett par av dem inkluderar väderprognoser.

En referensgrupp med stor erfarenhet av väderprognosstyrning knöts redan tidigt till forskningsprojektet. Gruppen består av:

- Cari Andersson & Magnus Rödin – SMHI
- Dan Ervall – Medichus, Göteborg
- Henrik Patriksson – Eidar, Trollhättan
- Jonas Tannerstad – Örebrobostäder
- Kjell Berndtsson – Riksbyggen/BeBo
- Olof Peterson – Vasakronan
- Per Löveryd – Akademiska Hus, Chalmers
- Stefan Berggren och Thorbjörn Geiser – eGain

I sammanhanget vill SMHI och eGain framhålla att den i rapporten studerade väderprognosstyrningen varken är identisk med den som marknadsförs av SMHI eller den som marknadsförs av eGain.

Energimyndigheten har stått för finansieringen av forskningsprojektet som genomfördes för Chalmers. Huvudhandledare har varit professor Jan-Olof Dalenbäck och daglighandledare har varit universitetslektor Anders Trüschel, båda på Chalmers, Institutionen för Energi och Miljö, avdelningen för Installationsteknik.

2 Bakgrund

Sedan konceptet med väderprognosstyrning första gången såg dagens ljus i slutet av 80-talet får det allt fler användare. Idag reglerar det uppvärmningen av mer än 10 miljoner kvadratmeter bostads- och lokalarea, där flerbostadshus utgör lejonparten. Detta kan jämföras med att det totalt i Sverige finns drygt 170 miljoner kvadratmeter uppvärmd flerbostadshusarea [Energimyndigheten 2012]. Enligt leverantörer av tekniken resulterar den, rätt anpassad och i rätt sammanhang, i värmebesparingar på ca 10-15%. Värmebesparingar i intervallet 10 - 20 kWh/(m²,år) nämns också.

Kanhända är en bidragande orsak till genomslaget bland fastighetsägare att det framstår som en relativt enkel åtgärd, som endast förutsätter ringa egeninsatser, i alla fall i jämförelse med flera andra energisparande åtgärder som att exempelvis installera värmeåtervinnande ventilation, injustera värmesystem eller annat som kan kräva stor arbetsinsats och fysisk åtkomst till lägenheter mm.

Bland fastighetsägare som testat/testar väderprognosstyrning skiftar erfarenheterna. Vissa påvisar dokumenterade reduktioner av värmeanvändningen, medan andra inte ser någon nämnvärd skillnad jämfört med tidigare. En anledning kan vara att den typen av granskningar kan vara svåra att göra, eller åtminstone att tolka. Eftersom det enligt leverantörernas egen utsago trots allt inte handlar om större besparingar än 10-15 %, vilket förvisso är en respektabel effektivisering, kan det vara svårt att veta vad en eventuellt reducerad energianvändning kan ha orsakats av. I verkliga fallstudier finns flera aspekter som kan vara svårbedömda, även om analysarbetet genomförs aldrig så noga. Exempel på något tillspetsade frågor som bör ställas inför slutsatser av sådana jämförelser är:

- Var verksamheten i byggnaden samma under jämförelseperioden innan och efter?
- Var de boende samma till antal?
- Flyttade några ensamboende hyresgäster ut till förmån för duschande tonårsfamiljer, eller vice versa?
- Upphörde de där notoriska inomhusrökarna att ständigt vädra i samband med att de bytte cigaretter mot tuggummi?
- Genomfördes andra energieffektiviseringsåtgärder, så som exempelvis injustering av värmesystem eller installation av snålspolande vattenarmaturer?
- Var det liknade väder eller var det ovanligt varmt/kallt (relativt enkelt att kompensera för) eller var det ungefär lika mulet/soligt, blåsig (mindre enkelt att kompensera för)?

Den sista aspekten kan vara nog så avgörande om vädrets inverkan enbart normalårskorrigeras med avseende på utomhustemperatur, särskilt om byggnaden är lite nyare med kanske stor andel fönster och/eller välisolerade och täta väggar. Den gängse normalårskorrigeringsmetoden som enbart beaktar temperatur togs fram på 30-talet och är helt enkelt inte anpassad efter senare tiders byggnorm. Många gånger kan det i så fall vara bättre att använda *energiindex* [Schulz 2003], som även beaktar sol och vind.

Med detta som bakgrund beviljade Energimyndigheten medel för att i en teoretisk studie analysera värmebesparingspotentialen med väderprognosstyrning och ta reda på för vilka förhållanden eventuella besparingar kan uppnås och vice versa. Förvisso har tidigare ett teoretisk test gjorts av den beräkningsmodell som SMHI använder sig av. Testet genomfördes på Chalmers redan 2006 [Sasic et al 2006] men det avsåg endast SMHIs beräkningsmodell, inte energibesparingspotentialen för konceptet som sådant.

Men vad är då väderprognosstyrning? Svaret på frågeställning varierar sannolikt beroende på vem som tillfrågas och vilket tillämpningsområde den tillfrågade personen avser. Som vi snart skall se förekommer begreppet i flera olika typer av lokala och regionala tillämpningar. I denna rapport avses dock endast väderprognosstyrning ur ett synnerligen lokalt perspektiv, närmare bestämt på byggnadsnivå.

Finns då någon vedertagen definition av begreppet väderprognosstyrning för det aktuella tillämpningsområdet? Kanske ingen i dess striktaste mening, men på Wikipedia återfinns i alla fall följande formulering:

Prognosstyrning är en metod för att styra uppvärmning av byggnader som innebär att man för varje tidpunkt beräknar hur mycket energi som skall tillföras en byggnad, baserat på mycket lokala väderprognoser. Genom att kombinera byggnadsfysik och meteorologi kan man ta hänsyn till byggnadens egenskaper såväl som väderförhållanden med utetemperatur, vindstyrka, vindriktning och solinstrålning.

I många andra installationstekniska sammanhang har annars *behovsstyrning* kommit att bli ett populärt begrepp sedan en tid tillbaka för alla möjliga tillämpningar. Med det som utgångspunkt utgör följande formulering en alternativ definition (som är central i denna rapport):

Väderprognosstyrning är en reglerstrategi för att behovsstyra byggnaders uppvärmning genom att såväl prognostiserade som aktuella klimatparametrar beaktas i samspel med byggnadens egenskaper och användningssätt för framtagning av en anpassad framledningstemperatur.

3 Syfte, hypotes och projektupplägg

I finansieringsansökan till Energimyndigheten sammanfattas projektets syfte och arbetsupplägg med:

Projektet omfattar en vetenskaplig utvärdering av möjligheter och begränsningar att minska energianvändningen med så kallad prognosstyrning. Utvärderingen görs med en avancerad byggnadsmodell som har kapacitet att simulera såväl byggnaders funktion som värmebalans i detalj.

En allmänt god vana är att undvika att ange vad ett projekt INTE ska innefatta, eftersom det underförstått kan tolkas som att allt övrigt mellan himmel och jord faktiskt ingår... Men i detta fall görs, på förekommen anledning, ett undantag eftersom flera personer tolkat det som att projektets uppgift är att utvärdera de existerande koncept för väderprognosstyrning som idag finns på den svenska marknaden. Men så är alltså inte fallet. Här avses istället att den *teoretiska potentialen* för prognosstyrning utvärderas.

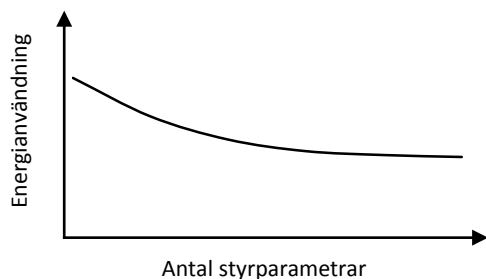
Vidare - eftersom prognosstyrning handlar om så mycket mer än att bara styra mot en prognostiserad utomhustemperatur är det nödvändigt att reglerstrategin analyseras i steg för att besvara den grundläggande frågan huruvida själva prognosmomentet är viktigt för nyttan med strategin eller ej i jämförelse med de andra momenten som ryms inom reglerstrategin.

3.1 Hypotes

När det gäller antagande/hypotes, beror den lite på vad som avses. Hypotesen är nämligen till viss del avhängig valet av huvudprincip för reglering. Senare redogörs för skillnaden mellan huvudprinciperna *återkoppling* och *framkoppling* där framkopplingen kan vara antingen *statisk* (traditionell) eller *modellbaserad* eller *modellbaserad med prognos*. Utan att närmare gå in på begreppen här och nu konstateras bara att hypotesen för effektiv reglering, i sin kortaste form i denna rapport lyder:

Ju fler parametrar en reglerstrategi kan beakta ju större värmebesparingspotential. Detta förutsätter dock att reglerstrategin kan hantera flera variabla styrparametrar på ett tillbörligt vis.

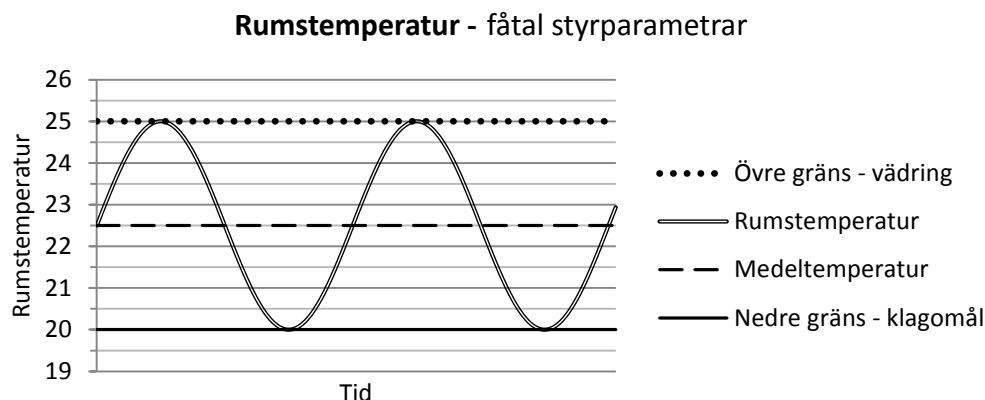
Eftersom väderprognosstyrningskonceptet innefattar ett relativt stort antal olika styrparametrar torde det enligt tesen ha goda förutsättningar att reducera byggnaders energianvändning.



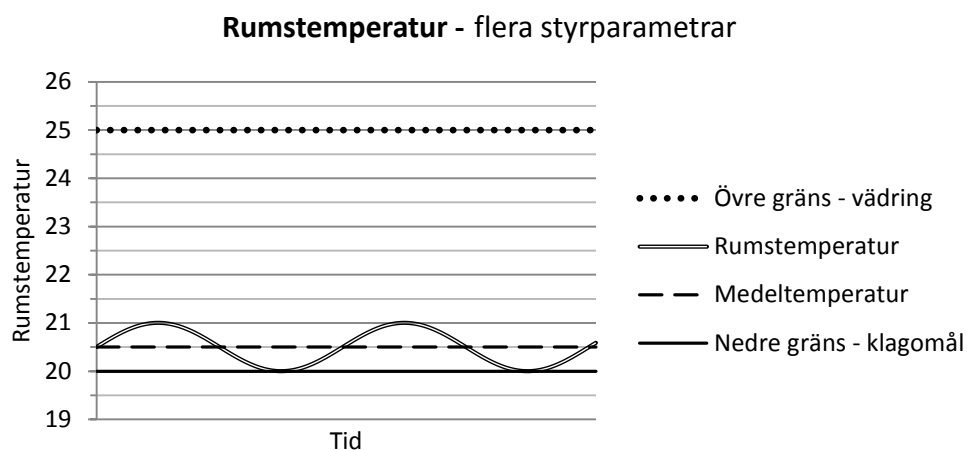
Figur 3.1 Principiellt antaget förhållande mellan värmeenergianvändning och antalet styrparametrar

Dock är det självfallet inte *antalet* reglerparametrar i sig som avgör hur bra ett system är. *Vilka* reglerparameter som avses och *hur* de används är viktigare. Det visar sig exempelvis att återkoppling med avseende på frånluftstemperatur kan vara ett effektivt sätt att centralt styra byggnaders värmesystem om förutsättningarna är de rätta, trots att det då bara är frågan om två styrparametrar (utomhustemperatur och rumstemperatur). Indirekt rymmer dock återkoppling ett näst intill oändligt antal styrparametrar eftersom rumstemperaturen är resultatet av ett mycket komplext byggnadsfysikaliskt dynamiskt samband. Det visar sig hursomhelst att återkoppling i många fall kan vara väl så bra som att styra mot ett betydligt större antal parametrar.

Vidare fastställs att reglerstrategier, däribland återkoppling, som beaktar flera parametrar än bara utomhustemperatur har större förutsättningar att skapa en jämn inomhustemperatur jämfört med traditionell reglerstrategi. Med jämnare inomhustemperatur, dvs. reducerad amplitud för inomhustemperaturförloppet, kan börvärdet (den eftersträlvade inomhustemperaturen) och därmed medeltemperaturen sänkas vilket reducerar värmeförlusterna eftersom dessa har sin grund i temperaturskillnaden mellan utomhus och inomhus, se Figur 3.2 och 3.3 på nästa sida.



Figur 3.2 Principiellt exempel över rumstemperatur som resultat av traditionell reglering.



Figur 3.3 Principiellt exempel över rumstemperatur som resultat av ett system som reglerar mot flera olika parametrar (dynamisk framkoppling).

I Figur 3.2 med statisk framkoppling och bristfälligt fungerande lokal reglering riskerar temperaturamplituden att bli stor, vilket gör att medeltemperaturen måste hållas hög för att undvika att rumstemperaturen underskrider den nedre acceptabla gränsen. Figur 3.3 visar hur resultatet kan bli med effektiv reglering där en låg medeltemperatur möjliggörs utan att rumstemperaturen underskrider den nedre acceptabla gränsen.

Som konstaterades redan i det inledande kapitlet är ett utmärkande drag för väderprognosstyrningskonceptet, måhända föga förvånande, att regleringen sker mot väderprognoser men därutöver baseras regleringen även på flera byggnadsrelaterade parametrar.

Utan att föregå beräkningsresultaten i slutet av rapporten konstateras att om hypoteserna stämmer torde väderprognosstyrningskonceptet alltså visa sig resultera i såväl jämnare inomhustemperatur som reducerad värmeenergianvändning. Men som tidigare nämnts är dock en av arbetets frågeställningar huruvida delar av en sådan komfortförbättring och

värmeenergibesparing kan uppnås enbart genom att styra mot fler parametrar (utan prognosdelen) än vad traditionell reglering gör.

3.2 Projektmetod

För att utvärdera om hypotesen stämmer eller inte görs energi- och inneklimatsimuleringar med ett antal olika reglerstrategier som appliceras på en framtagna referensbyggnad som motsvarar ett typiskt svenskt flerbostadshus.

För att förankra arbetet på "marknaden" och få in adekvata uppgifter och åsikter om bl.a. projektets utformning och indata knöts en referensgrupp till projektet, med representanter för fastighetsägare, energileverantörer, energi- och projekteringsingenjörer samt tjänsteleverantörer. Sammantaget har referensgruppen mycket stor erfarenhet av väderprognosstyrning, se Kapitel 1 - Inledning.

Energisimuleringarna genomförs med det avancerade och verifierade svenskutvecklade beräkningsprogrammet IDA ICE, version 4.6. Programmet är sedan länge välkänt för sin flexibilitet och goda modelleringsförmåga.

Väderdata till beräkningsmodellerna baseras på ett statistiskt genererat klimatår som bl.a. innehåller information om luftens temperatur, solintensitet, molnighet, vindriktning och vindhastighet. I de fall värmeregleringen tar hänsyn till väderprognoser tidsförskjuts klimatinformationen framåt i tiden i en process som leder till en beräknad och behovsanpassad framledningstemperatur, samtidigt som byggnaden kontinuerligt utvärderar sin värmebalans med aktuellt klimat i nutid. Men detta beskrivs mer i detalj senare.

I dagsläget har IDA ICE 4.6 ingen standardlösning för flera av de reglerstrategier som analyseras. I projektet ingår därför framtagande av ett antal nya beräkningsmoduler. Redan från projektets början gjordes bedömningen att den mest effektiva arbetsmetoden torde vara att programmering och nyutveckling av moduler fick ske i samarbete med företaget EQUA i Stockholm, som tillhandahåller och utvecklar IDA ICE.

Bland de som levererar väderprognosstyrning som koncept hävdas ofta att den reglerstrategin även leder till ökad termisk komfort jämfört med hur det var innan regleringen installerades. De menar att fastighetsägare ofta uppger att hyresgästernas klagomål relaterade till termisk komfort avtar då äldre reglering ersätts/kompletteras med väderprognosstyrning. Jämnare inomhustemperatur antas dessutom redan i hypotesen utgöra en grund för värmeenergibesparing. Alltså är även den aspekten viktig att studera, vilket också görs i Kapitel 9.

Det valda angreppssättet för att kvantifiera energibesparingspotentialen för modellbaserad reglering med prognos har efter överväganden bedömts vara den mest framkomliga ur ett vetenskapligt och resurseffektivt perspektiv.

Rapportens innehåll närmast härfter ger en litteraturutblick i ämnet följt av en historieskrivning. Kapitel 4 ger först vissa allmänna grunder bl.a. beträffande värmesystems uppbyggnad och funktion, samt hur dessa regleras. Särskilt fokus läggs på framledningstemperatur och hur en sådan kan tas fram. Därefter, i Kapitel 5, redogörs för begreppet fiktiv utomhustemperatur. Begreppet är fundamentalt vid konventionell väderprognosstyrning, men saknar allmängiltig definition. Därför görs här ett försök att beskriva några olika typer av fiktiv utomhustemperatur och därefter knyta ihop resonemanget till aktuellt tillämpningsområde. Kapitel 6, tillsammans med Bilaga 1, utgörs av beskrivningar av den aktuella referensbyggnaden med avseende på teknik, geometri, byggnadsmaterial, aktivitet (boende), etc. Om Kapitel 7 är en allmän redogörelse för uppbyggnaden av ett antal olika centrala och lokala reglerstrategier så kan Kapitel 8 sägas ge en mer specifik beskrivning av hur de olika systemen modellerats i IDA ICE 4.6. Rapportens avslutning inleds med resultat och analyser i Kapitel 9 följt av Kapitel 10 där erfarenheter från några användare av verklig prognosstyrning presenteras. Slutligen avrundas rapporten med ett diskussionskapitel (Kapitel 11).

3.3 Litteraturutblick

Det senaste decenniet har det kommit ett antal internationella artiklar, rapporter och konferensbidrag om prognosstyrning. Av de som finns råder en relativt kraftig slagsida åt teoretiska och simulerade betraktelser, men några redovisar även uppmätta data från fältförsök. I merparten av de artiklar som hittats om prognosstyrning ingår begreppet som en mer eller mindre väsentlig beståndsdel i en reglerteknikstrategi som ofta kallas för Model Predictive Control (MPC), vilket på svenska brukar översättas med *modellbaserad styrning*. Den kanske främsta plattformen för skriftlig information om MPC i allmänhet är hemsidan för det så kallade OptiControl-projektet (www.opticontrol.ethz.ch) inom det teknologiska institutet ETH Zürich, i Schweiz.

Model predictive control började användas som reglerstrategi i stor skala inom bl.a. processindustrin i slutet på 70-talet och början på 80-talet [Široký et al. 2011] och går ut på att en modellbaserad reglering av ett system baseras på vad man vet eller tror sig veta om framtida variabla indata. Eftersom prognosstyrning av byggnader tar hänsyn till framtida väder kan tekniken kategoriseras som MPC. Men i den svenska litteratur som finns om väderprognosstyrning används varken benämningarna MPC eller modellbaserad styrning med prognos, möjligen beror det på att den svenska text som finns i ämnet ofta är ganska kundtillvänd där vissa benämningar kanske bedömts riskera att framstå som abstrakta och svårbegripliga.

Av de studier som hittats redogörs här för *några* få av de som ansågs vara av intresse för denna rapport:

I en tjeckisk vetenskaplig artikel från 2011 [Široký et al. 2011] tas en MPC-modell fram för styrning av en byggnads värmesystem. Modellen testades sedan i verkligheten på en mycket stor universitetsbyggnad i Prag vars värmesystem under två och en halv månad styrdes av

testmodellen. Författarna anger att den graddagskompenserade värmebesparingen jämfört med traditionell framledningskurva blev 15 -25 % beroende på vilken byggnadskropp som analyserades. Byggnadens värmesystem består av uppvärmda betongbjälklag, vilket kanske kan liknas vid golvvärme som annars normalt sett i Sverige inte brukar styras med prognosstyrning, även om det faktumet kan ha andra orsaker än rent reglertekniska. Huruvida framledningskurvan till bjälklagssystemet optimerades eller ej framgår tyvärr inte, däremot uppges att systemet regleras lokalt med PID-regulatorer, vilket nog får anses anmärkningsvärt omsorgsfullt. En intressant utgångspunkt för den aktuella MPC-modelleringen var att den inte bara beaktade internvärme och väderprognos, även dygnsvarierande energitaxor togs hänsyn till.

En koreansk/kanadensisk vetenskaplig artikel från 2002 [Cho, Zaheer-uddin 2002] beskriver en teoretisk och praktisk studie av ett ganska typiskt sydkoreanskt flerbostadshus med bjälklagsvärme. Tydligt är det ganska vanligt att sådana värmesystem där styrs med konstant framledningstemperatur som slås av och på under olika långa tidsperioder beroende på hur kallt det är utomhus, s.k. PWM (pulse-width modulation). Denna typ av reglering kallas ibland även för intermittent reglering och är knappast särskilt vanlig i svenska byggnadssammanhang, åtminstone inte för vattenburna värmesystem. Även MPC-modellen i studien som tas fram för simulering och praktisk studie är intermittent och i likhet med det konventionella systemet saknas såväl återkoppling som lokal reglering. Inga rumsternostater alltså. Studien beaktar endast utomhustemperatur och man skärmar därför av solstrålning under sin sammanlagt tre dagar långa försöksperiod. Resultaten visade att man sparade 10 – 20 % värmeenergi med MPC-reglering även om det alltså var under lite speciella omständigheter och en mycket begränsad tidsperiod.

Ett schweiziskt konferensbidrag från 2010 [Oldewurtel 2010], där hälften av författarna har sin bakgrund i det tidigare nämnda tekniska institutet i Zürich, beskriver en teoretisk studie där modeller av kontorsbyggnader simuleras med olika typer av reglerstrategier. I likhet med upplägget i denna licentiatuppsats jämförs olika typer av reglering med en teoretiskt optimal reglering. Tyvärr finns där dock ingen särskilt konventionell reglering att jämföra med, bara olika mer eller mindre avancerade MPC-strategier. Eftersom studien simulerade kontorsbyggnader var det fler saker än värmesystemet som styrdes med MPC som strategi. Författarna anger att även HVAC systemet styrdes av MPC (oklart om även luftflöde och kyla styrdes) samt belysning och solavskärmning. Detta gör att resultaten från denna studie inte är direkt jämförbara med resultaten från de andra studierna eller med denna licentiatrapport. Studien är dock intressant ur den aspekten att den undersöker skillnaden mellan bra och dålig väderprognoskvalitet. Simuleringsresultaten för deras sex byggnadsmodeller visar först att den totala energianvändningen (el + värme) är 10 – 50 % högre (genomsnitt 28 %) för deras framtagna MPC-strategi jämfört med vad som skulle fås med en teoretiskt optimal reglering och perfekt väderprognoskvalitet. Används istället en teoretiskt optimal reglering, men med en väderprognos av sämre kvalitet, här i form av repetition från föregående dygn, fås att motsvarande energianvändningsökning är 45 - 140 % (genomsnitt 100 %). Utan att allt för mycket gå händelserna i förväg för denna rapport får nog resultaten från den schweiziska studien i vissa stycken anses anmärkningsvärda, inte minst med avseende på skillnaderna

mellan olika prognoskvalitet, även om det alltså var kontor som simulerades och mer än bara värmesystem som styrdes.

En schweizisk konferensartikel från 1985 [Grünenfelder, Tödtli 1985] är den äldsta litteraturen som hittats i ämnet och är med här just därför, trots att den handlar om reglering av solvärt tappvarmvatten. Det är en optimeringsstudie för att se huruvida användning av väderprognoser kunde reducera mängden köpt energi (spets-el) för ett solvärmebaserat tappvarmvattensystem. Faktum är att det redan i den studien gjordes en analys av prognoskvalitetens betydelse men resultaten är något svårtolkade.

En svensk vetenskaplig artikel från SMHI [Taesler et al. 2006]. Detta är en av ganska många artiklar som tar upp den så kallade ENLOSS modellen, den beräkningsmotor som bl.a. ligger till grund för värmebalansberäkningar och framtagning av ekvivalent utomhustemperatur för reglering av byggnaders värmesystem. ENLOSS är grunden för den väderprognosstyrningstjänst som SMHI tillhandahåller via Honeywell och ERAB.

ENLOSS modellens värmebalans inkluderar förutom värmeförluster för transmission, luftläckage och mekanisk ventilation även internvärme från personer, apparater, solvärme, värmelagring, mm. Värmebalansen används för att ta fram en fiktiv, framräknad utomhustemperatur som i sin tur används för att styra byggnaders värmesystem. Den fiktiva utomhustemperaturen kan inte mätas, bara beräknas fram. I ENLOSS-modellen förblir inomhustemperaturen konstant, enligt ett satt börvärde, och kan därmed kanske sägas vara en halvdynamisk modell. Vid prognosstyrning används såväl observerade som prognostiserade väderdata så att den fiktiva temperaturen blir ett resultat av byggnadens konstruktion, byggnadens användning, aktuellt väder och framtida väder. Den fiktiva temperaturen kallas av SMHI genomgående för *ekvivalenttemperatur*, T_e och beräknas som:

$$T_e = t_{ute} - \left(\frac{1}{A}\right) \cdot (B \cdot u^2 \cdot \Delta t + G - EP - S) \quad [^\circ\text{C}] \quad (\text{ekv 3.1})$$

u: vindhastighet [m/s]

Δt : tute – tinne, bör [°C]

G: värmeförlust till mark [W]

EP: internvärme från apparater och människor [W]

S: solvärmetillskott genom fönster [W]

A och B fås genom regressionsanalys av värmebehovet ställt mot värmeförluster för olika byggnadstyper

En svensk vetenskaplig artikel från Chalmers och SMHI [Sasic et al. 2006a]. Denna artikel redogör preliminärt för en utvärdering av ENLOSS som beräkningsmodell. Eftersom den teoretiska utvärderingen ännu inte var helt klar då artikeln skrevs hänvisas till den tekniska rapport som kom något senare, se nedan [Sasic et al 2006b]. Istället beskrivs i denna artikel en intressant mätbaserad studie gjord på två likadana fjärrvärmeförsörjda flerbostadshus i

Köping, en med prognosstyrning och en utan där den normalårskorrigerade energianvändningen blev 9 % lägre i byggnaden med väderprognosstyrning. Läs mer om denna studie i Kapitel 10.3.

En teknisk rapport från Chalmers [Sasic et al. 2006b]. Denna tekniska rapport redogör för en utvärdering av beräkningsmodellen ENLOSS. Utvärderingen skedde på Chalmers av författaren Sasic. Uppdragets syfte, förutom att utvärdera ENLOSS som beräkningsmodell, var även att identifiera och ta fram förslag till förbättringar av modellen.

I studien jämfördes ENLOSS med beräkningsmodellen HAM (Heat, Air and and Moisture transfer) som tidigare tagits fram och utvärderats på Chalmers. Jämförelsestudien mellan ENLOSS och HAM bestod i ett antal simuleringar av en lätt och en tung enkel teoretisk byggnadsmodell. Modellerna hämtades från ett vedertaget testförfarande kallat BESTEST, som ingår i ANSI/ASHRAE Standard 140-2001. Båda modellerna testades under två olika förutsättningar - med och utan solstrålning genom fönster. I inget av fallen beaktas solstrålning på fasad och tak eftersom ENLOSS inte gör det. Ett avsteg som fick göras på själva byggnadsmodellerna jämfört med BESTEST var att den lokala reglerstrategin fick begränsas till en "på/av-reglering" där byggnaden värms så fort rumstemperaturen är lägre än 21 °C och kyls om rumstemperaturen är högre än 21 °C. Inget glidande mellanläge (dödband) alltså. Denna förenkling påverkar dock främst byggnadens kylenergibehov.

Beräkningsresultaten visade att ENLOSS och HAM räknade sig fram till i princip helt identisk energiprestanda för byggnadsmodellen där sol inte beaktades, oavsett om byggnaden var lätt eller tung (endast ca 0,2 % skiljde). Om däremot även sol genom fönster beaktades gav ENLOSS-modellen 5,6 % lägre energianvändning för den lätta byggnadsmodellen och 10,7 % lägre för den tyngre, jämfört med HAM. Senare i rapporten kommer författaren fram till att skillnaden skulle varit ännu större om det inte vore för att ENLOSS använde sig av anmärkningsvärt höga värden för de konvektiva värmeöverföringskoefficienterna på klimatskalets in- och utsida.

Eftersom beräkningsresultaten visade på skillnader först när sol fick lysa genom fönster, analyserades främst orsaken till detta i Sasic rapport. Det visade sig att ENLOSS-modellen överdrev inverkan av värmetröghet enligt författaren. Detta berodde på att modellen bara hade en gemensam tidskonstant för hela byggnaden, alltså samma för solinstrålning genom fönster som för utomhustemperaturens långsamma inverkan på klimatskalet. Detta är en förenkling även om det i verkligheten förvisso finns en fördröjning mellan inkommande solstrålning och tillförd värme till rumsluften, men den fördröjningen är inte den samma som byggnadens övriga tröghet. Detta föranledde rapportförfattaren att komma med förslag om hur ENLOSS kunde förbättras på den punkten. Enligt förslaget bör den ekvivalenta temperaturen viktas i två separata steg; en viktning utan solvärmetillskott genom fönster och en annan parallell viktning av enbart solvärmetillskottet genom fönster. Den slutliga ekvivalenta temperaturen blir då en sammanslagning av de två.

I ett svenskt examensarbete från Chalmers 2011 [Andreasson, Hägg 2011] görs en teoretisk studie på ett fiktivt flerbostadshus från 70-talet i Göteborg. Studien baseras på simuleringar med IDA ICE där olika reglerstrategier tas fram med och utan så kallad ekvivalent utomhustemperatur. I arbetet beräknas den ekvivalenta utomhustemperaturen så som begreppet beskrivs i ett svenskt patent för väderprognosstyrning från 2007 [Taesler, 2007], se ekv 3.1. De olika reglerstrategierna är i grund och botten uppdelade i två typer av lokal reglering: *utan* respektive *med* termostater. De två lokala regleringarna kombineras med tre typer av central reglering för framledningstemperaturen: traditionell reglering (bara utomhustemperaturreglerad), ekvivalent temperatur samt ekvivalent temperatur med väderprognos.

I arbetet anges att värmeenergibesparingen som erhöles pga. installation av termostater blev ungefär lika stor som när ekvivalent utomhustemperatur fick styra framledningstemperaturen istället för bara utomhustemperaturen (ca 8 % respektive ca 7,5 %). Med en kombination av termostater och ekvivalent temperatur reglering blev besparingen istället ca 9 %, alltså bara något större. Vidare menar författarna att skillnaden mellan att låta värmesystemet regleras av en ekvivalent utomhustemperatur baserad på *aktuella* väderdata jämfört med ekvivalent temperatur baserad på *väderprognos* var försumbar (0,2 %).

I arbetet redovisas även två studier från verkliga mätningar på flerbostadshus och radhus i Borås och Tyresö där väderprognosstyrning installerats. Läs mer om dessa studier i Kapitel 10.2.

I ett svenskt examensarbete från Chalmers 2009 [Hilding, Nilsson 2009] studeras ett antal olika reglerstrategier utifrån faktiska uppmätta data i olika byggnadsbestånd. Studien är delvis gjord ur ett fjärrvärmeleverantörsperspektiv för att se vilken inverkan implementering av olika ”nya” reglerstrategier får för den totala fjärrvärmelasten i Göteborgs fjärrvärmenät. Väderprognosstyrning var en av de reglerstrategier som studerades, en annan var reglering med utomhusgivare tillsammans med rumstemperaturgivare som via en byggnadsmodell beräknar fram lämplig framledningstemperatur. Examensarbetet går inte in på hur de olika reglerstrategierna fungerar rent tekniskt, här är det istället mätresultat från olika fastighetsbestånd som utgör underlaget för följdanalyser mm. I fallet med prognosstyrning var det olika flerbostadshus i Göteborg som studerades med den sammalagda arean om ca 7 600 m². Enligt eGain, som var leverantör av prognosstyrningstjänsten, var den normalårskorrigerade värmebesparingen för de aktuella byggnaderna ca 14 %. I fallet med reglering med bl.a. rumsgivare, så kallad återkoppling, baserades även dessa mätresultat på flerbostadshus i Göteborg men då med en total area om ca 28 900 m². Enligt EnReduce, som var leverantör av energitjänsten med återkoppling, reducerades värmeenergianvändningen 10 - 17 % efter normalårskorrigerig med denna typ av reglerstrategi. Besparingens storlek berodde på vilken byggnadskropp som avsågs. Viktas resultaten med avseende på antalet kvadratmeter blev genomsnittet ca 15 %.

Ett svenskt examensarbete från Gävle högskola 2008 [Urdian 2008] gör en teoretisk beräkning av värmeenergianvändningen i en befintlig kontorsbyggnad i Sandviken på Sandvik AB. Av olika anledningar hade Sandvik AB tidigare införskaffat en väderstation och man var intresserade av att se om man kunde använda indata från den för att styra byggnadens värmesystem och på så vis spara värmeenergi. Beräkningarna i examensarbetet genomfördes i det matematiska programmet MATLAB och utgick helt och hållet från Taeslers teorier och framräkning av ekvivalent temperatur. Det bör dock nämnas att arbetet inte beaktar prognosstyrning och att den framräknade ekvivalenta temperaturen endast används för värmebalansberäkningar, inte för att styra ett vattenburet värmesystem. Författaren räknar sig fram till att värmebesparingen under de förutsättningarna blir ca 8 % per sänkt Celsiusgrad inomhus. Att examensarbetet omnämns i detta arbete beror på mestadels på det sistnämnda, eftersom det är ett ”nyckeltal” som är helt i nivå med vad som beräknas fram även i detta arbete, se Kapitel 11.

3.4 Prognosstyrning – en svensk historisk tillbakablick

I syfte att ge en svensk bakgrundsbeskrivning till väderprognosstyrning som koncept, sammanfattas här en tillbakablick i ämnet. Eftersom motsvarande information inte tidigare sammanställts överläts författandet av detta delkapitel till de som var med från början och först introducerade prognosstyrning, nämligen SMHI. Sammanställningen har tagits fram i samförstånd med tidigare anställda på INU Control som tidigt var med i teknik- och konceptutvecklingsprocessen och som numera jobbar på företaget eGain. Huvudtexten har tagits fram av Cari Andersson på SMHI som själv hade stor del i framtagandet av tekniken.

I texten nämns ENLOSS-modellen på flera ställen. Som redan konstaterats är ENLOSS den ”beräkningsmotor” som SMHI använder sig av vid bl.a. reglering av byggnaders värmesystem.

3.4.1 Tillbakablick – en sammanställning av SMHI

Metoden för prognosstyrning utvecklades vid SMHI under 1990-talet under ledning av professor Roger Taesler, även om den teoretiska grunden för ENLOSS-modellen utvecklades av Taesler redan i början av 1980-talet. Modellsystemet ENLOSS togs fram för beräkning av byggnadens värmebalans. För varje enskild timma beräknar ENLOSS det nettobehov av energi som krävs för att byggnaden ska hålla önskad innetemperatur. Hänsyn tas till byggnadens form, användningssätt, fönsterfördelning, el- och personvärmertilskott, energitekniska status (U-värden, lufttäthet, termisk tröghet) samt exponering för sol och vind. Beräkningarna omfattar dels energiförluster pga. värmetransmission genom väggar, tak och mot mark, förluster pga. självdragsventilation och fläktstyrd ventilation med ev. värmeåtervinning. Det beaktar också värmertilskott pga. solinstrålning genom fönster samt från personer och elanvändning i byggnaden. De enskilda posterna i byggnadens momentana värmebalans summeras till ett nettobehov av tillförd eller bortförd värmeeffekt för upprätthållande av önskad innetemperatur.

ENLOSS-modellens framtagande och utvärdering grundas bl.a. på samarbete och kontakter med forskare vid f.d. Statens Institut för Byggnadsforskning, Lunds Tekniska Högskola, Chalmers i Göteborg och Kungliga Tekniska Högskolan i Stockholm. ENLOSS-modellens uppbyggnad redovisas i sina huvuddrag i referenserna (Kapitel 3.4.3)

Roger Taeslers intresse för vädrets och klimatets roll i byggnaders energianvändning väcktes i början av 1970-talet under den första sk. energikrisen. Han tyckte det var märkligt att man inom byggbranschen inte brydde sig särskilt mycket om annat än utetemperaturens roll trots att det borde vara uppenbart att både solstrålning och vind påverkar värmebalansen. Han hade en del kontakt med Engelbrekt Isfält och de skrev några uppsatser i ämnet 1975 och 1979 [Isberg, Taesler 1975] respektive [Taesler, Isberg 1979]. Roger insåg att de synoptiska meteorologiska timobservationerna innehåller en mängd information som inte utnyttjas för värmebehovsberäkningar och tyckte att man borde göra något åt saken.

Det första steget runt 1980 blev att försöka utveckla en modell för beräkning av solinstrålning mot byggnader med hjälp av molnobservationer, eftersom solstrålning mäts på få platser. Denna modell ingår i ENLOSS-modellen. Roger arbetade med den teoretiska formuleringen och Cari Andersson vid SMHI gjorde programmeringsarbetet. Detta var början på Rogers och Caris mångåriga samarbete kring väderberoendet i byggnadernas energianvändning. Solmodellen publicerades första gången 1984 i tidsskriften Energy and Building [Taesler, Andersson 1984]. Under åren på KTH i slutet av 1980- talet prövade Roger sedan några idéer för tillämpningar av solmodellen.

Sedan var det dags att ta itu med vindens roll för självdragsförlusterna. Uppslaget till den delen av ENLOSS-modellen kom från en artikel av P. O Nylund [Nylund 1984] som beskrev en metod för manuell s.k. passningsberäkning av den naturliga ventilationen. I stället för passningsberäkning utvecklade Roger en iterativ numerisk lösning. För detta behövdes data på vindhastighet och riktning samt på tryckkoefficienternas fördelning över byggnadsfasaderna vid olika anblåsningsriktningar. Vidare skulle vindhastigheten kunna korrigeras för inverkan av omgivande terräng och bebyggelse.

ENLOSS-modellen utvecklades vidare under 80-talet och användes på SMHI i såväl forskningsprojekt som konsultverktyg i bebyggelseplanering och för energisparåtgärder.

En av de tillämpningar som ENLOSS-modellen används för idag är SMHI EnergiIndex för uppföljning av uppvärmningsbehov i byggnader och energiproduktion. 1987 togs EnergiIndex fram som ett mått på värmebehovet där hänsyn också togs till vindens och solens inverkan på värmebehovet och byggnadernas värmetekniska egenskaper och omgivning där den senare inverkar på påverkan från sol och vind. Uppvärmningsbehovet i byggnaden beräknas timme för timme med ENLOSS-modellen utifrån meteorologiska observationer på temperatur, vind och solstrålning för aktuellt dygn eller månad och jämförs med motsvarande för ett normalt dygn/månad, och man får på så sätt ett EnergiIndex. Idag används SMHI EnergiIndex allmänt för energiuppföljning på samma sätt som SMHI graddagar.

Innan SMHI började försöka prognosstyra med hjälp av ENLOSS-modellen ville alltså Roger lansera ENLOSS-beräkningar som underlag för analyser av bebyggelseplaneringens inverkan på energibehovet. Möjligheterna till att använda ENLOSS-beräkningar som underlag för denna typ av studier demonstrerades först i det forskningsprojekt som kom att kallas ”Ängelholmsprojektet” som pågick under en längre tid i olika faser under 80-talet och som beskrivs närmare i ”Att planera med energi: exemplet Ängelholm” [Jansson et al. 1984] samt ”Klimat, bebyggelseplanering, energibehov” [Taesler 1989]. Den senare studien visade bl.a. att solvärmestillskottet genom fönster skulle kunna reducera årsvärmebehovet i småhus kraftigt. Detta gav Roger idén att försöka utnyttja solvärmestillskottet genom att aktivt styra uppvärmningen med stöd av prognoser. Detta kanske man kan säga var prognosstyrningens EUREKA-tillfälle. I artikeln från 1991 i Energy & Buildings [Taesler 1991] nämns prognosstyrning för första gången.

3.4.2 Några milstolpar

Här är några valda händelser som får belysa väderprognosstyrningens utveckling över tiden som reglerstrategi och kommersiell produkt. Även sammanställningen är framtagen av Cari Andersson på SMHI i samråd med Stefan Berglund på eGain. Här bör nämnas att det numera finns fler företag som tillhandahåller väderprognosstyrning än de som omtalas i listan nedan.

1988 – DTU Hofors - Den första prognosstyrda fastigheten baserat på ENLOSS

I Hofors startades en utbildning för drifttekniker (DTU) i en helt nybyggd fastighet med mycket ny teknik i fastigheten. Bl.a. värmdes byggnaden av en uppvärmd innervägg i betong. Det blev SMHIs första prognosstyrda byggnad. SMHI levererade timvisa prognoser på värmeeffektbehov som beräknades med ENLOSS-modellen, från 1988 och till slutet av 90-talet.

1991 – Fjärrvärmeprognoser Hofors beräknade med ENLOSS

Genom SMHIs kontakt i Hofors (som också var VD på Hofors Energi) började SMHI 1991 leverera fjärrvärmeprognoser på effektbehov beräknade med ENLOSS till Hofors Energi.

1992 – slutet av 90-talet Umeå

Under hela 90-talet skedde diverse vidareutveckling och samarbete mellan SMHI och olika kunder/partner. 1992 började SMHI leverera fjärrvärmeprognoser till Umeå Energi och Vitec. Detta pågick i många år till slutet av 90-talet.

1994 – Platen Motala

SMHIs första prognosstyrda bostadsfastigheter var ett antal höghus tillhörande Bostadsbolaget Platens Gamla Stan i Motala. Detta projekt drevs i samarbete med en ny energiteknisk partner som bara fanns för detta projekt och SMHIs kontakt i Hofors. Som styrparameter användes ekvivalenttemperatur, T_e , och en mycket avancerad reglering där hänsyn togs till solvärmestillskott genom fönstren på varje våning och varje fasad.

1994 - Samarbete mellan SMHI och INU Control inleds

De första kontakterna togs för att göra prognosstyrning till en kommersiell produkt för fastighetsägare.

1995 – Första driftsatta byggnaderna SMHI - INU Control

De första prognosstyrda byggnaderna driftsätts på "svenska området" på BO94 i Borås i samarbete mellan AB Bostäder i Borås, SMHI och INU Control. Samarbetet med INU Control fortsätter även när INU Control köps av Honeywell. Honeywell är fortfarande partner till SMHI.

2001 – ERAB Stockholm

2001 började SMHI samarbeta med en ny partner ElektroRelä AB (ERAB), som fortfarande är partner till SMHI.

2003 – eGain

eGain startas och redan 2004 passerar de 1 miljon kvadratmeter prognosstyrd golvarea och fortsätter därefter att expandera kraftigt.

2003 - 2007 Samarbete mellan eGain och SMHI

Ett samarbetade mellan SMHI med eGain inleds 2003. Avslutas 2007.

2010 – Prognosstyrning installerat i mer än 10 miljoner m²

Prognosstyrning installerad i mer än 10 miljoner m² bostads- och lokalarea.

Parallellt med de angivna milstolparna sker en ständig vidareutveckling och förbättring av metodiken för prognosstyrning hos de olika leverantörerna av prognosstyrning.

3.4.3 Referenser till sammanställningen av SMHI

Utöver de hakparantesförsedda referenserna i delkapitel 3.4.1 som återfinns i slutet under rapportens hela referensregister, anger Cari Andersson ytterligare ett antal referenser som knyter an till texten utan att de där direkt anges. Dessa är:

Taesler R, Andersson C.,1985: *Jämförelser av beräknade och uppmätta solstrålningsdata för tre orter i Sverige*. SEAS- bladet 4/1985, KTH, Inst. för Uppvärmning och Ventilationsteknik, Stockholm.

Taesler R,1985: *Klimatberoendet i bebyggelsens energibudget*. Rapport R116:1985, Statens Råd för Byggnadsforskning, Stockholm.

Peterson F, Taesler R, 1986: *Solstrålningsberäkningar som Projekteringshjälpmedel*. The Heliograph 1:1986, Inst. för Uppvärmning och Ventilationsteknik, Stockholm.

Taesler R, 1986: *Climate, buildings and energy exchange - an integrated approach*. Tekniska meddelanden 297, KTH, Inst. för Uppvärmning och Ventilationsteknik, Stockholm.

Häggkvist K, Taesler R, 1987: *Vindtrycksfördelningar runt friliggande enfamiljshus. Jämförelser mellan beräkningar och vindtunnelförsök*. Rapport från Byggforskningen R7:1987, Statens Råd för Byggnadsforskning, Stockholm.

Taesler R, 1987: *Bättre grepp om väderberoendet*. Klimat och Byggnader 3/1987, KTH, Inst. för Uppvärmning och Ventilationsteknik, Stockholm.

Taesler R, 1987: *Klimatdata för VVS-branschen*. Tidskriften VVS och Energi nr 9/1987.

Häggkvist K, Taesler R, 1988: *Pressure distribution on a small scale house - numerical simulations of wind tunnel experiments*. Proceeding 2nd PHOENICS-user Conference, London.

Taesler R, 1988: *Passive solar heat gain in district heating*. Proceedings "North Sun '88", Borlänge, Statens Råd för Byggnadsforskning, Stockholm.

Taesler R, 1988: *Weather and urban district heating requirements*. An analysis of data for a large district heating system. Proceedings Seminar on District Heating 1:1988, KTH, Inst. för Uppvärmning och Ventilationsteknik, Stockholm.

Taesler R, Andersson C, Häggkvist K, Peterson F, 1988: *Calculations of solar radiation in built up environments*, Proceedings CIB Conference 'Healthy Buildings', Stockholm, Statens Råd för Byggnadsforskning, Stockholm.

Taesler R, 1990: *The role of passive solar gain in the energy balance of buildings - A case study of an office building*, The Heliograph 1:1990, Inst. för Uppv. o. Ventilationsteknik, KTH, Stockholm.

Taesler R, 1995: *Vädrets inverkan på byggnadsuppvärmningen*. EnergiTeknik nr 2 1995, pp52 -54.

Taesler R, Andersson C, 1995: *Applications of meteorology to heating and cooling of buildings*. ECAM -95 (European Conf. on Applications of Meteorology) Toulouse.

Wirén B.G, 1985: *Effects of surrounding buildings on wind pressure distributions and ventilation losses for single-family houses – Part 1: 1-1/2 storey detached houses*. National Swedish Institute for Building Research, Bulletin M85:19, Gävle.

3.5 Väderprognosstyrning – inte bara i bostäder

Som glimtvis redan framgått används, eller så finns i alla fall en ambition om att använda, väderprognosstyrning inom fler tillämpningsområden än bara flerbostadshus. Exempel som nämndes i litteraturutblicken tidigare var värmereglering av kontorshus, solvärme för tappvarmvatten och inte minst väderprognosstyrning av fjärrvärmeproduktion (prognos av värmebehov). Ett annat exempel på ett närbesläktat tillämpningsområde som uppenbarats under arbetets gång är solelproduktion (prognos av produktionskapacitet). Säkert finns många fler tillämpningsområden än så och därför kanske det är lite kringskuret att så underförstått som här knyta begreppet till enbart reglering av vattenburen värme i flerbostadshus, icke

desto mindre är det så det förhåller sig. Som växthusanhängare är det dock svårt att inte åtminstone som kortast nämna något om en lite speciell tillämpning av reglerstrategin, nämligen reglering av värmesystem i växthus...

Växthus för kommersiellt bruk tillför ofta värme för att förlänga växtsäsongen och på så sätt möjliggöra större produktion över året. Värmesystemen i dem består av vattenrör (ofta $\varnothing$ 50 mm) som löper fram och tillbaka under glastaken med en framledningstemperatur på ca 40-80 °C. Eftersom växthusen ofta är lokaliserade till landsbygden är normal sett inte ens de svenska större växthusen anslutna till något fjärrvärmenät. Värmekällan har därför historiskt sett varit tjockolja i Sverige och gas i Europa. Numera kanske biobränsle är den vanligaste värmekällan i Svenska kommersiella växthus medan gas fortfarande används mest i Europa. Växthusens värmesystem kopplas normalt sett till en buffrande ackumulatortank som håller hög temperatur, kanske 90 °C i det varmaste vattenlagret. Stora växthus behöver stora ackumulatortankar, ofta ca 500 m³ för ett växthus på ca 10 000 m², jätteväxthusen som främst finns utomlands (inte minst i Nederländerna) har dock ibland ackumulatortankar på ca 5 000 m³ (!)

Växthusens helglasade och lätta klimatskärmar gör att värmebehovet varierar mycket kraftigt över dygnet. När ett värmebehov uppstår måste värmesystemet snabbt kunna ta sitt värmevatten från en färdigvärmad bufferttank. Att börja värma upp en bufferttank först när värmebehovet uppstår duger inte, men att hela tiden varmhålla så stora vattenvolymer med hög temperatur är naturligtvis kostsamt och därför används i vissa fall väderprognosstyrning för att reglera andelen högt tempererad vattenvolym i ackumulatortanken. Ju mer sol som kan förväntas, desto mindre kan den högt tempererade vattenvolymen vara.

Uppgifterna om värmesystemens utformning, storlek mm. erhöles främst i kontakt med Priva Scandinavia AB, vars affärs idé är att bedriva försäljning och service av uppvärmnings- och regler-system för jordbrukssektorn. Av den kontakten framgick även att reglerstrategin med väderprognosstyrning använts i växthus sedan mitten av 00-talet och att prognoserna normalt sett kommer med en framförhållning om 6 eller 12 timmar. Vidare konstaterades att biobränslepannor är relativt tröga system med lång startsträcka, vilket rimmar illa med växthusens mycket växlande och snabba värmebehovsförlopp. Prognosstyrning uppgavs därför fylla en viktig nyttofunktion även då värmeproduktionen sköts i egen regi utan effekttaxor.

4 Värmesystem – grunder om uppbyggnad och funktion

Syftet med ett vätskeburet värmesystem är det samma som för alla värmesystem; att avge värme i rätt mängd, på rätt plats och i rätt tid [Trüschel 1999]. Hur väl denna roll fullgörs beror på värmesystemens reglering och eftersom det är huvudtemat för denna rapport är det naturligt att värme- och reglersystemens uppbyggnad först ges visst utrymme, även om fokus framöver snarare ligger på systemens funktion.

Innan de kortfattade beskrivningarna av värme- och reglersystemen inleds, fastslås först att ordet *värmebehov* naturligtvis rymmer fler aspekter än bara uppvärmning av byggnadsvolym. Uppvärmning av tappvarmvatten är en väsentlig del av byggnaders totala uppvärmningsbehov, särskilt i flerbostadshus där det i dagsläget står för ca 20-25 % av det totala värmeenergibehovet [Aronsson, 1996]. I framtida flerbostadshus där täta och välisolerade klimatskal i kombination med att värmeåtervinnande ventilationsluft är ett måste, kommer värmebehovet för uppvärmning av byggnadsvolymen hållas nere på ett minimum. Som en följd ökar tappvarmvattenuppvärmningens andel av det totala värmebehovet, kanske så mycket att det blir den största posten. Därutöver finns även uppvärmning av tappvarmvattencirkulation (VVC), som förutom att förkorta spoltider även tillför byggnadsvolymen värme, om än ofrivilligt. I byggnader med relativt långa och sparsamt värmeisolerade rörsträckor kan värmeförlusterna från VVC utgöra upp till ca 50 % av uppvärmningsbehovet av tappvarmvatten! [Aronsson 1996]. Välisolerade vattenrör kan minimera värmeförlusterna, men att justera den saken i efterhand i befintliga byggnader kan vara både omständligt och dyrt. Förvisso kommer delar av värmeförlusterna från varmvattencirkulationen byggnadsvolymen tillgodo, men dels tillförs den värmen under hela året, dvs. även då inget värmebehov föreligger och dels är den naturligtvis helt oreglerad med avseende på termisk komfort i rum och kan därför betraktas som en störning gentemot byggnadens värmesystem.

Resten av föreliggande skrift handlar om uppvärmning av byggnadsvolym, inte tappvarmvatten, även om tappvarmvatten och VVC beaktas i byggnadens värmebalans där spillvärmen från VVC-rören ansätts vara konstant över året.

4.1 Värmesystemets uppdelning och komponenter

Oavsett om det handlar om värmesystem ur ett regionalt perspektiv eller ur ett byggnadsperspektiv kan värmesystem grovt delas upp i tre delar:

- Värmeproduktion
- Värmedistribution
- Värmeavgivande komponenter

Resten av detta underkapitel ägnas åt dessa delar.

4.1.1 Övergripande om värmeproduktion

För flerbostadshus är fjärrvärme det klart dominerande uppvärmningssättet i Sverige, men exakt hur dominerande det är och hur vanliga alternativen är beror lite på hur den nationella statistiken tolkas.

I ett fjärrvärmesystem, sker värmeproduktionen centralt i ett värmeverk alternativt värmekraftverk (om det även kan producera elektricitet). Distributionen av värmevattnet sker då via nedgrävda rör i stadsnätet och in i respektive byggnad där värmen växlas av mot byggnadens värmesystem i så kallade fjärrvärmecentraler med värmeväxlare, vilka i analogi med uppdelningen nyss och ur ett regionalt perspektiv kan sägas utgöra den värmeavgivande komponenten. Värmesystem ur ett byggnadsperspektiv producerar antingen sin egen värme alternativt är anslutet till fjärrvärmenätet via den nyss nämnda fjärrvärmecentralen.

När det gäller nationell statistik om energirelaterade frågor för bostäder finns framförallt två olika studier att förhålla sig till, en från Energimyndigheten och en från Boverket. Kort kan sägas att Energimyndighetens studie avser energianvändning medan Boverkets studie är betydligt bredare i sin beskrivning av byggnaders tekniska status medan den faktiskt inte alls anger några uppgifter om energiprestanda, däremot finns där statistik om hur vanliga olika värmesystem är i olika typer av byggnader och för vilka byggår, etc.

- Energimyndigheten – *Energistatistik för flerbostadshus 2011*
Fokus: energianvändning
Baseras på svar från obligatorisk och årligen återkommande enkätundersökning med ca 7 000 utskick 2011. [Energimyndigheten 2012]
- Boverket – *Teknisk status i den svenska bebyggelsen, resultat från projektet BETSI*
Fokus: teknisk status
Baseras på ca 1 800 besiktningar under 2007-2008. [Boverket 2010 a]

Båda studierna är noga med att inte sammanblanda småhus, flerbostadshus och lokaler och särredovisar dessutom oftast olika byggnadsår, vilket är bra. Dock redovisas värmeenergistatistiken i Energimyndighetens studie på flera olika vis, vilket i grunden naturligtvis också är bra men som lätt kan misstolkas och blandas samman eftersom åtminstone vissa av sätten framstår som ganska snarlika vid en snabb anblick.

Nedan återges som kortast ett antal energirelaterade uppgifter som anges i de nämnda studierna avseende fjärrvärme i flerbostadshus (alla byggår). De flesta av uppgifterna är från energimyndighetens enkätstudie, uppgifter från Boverkets BETSI-studie anges därför inom parentes:

- Andel fjärrvärmeuppvärmd area: 86 % (81 %)
- Andel fjärrvärmeuppvärmda byggnader: (64 %)
- Andel fjärrvärmeuppvärmda lägenheter: 85,7 %
- Total fjärrvärmeuppvärmd area: 148,2 miljoner m²
- Antal fjärrvärmeuppvärmda lägenheter: 2 042 000
- Total fjärrvärmeenergianvändning: 22,2 TWh
- Värmeenergiprestanda: 143 kWh/m²
- Temperaturkorrigerad värmeenergiprestanda: 153 kWh/m²
- Värmeenergiprestanda: 10,4 MWh/lgh

Att andelen byggnader skiljer sig så mycket åt jämfört med andelen lägenheter i studien från Boverket uppges bero på att flera stora byggnader med fjärrvärme ligger i större städer och att många av de mindre flerbostadshusen (små, men relativt många) ligger i småstäder där fjärrvärme inte finns i samma utsträckning.

Utöver fjärrvärme värms flerbostadshus av framförallt värmepumpar alternativt gas/olja. Undersökningen från Energimyndigheten är årligt återkommande och en tillbakablick bara 10-20 år tillbaka i tiden visar att oljeanvändandet snabbt avtar och torde inom kort vara i princip helt utfasat. När det gäller uppgifter om hur vanliga eller ovanliga olika värmekällor är avgörs det till viss del av vilken av de båda studierna som konsulteras. En källa till osäkerhet är att fjärrvärme är så dominant att de återstående värmesätten helt enkelt blir så få i antal räknat att underlaget där inte är tillräckligt stort för att ge en stabil bild av läget. Men osäkerheten beror också på att studierna i vissa fall slår samman olika energikällor och att de sammanslagningarna tyvärr inte är jämförbara studierna emellan. Eftersom Energimyndighetens studie baseras på störst underlag används här deras uppgifter och uppdelning av uppvärmningssätt för flerbostadshus (andel lägenheter):

- Enbart fjärrvärme 85,7 %
- Fjärrvärme + värmepump 0,6 %
- Enbart oljeeldning 0,4 %
- Enbart elvärme 2,4 % (varav drygt hälften direktverkande)
- Biobränsle + elvärme 0,6 %
- Olja + elvärme 0,3 %
- Olja + värmepump 0,8 %
- Olja + fjärrvärme 0,1 %
- Övrigt + värmepump 2,6 %
- Enbart gas 0,8 %
- Övrigt + elvärme 5,5 %
- Övrigt 0,3 %

Elvärme dyker upp i många av uppvärmningsätten ovan, som ett enkelt komplement/spets/”back up” för den händelse huvudbränslet inte räcker till eller inte kan användas under kortare eller längre tidsperioder.

Av sammanställningen ovan från Energimyndighetens studie framgår att ca 1,3 % av lägenheterna enbart har direktverkande elvärme och att ytterligare ca 6 % har elpanna/elpatron som värme i sina vattenburna värmesystem. Omvänt kan sägas att nästan 99 % av Sveriges flerbostadshus har vattenburen värme och att ca 94 % *inte* har elvärme. Detta samstämmer på ett ungefär med uppgifterna från ytterligare en Boverksstudie i samma serie som den tidigare nämnda (BETSI). I den hävdas att 94 % av den uppvärmda *golvarean* i flerbostadshus värms med vattenburen värme och att direktverkande el och luftvärme står för 3 % vardera [Boverket 2010 b]. Oavsett vilken av studierna som har rätt och hur de tolkas är en sak klar: vatten är den överlägset vanligaste värmebäraren, åtminstone i flerbostadshus, vilket leder in på nästa del av värmesystemen i nästkommande underkapitel, nämligen distributionen.

4.1.2 Övergripande om värmedistribution och pumpar

Äldre tiders vattenburna värmesystem var självcirkulerande och fungerade på grund av naturliga densitetsskillnader mellan varm framledning och svalare returledning [Trüschel 1999]. Principen byggde på att rörsystemen inte gav upphov till allt för stora tryckförluster samt att värmekällan var placerad lägre än radiatorsystemet där en vanlig lösning var ved- eller oljepanna i källare med grovt rörsystem och likaledes grova radiatorer. En nackdel med självcirkulerande system var att de krävde en rejäl temperaturdifferens mellan fram- och returledning, vilket ibland egentligen inte behövs när värmebehovet är litet, exempelvis vackra vår och höstdagar med dräglig utomhustemperatur och sol. Systemen var heller inte särskilt flexibla för om- och tillbyggnad och termostatventiler gick inte att använda eftersom deras uppgift är att just skapa tryckfall vid behov. Huruvida sådana system fortfarande finns i svenska flerbostadshus har inte undersökts vidare i detta arbete, kanske kan det fortfarande förekomma renodlad självcirkulation i några enstaka äldre byggnader, i så fall är de sannolikt minst 100 år gamla med rejält överdimensionerade radiatorsystem. Eftersom den typen av

byggnader företrädesvis finns i centrala delar av större städer som idag försörjs av fjärrvärme, minskar nog dock sannolikheten för att de fortfarande existerar ännu mer.

Idag är istället pumpen en given del och själva hjärtat i nästan alla värmedistributionssystem med vattenburen värme och pumpen är en grundförutsättning för god reglering, vare sig det handlar om en ensam central pump eller flera decentraliserade pumpar. Centrala pumpar är i dagsläget det vanligaste även om decentraliserade pumpsystem med pumpar kopplade till respektive värmeavgivande komponent eventuellt kan komma att erhålla större intresse och marknadsandel på sikt, åtminstone finns det i skrivande stund en del svensk forskning inom det området. I denna skrift avses framgent dock endast centralt pumpsystem.

Värmeavgivningen från en radiator och ett radiatorsystem beror bl.a. på massflödet. Lokalt utnyttjas detta förhållande genom att radiatorer förses med termostatventiler som stryker massflödet när rumstemperaturen blir högre än börvärdet. Av reglertekniska skäl styrs dock inte värmesystemen centralt med hjälp av massflöde och centrala cirkulationspumpar har dessutom historiskt sett endast konstant varvtal. Trots det, eller kanske på grund av det beroende på hur man ser det, finns fördelar med att kunna varvtalsreglera centrala cirkulationspumpar. Om många termostatventiler samtidigt stryker radiatorflödet ökar pumpens tryckuppsättning totalt. Med konstant varvtal på pumpen kommer då tryckuppsättningen och därmed elbehovet för att driva den att vara onödigt högt så länge termostatventilerna stryker massflödet. Varvtalsreglerade pumpar däremot kan anpassa tryckuppsättningen efter flödet och sänka tryckuppsättningen då flödesbehovet är reducerat, vilket ger en mer energieffektiv drift. Sedan en tid tillbaka installeras nästan alltid varvtalsstyrda cirkulationspumpar vid nybyggnation, åtminstone vid större byggnader än villor [Petersson, Werner 2003]. I befintliga byggnader är det vanligt att cirkulationspumpar med konstant varvtal successivt ersätts med varvtalsreglerade dito allt eftersom de befintliga pumparna faller för åldersstreck, vilket enligt en svensk standard brukar inträda efter ca 10 - 20 år i drift [Svensk standard, 2007 a].

4.1.3 Övergripande om radiatorers kopplingsprinciper

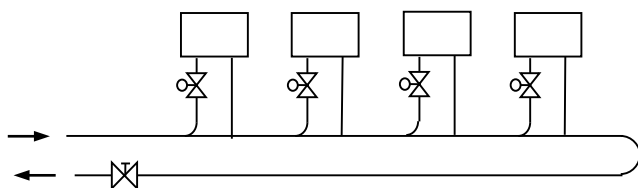
Eftersom direkverkande el och luftburen värme i flerbostadshus är relativt ovanligt och för att väderprognosstyrning som kommersiellt koncept åtminstone hitintills inte är tillämpligt på den typen av värmesystem, bortses från de uppvärmningsteknikerna i denna skrift, trots att luftburen värme kanske skulle kunna anpassas för väderprognosstyrningskonceptet. Hur det faktiskt förhåller sig med den saken får dock inget svar här, istället läggs fokus på vattenburna radiatorsystem som alltså är den helt dominerande distributionsformen i Sverige. Utomlands är emellertid situationen ibland den omvända.

Radiatorsystem brukar delas upp i tre olika kopplingsprinciper, som åtminstone till namnen är enkla att komma ihåg:

- 1-rörssystem
- 2-rörssystemen
- 3-rörssystem

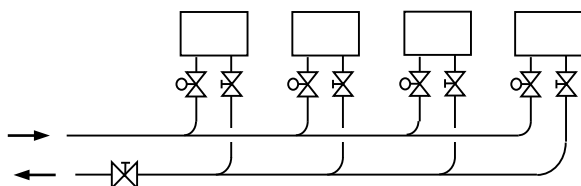
Idag är 2-rörssystem den förhärskande kopplingsprincipen i såväl flerbostadshus som övriga byggnadstyper, men eftersom de två andra principerna inte är helt ovanliga visas här alla tre.

1-rörssystemet är, som namnet antyder, ett system med bara ett rör. Systemet består av en slinga som samtidigt utgör både fram- och returledning. Varje radiator i slingan tilldelas erforderligt värmevattenflöde som därefter (avkylt) går vidare till slingan och in i nästa radiator, som då får en lägre framledningstemperatur än den föregående radiatoren. För att kompensera för detta kan antingen komponenterna successivt väljas större eller också kan flödet som avtappas till varje komponent ökas ju längre bort den ligger från värmekällan i flödesriktningen [Trüschel 1999].



Figur 4.1 Radiatorsystem med 1-rörkoppling

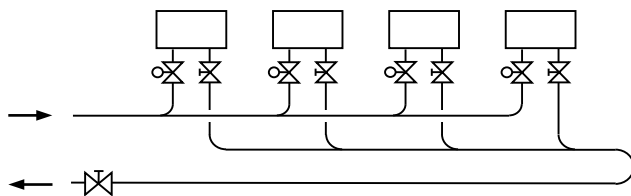
2-rörssystemet, som alltså är den klart vanligaste kopplingsprincipen, består av ett separat framledningsrör och ett separat returledningsrör. I ett tvårörssystem utgör varje radiator en egen liten krets eller slinga till och från värmekällan. Bortsett från temperaturförändringar pga. värmeförluster i själva framledningsröret får varje radiator samma framledningstemperatur eftersom värmeflödet grenas av till respektive radiator.



Figur 4.2 Radiatorsystem med 2-rörkoppling

3-rörssystemet, eller Tischelmannkoppling som det även kallas, är en utveckling av 2-rörssystemet där returledningen kopplats omvänt. Syftet med denna kopplingsprincip är att minska skillnaderna i differenstryck över de olika radiatorerna, som annars uppstår i ett 2-rörssystem till följd av tryckförluster i fram- och returledning [Trüschel 1999]. I ett

3-rörssystem har vattnet alltid lika lång rörlängdsväg oavsett om radiatoren sitter nära eller långtifrån värmekällan, se Figur 4.3.



Figur 4.3 Radiatorsystem med 3-rörskoppling (Tischelmannkoppling)

I fallet med 2-rörssystemet kan det vara stor skillnad i rörlängdsväg beroende på var på slingan radiatoren befinner sig, se Figur 4.2. Det gör att det tillgängliga differenstrycket för respektive radiator blir olika, vilket måste injusteras med individuell anpassning till respektive radiator. Fördelen med 3-rörskoppling är alltså likformigheten med ungefär samma differenstryck över alla radiatorer, vilket är en förenklande omständighet vid injustering. Samma differenstryck ger samma flöde och samma värmeavgivning från alla radiatorer för samma ventilinställning (injustering). Att 3-rörssystemet inte är vanligare än vad det är beror sannolikt på extra installationskostnad för material och arbete, men det kan också ha att göra med tradition och vana.

4.1.4 Övergripande om värmeavgivning från radiatorer

Så till den sista delen av värmesystemets delar; de värmeavgivande komponenterna. Här redogörs i korthet för radiatorers värmeavgivning till omgivningen. Först belyses de olika värmeöverförande principerna och därefter själva värmeavgivningen med avseende på värmevattentemperatur och rumstemperatur.

Värmeöverföringsprinciper

Värmeöverföring från exempelvis människokroppen sker via fyra olika värmetransportprinciper: *konvektion*, *strålning*, *ledning* och *förångning*. De två sistnämnda är inte aktuella för radiatorer som normalt sett varken är fuktiga eller i fysisk kontakt med rummets ytor, bortsett från de små upphängningsanordningarna mellan vägg och radiator bakom respektive enhet.

För värmeöverföringen från en radiator är temperaturskillnaden mellan radiatorns yta och rummet den drivande potentialen. Utan temperaturskillnad, ingen värmetransport. Därutöver är värmetransporterna även areaberoende. Ju större radiatorarea, desto större värmetransport förutsatt att temperaturdifferensen är den samma.

Skillnaden mellan strålning och konvektion är att strålning uteslutande avger värme gentemot omgivande ytor, så som väggar, tak, golv, möbler, etc. och beror därför helt på dessas ytemperaturer, medan konvektion å andra sidan avger värme till omgivande luft.

Den värmeöverförande processen från radiatorns varma yta till rummet påverkas av dess värmeöverföringskoefficienter som oftast betecknas α_r och α_c för strålning respektive konvektion. Storleken för α_r baseras bl.a. på ytegenskaper och rummets geometri. Värmeöverförings α_c beror istället i huvudsak på luftens hastighet.

Värmeöverföringskoefficienten med avseende på strålning kan beräknas med följande förenklade samband [Sandin 1990]:

$$\alpha_r \approx 4 \cdot K_r \cdot T_m^3 \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})] \quad (\text{ekv 4.1})$$

K_r : Konstant som beror på radiatorns geometri och material $[\text{W}/\text{m}^2 \text{ K}^4]$

T_m : Medeltemperatur för radiatorytan (dess medeltemperatur) och omgivande ytor $[\text{K}]$

Konstanten, K , kan i sin tur beräknas enligt nedanstående samband [Abel et al 1997]

$$K_r = \frac{\varepsilon_{\text{radiator}} \cdot \sigma}{\varepsilon + \frac{A_{\text{strål}}}{A_{\text{radiator}}} \cdot (1 - \varepsilon_{\text{radiator}})} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)] \quad (\text{ekv 4.2})$$

$\varepsilon_{\text{radiator}}$: radiatorytans emissivitet (förmåga att absorbera och avge strålningsenergi) $[-]$

σ : Stefan-Boltzmanns konstant $\approx 5,67 \cdot 10^{-8} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)]$

$A_{\text{strålning}}$: radiatorarea som "ses" av rummet (aktiv area map. strålningsutbyte) $[\text{m}^2]$

A_{radiator} : radiatorns mantelarea (aktiv area map. konvektion) $[\text{m}^2]$

Vid beräkning av den konvektiva värmeöverföringskoefficienten, α_c , kan man säga att det finns två vägar att gå, en lite bökelig och en enklare. Den förstnämnda går via Nusselts tal, som är förhållandet mellan värmeöverföring från en yta när konvektion finns respektive inte finns. Nusselts tal beräknas på olika sätt om det handlar om påtvingad konvektion (högre lufthastigheter än vad som normalt är fallet när det handlar om radiatorer) eller naturlig konvektion. Om värmeöverföringskoefficienten, α_c , istället beräknas på det enkla viset räcker det att känna till radiatorhöjden och temperaturskillnaden mellan radiatorn och rumsluften. Då fås följande uttryck [Abel et al 1997]:

$$\alpha_c \approx 1,47 \cdot \left(\frac{\Delta t_m}{H} \right)^{1/4} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})] \quad (\text{ekv 4.3})$$

Δt : temperaturskillnad mellan radiatorns yttemperatur (medel) och rumsluften $[\text{ } ^\circ\text{C}]$

H : radiatorhöjd $[\text{m}]$

Ekv 4.3 gäller bara vid laminär strömning, men vid normala radiatortemperaturer (< 80 °C), rumstemperaturer (18 – 24 °C) och radiatorhöjder (< 0,6 m) kan luftströmningen antas vara laminär [Trüschel 1999].

Som en parentes kan nämnas att α_r och α_c även nämns i Kapitel 5, men då handlar det om värmeavgivning från byggnadens klimatskal.

Indexeringen r syftar till engelskans *radiation* (strålning) som i sin tur kommer från latinets *radiatio* som fått ge namn åt radiatören. Man kanske kan tycka att den huvudsakliga värmetransportprincipen från en radiator borde vara just strålning, men strålningsandelen blir faktiskt inte mer än ca 50 % ens för de enklaste panelradiatorerna [Johansson 2011] trots att den utformningen har störst strålningsandel av alla. Genom att komplettera en panelradiator med en veckad plåt på baksidan (vilket ökar radiatorns area mot luften) ökas andelen konvektion påtagligt och andelen strålning reduceras. Ytterlighetsfallet utgörs av konvektorn, vars konvektionsandel dominerar totalt. Den består av tunna plåtar som sitter tätt ihop [Trüschel 1999]. Konvektorer används främst i sammanhang där man inte vill att den värmeavgivande enheten skall uppta så stor plats och avge framförallt konvektiv värme (motverka kallras), exempelvis framför fönster som går ner till golvnivå.

Typiska värden för α_r och α_c i dessa sammanhang är i storleksordningen 5 - 8 respektive 3 - 4 W/(m² °C). Hur dessa påverkar radiatorers värmeavgivning till rummet går igenom i nästföljande stycke.

Värmeavgivning från radiatorer

Med värmeöverföringskoefficienterna för strålning och konvektion kända kan värmeavgivningen från radiatorytan beräknas som [Abel et al 1997]:

$$\dot{Q}_{radiator} = \dot{Q}_r + \dot{Q}_c = \alpha_r \cdot A_{strål} \cdot (t_{radiator,medel} - t_{rum,yta}) + \alpha_c \cdot A_{radiator} \cdot (t_{radiator,medel} - t_{rum})$$

[W] (ekv 4.4)

$$\dot{Q}_r : \text{ värmeavgivning via strålning} \quad [W]$$

$$\dot{Q}_c : \text{ värmeavgivning via konvektion} \quad [W]$$

Ofta används dock istället ett approximativt samband för beräkning av värmeavgivning från radiatorer, med en sammanslagen värmeöverföringskoefficient. Utan att gå vidare in på hur approximationen tas fram konstateras här bara att ett vanligare sätt att beräkna värmeavgivningen är [Trüschel, 1999]:

$$\dot{Q}_{radiator} = k_{radiator} \cdot A_{radiator} \cdot \Delta t_m^n$$

[W] (ekv 4.5)

$$k_{radiator}: \text{ radiatorkonstant (strålning och konvektion) [W/(m}^2 \text{ °C)]}$$

$$n: \text{ radiatorexponent} \quad [-]$$

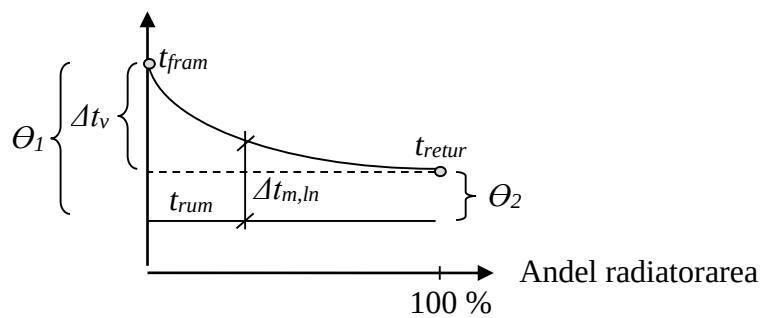
Värdet på radiatorkonstanten, $k_{radiator}$, är i det närmaste att betrakta som summan av α_r och α_c . I byggnadsfysikalisk kontext används ofta det närbesläktade begreppet U-värde, som brukar användas vid exempelvis beräkningar av värmeförluster genom klimatskal. I de sammanhangen är värmeöverföringskoefficienterna i princip försumbara i jämförelse med klimatskalet i övrigt. När det gäller radiatorer visar det sig dock vara tvärtom, eftersom själva radiatorväggen är tunn, av metall och helt gjord för att vara så oisolerad som möjligt. Därmed ligger i stort sett hela värmemotståndet i själva värmegenomgångskoefficienten. Enkla värmeledningsberäkningar med antagande om att radiatorns vägg är av stål och att dess godstjocklek är 1 mm, ger vid handen att endast ca 0,01 % av radiatorns totala värmemotstånd kan tillskrivas radiatorväggen (plåten), resten är i övergången mellan radiatorns yta och dess omgivning samt mellan vattnet och radiatorns insida.

Ett typiskt k -värde för normalstora radiatorer med normala temperaturnivåer är därför i dessa sammanhang ca 8 - 12 W/(m² °C) för panelradiatorer och ca 3 - 4 W/(m² °C) för konvektorer. Radiatorexponenten för radiatorer brukar ansättas till ca 1,3 för panelradiatorer och ca 1,25 för konvektorer där mer noggranna uppgifter fås från tillverkaren. I detta arbete ansätts radiatorexponenten till 1,28 vilket är ett typiskt värde från produktkatalog för motsvarande standardradiatorer i flerbostadshus från miljonprogrammet, som ofta är ett mellanting mellan panelradiator och konvektor.

Vid beräkning av värmeavgivning från en känd radiator är det ofta enklast att använda uppgifter från radiatortillverkare. Då slås k -värdet ihop med radiatorarean, vilket på byggspråk brukar kallas UA-värde. I radiatorsammanhang kallas det dock K -värde och då fås slutligen det vedertagna uttrycket för värmeöverföring från radiatorer som:

$$\dot{Q}_{radiator} = K_{radiator} \cdot \Delta t_m^n \quad [\text{W}] \quad (\text{ekv 4.6})$$

Nu har medeltemperaturskillnaden mellan radiator och rumsluft, Δt_m , nämnts tre gånger på kort tid utan vidare redogörelse. En radiators medeltemperatur kan överslagsmässigt beräknas som medelvärde av fram- och returledningstemperatur. Medeltemperaturskillnaden skulle då vara skillnaden mellan den temperaturen och rummets temperatur. För exempelvis en radiator med framledningstemperaturen 60 °C och returledningstemperaturen 40 °C skulle medeltemperaturen bli 50 °C där den aritmetiska medeltemperaturdifferensen mellan radiatorn och ett rum med 20 °C då skulle bli 30 °C. Dock ger den typen av grovuppskattning alltid ett för högt värde eftersom vätsketemperaturen då antas sjunka linjärt, vilket inte är sant. Används istället en så kallad logaritmisk medeltemperaturdifferens tas hänsyn till att sambandet i verkligheten är olinjärt, se Figur 4.4.



Figur 4.4 Framledningstemperatur, returledningstemperatur, rumstemperatur och medeltemperaturskillnad mellan dessa.

Den logaritmiska medeltemperaturdifferensen mellan radiator och rum beräknas som [Abel et al 1997]:

$$\Delta t_{m,\ln} = \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{\ln \frac{\Theta_1}{\Theta_2}} = \frac{t_{fram} - t_{retur}}{\ln \frac{t_{fram} - t_{rum}}{t_{retur} - t_{rum}}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{ekv 4.7})$$

t_{fram} : framledningstemperatur $[^{\circ}\text{C}]$

t_{retur} : returledningstemperatur $[^{\circ}\text{C}]$

Ett annat fundamentalt uttryck för värmesystem med flödande medium ges av ekv 4.8. Där räcker det att känna till vattenflödets storlek och vattnets temperaturfall genom systemet, utan kännedom om specifika radiatorvärden. Värmeavgivningen beräknas då enligt följande [Abel et al 1997]:

$$\dot{Q}_{radiator} = \dot{V}_v \cdot \rho_v \cdot c_v \cdot (t_{fram} - t_{retur}) \quad [\text{W}] \quad (\text{ekv 4.8})$$

$\dot{V}_v$: vattenflöde $[\text{m}^3/\text{s}]$

ρ_v : vattnets densitet $[\text{kg}/\text{m}^3]$

c_v : vattnets specifika värmekapacitet $[\text{J}/(\text{kg } ^{\circ}\text{C})]$

Innan nästa underkapitel tar vid om reglersystem och reglering, kan det vara på sin plats att slutligen få med ett uttryck för byggnaders värmeeffektbehov sett ur ett större perspektiv, utanför radiatoren och värmesystemet. Det är ju till syvende och sist det värmeeffektbehovet som värmesystemet måste täcka och som allt handlar om. I byggnader utan tempererad tilluft, vilket gäller för de flesta flerbostadshus, kan värmebehovet kort och gott uttryckas som:

$$\dot{Q}_{behov} = K_{bygg} \cdot (t_{rum} - t_{ute}) \quad [\text{W}] \quad (\text{ekv 4.9})$$

K_{bygg} : byggnadens termiska konduktans [W/°C]

En lite mer utförlig beskrivning av K -bygg ges i Kapitel 5.

4.2 Reglersystem och reglering

Reglering är absolut nödvändigt för att ett värmesystem skall fungera under drift. I detta underkapitel beskrivs vissa vanligt förekommande reglerstrategier och generella/allmängiltiga grunder för reglering av värmesystem. Några av de mest generella reglertekniska grunderna är uppdelningen mellan *central* och *lokal* reglering samt mellan *framkopplad* och *återkopplad* reglering.

Som en kort introduktion till resten av detta kapitel konstateras här först att central framkoppling i sin renaste form innebär att ingen hänsyn tas till resultatet. I dessa sammanhang innebär det att framledningstemperaturen endast är en funktion av utomhustemperaturen. Den centrala regleringen får då förvisso ständigt uppdaterad information om vad framledningstemperaturen blev i förhållande till avsikten, men systemet är helt ovetande om vad *rumstemperaturen* (slutresultatet) verkligen blev. För att en sådan styrprincip skall bli lyckosam måste dess grundparametrar ställas in rätt från början, vilket i detta fall innebär att framledningstemperaturens förhållande till utomhustemperaturen måste matchas väl. Förhållandet/matchningen kallas *framledningskurva* och beskrivs mer utförligt några sidor längre fram. Enbart central framkoppling blir många gånger ett trubbigt icke-optimerat system som måste "ta höjd" (överdimensioneras) för att klara av negativa störningar som ligger utanför dess kontroll, exempelvis kraftig blåst. Med enbart framkoppling är det svårt att hålla en jämn och stabil inomhustemperatur [Ruud 2003] och risken är stor att medeltemperaturen, och därmed värmeenergianvändningen, blir onödigt hög med sådana system. För att råda bot på det kombineras därför nästan alltid central framkoppling med lokal flödesreglering i form av termostatventiler, som även de beskrivs mer utförligt längre fram. Läs mer om central framkoppling i Kapitel 4.2.2.

Även återkopplad reglering bygger på framkoppling med lokal flödesreglering, dock tas här centralt även hänsyn till faktisk rumstemperatur eller andra händelser som kan påverka slutresultatet. Normalt sett, åtminstone i bostäder, återspeglas resultatet i byggnaden av temperaturgivare i boendezonen. Framledningstemperaturen justeras därefter med avseende på uppmätt rumstemperatur. Övertemperaturer inomhus innebär sänkt framledningstemperatur och tvärtom. Istället för att styra mot rumstemperatur kan man

naturligtvis styra mot förekomst av värmekällor, innan rumstemperaturen hunnit påverkas. Exempelvis är det tänkbart att styra framledningstemperaturen mot uppmätt hushållsel eller mot personräknare i samband med entrédörrar, mm. Men för bostäder är de sistnämnda tillämpningarna mycket ovanliga, om de alls förekommer. Läs mer om återkopplad reglering i Kapitel 4.2.3.

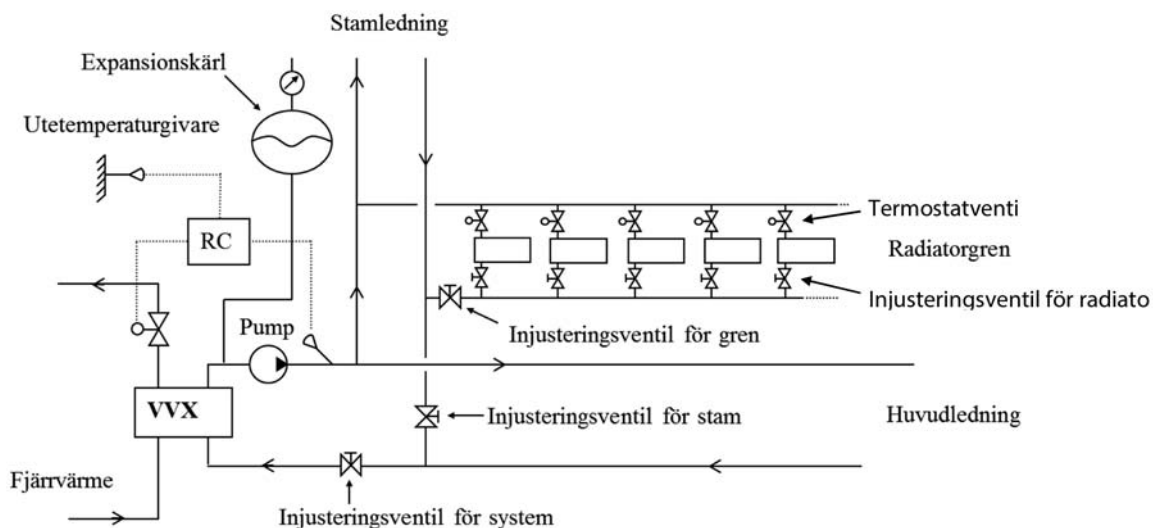
4.2.1 Värmesystemets uppbyggnad för reglering av framledningstemperatur

Där inget annat angivs baseras merparten av detta underkapitel (4.2.1) på Trüschels licentiatuppsats om värmesystem [Trüschel 1999] även om texten anpassats till aktuellt ändamål.

I ett centralt reglersystem ingår:

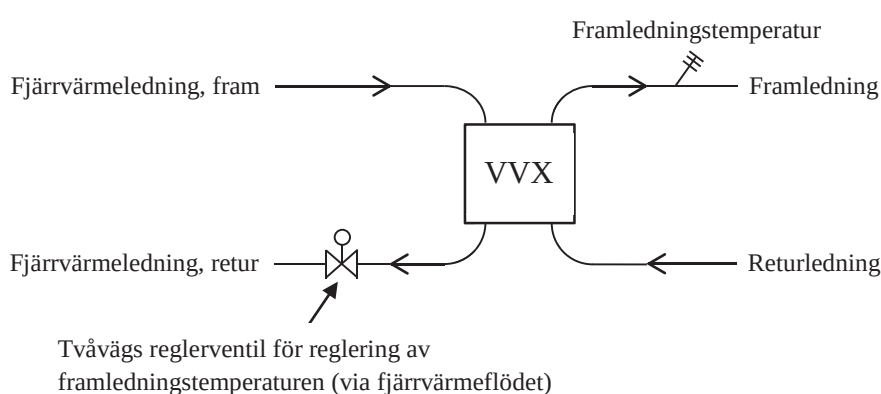
- reglercentral
- givare
- reglerventil
- ställdon

Ett värmesystem för flerbostadshus inkluderar normalt sett tappvarmvatten respektive värmevatten till radiatorer, och på det viset har det sett ut i Sverige fram tills nyligen då nya byggregler (ungefär 2007) med krav på energiprestanda gjorde att flerbostadshus vid nybyggnation indirekt måste utrustas med värmeåtervunnen ventilation (FTX-aggregat) och därtill hörande luftvärmare, även om det finns exempel på FTX-aggregat utan luftvärmare. Dessförinnan, med undantag för en period under 90-talet, användes i princip bara frånluftventilation som per definition saknar värmeenhet för värmning av mekanisk tilluft. Referensbyggnaden som de kommande beräkningarna kretsar kring har bara frånluft och saknar därför helt luftvärmare. Vi kan här alltså helt fokusera på radiatorerna som enda värmande klimathållningssystem. I Figur 4.5 visas ett renodlat värmesystem för radiatorer, utan vare sig tappvarmvatten eller luftvärme.



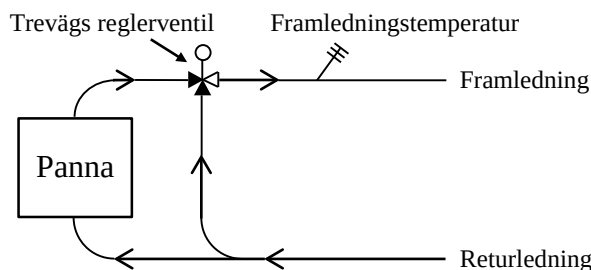
Figur 4.5 Vätskeburet värmesystem (endast radiatorvärme) med fjärrvärme som värmekälla [Trüschel 1999].

Temperaturgivarna i Figur 4.5 (utomhusgivare och framledningsgivare, där framledningsgivaren är placerad direkt efter pumpen) matar kontinuerligt reglercentralen (RC) med mätuppgifter, som i reglercentralen omvandlas till instruktioner om hur mycket reglerventilen skall öppna eller stänga för att ge önskad framledningstemperatur till radiatorkretsen. Mer precist är det reglerventilens ställning som får signalen och som därefter mekaniskt ser till att reglera vätskeflödet (och därmed temperaturen) genom den värmeavgivande undercentralens värmeväxlare. För att tydliggöra det beskrivna förloppet rensas figuren från allt utom själva undercentralen för fjärrvärme och anslutande rör, se Figur 4.6.



Figur 4.6 Reglering av framledningstemperatur genom reglering av fjärrvärmeflöde via värmeväxlare (V VX).

I byggnader som värms med egen panna anpassas framledningstemperaturen genom att avsvälnat returflöde från radiatorsystemet blandas in i framledningen, via en så kallad shuntledning med en trevägs reglerventil, se Figur 4.7.



Figur 4.7 Reglering av framledningstemperatur med hjälp av shuntledning.

I vissa fall kan framledningstemperaturen regleras direkt i pannan, så sker exempelvis i en del elpannor där elpatroner reglerar effekten till rätt temperatur på utgående vatten.

I de allra flesta fall idag anpassas radiatorsystemens värmeavgivning kontinuerligt på detta sätt (Figur 4.5 – 4.7), med en central reglering av framledningstemperaturen. Eftersom denna skrift i mångt och mycket handlar om central reglering av framledningstemperaturen får begreppet dels ett eget underkapitel (Kapitel 4.3) för att sedan dessutom återkomma på ett flertal ställen längre fram. Likaså har termostatventiler här en framträdande roll och redogörs för separat i Kapitel 4.2.4, även om dess inverkan snarare kommer beaktas än modifieras i beräkningarna längre fram.

4.2.2 Central reglering av framledningstemperatur

Enligt nyss beskrivet utgår alltså den centrala regleringen i de allra flesta fall från att byggnaders värmebehov är proportionellt mot utomhustemperaturen. För ett fjärrvärmeförsörjt värmesystem innebär det att ett minskat värmebehov, dvs. ökad utomhustemperatur, leder till att tvåvägsreglerventilen i Figur 4.6 stryper fjärrvärmeflödet genom värmeväxlaren vilket gör att framledningstemperaturen till byggnadens värmesystem sänks enligt en förutbestämd kurva (framledningskurva). Därmed sänks även värmeavgivningen från respektive radiator. *Hur mycket* framledningstemperaturen påverkas av utomhustemperaturen ser olika ut från fall till fall och förhållandet behöver i många fall efterjusteras med tiden, som en anpassning till byggnaden och dess boende samt till eventuella förändringar i värmesystemet.

Angående förändringar av injusteringsventiler till radiatorer visar en rapport från Svensk Fjärrvärme [Trüschel 2005] att det nog är ganska vanligt. Syftet med rapporten var att visa på värdet av injusterings av värmesystem, varpå tre flerbostadshus i Göteborg injusterades och följdes upp. I samband med injusteringsarbetet upptäcktes att hela 65 % av injusteringsventilerna hade öppnats mer jämfört med senaste injusteringen 10-15 år tidigare, i vissa fall till helt öppna. Vidare konstaterades att ett antal termostatventiler antingen fastnat med begränsad funktion som följd, eller så hade själva termostaten helt sonika tagits bort

samtidigt som långtidsmätningar i lägenheterna visade att det var relativt stora temperaturskillnader mellan olika lägenheter i ett och samma hus, ca 2-3 °C. Författaren till rapporten menar att ändringarna av förinställningarna naturligtvis kan ha varit skäliga, kanske blev resultatet av injusteringen senast helt enkelt inget vidare och möjligen fanns även andra legitima skäl, men att det också är sannolikt att en del ventiler öppnats av de boende själva!

Man kan naturligtvis ställa sig frågan i vilken utsträckning de tre byggnaderna i Göteborg är representativa eller inte, tre hus är naturligtvis ett allt för litet underlag för att dra några generella slutsatser om värmesystems verkliga funktion efter flera år i bruk. Men exemplet från Göteborg hamnade så småningom i en kortfattad lärobok för ByggaBoDialogen [ByggaBoDialogen 2006], där innehållet diskuterades under ett stort antal kurser som hölls i dialogform med sammanlagt flera hundra praktiserande drifttekniker runt om i landet. Det visade sig gång på gång att driftteknikerna kunde bekräfta att situationen såg ungefär likadan ut på deras hemmaplan. Det finns alltså anledning att tro att det allt som oftast faktiskt förhåller sig ungefär som i de undersökta flerbostadshusen. Ett injusterat värmesystem är således en ”färskvare”, eftersom systemet successivt förändras utan att det alltid är på förvaltarens eller driftteknikerns initiativ.

Tillbaka till regleringen av framledningstemperatur, vilket ombesörjs av reglercentralen som jämför ett mätvärde i framledningstemperaturen med ett börvärde för en given utomhustemperatur. Mätvärdet kallas även *ärvärde* eftersom det anger vilken temperatur framledningen faktiskt har. *Börvärdet* däremot är i dessa sammanhang ett givet förhållande mellan utomhustemperatur och värmebehov som ibland kallas för börvärdeskurva men kanske oftare för framledningskurva. Skillnaden mellan börvärde och ärvärde kallas *reglerfel*. Vid ett reglerfel görs korrigeringar i ställdonet och en ny framledningstemperatur erhålls, som åter jämförs med börvärdet för det aktuella förhållandet, osv.

I de allra flesta av dagens värmesystem i byggnader behandlas reglerfelssignalen framförallt med så kallad PI-reglering, där P står för proportionerlig reglering och I för integrerande reglering.

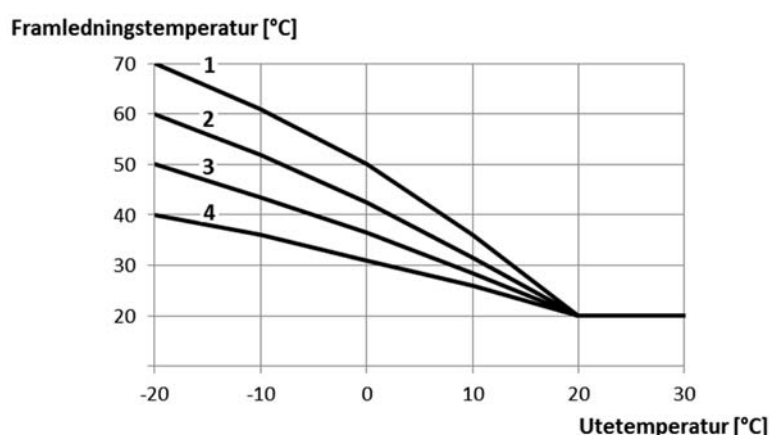
P-reglering innebär att utsignalen (reglersignalen) är en linjär funktion av reglerfelet. Kortfattat kan sägas att P-reglering är ett enkelt men lite trubbigt instrument. Reglersignalen vid P-reglering är helt proportionell mot reglerfelet och med en konstant förstärkningsfaktor, vilket gör att om reglerfelet (skillnaden mellan bör- och ärvärde) är stor blir också reglersignalen stor. Problemet med att enbart använda P-reglering är att om ett reglerfel av olika anledningar kvarstår, så minskas eller ökas inte reglersignalen ytterligare för att göra något åt det. Jämvikt kan med andra ord uppstå trots kvarstående reglerfel. Med P-reglering är det näst intill omöjligt att exakt nå önskat börvärde.

Vid I-reglering beaktas tiden, så om ett reglerfel kvarstår ökar reglersignalen successivt till dess att reglerfelet betvingats. Om P-regleringen kan sägas ”kolla felet som är nu” och så är I-regleringens princip att ”kolla felet som varit”.

Utöver P- och I-reglering finns även D-reglering, där D står för deriverande reglering. D-regleringen tittar framåt och styr på förändringshastigheten av ett begynnande fel. En snabb förändring ger stor reglersignal. D-regleringens princip är således att ”kolla felet som är på väg”.

Dessa helt grundläggande reglerprinciper kan kombineras ihop till olika konstellationer, men i installationstekniska sammanhang innehåller de alltid ett så kallat P-block som grund. Eftersom värmesystem i byggnader alltså alltid innehåller minst P-blocket, såväl när det gäller central som lokal reglering, kommer resten av fokus i detta kapitel ligga på P-reglering.

Åter till framledningstemperaturen och framledningskurvor. I lite äldre system väljs oftast mellan ett antal förinställda framledningskurvor, se Figur 4.8.

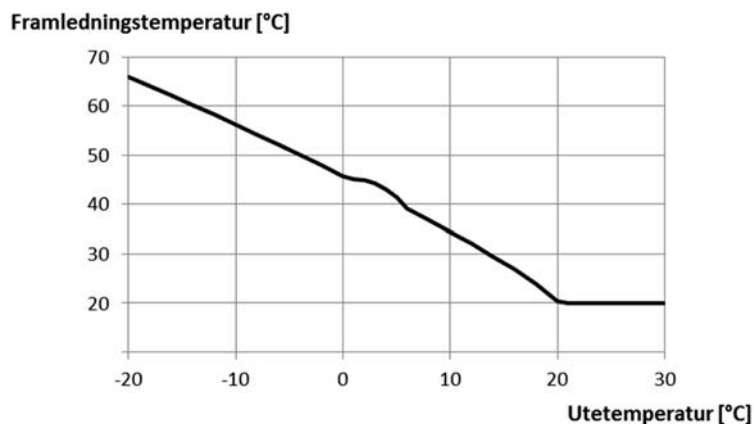


Figur 4.8 Exempel på förinställda framledningskurvor. Val av kurva beror på byggnad och klimat.

I nyare system ansätts dock oftast framledningskurvan mer fritt, exempelvis genom att ett antal punkter läggs in för olika utomhustemperaturer som automatiskt bildar en framledningskurva. Inte sällan utnyttjas den friheten till att förhöja framledningskurvan något extra kring ungefär ± 0 till $+ 5$ °C, då många anser att den ”standardiserade” framledningskurvan ofta inte riktigt räcker till eftersom utomhustemperaturer i det intervallet ofta förknippas med ”ruggigt väder”, vilket väl kanske kan översättas med regnigt, mulet och blåsigt. Nationell statistik över uppmätt klimatdata för perioden 1931-1960 [Taesler 1972] visar att det nog finns visst fog för sådan anpassning, åtminstone för vissa orter. Studeras exempelvis mätvärdena för landets tre största städer utmärker sig december månad i Göteborg som en ovanligt blåsig och molnig månad (förutom att det naturligtvis är mörkt och därmed ger lågt solvärmetillskott) i jämförelse med medel för året. I den månaden är medeltemperaturen där 1,8 °C, vilket ligger inom det ruggiga intervallet ovan. På samma sätt utmärker sig november och framförallt december månad i Malmö som ovanligt molniga och blåsiga företeelser och för de månaderna är medeltemperaturen 5 °C respektive 2 °C. I

Stockholm däremot tycks ingen månad sticka ut på det viset (bortsett från mörkret), åtminstone inte inom temperaturintervallet ± 0 till $+ 5$ °C.

En individuellt framtagen framledningskurva kan exempelvis se ut som i Figur 4.9.



Figur 4.9 Exempel på individuellt framtagen framledningskurva, här med viss extra höjd för utetemperaturintervallet ± 0 till $+ 5$ °C. Oftast är förhöjningen bara angiven med en enda punkt och blir då spetsigare till sin form än kurvan här.

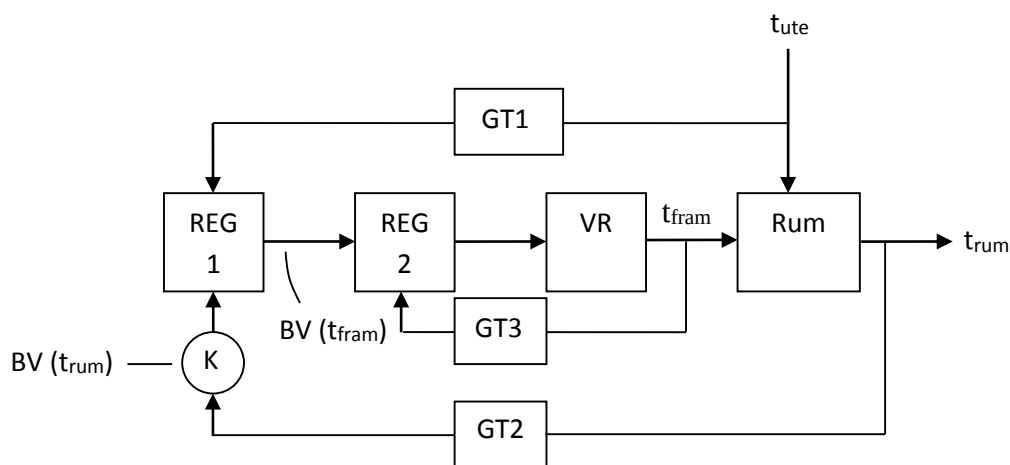
4.2.3 Återkopplad reglering av framledningstemperatur

Ibland används rums- eller frånluftsgivare som ett komplement till central reglering. I nyare reglercentraler finns denna möjlighet oftast inbyggd och reglerprincipen bygger då på återkoppling. Rums- eller frånluftsgivarens uppgift i ett värmesystem med återkoppling är att justera framledningstemperaturen med avseende på behovet, eller rättare sagt med avseende på rumstemperaturen. Om rumstemperaturen avviker från börvärdet justeras framledningstemperaturen upp eller ned för att öka eller minska radiatorernas värmeavgivning. Denna reglermetod kan alltså sägas ha två reglersensorer förutom framledningsgivaren: utomhusgivare (utomhusluftens temperatur) och rumsgivare (rummets temperatur). Därutöver finns i de flesta fall även lokal reglering. Återkoppling med rumsgivare som reglermetod är sannolikt mer vanlig i lokalbyggnader än i bostäder. Särskilt i lokalbyggnader med kylbehov eftersom information om rummets temperatur även kan användas för att reglera komfortkyla.

Som exempel på en relativt ny tillämpning, där informationen om vad som händer i byggnaden har tagit ytterligare ett steg, kan nämnas ett koncept där hushållsel mäts momentant för att därefter ligga till grund för korrigering av framledningskurvan. Grundtanken är då att hushållsel slutligen omvandlas till internvärme vilket påverkar värmebehovet. Om enbart hänsyn tas till central elmätning saknas dock information om personvärme och solvärmetilskott, där det sistnämnda är av betydligt större vikt än variationer av hushållselen.

Figur 4.10 visar ett blockschema för reglering av framledningstemperatur med återkoppling. Av figuren framgår att förutom en temperaturgivare för utomhus- och rumsluft (GT1 respektive GT2) kan reglering med återkoppling förenklat och schematiskt delas upp i en komparator/jämförare (K), två regulatorer (REG1 och REG2), en reglerventil (VR) och en temperaturgivare placerad efter reglerventilen (GT3). Signalflödet blir då enligt följande:

- 1) Temperaturgivarna GT1 och GT2 registrerar temperaturer utomhus och inomhus. Signalen från GT1 jämförs i REG1 med en förutbestämd kurvform för framledningstemperatur. Ju lägre utomhustemperatur GT1 registrerat, ju högre framledningstemperatur kommer regulatorn påkalla.
- 2) Samtidigt behandlas signalen från GT2 i komparatorn (K) där den jämförs med ett förutbestämt börvärde för rumstemperaturen, $BV(t_{rum})$. Ju större avvikelser är mellan rummets aktuella temperatur och dess börvärde, ju större justeringssignal skickas till REG1 från komparatorn.
- 3) REG1 har nu följaktligen två signaler att hantera. Formen på framledningskurvan ligger fast men justeras upp eller ned beroende på om rummet varit svalare eller varmare än börvärdet. REG1 skickar en signal till REG2 om en önskad framledningstemperatur.
- 4) REG2 skickar en reglersignal till reglerventilen (VR) som i sin tur försöker se till att temperaturen på framledningsvattnet blir det önskade.
- 5) GT3 registrerar den verkliga framledningstemperaturen och skickar det mätvärdet vidare till REG2.
- 6) REG2 jämför verklig framledningstemperatur med befalld framledningstemperatur. Skiljer sig dessa temperaturer åt skickar REG2 en ny och kompenserad reglersignal till reglerventilen (VR).
- 7) Rummet får nu förhoppningsvis den temperatur som önskas. För att veta om så verkligen är fallet registreras rummets temperatur av GT2 samtidigt som utomhustemperaturen registreras av GT1, och så fortsätter det...



Figur 4.10 Principschema för reglering av framledningstemperatur med återkoppling i form av så kallad kaskadkoppling.

En fråga man direkt ställs inför med denna typ av reglering är *vilken* rumstemperatur man skall justera efter. Skrapas lite på frågan inses att den i all sin enkelhet rymmer ett visst mått av komplexitet och manar till följdfrågor om framförallt var den justerande rumstemperaturen skall mätas. Skall temperaturgivaren placeras i byggnadens kallaste eller varmaste rum? Eller kanske i ett medeltempererat rum? Hur vet man i så fall vilka rum som är vad på temperaturskalan? Är ett rum fortfarande representativt om det vädras och vad händer om det är stora söder- eller västfönster som släpper in mycket solvärme? Var i ett utvalt rum skall en temperaturgivare placeras och på vilken höjd? Finns risk för åverkan på givare? Ja, det blir snabbt ganska många frågor men få snabba svar.

Ett alternativ till att placera temperaturgivare i rum är att placera dem i frånluften. Förutsatt att ventilationen är väl omblandande, dvs. luftens föroreningar är jämnt fördelade över rumsvolymen, och att frånluftdonen placerats där de bör, kan man ofta anta att temperaturen i frånluften är representativ för rumstemperaturen även om givarna då per definition placeras utanför vistelsezonen. I den mån värmesystem alls regleras med återkoppling används ofta just frånluftens temperatur. Dock kan konstateras att även här väcks frågor som i mångt och mycket hänger ihop med frågeställningarna tidigare om man bör välja ett varmt, kallt eller kanske ett medeltempererat rum och vilket det i så fall är. Ett sätt att komma runt problematiken kring oliktempererade rum är att använda sig av en central temperaturgivare i slutet av ett centralt frånluftssystem. En sådan kan ibland sägas representera en byggnads medeltemperatur, dock finns vissa förbehåll. Om frånluften uteslutande, eller nästan uteslutande, tas från kök och badrum kanske det egentligen inte ger en representativ bild av lägenheternas samlade medeltemperatur, i alla fall inte tider då boende duschar eller lagar mat. Dessutom kan en frånluftkanal vara oisolerad, lång och åtminstone delvis gå i otempererade schakt och vindar, vilket gör att frånluftens temperatur i slutet av ett sådant frånluftssystem kan ha ändrats en eller ett par grader.

Jämfört med temperaturgivare i rum, är temperaturgivare i frånluft snabbare på att registrera temperaturförändringar (störningar) eftersom de saknar temperaturutjämnande skyddshöljen. Dessutom omges de av betydligt högre lufthastighet än rumsgivare, vilket gör att deras konvektiva värmeöverföringskoefficient blir hög och temperaturgivaren antar snabbt luftens temperatur. Kanalplacerade temperaturgivares tidskonstant, dvs. tiden det tar för givarna att uppnå 63 % av sitt slutvärde, är ofta mindre än en minut, medan temperaturgivare för placering i rum normalt har tidskonstanter på ca 10 – 30 min.

Frånluft tas oftast från don i taket eller högt placerade väggdon. Teoretiskt kan man tänka sig att det vid taket kan bildas varma luftlager eftersom varm luft stiger. Väl omblandad rumsluft motverkar dock den problematiken. Hur står det då till med luftomblandningen i frånluftsventilerade flerbostadshus? Tyvärr har inga studier i ämnet hittats, men ett allmänt resonemang ger vid handen att de sannolikt har relativt god luftomblandning, åtminstone vintertid. Resonemanget grundas på tanken att varma radiatorer skapar luftströmmar (konvektionsflöde) kring radiatorkropparna. Dessutom finns kallras vid fönster som rimligtvis också påverkar luftomblandningen något. Kanhända är situationen mindre gynnsam

sommartid (mindre omblandad rumsluft), eller i byggnader som värms med golvvärme. De aspekterna är dock inte av intresse i detta arbete.

Rumstemperaturens påverkan på framledningstemperaturen är avhängig en förutbestämd s.k. förstärkningsfaktor som kvantifieras i Kapitel 7.2.1. Generellt gäller dock att en liten reglersignal som svar på ett reglerfel resulterar i ett stabilt men långsamt system. En stor reglersignal resulterar i ett snabbt system, men innebär också ökad risk för instabilitet [Gruber 2012].

4.2.4 Lokal reglering med termostatventiler

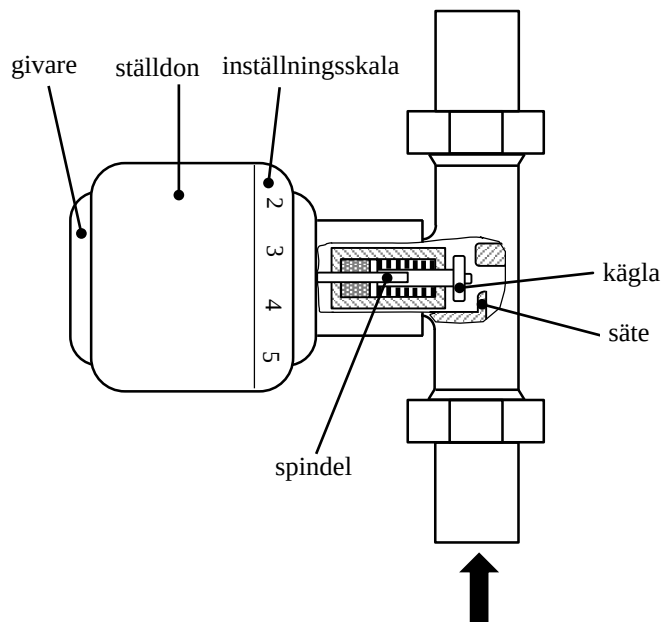
Den första oljekrisen (-73) inledde ett yrvaket intresse för energieffektivisering och efter den andra oljekrisen fem år senare var efterfrågan på enkla energieffektiviseringsåtgärder stor. Ungefär i mitten på 70-talet började radiatortermostatventiler användas i stor utsträckning och de blev snabbt en självklarhet vid nybyggnation, men även i många befintliga byggnader. Under andra halvan av 70-talet och under 80-talet installerades sammanlagt miljontals radiatortermostatventiler runt om i Sverige [Johansson et al 1989].

Som en parentes, för att ge en bild av den allmänna energibesparingsiver som vid tiden rådde, kan nämnas att ett genomsnittligt flerbostadshus 1970 använde ca 315 kWh värme per m² och år. Motsvarande användning bara 15 år senare var ca 200 kWh [ByggaBoDialogen 2006]. En remarkabel förbättring av ett riksgenomsnitt som kanske saknar motstycke i modern tid. Självklart stod termostatventilerna bara för en liten del av detta men det var ingen slump att termostatventilerna fick ett sådant genomslag som de fick när de kom, tajmingen kunde näppeligen varit bättre. För att förlänga den historiska utvecklingen något ytterligare kanske bör sägas att ett exempel på andra energieffektiviseringsåtgärder som då genomfördes i stor omfattning var reducerade friskluftflöden, (stängda ventilationsluckor, tätningslister, mm). Några av de åtgärderna visade sig vara rent felaktiga ur ett hälso- och byggnadsperspektiv. Men termostatventilen var inte bland de riskabla åtgärderna, och därmed är det dags att här beskriva den i mer tekniska ordalag.

Radiatortermostatsens uppgift är att finreglera flödet till radiatorn genom att reagera på de temperaturvariationer som förekommer i rummet [Petersson, Werner 2003]. Ur ett komfortperspektiv kan termostatventilens uppgift sägas vara att reducera värmetoppar (övertemperaturer) inomhus och skapa ett jämnare termiskt inomhusklimat. Ur ett energiperspektiv är dess uppgift att ta tillvara ”gratisvärme” från exempelvis apparater, belysning, matlagning, personer och inte minst från solen.

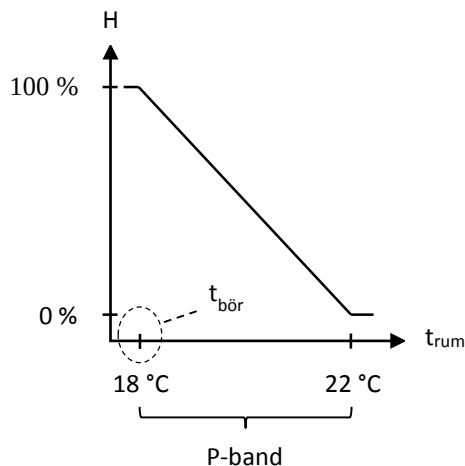
Den aktiva delen i en radiatortermostat utgörs av en temperaturkänslig och flexibel behållare (känselkropp) kopplad till en återfjädrad axel (spindel). Känselkroppen vidgas eller dras ihop beroende på rumstemperatur. I de flesta fall består känselkroppen av antingen gas eller vax. Ju högre rumstemperatur desto mer utvidgas känselkroppen. När den utvidgas puttar den spindeln framför sig och trycker då på ventilens kägla som successivt täpper till det så kallade ventilhuset allt mer, varpå värmevattenflödet stryps. Först när rumstemperaturen sjunker igen ger känselkroppen med sig och krymper, vilket gör att återfjädern kan skjuta tillbaka

spindeln. Den aktiva delen (själva termostatdelen) har en grundinställning som påverkar hur mycket spindeln skall strypa flödet i sitt grundläge. Denna inställning av börvärdet brukar kunna manövreras manuellt med en greppformad ratt längst ut på termostatventilen.



Figur 4.11 Termostatventil, principskiss

Känslkroppens utvidgning är proportionell mot temperaturförändringen och termostatventilen kan därför sägas vara P-reglerande enligt tidigare, där den drivande faktorn är skillnaden mellan aktuell rumstemperatur och ett givet börvärde för den samma.



Figur 4.12 Exempel på P-kurva för en termostatventil.

Ventilens öppningsgrad, H , är ett relativt mått på ventilkäglans placering i höjddled. För en fullt öppen ventil är $H = 100 \%$ och för en helt stängd ventil är $H = 0 \%$.

I Figur 4.12 är ventilen helt öppen för rumstemperaturer under 18 °C. Stiger rumstemperaturen över det börjar ventilen stänga så smått. Stängningen sker proportionellt fram till dess att rumstemperaturen uppnått 22 °C, då är ventilen helt stängd. Om ytterligare intern- eller solvärme tillförs ligger det utanför termostatventilens kapacitet och rumstemperaturen kan stiga fritt utan att termostater bromsar förloppet ytterligare.

Ventilen i exemplet går alltså från fullt öppen till fullt stängd vid en ökning på 4 °C, detta kallas regulatorns P-band. Små P-band är det samma som snabb reglering och stora P-band innebär långsam reglering. Normalt sett är termostatventilers P-band = 0.5 - 2 °C beroende på injustering. Själva termostaten är ofta 2 °C (om den vore frikopplad från ventilen), men för kraftigt strypta ventiler stängs flödet vid minsta övertemperatur (litet P-band).

Termostatventilers funktion delas ofta upp i en *reglerande* och en *maxbegränsande* del. Själva termostatventilerna är vad de är oavsett etiketteringen, men omständigheterna runtomkring ser olika ut beroende på hur man vill att de skall agera. För att belysa skillnaderna mellan dessa två funktioner används här ett exempel där termostatventilernas P-band är 2 °C och lägsta acceptabla rumstemperatur är 20 °C:

Exempel – reglerande termostatventil

Vill man att termostatventilen skall ha en så kallad aktivt reglerande funktion används termostatventiler med lågt börvärde. I detta exempel ansätts den reglerande termostatventilens börvärde till 19 °C. Termostatventilen kommer då att reglera mellan 19 °C och 21 °C. För rumstemperaturer < 19 °C kommer termostatventilen vara maximalt öppen och för rumstemperaturer > 21 °C kommer den vara helt stängd. Däremellan sker en linjär (proportionell) reglering. Detta innebär att den faktiska rumstemperaturen normalt sett kommer ligga lägre än den önskade rumstemperaturen. För att undvika för låg rumstemperatur är framledningstemperaturen väl tilltagen och termostatventilen kommer allt som oftast vara förhållandevis strypt.

Exempel – maxbegränsande termostatventil

Skillnaden mot reglerande termostatventiler är att termostaterna ges ett högre börvärdet så att hela reglerområdet hamnar inom acceptabel rumstemperaturnivå. I detta exempel sätts börvärdet till 20 °C, vilket innebär att termostatventilen kommer reglera först inom intervallet 20 – 22 °C. För maxbegränsande termostatventiler används lägre framledningstemperatur än för reglerande dito och termostatventilen kommer oftast vara helt eller delvis öppen. Först vid övertemperatur reduceras flödet [Eriksson, Wahlström 2001]. Dessa termostatventiler ger alltså fullt (injusterat) flöde vid önskad rumstemperatur, men stänger flödet helt vid en till två graders övertemperatur [Ruud 2003].

Vid fönstervädring kommer rumstemperaturen i många fall bli lägre än nedre delen av P-bandet (19 °C alternativt 20 °C), åtminstone i direkt anslutning till fönster där radiatorerna normalt sett är placerade. Oavsett om termostatventilernas funktion är reglerande eller maxbegränsande kommer de vid vädring ofta att vara fullt öppna. Men eftersom

framledningstemperaturen är högre för den reglerande principen kommer radiatorerna då avge mer värme, vilket naturligtvis är negativt ur energisynpunkt. Dessutom kan vädringsförloppet då bli mer utdraget i tid om syftet från början varit att vädra bort överskottsvärme.

Reglerande termostatventiler har svårt att hantera fönstervädning på ett energieffektivt sätt [Ruud 2003] och enligt Ruud används därför maxbegränsande reglering i flerbostadshus i allt större omfattning.

Figur 4.12 ger en något idealiserad bild av verkligheten där fenomen som hysteres, dödtid och tidskonstant inte har någon plats. Hysteres, vars namn har ett grekiskt ursprung och då betyder *tillkortakommande* eller *eftersläpande* [Wikipedia], är den temperaturförändring som krävs för att friktionskrafterna skall övervinnas och spindeln röra sig. I en rapport från slutet av 80-talet, där lågflödessystem och den så kallade Kiruna-metoden beskrivs [Andersson et al, 1988], framgår bl.a. annat att hysteresen är samma vid öppning och stängning och att den ökar något med tiden allt eftersom smörjmedel försvinner, vilket leder till att börvärdet förskjuts uppåt några tiondelsgrader med tiden. Enligt en rapport från Byggforskningsrådet [Johansson et al, 1989] bör hysteresen vara så låg som möjligt och enligt nyss nämnda rapport om Kirunametoden har dagens ventiler vanligen en hysteres på 0,3 - 0,7 °C.

Tidsfördröjningar i dessa sammanhang är död-tid och tidskonstant. Där död-tiden är den tid det tar för termostatventilen att överhuvudtaget reagera på en temperaturförändring och tidskonstanten är ett mått på systemets tröghet när det väl börjar hända något. Längden på dessa två tidsfördröjningar avgörs bland annat av den termiska massan hos termostatventilens skyddande skal och egenskaperna hos mediet i känselkroppen. Termostatventilers dödtid ligger vanligen mellan 0,6 - 2,4 minuter och tidskonstanten är vanligtvis 20 - 30 minuter [Andersson et al 1988].

Här kan tills sist nämnas att ju längre den temperaturkänsliga kroppen puttar den återfjädrande spindeln och kägla framför sig, desto trögare blir det allt eftersom fjädern spänns mer och mer. Det innebär i praktiken att P-regleringen inte är helt linjär, även om olinjäriteten inte bara behöver ha med fjädern att göra. Dock brukar man bortse från detta faktum och så görs även i denna rapport av simuleringsskäl.

4.3 Framledningstemperatur

Framledningstemperatur har redan nämnts på åtskilliga ställen i denna rapport och i Figur 4.8 och 4.9 tidigare visades exempel på olika kurvor för relationen mellan utomhustemperatur och framledningstemperatur. I Figur 4.8 handlade det om förutbestämda kurvor och Figur 4.9 var exempel på en kurva som tagits fram på helt fri hand. Men vad är rätt framledningstemperatur och framledningsskurva för en byggnad och kan de i så fall beräknas med bl.a. ekv 4.8, istället för att bara testas fram som tidigare antytts?

Vid traditionell framkopplad reglering handlar det i mångt och mycket i praktiken om att först räkna ut eller hitta en lämplig framledningstemperatur för ett dimensionerande vinterfall och därefter anta att framledningstemperaturen kan avta proportionellt med stigande

utomhustemperatur. Om en förutbestämd kurvform finns att följa är det bara att välja den som passar med den framräknade dimensionerande temperaturen. I de fall en kurva tas fram på fri hand känner många till att framledningskurvan av sin natur skall vara lite böjd och därför lägger in ett par punkter för att få just en böjd framledningskurva ”på ett ungefär”, plus ett litet allmänt tillägg för att ta höjd för blåst och kanske andra störningar. Med lång erfarenhet och durkdriven skicklighet kan drifttekniker många gånger ansätta någorlunda rätt förhållande redan från början, med endast små efterjusteringar. I många andra fall kan det dock krävas flera efterjusteringar och slutresultatet kan bli att en onödigt hög framledningskurva ansätts för att undvika klagomål från boende, vilket kan leda till onödigt hög värmeenergianvändning.

I resterande del av detta kapitel tas ett uttryck fram för ”rätt” framledningstemperatur, med anpassning till internvärme och luftläckage. Utrycket bygger på en finsk avhandling från 2010 som kommit att bli avgörande för detta licentiatprojekt. Det är ett explicit analytiskt sätt att ta fram en korrekt framledningstemperatur som bygger på vedertagna och grundläggande fysikaliska samband.

Syftet med den finska avhandlingen var att ta fram ett praktiskt hjälpmedel för injustering av radiatorsystem. Den bärande tanken med metoden var: bara det finns en referenspunkt för ett känt tillfälle med avseende på rumstemperatur, utomhustemperatur och temperaturer för fram- och returledning, så kan en ny framledningstemperatur beräknas även för andra fall. Själva nyckeln i detta resonemang bygger på ett så kallat relativt effektbehov, dvs. ett aktuellt effektbehov i relation till ett känt effektbehov vid ett speciellt tillfälle, referenstillfället. Metoden kan sägas vara praktiskt tillämpbar eftersom merparten av ingredienserna till metoden baseras på enkla temperaturmätningar. Här kan också nämnas att personen som tog fram metoden har varit involverad i praktiskt injusteringsarbete i ca 20 år.

Eftersom framledningstemperatur är en så central del för beräkningarna i detta arbete och för att den nämnda nya metoden med sin ekvation för framledningstemperatur är helt okänd för det stora flertalet, läggs relativt stor vikt vid att förklara den samma. Huvudstråket i förklaringarna nedan tas från Kärkkäinens avhandling [Kärkkäinen 2010] utan vidare källanvisningar, men anpassas till det aktuella arbetet.

Innan framledningsekvationen börjar mejslas ut kan man ju ställa sig frågan om det inte sedan gammalt finns något enkelt fysikaliskt vedertaget samband för framledningstemperatur och utomhustemperatur? Man kan tycka att det borde gå att ta fram ett uttryck för detta eftersom värmeavgivningen från en radiator är proportionell mot skillnaden mellan framledningstemperatur och rumstemperatur (ekv 4.6) och att rumstemperaturen i sin tur är proportionell mot både radiatorns värmeavgivning och mot utomhustemperaturen, vilket kanske kan fixas till i ekv 4.9?

För tydlighetens skull börjar vi med att föra samman ekv 4.6 och 4.7 varpå följande hjälpekvation fås:

$$\dot{Q}_{rad} = K_{rad} \cdot \frac{t_{fram} - t_{retur}}{\ln \frac{t_{fram} - t_{rum}}{t_{retur} - t_{rum}}} \quad [\text{W}] \quad (\text{ekv 4.6a})$$

Därefter konstateras att vid jämvikt är rummets värmeeffektbehov lika stort som radiatorns värmeavgivning. Om då hjälpekvation 4.6a och 4.9 förs samman fås ytterligare en förtydligande hjälpekvation:

$$\dot{Q}_{rad} = \dot{Q}_{bygg} \Rightarrow K_{rad} \cdot \frac{t_{fram} - t_{retur}}{\ln \frac{t_{fram} - t_{rum}}{t_{retur} - t_{rum}}} = K_{bygg} \cdot (t_{rum} - t_{ute}) \quad [\text{W}] \quad (\text{ekv 4.6b})$$

Vilket slutligen leder fram till följande något trubbiga samband för framledningstemperatur och värmebehov:

$$(t_{fram} - t_{rum})^n = \frac{K_{bygg}}{K_{radiator}} \cdot (t_{rum} - t_{ute}) \cdot \left(\ln \frac{t_{fram} - t_{rum}}{t_{retur} - t_{rum}} \right)^n \quad (\text{ekv 4.10})$$

Eftersom detta samband endast kan lösas iterativt krävs ett bättre uttryck, ett som kan lösas explicit för att praktiskt kunna användas som underlag till ett reglersystem. Det är här Kärkkäinen's avhandling kommer in i bilden.

Normalt sett bestäms alltså radiatorstorlek, vattenflöde och framledningstemperatur för en dimensionerande utomhustemperatur vintertid, dvs. en fastlagd mycket kall utomhustemperatur som beror på ort och byggnadstyngd. (Som ett resultat av detta fås även dimensionerande returtemperatur.) För alla andra driftfall ges framledningstemperaturen av framledningskurvan. Denna kurva ställs in efter bästa förmåga för att ge efterfrågad rumstemperatur för så stor del av eldningssäsongen som möjligt, dock utan hänsyn till vind, sol eller internvärme. Vid sol och/eller hög internvärme kommer framledningstemperaturen med ett sådant system generera högre värmeavgivning än det aktuella värmebehovet, vilket resulterar i högre rumstemperatur än satt börvärde. I system med fungerande termostatventiler stryps då vattenflödet genom radiatorerna och därmed värmeavgivningen. Men det förutsätter att termostatventilerna faktiskt fungerar. Vidare är många värmesystem i Sverige överdimensionerade [Johansson 2011] vilket naturligtvis ger extra hög inomhustemperatur i händelse av ickefungerande termostatventiler.

Med det sagt kan man intuitivt tycka att det vore fördelaktigt om framledningstemperaturen bättre kunde behovsanpassas för att undvika en situation där rumstemperaturen till stora delar regleras av termostater (med viss fördröjning) och/eller rumsgivare först efter fullbordat faktum.

I den nämnda finska avhandlingen ges framledningstemperaturen en form som öppnar för reglering efter byggnadens faktiska värmebehov. När Kärkkäinen väl infört begreppet relativt

effektbehov, som enligt nyss alltså var förhållandet mellan aktuellt effektbehov och ett känt effektbehov vid referenstillfället, utnyttjar han att det drivande i värmeöverföringen från radiator till rum är temperaturdifferensen dem emellan. Den relativa effekten, f , kan alltså beskrivas med endast temperaturförhållanden (vilket är smidigt vid praktiskt injusteringsarbete). Det relativa effektbehovet skrivs då:

$$f = \left(\frac{\Delta t_{m,\ln}}{\Delta t_{m,\ln r}} \right)^n \quad [-] \quad (\text{ekv 4.11})$$

$\Delta t_{m,\ln}$: Aktuell logaritmisk medeltemperaturdifferens $[^{\circ}\text{C}]$

$\Delta t_{m,\ln r}$: Referensvärde för logaritmisk medeltemperaturdifferens $[^{\circ}\text{C}]$

n : Radiatorexponent $[-]$

Med ekv 4.7 kan den logaritmiska medeltemperaturen, $\Delta t_{m,\ln}$, beräknas, men lite senare behövs ett alternativt sätt att beskriva den, därför skrivs ekv 4.11 om till:

$$\Delta t_{m,\ln} = \Delta t_{m,\ln r} \cdot f^p \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{ekv 4.12})$$

p : inversen av radiatorexponenten ($1/n$) $[-]$

I Figur 4.4 tidigare finns ett par temperaturdifferenser som ännu inte riktigt berörts: Δt_v samt Θ_1 och Θ_2 . Vattnets temperaturfall genom radiatoren betecknas här Δt_v , medan temperaturdifferenserna Θ_1 och Θ_2 symboliserar skillnaden mellan vattnets framledningstemperatur och rummets temperatur (Θ_1) respektive vattnets returtemperatur och rummets temperatur (Θ_2). Under förutsättning att radiatorflödet är oförändrat kan uttrycket för vattnets temperaturfall, Δt_v , genom en radiator med den relativa effekten f således tecknas:

$$\Delta t_v = f \cdot (\Theta_{1r} - \Theta_{2r}) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{ekv 4.13})$$

Där:

$$\Theta_{1r} - \Theta_{2r} = t_{\text{fram},r} - t_{\text{retur},r} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{ekv 4.14})$$

Vilket ger:

$$\Delta t_v = f \cdot (t_{\text{fram},r} - t_{\text{retur},r}) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{ekv 4.15})$$

Både ekv 4.7 och ekv 4.12 ger en logaritmisk medeltemperaturdifferens mellan radiator och rum. Tillsammans med ekv 4.13 - ekv 4.15 kan de skrivas:

$$\frac{\Delta t_v}{\ln \frac{\Theta_1}{\Theta_1 - \Delta t_v}} = \Delta t_{m,\ln r} \cdot f^p \Rightarrow \ln \frac{\Theta_1}{\Theta_1 - \Delta t_v} = \frac{\Delta t_v}{\Delta t_{m,\ln r} \cdot f^p}$$

För att förenkla och förkorta kommande ekvationer definieras:

$$q = \frac{\Delta t_v}{\Delta t_{m, \ln r} \cdot f^p} = \ln \frac{\Theta_1}{\Theta_1 - \Delta t_v} \quad [-] \quad (\text{ekv 4.16})$$

Nu är det dags att lösa ut framledningstemperaturen. För att göra det utgås först från ekv 4.16:

$$e^q = \frac{\Theta_1}{\Theta_1 - \Delta t_v} \Rightarrow \Delta t_v = \frac{\Theta_1 \cdot (e^q - 1)}{e^q}$$

Vilket leder fram till:

$$\Theta_1 = \frac{e^q \cdot \Delta t_v}{e^q - 1} \quad [^\circ\text{C}] \quad (\text{ekv 4.17})$$

Beräknas den logaritmiska medeltemperaturdifferensen i ekv 4.16 med referensvärdena Θ_{1r} respektive Θ_{2r} kan uttrycket för q i ekv 4.16 istället skrivas:

$$q = \frac{f(\Theta_{1r} - \Theta_{2r})}{\Delta t_{m, \ln r} \cdot f^p} = \frac{f \cdot (\Theta_{1r} - \Theta_{2r})}{(\Theta_{1r} - \Theta_{2r}) \cdot f^p \cdot \ln \frac{\Theta_{1r}}{\Theta_{2r}}}$$

Detta ger ett nytt och, som det skall visa sig, mer praktiskt uttryck för q :

$$q = f^{(1-p)} \cdot \ln \frac{\Theta_{1r}}{\Theta_{2r}} \quad [^\circ\text{C}] \quad (\text{ekv 4.18})$$

Den logaritmiska kvoten i ekv 4.18 kan enligt ekv 4.7 även skrivas:

$$\ln \frac{\Theta_{1r}}{\Theta_{2r}} = \frac{t_{\text{fram } r} - t_{\text{retur } r}}{\Delta t_{\ln r}} \quad (\text{ekv 4.19})$$

Varpå faktorn q kan skrivas:

$$q = f^{(1-p)} \cdot \frac{t_{\text{fram } r} - t_{\text{retur } r}}{\Delta t_{\ln r}} = f^{(1-\frac{1}{n})} \cdot \frac{\Delta t_{vr}}{\Delta t_{\ln r}} \quad [^\circ\text{C}] \quad (\text{ekv 4.20})$$

Eftersom Θ_1 är skillnaden mellan framledningstemperatur och rumstemperatur, se Figur 4.4, kan slutligen uttrycket för framledningstemperatur i förhållande till bl.a. rummets börvärdestemperatur, $t_{\text{rum}, \text{bör}}$, tecknas baserat på ekv 4.17 och ekv 4.20:

$$t_{fram} = t_{rum,bör} + \frac{e^{\frac{f(1-\frac{1}{n})}{f} \cdot \frac{\Delta t_{vr}}{\Delta t_{lnr}}} \cdot f \cdot \Delta t_{vr}}{e^{\frac{f(1-\frac{1}{n})}{f} \cdot \frac{\Delta t_{vr}}{\Delta t_{lnr}}} - 1} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{ekv 4.21})$$

Åter till den relativa effekten f . I ekv 4.11 beräknades den som ett resultat av logaritmiska medeltemperaturdifferenser för ett aktuellt fall och ett referensfall. Kärkkinen beskriver dock istället (av praktiska skäl) den relativa effekten som kvoten mellan ett antal aktuella temperaturnivåer och temperaturnivåer för ett referensfall. Känner man rummets börvärdestemperatur, utomhustemperatur och temperaturökningen orsakad av internvärme, samt referensfalllets dito kan f beräknas som:

$$f = \frac{\dot{Q}_{bygg} - \dot{Q}_{int}}{\dot{Q}_{bygg,r} - \dot{Q}_{int,r}} = \frac{K_{bygg}(t_{i,bör} - t_u - \Delta t_{int})}{K_{bygg}(t_{i,bör,r} - t_{u,r} - \Delta t_{int,r})} = \frac{t_{i,bör} - \Delta t_{int} - t_u}{t_{i,r} - \Delta t_{int,r} - t_{u,r}} \quad [-] \quad (\text{ekv 4.22})$$

$t_{i,bör}$:	rumstemperatur, börvärde	[$^{\circ}\text{C}$]
$t_{i,r}$:	rumstemperatur, referensvärde	[$^{\circ}\text{C}$]
Δt_{int} :	rumstemperaturändring pga. internvärme	[$^{\circ}\text{C}$]
$\Delta t_{int,r}$:	rumstemperaturändring pga. internvärme, referensvärde	[$^{\circ}\text{C}$]
t_u :	utomhustemperatur	[$^{\circ}\text{C}$]
$t_{u,r}$:	utomhustemperatur, referensvärde	[$^{\circ}\text{C}$]

Som tidigare nämnts är Kärkkäinens metod anpassad för praktisk tillämpning med enkla temperaturmätningar som grund. Men eftersom denna rapport baseras på energisimuleringar i IDA ICE, där alla typer av ”mätresultat” kan erhållas kontinuerligt, anpassas ekv 4.22 något. Istället för att beräkna relativ effektfaktor med temperaturer utgår istället från effektbehov för aktuellt tillfälle i relation till effektbehov vid ett referenstillfälle.

Ekv 4.22 kan då istället enkelt skrivas:

$$f = \frac{\dot{Q}_{behov}}{\dot{Q}_{behov,r}} \quad [-] \quad (\text{ekv 4.23})$$

$\dot{Q}_{behov}$: Aktuellt värmeeffektbehov [W]

$\dot{Q}_{behov,r}$: Värmeeffektbehov vid referenstillfälle [W]

Ekvationerna 4.21 och 4.23 ligger till grund för de fortsatta beräkningarna i Kapitel 7.

5 Fiktiv temperatur och värmetröghet – några grunder

Inom väderprognosstyrning figurerar ofta begreppet fiktiv, eller möjligtvis ekvivalent temperatur. Generellt sett menas då en beräknad utomhustemperatur som skiljer sig från utomhusluftens verkliga temperatur genom att den ”appliceras” på en byggnad och då tar hänsyn till en mängd olika faktorer så som exempelvis sol, vind, byggnadsskalets egenskaper, byggnadens orientering, internvärme, byggnadens termiska tröghet, mm. Vid väderprognosstyrning ersätts den vanliga utomhustemperaturen som insignal till värmesystemet med en fiktiv utomhustemperatur, som dessutom är prognostiserad. Detta är åtminstone fallet för de marknadsledande koncepten för prognosstyrning som tillhandahålls av eGain och SMHI (genom Honeywell och ERAB i fallet med SMHI).

Senare i denna rapport appliceras ett antal reglerstrategier på en referensbyggnad. I inget av fallen används dock fiktiv utomhustemperatur eftersom de antingen styrs mot en obearbetad utomhustemperatur (ibland justerad med uppgifter om inomhustemperatur) eller mot en framledningstemperatur med ekv 4.21 och 4.23 som bas, där hänsyn redan tas till sol, vind, värmetröghet, mm genom att ett aktuellt värmeeffektbehov ständigt beräknas. Då ekv 4.21 och 4.23 används som bas tar beräkningsprogrammet själv hand om bearbetningen av framledningstemperaturen genom att bl.a. räkna ut inverkan av kommande solvärmestillskott, avkylning på grund av vind, tidsförskjutning på grund av termisk tröghet, internvärme, mm. En fördel med att använda ekv 4.21 och 4.23 som bas i detta arbete, jämfört med en fiktiv utomhustemperatur, är att man då direkt kan utgå från byggnadens faktiska värmebehov utan att gå via en fiktiv utomhustemperatur.

Eftersom begreppet är så förknippat med väderprognosstyrningskonceptet ges det dock här ändå visst utrymme som ett slags bakgrundsfakta, även om det alltså inte används inom ramen för detta projekt.

Faktum är att begreppet även förekommer inom andra mer eller mindre närliggande användningsområden, men då oftast med en mer begränsad innebörd. Exempelvis kan det ibland i samband med bistra väderprognoser i media talas om *upplevd* eller *effektiv* utomhustemperatur och då avses en temperatur som tar hänsyn till vindhastighet. Till exempel kan en väderpresentatör varna för att - 10 °C kommer att upplevas som - 20 °C om det blåser 10 m/s, vilket sedan några år tillbaka baseras på följande empiriska samband [Osczevski, Bluestein 2005] (på svenska *effektiv* temperatur, på engelska *equivalent* temperature):

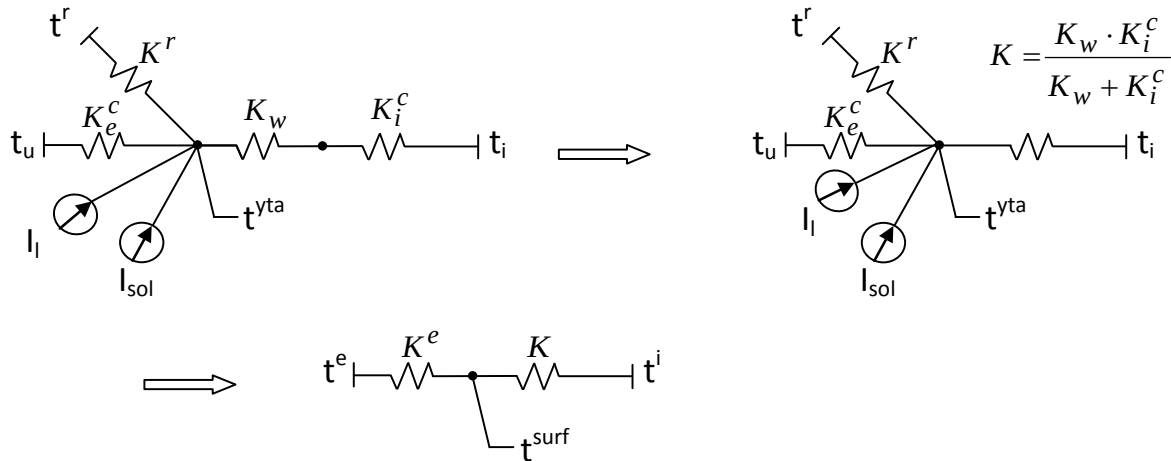
$$t_{eff} = 13,12 + 0,6125 \cdot t_u - 13,956 \cdot v^{0,16} + 0,48669 \cdot t_u \cdot v^{0,16} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{ekv 5.1})$$

t_u : luftens utomhustemperatur [$^{\circ}\text{C}$]

v : vindhastighet [m/s]

I byggnadsfysikaliska sammanhang förekommer begreppet ekvivalent temperatur ofta som ett verktyg i samband med så kallad kretsreduktion vid kretsanalogi, där exempelvis

klimatekretsens ytemperatur skall beräknas och där värmeutbyte med avseende på konvektion, värmeutstrålning, förångning och solinstrålning av förenklingsskäl reduceras till en krets med en temperatur, en så kallad ekvivalent temperatur. I de sammanhangen bortses dock ofta från såväl termisk tröghet som internvärme, i alla fall vid beräkningar för hand.



Figur 5.1 Exempel på ekvivalent temperatur – byggnadsfysik
Kretsanalogi för beräkning av ytemperatur i byggnadsfysikaliska sammanhang. I den nedre kretsen bakas solstrålning, förångning, konvektion och värmeutstrålning ihop till en gemensam konduktans och temperatur.

Den ekvivalenta temperaturen i Figur 5.1 beräknas som [Hagentoft, 2001]:

$$t^e = t_u + \frac{1}{\alpha_c + \alpha_r} \cdot (I_{sol} \cdot \alpha_{sol} + g \cdot r + (t^r - t_u) \cdot \alpha_r) \quad [^\circ\text{C}] \quad (\text{ekv 5.2})$$

t_u :	luftens utomhustemperatur	$[^\circ\text{C}]$
t^r :	ytemperatur och/eller himmelstemperatur	$[^\circ\text{C}]$
α_c :	värmeöverföringskoefficient för konvektion	$[\text{W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})]$
α_r :	värmeöverföringskoefficient för strålning	$[\text{W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})]$
α_{sol} :	absorptionsfaktor för sol	$[-]$
I_{sol} :	solintensitet	$[\text{W}/\text{m}^2]$
g :	fuktflödesdensitet	$[\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})]$
r :	latent värme från förångning	$[\text{J}/\text{kg}]$

Syftet med de två ovanstående exemplen är att visa på att det finns flera olika betydelser av fiktiv och ekvivalent temperatur, vilket kan vara bra att hålla i minnet vid litteraturstudier i ämnet.

Så åter till väderprognosstyrningen. Utan att gå närmare in på hur leverantörer av väderprognosstyrningskonceptet styr sina värmesystem konstateras här bara att ekv 4.21 och

4.22 sannolikt skulle gå att använda som bas för central reglering av värmesystem, där ekv 4.22 alltså ersätter ekv 4.23. En sådan reglerstrategi skulle inte nödvändigtvis behöva en avancerad beräkningsmotor för kontinuerlig beräkning av aktuellt värmeeffektbehov som annars några av de andra reglerstrategierna i Kapitel 7 tarvar.

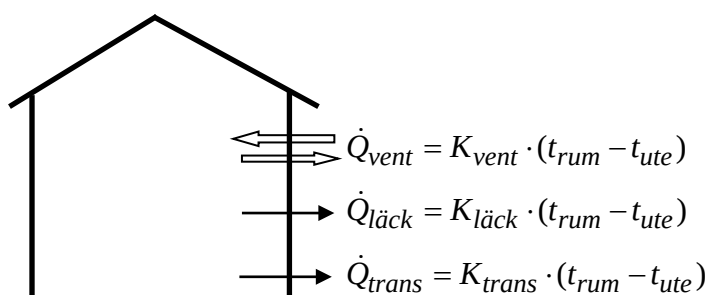
Syftet med detta kapitel, förutom att lyfta begreppet fiktiv utomhustemperatur, är att kortfattat ge ett antal grundstenar för utveckling av en egen central reglerstrategi där delvis en fiktiv utomhustemperatur kan beräknas baserat på uppgifter från en väderstation, kännedom om internvärme (antagen eller uppmätt), byggnadens tekniska utformning och tekniska prestanda. Underlaget appliceras dock inte på någon av beräkningsmodellerna i detta arbete eftersom det tillvägagångssättet endast svårligen (och mindre exakt) kan hantera prognoser/tidsförskjutning. Men för den som vill utveckla en alternativ central reglering och inte efterfrågar prognoser är underlaget förhoppningsvis värdefullt. Framledningstemperaturen kommer då beräknas med hjälp av ekvationerna 4.21 och 4.22 (istället för 4.21 och 4.23).

Utan att det visades i Kapitel 4 ger faktiskt ekv 4.22 utrymme för såväl solinstrålning, vind, internvärme och termisk tröghet, se Kapitel 7.3 där den sistnämnda aspekten beaktas genom att utomhustemperaturen, t_u , i ekv 4.22 ersätts med en ”tyngdkompenserad” fiktiv utomhustemperatur som strax beskrivs närmare. Därmed är vi inne på en tredje innebörd för begreppet fiktiv temperatur.

5.1 Fiktiv temperatur med avseende på termisk tröghet

En byggnads värmeförluster mot omgivningen utgörs i huvudsak av följande tre delar, se Figur 5.2:

- Transmissionsförluster
- Ventilationsförluster
- Läckageförluster



Figur 5.2 En byggnads huvudsakliga värmeförluster.

I de tre värmetransportprinciperna handlar det om värmeutbyte mellan rumstempererad luft och utomhusluft, men det är bara för en av principerna som tröghetsaspekten kan komma ifråga, nämligen för transmissionsförlusterna som är ett resultat av materialuppvärmning i en mer eller mindre värmetrög konstruktion. I de övriga fallen handlar det om ett direkt

värmeutbyte eftersom ventilations- och läckageluft tas direkt in i en byggnad. När det gäller luftläckagedelen kan motargument finnas mot detta påstående eftersom delar av det sakta och mödosamt letar sig in till rummet via sprickor och mindre otätheter i klimatskalet och därmed till viss del torde påverkas av dess värmetröghet. Efter kommunikation med SP i Borås antas här dock att merparten av läckageflödet tillförs via exempelvis dörr- och fönsteranslutningar som via tilluftsdon eller spaltventiler, vilket ger upphov till ett relativt direkt luftflöde.

Av ekv 4.22 framgår att det bara finns utrymme för EN variabel utomhustemperatur när det gäller omvandling till framledningstemperatur, åtminstone blir det mer praktiskt så. Därför visas här hur värmesystem baserade på ekv 4.21, istället kan styras med en fiktiv ("tyngdkompenserad") utomhustemperatur som dels beaktar termisk tröghet för transmissionsförluster men också tar hänsyn till att värmeförluster via luftläckage och ventilation sker utan tidsfördröjning. En sådan beräknad fiktiv framledningstemperatur kan alltså ligga till grund för en egenutvecklad reglerstrategi.

I en svensk avhandling [Nilsson 1994] ges följande uttryck för fiktiv utomhustemperatur med avseende på termisk tröghet:

$$t_{uN}^* = t_{uN} - (t_{uN} - t_{uN-1}^*) \cdot e^{-\frac{\Delta\tau}{\tau^*}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{ekv 5.3})$$

t_{uN} : utomhustemperatur för tidssteg nr N $[^{\circ}\text{C}]$

ΔT tidssteg $[\text{h}]$

τ^* tidskoefficient $[\text{h}]$

Tidskoefficienten τ^* i ekv 5.3 beskriver hur byggnadsskalet utanför isoleringen svarar mot en temperaturförändring utomhus då inomhustemperaturen hålls konstant. Den kvantifierar alltså ett förhållande mellan lagrad värme i konstruktionen, och dess värmeutbyte med omgivningen och beräknas enligt.

$$\tau^* = \frac{\sum cm}{\sum UA + \dot{V} \cdot \rho_l \cdot c_{pl}} \cdot \frac{1}{3600} \quad [\text{h}] \quad (\text{ekv 5.4})$$

$\sum cm$: värmelagringsförmåga (värmekapacitet) $[\text{J}/^{\circ}\text{C}]$

$\sum UA$ klimatskalets värmeledningsförmåga $[\text{W}/^{\circ}\text{C}]$

$\dot{V}$: totalt luftflöde till och från byggnaden $[\text{m}^3/\text{s}]$

Tidskoefficienten skall inte förväxlas med den mer frekvent omnämnda *tidskonstanten* som istället är ett mått på hur lång tid det tar för rumstemperaturen att sjunka 63 % av en temperaturförändring om värmetillförseln plötsligt stängs av, vilket inte är av intresse här.

I avhandlingen [Nilsson, 1994] avses endast luftläckage genom klimatskalet, inte ventilation. Men eftersom frånluftventilering (F-system) i det närmaste är att betrakta som mekaniskt förstärkt luftläckage, kan uttrycket för denna tillämpning även tillåtas inkludera ventilationsflödet. Vidare konstaterar Nilsson att endast en liten del av klimatskalets termiska massa påverkas av temperatursvängningar utomhus. Denna del kallas yttre aktiv massa. En korrektionsfaktor, ξ , används för att reducera total termisk massa till yttre aktiv massa. Ekv 5.4 kan då således skrivas:

$$\tau^* = \frac{\xi \cdot \sum cm}{\sum UA + (\dot{V}_{l\ddot{a}ck} + \dot{V}_{vent}) \cdot \rho_l \cdot c_{pl}} \cdot \frac{1}{3600} \quad [\text{h}] \quad (\text{ekv 5.5})$$

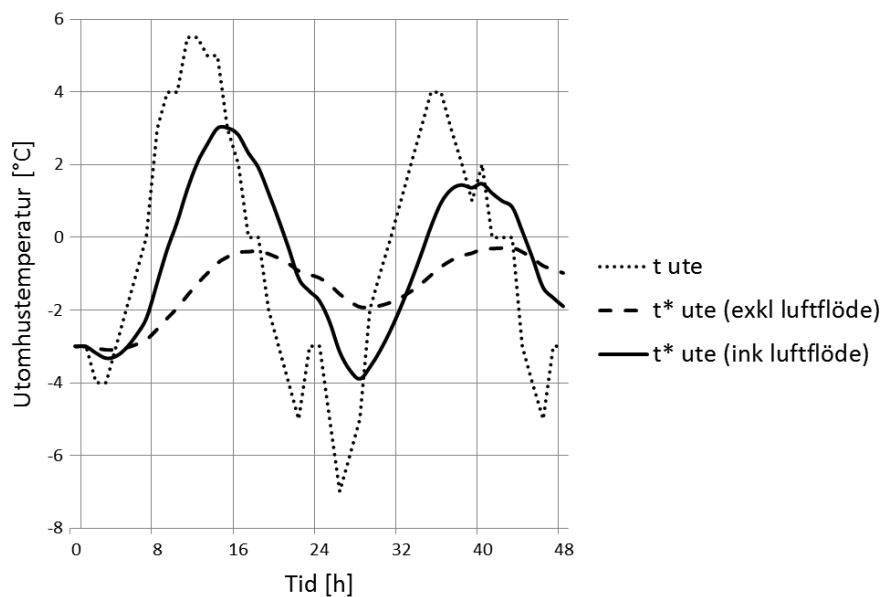
ξ : korrektionsfaktor för yttre aktiv termisk massa [-]

Nilsson uppger att det inte finns något direkt samband mellan korrektionsfaktor och termisk massa, $\sum cm$. Värden på korrektionsfaktorer för ett antal olika klimatskal som analyserades i Nilssons studie prövades istället fram med hjälp av beräkningsprogrammet DOE-2, varpå tabellvärden togs fram för ett ganska stort antal väggkonstruktioner som även borde kunna användas för en egenutvecklad reglerstrategi. Sammanställningen visar att korrektionsfaktorn för en tung vägg med invändig isolering typiskt är ca 0,06 – 0,1. Alltså menar Nilsson att endast 6 - 10 % av en sådan väggs termiska massa kan betraktas som termiskt aktiv. Typisk korrektionsfaktor för en lätt konstruktion med invändig isolering är ca 0,3 – 0,6.

Enligt ekv 5.5 blir tidskoefficienten stor för tunga byggnader. Den blir också stor om byggnaden är välisolerad, dvs. UA-värdet är lågt. Ekvationen visar också att tidskoefficienten minskar med ökat luftflöde. Om detta resonemang förs över på ekv 5.2 fås inte helt oväntat att tunga, täta och välisolerade byggnader påverkar den fiktiva utomhustemperaturen i större utsträckning än vad lätta och otäta byggnader med låg värmeisoleringsförmåga gör.

I Figur 5.3 ges en illustration för att visa skillnaden mellan ojusterad utomhustemperatur och fiktiv dito. Indata baseras på referensbyggnadens konstruktion i dess ursprungliga utformning, dvs. relativt tunga väggar av bl.a. tegel och ett tak jämfört med en lätt yttre del men ett betydligt tyngre inre bjälklag av betong (se Bilaga 1):

$\sum cm = 285\,172\,200$	[J/°C],
$\sum UA = 376$	[W/°C]
$\sum \text{Luftflöden (läck + vent)} = 0,97$	[m³/s]
$\xi = 0,1$	[-]
$t^*_{utan\ luftflöde} = 21,1$ (baserat på ovan)	[h]
$t^*_{med\ luftflöde} = 5,1$ (baserat på ovan)	[h]



Figur 5.3 Fiktiv utomhustemperatur i förhållande till ojusterad utomhustemperatur. Grafen baseras på referensbyggnadens konstruktion i dess ursprungliga utformning. Eftersom byggnaden de facto har såväl ventilation som luftläckage är det den heldragna linjen som är aktuell.

Tyngdkompenserad utomhustemperatur kan användas för att behovsanpassa regleringen i syfte att ge en stabilare inomhustemperatur och kan ersätta den vanliga utomhustemperaturen i ekv 4.22.

5.2 Central reglering med fiktiv utomhustemperatur

Nu finns snart alla byggstenar på plats för att skapa en egenutvecklad, relativt komplex och delvis dynamisk modellbaserad reglerstrategi baserad på fiktiv temperatur. Först beräknas framledningstemperaturen i vanlig ordning med ekv 4.21 som bas, men denna gång alltså med den fiktiva tyngdkompenserade utomhustemperaturen som underlag för det relativa effektbehovet. För att gå vidare krävs dock först att det s.k. rumsvärmetillskottet Δt_i i ekv 4.22 beräknas.

Förtydligande om internvärmerelaterad temperaturförändring, Δt_i (ekv 4.22)

När det gäller temperaturförändringen, Δt_i , orsakad av förändrad internvärme kan den vara resultatet av flera oberoende aspekter så som belysning, matlagning, personnärvaro, solinstrålning mm. Hur stor en temperaturökning blir pga. ökad intervärme beror, förutom på internvärmens storlek, även på byggnadens värmeisolering, täthet, ventilationsluftflödet och naturligtvis hur snabbt och väl värmesystemet justerar värmetillförseln för att matcha aktuellt värmebehov.

Ett anspråkslöst resonemang med två olika fall ger ett enkelt samband mellan internvärmetillskott och temperaturförändring. Det ena fallet (1) är en byggnad utan

internvärme. Det andra fallet (2) är exakt samma byggnad, dock med internvärme denna gång. Båda fallen har samma värmetillförsel från sina radiatorsystem.

$$(1) \quad \dot{Q}_{radiator} = \dot{Q}_{bygg} = K_{bygg} \cdot (t_i - t_u) \quad [\text{W}] \quad (\text{ekv 5.6})$$

$$(2) \quad \dot{Q}_{radiator} = \dot{Q}_{bygg} - \dot{Q}_{\text{int}} = K_{bygg} \cdot (t_i - \Delta t_{\text{int}} - t_u) \quad [\text{W}] \quad (\text{ekv 5.7})$$

Med K_{bygg} avses en byggnadsfysikalisk faktor som beror på byggnadens olika värmeförluster, så som transmissionsförluster, läckageförluster och värmeförluster genom ventilation. Om ventilationsluften förutsätts vara otempererad, tecknas således byggnadens totala K_{bygg} -värde som:

$$K_{bygg} = \Sigma UA_{bygg} + \rho_l \cdot c_{pl} \cdot (\dot{V}_{läck} + \dot{V}_{vent}) \quad [\text{W/K}] \quad (\text{ekv 5.8})$$

ρ_l :	luftens densitet	$[\text{kg/m}^3]$
c_{pl} :	luftens värmekapacitet	$[\text{J}/(\text{kg } ^\circ\text{C})]$
U :	klimatelets värmegenomgångskoefficient	$[\text{W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})]$
A :	klimatelets area	$[\text{m}^2]$

Eftersom värmetillförseln i de två fallen var identiska kan ekv 5.6 och ekv 5.7 skrivas samman, varpå följande uttryck för Δt_i fås:

$$\Delta t_{\text{int}} = \frac{\dot{Q}_{\text{int}}}{K_{bygg}} \quad [^\circ\text{C}] \quad (\text{ekv 5.9})$$

Som exempel på internvärmelaster brukar främst följande fyra nämnas: personer, apparater, belysning och sol. Värmestillskott från sol kommer förvisso utifrån men klassas ofta som internvärme. Vidare, i de fall byggnader eller rum med bristfällig grundisolering avses kan det vara aktuellt att beakta värmeförluster genom golv. Eftersom markens temperatur under en byggnad är relativt konstant hanteras den avkylningen ofta som en konstant värmeförlust. Med detta som bakgrund kan nu ekv 7.5 utvecklas och skrivas som:

$$\Delta t_{\text{int}} = \frac{\dot{Q}_{pers} + \dot{Q}_{bel} + \dot{Q}_{app} + \dot{Q}_{sol} - \dot{Q}_{golv}}{\Sigma UA + \rho_l \cdot c_{pl} \cdot (\dot{V}_{läck} + \dot{V}_{vent})} \quad [^\circ\text{C}] \quad (\text{ekv 5.10})$$

Detta uttryck kan nu användas i ekv 4.22 men för att förbättra regleringen ytterligare bör indata för solvärmestillskottet först förbehandlas något.

Angående solvärme in i rum

Central reglering med fiktiv utomhustemperatur kan naturligtvis hantera solinstrålning på flera olika sätt. Ett av sätten skulle kunna vara att ha mätare för solstrålning på fasaderna för att på det viset (efter avräkning för icke-glasad fasadarea) få kontinuerlig information om

solvärmetillskottet till byggnaden. För att exakt veta hur stort ett sådant värmetillskott blir och hur det utvecklas över tiden med tanke på termisk tröghet mm, krävs relativt avancerade beräkningsmodeller. Dock kan vissa förenklingar/schabloner användas med någorlunda god överensstämmelse jämfört med verkligheten. Här följer ett mycket kort resonemang kring detta.

Största delen av solvärmens som kommer in genom ett fönster lagras först i den inre konstruktionen och avges därefter som långvågig värmestrålning och konvektion till rummet. Yttemperaturen på de bestrålade ytorna inomhus ökar förvisso momentant, men materialets värmetröghet och förmåga att leda värmen djupare ned i konstruktionen gör att det tar tid innan den kortvågiga värmestrålningen resulterat i en märkbar värmelast till rummet. Värmetrögheten bestäms av materialets värmekapacitet, densitet, värmeledningsförmåga och diffusivitet.

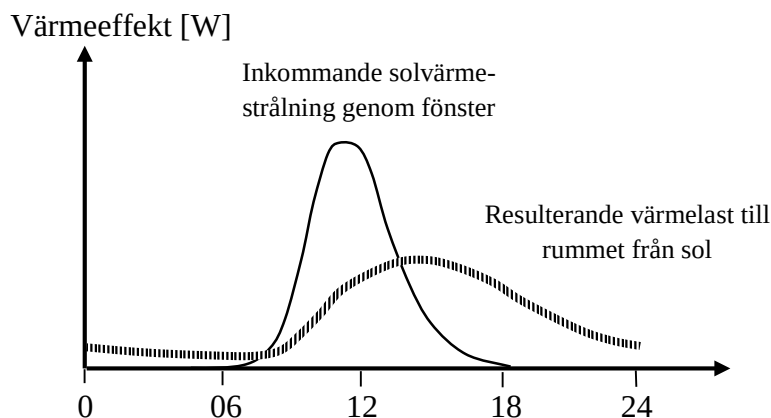
I framförallt bostäder är det vanligt att gardiner täcker delar av fönsterarean. Solinstrålning som träffar gardiner omvandlas mycket snabbt till värmetillskott till rummet då värme överförs konvektivt till rumsluften från gardinerna.

Att momentant reglera framledningstemperaturen efter solinstrålning torde vara önskvärt eftersom dess resulterande värmeavgivning är ett utdraget tidsförlopp, åtminstone för den del av solvärmens som inte träffar gardiner och andra delar med låg massa. Materialets värmetröghet gör alltså att ett sådant reglersystem ”reglerar ned” innan solvärmens hunnit värma upp rummet märkbart. En inbyggd prognosstyrning kanske man kan säga. Anspråkslös känslighetsanalys med IDA ICE visar att tidsförskjutningen mellan inkommande sol och resulterande rumstemperaturökning ofta är ca 2 timmar för relativt tunga byggnader. Ett sådant system vore dessutom självanpassande såtillvida att tunga byggnader regleras ner tidigare än lätta byggnader, vilket torde vara bra då man vill skapa ett så stabilt termiskt klimat som möjligt.

Utöver att skapa en fasförskjutning mellan inkommande sol och rumsvärmetillskott, spelar byggnadsstommen även en utjämnande roll för solvärmetillskottet. En enkel värmebalans för att tydliggöra detta faktum kan skrivas som ekv 5.11.

$$\dot{Q}_{behov} = \dot{Q}_{trans} + \dot{Q}_{läck} + \dot{Q}_{vent} - \dot{Q}_{pers} - \dot{Q}_{bel} - \dot{Q}_{app} - \dot{Q}_{sol} \cdot R \quad [W] \quad (\text{ekv 5.11})$$

R är en reduktionsfaktor mellan 0 och 1 för inkommande direkt solinstrålning. R används för att kompensera för utjämnning med avseende på termisk massa. Det maximala värmeeffektillskottet som faktiskt tillförs rummet är ofta ganska mycket lägre än motsvarande maximala inkommande solvärmeeffekt (strålning) och uppträder alltså en tid senare, normalt sett någon timma senare. Tidsfördröjningens längd beror på byggnadens termiska tröghet [Nilsson 2003]. Solvärmeenergin som kommer in genom fönstret är dock lika stor som tillgodogjord solvärmeenergi i rummet.



Figur 7.6 Inkommande solvärmestrålning och resulterande värmelast till rum [Nilsson 2003]

Reduktionsfaktorns storlek beror på byggnadens inre termiska massa i stomme, möbler etc. En byggnad utan termisk massa får reduktionsfaktorn 1, dvs. ingen reduktion alls, medan tyngre byggnader naturligtvis får lägre reduktionsfaktorer (större reduktion). Normalt sett blir det resulterande solvärmestillskottet till rummet lägre än 70 % av inkommande solvärmeeffekt [Nilsson 2003].

R kan exempelvis tas fram genom känslighetsanalys i IDA ICE. Solens inverkan kan då isoleras från övriga parametrar genom att byggnaden exempelvis tillfälligt utsätts för ett konstant klimat (utomhustemperatur), internvärme, luftläckage, ventilation och värmetillförsel. Eftersom simuleringsprogrammet anger inkommande solvärme genom fönster återstår bara att studera hur rumstemperaturen stiger med infallande solvärmeeffekt. För att omvandla solvärmeeffektstillskott till rumstemperaturökning (som efterfrågas i ekv 4.22) kan således ekv 5.10 användas.

5.3 Sammanfattat underlag för alternativ beräkning av framledningstemp

Med ekv 4.22 som bas kan nu en egen central reglerstrategi med beräknad framledningstemperatur tas fram (notera dock att någon sådan strategi inte testats i detta projekt). Här följer underlaget i sammanfattning:

- 1) Använd ekv. 4.21 som bas för beräkning av framledningstemperatur
- 2) Använd ekv 4.22 för beräkning av det relativa effektbehovet (som efterfrågas i ekv 4.21)
- 3) Ersätt utomhustemperaturen i ekv 4.22 med uttrycket i ekv 5.3
- 4) Använd ekv 5.10 för beräkning av rumstemperaturläskottet, Δt_i (som efterfrågas i ekv 4.22) men beräkna (simulera) eller antag först en reduktionsfaktor, R , för solvärmestillskottets inverkan.

6 Referensbyggnaden

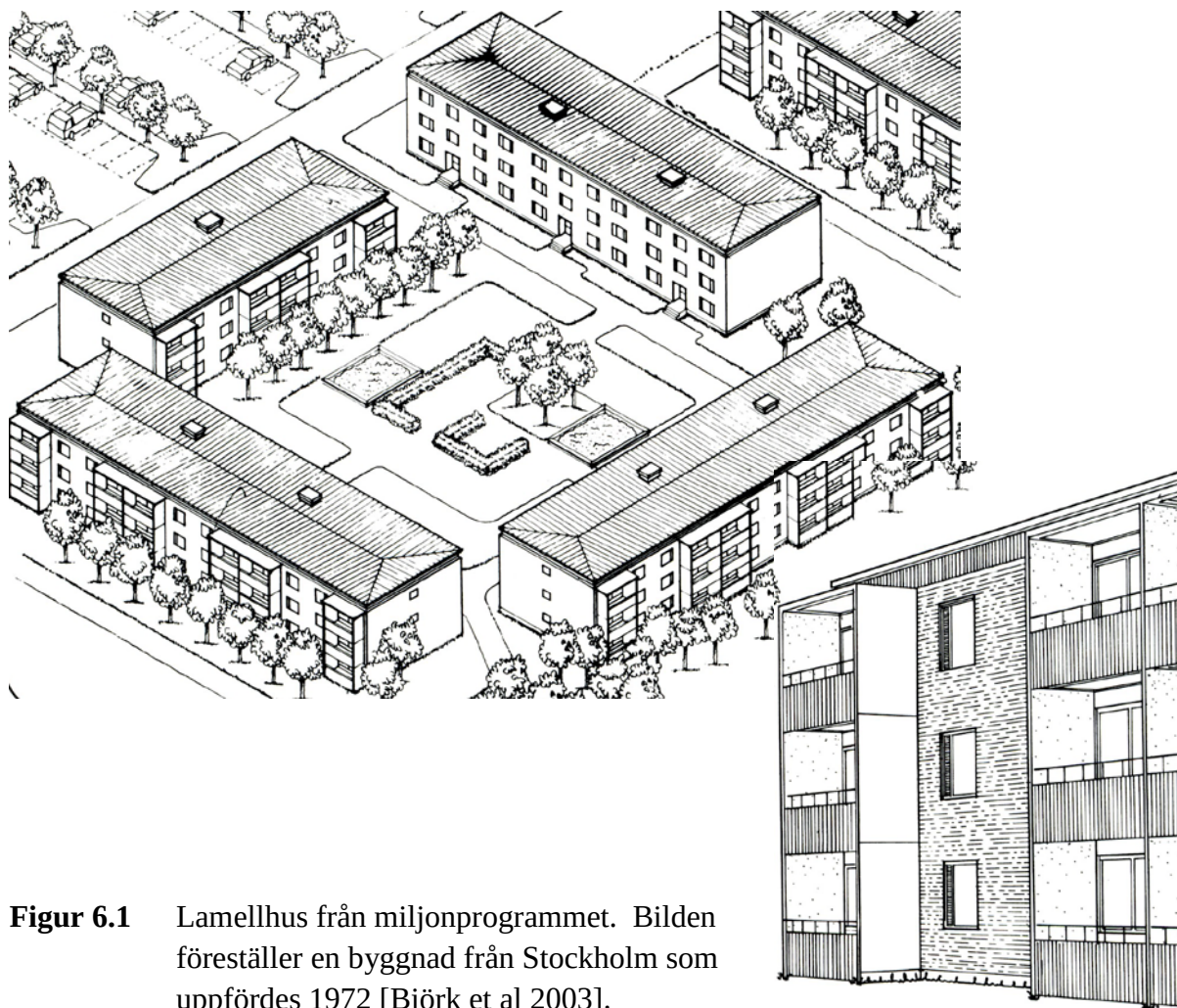
Här beskrivs den så kallade referensbyggnaden som används för beräkningarna framöver med en tyngre och en lättare byggnad för att studera den termiska massans inverkan beroende på regleringen. Men det handlar då endast om tillfälliga utvikningar, i övrigt hålls byggnaden intakt arbetet igenom, sånär som på typen av reglerstrategi för värmesystemet.

I syfte att applicera studien på en representativ byggnad för det svenska flerbostadsbeståndet, väljs en klassisk byggnadstyp från miljonprogrammets dagar (1965-1975). Detta var en tillväxtperiod utan motstycke för det svenska bostadsbeståndet och den allra vanligaste byggnadstypen som då uppfördes var trevånings lamellhus som ibland kom att kallas ”limpor”. Författarens egen tolkning till livsmedelsassociationen är att den yttre formen till viss del kan föra tankarna till en brödlängd, i kombination med att byggnaden gick att skära av i lämpliga modulanpassade längder med vanligtvis två eller tre trapphus per byggnad. Mina egna byggnadsminnen från de fem första levnadsåren i en nybyggd ”limpa” i Hammarkullen norr om Göteborg, är begränsade. Men de identiska husens plåtfasader minns jag och inte minst trapphusen, de senare kanske mest pga. väggarnas mönstring och färgvalen. Byggteknik och värmesystem kom dock inte att väcka mitt intresse förrän långt senare.

I den mycket läsvärda boken från Formas: *Så byggdes husen 1880-2000* av Björk, Kallstenius och Reppen [Björk et al 2003] är ”limpan” beskriven och där framgår bland annat att ca 300 000 lägenheter i trevånings lamellhus producerades under perioden 1960 – 1975 och att byggnadstypen utgjorde basen i flerbostadsproduktionen under miljonprogrammet. Husen var enkla att planera och kunde byggas utan hiss. När krav på hiss infördes upphörde produktionen under slutet av 70-talet [Björk, 2003]. Att lamellhusen dominerande under miljonprogrammet understryks av en sammanställning från Boverket [Boverket 2010 a] där det framgår att ca 80 - 85 % (beroende på tolkning av byggnadstyp) av alla flerbostadshus som byggdes under 1961 - 1975 var lamellhus.

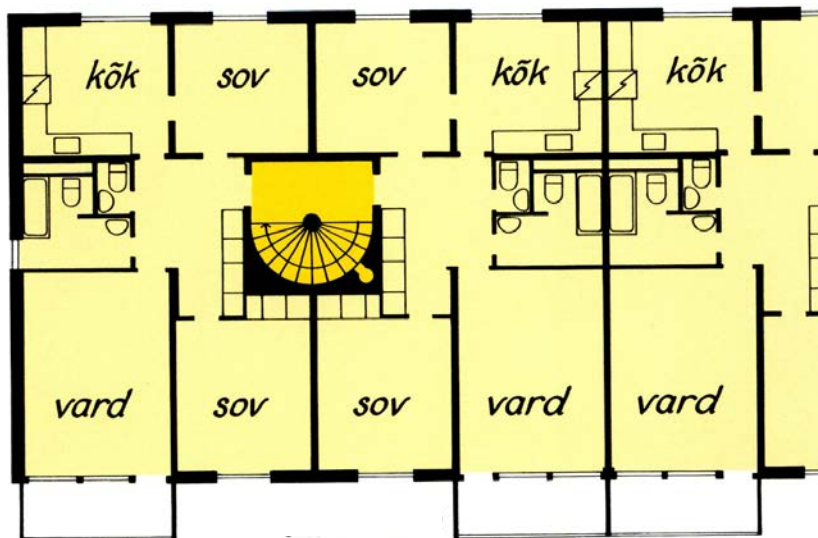
Det kan vara värt att hålla i minnet att miljonprogrammet inleddes ungefär samtidigt som skiftet mellan *BABS – Bostadsstyrelsens anvisningar till byggstadgan* (1947 – 1966) och *SBN – Svensk Byggnorm* (1967 – 1986) trädde i kraft. Varken i BABS eller i den första SBN-normen (SBN 67) fanns några specifika krav på energiprestanda eller ens för värmeisolering. Först i och med ikraftträdandet av SBN 75, som var den första byggnormen efter den första oljekrisen (1973), infördes särskilda krav på värmeisolering ur ett energiperspektiv. Dessförinnan fanns bara vissa enkla krav eller råd på tätskikt etc. i syfte att skydda konstruktioner från kondensproblematik. I den mån de normerna alls hade någon inverkan på byggnaders energianvändning var det i det närmaste oavsiktligt. Följaktligen kan sägas att i princip hela miljonprogrammet uppfördes mer eller mindre utan tanke på energianvändning, vilket naturligtvis resulterade i byggnader med undermålig energiprestanda jämfört med dagens nybyggnationer. Men detta gör frågan om reglerstrategier allt mer angelägen eftersom då även små besparingar procentuellt sett kan innebära stora besparingar räknat i kWh eller kronor.

Referensbyggnaden tar avstamp i Formas-bokens beskrivning av det massproducerade lamellhuset när det gäller storlek, geometri, materialval, andel fönster och placering, mm.



Figur 6.1 Lamellhus från miljonprogrammet. Bilden föreställer en byggnad från Stockholm som uppfördes 1972 [Björk et al 2003].

Huset är projekterat efter modulsystemet 3M (multiplar av 30 cm) som lanserades på 1960-talet och som under en period ställdes som villkor för statliga bostadslån [Björk et al 2003]. Vidare menar Formas-bokens författare att lägenheterna i lamellhusen fick bra planering trots att de bärande mellanväggarna av betong helt dikterade förutsättningarna.



Figur 6.2 Lamellhusets stomplan [Björk, 2003]

I fortsättningen delas detta kapitel upp i två delar. En del (Kapitel 6.1) som mycket översiktligt beskriver simuleringsförutsättningar och ett antal avgränsande val som gjorts. Den andra delen (Kapitel 6.2 - 6.4) är mer djuplodande, i syfte att underbygga vissa val av indata där beskrivande förklaringar ansetts befogade. Exempelvis skildras underlaget för vädring och användning av persienner relativt ingående, två faktorer som bedömts som viktiga för analysarbetet senare och för arbetet i stort.

För en mer kortfattad och allomfattande redogörelse av referensbyggnaden med avseende på installationsteknik, klimatskalets egenskaper, utformning, mm hänvisas till *Bilaga 1- Referensbyggnaden i ett nötskal*. Den delen skall i det närmaste ses som en förlängning till detta kapitel och de läses med fördel parallellt. Underlaget till uppgifterna i Bilaga 1 baseras på många olika källor, som exempelvis BETSI-studien för att nämna någon. Även om storlek, geometri, andel fönster mm är direkt taget från lamellhuset "limpan" är underlaget i övrigt allmäntillgäntligt för den aktuella byggperioden och gäller alltså inte specifikt för trevånings lamellhus.

6.1 Övergripande simuleringsförutsättningar

Den framtagna referensbyggnaden består av tre våningar à 6 lägenheter, alltså sammanlagt 18 lägenheter. Redan för dessa 18 "zoner" som de rubriceras i beräkningsprogrammet IDA ICE, är simuleringstiden för en årskörning relativt omfattande. Skulle varje lägenhet dessutom delas upp i flera zoner/rum med kanske öppna dörrar emellan, skulle simuleringstiden bli orimligt lång särskilt med tanke på antalet reglerstrategier och olika känslighetsanalyser som skall simuleras. Av tidsskäl förenklas därför planlösningen till att bestå av lägenheter med en mer öppen karaktär (en zon). Av samma skäl slås därför två av fönstren i Figurerna 6.1 och 6.2 ihop till ett gemensamt stort fönster. Ytterligare en förenkling som görs är att referensbyggnaden inte har några trapphus eftersom sådana är av en helt annan utformning än lägenheterna med en zon som sträcker sig vertikalt genom byggnaden med andra

temperaturnivåer än de anslutande lägenheterna, vilket inverkar på komplexiteten i uppbyggnaden högst påtagligt med utdragna simuleringar som följd.

Dessa förenklingar bedöms ha en mycket liten inverkan på resultatet, särskilt som det är frågan om jämförande studier där alla de testade reglerstrategierna ges samma förenklade grundförutsättningar med avseende på bl.a. rumsutformning.

Byggnadsår

Ungefär 55-60 % av alla lägenheter i Sverige är byggda efter 1960 [Boverket 2010 a]. Åldersfördelningen är dock något snedfördelad med tyngdpunkt på framförallt 60-talet och första halvan av 70-talet (bl.a. miljonprogrammet, 1965-1975). Stora delar av det beståndet står nu inför omfattande renoverings- och moderniseringsinvesteringar. Det finns således flera anledningar att i denna studie omfatta detta byggnadsbestånd där ”limpan” alltså valts som representant för byggnadsepoken.

Reglerstrategier

Flera olika grundtyper av reglering med ytterligare varianter kommer att analyseras. Systemen sammanställs och beskrivs i Kapitel 7.

Ventilationssystem

Miljonprogrammets flerbostadshus hade mekanisk frånluftventilation (F-system) och så ser de ut än idag, även om det i några byggnader konverterats till från- och tilluftventilation med värmeåtervinning (FTX-system). Flerbostadshus som byggs idag har FTX-system för att klara kraven på energiprestanda. Referensbyggnaden har F-system.

Värmetröghet (termisk massa)

För att utvärdera hur byggnaders värmetröghet påverkar energiprestanda och inomhusmiljö för olika typer av reglerstrategier kommer en mycket lätt och en mycket tung variant av referensbyggnaden att analyseras. I sitt grundutförande är referensbyggnaden dock relativt tung.

Geografisk placering

Referensbyggnaden placeras i Stockholm, där klimatet i simuleringsprogrammet är ett verkligt uppmätt väderår (1977) för Bromma flygplats. Att just 1977 fått representera orten beror på att SMHI bedömt det året som representativt ur uppvärmningssynpunkt jämfört med andra uppmätta år.

Prognoskvalitet

Nog har det hänt att väderprognoser slagit fel. Men någon statistik över ”typiska prognosfel” finns inte. Ett alternativ skulle kunna vara att använda samlade prognostiserade indata för en specifik ort under ett år och därefter jämföra det med hur utfallet blev för den orten. Men inte heller sådan statistik finns på den detaljeringsnivå som IDA ICE behöver till sina så kallade

”väderfiler”. Dessutom hade det varit svårt att dra slutsatser huruvida det valda utfallet var ett representativt utfall i jämförelse med vad som prognostiserades. För enkelhets skull antas därför att alla prognoser är perfekta in i minsta detalj, i varje tidssteg. På det viset kan man säga att simuleringarna av reglerstrategier för väderprognosstyrning blir ideala ur den aspekten.

Specificerad indata – klimatskal, installationer, boende och energiprestanda

För uppgifter om detta hänvisas till *Bilaga 1 - Referensbyggnaden i ett nötskal*. Där redogörs kortfattat för följande antaganden och indata (inklusive källhänvisningar) i simuleringsmodellen:

- Byggnadens geometri och storlek
- Värmeisolering
- Köldbryggor
- Luftläckage (inkl. tilluft via spaltventiler)
- Fönster
- Värmesystem
- Luftbehandling
- Belysning och apparater (hushållsel)
- Tappvarmvatten
- Solavskärmning
- Vädring

Aspekterna luftläckage, solavskärmning och vädring visade sig kräva extra omsorg för att hitta lämpliga indata, eftersom där saknas tillämpbara nationella riktvärden. De aspekterna tilldelas därför egna utrymmen i de följande underkapitlen.

6.2 Fönstervädring

I syfte att i allt väsentligt återspegla verklighetens flerbostadshusbestånd i referensbyggnaden, tas här hänsyn till vädring eftersom detta antogs vara en relativt viktig beteenderelaterad aspekt.

Det finns ett antal studier gjorda om fönstervädring. Flera av dem baseras på Stockholms Stads Innemiljöenkät [Engvall 1990] ibland kallad Stockholmsenkäten som utgjorde informationsgrunden i Stockholms stads kartläggning av upplevd innemiljö och hälsa i flerbostadshus. Enkäten delas upp i fem ämneskategorier; värme och temperatur, luftkvalitet och ventilation, hus och hälsa, ljud och ljus samt bakgrundsfrågor. I detta finns frågor som rör vädring (fråga # 15 och #16) med avseende på frekvens och varaktighet. Tyvärr finns här dock inget om hur många fönster hushållen öppnar när de vädrar eller hur mycket de öppnas (fönstervinkel eller öppningsmått). Där finns heller ingen koppling till varför man vädrar (termisk komfort, luftkvalitet, dagsljus, mm) eller vilken typ av ventilationssystem de svarande hade.

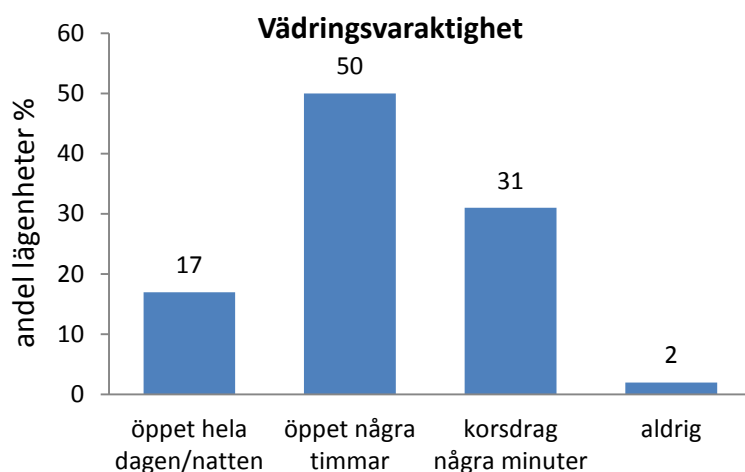
För att i någon mån strukturera texten om fönstervädring delas den här upp i två delar; *vädringsvaraktighet* respektive *fönsteröppning*.

6.2.1 Vädringsvaraktighet

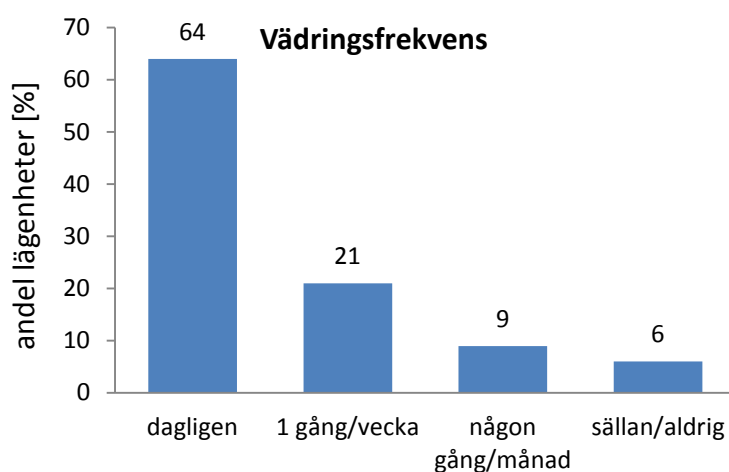
Kartlägningsstudier baserade på slumpmässigt stratifierade urval av flerbostadshus i Stockholm genomfördes 91/93 respektive 2005. Studien från 91/93 kallades "Hus och Hälsa" och bestod av svar från 508 flerbostadshus med sammanlagt 9808 lägenheter. Studien från 2005 bestod av svar från 481 flerbostadshus och 7 640 lägenheter. Efter dessa två stora studier genomfördes även en mindre studie i mars/april 2007. Denna vände sig till en specifik målgrupp, närmare bestämt bostadsrättsinnehavare i 226 nybyggda lägenheter uppförda enligt Stockholms Stads program för miljöanpassat byggande [Engvall et al 2009].

Generellt kan sägas att statistiken tyder på att man vädrar i mindre omfattning nu än förr och att man vädrar mindre i nybyggda hus än i äldre. Det senare gäller åtminstone under förutsättning att nybyggda hus är utformade på ungefär samma sätt som de hus som avsågs i undersökningen från 2007. Man får nog förmoda att de nybyggda husen i fråga, med sina relativt nya värmesystem och termostatventiler samt mekanisk ventilation, oftare lyckas skapa bättre termisk komfort och luftkvalitet än äldre dito. De nya lägenheterna behöver därför sannolikt helt enkelt inte vädras lika ofta som de äldre. Förvisso kan gamla otäta flerbostadshus ha en hög luftomsättning orsakade av luftläckage genom klimatskal tilluftdon eller spaltventiler. Det gör att kalla eller mycket blåsiga dagar kan den läckagebaserade luftomsättningen väl motsvara även höga luftflöden. Men generellt sett har nyare byggnader med mekanisk ventilation en högre luftomsättning än äldre självdragshus, vilket alltså sannolikt är en av orsakerna till varför det vädras mer i äldre hus än i nyare. Antagandet om en korrelation mellan termisk komfort och vädringsbeteende motsägs dock i viss mån av resultat från det s.k. MEBY-projektet. Mer om det strax.

Eftersom referensbyggnaden i denna rapport är från 70-talet beaktas inte resultaten från undersökningen 2007 ytterligare. Vid en första anblick ter sig istället resultaten från den stora och relativt nya studien från 2005 som den mest intressanta som grund för det fortsatta arbetet. En fördel med den äldre studien från 91/93 är förvisso att resultaten från denna delades upp i byggnadsår vilket är intressant eftersom vädringsvanorna alltså skiljer sig åt beroende på byggår. Det som dock faller avgörandet till förmån för undersökningen från 2005 är att det för detta material finns svarskopplade sammanställningar, dvs. uppgifter om ungefär hur länge de som exempelvis dagligen vädrar faktiskt gör så, se Figur 6.3 och 6.4 nedan.



Figur 6.3 Vädringsfrekvens under uppvärmningssäsongen (sept-april). Andel lägenhetsrepresentanter [Engvall et al, 2009].

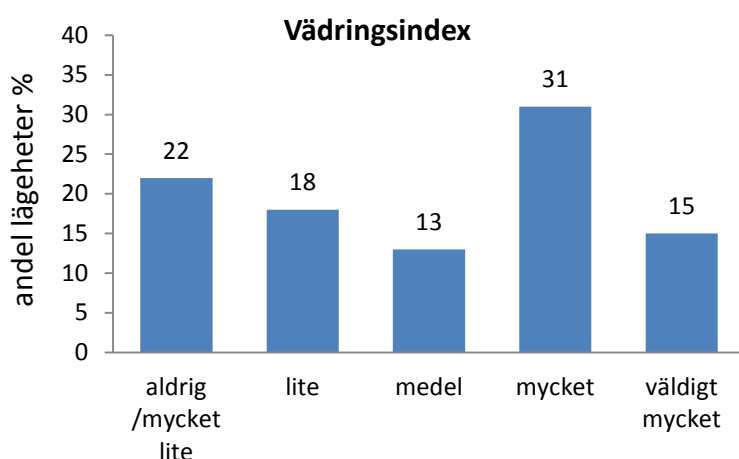


Figur 6.4 Vädringsvaraktighet. Andel lägenhetsrepresentanter [Engvall et al 2009]

I skriften *Upplevd inomhusmiljö och hälsa i Stockholms flerbostadshus 2005* kopplas svaren från frågorna om vädringsfrekvens och vädringsvaraktighet samman till ett vädringsindex, se Tabell 6.1 och Figur 6.5 nedan. Ur detta går bl.a. att utläsa att det i 40 % av lägenheterna i studien vädras *lite* och att det i 45 % vädras *mycket*. I Tabell 6.1 kvantifieras i någon mån bl.a. omdömena *lite* respektive *mycket*. Där framgår även att det i 15 % av lägenheterna vädras *väldigt mycket* och att det i 22 % av lägenheterna *aldrig eller mycket sällan* vädras.

Tabell 6.1 Kategoriserade vädringsbeteenden [Engvall et al, 2009]

Vädringskombination	Vädringsindex
Vädrar aldrig	Aldrig
Någon gång per månad, korsdrag några minuter	Mycket lite
En gång per vecka, korsdrag några minuter	Lite
Någon gång per månad, öppet några timmar	Lite
Dagligen, korsdrag några minuter	Lite
En gång per vecka, öppet några timmar eller någon gång per månad, öppet hela dagen/natten	Medel
En gång per vecka, öppet hela dagen/natten	Medel
Dagligen öppet några timmar	Mycket
Dagligen öppet hela dagen/natten	Väldigt mycket



Figur 6.5 Vädringsbeteende baserat på hur man vädrar och hur ofta. [Engvall et al 2009]

Nyttan med vädringsindex i detta arbete fås först då begreppen i Tabell 6.1 omvandlas till tidsschema och sedermera även till total öppningsmängd dvs. ett mått på *antal* fönster som öppnas, *storlek* för dessa och *öppningsmått*. Men först alltså tidsaspekten.

Schema

För att kunna lägga in ett vädringsschema i IDA ICE behöver vädringsindexen ovan översättas och kvantifieras. Tyvärr är inte enkätsvarsalternativen, och därmed inte heller vädringsindexen, mer precisa i detta avseende än vad som ovan redovisats. Här kan man alltså bara gissa vad de svarande avsett. I Tabell 6.2 nedan redogörs för ett antal antaganden om vad som egentligen menas med de olika tidsbegreppen i Tabell 6.1. Först några egna generella antaganden för detta arbete:

1. Sällanvädrarnas inverkan på byggnadens värmeenergianvändning bedöms vara försumbar.
2. Orden *någon* respektive *några* kvantifieras till två (2).
3. Alla vädringsvanor som bedöms ha betydelse för byggnaders värmeenergianvändning omvandlas till ett regelbundet dygnsschema, vilket inkluderar de fall där den verkliga vädringen inträffar relativt sällan men över längre tid.
4. Endast ett fönster eller en altandörr per lägenhet används för vädring
5. Klockslagen för vädring är de samma oavsett om det är vardag eller helg.

Förenklingarna i punkt 3) och 5) bedöms underlätta analysen av det termiska inomhusklimatet. Ju färre tidsscheman att ta hänsyn till ju enklare att hantera och analysera temperaturförändringar inomhus.

Tyvärr finns inget om klockslag i vädringsstudierna, så tiderna i Tabell 6.2 nedan är således bara gissningar, delvis baserade på egna preferenser.

Tabell 6.2 Egen översättning av tidsbegrepp (bedömningar)

Vädringskombination	Vädringsindex	Tid [tim/dygn]	Klockslag
Vädrar aldrig	Aldrig	0	-
Någon gång per månad, korsdrag några minuter	Mycket lite		
En gång per vecka, korsdrag några minuter	Lite	0	-
Någon gång per månad, öppet några timmar	Lite		
Dagligen, korsdrag några minuter	Lite		
En gång per vecka, öppet några timmar ^(A) alt. Någon gång per månad, öppet hela dagen/natten ^(B)	Medel	1 ^(D)	07.00 - 07.30 17.30 - 18.00
En gång per vecka, öppet hela dagen/natten ^(C)	Medel		
Dagligen öppet några timmar	Mycket	2	06.30 - 07.30 17.30 - 18.30
Dagligen öppet hela dagen/natten	Väldigt mycket	12	07.00 - 19.00

^(A) Antagande: 2 h/vecka

^(B) Antagande: 2 ggr/mån, 12 h/gång = 24 h/mån = 6 h/vecka

^(C) Antagande: 8 h/vecka

^(D) Antagande: alternativen indexerade som (A)-(C) ovan är lika vanligt förekommande.

Att vädringsindexen *aldrig*, *mycket lite* och *lite* här anses som försumbar för byggnadens värmeenergianvändning beror på vädringens begränsade omfattning i tid. Förutsatt att begreppen *någon* och *några* kan kvantifieras som *två* fås följande vädringsvaraktighet per svarsalternativ:

Någon gång per månad, korsdrag några minuter

2 ggr/månad, 2 min/tillfälle, dvs. totalt 4 min/månad. Detta motsvarar 0,01 % av tiden och bedöms här vara helt försumbart.

En gång per vecka, korsdrag några minuter

Ansätts här till 2 min per vecka. Detta motsvarar 0,02 % av tiden och bedöms här vara helt försumbart.

Någon gång per månad, öppet några timmar

2 ggr/månad, 2 h/tillfälle, dvs. totalt 4 h/månad. Detta motsvarar 0,6 % av tiden och bedöms här vara helt försumbart.

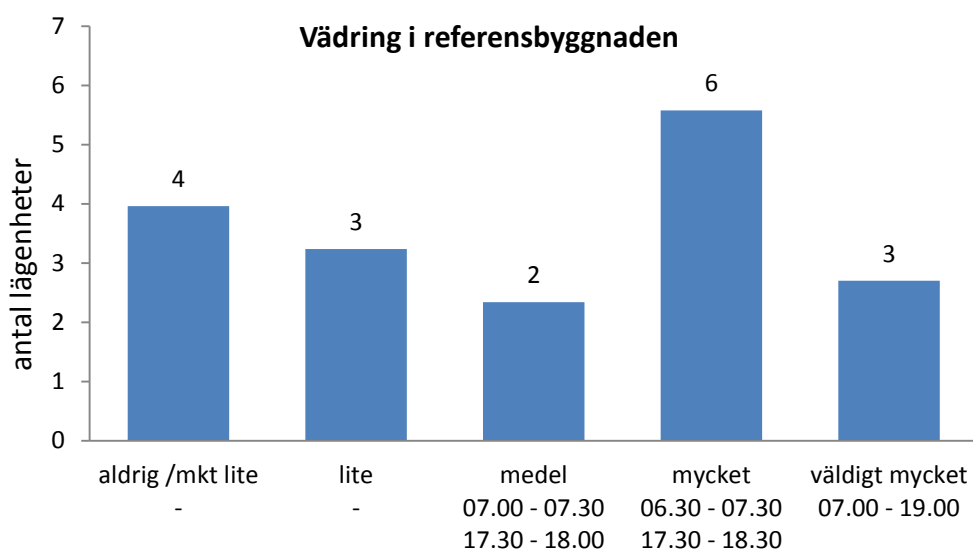
Dagligen, korsdrag några minuter

2 min/dag. Detta motsvarar 0,1 % av tiden och bedöms här vara helt försumbart.

Det är tydligt att även om begreppen någon och några tolkas som fler än två, säg kanske upp till max fem som rimlig tolkning, så kan vädringsbeteenden som indexeras som *mycket liten* eller *liten* här anses vara försumbara.

Vad innebär detta för referensbyggnaden?

Referensbyggnaden består av 18 lägenheter. Förutsatt att dess boende vädrar i samma omfattning som de Stockholmare som 2005 svarade på den s.k. Stockholmsenkäten, kan värdena i Tabell 6.2 appliceras även på referensbyggnaden varpå dess tidsschema för vädring blir enligt Figur 6.6 nedan. Antalet lägenheter som vädras avrundas till närmaste heltal.



Figur 6.6 Vädringsvanor i referensbyggnaden uppdelat på antal lägenheter och klockslag, baserat på Figur 6.5 och Tabell 6.2. Antalet lägenheter för de olika vädringsvanekategorierna är avrundade till närmaste heltal.

6.2.2 Fönsteröppning

Att bara känna till ”hur ofta” och ”hur länge” boende i flerbostadshus vädrar hjälper inte i stort om man inte även tillför aspekterna ”vad som vädras med” (dörr eller fönster) och ”vädringsöppningens storlek”. Vidare är det av intresse att veta varför folk vädrar. Är det inomhustemperaturberoende eller är det kanske snarare relaterat till utomhustemperatur eller rökning eller något helt annat? Kan det vara så att gemene man helt enkelt mestadels vädrar av gammal vana, oavsett faktorerna ovan?

MEBY-projektet

Analyser av Stockholmsenkäten i sitt grundutförande ger i sig inga svar på nyss nämnda frågeställningar, men 2001/2002 togs intressant statistik fram i samband med en teknikupphandling som kom att kallas MEBY-projektet (Teknikupphandling av energiberäkningsmodell för energieffektiva sunda flerbostadshus) [Sandberg, Engvall 2002]. Det övergripande målet med projektet var att ge förslag på en praktiskt användbar och enkel modell för beräkning, analys och uppföljning av energianvändning och energirelaterade driftskostnader för flerbostadshus. Där undersöktes bl.a. om vädringsbeteendet påverkas av inomhustemperatur, solavskärmning, väderstreck, drag, mm.

MEBY-projektet baseras på sammanlagt 386 svarande stockholmskushåll, klart färre alltså än studierna från 1991/1993 respektive 2006. Svarsunderlaget i MEBY-projektet utgörs av boende i relativt nybyggda fastigheter, vilket i detta arbete är lite olyckligt med tanke på att referensbyggnaden i denna rapport är en typbyggnad från tidsperioden för miljonprogrammet. Något reellt alternativ till MEBY-projektet tycks dock inte finnas om man söker svar på dessa frågor.

MEBY-projektet baserades på två olika enkäter:

1. Kompletterad Stockholmsenkät (kompletterad med inomhustemperatur och vädringsdetaljer)
2. MEBY-enkäten (riktad enkät m.a.p. solavskärmning, internvärme, vädring, mm)

För att undersöka sambanden mellan bl.a. termisk komfort och vädring ombads de tillfrågade själva läsa av inomhustemperaturen med hjälp av tilldelade temperaturmätare. De fick även tala om var i lägenheten mätningarna gjordes och om de då var nöjda med inomhustemperaturen. Utöver detta fick de svarande även ange datum och klockslag för mätningarna.

Något förvånande kan tyckas, visade sammanställningen av enkätsvaren att det inte tycks finnas något samband mellan hur mycket man vädrar och varför (behovet). Faktum är att det knappt fanns någon som helst korrelation mellan vädringsvanor och termisk komfort och att det endast fanns en ganska svag korrelation mellan vädring och rökning. I vissa enskilda fastigheter fanns förvisso tydligare samband, men alltså inte för underlaget i sin helhet. Som möjliga förklaringar till de svaga sambanden konstaterades att enkäterna gjorts under ganska skilda yttre omständigheter med avseende på bl.a. solstrålning och utomhustemperatur.

Dessutom gjordes alla värdringsvanor om till det nämnda värdringsindexet, ett då nypåkommet mått och hjälpmedel för ändamålet (se Kapitel 6.2.1). Man kommenterar i rapporten att indexet eventuellt kunde utformats annorlunda.

För att särstudera eventuella samband mellan vädring och utomhusklimat gjordes en kompletterande telefonenkät för en del av fastighetsbeståndet. De tillfrågade fick helt enkelt åter svara på frågor om värdringsvanor, men detta under en kallare och mörkare del av året (jan/feb) än vad som var fallet första gången de besvarade enkäten (våren). Den studien visade att de tillfrågade logiskt nog vädrade mindre under jan/feb än under våren. Tyvärr finns dock inga slutsatser kring huruvida det kan ha berott på utomhustemperatur, sol och dagsljus eller bara en allmän kärlek till fria luften.

Av de resultat som trots allt framkom ur MEBY-projektet visades att det tycks finnas ett samband mellan vädringstid och *öppningsgrad*. En särstudie inom MEBY-projektet på fastigheter i Nybodahöjden i Stockholm (104 svar) visade nämligen att två tredjedelar vädrar med balkongdörr medan en tredjedel väljer att vädra genom att öppna fönster. Svaren från Nybodahöjden visar också att ju kortare tid man vädrar ju större öppningsgrad. Av korttidsanvändarna (värdringsindex: aldrig – medel) angav ca 40 % att de vädrar genom att öppna minst 10 cm. Ungefär hälften av långtidsvädrarna (värdringsindex: väldigt mycket) i studien öppnar ca 5 cm eller mer. Särstudien i Nybodahöjden utgick från Stockholmsenkäten som bas.

Vad innebär nu då detta för energisimuleringarna av referensbyggnaden? Att helt korrekt återspegla ett typiskt flerbostadshus i Sverige med avseende på vädring låter sig nog inte göras. I avsaknad av tydliga samband för *varför* man vädrar väljs i detta arbete att enbart låta vädringen styras av tidsschema.

Här bör noteras att den simulerade referensbyggnaden saknar balkonger och att vädring med balkongdörrar därmed inte låter sig göras. Istället ersätts de med ett vanligt fönster. Verklighetens lamellhus är ofta utrustade med balkonger, dock bedöms balkonger i andra sammanhang påverka simuleringsresultaten i allt för stor grad, se mer under avsnittet om solavskärmning strax. Eftersom balkongdörrar normalt sett är större än fönster kompenseras fönstrens öppningsmått nedan för att återspegla statistiken som visade att två tredjedelar vädrar med balkongdörrar.

MEBY-projektets uppgifter om öppningsmått ligger till grund för öppningsgraderna i referensbyggnaden, kompletterade med ett antal antaganden för att få absoluta mått. Antagandena är följande:

- *Minst 5 cm* innebär här 7 cm
- *Minst 10 cm* innebär här 12 cm
- Öppningsmålet för värdringsindexet *mycket vädring* är ett avrundat medel mellan värdringsindexen *medel* och *väldigt mycket*.
- Antalet lägenheter för olika värdringsföreteelser avrundas till närmaste heltal.
- Vädring sker endast med ett vardagsrumsfönster.

Tabell 6.3 Vädringsschema och öppningsmått för flerbostadshus med balkongdörrar. Detta gäller dock ej referensbyggnaden som saknar balkongdörrar.

Vädringsindex	Aldrig/ mkt lite	Lite	Medel	Mycket	Väldigt mycket
Antal balkongvädrade lgh.	3	2	1	4	2
Antal fönstervädrande lgh.	1	1	1	2	1
Klockslag	-	-	07.30 – 08.30 17.30 – 18.00	06.30 – 07.30 17.30 – 18.30	07.00 – 19.00
Öppningsmått	-	-	12 cm	10 cm	7 cm

Innan allt är klart för simulering måste ytterligare några anpassningar göras.

Simuleringsprogrammet IDA ICE efterfrågar en öppningsandel, snarare än öppningsmått i centimeter. Vidare genererar många fönster per lägenhet lång simuleringstid. Därför reduceras antalet fönster i referensbyggnaden till sammanlagt tre fönster per lägenhet: ett på fasaden med kök och två på fasaden med vardagsrum. Med undantag för sovrumsfönstret mot samma fasad som vardagsrumsfönstret, är fönstren i referensbyggnaden alltså betydligt större (bredare) än vad som vore fallet för en verklig byggnad motsvarande referensbyggnaden. För att kompensera för denna storleksskillnad minskas öppningsmåtten (öppningsandelen) för referensbyggnadens fönster, detta för att öppningsarean i det stora fönstret annars skulle bli oproportionerligt stor. Läs mer om fönstermått i Bilaga 1 där referensbyggnadens utformning beskrivs mer i detalj.

Ett anpassat vädringsschema för referensbyggnaden och de aktuella simuleringarna redogörs slutligen för i Tabell 6.4 nedan.

Tabell 6.4 Vädringsschema och öppningsandel för referensbyggnaden.

Vädringsindex	Aldrig/ mkt lite	Lite	Medel	Mycket	Väldigt mycket
Antal vädrade lägenheter	4	3	2	6	3
Klockslag	-	-	07.30 – 08.30 17.30 – 18.00	06.30 – 07.30 17.30 – 18.30	07.00 – 19.00
Öppningsandel	-	-	5,6 %	4,6 %	3,2 %

En fördel med att välja ett ”stelt schema” för vädring istället för att låta det bero på antaganden om påverkan av årstider, dagsljus etc. är att analysen underlättas. En av de viktigare parametrarna som studeras i detta arbete är inomhustemperatur som ju naturligtvis påverkas av vädring. Allt för komplexa temperatursvängningar orsakade av vädring bedöms försvåra den analysen.

6.3 Solavskärmning - användning av persienner

Att använda persienner och annan utrustning för avskärmning mot solinstrålning påverkar naturligtvis rummets ljusmiljö, men det kan även påverka den termiska komforten. Fler och i någon mån mer jordnära skäl till att använda persienner finns dock. En kartläggning [Sandberg, Engvall 2002] av hur persienner används i vardagsrum visar att de flesta som drar ner sina persienner gör så för att reglera ljuset (46 %), näst vanligaste orsaken är för att skydda blommor (31 %). Först därefter kommer skäl som värmereglering (12 %) och insyn (10 %).

Persienner påverkar inomhusklimatet genom att de reducerar solvärmestillskott, särskilt om de stängs helt. Men persienner är inte lika effektiva som exempelvis markiser och flera andra utvändiga solskyddslösningar. Ett kortfattat byggnadsfysikaliskt resonemang ger vid handen att inkommande kortvågig värmesolstrålning påverkar rummets temperatur först efter att det lagrats i det solbelysta byggnadsmaterialet och därefter omvandlats till värmeavgivning i form av framförallt konvektion och långvågig värmestrålning från det uppvärmda materialet. Om en persienn blockerar solstrålningen innebär det att det är persiennen som värms upp och därefter avger värme till rummet i form av konvektion och strålning. Solenergens omvandling till internvärme via persienner går relativt snabbt eftersom persiennen har en låg termisk massa. Under beskrivna förhållanden skulle nyttan med persienner som ”övertemperaturdämpare” alltså vara kraftigt begränsad, endast bättre än om personerna i rummet träffades direkt av solen. Dock avges även värme ut igen genom fönsterrutan genom konvektion, ledning och strålning. En stängd och invändigt placerad persienn exempelvis reducerar i sig självt typiskt solvärmes med en faktor 0,5 vilket innebär att 50 % av solvärmes som kommer in genom glaset också kommer rummet till godo medan 50 % ”reflekteras” tillbaka ut. Denna reducerande faktor kallas ofta solfaktor, eller g-faktor.

Även glas reducerar mängden insläppt solvärme. I många moderna kontorshus vill man ha glas med behandlade ytor som bara släpper in lite solenergi, för att undvika ett allt för stort värmeöverskott under delar av året. Vissa moderna glas för sådana tillämpningar reducerar den insläppta solenergin med upp till 90 %. I bostäder vill man dock oftast tillgodoräkna sig solenergi och vanliga 2-glasfönster med så kallat klarglas, dvs. utan behandlade ytor, reducerar typiskt solenergin med 25 %. För vanliga klara treglasfönster är motsvarande siffra ca 30 %. Husen från miljonprogrammet är oftast utrustade med klara 2-glasfönster, därför används sådana fönster i referensbyggnaden.

För att få ett fönsters totala solfaktor för glas och neddragen persienn multipliceras dessas solfaktorer med varandra. För referensbyggnaden innebär det att fönster med neddragna persienner totalt sett reducerar solenergitillförseln med ca 40 -60 % beroende på persiennvinkel och färg enligt en studie gjord på Lunds universitet 2003 [Wall, Bülow-Hübe 2003].

Det kan nämnas att persienner under vissa förutsättningar kan reflektera tillbaka mer solvärme än vad som angetts ovan. Nyttan med persienner (här avses reducerat värmestillskott), är beroende av persiennmaterialets reflektionsförmåga av kortvågig värmestrålning samt

persiennernas placering i själva fönstret. Förenklat kan sägas att blanka persiennner långt ut i fönsterkonstruktionen (mot utomhus) bättre reducerar solvärmestillskott än mörka och matta persiennner på insidan av ett fönster.

I MEBY-projektet [Sandberg, Engvall 2002] finns faktiskt en mindre studie i ämnet, baserad på fem fastigheter. I studien kartläggs dock endast förekomst och användande av persiennner i vardagsrum. Fönster i andra rum noterades tyvärr inte. Av studien som gjordes under vinterhalvåret framgår att 87 % av lägenheterna har vardagsrum utrustade med persiennner och att 57 % av dessa har sina persiennner uppdragna. Enligt studien har 39 % av persienninnehavarna sina persiennner nerdragna men uppvinklade medan endast 4 % har dem nerdragna och stängda.

Kartläggningen inom MEBY-projektet slår fast att användningen av persiennner påverkas av årstid och av i vilket väderstreck fönstren ligger. Inte helt oväntat visar det sig att persiennner används i störst omfattning under sommarhalvåret och att fönster mot norr i stort sett aldrig har persiennner nere. Persiennner i fönster mot framförallt syd och väst är däremot ofta nerdragna och stängda. Mer i detalj visar studien att av de vardagsrum med fönster i öst har 90 % av dessa persiennner nere sommartid, av dessa är det ungefär lika många som har dem uppvinklade som helt stängda. Motsvarande andel för väst eller öst är 78 % respektive 75 %. Nerdragna persiennner på västfasader är oftare helt stängda än motsvarande dito på östfasader, 35 % jämfört med 19 %.

Skillnaden i persiennanvändning med avseende på olika väderstreck finns tyvärr bara redovisad för sommarhalvåret. I detta arbete antas därför att persiennanvändandets fördelning mellan väderstreck är samma året om. Det vill säga, i enlighet med statistiken ovan där persiennner i västfönster sommartid är helt stängda ungefär dubbelt så ofta som persiennner i östfönster sommartid, ja då gäller det sambandet året om.

Vad innebär detta för referensbyggnaden?

För referensbyggnadens del ansätts att de boende i lägenheterna endast använder persiennner i vardagsrummen, vars glasarea utgör 50 % av lägenheternas totala glasarea. De övriga rummen, sovrum, kök och toalett bedöms inte avskärmas i någon större utsträckning. Detta är dock ett antagande i brist på studier i ämnet. Här kan även nämnas att referensbyggnaden helt saknar övrig solavskärmning, så som balkonger etc. och skuggas inte på något sett av intilliggande byggnader, träd eller topografi. Anledningen därtill är för att undvika ofrivilliga solavskärmningsfenomen som bedöms försvåra analysen och ge olyckligt stort genomslag på resultaten. Flera av de reglerstrategier som analyserades i detta arbete tar tillvara lagrad solvärme. Därmed vore det olyckligt att i denna studie så drastiskt beskära solvärmestillskott, även om flera balkongförsedda byggnader i verkligheten naturligtvis utrustats med väderprognosstyrning.

Eftersom licentiatarbetet i sin helhet avser studera olika reglerstrategiers inverkan på byggnadens värmeenergianvändning är egentligen endast uppvärmningssäsongen av intresse. MEBY-projektets kartläggning av persiennanvändning innefattar förvisso uppgifter för såväl

vinterhalvåret som sommarhalvåret, men för att underlätta analysarbetet av den termiska komforten och för att undvika överföringsfenomen mellan vinter- och sommarvanor antas här att personerna i referensbyggnaden använder sina persienner i samma omfattning året om och då som vid vinterfallet. I brist på tidsstudieunderlag över användning av persienner antas att användningen är konstant över dygnet. I verkligheten kanske persiennerna dras upp mulna dagar eller kvällar, men det är egalt ur ett solperspektiv eftersom solvärme då ändå inte tillförs.

Om statistiken från MEBY-projektet anpassas till referensbyggnaden fås indata enligt Tabell 6.5 nedan beträffande förekomst och användande av persienner i förhållande till väderstreck.

Tabell 6.5 Användning av persienner i referensbyggnaden i relation till väderstreck.

Antal vardagsrumsfönster där...	Vardagsrumsfönster i olika väderstreck			
	Norr	Öst	Syd	Väst
..persienner saknas eller är helt uppdragna	18 st	7 st	9 st	8 st
..persienner är helt nerdragna men uppvinklade	0 st	10 st	7 st	9 st
..persienner är helt nerdragna och stängda	0 st	1 st	2 st	1 st

Som ett exempel för sydfasader skall Tabell 6.5 ovan uttolkas som: Om vardagsrumsfönstren ligger utmed en sydfasad så har nio av dessa uppdragna eller inga persienner alls, sju har nerdragna persienner med uppvinklade lameller medan två har helt stängda persienner.

6.4 Luftläckage

Fråga en godtycklig energiberäkningskonsult om vilket moment/indata han eller hon anser vara det mest osäkra i förhållande till dess bedömda inverkan på byggnadens värmeanvändning, och det är stor sannolikhet att du får "luftläckaget" till svar. Förutom att luftläckage, eller infiltration som det ofta också kallas, byggnadsfysikaliskt sett är ett ganska komplext moment så är det dessutom svårt att verifiera resultaten efteråt med verkliga värmemätningar. Vi kan alla förstå att luftläckage orsakar värmeförluster. Men hur det egentligen hänger ihop med inne- och utetemperatur, vindriktning, vindhastighet, höjd på byggnad mm. är mer komplext och alltså svårt att verifiera eftersom det kan vara svårt att i annat än laboratoriemiljö isolera och därefter kvantifiera en enskild faktor, exempelvis vindhastighet.

Icke desto mindre måste man vid energiberäkningar hantera luftläckagefrågan, hur otillfredsställande den än ter sig.

I Sverige infördes lufttätetskrav för nybyggnation först 1977 i och med ikraftträdandet av ett supplement till svensk byggnorm 1975, SBN 75. Innan dess fanns inga explicita krav på lufttätet för nybyggnation, inte mer än att det i byggnormen från 1967, BABS 67 angavs att

vissa byggnadsdelar skulle vara så lufttäta att dess funktion och beständighet inte skulle äventyras [Mattsson, 2004]. I supplementet till SBN 75 angavs olika lufttätetskrav per kvadratmeter area byggnadsdel mot fria luften ($\text{m}^3/\text{h m}^2$), dvs. klimatskalet utan grundkonstruktion. Kraven var olika beroende på vilken byggnadsdel som avsågs, exempelvis skulle tak vara dubbelt så täta som väggar och betydligt tätare än fönster och dörrar. Kravnivåerna gällde vid provtryckning med ett differenstryck på 50 Pa. När dessa krav ställdes fanns ingen kunskap om hur täta eller otäta byggnader i Sverige var. Det visade sig dock omgående vid provmätningar att inga byggnader ens kom i närheten av kraven, utan samtliga provade byggnader var betydligt otätare [Mattsson 2004]. Som en parentes kan nämnas att kraven i supplementet till SBN 75 faktiskt var betydligt tuffare än dagens krav för passivhus, som allmänt anses vara mycket täta.

Krav och definitioner för luftläckage varierade därefter i efterföljande byggregler: *Svensk Byggnorm 1980*, *Nybyggnadsregler* (1989) och *Boverkets Byggregler BBR 94*. I den senare av de tre angavs kravet på lufttätet till 0,8 liter per kvadratmeter omslutningsarea och sekund (l/sm^2) vid 50 Pa tryckskillnad. Med omslutningsarea avsågs då även grundkonstruktionen.

Dagens byggnadsregler, från 2006 och framåt, ställer inga uttryckliga krav på lufttätet. Dock kan man säga att kravet på energiprestanda förutsätter ett relativt lufttätt klimatskal eftersom dagens byggteknik med välisolerade klimatskal måste vara täta för att undvika kondensproblem på kalla ytor längre ut i klimatskalet (mot utomhus).

Även om det under framförallt 80-talet gjordes en hel del lufttätetsprovningar runt om i landet för att verifiera byggnaders verkliga luftläckage, finns tyvärr inte många täthetsprovningar utförda på flerbostadshus, särskilt inte för hela byggnader. Anledningen därtill beror sannolikt på att sådana mätningar tar lång tid att utföra, kräver tillgång till byggnadens alla lägenheter och fordrar mycket stor flätkapacitet. Faktorer som naturligtvis kan vara kostsamma.

Inför en teknikupphandling 2011 [Mjörnell 2011] i regi av BeBo (Energimyndighetens beställargrupp för energieffektiva bostäder) täthetsprovades dock totalt femton enskilda lägenheter i sammanlagt sex flerbostadshus byggda under perioden 1965-1975. Resultaten från den rapporten visade mycket stor skillnad mellan olika lägenheter. Lägenheter i ytterkant av en byggnad, som exempelvis gavellägenheter eller lägenheter på markplan, uppvisade generellt sett större luftläckage än mer centralt placerade lägenheter. Även skillnaden mellan olika byggnader visade sig vara stor. Sett över alla de uppmätta lägenheterna var det genomsnittliga läckaget ca $0,66 \text{ l/sm}^2$ "kallarea" vid differenstrycket 50 Pa. Här bör man dock notera att nästan samtliga lägenheter i undersökningen var placerade på antingen markplan, översta våning eller vid en gavel. Sådana lägenheter har naturligtvis en betydligt större kallarea än motsvarande lägenheter på mittplan, dock var antalet fönster, balkonger etc. för lägenheterna i studien oftast det samma oavsett placering. Eftersom en stor del av luftläckage från lägenheter sker just vid balkongutfackningar, altandörrar och fönster så kan man anta att mittenvåningarnas lägenheter med sin begränsade kallarea, men lika många fönster etc., sannolikt skulle uppvisat ett något större läckageflöde per kallarea än mer perifert placerade

dito om de testats. Följaktligen skulle ett representativt läckageflöde för miljonprogrammets flerbostadshus sannolikt vara något större än de 0,66 l/sm² som BeBo studien visade, men den skillnaden antas vara försumbar för referensbyggnaden eftersom mittenlägenheterna (som saknar golv eller tak mot kall yta) är i minoritet (4 av 18 lägenheter).

6.4.1 Tilluftdon och spaltventiler

Vid provtryckning av fastigheter tätas all till- och frånluft (inkl. tilluftdon och spaltventiler), detta för att få ett mått på byggnadens *ofrivilliga* ventilation. Luft som tillförs byggnaden genom tilluftdon eller spaltventiler inkluderas alltså inte i den ofrivilliga ventilationen, även om den till sin natur är oreglerad. Eftersom frånluftventilerade flerbostadshus normalt sett har antingen tilluftdon i fasad eller spaltventiler i fönster, så måste också projektets referensbyggnad kunna hantera ett sådant tilluftflöde.

I ekv. 6.1 ges ett mått på ekvivalent läckagearea, även kallad effektiv läckagearea [ASHRAE 2009]. Med kunskap om läckagearean kan luftflödet via tilluftdon och spaltventiler beräknas.

$$A_L = 10\,000 \cdot \dot{V} \cdot \frac{\sqrt{\rho/(2 \cdot \Delta P)}}{n} \quad [\text{cm}^2] \quad (\text{ekv 6.1})$$

$\dot{V}$	läckageluftflöde	[m ³ /s]
ΔP :	tryckdifferens, ute – inne	[Pa]
ρ :	luftens densitet	[kg/m ³]
n :	tryckexponent (0,5 – 1,0)	[-]

Storleken på tryckexponenten, n , beror på om luftflödet över läckaget är turbulent eller laminär. Vid fullt turbulent strömning ges tryckexponenten värdet 0,5 medan den ges värdet 1,0 vid laminär strömning.

I ritningar över ett relativt typisk miljonprogramshus från 70-talet [Göteborgs stad 1968] framgår att genomgångslägenheterna där hade två fönsterplacerade spaltventiler vardera. Antas att varje spaltventil är 200x7 mm, vilket förmodas vara ett vanligt mått fås att byggnadens totala ”frivillig läckagearea” motsvarar ca 500 cm². Antas vidare att luftläckagflödet är nästintill enbart turbulent så kan tryckexponenten ansättas till 0,6. Med värden på luftläckagearea och tryckexponenten kan det frivilliga luftläckaget nu beräknas till motsvarande 0,14 l/(sm²) omslutningsarea vid differenstrycket 50 Pa.

I IDA kan man förvisso lägga in lokala luftläckageareor direkt i respektive lägenhet. Men för att snabba på beräkningsförloppet och underlätta simuleringsarbetet inkluderas luftflödet som tillförs genom spaltventiler i det totala luftläckageflödet.

Referensbyggnaden får därför ett totalt luftläckageflöde på 0,66 + 0,14 = 0,8 l/(sm²) vid differenstrycket 50 Pa, vilket alltså precis motsvarar de sista byggreglerna med uttalade krav på lufttäthet (innan 2006).

6.4.2 Luftläckagemodeller i IDA

I framförallt byggnader med självdragsventilation eller balanserad ventilation med mekanisk till- och frånluft har luftläckaget ofta ganska stor inverkan på byggnaders värmeenergianvändning, åtminstone i förhållande till osäkerheten i indata vid energiberäkningar.

Luftläckage beräknas och hanteras olika beroende på val av simuleringsprogram. I IDA ICE kan byggnadens luftläckage antingen modelleras som en funktion av bl.a. vindhastighet, höjd över marken, intilliggande terräng med mera, eller så anges ett fast värde. Det första alternativet är naturligtvis det mest komplicerade, men kan också vara det mest korrekta av de två, förutsatt att indata håller tillräckligt hög nivå. Man kan välja att hantera luftläckage på byggnadsnivå respektive zonnivå, här kallat lägenhetsnivå eftersom varje lägenhet i referenshuset modelleras som en zon. Byggnadsnivån är dominant gentemot lägenhetsnivån, dvs. det som anges i byggnadsnivån gäller för hela byggnaden.

- Byggnadsnivå Alt 1. Vinddrivna läckageflöden (t.ex. oms/h vid X Pa)
Beror bl.a. på ytterväggarnas täthet, läckageareor, vindtryck och termiska drivkrafter. Detta alternativ används om inget annat anges.
- Alt 2. Fasta läckageflöden (t.ex. oms/h)
Läckageflöde anges. Gäller alltid, oavsett övriga faktorer.
- Rumsnivå Luftläckage genom läckagearea + ev. extra fast luftläckage ($m^2 + t.ex. oms/h$)
Läckagearean beräknas enligt ekv 6.1. Fast läckageflöde kan läggas till.

Om användaren väljer att hantera luftläckagemomentet på byggnadsnivån enligt Alternativ 1 så överförs värden därifrån automatiskt till rumsnivån. På byggnadsnivån anges luftläckageflöde exempelvis i form av luftomsättningsvolym per timma eller som luftflöde per kvadratmeter omslutningsarea. Läckageflödet på byggnadsnivån anges för ett valbart referenstryck, typiskt 50 Pa.

När luftläckaget angetts på byggnadsnivån skapas automatiskt läckageareor på ytterväggarna i rumsnivån och vad som stått där tidigare skrivs då automatiskt över. Summan av alla läckageareor görs därefter automatiskt om till en enda tryck- och flödespunkt per fasad på en fördefinierad höjd över marken. Att på detta vis välja en global hantering av luftläckage är smidigt eftersom användaren då slipper gå in i respektive rumsnivå för att ange indata. Användaren kan dock ändra det överordnade och automatiskt fördela luftläckaget i enskilda rum genom att själv ange en luftläckagearea för respektive rum, dock endast med referenstrycket 4 Pa.

I vissa fall kan det vara värt att reducera luftläckaget på rumsnivå till ett minimum för att istället ersätta det med egna läckageareor som placeras godtyckligt på ytterväggarna. Detta kan vara ett bra sätt att hantera exempelvis vädringsfönster, spaltventiler i fönster eller äldre tiders ventilationsluckor mm, förutsatt att de är öppna.

IDA beräknar luftläckageflödet enligt ASHRAE [ASHRAE 2009], där basen är den s.k. *effektlagen (the power law equation)*, se nedan, som bl.a. finns beskriven i en ISO standard [ISO 2006].

$$\dot{V} = c \cdot (\Delta P)^n \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (\text{ekv 6.2})$$

$$c: \quad \text{flödeskonstant} \quad [\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{Pa}^n)]$$

Vid frånluftventilation (som referensbyggnaden har) är infiltrationens inverkan på byggnadens energiprestanda lågt så länge det totala vinddrivna infiltrationsflödet genom klimatskal och eventuella spaltventiler med mera är lägre än det mekaniska frånluftflödet, eftersom det sistnämnda inte påverkas av tryckförändringar i IDA ICE modellen.

Detta innebär att så länge det totala infiltrationsflödet är lägre än frånluftflödet så går infiltrationsluft in genom klimatskalet på klimatskalets lovartsidan men inte ut genom dess läsida.

Infiltrationens begränsade inverkan på frånluftventilerade byggnaders energiprestanda stöds av publicerad litteratur i ämnet [Warfvinge et al 2008], [Svensson 1984] och [Svensson et al 1985] och i artikeln ” Infiltration simulation in a detached house – empirical model validation” [Jokisalo et al 2007] redovisas en jämförelse mellan mätningar och beräkningar med IDA ICE av tryckförhållandet i ett enfamiljshus. Resultatet visar på en god överensstämmelse.

7 Metoder för värmereglering

Idag finns ett antal mer eller mindre vanligt förekommande metoder för reglering av värmesystem både centralt i byggnader och lokalt i rum, oftast i en kombination.

I detta arbete studeras och simuleras tre olika grundprinciper för värmereglering, grundprinciper som här kallas för ”traditionellt”, ”återkopplat” och ”modellbaserat”. Dessa består i sin tur av ett antal varianter, dock med vardera gemensamma grundförutsättningar. Därutöver simuleras också ett teoretisk perfekt system, ett system som bara kan återskapas i ett simuleringsprogram. Det perfekta systemet används för att ange en borte gräns för vad som är teoretiskt möjligt att uppnå utifrån givna förutsättningar.

”Traditionellt”

I Kapitel 7.1 redogörs för den allra vanligaste reglerstrategin, den som i denna skrift kallas för ”traditionellt” vilket här avser ett samlingsnamn för reglersystem där framledningskurvan statistiskt styrs centralt av endast utomhustemperatur. Redan i Kapitel 4.2.2 beskrevs grunderna för denna reglerstrategi som ofta benämns framkoppling.

”Återkopplat”

Med återkopplad värmereglering, som i grunden bygger på principen för framkoppling, avses en reglering där hänsyn tas till aktuellt inomhusklimat med hjälp av exempelvis temperaturgivare. Denna reglerstrategi redogjordes allmänt för redan i Kapitel 4.2.3 men specificeras mer i Kapitel 7.2. Trots att styrprincipen är relativt enkel och sedan länge tillämpats i byggnader är den inte alls lika vanligt förekommande som den traditionella styrprincipen ovan. Det är dock författarens bedömning att denna, eller liknande återkopplande och behovsanpassade regleringar kan komma att bli allt vanligare i framtiden, sannolikt alltid tillsammans med termostatventiler.

En ytterlighet inom grundprincipen med återkoppling vore att enbart styra framledningskurvan efter aktuell inomhustemperatur. Det finns faktiskt byggnader i Sverige som regleras på det viset, det är dock mycket ovanligt och tas därför inte upp vidare här.

”Modellbaserat”

Kapitel 7.3 handlar om system med modellbaserad styrning. Med epitet avses en behovsstyrd central värmereglering baserad på värmebalanser som beräknas i något beräkningsverktyg för en teoretisk modell av den aktuella byggnaden. Väderprognosstyrning är en variant av detta och kan därför här helt enkelt kallas *modellbaserad styrning med prognos*.

I Tabell 7.1 visas en sammanställning över de olika reglerstrategier som här behandlas.

Tabell 7.1 Reglerstrategier som behandlas i detta projekt.

Traditionellt	Fall 1A	Utan termostatventiler	Kap 7.1.1
	Fall 1B	Normalfungerande termostatventiler	Kap 7.1.2
	Fall 1C	Perfekt fungerande termostatventiler	Kap 7.1.3
Återkopplat	Fall 2A	Rumsgivare (P-reglering)	Kap 7.2.1
	Fall 2B	Rumsgivare (PI-reglering)	Kap 7.2.2
Modellbaserat	Fall 3A	Modellbaserad framledningstemperatur	Kap 7.3.1
	Fall 3B	Modellbaserad framledningstemp. med prognos	Kap 7.3.3
Perfekt	Fall 4	Teoretiskt optimal värmeförsörjning	Kap 7.4

Syftet med att studera och simulera flera olika reglerstrategier är att undersöka huruvida tesen i Kapitel 3 stämmer. Enligt den förbättras energiprestandan ju fler reglerparametrar som beaktas, förutsatt att de beaktas på ett bra sätt, även om i själva verket *vilka* reglerparametrar som beaktas och *hur*, är viktigare än antalet.

Huruvida hypotesen stämmer eller ej och om modellbaserat är bättre än återkopplat (som ju båda är behovsstyrda reglerstrategier) får sina svar i Kapitel 9. Här kan väl dock kommenteras att den återkopplade strategin förvisso regleras av bara två parametrar, ute- och rumstemperatur och borde enligt tesen därmed kanske vara den mindre energieffektiva strategin av de två grundprinciperna. Dock är inomhustemperaturen resultatet av byggnadens totala värmebalans. Därmed är även den återkopplade reglerstrategin en komplex och dynamisk metod i all sin teoretiska enkelhet.

En sak är i alla fall säker, Fall 4 (optimal) kommer alltid resultera i allra bäst energiprestanda, men skall ses som en teoretiskt optimal referens, inte som ett reellt alternativ.

Simuleringsprogrammet möjliggör i sin ursprungliga form analys av värmesystemen i kategorin "Traditionell" respektive "Perfekt", utan att nya beräkningskomponenter behöver skapas och implementeras. Kategorierna "Återkopplat" och "Modellbaserat" kräver dock beräkningskomponenter som inte finns i IDA ICE från början. I Kapitel 8 redogörs bl.a. kortfattat för grunderna för framtagning av de skapade beräkningskomponenterna, baserat på Kapitel 7.2 - 7.3 och tidigare.

Innan beskrivningen av de olika reglerstrategierna tar sin början kan det vara på sin plats att med några få ord påminna och lägga till något om begreppet framledningskurva från Kapitel 4.

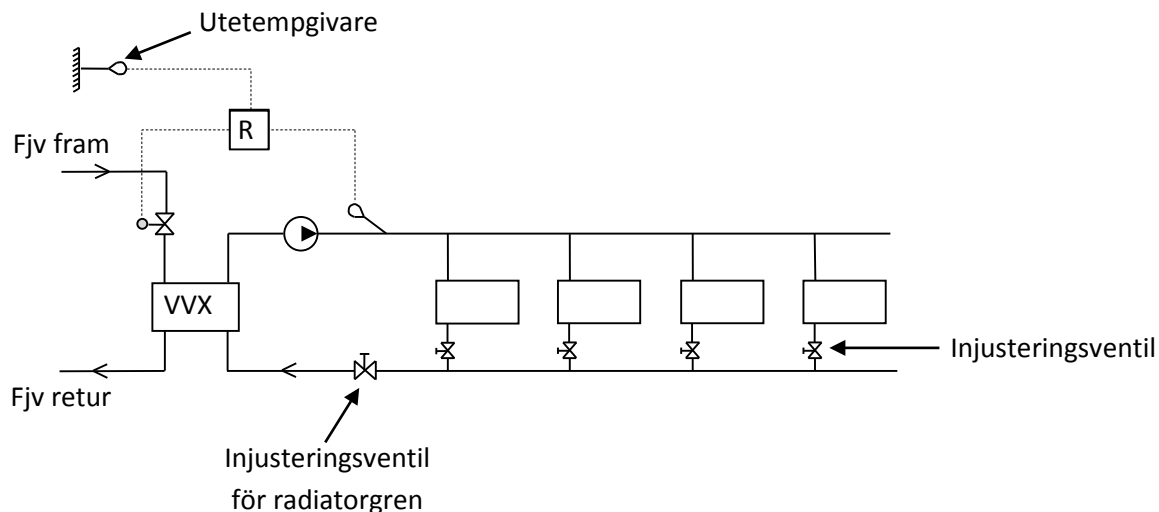
Generellt sett gäller att framledningskurvan ställs så att önskad temperatur fås inomhus oavsett utomhustemperatur [Kärkkäinen 2010]. Dock anpassas den normalt sett varken till byggnadens tröghet eller till värmesystemets tröghet [Jensen 2009]. Framledningskurvan är, som namnet antyder, böjd till sin karaktär. Enkelt kan sägas att kurvans grund- eller huvudform här används för framtagning av framledningstemperatur i Fall 1, Fall 2 och Fall 4 även om vi snart skall se att den centrala grundregleringen för Fall 4 är oväsentlig så länge bara framledningstemperaturen är tillräckligt hög. Men för Fall 3 som har sin grund i värmebalanser beräknas istället en lämplig framledningstemperatur för varje tidssteg. Mer om detta senare.

7.1 Traditionellt

Enligt Boverkets genomlysning (BETSI) av det svenska fastighetsbeståndet får några år sedan, styrs ca 90-95 % [Boverket 2010 b] av alla flerbostadshus från miljonprogrammets dagar lokalt med termostatventiler. Studien anger tyvärr inte hur stor andel av de besiktigade byggnaderna som har central reglering på annat än ”traditionellt” vis, med mer behovsanpassad framledning så som exempelvis väderprognosstyrning eller återkoppling. Det råder dock ingen tvekan om att den absoluta merparten fortfarande styrs enligt den ”traditionella” principen. Att den principen än i dag är så dominerande beror sannolikt till största delen på en kombination av tradition, enkelhet och lågt pris.

7.1.1 Fall 1A – Helt utan termostatventiler

Här avses ett äldre system helt utan termostatventiler, alternativt ett system med termostatventiler helt ur funktion. Alltså en typ av system som återfinns bland de 5-10 % av flerbostadshusstocken från miljonprogrammet, som enligt Boverkets studie från 2010 saknade termostatventiler. (Andelen byggnader där termostatventiler plockats bort alternativt är ur helt funktion är dock sannolikt högre eftersom de som besiktigade husen i samband med BETSI-undersökningen inte detaljstuderade termostatventilernas funktion.)



Figur 7.1 Radiatordelen av ett vätskeburet värmesystem enligt Fall 1A. För att förtydliga och renodla principskissen ritas här bara en enda så kallad radiatorgren.

System som Fall 1A blir väldigt beroende av den förutbestämda framledningskurvan, risken är då överhängande att rumstemperaturen i byggnader med sådana system pendlar mycket. Förutom en uppenbar risk för klagomål från boende är det också sannolikt med övertemperaturer som vädras ut, vilket naturligtvis är negativt för byggnadens energiprestanda. Generellt sätt är systemet således varken idealiskt för rumstemperaturen eller för energiekonomin.

7.1.2 Fall 1B – Normalfungerande termostatventiler

Värmesystemet i Fall 1B regleras lokalt av normalfungerande termostatventiler. Med det sistnämnda menas termostatventiler med en funktion som motsvarar vad man idag kan förväntas finna i ett genomsnittligt flerbostadshus från miljonprogrammet. Eftersom det i Kapitel 4 visade sig saknas en samlad bild av befintliga termostatventilers faktiska funktion efter en tid i drift, måste först en sådan funktion definieras och tas fram.

Först konstateras att det numera inte görs några långtidstester av radiatortermostatventiler i Sverige. Den undersökning som kunnat hittas är från 1989 då Bygghälsökningsrådet finansierade en studie med fältundersökningar och laborietester [Johansson et al 1989]. Slutsatsen där blev att det är väldigt svårt att säga något om hur termostatventiler förändras med tiden. Vissa tycks inte påverkas nämnvärt av tidens tand, medan andra tappar sin funktion helt. Man konstaterar dock att termostatventiler äldre än 10 år med ganska stor sannolikhet inte fungerar tillfredsställande. De fel man då framförallt hittade var:

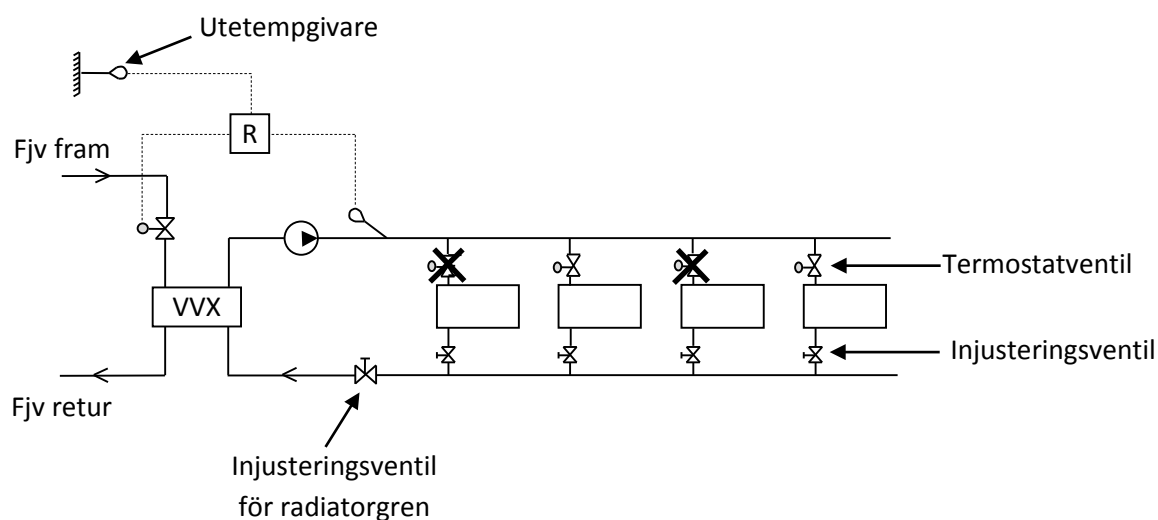
- Fastnade ventilspindlar, vilket gör att reglerfunktionen upphör.
- Ökad hysteres med tiden, dvs. större och större temperaturförändringar krävs för att ventilkägla skall börja röra sig. Orsak till detta kan exempelvis vara att smörjmedlet reducerats med tiden eller förändringar i känselkroppen [Peterson, Werner 2003].
- Reglerområdesförskjutningar, vilket innebär att rumstemperaturen successivt ökar med tiden även om ventiltvredet inte förändras.

Som ytterligare indicium på att även termostatventilers liv är ändliga anges i en svensk standard om byggnaders energiprestanda och ekonomisk utvärdering, att hållbarheten för termostatventiler bör ansättas till 15 år, då ekonomiska investeringskalkyler görs [Svensk standard 2007 a].

Som en konsekvens av detta och i enlighet med Kapitel 4.2.2 tidigare dras här slutsatsen att värmesystemens lokala reglering i så många fall underpresterar att normalfallet bedöms vara underpresterande. Det är dock inte rimligt att tro att det är helt ur funktion eller fungerar allt genom dåligt. Särdeles dåliga system skulle de boende reagera på och få åtgärdade. Ett mellanting mellan perfekt funktion och ingen funktion alls ligger därmed nära till hands att ta till.

Hur återskapar man då ett normalfungerande värmesystem i ett teoretiskt beräkningsprogram där alla processer är logiska och perfekta? Här antas helt sonika att en genomsnittlig inverkan av trasiga, bristfälliga och ibland helt borttagna termostatventiler bäst återspeglas om hälften av termostatventilerna i beräkningsmodellen sätts helt ur spel och hälften tillåts fungera perfekt med ett P-band på 2 °C. Verkliga byggnaders ibland bristfälliga injustering, med olika rumstemperaturer som följd, kommer därmed efterliknas i detta arbete genom att termostatventilernas status och funktion gäller hela lägenheter. Det innebär att i varannan lägenhet fungerar termostatventilerna inte alls och i varannan fungerar de perfekt.

Följaktligen kan den valda strategin som principskiss visas enligt Figur 7.2 nedan.

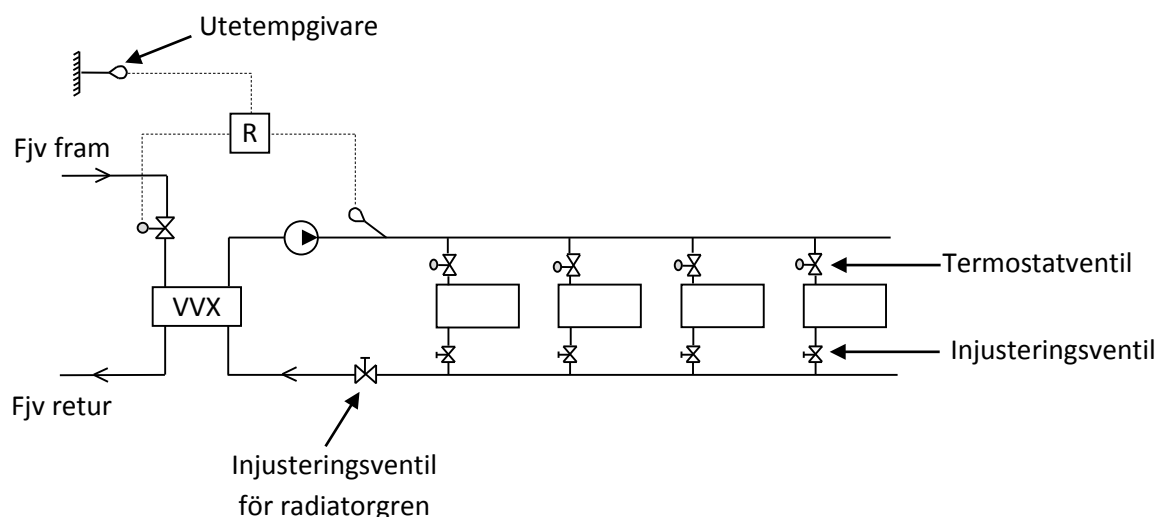


Figur 7.2 Radiatordelen av ett vätskeburet värmesystem enligt Fall 1B. Varannan termostatventil är satt ur funktion.

Eftersom detta system sannolikt är det mest representativa under grundprincipen "Traditionellt" och för den svenska flerbostadshusstocken som helhet, är det först och främst mot detta som övriga system kommer jämföras. Likaså är det detta system som fått utgöra basen vid framtagning av referensbyggnaden vid jämförelse med nationell energistatistik, mer om det i inledningen av Kapitel 8.

7.1.3 Fall 1C – Perfekt fungerande termostatventiler

Detta system har samma uppbyggnad som Fall 1B, med undantag för att samtliga termostatventiler här fungerar. Den fina lokala regleringen i Fall 1C innebär bättre och jämnare inomhustemperatur och bättre energiprestanda än Fall 1B och skall närmast ses som ett referensfall för hur bra det kan bli med fungerande termostatventiler ($P\text{-band} = 2\text{ }^{\circ}\text{C}$).



Figur 7.3 Radiatordelen av ett vätskeburet värmesystem enligt Fall 1C. Samtliga termostatventiler fungerar perfekt.

7.2 Återkopplat

Som nämndes i Kapitel 4 används återkopplade system sedan en tid tillbaka i vissa byggnader, normalt sett i kombination med lokal reglering i form av termostatventiler. Principen är enkel: en rumsgivare registrerar aktuell rumstemperatur, vilken ligger till grund för justering av framledningskurvan. Ju större skillnad mellan rummets uppmätta temperatur och börvärdet, ju större korrigering av framledningskurvan. Enligt tidigare resulterar en liten reglersignal som svar på ett fel i ett stabilt men långsamt system. En stor reglersignal resulterar i ett snabbt system som dock riskerar vara instabilt [Gruber, 2012].

Justeringen av framledningstemperaturen kan exempelvis baseras på P-reglering eller på PI-reglering, se Kapitel 4.2.3. I detta arbete undersöks både ett P-reglerat och ett PI-reglerat system.

De återkopplade reglerstrategierna simuleras med normalfungerande termostatventiler då inget annat anges.

7.2.1 Fall 2A – Rumsgivare med P-reglering

Här väljs en enda rumstemperaturgivare, placerad centralt i frånluften, i enlighet med resonemanget i Kapitel 4.2.3. Det innebär att framledningskurvan korrigeras med avseende på lägenheternas sammanlagda medeltemperatur. I jämförelse med verkliga byggnader blir detta

något idealt eftersom man i simuleringarna undviker problematik med avkylning (luftkanaler på kalla vindar etc.) och tillfälliga temperaturhöjningar i samband med matlagning, dusch etc. IDA ICE har dessutom en gemensam rumstemperatur för hela rummet, ingen temperaturskiktning eller liknande alltså, vilket enligt tidigare är att likställa med väl omblandad rumsluft.

IDA ICE har inte återkoppling som någon standardlösning. Dock är det programmeringstekniskt relativt enkelt att skapa en styrmodul för detta och det matematiska uttrycket är även det enkelt:

$$t_{fram,korr} = t_{fram} - \Delta t_i \cdot k \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{ekv 7.1})$$

$t_{fram,korr}$: korrigerad framledningstemperatur med avseende på rumstemperatur [$^{\circ}\text{C}$]

t_{fram} : framledningstemperatur enbart med avseende på utomhustemperatur [$^{\circ}\text{C}$]

Δt_i : $t_{rum} - t_{bör}$, dvs. skillnaden mellan rummets aktuella temperatur och dess förutbestämda börvärde [$^{\circ}\text{C}$]

k : korrektionsfaktor [-]

Så, för varje grad som skiljer mellan rummets temperatur och dess förutbestämda börtemperatur ökar eller minskar framledningstemperaturen med faktorn k .

För att ge en bild av i vilken utsträckning rumstemperaturen påverkas av en förändrad framledningstemperatur, konsulteras en licentiatuppsats från Chalmers [Trüschel 1999]. Enligt den förändras inomhustemperaturen 1°C om framledningstemperaturen förändras 2°C . Men i den finska avhandlingen [Kärkkäinen 2010] som tidigare omnämnts, uppges att allmänna riktlinjer i Finland snarare anger 4°C förändrad framledningstemperatur per Celsius-grad förändrad inomhustemperatur.

Utan någon omfattande optimeringsstudie på återkopplade system, tycks praxis i Sverige för förstärkningsfaktorn k , ligga på i storleksordningen 5, varför det värdet används även här.

7.2.2 Fall 2B – Rumsgivare med PI-reglering

Till det yttre är denna reglerstrategi lik den i Fall 2A. Skillnaden består i hur själva framledningstemperaturen korrigeras. Här används ingen algoritm i stil med ekv 7.1, istället regleras framledningstemperaturen av en PI-regulator där ett litet reglerfel under kort tid ger en liten utsignal och vice versa. Signalen från I-blocket adderas till signalen från P-blocket.

Förutom att ange korrektionsfaktor för PI-regulatorn anges här även så kallad I-tid, vilket är ett mått på hur lång tid det tar för den I-reglerade signalen att öka lika mycket som utsignalen från P-blocket.

Om I-delen i PI-regulatorn stängs av genom att I-tiden sätts mycket lång, fås en proportionell reglering med samma funktion och resultat som Fall 2A.

Utsignalen från PI-regulatorn adderas eller subtraheras till/från den ”traditionella” framledningsskurvan. Om exempelvis värdet på utsignalen är - 3 °C och den okorrigerade framledningstemperaturen samtidigt är 50 °C, ja då blir den korrigerade framledningstemperaturen 47 °C. För att undvika instabilitet och oacceptabla rumstemperaturer begränsas utsignalen inom ett givet intervall (± 13) som togs fram genom simuleringsbaserade känslighetsanalyser för referensbyggnaden.

7.3 Modellbaserat

Med *modellbaserad framledningstemperatur* avses här en framledningstemperatur som ständigt anpassas efter aktuellt värmebehov utifrån värmebalanser. De två modellbaserade reglerstrategierna som tas fram i detta arbete (Fall 3A och 3B) styrs av alla de aspekter som IDA ICE beaktar i sin dynamiska värmebalans och de kan därmed i allra högsta grad kallas för behovsanpassade. Steget från värmebalans till framledningstemperaturen går via den finska avhandlingens [Kärkkäinen 2010] framledningsekvation (ekv 4.21) där det valda referenstillfället här är det tillfälle under året då byggnaden kräver störst värmeeffektbehov, vilket i detta fall är 17-18 februari för referensåret 1970 i Bromma.

I ekv 4.22 visades Kärkkäinens samband för s.k. relativt effektbehov, grundat på aktuella uppmätta temperaturer i förhållande till temperaturer för ett referenstillfälle. Sambandet är speciellt framtaget för praktiskt injusteringsarbete. Men som konstaterades redan i samband med den ekvationen kan det relativa effektbehovet istället tas fram på ett mer direkt sätt, i IDA ICE, genom att använda kontinuerliga ”mätvärden” för aktuellt effektbehov kontra ett relativt effektbehov för referenstillfället. Alltså helt utan temperaturnivåer. Den kvoten visades i ekv 4.23 och utvecklas strax ytterligare.

7.3.1 Fall 3A – Modellbaserad behovsstyrd framledningstemperatur

Innan vi går in på beskrivningar av systemet följer här först ett allmänt resonemang kring val av strategi/lösning för både Fall 3A och Fall 3B. De systemen måste här nämligen vara identiska med undantag för själva prognosstyrningsdelen. Detta för att kunna urskilja och kvantifiera den eventuella besparingen som uppnås genom att styra mot en prognos.

Resonemanget underlättas om vi avsnittsrubriken till trots först börjar lite kort med Fall 3B, alltså den modellbaserade strategin med prognos, eftersom den regleringen kan sägas ställa störst krav på själva reglerstrategin och dess utformning. Ett sätt att skapa en praktiskt användbar reglerstrategi baserad på kontinuerlig värmebalans vore att använda sig av algoritmer, som hela tiden skulle matas med uppgifter om väder (aktuellt och prognostiserat) och kanske internvärme, för bearbetning med hjälp av något avancerat automatiskt beräkningsverktyg. För att få till själva ”prognosdelen” med en sådan reglerstrategi behöver man i så fall ha kännedom om hur byggnaden reagerar på väderförutsättningar som ännu inte inträffat, samtidigt som den i realiteten naturligtvis bara kan utsättas för ett aktuellt väder. Exempelvis behöver man känna till hur stort solvärmestillskottet i byggnaden kommer bli innan det inträffat, kanske flera timmar innan soluppgång. Denna reglerstrategi kan vara såväl öppen som återkopplande och ställer högre krav på beräkningsverktyget och dess användning

ju större kraven är på noggrannhet och dynamik. Med öppen reglering avses här en reglering som inte direkt beaktar slutresultatet (rumstemperaturen) utan helt förlitar sig på att den framräknade framledningstemperaturen tillräckligt väl matchar byggnadens värmebehov, samt att den lokala regleringen kompenserar för eventuellt värmeöverskott. Detta är egentligen samma grundfilosofi som vid traditionell central reglerstrategi (utan återkoppling), dock med den stora skillnaden att byggnadens värmebehov här kontinuerligt beräknas för framtagning av lämplig framledningstemperatur. Utan detaljkunskaper om olika kommersiella prognosstyrningstjänsters tekniska funktion, kan man nog påstå att de systemen ungefär fungerar på detta vis, dock med det tillägget att flera av dem kompletteras med återkoppling av rumslufttemperaturen.

Ett annat sätt att hantera det hela, en annan reglerstrategi, är att göra en i någon mening mer simuleringsaktiv betraktelse med framkoppling baserad på IDA ICE. Denna så kallade modellbaserade framkoppling blir den valda reglerstrategin för denna licentiatuppsats och beskrivs här därför mer i detalj. *I korthet är den springande punkten att två identiska byggnader simuleras samtidigt.* Den enda skillnaden mellan de två är att den lokala värmeregleringen i ”kopian” (här efter kallad ”spegelbyggnaden”) är perfekt (vilket är lätt ordnat i IDA ICE) och samtliga lägenheter i den byggnaden får därför hela tiden eftersträvad rumstemperatur (20,0 C°) så länge värmesystemet levererar värme, undantaget när sol- och internvärme orsakar övertemperaturer som överstiger den lokala regleringens inverkan. Den lokala värmeregleringen i ”originalet” (referensbyggnaden) är dock bara normalfungerande, (dvs. halvbra) i syfte att förete funktionen i verklighetens byggnader enligt tidigare. ”Spegelbyggnaden” enda uppgift är att skapa underlag för beräkning av framledningstemperaturen till referensbyggnaden. ”Spegelbyggnaden” går därför hela tiden i bräsch och utsätts i Fall 3B (prognosfallet) för ett väder som referensbyggnaden ännu inte upplevt, medan de båda byggnaderna i Fall 3A utsätts för ett samtida väder, utan tidsförskjutningar.

Det eftersökta beräkningsunderlaget från ”spegelbyggnaden” är det relativa värmeeffektbehov (se ekv 4.23) som de perfekt reglerade radiatorerna i ”spegelbyggnaden” levererar. Med det känt kan en behovsanpassad framledningstemperatur till referensbyggnaden beräknas med hjälp av ekv 4.21. Kanske kan man uttrycka det som att den framtagna reglerstrategin är en ”modellbaserad styrning genom återspeglings”.

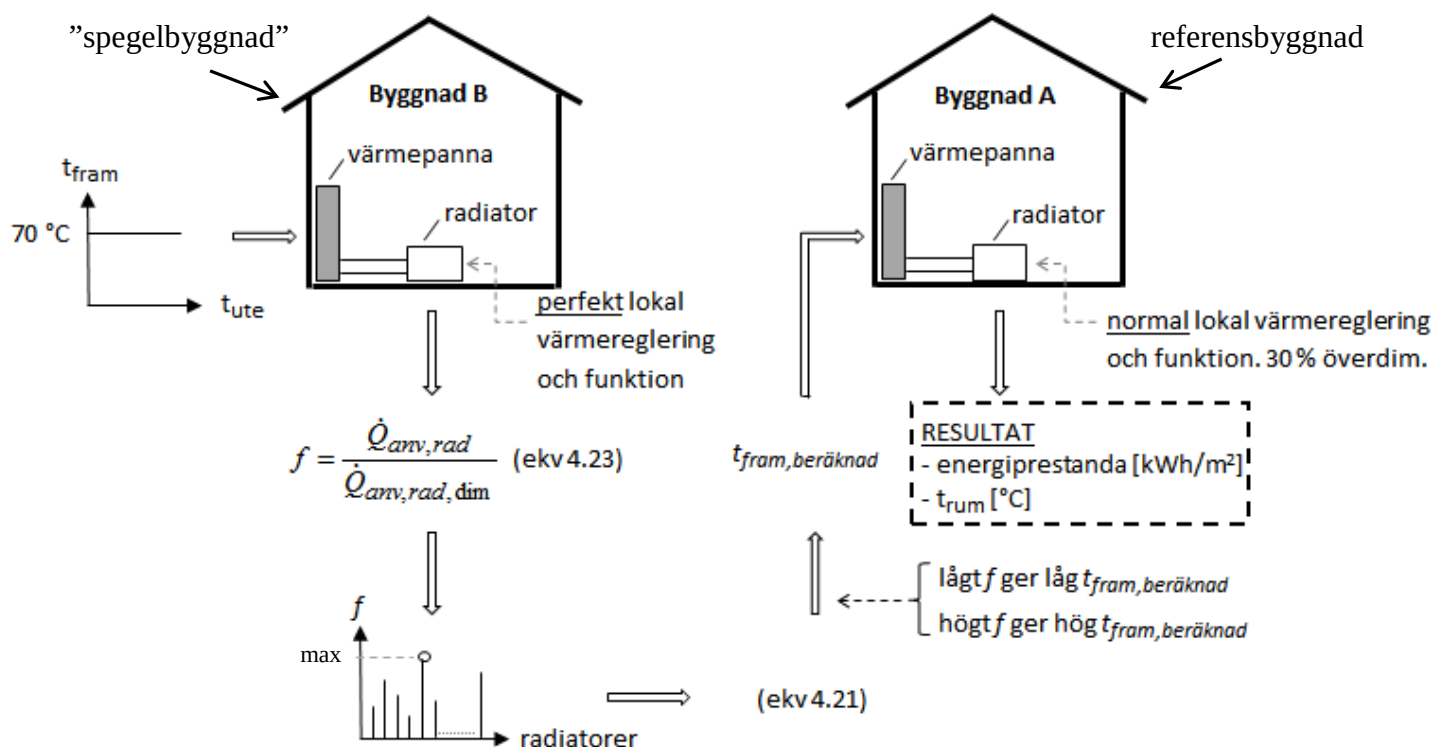


Figur 7.4 ”Modellbaserad styrning genom återspeglings” med två identiska byggnader. ”Spegelbyggnaden” styr värmeregleringen i referensbyggnaden. Översiktsbild av simuleringsmodellerna i IDA ICE.

Vid simuleringarna senare delas Fall 3A upp i två delstrategier: Fall 3A^I och Fall 3A^{II}.

I Fall 3A^I har de bägge byggnaderna exakt samma väder. Men i Fall 3A^{II} utsätts ”spegelbyggnaden” för ett modifierat väder. Tiden för de bägge klimaten är förvisso densamma även i Fall 3A^{II} men där ges möjlighet att förstärka/dämpa enskilda väderparametrar (temperatur, sol, vind) för förbättrad styrning, vilket illustreras i Figur 7.9 lite längre fram.

Med det teoretiska underlaget för beräkning av framledningstemperaturen redan känt sedan Kapitel 4 är syftet med vad som återstår av Kapitel 7.3 samt delar av Kapitel 8 att mer tydliggöra den valda reglerstrategin för Fall 3A och 3B. Här bedöms att figurer och principskisser är bästa sättet att förklara den framtagna reglerstrategin, framförallt genom Figur 7.5 även om naturligtvis också beskrivande text erfordras. Här kan det dock redan nu vara på sin plats att framhålla en möjlig framtida vidareutveckling och praktisk tillämpning av den framtagna reglerstrategin, eftersom den i licentiatarbetet endast är en teoretisk skapelse. Rent tekniskt torde reglerstrategin även kunna tillämpas på verkliga fall, med en simulerad byggnad (”spegelbyggnad”) kopplad till exempelvis en väderstation som genererar indata till en simulerad värmebalans som är beräkningsgrund till en verklig byggnad. Mer om en eventuell framtida verklig fallstudie senare i Kapitel 11.



Figur 7.5 Principskiss över ”modellbaserad styrning genom återspeglning”. Radiatorernas relativa effektbehov i ”spegelbyggnaden” ligger till grund för beräkningen av framledningstemperaturen i referensbyggnaden.

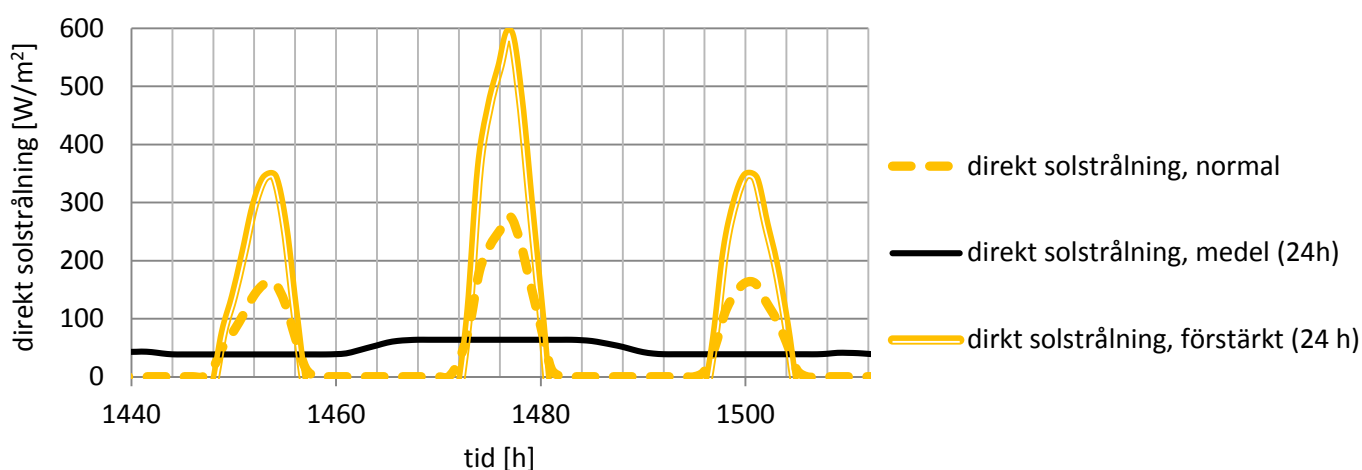
Enligt projektets referensgrupp ger åtminstone några av dagens kommersiella prognosstyrningskoncept utrymme för förstärkning av enskilda klimatparametrar. Prognoser för enskilda klimatparametrar kan då förstärkas eller dämpas så att värmesystemen regleras efter prognoser där exempelvis vindens hastighet överdrivs (ges större tyngd än de egentligen har). Utan hänvisningar här till vare sig litteratur eller förstudier, kan det åtminstone inte uteslutas att förstärkning och/eller dämpning i rätt kombination och proportion kan ha en positiv inverkan. Exempelvis skulle en förstärkning av solstrålningen kunna leda till sänkt framledningstemperatur vilket i sin tur skulle kunna medföra sänkt inomhustemperatur och förbättrad energiprestanda.

För att här studera huruvida den typen av förstärkning/dämpning av väderindata (sol, temperatur och vindhastighet) faktiskt kan ha positiv inverkan på rumstemperatur och värmeenergianvändning (mer behovsanpassad framledningstemperatur) eller ej, skapas förutsättningar för en sådan känslighetsanalys redan även här i Fall 3A^{II} där endast klimatdata i realtid beaktas.

Förstärkningen/dämpningen regleras av en förstärkningsfaktor (K) som multipliceras med skillnaden mellan aktuell klimatdata och ett glidande dygnsmedelvärde för det samma. Här exemplifierat med solstrålning.

$$sol_{förstärkt} = sol + (sol - sol_{medel}) \cdot K \quad [W/m^2] \quad (\text{ekv 7.2})$$

Medelsolstrålningen baseras på mätvärden från den senaste 24 h perioden.

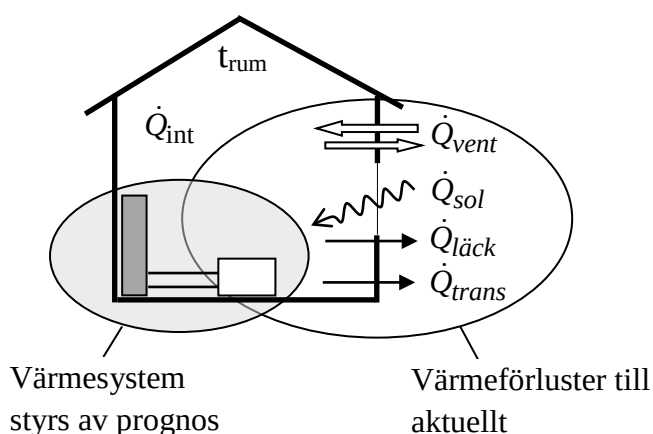


Figur 7.6 Exempel på förstärkt solstrålning (2 – 4 mars, Bromma), medelvärde för den samma (glidande medelvärde, 24 h) och en förstärkt solstrålning ($K = 1,5$). Förstärkning av väderparametrar är möjligt i Fall 3A^{II}.

Lämpliga förstärknings- eller dämpningsfaktorer (K) testas fram på månadsbasis, dvs. K är konstant för en månad. För att reducera antalet frihetsgrader ansätts att faktorn K för diffus solstrålning och direkt solstrålning är identiska.

7.3.2 Fall 3B – Prognostiserad framledningstemperatur

Generellt kan sägas att detta system är identiskt med Fall 3A till sin uppbyggnad och princip, med undantaget att framledningstemperaturen och därmed värmepannan indirekt (via värmebalans i ”spegelbyggnaden”) styrs av ett kommande väder istället för det aktuella vädret, gentemot vilket byggnaden å sin sida ständigt utkämpar en värmebalans. För radiatortorn uppstår då den något särpräglade situationen att den tilldelas centralt reglerat värmevatten som indirekt styrs av framtida väder, samtidigt som dess värmeavgivning är avhängt den aktuella situationen i rummet som bl.a. påverkas av pågående väder.



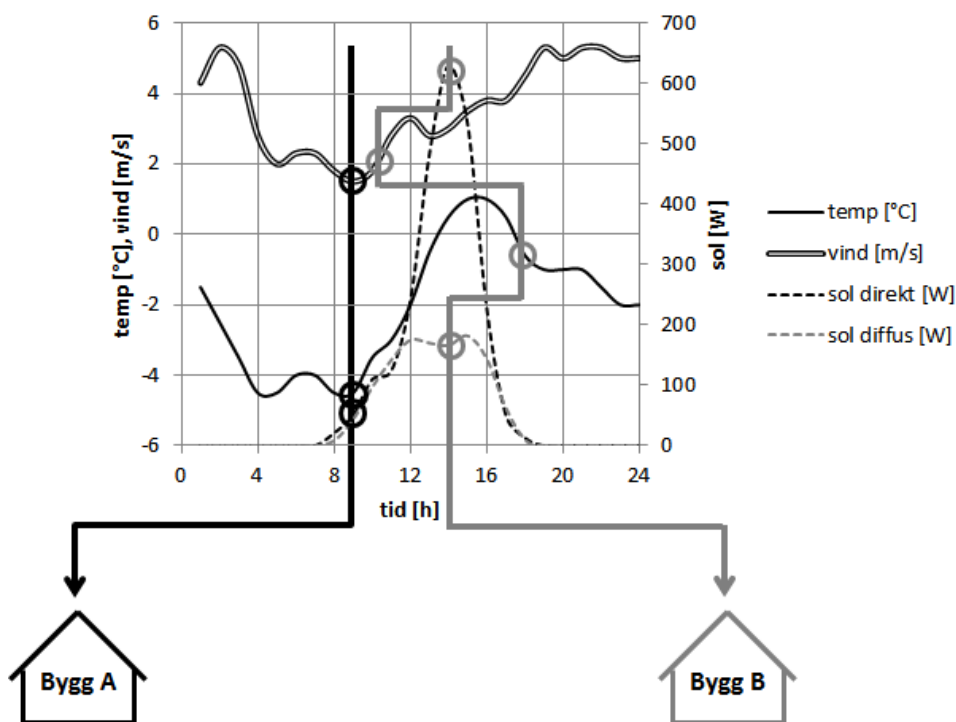
Figur 7.7 Byggnadens värmebalans vid reglering mot prognos

Om reglerstrategin för Fall 3A kunde beskrivas som ”modellbaserad styrning via återspeglning” så kanske Fall 3B kan rubriceras som ”modellbaserad styrning via återspeglning och prognos” där alltså värmebehovet för en fiktiv dubblettbyggnad (”spegelbyggnaden” i Figur 7.8) projiceras på den aktuella byggnaden (referensbyggnaden i Figur 7.8). Skillnaden mellan byggnaderna är att ”spegelbyggnaden” här utsätts för ett väder som ännu inte inträffat, ett väder där de olika väderparametrarna är förskjutna framåt i tiden jämfört med vad referensbyggnaden upplever. *Tiden* i de bägge byggnaderna är dock den samma, det är bara väderinformationen som förskjuts.

I Fall 3A levde alltså ”spegelbyggnaden” med samma väder som referensbyggnaden (även om vädret kunde förstärkas), men i Fall 3B med väderprognoser utsätts alltså ”spegelbyggnaden” för ett väder som oftast är några timmar framåt i tiden. Väderförskjutningens storlek varierar för att hitta den framledningstemperatur som resulterar i bästa värmeenergiprestanda för referensbyggnaden, utan att någon lägenhet någonsin får en inomhustemperatur som är lägre än 20,0 °C.

Figur 7.8 är ett försök att åskådliggöra det nämnda skeendet för fler väderparametrar än bara sol. Väderdata i exemplet hämtas från ett dygn av det valda klimatåret, närmare bestämt 1 mars 1977 i Stockholm - Bromma. Eftersom deltagare i projektets referensgrupp påpekat att väderparametrarna i flera av dagens koncept för prognosstyrning kan tilldelas *olika* lång framförhållning för att förbättra energiprestanda och/eller den termiska komforten, så används även här individuell tidsförskjutning för väderparametrarna lufttemperatur, solintensitet och

vindhastighet. När det gäller vindhastigheten visade sig dock snabbt att den inte påverkar energiprestandan eller komforten oavsett tidsförskjutning, vilket ju ligger i linje med vad som kunde konstateras i Kapitel 6.4.2. Själva optimeringsprocessen för de övriga parametrarna i Fall 3B beskrivs närmare i Kapitel 8, men principen är den att bästa månatliga kombination av olika tidsförskjutningar söks för de olika väderparametrarna. Optimeringsarbetet värderas utifrån inomhustemperatur och energiprestanda.



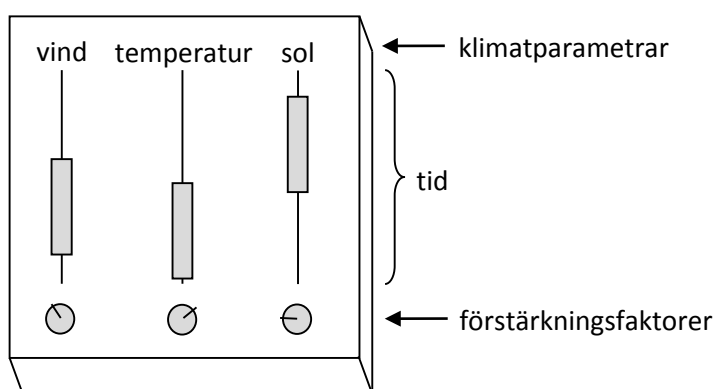
Figur 7.8 ”Modellbaserad styrning genom återspeglning med prognos”, där ”spegelbyggnaden” (Byggnad B) utsätts för ett tidsförskjutet väder som ännu inte inträffat. Exemplet är från 1 mars i Stockholm – Bromma, där vädret som påverkar referensbyggnaden är ca kl. 09.00 medan väderparametrarna för ”spegelbyggnaden” varierar: ca kl. 18.00 för lufttemperaturen, kl. 10.00 för vindhastigheten och kl. 14.00 för solintensiteten.

Utöver att tidsförskjuta väderparametrar kan de i Fall 3B även förstärkas/dämpas vilket dock ej framgår av den tvådimensionella grafen i Figur 7.8.

I den framtagna IDA-modellen för Fall 3 placeras alltså referensbyggnaden respektive ”spegelbyggnaden” i olika tider beroende på vald tidsförskjutning. Förutom att ”spegelbyggnaden” då går före in i en tid som ännu inte inträffat, så är klockslagen i respektive byggnad individualiserad för att de bägge byggnadsmodellerna skall få korrekta solvinklar för respektive klockslag, oavsett tidsförskjutning.

Optimeringsprocessen för att hitta bra kombinationer av tidsförskjutning och förstärkningsfaktorer handhas manuellt (närmare motivering därtill i Kapitel 8). Eftersom optimering kan därmed framstå som aningen förmätet, åtminstone om man förleds att tro att resultatet därmed är optimalt. Så är tyvärr inte fallet, faktum är dock att det visade sig krävas drygt 500 separata simuleringar med ofta mycket små individuella resultatskillnader. Så processen får nog ändå anses ganska väl genomarbetad med relativt optimala resultat.

Ett försök att illustrativt beskriva den sammanlagda problemställningen och tillvägagångssättet för optimeringsarbetet med månatlig individuell tidsförskjutning och förstärkning/dämpning av respektive väderdata, går via bilden av ett mixerbord för en tänkt ljudanläggning. Där får mixerbordets olika kanaler representera informationsinnehållet för respektive klimatparameter från en klimatfil (1 månad i taget). Tidsförskjutningen av parametrarna illustreras av kanalreglarnas position i förhållande till varandra och ett nolläge (helt nerdragna regler, se Figur 7.9). Kanalernas huvudförstärkning, som i ljudsammanhang oftast är vridpotentiometrar, får representera förstärknings- alternativt dämpningsfaktorn för respektive väderparameter.



Figur 7.9 Illustration av strategin för optimering av tidsförskjutning mellan klimatparametrar samt förstärkning av de samma.

Som tidigare framhållits är det i Fall 3B som själva prognosdelen behandlas. Skillnaden i energiprestanda för referensbyggnaden med Fall 3B respektive Fall 3A är inverkan av väderprognosen.

7.4 Teoretiskt perfekt

Slutligen simuleras referensbyggnaden med ett helt perfekt lokalt reglerat värmesystem. Även om regleringen är helt teoretiskt och bättre än vad som någonsin kan återskapas i verkligheten, är resultaten från beräkningarna med det av intresse här eftersom de kan ses som referensvärden och borte gränser att sätta i relation till simuleringsresultat från andra och mer verklighetsnära reglerstrategier.

Detta värmesystem tillför vid varje tidssteg precis och helt utan fördröjningar den värmeeffekt som behövs för att exakt hålla önskad inomhustemperatur. Detta åstadkoms genom att använda Fall 1C ("traditionellt" med fungerande termostatventiler) med där termostaternas p-band sätts till ett värde nära noll (0,01), vilket hela tiden resulterar i en helt jämn inomhustemperatur på önskad nivå, såvida inte "gratisvärme" ger övertemperaturer som ligger bortom termostatventilernas kontroll, dvs. att de redan är helt stängda. Eftersom all reglering i praktiken sker lokalt så fyller framledningsskurvan här egentligen ingen funktion så länge bara framledningstemperaturen är tillräckligt hög.

8 Tillvägagångssätt vid simuleringar i IDA ICE

I detta kapitel beskrivs övergripande tillvägagångssätten för simulering av de olika reglerstrategierna i Kapitel 7. Fokus här ligger på själva hanteringen av värmesystemen och reglerstrategierna för dessa i IDA ICE, inte på övriga byggnads- eller internvärmerelaterade aspekter som naturligtvis också är en viktig del i simuleringsarbetet. Eftersom tillvägagångssätten vid ”traditionell reglering” och framförallt ”perfekt reglering” till stora delar baseras på standardlösningar i IDA ICE, beskrivs de fallen högst kortfattat.

Här i inledningen av detta kapitel belyses först ett antal löst sammanhängande och generella men relativt viktiga aspekter relaterade till själva simuleringsarbetet.

Dimensionering av referensbyggnadens värmesystem (30 % överdimensionering)

Referensbyggnadens radiatorer i respektive lägenhet dimensionerades för årets kallaste timmar genom analyser med stängda fönster och orimligt perfekta termostatter, där P-banden sattes mycket lågt (samma som i Fall 4). Vidare påkallades en konstant framledningstemperatur på hela 70 °C samtidigt som värmepannans värmeeffektbegränsning sattes ur spel för att det centrala värmesystemet hela tiden skulle ha möjlighet att leverera efterfrågad värmeeffekt. Värdena för respektive radiator loggades för det dimensionerande dygnet varpå samtliga radiatorer fick olika värden, även om flera av dem självfallet var snarlika. Radiatorerna delades därefter upp i sex olika radiatorgrupper:

- Gavellägenheter för våning 1
- Gavellägenheter för våning 2
- Gavellägenheter för våning 3
- Mittenlägenheter för våning 1
- Mittenlägenheter för våning 2
- Mittenlägenheter för våning 3

Gavellägenheterna krävde 10 – 20 % större värmeeffektbehov än mittenlägenheterna för det dimensionerande tillfället, samtidigt som våning 1 och 3 visade sig kräva i genomsnitt ca 30 % respektive 20 % högre värmeeffekt än våning 2. Att nedersta våningen krävde mer värme än översta till och med vid dimensionerande tillfälle förklaras av att taket i referensbyggnaden är relativt välisolerat även med dagens mått mätt, bottenplattan däremot saknar helt isolering.

Verkliga värmesystem överdimensioneras som en slags säkerhetsåtgärd mot för låga rumstemperaturer. Dagens beräkningsprogram som används vid dimensionering är ofta så bra att det finns anledning att tro att värmesystem i nya byggnader är mindre överdimensionerade än i äldre dito. Enligt en erfaren VVS-projektör som kontaktats i ämnet under projektet, tilldelas radiatorerna numera helt sonika de framräknade värmeeffektvärdena med det ända tillägget att närmaste radiatorstorlek över det framräknade väljs. Detta får till följd att radiatorer numera i praktiken i genomsnitt bara är ca 5 % överdimensionerade vid nybyggnation (baserat på produktdata från ett antal godtyckliga raditortillverkare). Referensbyggnaden är dock av äldre snitt och bedöms därför ha större överdimensionering

beroende på att den tidens VVS-projektörer sannolikt la på lite extra som säkerhet innan valet av radiator gjordes. I detta arbete antas att överdimensioneringen (plus senare tiders eventuella efterjusteringar för att höja värmen hos klagande hyresgäster) i miljonprogrammets flerbostadshus i genomsnitt är ca 30 %. Därför överdimensioneras här samtliga radiatorgrupper i referensbyggnaden med den marginalen.

Jämförelse med nationell energistatistik

Jämförelsen med nationell energistatistik gjordes gentemot en normalvädrad referensbyggnad med traditionell värmereglering med normalfungerande termostater dvs. Fall 1B, placerad i Stockholm. Med redovisade data för referensbyggnadens byggnadskropp, luftläckage, personnärvaro, belysning, vädring, mm erhöles utan ytterligare ”justering mot målvärdet” (dock med vissa tillägg/avdrag enligt Tabell 8.1 nedan) en energiprestanda som kunde anses godtagbart nära nationell statistik för värmesidan (totalt ca 4 kWh/m² högre), identisk för hushållselen och slutligen mycket nära med avseende på driftel (1 kWh/m² lägre). Total ”BBR-energi” (värme + driftel per kvadratmeter tempererad golvarea) för referensbyggnaden är knappt 2 % högre än vad nationell energistatistik ger utrymme för. Denna skillnad ansågs dock ligga inom felmarginalen och inga ytterligare åtgärder vidtogs. I Tabell 8.1 jämförs nationell statistik med värden för referensbyggnaden som Fall 1B i vädrat läge. Här kan det vara värt att veta att om Fall 1B skulle varit ovädrad hade medeltemperaturen inomhus varit 22,3 °C, vilket exakt sammanfaller med den nationella statistik som finns i frågan [Tolstoy et al 1993], [Boverket 2010 b].

Tabell 8.1 Nationell energistatistik för byggnader motsvarande referensbyggnaden (som här representeras av Fall 1B med vädring)

	Nationell statistik för Sthlm	Källa	Fall 1B
Värmeenergi	144 kWh/m ² (A)	[E-myndigheten, 2009]	148 kWh/m ² (D)
Hushållsel	42 kWh/m ² (B)	[Sveby , 2009]	42 kWh/m ²
Driftel	17 kWh/m ² (C)	[Sveby , 2009]	16 kWh/m ² (E)
”BBR-energi”	144 + 17 = 161 kWh/m ²		164 kWh/m ²

Kommentarer angående nationell statistik och rekommenderade referensvärden:

- (A) Inklusive tappvarmvatten. Fjärrvärmeförsett flerbostadshus, byggår 1961-1980.
- (B) Exklusive tvätt/tork
- (C) Inklusive tvätt/tork, dock avdrag på 2 kWh/m² pga. avsaknad av hiss (eget antagande)

Kommentarer angående beräkningsresultat:

- (D) Tillägg: 2 kWh/m² för att kompensera för att referensbyggnaden bara har en radiator per lägenhet. En verklig byggnad har vanligtvis en radiator per fönster, vilket ger extra värmeförluster precis bakom radiatorerna pga. lokalt övertempererade väggar. Tilläggets storlek är framtaget med simuleringar i IDA ICE på referensbyggnaden.
- (E) Tillägg: 3 kWh/m² för att kompensera för tvätt och tork som inte ingår i simuleringarna.
Tillägg: 1 kWh/m² för att kompensera för att IDA ICE inte beräknar pumpel för VVC.
Trapp- och utomhusbelysning försummas.

Beskrivningarna av modelluppbyggnaderna för de olika reglerstrategierna i IDA ICE baseras på en rapport som togs fram på KTH i Stockholm 1999 [Bring et al 1999], en rapport som i det närmaste kan betraktas som en fördjupad manual till IDA ICE. Innan modellbeskrivningarna tar vid kan det vara på sin plats att först lägga ut texten något om vissa allmänna förutsättningar och samband för pumpar, fläktar och termostatventiler i IDA ICE, samt faktiskt lite om vattenförångning från fasad.

Angående pumpar och fläktar i IDA ICE

Värme- och ventilationssystem i IDA ICE är förenklade speglingar av verkliga massflödessystem, där pumpar eller fläktar skapar tryckhöjder för att driva värmemedium genom rör eller kanaler. Oavsett om det handlar om vatten eller luft som energibärare är systemens grundprincip den samma.

I IDA ICE finns inga tryckförluster i rör eller kanaler, istället ligger ofta hela kretsens tryckfall över enskilda komponenter. I till exempel en radiatorkrets ligger hela tryckfallet över radiatorerna.

I system för vattenburen värme med radiatorer finns två regleringar av massflöde. Dels en central ideal reglering på pumpnivå och dels en lokal ideal reglering på radiatornivå. På den centrala nivån håller pumpen en given tryckhöjd, och så länge inte den lokala regleringen gör att tryckdifferensen i systemet går utanför givna gränser är massflödet genom vattenkretsen tryckoberoende.

När det gäller radiatorer har dessa en ideal massflödesreglering baserad på en algoritm som bestämmer värmevattenflödet, mer om det strax. Radiatorns reglering kommer se till att ett erforderligt massflöde upprätthålls så länge systemets tryckhöjd är tillräckligt stor. Stängs pumpen av någon anledning av, saknas tillgänglig tryckhöjd och därmed finns logiskt nog heller inget värmevattenflöde genom radiatören.

Angående termostatventiler i IDA ICE

Modellerna för vattenradiatorer i IDA ICE inkluderar termostatventiler vars uppgift är att känna av rumstemperaturen, jämföra den med ett givet börvärde och därefter generera en utsignal (0-1) som proportionellt styr massflödet av värmevatten till och genom radiatören.

För att undvika simuleringsproblem är termostatventilernas P-band en sinusfunktion, se Figur 8.1. Systemet blir då stabilt men det gör också att det blir en skillnad i regleraktivitet beroende på var i P-bandet rumstemperaturen är. Centralt i P-bandet är regleringen mer aktiv än vid P-bandets gränser. Små rumstemperaturförändringar i mitten av P-bandet ger alltså större utslag på utsignalen än motsvarande temperaturförändringar nära P-bandets yttersta gränser. Detta kan jämföras med ett linjärt P-band som är lika aktivt över hela sitt reglerområde, se Figur 8.1 och läs mer om P-band i Kapitel 4.

IDA ICE har två olika modeller för att ”mjukgöra” P-bandet med sinusfunktion. Dels en modell med fixt börvärde för rumstemperaturen och dels en med variabelt börvärde. Som standard i IDA ICE används modellen för fixt börvärde, och det är även fallet för simuleringarna i detta arbete.

Positionen på p-bandet (*RampPos*) i förhållande till rumstemperaturen bestäms av följande samband:

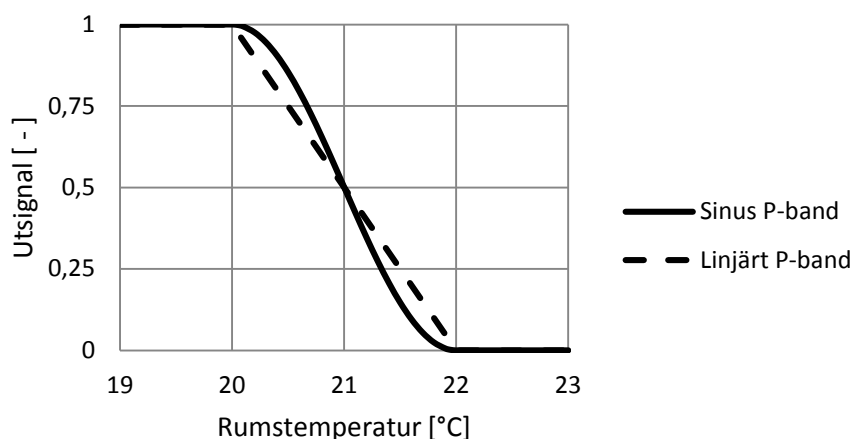
$$RampPos = \frac{t_{rum,bör} - t_{rum,mätt}}{P - band} \quad [-] \quad (\text{ekv 8.1})$$

Detta kan jämföras med ventilkäglans position i en verklig termostatventil. Utsignalen för bestämning av vattenmassflödet beror på värdet för ventilkäglans position och bestäms av sammanlagt två randvillkor och en sinusfunktion:

- 1) Om värdet för *RampPos* är mindre än - 0,5 sätts utsignalen automatiskt till värdet 0.
- 2) Om värdet för *RampPos* är större än 0,5 sätts utsignalen till 1,0.
- 3) Däremellan, alltså -0,5 och 0,5, används följande utjämnade förlopp för att beräkna utsignalen:

$$Utsignal = \frac{1 + \sin(RampPos \cdot \pi)}{2} \quad [-] \quad (\text{ekv 8.2})$$

I Figur 8.1 ges en grafisk framställning av förloppet (1-3) ovan där det översatts till vanligt förekommande rumstemperaturer och ett börvärde på 21 °C eftersom IDA ICE placerar termostatventilens P-band jämt fördelat runt rumstemperaturens börvärde. Det gör att om börvärdet exempelvis är ställt till 20 °C, hamnar ett tvågradigt P-band mellan 19 – 21 °C. Rumstemperaturen skulle i så fall tillåtas sjunka under 20 °C utan att termostatventilen öppnar för fullt. Eftersom kravet på lägsta rumstemperatur i detta arbete är 20 °C sätts således ett fiktivt börvärde på rumstemperaturen till 21 °C i IDA. Detta motsvarar alltså en fullt öppen ventil vid 20 °C och en fullt stängd vid 22 °C, vid ett P-band på 2 °C.



Figur 8.1 Utsignalen styrs av en sinusutjämnad funktion (heldragen linje). Om den istället styrs av en linjär funktion (streckade linje) hade dess övergång mellan på/av blivit skarpare, vilket skulle kunna ge simuleringsproblem. Börvärdet här är 21 °C och p-bandet är 2 °C.

Utsignalens inverkan på vattenmassflödet till radiatorn tecknas:

$$\dot{m} = \dot{m}_{\max} \cdot Utsignal \quad [\text{kg/s}] \quad (\text{ekv 8.3})$$

Där

$$\dot{m}_{\max} \text{ maximalt massflöde då ventilen är fullt öppen} \quad [\text{kg/s}]$$

I de fall inga termostater finns, dvs. Fall 1A som helt saknar termostater eller Fall 1B där varannan radiator saknar termostat, ersätts funktionen för utsignalen ovan med ett konstant värde (1,0), vilket alltså motsvarar en helt öppen termostatventil. Mer om det i Kapitel 8.1.1 senare.

Angående förångning från fasad

Vid samtal under referensgruppmöte med representanter för de företag som tillhandahåller väderprognosstyrning som koncept och produkt, har frågan uppkommit huruvida förångning från fasad har någon egentlig inverkan på klimatet inomhus och byggnaders värmeenergiprestanda. I Bilaga 2 förs ett resonemang kring detta baserat på klimatstatistik, byggnadsfysik och ett stort antal antaganden. Sammanfattningsvis bedöms fasadförångningens inverkan vara helt negligerbar och tas därför inte ytterligare hänsyn till i detta arbete.

Med detta återgår nu till kapitlets egentliga syfte, vilket är att övergripande beskriva tillvägagångssätten för simulering av de olika reglerstrategierna i Kapitel 7, applicerade på referensbyggnaden.

8.1 Simulering av "traditionella" system

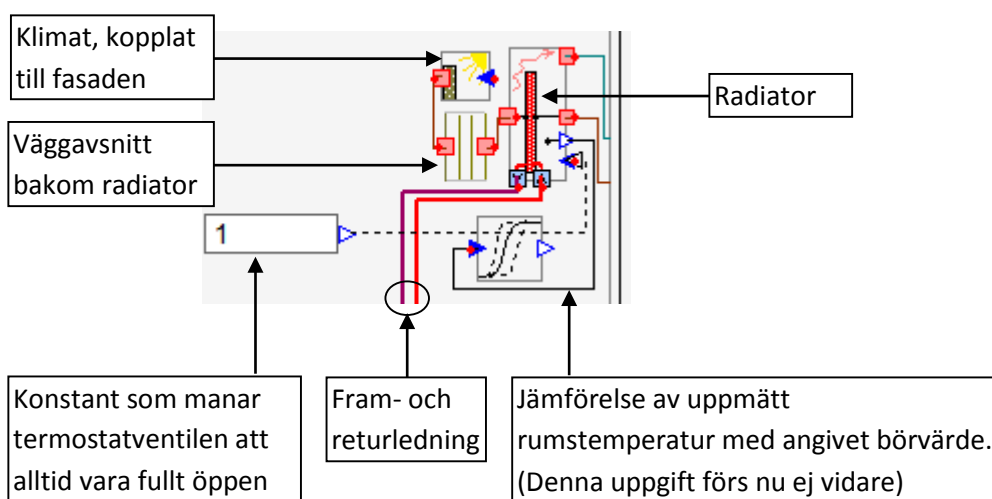
Fall 1 och i synnerhet Fall 1C är att betrakta som standardberäkningar inom IDA ICE.

Möjligtvis bortsett från att framledningsskurvan har böjts något, för att ge den en mer verklighetsnära form (se Kapitel 4) än vad IDA ICE har som standard (helt linjärt). Fall 1A och 1B kräver bara vissa smärre åtgärder jämfört med ett normalt simuleringsförfarande.

8.1.1 Fall 1A – Utan termostatventiler

Eftersom termostatventiler är standard för vattenburna värmesystem i IDA ICE, måste dessa först "avlägsnas". Det görs i den fördjupade nivån för IDA ICE där en skapad modells alla beräkningskopplingar framgår. Termostatventilerna avlägsnas genom att deras funktion elimineras. Detta kan göras på olika sätt, varav det ena i någon mån kan anses mer visuellt och pedagogiskt. Nedan visas därför hanteringen av detta för IDA ICE version 4.2, trots att alla simuleringar i arbetet gjorts med IDA ICE version 4.5 och där hanterades något annorlunda men med samma princip, funktion och resultat.

Av Figur 8.2 nedan framgår att en konstant ersätter termostatventilens funktion. Konstanten ges värdet 1,0 vilket motsvarar att termostatventilen alltid är helt öppen och maxvattenflöde erhålls.



Figur 8.2 Kopplingsschema för en radiator utan termostatventil. Schematisk bild från IDA ICE.

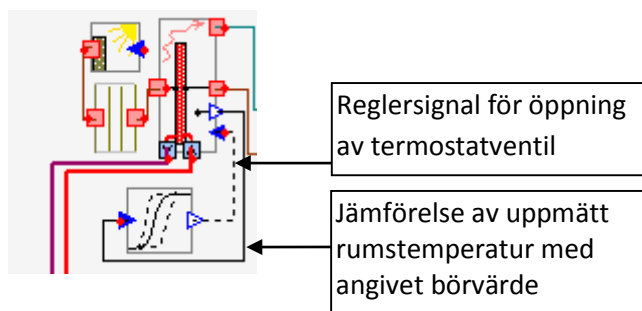
8.1.2 Fall 1B – Med normalfungerande termostatventiler

Här ersätts varannan termostatventil med en konstant signal (1,0) i likhet med Fall 1A. För övriga termostatventiler gäller standardlösningen för vattenradiatorer enligt IDA ICE, se Fall 1C nedan.

8.1.3 Fall 1C – Med perfekt fungerande termostatventiler

Fall 1C är helt och hållet en standardlösning inom IDA ICE och är sannolikt den lösning det stora flertalet användare av programmet använder sig av vid simulering av vattenburen värme.

Här fungerar alla termostatventiler perfekt med ett P-band på 2 °C. Med denna lösning behöver användaren inte gå in i programmets fördjupade nivå.



Figur 8.3 Kopplingsschema för en radiator med termostatventil, IDA ICE.

Reglersignalen som avgör hur stort vattenflödet till radiatoren skall vara beror av temperaturskillnaden mellan rummets aktuella temperatur och angivet börvärde. Korrigering sker om rumstemperaturen ligger inom P-bandet (2 °C). Utanför P-bandet är vattenflödet antingen helt avstängt eller maximalt på.

P-bandets storlek anges enklast centralt i IDA ICE på "förstasidan", under fliken *System Parameters*.

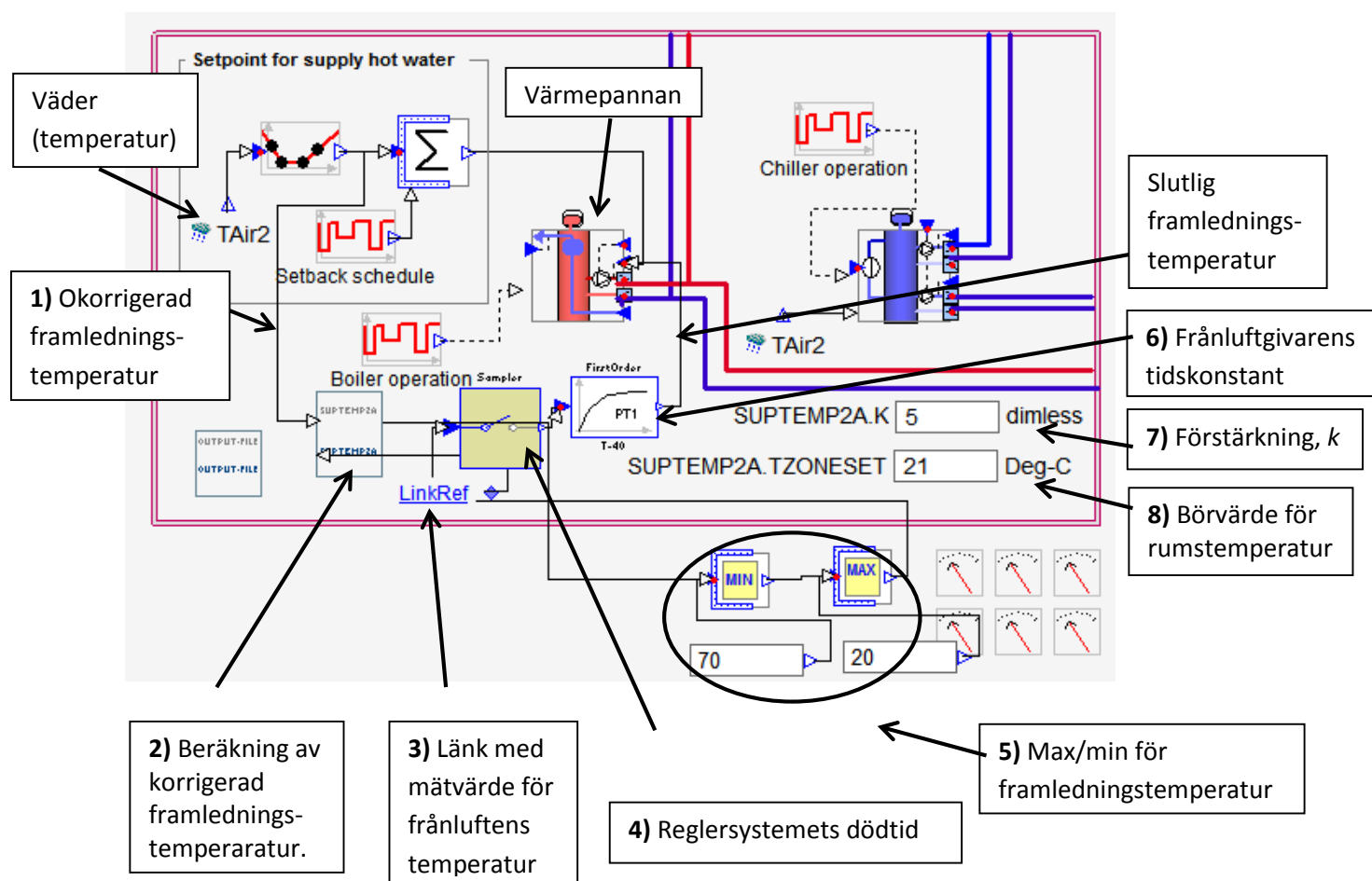
8.2 Simulering av "återkopplade" system

Reglering med återkoppling via rumsgivare finns från början inte i IDA ICE. En ny komponent för ändamålet har därför utvecklats i samarbete med EQUA Simulation AB, som tagit fram och driver utvecklingen av IDA ICE. Underlaget för framtagning av de nya komponenterna redogjordes för i Kapitel 7.2.1 och 7.2.2. EQUA Simulation har därefter utvecklat komponenterna inom ramen för forskningsprojektets finansiering.

8.2.1 Fall 2A – Rumsgivare med P-reglering

Detta system beskrivs i Kapitel 7.2.1 där beräkningsmodellen för reglerstrategierna baseras på ekv 7.1. Framledningskurvan är ursprungligen identisk med den i de "traditionella" systemen, men korrigeras av rumstemperaturen som likställs med den centrala frånluftens temperatur (*AirExhaust*). Lägenheternas börvärdestemperatur tas från inmatat värde för detta i den centralt belägna så kallade kontrollpanelen (*Controller Setpoint/Temperature*).

Användaren kan själv ange olika korrektionsfaktorer, k (ekv 7.1). Indatahanteringen gjordes enkel genom att EQUA Simulation placerade korrektionsfaktorn i en visuellt tydlig och separat indatabox centralt i den del av IDA ICE som översatt kallas *värmepannan*.

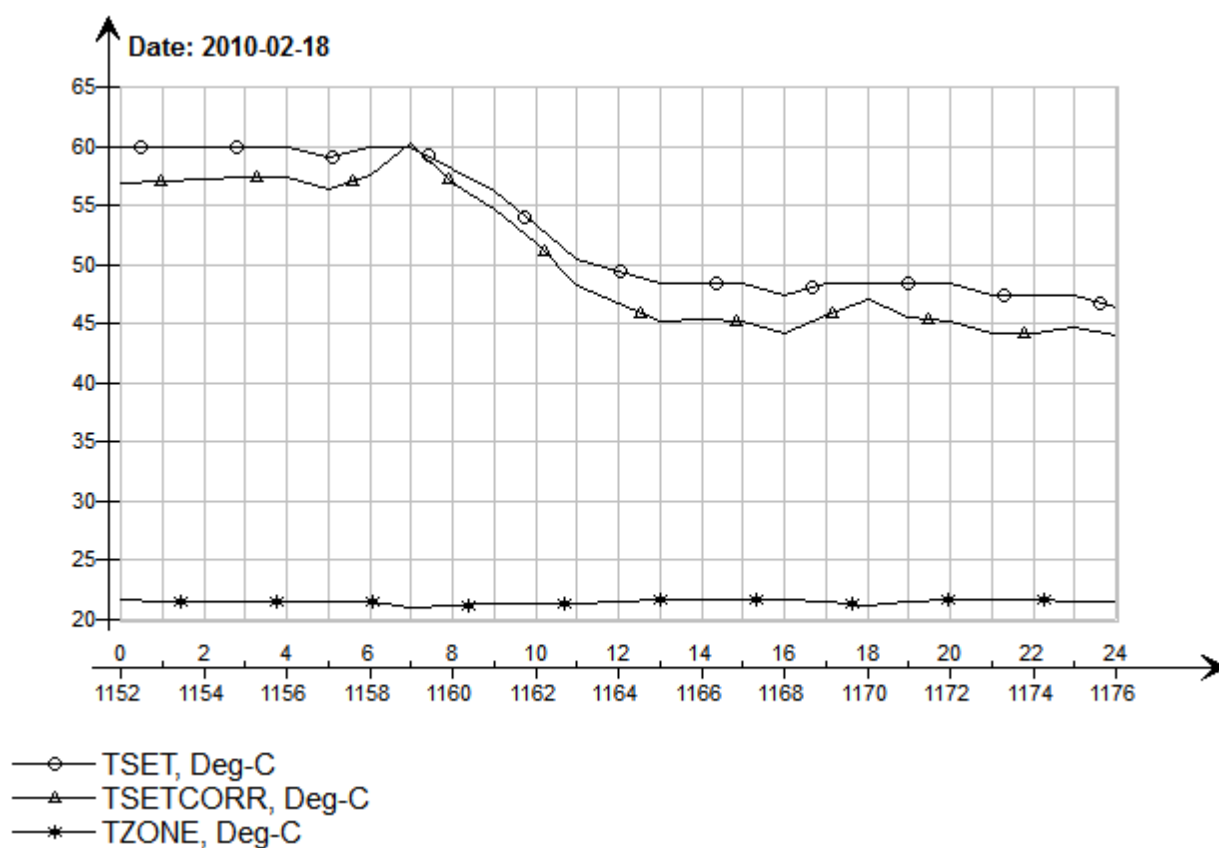


Figur 8.4 Den centrala "installationsanläggningen" (*Plant*) i IDA ICE – Fall 2A. Delarna som framtagits för Fall 2A markeras med pilar.

- 1) Här är den ordinarie framledningstemperaturen utifrån den givna framledningsskurvan. Att den okorrigerade framledningstemperaturen fortfarande står i förbindelse även med värmepannan via en länk till höger om 1) är ifall det skulle finnas fler vattenburna värmesystem (exempelvis luftvärmare), vilket inte finns här.
- 2) Här beräknas framledningstemperaturen baserat på ekv 7.1.
- 3) Från denna trådlösa länk kommer indata (central frånluftstemperatur) till 2)
- 4) Dödtid (5 min) för reglersystemet. (Ökar simuleringstiden avsevärt)
- 5) Max/min-begränsningen för framledningsskurvan ifall 2) skulle komma fram till exempelvis orimligt hög framledningstemperatur.
- 6) Tidskonstant (40 s) för att göra reglersystemet långsammare och mindre idealt.
- 7) Korrektionsfaktorn. Används som indata till 2).
- 8) Rumstemperatures börvärde. Används som indata till 2).

Vad gäller dödtiden för systemet är den satt till 5 min. Dödtiden anges normalt sett inte i produktdata och de fem minuterna är därför en bedömd tidslängd. Känslighetsanalys av olika dötider visar dock att slutresultatet, dvs. rumstemperaturen och energiprestandan, inte påverkas nämnvärt inom rimliga tidsintervall för dödtiden. Tidskonstanten sätts till 40 sekunder som ett ungefärligt medelvärde för kanalmonterade lufttemperaturgivare, baseras på produktdata från olika tillverkare där vissa förutsättningar stäms av.

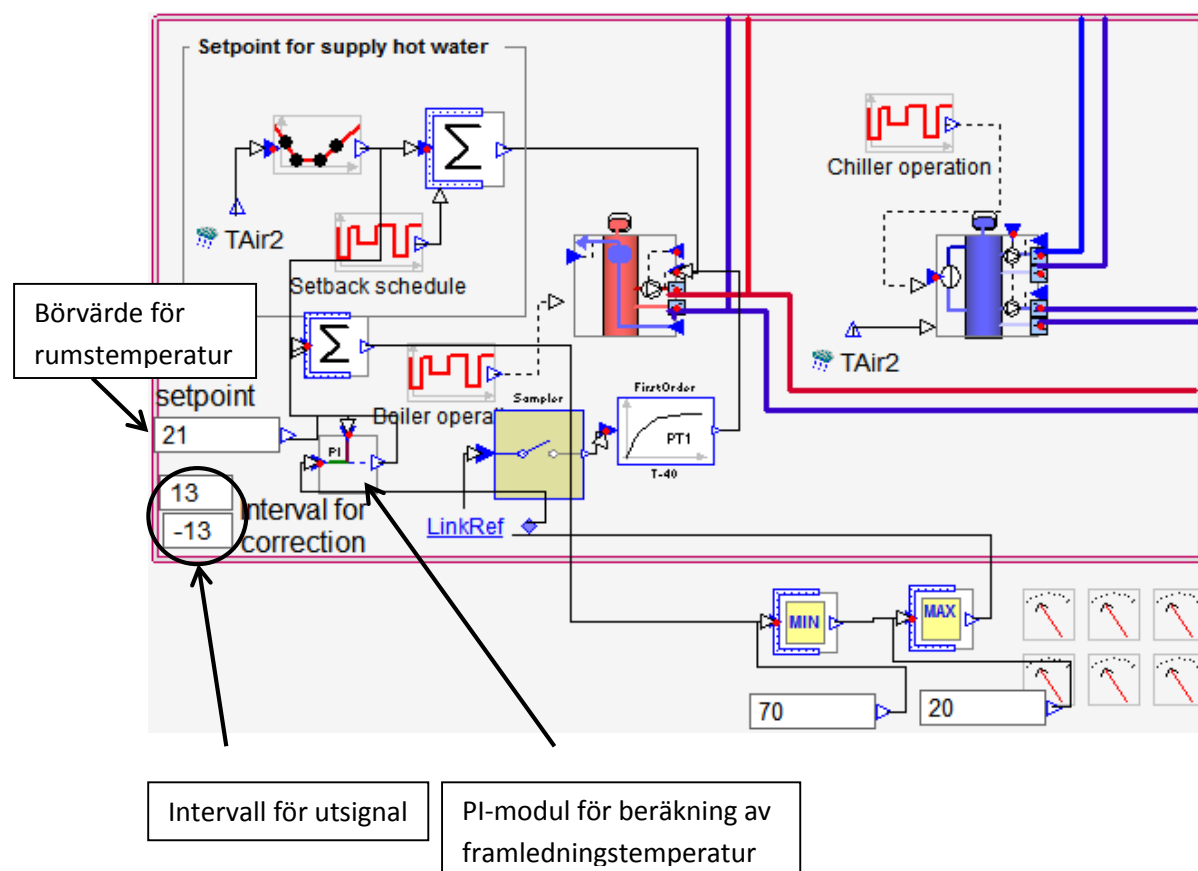
En skärmdump från IDA ICE med "ordinarie" framledningstemperatur tillsammans med korrigerad framledningstemperatur och rumstemperatur visar hur den korrigerade framledningstemperaturen aktivt kompenserar för inomhustemperaturen, samtidigt som den ordinarie endast är ett resultat av utomhustemperaturen och därmed i princip bara följer dygnsrytmen, med hög framledningstemperatur under den kalla natten och en lägre på den lite mildare dagen.



Figur 8.5 Fall 2A. Skärmdump från IDA ICE med loggade utdata över okorrigerad (TSET) respektive korrigerad framledningstemperatur (TSET CORR), samt den centrala frånluftens temperatur (TZONE). Byggnaden är vädrad.

8.2.2 Fall 2B – Rumsgivare med PI-reglering

Som framgick i Kapitel 7.2.2 är framledningstemperaturen här PI-reglerad, utan inblandning av ekv 7.1. Simuleringsplattformen är dock ungefär den samma som i Fall 2A.



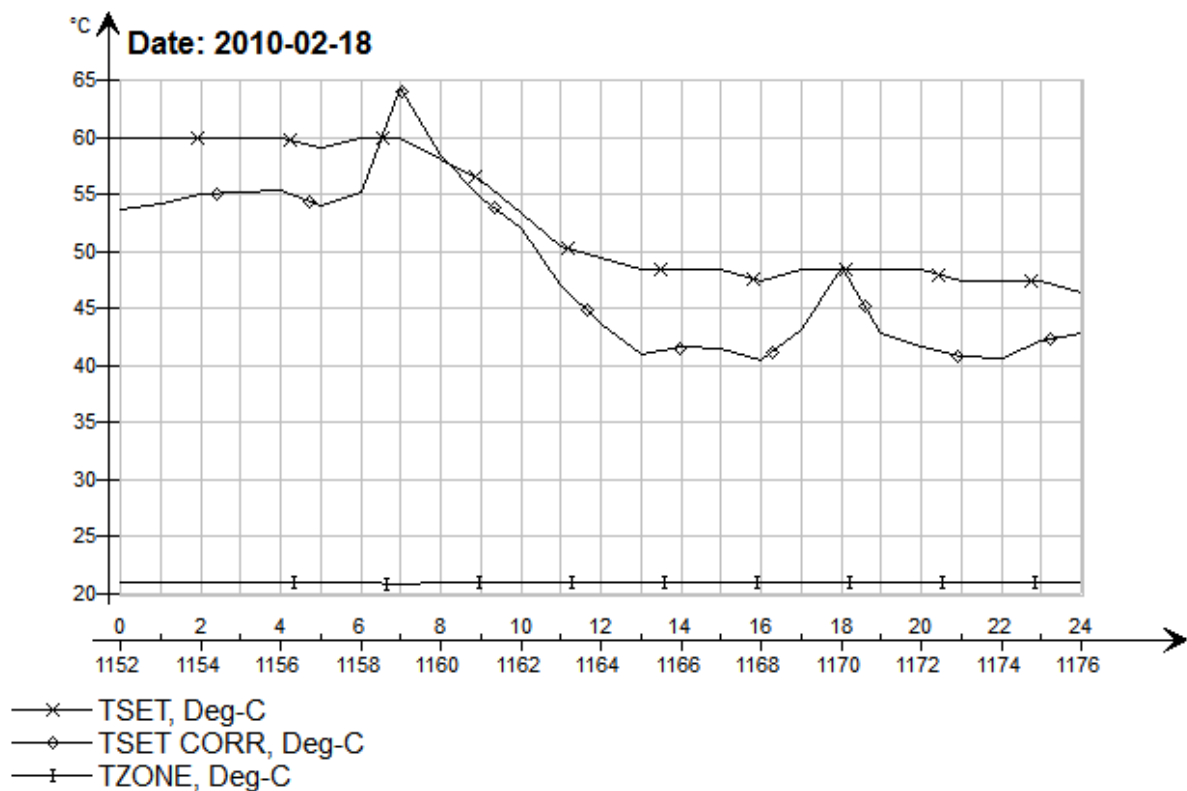
Figur 8.6 "Planten" i IDA ICE – Fall 2B. Skillnaderna jämfört med motsvarande plattform för Fall 2A markeras med pilar.

I PI-modulen anges processens integreringstid och förstärkning som tillsammans ger utsignalens storlek. Utanför PI-modulen finns boxar för rumstemperaturens börvärde och intervall för utsignalen. Utan ett begränsningsintervall skulle utsignalens storlek kunna bli för stor med oacceptabla pendlingar av rumstemperaturen som följd. Intervallet kan även anges i PI-modulen men är här förlagd utanför, för ökad tydlighet och användarvänlighet.

Känslighetsanalyser på referensbyggnaden visar att maximalt intervall för utsignalen i Fall 2B är ± 13 under gällande förutsättningar.

I IDA ICE är integreringstiden satt till 5 minuter som standard för alla PI-moduler. Även om den alltså är ändringsbar behålls tiden för dessa simuleringar.

Figur 8.7 visar en skärmdump från IDA ICE med framledningstemperaturer och byggnadens medelrumstemperatur (mätt centralt i frånluften).



Figur 8.7 Fall 2B. Skärmdump från IDA ICE över loggade utdata för okorrigerad (TSET) respektive korrigerad framledningstemperatur (TSET CORR), samt den centrala frånluftens temperatur (TZONE). Byggnaden är vädrad.

8.3 Simulering av "modellbaserade" system

Jämfört med de återkopplade reglerstrategierna (Fall 2) har de behovsstyrda reglerstrategiernas (Fall 3) uppbyggnad redan beskrivits ganska utförligt, se Kapitel 7.3. Skillnaden beror på att de återkopplade systemen ligger ganska nära till hands att modellera fram i IDA ICE för den vane användaren medan den modellbaserade reglerstrategin i någon mening är mer oortodox och komplex, vilket medför att den också är svårare att redogöra för med enskilda skärmdumpar. Här görs dock ett försök att sammanhängande visa de modellbaserade reglerstrategiernas framställning i IDA ICE.

Men först en snabb repetition av grundförutsättningarna från Kapitel 7.3: Modellen består alltså av två byggnader, referensbyggnaden och "spegelbyggnaden". Referensbyggnaden är den "riktiga" byggnaden från vilken alla resultat för rumstemperaturer och energiprestanda plockas. Den byggnaden har traditionell lokal värmereglering. "Spegelbyggnaden" är en exakt kopia av referensbyggnaden i alla avseenden, inklusive internvärmerna, allt som skiljer dem är värmeregleringen. Centralt finns ingen reglering att tala om i "spegelbyggnaden", värmepannan skickar hela tiden ut ordentligt varmt vatten med konstant temperatur för att säkra tillräcklig värmeavgivning i alla tidssteg, men totalt sett är ändå värmeregleringen i "spegelbyggnaden" optimal eftersom den lokala regleringen är perfekt, medan referensbyggnaden har normalfungerande termostater. Värmeuttaget i "spegelbyggnaden" på rumsnivå sätts i relation till ett dimensionerande värmeuttag på rumsnivå, ett s.k. relativt

effektbehov beräknas och används därefter som underlag för framräkning av den centrala framledningstemperaturen i referensbyggnaden.

8.3.1 Fall 3A – Modellbaserad styrning

För att underlätta arbetet i modellen och slippa växla allt för ofta mellan referensbyggnaden och "spegelbyggnaden", förläggs vissa funktioner på samma "plattform" genom länkar.

Framledningsskurvan till värmepannan i "spegelbyggnaden" har ersatts med en konstant på 70 °C eftersom den lokala regleringen ändå är perfekt (bara den tillgängliga framledningstemperaturen inte är för låg). Ramen till plattformen är bärare av information, exempelvis hämtar beräkningsmodulen till värmepannan i referensbyggnaden information om det relativa effektbehovet "spegelbyggnaden" från den. Dessförinnan har maximalt relativt effektbehov i varje tidssteg från respektive lägenhet i "spegelbyggnaden" beräknats med ekv 4.23 och plockas ut med en kontrollmodul i IDA ICE ("Smoothed Min or Max value"). Värdet på det maximala relativa effektbehovet skickas till beräkningsmodellen som med ekv 4.21 beräknar framledningstemperaturen till referensbyggnaden.

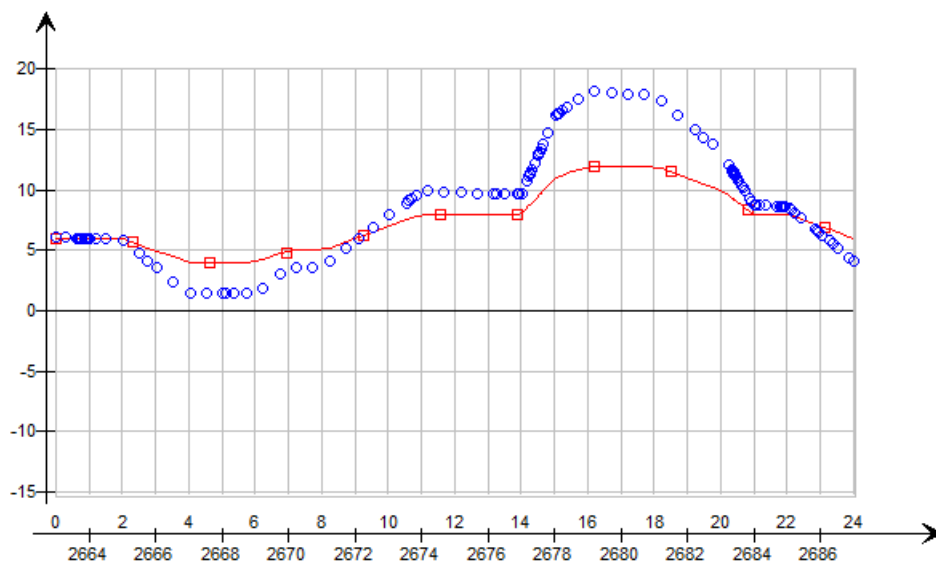
Enligt tidigare utsätts "spegelbyggnaden" inte nödvändigtvis för samma klimat som referensbyggnaden. I Fall 3A är *tiden* för vädret alltid den samma i de båda byggnaderna, men genom en klimatmodul som förlagts till den gemensamma plattformen kan väderparametrarna temperatur, vindhastighet och sol (direkt respektive diffus) förstärkas eller dämpas godtyckligt genom ekv 7.2. Det innebär att väderparametrarnas inverkan på "spegelbyggnaden" kan påverkas. Förstärkningens eller dämpningens faktiska förändring av respektive väderparameter beror naturligtvis dels på förstärkningsfaktorns (K) storlek, men också på väderparametrarnas medelvärde det senaste dygnet. Ansätts K till 0 fås ingen förstärkning alls. Värden > 0 innebär en förstärkning medan värden < 0 innebär en dämpning.

Eftersom optimeringsförfarandet för Fall 3 bestod av ett stort antal separata simuleringar med olika kombinationer av klimatparametrarna gjordes klimatmodulen användarvänlig:

	Förskjutning	Förstärkning
Temperatur	0	0
Vindhastighet	0	0
Direkt sol	0	0
Diffus sol	0	0

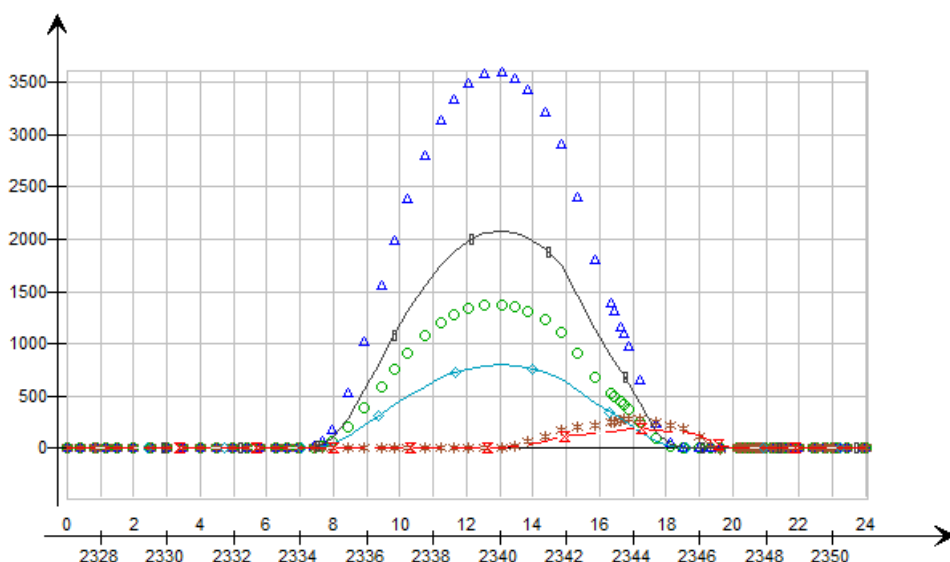
Figur 8.8 Klimatmodulen i IDA ICE – Fall 3A (och 3B). I Fall 3A används den endast till att förstärka och dämpa klimatparametrar så att "spegelbyggnaden" utsätts för ett justerat klimat. Förstärkningen (K i ekv 7.2) kan anges individuellt för respektive väderparameter.

Figur 8.9 visar skillnaden i utomhustemperatur utanför ”spegelbyggnaden” respektive utanför referensbyggnaden då temperaturen utanför ”spegelbyggnaden” förstärks med den framoptimerade faktorn för detta i april månad ($K = 1.2$, se Tabell 8.2 nedan).



Figur 8.9 Utomhustemperaturen [°C] utanför ”spegelbyggnaden” respektive utanför referensbyggnaden en dag i april. Förstärkningsfaktor = 1,2. Värdena för ”spegelbyggnaden” är prickade.

Figur 8.10 visar skillnaden i inkommande solvärme genom fönster i en lägenhet på översta plan i referensbyggnaden respektive ”spegelbyggnaden” då solen för ”spegelbyggnaden” förstärkts med den framoptimerade faktorn för detta i april månad ($K = 0.9$, se Tabell 8.2 nedan).



Figur 8.10 Solinstrålningen [W] in i en lägenhet på översta plan i ”spegelbyggnaden” respektive referensbyggnaden en dag i april. Förstärkningsfaktor = 0,9. Värdena för ”spegelbyggnaden” är prickade.

Optimeringssystematiken går ut på att hitta en bästa kombination av förstärkningsfaktorer för de olika väderparametrarna. Rent arbetsmässigt framställdes först en matris per väderparameter månadsvis med olika förstärkningsfaktorer som indata och med resulterande värmeenergiprestanda och rumstemperatur. I vanlig ordning tilläts inga temperaturer på lägenhetsnivå under 20,0 °C. I såväl Fall 3A som 3B hanteras direkt och diffus sol som en enhet när det gäller optimeringsförfarandet. Det innebär att dessa gavs identiska förstärkningsfaktorer (i Fall 3B även identiska tidsförskjutningar). Detta reducerade antalet möjliga kombinationer och simuleringar ganska väsentligt och bedöms vara en rimlig förenkling. Ganska omgående visade det sig vara i stort sett verkningslöst att förstärka eller dämpa vindhastigheten, vilket är i linje med vad som kunde konstateras i Kapitel 6.4 angående luftläckage i frånluftventilerade byggnader. Även detta underlättade naturligtvis optimeringsförfarandet avsevärt eftersom då bara väderparametrarna temperatur och sol återstod.

Tabell 8.2 Matriser som arbetshjälp för att hitta optimala enskilda *förstärkningsfaktorer* för väderparametrarna temperatur och sol. Matriserna gäller utomhustemperatur och solintensitet i april. Rummen är ovädrade.

utomhustemperatur		
förstärkning	e-anv	t _{rum,min}
[-]	[kWh]	[°C]
0	18960	20,8
1,0	18920	20,2
1,2	18919	20,0
1,3	-	19,9

Sol		
förstärkning	e-anv	t _{rum,min}
[-]	[kWh]	[°C]
0	18960	20,8
0,7	18492	20,2
0,8	18425	20,0
0,9	18339	20,0
1,0	-	19,8

Som framgår av Tabell 8.2 söks successivt efter den förstärkningsfaktor som ger lägst värmeenergianvändning. Oftast går det hand i hand med vilken förstärkningsparameter som ger den lägsta temporära rumstemperaturen, men inte alltid. I matriserna ovan för april gav förstärkningsfaktorn 1,2 bäst resultat för temperatur medan den bästa förstärkningsfaktorn för solen var 0,9. Större förstärkningsfaktorer än så i april ger för låga rumstemperaturer. Förfarandet fortskred till dess det fanns en optimal förstärkningsfaktor för varje månad för den aktuella väderparametern. Att enskilt ta fram optimala förstärkningsfaktor är således enkelt med den framtagna beräknings- och användarplattformen, även om det kräver ett ganska stort antal simuleringar.

Mer komplext blir det dock eftersom det egentligen är *kombinationen* av de två kvarvarande förstärkningsfaktorer som eftersöks. Förvisso kan ibland de isolerade optimeringarna ge bäst resultat, som exempelvis i aprilfallet i Tabell 8.3, men allt som oftast erhöles bäst utfall om de bägge kvarvarande väderparametrarnas förstärkningsfaktorer kombinerades. Här går det dock inte längre att tala om en optimeringsprocess eftersom antalet möjliga kombinationer är näst

intill oändliga. Arbetsprocessen övergår då i en mer sökande form där de enskilda parameterstudierna i Tabell 8.2 tidigare är vägledande.

Tabell 8.3 Matris som arbetshjälp för att hitta lämplig kombination av förstärkningsfaktorn för väderparametrarna temperatur och sol. Matriserna gäller april och lägenheterna är ovädrade.

Temperatur	Sol	Resultat	
förstärkning	Förstärkning	e-anv	t _{rum,min}
[-]	[-]	[kWh]	[°C]
0	0	18960	20,8
1,2	0,9	-	19,3
1,2	0	18913	20,0
0	0,9	18339	20,0
0,5	0,9	-	19,7
0,5	0,7	-	19,9
0,5	0,6	18538	20,0
0,2	0,9	-	19,8
0,1	0,9	-	19,9

Systematiken för att hitta en lämplig kombination kan förefalla stokastisk vid en första anblick av Tabell 8.2, men i princip drivs den framåt av följande frågeställningar (förstärkningsindata för april inom parentes):

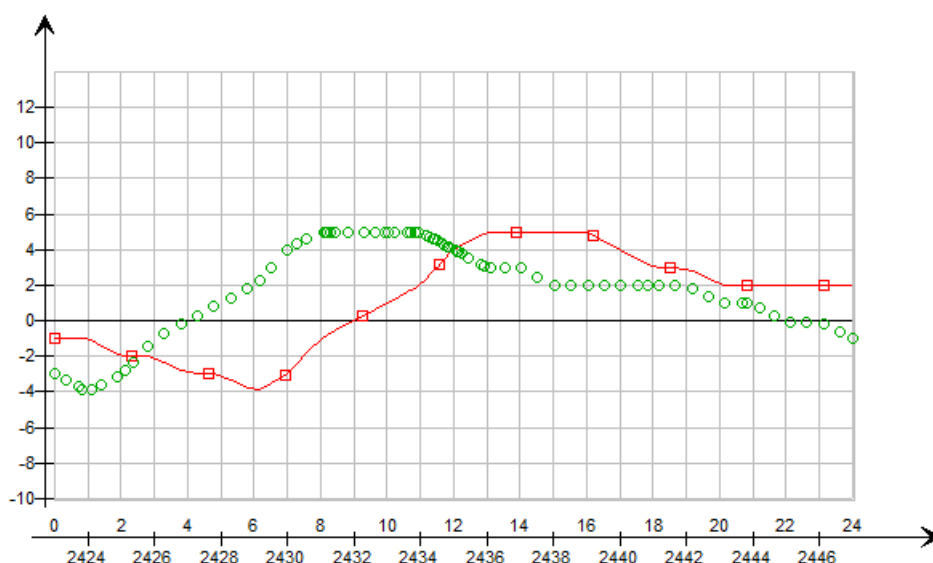
- 1) Vad händer om inget görs (0 + 0)?
- 2) Vad händer om värdena från de enskilda parameterstudierna kombineras (1,2 + 1,2)
- 3) Hur förhåller sig resultatet för 2) till de enskilda förstärkningarna innan (1,2 + 0) resp. (0 + 1,2)
- 4) Vad är rimligast att bygga vidare på, vad ger bäst utväxling? (X + 1,2), (1,2 + X) eller (<1,2 + <1,2)

En stor andel av kombinationerna som testats resulterade i alldeles för låga rumstemperaturer och kunde därmed avskrivas direkt, andra gav rumstemperaturer som låg närmare det önskade men med högre värmeenergianvändning än om ingen förstärkningsfaktor alls använts. Att hitta en acceptabelt bra kombination kräver helt enkelt ett antal försök. Mer om val av förstärkningsfaktorer och tillhörande konsekvenser i Kapitel 9.2.3.

8.3.2 Fall 3B – Prognostiserad behovsstyrd framledningskurva

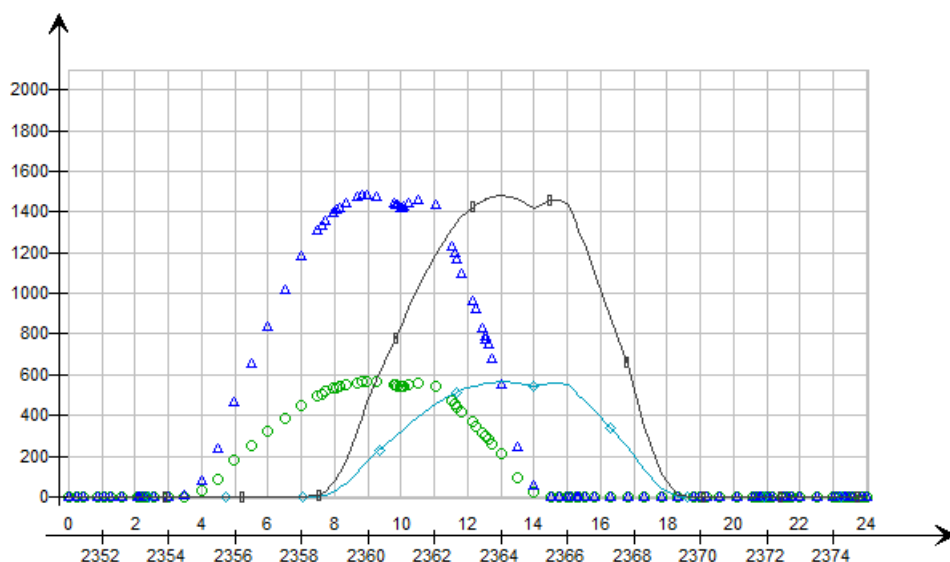
Fall 3B är identiskt med Fall 3A med undantag för att även den vänstra kolumnen i Figur 8.8 med tidsförskjutning av väderparametrar nu aktiveras för att tidsförskjuta det väder som ”spegelbyggnaden” upplever. Till en början hanteras tidsförskjutningarna separat, i likhet med förfarandet för enskilda förstärkningsfaktorer i Fall 3A, se matriserna i Tabell 8.4.

Figur 8.11 visar skillnaden i utomhustemperatur utanför ”spegelbyggnaden” respektive utanför referensbyggnaden då temperaturen utanför ”spegelbyggnaden” förskjuts med den framoptimerade tiden i april månad (5 timmar, se Tabell 8.4 nedan).



Figur 8.11 Utomhustemperaturen utanför ”spegelbyggnaden” respektive utanför referensbyggnaden en dag i april. Tidsförskjutning = 5 h. Värdena för ”spegelbyggnaden” är tätt prickade. Temperaturen är inte förstärkt.

Figur 8.12 visar skillnaden i inkommande solvärme genom fönster i en lägenhet på översta plan i referensbyggnaden respektive ”spegelbyggnaden” då solen för ”spegelbyggnaden” förskjuts med den framoptimerade tiden för april månad (4 timmar, se Tabell 8.4 nedan).



Figur 8.12 Solinstrålningen in i en lägenhet på översta plan i "spegelbyggnaden" respektive referensbyggnaden en dag i april. Tidsförskjutning = 4 h. Värdena för "spegelbyggnaden" är prickade. Solen är inte förstärkt.

I likhet med Fall 3A^I så går optimeringssystematiken initialt ut på att hitta enskilda optimala tidsförskjutningarna för temperatur respektive sol, med så bra energiprestanda som möjligt utan att inomhustemperaturen någonsin går under 20,0 °C.

Tabell 8.4 Matriser som arbetshjälp för att hitta optimala enskilda *tidsförskjutningar* för väderparametrarna utomhustemperatur och sol. Matriserna gäller april och rummen är ovädrade.

Temperatur		
förskjutning	e-anv	t _{rum,min}
[h]	[kWh]	[°C]
0	18960	20,8
2	18908	20,5
4	18836	20,1
5	18825	20,0
6	-	19,9
8	-	19,8
12	-	19,8

Sol		
Förskjutning	e-anv	t _{rum,min}
[-]	[kWh]	[°C]
0	18960	20,8
2	18938	20,4
4	18915	20,3
5	-	19,9
6	-	19,8
8	-	19,8
12	-	19,7

Eftersom Fall 3B beaktar såväl förstärkning som tidsförskjutning fås nu fyra fristående parametrar att hantera i den slutliga matrisen för att hitta rätt kombination. Det innebär att antalet frihetsgrader för olika simuleringskombinationer ökar betänkligt, även om arbetet

fortfarande underlättas av att diffus och direkt solstrålning hanteras gemensamt och att vinden bortses från även här.

För att komma framåt i den optimeringsprocessen anammas samma frågeställningar som till Tabell 8.2, men här finns ett större behov att från början välja ut den parameter som tycks ha störst utväxling.

En jämförelse mellan matriserna i Tabell 8.2 och 8.4 visar genomgående att solparametern här har större utväxling än temperaturparametern för april månad under gällande omständigheter. Vidare framgår att det framförallt är förstärkningen som ger resultat, i alla fall större resultat än med tidsförskjutning av solen. Alltså tycks det rimligt att för april månad framförallt prova kombinationer i närheten av en maximal solförstärkning, dvs. kombinationer där solförstärkningen får vara på sitt maximala värde enligt den högra matrisen i Tabell 8.2 (fetmarkerat). Övriga parametrar ges rimligtvis framförallt värden under sina enskilda maxvärden. Här bör dock noteras att det inte nödvändigtvis betyder att resultatet blir bäst om de ”underordnade” parametrarna ligger så nära sina maxvärden som möjligt, även om det ofta visade sig vara så.

Tabell 8.5 Matris som arbetshjälp för att hitta lämplig kombination av såväl förstärkningsfaktorer som tidsförskjutning. Matrisen gäller april och rummen är ovädrade.

Temperatur		Sol		Resultat	
förskjutning	Förstärkning	förskjutning	förstärkning	e-anv	t _{rum,min}
[h]	[-]	[h]	[-]	[kWh]	[°C]
0	0	0	0	18960	20,8
5	1,2	4	0,9	-	18,5
4	1,0	2	0,7	-	18,9
4	0	0	0,7	-	19,5
2	0	0	0,7	18440	20,0
2	0	0	0,8	-	19,8
2	0	0	1,0	-	19,5
5	0	0	0	18825	20,0
0	1,2	0	0	18919	20,0
0	0	4	0	18915	20,1
0	0	0	0,9	18339	20,0
0	1,2	0	0,9	-	19,5
0	0,5	0	0,9	-	19,8
0	0,5	0	0,7	-	19,9
0	0,2	0	0,6	18538	20,0
0	0,1	0	0,9	-	19,9
2	0	0	1,0	-	19,5
0	0	2	0,8	-	19,5
1	0	0	0,9	-	19,9
1	0	0	0,8	18379	20

8.4 Simulering av ett "perfekt" system

Som Fall 1C men med P-band = 0.01 vilket ger en helt jämn inomhustemperatur förutsatt att rumstemperaturen ligger inom termostatsens reglerområde, dvs. innan den är helt stängd pga. övermäktigt värmeöverskott.

9 Resultat och analys

Så var det dags att summera och analysera resultaten för de olika reglerstrategierna. I Kapitel 9.1 summeras beräkningsresultaten för de ordinarie reglerstrategierna tämligen rakt på. I Kapitel 9.2 därefter förs ett vidare resonemang kring resultaten och dess bakgrund. Rapportens resultat- och analysdel avslutas med en redogörelse i Kapitel 9.3 för ett antal av de känslighetsanalyser som utförts under arbetets gång, vilket dels kan vara småändringar inom de ”ordinarie” fallen men också lite större principiella förändringar inom de undersökta reglerstrategierna.

9.1 Resultatsammanställning för de ordinarie reglerstrategierna

Simuleringarna av de olika reglerstrategierna på referensbyggnaden renderar i ett ganska stort antal resultat med avseende på energiprestanda och inomhustemperatur. Därför behandlas dessa aspekter här separat, även om analysen lite senare i flera fall knyter samman energi och temperatur.

Nästan samtliga reglerstrategier har simulerats i två utföranden: vädrat och ovädrat. Det senare främst för att följa upp och verifiera inomhustemperaturen. En grundförutsättning för de olika reglerstrategierna var att rumstemperaturen aldrig fick understiga 20,0 °C i någon lägenhet. Det kravet gäller dock naturligtvis inte när rum vädras, det hade varit orimligt. Först efter att temperaturen verifierats för de olika reglerstrategierna simuleras de i normalvädrat tillstånd, för att bättre efterlikna verklighetens byggnader och boende. Resultaten för inomhustemperatur baseras alltså på ovädrade byggnader, medan resultaten för värmeenergiprestanda baseras på normalvädrade diton. Undantaget är ironiskt nog Fall 3, som ju kan betraktas som den viktigaste reglerstrategin för detta arbete. Fall 3 är dock av analysmässiga skäl endast simulerat i ett tillstånd, ovädrat. För att ge jämförbara resultat med övriga reglerstrategiers värmeenergiprestanda görs ett schablonpåslag motsvarande 5 kWh/m². Påslaget anses här relativt väl förankrat i det att det baseras på ett genomsnitt för de övriga reglerstrategiernas skillnad mellan vädrat och normalvädrat, en skillnad som dessutom visade sig vara mer eller mindre samma oavsett reglerstrategi.

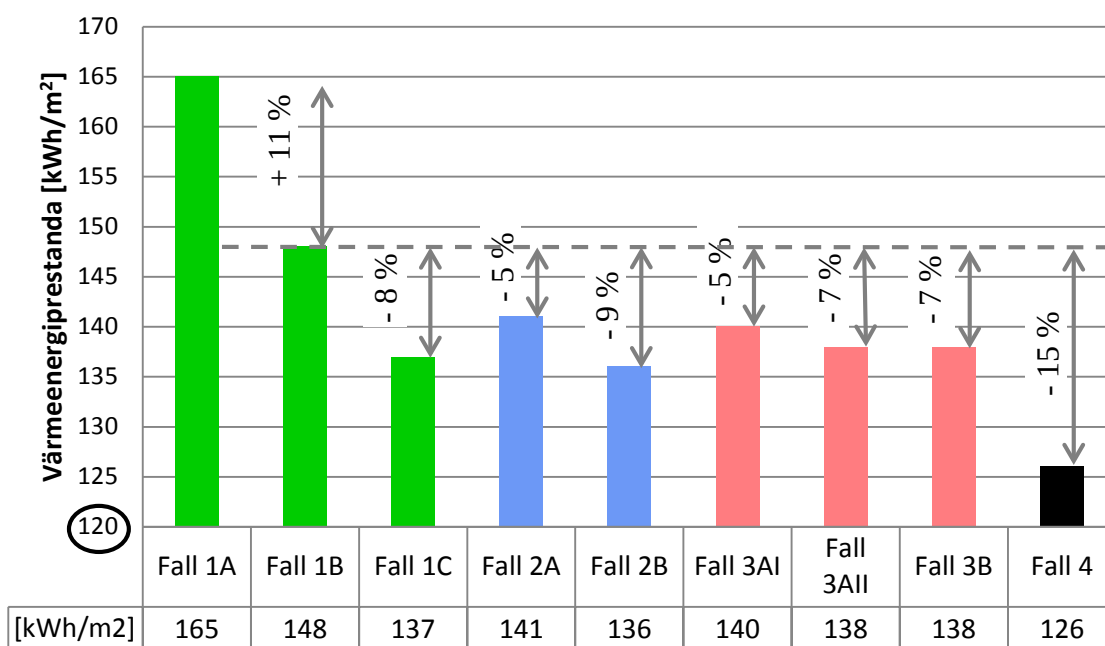
I Tabell 9.1 markeras Fall 1B särskilt för att tydliggöra att det är själva referensen för resultaten eftersom det fallet i någon mån kan sägas utgöra den förväntat mest korrekta avspegligen av ett svenskt flerbostadshus från 70-talet.

Tabell 9.1 Referensbyggnadens värmeenergiprestanda beroende på reglerstrategi

Princip	Typfall	Beskrivning	kWh/m ²
”Traditionellt”	Fall 1A	Utan termostatventiler	165
	Fall 1B	Normalfungerande termostatventiler	148
	Fall 1C	Perfekt fungerande termostatventiler	137
”Återkopplat”	Fall 2A	P-reglerad återkoppling	141
	Fall 2B	PI-reglerad återkoppling	136
”Modellbaserat”	Fall 3A ^I	Modellbaserad styrning (utan förstärkning)	140
	Fall 3A ^{II}	Modellbaserad styrning (med förstärkning)	138
	Fall 3B	Modellbaserad styrning med prognos	138
”Perfekt”	Fall 4	Teoretiskt optimal värmeförsörjning	126

Anledningen till varför Fall 3A ges två resultat beror på att den reglerstrategin simulerats i två versioner; med och utan förstärkning av klimatparametrar. Detta för att kunna urskilja väderprognosers inverkan på energiprestandan, vilken alltså framträder som skillnaden mellan Fall 3B och 3A^{II} ($< 1 \text{ kWh/m}^2$).

Ett av många alternativa sätt att grafiskt redovisa resultaten i Tabell 9.1 och tydliggöra skillnaderna mellan fallen visas i Figur 9.1, där Fall 1B återigen är referensnivån för standardutförandet.



Figur 9.1 Referensbyggnadens värmeenergiprestanda beroende på reglerstrategi. OBS!! Den lodräta axeln börjar på 120 kWh/m² för att förtydliga skillnaderna.

Som förväntat finns ett samband mellan medeltemperatur inomhus och värmeenergiprestanda. För att kunna analysera och kvantifiera det senare i Kapitel 9.2 redovisas i Tabell 9.2 temperaturnivåer för olika tidsperioder och hur medeltemperaturen typiskt varierar i referensbyggnaden beroende på reglerstrategi. Temperaturerna mäts centralt i frånluften där luften i varje tidssteg exakt antar lägenheternas medeltemperatur i den ovädrade byggnaden eftersom ventilationskanalerna i modellerna är helt befriade från såväl värmetillskott som avkylning.

Tabell 9.2 Medeltemperaturnivåer i referensbyggnaden (ovädrad), mätta centralt i frånluften.

Typfall	okt - april [°C]	nov [°C]	jan [°C]	mars [°C]	typisk dygnssvängning i jan [°C]	typisk dygnssvängning i april [°C]
Fall 1A	24,2	23,7	23,4	25,3	0,4	0,7
Fall 1B	22,3	22,1	21,9	22,8	0,3	0,6
Fall 1C	21,2	21,1	21,0	21,3	0,1	0,5
Fall 2A	21,6	21,5	21,4	21,9	0,2	0,6
Fall 2B	21,0	21,0	21,0	21,1	0	0,3
Fall 3A ^I	21,7	21,4	21,7	21,8	0,1	0,3
Fall 3A ^{II}	21,3	21,2	21,4	21,3	0,3	0,4
Fall 3B	21,3	21,2	21,4	21,3	0,3	0,4
Fall 4	20	20	20	20,1	0	0,3

9.2 Analys av de ordinarie reglerstrategierna

Även om redan Tabell 9.1 - 9.2 och Figur 9.1 i alla sin enkelhet ger en ganska tydlig antydning om hur detta arbete kommer summeras i slutändan för de ordinarie fallen, finns anledning att ytterligare kommentera och fylla på med viss bakomliggande information till de annars endimensionella resultaten. Men innan de olika reglerstrategierna analyseras separat poängteras först att Tabell 9.1 och Tabell 9.2 ger ett samstämt samband mellan årsmedeltemperatur inomhus och energiprestanda på motsvarande 7 - 8 %/°C, vilket hänvisas till i analyserna strax.

9.2.1 Analys – Fall 1 ("traditionellt")

Av resultatsammanställningen framgår att den reglerstrategi som här kallas för "traditionell" har en stor resultatbredd, där Fall 1A är klart sämst av alla de studerade reglerstrategierna medan Fall 1C är nästan bäst. I strikt mening är Fall 1B och Fall 1C samma reglerstrategi, allt som skiljer dem åt är termostaternas funktion. Resultaten visar tydligt vikten av välfungerande termostater, eftersom de på ett effektivt sätt kan tillvarata överskottsvärme och kompensera för överdimensionering.

Att Fall 1A (helt utan termostater) ger sämst resultat av de studerade reglerstrategierna i form av högst inomhustemperatur, störst temperatursvängning över dygnet och sämst energiprestanda, ligger i linje med tesen i Kapitel 3. Kombinationen med traditionell framkoppling och avsaknad av lokal reglering är helt enkelt inte bra. Systemet är fastlåst och saknar dels anpassning till hur byggnaden faktiskt används och dels viktig information om det aktuella vädret, förutom utomhustemperaturen. En stor anledning till varför Fall 1A får så dålig energiprestanda beror på att värmesystemet är mycket känsligt för överdimensionering. Med lägre överdimensionering blir Fall 1A mindre dåligt jämfört med andra reglerstrategier. Men den valda överdimensioneringen på 30 % är bedömd som rimlig och utgör därmed en kraftig hämsko för system utan lokal reglering.

Även om det kanske knappt längre finns byggnader med så torftig reglering som Fall 1A, finns ändå en uppenbar risk att traditionell reglering med termostatventiler gradvis närmar sig Fall 1A allt eftersom termostatventilernas funktion avtar av olika orsaker med ålderns rätt. Teoretiskt sett är "försämringspotentialen" hela 25 kWh/m² jämfört med perfekt fungerande termostatventiler, en skillnad som avspeglar det faktum att byggnadens medeltemperatur inomhus är nästan 3 °C grader högre i Fall 1A jämfört med Fall 1C.

9.2.2 Analys – Fall 2 ("återkopplat")

Den tekniska skillnaden mellan Fall 2A och 2B är att den sistnämnda reglerstrategin även innehåller ett I-block. Används en mycket lång integreringstid sätts I-blocket ur spel och de bägge reglerstrategierna ger identiska resultat förutsatt att förstärkningen är densamma. Att Fall 2B ger såpass mycket bättre energiprestanda än Fall 2A beror delvis på själva I-blocket som tillsammans med P-blocket ger en bättre reglering än ett ensamt P-block i det att PI-blocket aktivt ökar reglersignalen till dess att reglerfelet är borta och som ständigt anpassas till det aktuella reglerfelet. Men det beror även på att PI-regleringen i Fall 2B agerar inom ett större arbetsområde än P-regleringen i Fall 2A. Utsignalens begränsningsintervall sattes här relativt stort i Fall 2B vilket gav underlag för större manöverutrymme än vad regleringen i Fall 2A kunde klara, vilket återspeglas i skillnaden mellan Figur 8.6 och Figur 8.8 även om det bara var ögonblicksbilder.

Snävare begränsningsintervall för utsignalen i Fall 2B resulterar lätt i att den korrigerade framledningstemperaturen "bottnar" och bara följer den traditionella framledningsskurvan parallellt långa stunder under framförallt höst och vår eftersom inomhustemperaturen då ofta är relativt mycket högre än börvärdet. Åtminstone förhåller det sig så i referensbyggnaden med normalfungerande termostatventiler.

I-blocket tillsammans med det tilltagna begränsningsintervallet gör att Fall 2B ger en energiprestanda som är 5 kWh/m² bättre än Fall 2A. Det gör Fall 2B till den mest energieffektiva reglerstrategin av samtliga studerade grundfall, förutom Fall 4 som är helt teoretisk optimalt och därför inte kan jämföras med på det viset. Dock finns som tidigare nämnts ett antal viktiga och praktiska förbehåll här som har att göra med kvaliteten på den uppmätta frånlufttemperaturen. Utfallet för framförallt fall 2B skall därför snarast ses som teoretiskt optimalt, även om det nog inte är alldeles omöjligt att återskapa ett snarlikt även i praktiken genom att värdena hämtas från representativa lägenheter eller att frånluftkanalen är ordentligt isolerad och frånluft från spis avsköljts.

9.2.3 Analys – Fall 3 ("modellbaserat")

Till skillnad från de övriga grundfallen är resultaten för Fall 3 en summering av månadsvisa simuleringar, detta för att bättre behovsanpassa reglerstrategin genom att välja olika förstärknings- och tidsförskjutningsparametrar beroende på yttre klimatförhållanden. Genom att använda månadsvisa tidsintervall kunde energiprestandan förbättras jämfört med om samma värden använts för hela året. Det visade sig att stoleken på de lämpligaste förstärknings- och förskjutningsparametrarna skiljer sig åt ganska ordentligt beroende på tid på året. Generellt sett kan väderparametrarna "manipuleras" betydligt mer på vintern än på höst och vår utan att äventyra kraven på rumstemperatur. Skillnaden visade sig särskilt stor för förstärkning av solintensiteten som knappt kan förändras något alls under framförallt vårmånaderna utan att inomhustemperaturen riskerar sjunka under acceptabel nivå, medan den på senhösten och vintern är betydligt mindre känslig. Som exempel på detta kan nämnas att den optimala förstärkningsfaktorn för solintensiteten (inga andra väderparametrar beaktade) i september var fattiga 0,1 medan den för december var hela 1,7.

I Tabell 9.3 och 9.4 strax görs ett försök att åskådliggöra månadsvis optimala förstärknings- och förskjutningsfaktorer för respektive väderparameter. Sedan tidigare konstateras att vindens inverkan på referensbyggnadens energiprestanda är låg eftersom den är frånluftventilerad. Således görs ingen optimering för vinden med avseende på vare sig förstärkning/dämpning eller tidsförskjutning.

I Tabell 8.4 tidigare visades ett exempel på valda förstärkningsfaktorer för de kvarstående väderparametrarna. Det exemplet gällde april månad och syftade till att förklara själva arbetsgången.

Tabell 9.3 Optimala enskilda *förstärkningsfaktorer* för utomhustemperatur respektive solintensitet. (OBS! Optimal $\neq$ maximal för temperaturfallet, men väl för solfallet)

Temperatur	
Månad	förstärkning
	[-]
Jan	0
Feb	1,4
Mar	- 1,0
April	1,2
Maj	0,0
Sep	0,0
Okt	1,0
Nov	0
Dec	0

Sol	
månad	Förstärkning
	[-]
jan	1,4
feb	1,0
mar	0,7
april	0,9
maj	0,2
sep	0,1
okt	0,4
nov	0,9
dec	1,7

Kombineras förstärkningsfaktorerna för temperatur och sol i Tabell 9.3 ”rakt av” månadsvis fås i de flesta fall en oacceptabelt låg inomhustemperatur vid en eller flera tidpunkter. Som nämdes i Kapitel 8.3.1 kan istället den energimässigt bästa lösningen för Fall 3A vara att bara justera ena väderparametern och låta den andra justeringen vara noll. För de några månader fås dock bäst resultat om väderparametrarnas förstärkningsfaktorer kombineras, även om det oftast innebär att de individuella nivåerna först måste reduceras något.

Om även tidsförskjutning tillsätts fås som bekant Fall 3B. I Tabell 9.4 sammanställs de valda tidsförskjutningarna för utomhustemperatur respektive solintensitet.

Tabell 9.4 Valda enskilda *tidsförskjutningar* för utomhustemperatur respektive solintensitet.

Temperatur		Sol	
Månad	tidsförskjutning	Månad	tidsförskjutning
	[h]		[h]
jan	0	Jan	8
feb	24	Feb	24
mar	5	Mar	0
april	5	April	4
maj	2	Maj	3
sep	4	Sep	2
okt	12	Okt	1
nov	0	nov	0
dec	12	dec	2

I Tabell 8.5 visades tidigare hur valet av en slutlig kombination förstärkningsfaktorer och tidsförskjutningar mejslades fram för april genom simuleringar. Tabell 9.5 visar en sammanställning för hela året över de framtagna kombinationer som gett bäst resultat respektive månad.

Tabell 9.5 Valda månadsvisa kombinationer av förstärkningsfaktorer och tidsförskjutningar samt förbättring av energiprestanda jämfört med om väderparametrarna varken förstärkts eller förskjutits. Med ”förbättring” avses en jämförelse med Fall 3A¹.

	Temperatur		Sol		Resultat
månad	förskjutning	Förstärkning	förskjutning	förstärkning	förbättring
	[h]	[-]	[h]	[-]	[%]
Jan	0	0	0	1,4	1,9
Feb	0	0	0	1,0	1,8
Mar	2	0	0	0,7	3,5
April	0	0	0	0,9	3,3
Maj	1	0	0	0,2	3,9
Sep	3	0	0	1	2,6
Okt	0	0	0	0,4	1,6
Nov	0	0	0	0,9	1,5
Dec	0	0	0	1,7	1,1

Av Tabell 9.5 framgår att den simulerade byggnaden, under givna förutsättningar, nästan alltid får bästa resultat om solparametern förstärks. Storleken på den optimala förstärkningen varierar dock beroende på årstid och väder.

Oavsett om det rör sig om Fall 3A^{II} eller 3B, om det handlar om enskilda parameterstudier eller kombinationer av olika förskjutningar och förstärkningar, så är erfarenheten efter långt fler än 500 utförda simuleringar att värmeenergiprestandan oftast påverkas ytterst lite av sådant samtidigt som risken för oacceptabelt låga inomhustemperaturer är överhängande. Ibland visade till optimeringsförfarandet även att tidsförskjutning kunde resultera i försämrade värmeenergiprestanda.

Resultatsammanställningen i Tabell 9.2 visade att referensbyggnadens genomsnittliga rumstemperatur pendlar något mer om väderparametrarna förstärks och tidsförskjuts även om medeltemperaturerna då kunde fås bättre (lägre). Jämförs Fall 3A^I (utan förstärkning) med Fall 3A^{II} (med förstärkning) och Fall 3B (med förstärkning och tidsförskjutning) framgår att inomhustemperaturen i Fall 3A^I har den lägsta typiska dygnsvariationen av alla reglerstrategier, bortsett från det hypotetiska Fall 4. Detta kan jämföras med Fall 3A^I och 3A^{II} vars dygnsvariation är i paritet med referensfallet (Fall 1B).

Vidare tycks det inte finnas något riktigt säkert mönster för vilka parametrar som är känsligast och när, inte mer än att solintensiteten är mycket känslig för framförallt förstärkning på våren och att solen sällan kan tidsförskjutas mer än max några enstaka timmar.

Utomhustemperaturen kan förvisso förskjutas betydligt längre i tiden än solintensiteten, i vissa fall upp till ett dygn, men även här är våren ett känsligt kapitel och under de varmare månaderna bör den inte förskjutas mer än max 5 timmar.

Här kan även nämnas att lättare byggnader är känsligare än tyngre, vilket belyses i Kapitel 9.3.1.

Till sist när det gäller de Fall 3A och 3B i sin ursprungliga form, konstateras att även om de bågiga reglerstrategierna kan förmås att resultera i bättre energiprestanda än exempelvis referensstrategin med normalfungerande termostatventiler (Fall 1B), så visar Tabell 9.2 att det fortfarande finns utrymme kvar att sänka medeltemperaturen och på så sätt förbättra energiprestandan ytterligare. Frågan är bara *hur* det kan åstadkommas endast genom modifierad central reglering, utan att inomhustemperaturen i något ovädrat rum någonsin blir lägre än 20 °C, vilket är en ovillkorlig premis i detta arbete.

I Kapitel 9.3.3 visas hur Fall 3A faktiskt kan ge ytterligare sänkt inomhustemperatur utöver vad som hittills visats och på det viset resultera i bättre energiprestanda. Innan dess redogörs dock för ett par känslighetsanalyser för att utröna vad som händer om byggnadens tyngd ändras samt inverkan av internvärme. Sist undersöks även inverkan av injustering, men nu allra först ges en kort analys av Fall 4.

9.2.4 Analys – Fall 4 ("perfekt")

Eftersom detta är en optimal och högst teoretisk skapelse finns här egentligen inte mycket att analysera. Vi konstaterar dock att den låga medeltemperaturen inomhus (precis på gränsen till det oacceptabla utan att den någonsin blir lägre än 20,0 °C) gör att energiprestandan för detta fall blir överlägset bäst, med hela 22 kWh/m² bättre än referensfallet (Fall 1B) vilket alltså skall ses som en teoretiskt maximal gräns för referensbyggnadens förbättringspotential med avseende på värmereglering under gällande förutsättningar.

9.3 Känslighetsanalyser

Nu när reglerstrategierna är beskrivna och beräknade kan det kanske vara intressant att ta del av några av de känslighetsanalyser som genomfördes inom ramen för projektet.

Resultatsammanställningarna tidigare innehåller tillräckligt med information som de gör. För att inte överlasta dem särredovisas således resultaten för känslighetsanalyserna här under respektive delkapitel. Eftersom känslighetsanalyserna inte på något vis togs upp i Kapitel 8 som är vigd åt att lyfta själva simuleringsförutsättningarna, beskrivs istället känslighetsanalyserna här även ur den aspekten om än begränsat.

9.3.1 Inverkan av termisk massa

Företrädare för väderprognosstyrningskoncepten menar att byggnadens termiska massa är mycket viktig i sammanhanget, ja rent av en förutsättning för att alls kunna anamma reglerstrategin med väderprognoser. Reglerstrategin anses kräva en viss byggnadstyngd. Exakt var gränsen går mellan en tillräckligt tung byggnad och en för lätt byggnad är nog svårt att precisera med aldrig så mycket erfarenhet och kunskap. Syftet med denna känslighetsanalys om termisk massa är inte att hitta den gränsen, utan snarare att få en bild av hur känslig eller okänslig den modellbaserade framkopplingsstrategin med prognos kan vara för termisk massa.

Alla kan nog intuitivt känna att det sannolikt vore olyckligt att reglera värmesystem i ett pappershus med väderprognoser, det känns som en uppenbar risk att inomhustemperaturen då skulle "skena", åtminstone om prognoserna har lång framförhållning. Tunga betongbyggnader däremot känns rimligare, där borde inte gärna rumstemperaturen påverkas så dramatiskt av att framledningstemperaturen justeras upp eller ned lite grann i förtid.

I programmet IDA ICE kan byggnadens alla materialdensiteter ganska enkelt ändras centralt. Således skapades en extremt lätt byggnad och en extremt tung byggnad. Bägge byggnaderna (inklusive respektive "spegelbyggnad") är exakta kopior av referensbyggnaden, enda skillnaden är deras tyngder.

I den lätta byggnaden ändrades densiteten för samtliga konstruktionsdelar så att det motsvarar en mycket lätt konstruktion uppbyggd av träreglar och mineralull. U-värden och andra materialegenskaper var dock oförändrade mot innan. Även inredning och möblemang gjordes extremt lätt och eftersom gipsväggar ersattes med den reglade lättkonstruktionen får vi för känslighetsanalysens skull acceptera att tapeterna på något vis hänger direkt på mineralullen

även om vissa yrkesfack och andra kanske skulle ha åsikter om den lösningen. I den tunga byggnaden ändrades densiteten på motsvarande sätt i alla konstruktionsdelar så att det motsvarar tyngden hos betong.

I sitt originalutförande kan nog referensbyggnaden, med sin tunga stomme och fasad, anses vara ganska rejält tung och på så vis ligga betydligt närmare den extremtunga varianten än den lätta.

Undersökningen av samspelet mellan prognosstyrning, termisk massa och inomhustemperatur gjordes genom att de tyngdmodifierade byggnaderna simulerades och optimerades på samma sätt som tidigare beskrivits. Tabell 9.6 visar resultaten för värmeenergiprestanda för Fall 3A^I, Fall 3A^{II} och Fall 3B. Av resursskäl optimerades bara månaderna: januari, april och oktober. Resultaten för de tre månaderna ligger därefter till grund för de angivna uppgifterna om årlig energiprestanda, som alltså är en ”bedömd/beräknad” uppskalning.

Tabell 9.6 Energiprestanda för referensbyggnaden i tre utföranden: ”mycket lätt”, ”mycket tung” samt ”original”. Resultaten för den sistnämnda är samma som tidigare redovisats och är endast med här som referens.

Utförande	Värmeenergiprestanda [kWh/m ²]		
	Fall 3A ^I	Fall 3A ^{II}	Fall 3B
”mycket lätt”	146	146	146
”mycket tung”	140	137	137
”original”	140	138	138

Resultaten understryker det faktum att referensbyggnaden är tung som den är. Den lätta byggnaden svarar förvisso relativt kraftigt på förstärkning och förskjutning av väderparametrar, dock kunde inte simuleringarna visa på någon förbättrad energiprestanda som följd av detta. Den tunga byggnaden däremot är betydligt mindre känslig för förstärkning, men ger trots det bättre energiprestanda än sitt lättare dito.

Att den lätta byggnaden får så pass mycket sämre värmeenergiprestanda för Fall 3A^I beror sannolikt på att den inte lika bra kan tillgodogöra sig lagrad gratisvärme från stunder då byggnaden av olika anledningar varit övertempererad. Men byggnadens låga vikt medför också något delvis gott; oförmågan att lagra värme gör att det är relativt enkelt att pressa ner medeltemperaturen inomhus genom att exempelvis förstärka väderparametrar. Detta är dock ett mycket vanskligt sätt att reglera lätta byggnader eftersom risken för oacceptabelt låga inomhustemperaturer då är mycket stor.

9.3.2 Utökat utrymme för prognoser och förstärkning

Som framgått har arbetet inte kunnat visa att tidsförskjutning ger någon påtagligt positiv inverkan på värmeenergiprestandan. Vid flera tillfällen har istället olyckligt vald

tidsförskjutning resulterat i oacceptabelt låga rumstemperaturer, ibland redan vid små tidsförskjutningar på kanske bara någon timma. Reglerstrategins grundutformning med spegelbyggnad etc. håller nere medelrumstemperaturen nästan en grad jämfört med vid traditionell reglering (Fall 1B). Således finns inte så stor marginal att agera på för tidsförskjutning och förstärkning, i alla fall inte utan att rumstemperaturen blir för låg. För att ytterligare testa potentialen för tidsförskjutning och förstärkning modifierades därför reglerstrategin för Fall 3A^I något så att rumsmedeltemperaturen under eldningssäsongen ökade från tidigare 21,6 °C till 22,3 °C, där den högre nivån sammanfaller med vad som mättes upp inom ELIB och BETSI studierna tidigare och som också är samma nivå som i referensstrategin (Fall 1B).

Temperaturhöjningen erhöles genom att den s.k. spegelbyggnaden gjordes till en mindre identisk kopia av referensbyggnaden. Vi kan kalla denna reglerstrategi för Fall 3A_{marginal}. Den bristfälliga regleringen åstadkoms genom att värmeeffektbehovet vid referenstillfället, $\dot{Q}_{anv,ref}$ (se ekv 4.23) i spegelbyggnaden reducerades vilket gav ett förhöjt relativt effektbehov som i sin tur ledde till ökad framledningstemperatur och därefter ökad rumstemperatur i lägenheter med bristfälliga termostater.

Fall 3A_{marginal} är sannolikt en sämre grundreglering än vad någon kommersiell leverantör av väderprognosstyrningskonceptet har att utgå från, vilket här är bra eftersom känslighetsanalysen syftar till att kvantifiera en högsta potential för tidsförskjutning och förstärkning.

Precis som vid känslighetsanalysen med avseende på termisk massa, så baseras resultaten här på simuleringar från januari, april och oktober och återigen bekräftas bilden av att tidsförskjutning och förstärkning på det stora hela endast hjälper på marginalen, se Tabell 9.7.

Tabell 9.7 Värmeenergiprestanda för referensbyggnaden i två utföranden: "marginal" (medeltemperatur: 22,3 °C för Fall 3A^I) och "original" (medeltemperatur 21,6 °C för Fall 3A^I). Resultaten för den sistnämnda är samma som tidigare redovisats och är med här som referens.

Utförande	Värmeenergiprestanda [kWh/m ²]		
	Fall 3A ^I	Fall 3A ^{II}	Fall 3B
"marginal"	146	142	141
"original"	140	138	138

Som framgår av Tabell 9.7 visade försöken att nyttan med förstärkning/förskjutning ökar med ökad inomhustemperaturmarginal. Något annat var knappast att vänta. Med större reglermarginal (högre inomhustemperatur att utgå från) ökar spelrummet och förbättringspotentialen för reglering. Det är dock inte frågan om två olika vägar till samma resultat, ty Fall 3A^{II}_{marginal} och 3B_{marginal} blir aldrig så bra som Fall 3A^I och 3B, grundregleringen är helt enkelt viktigare.

9.3.3 Inverkan av förhöjd internvärme i spegelbyggnaden

Eftersom referensbyggnadens värmesystem är överdimensionerat kommer inomhustemperaturen i den alltid att ha en viss marginal ner till 20,0 °C så länge den regleras som i Fall 3A^I, vilket gör att det latent finns ytterligare besparingspotential som vi ännu inte utnyttjat utan att antingen behöva förstärka/dämpa väderparametrarna eller tidsförskjuta dem som i Fall 3A^{II} respektive Fall 3B. Men inte heller då erhålls en stabilt låg rumstemperatur nära 20,0 °C mer än bara tillfälligt, eftersom överdimensioneringen envist håller medeltemperaturen uppe.

I denna känslighetsanalys reduceras överdimensioneringens inverkan på marginalen för rumstemperaturen i referensbyggnaden genom att "spegelbyggnadens" internvärme ökas för att i förlängningen reducera framledningstemperaturen till referensbyggnaden. I övrigt är regleringen i denna känslighetsanalys helt identisk med Fall 3A^I, utan vare sig förstärkningar/dämpningar eller tidsförskjutningar.

Som redan konstaterats har "spegelbyggnaden" bara en enda uppgift: att i varje tidssteg leverera ett värde på det relativa effektbehov, f (ekv 4.23), som underlag till framledningsekvationen (ekv 4.21). Om det relativa effektbehovet av någon anledning minskas i "spegelbyggnaden" så sänks framledningstemperaturen i referensbyggnaden, med sänkt inomhustemperatur som följd. Det relativa effektbehovet i "spegelbyggnaden" kan påverkas på flera olika sätt, det sätt som väljs här är alltså att internvärmerna i "spegelbyggnaden" ökas.

Känslighetsanalysen rymmer tre steg med olika internvärmelaster i "spegelbyggnaden":

Steg 1) Maximal variabel internvärme

Steg 2) Halva maximala variabla internvärmevärmeökningen i Steg 1

Steg 3) Ingen internvärme (endast solvärmestillskott)

I alla stegen är internvärmerna i referensbyggnaden intakt och därmed samma som för alla andra simuleringar och reglerstrategier. Steg 1) och 2) baseras på månadsvisa simuleringar, vilket betyder att internvärmestillskottets storlek i "spegelbyggnaden" varierar beroende på tid på året. Det visar sig nämligen att denna reglering är mindre känslig för förhöjd internvärme vintertid, dvs. framledningstemperaturen i referensbyggnaden kan justeras nedåt mer under vintern än under hösten och våren, utan att rumstemperaturen blir oacceptabelt låg.

Efter ett antal simuleringar för Steg 1) där internvärmerna i ”spegelbyggnaden” höjdes successivt tills dess att den lägsta rumstemperaturen i referensbyggnaden blivit så nära 20,0 °C som möjligt, erhöles maximala internvärmeökningar enligt Tabell 9.8.

Tabell 9.8 Maximal procentuell internvärmeökning i ”spegelbyggnaden”, Steg 1)

”Spegelbyggnaden”	
Månad	Internvärmeökning
	[%]
Jan	80
Feb	80
Mar	50
April	40
Maj	10
Sep	10
Okt	20
Nov	30
Dec	70

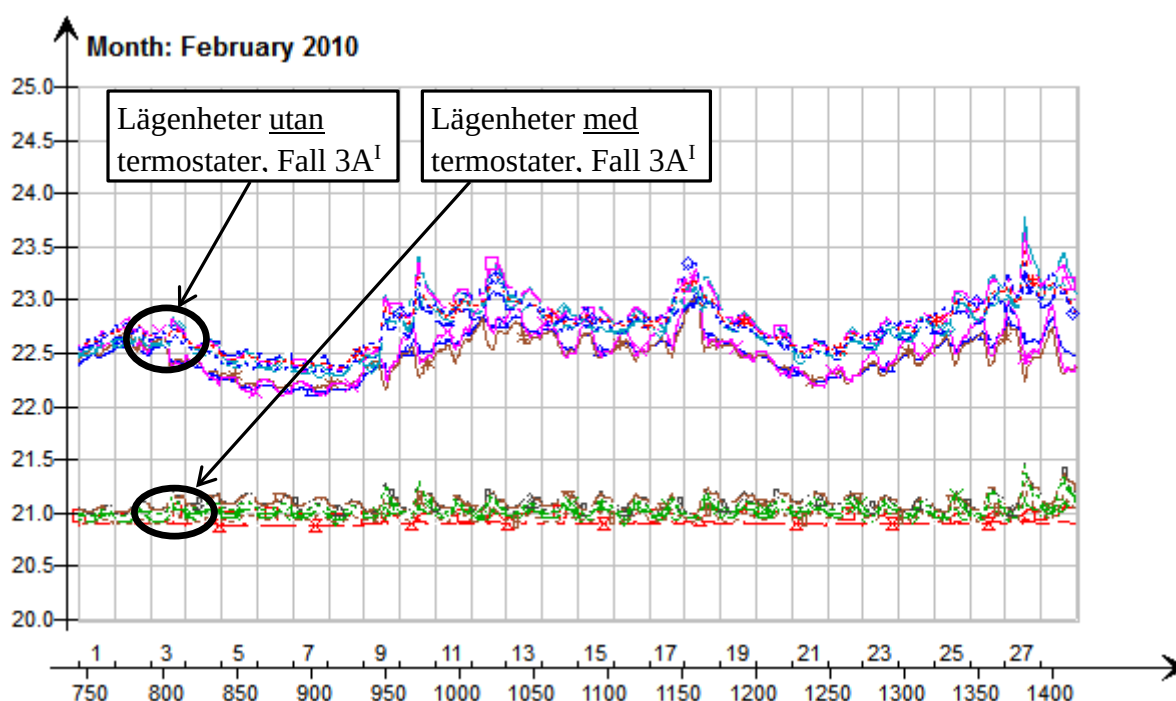
Med givna indata erhöles värmeenergiprestandaresultaten i Tabell 9.9, där även resultat för ett antal andra reglerstrategier visas som komihåg. Steg 2) är bara en halvering av de maximala tillskotten och finns med här för att ge en fingervisning om känsligheten med denna typ av reglering.

Tabell 9.9 Värmeenergiprestanda med justerad internvärme i ”spegelbyggnaden, Fall 3A^I_{intern} och i ”originalutförande”. Vädrat tillstånd.

Utförande	Reglering med internvärmertilskott		”Originalutförande”	
	energiprestanda [kWh/m ²]	Medeltemp. okt – april [°C]	energiprestanda [kWh/m ²]	Medeltemp. okt – april [°C]
Fall 3A ^I _{intern,Steg 1)}	135	20,9	-	-
Fall 3A ^I _{intern,Steg 2)}	137	21,3	-	-
Fall 3A ^I _{intern,Steg 3)}	152	22,8	-	-
Fall 1B	-	-	148	22,3
Fall 3A ^I	-	-	140	21,7
Fall 3A ^{II}	-	-	138	21,3

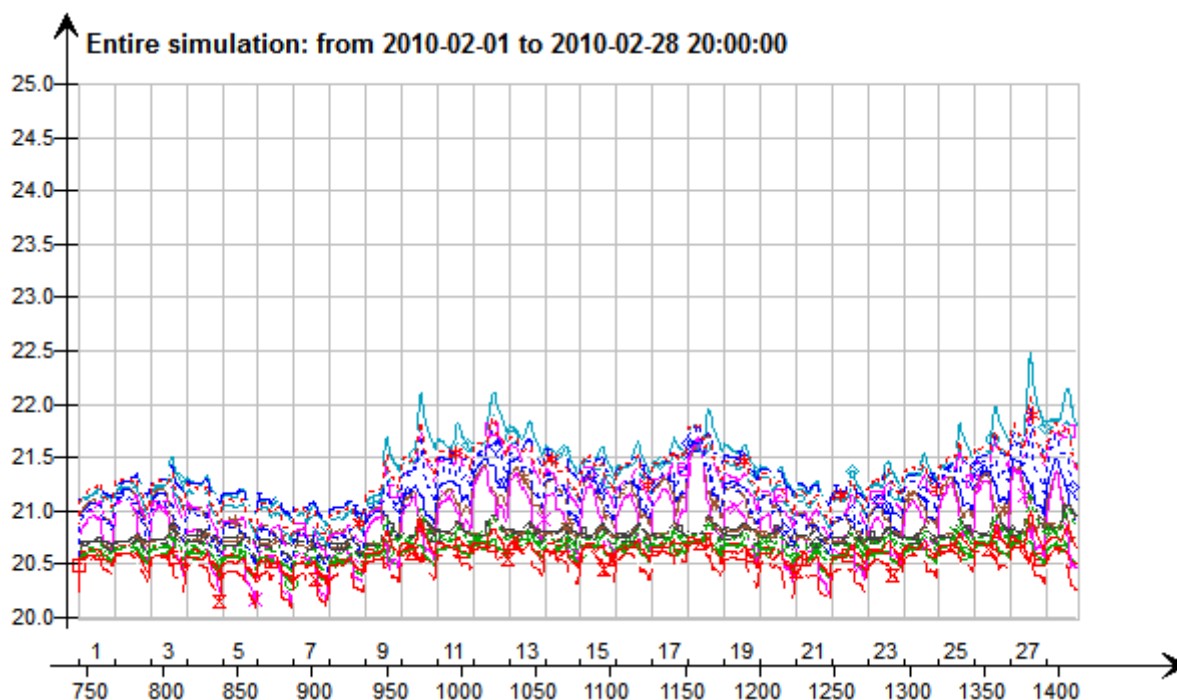
Som framgår av resultatsammanställningen ger alltså Steg 1) med normalfungerande termostatventiler bäst värmeenergiprestanda hittills av alla undersökta reglerstrategier (Fall 4 undantaget). Reglerstrategin ger hela 13 kWh/m² bättre värmeenergiprestanda än referensfallet (Fall 1B), vilket till och med är ett något bättre resultat än vad som erhöles med PI-reglerad återkoppling (Fall 2B) tidigare. Om referensbyggnaden istället hade varit exakt dimensionerad och injusterad, ja då hade det bästa resultatet uppnåtts genom att ha en exakt ”spegelbyggnad”.

Precis som för alla de andra reglerstrategierna i detta arbete visar analys av inomhustemperaturerna att lägenheterna kan delas upp i två olika temperaturnivåer: lägenheter där radiatorerna har termostater och lägenheter där termostater saknas. Lägenheterna utan termostater har en tydligt högre rumstemperatur under eldningssäsongen än de med fungerande termostater, se Figur 9.3.



Figur 9.3 Inomhustemperaturer [°C] i februari, utan justering av internvärmerna i ”spegelbyggnaden” (Fall 3A¹)

Ökas internvärmerna i ”spegelbyggnaden” reduceras inomhustemperaturerna i framförallt de lägenheter som saknar termostater. Skiktningen mellan lägenheter med och utan termostater blir då mindre tydlig, se Figur 9.4.



Figur 9.9 Inomhustemperaturer [°C] i februari, maximerad justering av internvärmen i ”spegelbyggnaden” (Steg 1)

9.3.4 Inverkan av injustering

Sist av känslighetsanalyserna undersöks inverkan av injustering av byggnadens värmesystem.

I verkliga värmesystem innebär injusteringen att injusteringsventilernas öppning anpassas så att de ger lagom flödesmotstånd. Utan injustering skulle vattenflödet genom de radiatorer som ligger närmast pumpen vara betydligt större än genom radiatorer längre bort i systemet vilket skulle ge väldigt ojämn temperaturfördelning med varma rum närmast pumpen och tvärtom. Injustering handlar alltså om att få ett likartat vattenflöde genom värmesystemets samtliga radiatorer. Utan injustering kan ett vattenburet värmesystem inte fungera, oavsett termostatventilernas skick och funktion och oavsett hur väl framledningstemperaturen återspeglar byggnadens värmebehov.

Värmesystem injusteras givetvis innan de tas i drift första gången, men av flera anledningar kan injusteringen behöva göras om med jämna mellanrum. I en rapport från Svensk Fjärrvärme [Trüschel, 2005] rekommenderas intervallet 10 år. Någon statistik över hur ofta bostadsbolag och föreningar faktiskt injusterar sina värmesystem har tyvärr inte kunnat hittas. Att injustering i det närmaste är att betrakta som en färskvara kan bl.a. bero på att grundförutsättningar ibland förändras med tiden när det gäller värmebehov, exempelvis kanske vindsvåningen inreds med lägenheter etc. Men oftast beror det nog på att injusteringsventilerna av olika anledningar helt enkelt inte längre är inställda på det sätt som avsågs från början, se Kapitel 4.2.2.

Risken med dåligt injusterade värmesystem är att temperaturfördelningen mellan lägenheterna blir ojämn, vilket ofta får till följd att framledningstemperaturen manuellt höjs för att säkerställa att de kallaste utrymmena får önskad temperaturnivå. Följden av det är att alla andra utrymmen då blir för varma, och att medeltemperaturen i byggnaden höjs varpå energianvändningen ökar.

Injustering i befintliga byggnader är förknippat med ett visst sjå, även bortsett från själva injusteringsarbetet. Bara att få tillgång till lägenheter på bestämda tider kan vara en utmaning. Därför passar man ofta på att byta de befintliga termostaterna till nya i samma veva. Nyttan av injustering är därför ofta resultatet av en ”tvåstegslösning”. I fjärrvärmerapporten [Trüschel, 2005] undersöktes tre hus där de flesta termostater byttes samtidigt. Värmebesparingen för två av byggnaderna i undersökningen var 10-15 %, det tredje huset gav dock ingen besparing alls beroende på att rumstemperaturen där faktiskt fick höjas i flera lägenheter för att undkomma klagomål.

Så till känslighetsanalysen med referensbyggnaden. I detta arbete likställs injustering med att värmesystemets överdimensionering reducerades från 30 % till nära 0 %. Känslighetsanalysen omfattar injustering på tre reglerstrategier:

- traditionell reglering med normalfungerande termostatventiler (Fall 1B)
- traditionell reglering med fungerande termostatventiler (Fall 1C)
- modellbaserad reglering med normalfungerande termostatventiler där väderparametrarna vare sig förstärks eller tidsförskjuts (Fall 3A¹).

Tabell 9.10 Värmeenergibesparing till följd av injustering.

Utförande	Värmeenergiprestanda [kWh/m ²]		
	Fall 1B	Fall 1C	Fall 3A ¹
”injusterat”	140	130	132
”original”	148	137	140

Ett genomgripande injusteringsarbete där även termostater byts kan närmast jämföras med att gå från Fall 1B ”original” till Fall 1C ”injusterat”, vilket motsvarar en besparing på 16 kWh/m² eller ca 12 % som ligger i linje med besparingarna för två av de undersökta husen i fjärrvärmerapporten [Trüschel, 2005].

10 Erfarenheter från användare

Eftersom detta arbete omfattar en teoretisk studie över nyttopotentialen med bl.a. väderprognosstyrning, har erfarenheter från verkligheten hittills fått stryka på foten. Allt som nämnts om de kommersiella alternativ för prognosstyrning som finns på den svenska marknaden idag är att dess företrädare uppger att reglerstrategin i genomsnitt reducerar energianvändningen med ca 10 – 15 % alternativt 10 – 20 kWh/m².

Med tanke på att tekniken nu finns installerad i långt mer än 10 miljoner kvadratmeter och i tusentals olika byggnader så är det naturligtvis omöjligt att här ge en allt igenom representativ sammanfattning av alla användares erfarenheter, även om kapitlet gjordes aldrig så långt. Men något kan ändå vara intressant att ta upp och intar en naturlig plats i en rapport som denna, även om alltså utblicken med nödvändighet blir mycket begränsad jämfört med den totala mängden väderprognosstyrda fastigheter. De erfarenheter som här anförs gäller 9 flerbostadshus i Borås, 23 flerbostadshus i Tyresö, 2 flerbostadshus i Köping och 2 äldreboenden i Göteborg. Erfarenheterna för flerbostadshusen i Borås och Tyresö hämtas från det examensarbete som utfördes på Chalmers 2011 och som redan refererats till i litteraturoversikten i Kapitel 3.3 [Andreasson, Hägg 2011] och flerbostadshusen från Köping hämtas från Sasic vetenskapliga artikel från Chalmers och SMHI [Sasic et al. 2006a]. Erfarenheterna från vårdlokalerna är från en konsultrapport som tyvärr inte publicerats men vars innehåll här sammanfattas efter medgivande av Lokalförvaltningen i Göteborg som var uppdragsgivare.

10.1 Flerbostadshus i Borås

Fastighetsbolaget Bostäder i Borås AB installerade väderprognosstyrning år 2003 i tre av sina bostadskvarter i Hulta. Kvarteren består av vardera 7 900 m² fördelat på två åttavåningshus och ett trevåningshus. Totalt alltså nio flerbostadshus på sammanlagt 23 700 m², som alla byggdes under perioden 1965 – 1966. Mätdata för att utvärdera inverkan av prognosstyrningen hämtades från tre år innan och tre år efter installationen. Efter att all väderpåverkad mätdata normalårskorrigerats kunde konstateras att energianvändningen reducerats med 4,3 – 7,3 % (beroende på kvarter) vilket i det fallet motsvarades av ca 9 – 15 kWh/m². Orsakerna till resultatens relativt stora spridning ges inget svar på i rapporten men författarna konstaterar att mät- och installationsperioden sträcker sig över sammanlagt sju år då naturligtvis mycket kan hända och förändras med avseende på vilka hyresgäster som bor där mm. Samtidigt konstaterar författarna att åtminstone inga övriga energibesparande åtgärder genomfördes under perioden varför slutsatsen som drogs var att besparingen nog kunde knytas till installationen av väderprognosstyrning.

Vidare visar det sig att antalet klagomål från hyresgäster reducerats sedan tekniken installerades, allt enligt bolagets energiansvarige.

10.2 Flerbostadshus och radhus i Tyresö

I Tyresö lät Tyresö Bostäder AB installera väderprognosstyrning i bostadsområdet Koriandern i sammanlagt 23 bostäder 2005, alla byggda 1982 – 1983. Sex av byggnaderna är fyravåningshus och resterande antal är radhus. Totalt finns i Koriandern 189 lägenheter fördelade på lite drygt 15 000 m² med bara en värmecentral för hela området och därmed också bara en prognosmottagare. Som en kommentar till detta ställde sig författarna till rapporten därför frågan hur behovsanpassad framledningstemperaturen kan ha varit i det fallet med tanke på att byggnaderna skilde sig åt ganska väsentligt med avseende på storlek och utformning.

Mätperioderna innan och efter installationen var två år vardera, allt som allt från 2003 - 2007 där den normalårskorrigerade besparingen blev 14 % vilket motsvarade nästan 26 kWh/m².

10.3 Flerbostadshus i Köping

I Köping testade Chalmers och SMHI två likadana fjärrvärmeförsedda flerbostadshus på vardera 2633 m², en med prognosstyrning och en utan [Sasic et al. 2006a] där den utan väderprognosstyrning fick utgöra referens. Under perioden september 2004 till januari 2005 mättes såväl inomhustemperatur som total värmeenergianvändning (inklusive tappvarmvatten) timme för timme. Mätningarna visade att medeltemperaturen inomhus var i stort sett identisk i de bägge byggnaderna medan värmeenergianvändningen reducerades med 9 % i byggnaden med väderprognosstyrning. I rapporten ges ingen förklaring till hur energianvändningen kunde minska så pass mycket utan att medeltemperaturen reducerades.

10.4 Äldreboende i Göteborg

Lokalförvaltningen i Göteborg, som bl.a. inrymmer den del av fastighetsförvaltarskapet i Göteborgs stad som hanterar vårdlokaler, lät 2006 och 2007 installera väderprognosstyrning i två av sina äldreboenden (beställaren hette då Medic Hus). Äldreboendena ligger i Svalebo och Kallebäck. I bägge fallen föregicks installationen av att värmesystemen lågflödesinjusterats några år innan, en tvåstegsåtgärd som också särredovisas med avseende på energiprestanda i konsultrapporten från ÅF-Infrastruktur AB. Särredovisningen användes för att urskilja och kvantifiera nyttan med väderprognosstyrning. Energistatistik från Göteborg Energi visade att den normalårskorrigerade värmeenergianvändningen i Kallebäck reducerades med 15 % pga. injusteringen, följt av ytterligare 9 % besparing till följd av prognosstyrningen. I Svalebo uppges motsvarande besparingar varit 6 - 9 % för injusteringen och ytterligare 5 % för prognosstyrningen.

Författaren till konsultrapporten menar att den månatliga energistatistiken från tiden innan väderprognosinstallationen visar att injusteringen i Kallebäck blev bättre än den i Svalebo, detta eftersom värmeenergianvändningen över tid var mer ojämn i Svalebo, en ojämnhet som fanns kvar även efter installation av väderprognosstyrning. Författaren drar slutsatsen att om det är de sämst injusterade rummen som i förlängningen avgör framledningstemperaturen istället för den anpassade prognostemperaturen, ja då minskar nyttan med väderprognosstyrning.

11 Slutsatser och diskussion

Att såväl central som lokal värmereglering visat sig viktigt för både värmeenergiprestanda och inomhustemperatur kommer knappast som någon överraskning. Resultaten för besparingspotentialernas storlek för den ena eller andra lösningen kan däremot förhoppningsvis vara av visst intresse.

I flerbostadshus är underhåll eller nyinstallation av den lokala regleringen behäftad med viss praktisk problematik. På det viset kan det i många sammanhang kanske upplevas enklare och mer rationellt att först och främst genomföra reglertekniska åtgärder på den centrala regleringen, allt ifrån att manuellt justera en förutbestämd framledningskurva till att installera väderprognosstyrning som en paketlösning.

Den sistnämnda åtgärdsstrategin har flera fördelar; förutom att tillgänglighetsdilemmat undviks kan en bra central reglering leda till en bättre ”lägstanivå”, dvs. även om termostaterna fallerar en efter en så finns en central grundreglering att falla tillbaka på som förhoppningsvis är betydligt bättre än traditionell statisk framkoppling. Kanske kan det i förlängningen leda till beslut om lägre servicebehov lokalt, med ökat tidsintervall för byte av termostatventiler och injustering av värmesystem. Däri ligger också en viss risk, lokal reglering *är* nämligen viktig och det enda sättet att kontrollera den enskilda zonen eller lägenheten. Utan god lokal reglering och ett väl injusterat värmesystem kan ingen centralreglering i världen generera bra värmeenergiprestanda och inomhustemperatur. God central reglering ökar således möjligheten för långvarigt bra resultat, men behovet av en fungerande lokal reglering kvarstår likafullt.

Simuleringsresultaten visar att den teoretiska besparingspotentialen för den modellbaserade regleringen med väderprognos är i storleksordningen 10 kWh/m² jämfört med traditionell reglering av ett normalfungerande värmesystem. Detta motsvarar ungefär 7 % av referensbyggnadens värmeenergianvändning om tappvarmvattnet inkluderas och knappt 9 % om det exkluderas.

När det gäller potentialen för inverkan av själva väderprognosen visar simuleringsresultaten i rapporten dock envetet att prognosen i sig inte gör så särskilt stor skillnad, oavsett om den centrala regleringen i övrigt fungerar effektivt eller ej, dvs. oavsett om regleringen i övrigt skapar en liten eller stor temperaturmarginal för förbättring. Däremot ökar risken högst väsentligt för att någon eller några lägenheter får uppleva undertemperaturer.

Inte heller känslighetsanalysen med en extremt lätt byggnad kontra en extremt tung byggnad visade på något särskilt stort utrymme för själva prognosen. Att i realtid centralt beakta flera relevanta parametrar än utomhuslufttemperatur tycks således viktigare än att reglera efter prognoser. Ju bättre den centrala regleringen är desto mindre reglermarginal för prognosens inverkan återstår. Om den centrala regleringen är tillräckligt bra kan den helt enkelt inte kombineras med prognoser eftersom risken för oönskat låg inomhustemperatur från tid till annan då blir allt för stor. Vid perfekt central reglering kan endast god lokal reglering ytterligare förbättra situationen.

Oavsett vilken reglerstrategi som simulerades visar en samkörning av resultaten för säsongmedeltemperatur inomhus och årlig värmeenergiprestanda, på ett besparingssamband motsvarande 7-8 % per sänkt °C. I strikt mening gäller detta resultat endast referensbyggnaden under rådande förutsättningar, men sambandet bedöms gångbart även för fler byggnader och omständigheter åtminstone så länge byggnaderna inte är mycket energieffektiva. Med det som fond konstateras att väderprognosstyrningsaktörernas uppgifter om att deras reglerstrategi i genomsnitt sparar 10 – 15 % värmeenergi måste matchas med en inomhustemperatursänkning på 1,5 – 2,0 °C vilket torde vara görligt om den aktuella byggnadens reglersystem ger upphov till en relativt hög medeltemperatur, säg kanske 23 - 24 °C för eldningssäsongen vilket förvisso är högt men inte orimligt i flera fall. Detta skall dock betraktas i ljuset av nationell statistik över inomhustemperatur som visar att medeltemperaturen i flerbostadshus under uppvärmningssäsongen i Sverige är ca 22,3 °C. I normalfallet måste alltså väderprognosstyrningskonceptet reducera medeltemperaturen inomhus till ca 20,3 - 20,8 °C, eventuellt något högre om tappvarmvatten exkluderas.

Med stöd i de utförda simuleringarna för ett antal olika reglerstrategier konstateras att en sänkning till så nära 20,0 °C torde vara svår att uppnå i verkligheten eftersom några lägenheter naturligtvis kommer vara svalare än medlet och därmed riskerar hamna under lägsta acceptabla nivån om framledningen optimeras för hårt efter enbart medelvärdet. För att ha en chans att lyckas krävs i så fall sannolikt en mycket flexibel central reglering med bättre upplösning än månadsvis. Men att hitta en sådan optimal reglering i verkligheten, utan att pröva sig fram via simuleringsprogram framstår som näst intill omöjligt, såvida naturligtvis inte undertemperaturer i vissa lägenheter accepteras under kortare perioder eller att regleringen kompletteras med en "säkerhetsreglering" i form av exempelvis återkoppling, för att justera regleringen om det visar sig bli för svalt inomhus. I samtal med referensgruppen framkom att återkoppling sedan en tid faktiskt används som en integrerad funktion i väderprognosstyrningskonceptet just för att säkerställa inomhustemperaturen.

Eftersom arbetet visat att modellbaserad styrning teoretiskt sparar energi, finns all anledning att gå vidare med den modellbaserade styrningen som reglerstrategi. Principen med reglering via spegelbyggnad gav gott resultat redan för de lite otrimmade behovsstyrda reglerstrategierna Fall 3A^I och 3A^{II}. Om strategin med spegelbyggnaden dessutom finjusterades genom exempelvis internvärmeökning i den virtuella spegelbyggnaden erhöles ytterligare förbättring som sammantaget var ganska väsentligt mycket bättre än traditionell reglering.

Reglerstrategin med en virtuell spegelbyggnad torde gå att anamma på en verklig byggnad, förutsatt att en väderstation finns tillgänglig som kontinuerligt kan leverera uppgifter om solstrålning, temperatur och vind. Reglerstrategin kräver också att regleringen i den verkliga byggnaden är uppkopplad mot en simuleringsmodell. Modellen skulle förfinas ytterligare om information om internvärme fanns tillgänglig, kanske i form av centralt mätt elanvändning och personräknare vid entrédörr.

Slutligen. En sammanställning över den totala besparingspotentialen för några av de analyserade regleråtgärderna på referensbyggnaden visar att det finns mycket värme att spara bara genom en förbättrad reglerstrategi jämfört med den traditionella, även utan ytterligare åtgärder på befintligt klimatskal och ventilationssystem etc. I Tabell 11.1 sätts referensbyggnadens totala värmebesparing beroende på reglerstrategi och åtgärd, i relation till värmeenergianvändningen för ett icke-elvärt 130 m² stort nybyggt småhus i klimatzon III (södra Sverige) enligt gällande byggregler [Boverket 2013]. Småhusets fastighetsel anses här försumbar i enlighet med Boverkets författningssamling [Boverket 2012].

Tabell 11.1 Total värmeenergibesparing för referensbyggnaden för olika typer av reglerstrategier och åtgärder. Besparingarna baseras på jämförelser med Fall 1B. Notera att endast den översta åtgärden avser välfungerande termostater i övriga fall utgår från att byggnaden har normalfungerande termostater som behålls. Referensbyggnadens tempererade area är lite drygt 1500 m². Motsvarande area för det nybyggda småhuset i klimatzon III är 130 m².

Reglerstrategi/åtgärd	Värmebesparing	Motsvarar
Byte till välfungerande termostater (Fall 1C)	16 600 kWh	1,4 småhus
P-reglerad återkoppling via central frånluft (Fall 2A)	10 600 kWh	0,9 småhus
PI-reglerad återkoppling via central frånluft (Fall 2B)	18 100 kWh	1,5 småhus
”Optimerad” behovsstyrd reglering (Fall 3A ^{I_{intern,Steg1}})	19 600 kWh	1,7 småhus

Man kanske egentligen inte skall dra jämförelserna längre än till det enskilda småhuset, men om besparingarna gick att realisera nationellt finns här onekligen en inte helt oansenlig nationell besparingspotential.

Enligt Energimyndighetens statistik finns idag nästan 173 miljoner m² uppvärmd flerbostadshusarea i Sverige [Energimyndigheten 2012]. Ungefär hälften av den arean byggdes mellan 1950 och 1975 [Boverket 2010a] varav en stor del under det omtalade miljonprogrammet. Antar man att medelhuset har samma värmeenergiprestanda som referensbyggnaden fås att besparingspotentialen är ca 1,90 TWh värme bara genom att byta till välfungerande termostater, eller nästan 2,25 TWh värme genom att reglera enligt Fall 3A^{I_{intern,Steg1}}. Jämfört med värmeenergianvändningen i de nybyggda icke-elvärmda småhusen i klimatzon III så motsvarar de ogripbara TWh-talen ca 163 000 st. respektive 192 000 st. småhus, eller ca 8,5 % respektive 10 % av Sveriges totala fjärrvärmeuttag för uppvärmning och tappvarmvatten av flerbostadshus i Sverige ... Men den typen av utdragna jämförelser kanske inte skall göras, även om det ibland är frestande!

12 Referenser

- [Abel 2000] Abel E. *Värmeöverföring, strömningssystem och fuktig luft*, 2000. Kompendium VIN086:2 2000. Institutionen för installationsteknik, Chalmers, Göteborg
- [Abel et al 1997] Abel E, Jagemar L, Widén P. *Energiteknik*, 1997. Institutionen för installationsteknik, Chalmers, Göteborg
- [ASHRAE 2009] ASHRAE Handbook – Fundamentals, 2009. ASCHRAE, USA
- [Andersson et al 1988] Andersson T. *Kirunametoden, för god energihushållning*, 1988. SABO, Stockholm
- [Andersson, Hägg 2011] Andersson L, Hägg S. *Equivalent temperature control of heat supply in multi-family dwellings*, 2011. Institutionen för Energi och Miljö, Chalmers.
- [Aronsson 1996] Aronsson S. *Fjärrvärmekunders värme- och effektbehov – Analys baserad på mätresultat från femtio byggnader*, 1996. Institutionen för Installationsteknik, Chalmers, Göteborg
- [Björk et al 2003] Björk C, Kallstenius P, Reppen L. *Så byggdes husen 1880-2000*, 2003. Fomas, Stockholm
- [Boverket 2007] Boverket. *ByggaBoDialogen – Utbildning i byggande för hälsosam innemiljö och effektiv energi- och resursanvändning*, 2007. Boverket, Karlskrona
- [Boverket 2010 a] *Teknisk status i den svenska bebyggelsen - resultat från projektet BETSI*, 2010. Boverket, Karlskrona.
- [Boverket 2010 b] *Energi i bebyggelse – tekniska egenskaper och beräkningar - resultat från projektet BETSI*, 2010. Boverket, Karlskrona
- [Boverket 2012] Boverkets författningssamling BFS 2012:9 BED 5, 2012. Boverket, Karlskrona
- [Boverket 2013] Boverkets författningssamling BFS 2013:14 BBR 20, 2013. Boverket, Karlskrona

- [Bring et al 1999] Bring A, Sahlin P, Vuolle M. *Models for Building Indoor Climate and Energy Simulation. A Report of Task 22, Building Energy Analysis Tools*. Version 1.02, 1999. Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm
- [Burström 2007] Burström P G. *Byggnadsmaterial – Uppbyggnad, tillverkning och egenskaper*, 2007. Studentlitteratur.
- [ByggaBoDialogen 2006] Utbildning i byggande för hälsosam inomhusmiljö och effektiv energi- och resursanvändning, 2006. Boverket, Karlskrona
- [Cho, Zaheer-uddin 2002] Cho S.H, Zaheer-uddin M. *Predictive control of intermittently operated radiant floor heating systems*, 2002. Energy Conversion and Management 44 (2003) 1333 - 1342
- [Energimyndigheten 2012] *Energistatistik för flerbostadshus 2011*, Rapport ES 2012:05, 2012. Energimyndigheten, Eskilstuna
- [Engvall et al 2009] Engvall K, Corner R, Emenius G, Hult M. *Upplevd inomhusmiljö och hälsa i Stockholms flerbostadshus 2005*, Rapport 1: Hälsomässigt Hållbara Hus 3H projektet. Rev sep 2009, Stockholm.
- [Engvall 1990] Engvall K. *Formulär 1990:3 – Några frågor om ditt inomhusklimat*, 1990. USK- Utrednings- och statistikkontoret, Stockholms stad. Stockholm.
- [Eriksson, Wahlström 2001] Eriksson J, Wahlström Å. *Reglerstrategier och beteendets inverkan på energianvändningen i flerbostadshus*, Temarapport 2001:04, 2001. EFFEKTIV
- [Gruber 2012] Gruber M. *Demand-based control of indoor climate in office buildings – Design of local and central feed-forward control systems for high comfort, low energy use and low peak power*, 2012. Avdelningen Energi och Miljö, Chalmers, Göteborg
- [Grünenfelder, Tödtli 1985] Grünenfelder W, Tödtli J. *The use of weather predictions and dynamic programming in the control of solar domestic hot water systems*, 1985. Zürich, Schweiz
- [Göteborgs stad 1968] Ritningar över flerbostadshusen i Gropensgård, Hammarkullen. Ritningarna inhämtades från stadsbyggnadskontoret i Göteborg.

- [Hagentoft 2001] Hagentoft, C-E. *Introduction to Building Physics*, 2001. Studentlitteratur, Lund
- [Isfält, Taesler 1975] Isfält E, Taesler r. *Choice of climate data to compute the energy requirements of buildings. A problem analysis*, 1975. KTH, Inst. för Uppvärmning och Ventilationsteknik, Stockholm.
- [ISO 2006] ISO 9972:2006, *Thermal performance of buildings - Determination of air permeability of buildings - Fan pressurization method*, 2006. SIS, Stockholm
- [Jensen 2009] Jensen L. *Reglering av värmesystem med framkoppling*, Rapport TVIT—09/7036, 2009. Lunds universitet. Lunds tekniska högskola. Avdelningen för installationsteknik, Institutionen för bygg- och miljöteknologi, Lund
- [Johansson et al 1989] Johansson G, Kolehmainen M, Waldner L. *Långtidsegenskaper hos radiatortermostatventiler*, Rapport R110:1989, 1989. Statens råd för byggforskning, Stockholm
- [Johansson 2011] Johansson P-O. *Effektivisering av fjärrvärmeanslutna byggnader*, 2011. Avdelningen för energihushållning, institutionen för energivetenskaper. Lunds tekniska högskola. Lunds universitet.
- [Johansson et al 2011] Johansson P-O, Fredtrixen S och Wollerstrand J. *Kombinerad fjärrvärme och fjärrkyla, Rapport 2011:8*, 2011. Svensk fjärrvärme, Stockholm
- [Jokisalo et al 2007] Jokisalo J, Kalamees T, Kurnitski J, Eskola L, Jokiranta K, Vinha J. *Infiltration simulation in a detached house – empirical model validation*. Proceedings of Clima 2007 WellBeing Indoors. Helsinki University of Technology, HVAC-Laboratory, Finland and Tampere University of Technology, Structural Engineering Laboratory, Finland.
- [Kärkkäinen 2010] Kärkkäinen A. *Gasfri påfyllning av värme- och kylsystem samt injustering av radiatorsystem*, TKK Dissertations 236, 2010. Aalto-universitetet, Tekniska högskolan, Fakulteten för ingenjörsvetenskaper och arkitektur, Institutionen för energiteknik. Espoo, Finland.
- [Mattsson 2004] Mattsson B. *Luftläckage i bostäder - litteraturstudier, modellering och mätningar*, 2004. Chalmers. Institutionen för byggnadsteknologi, Göteborg

- [Mjörnell 2011] Mjörnell K. *Teknikupphandling: Rationell isolering av klimatskärmen på befintliga flerbostadshus Rapport från etapp 1*, 2011. SP, Borås
- [Nilsson 1994] Nilsson P-E. *Heating and cooling requirements in commercial buildings – A duration curve model including building dynamics*, 1994. Institutionen för installationsteknik, Chalmers, Göteborg
- [Nilsson 2003] Nilsson P-E. *Achieving the Desired Indoor Climate: Energy Efficiency Aspects of System Design*, 2003. Studentlitteratur, Lund
- [Nylund, 1984] Nylund O. *Räkna med luftläckningen. Samspel byggnad – ventilation*. Rapport R1:1984, Bygghälsningsrådet.
- [Oldewurtel et al. 2010] Oldewurtel F, Gyqalistras D, Gwerder M, Jones C, Parisio A, Stauch V, Lehmann B, Morari M. *Increasing Energy Efficiency in Building Climate Control using Weather Forecast and Model Predictive Control*, 2010. Zurich, Schweiz
- [Osczevski, Bluestein 2005] Osczevski R, Bluestein M. *The new wind chill equivalent temperature chart*, Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 86 s 1453 – 1458, 2005. Boston, USA
- [Petersson 2008] Petersson, B-Å. *Tillämpad byggnadsfysik*, 2008. Studentlitteratur, Lund
- [Petersson, Werner 2003] Petersson S, Werner S. *Långtidsegenskaper hos lågflödesinjusterade radiatorsystem*, Rapport FOU 2003:88, 2003. Svensk fjärrvärme, Stockholm
- [Ruud 2003] Ruud S. *Reglerstrategier och beteendets inverkan på energianvändningen i bostäder*, Temarapport 2003:88, 2003. EFFEKTIV
- [Sandberg, Engvall 2002] Sandberg E, Engvall K. *Beprövad enkät – hjälpmedel för energiuppföljning, Delrapport 3*, 2002. MEBY, Stockholm
- [Sandin 1990] Sandin K. *Värme, luftöverföring, fukt*, 1990. Avdelningen för byggnadsfysik, Lunds Tekniska Högskola, Lund
- [Sasic et al 2006] Sasic A, Nord M, Andersson C, Taesler R, Gollvik L. *ENLOSS testing HAM-Tools – SMHI Common exercise 0. Calculation of energy use for space heating. Rapport 2005:6*, 2006. Chalmers tekniska högskola, Institutionen för Byggnadsfysik, Göteborg.

- [Sasic et al. 2006a] Sasic A, Taesler R, Andersson C, Nord M. Uppgraded weather forecast control of building heating systems, 2006. Research in Building physics and Building Engineering – Fazia Ge, Rao & Desmarais
- [Sasic et al. 2006b] Sasic A, Nord M, Andersson C, Taesler R, Gollvik L. ENLOSS testing with HAM-Tools. SMHI Common exercise 0. Calculation of energy use for space heating, 2006. Chalmers, Göteborg och SMHI, Norrköping
- [Schulz 2003] Schulz, L. *Normalårskorrigerig av energianvändning i byggnader - En jämförelse mellan två metoder*, 2003. EFFEKTIV
- [Široký et al. 2011] Široký J, Oldewurtal F, Cigler J, Privara S. *Experimental analysis of model predictive control for an energy efficient building heating system*, 2011. Applied Energy 88 (2011) 3079 – 3087.
- [Svensk standard 2003] SS-EN ISO 6946:2003 *Bygghkomponenter och byggnadsdelar - Värmemotstånd och värmegenomgångskoefficient – Beräkningsmetod*, 2003. SIS, Stockholm
- [Svensk standard 2007 a] SS-EN 15459:2007, *Byggnaders energiprestanda - Ekonomisk utvärdering av byggnaders energisystem*. SIS, Stockholm
- [Svensk standard 2007 b] SS-EN 15251:2007, *Indata för konstruktion och bestämning av energiprestanda i byggnader, avseende inomhusmiljö gällande luftkvalitet, termiskt klimat, ljus och buller*, 2007. SIS, Stockholm
- [Svensson et al 1984] Svensson A, Christophersen E, Ekman A, Hagen H. *Värmeåtervinning ur ventilationsluft. Några driftserfarenheter. Meddelande M84:15*, 1984. Statens institut för byggnadsforskning, Gävle.
- [Svensson et al 1985] Svensson A, Blomqvist C, Mellin A. *Värmeåtervinning ur ventilationsluft-Kv Malstenen Bomhus Gävle. Meddelande M85:10*. Statens institut för byggnadsforskning, Gävle.
- [Taesler 1972] Taesler R. *Klimatdata*, 1972. SMHI, Stockholm
- [Taesler, Isfält 1979] Taesler R, Isfält E. *Choice of climatological data for testing of computations of energy requirements in buildings*, 1979. KTH, Inst. för Uppv.o.Ventilations-teknik, Stockholm.
- [Taesler, Andersson 1984] Taesler R, Andersson C. *A method for solar radiation computations using routine meteorological observations*, 1984. Energy and Buildings Vol.7.

- [Taesler 1989] Taesler R. *Klimat, bebyggelseplanering, energibehov. Regionala och lokala variationer, exemplet Ängelholms kommun*, Rapport R5:1989, Statens Råd för Byggnadsforskning, 1989. Stockholm.
- [Taesler R 1991] Taesler R. *Climate and building energy management*, (invited lecture), Proceedings IFHP/CIB/WMO/IGU Conference on Urban Climate, Planning and Building, Kyoto, Energy and Buildings, Vol. 15-16 (1990/91).
- [Taesler et al 2006] Taesler R, Andersson C, Nord M, Gollvik. *Analyses of impacts of weather and climate on building energy performance – With special regard to urban climate characteristics*, 2006. SMHI, Norrköping
- [Taesler 2007] Taesler, R. *Patent NO. WO 2007/061357. Method of controlling the heating of a building at a desired level*. Sverige, 2007.
- [Tolstoy et al 1993] Tolstoy N, Borgström M, Högberg H, Nilsson J. *Bostadsbeståndets tekniska egenskaper, ELIB-rapport nr 6, TN:29*. Statens institut för byggforskning, Gävle.
- [Trüschel 1999] Trüschel A. *Värmesystem med luftvärmare och radiatorer – En analys av funktion och prestanda*, 1999. Institutionen för installationsteknik, Chalmers, Göteborg
- [Trüschel 2005] Trüschel A. *Värdet av injustering*, rapport 2005:134, 2005. Svensk fjärrvärme, Stockholm
- [Urdiani 2008] Urdiani E. *Weather forecast – Prestudy of installing a predictive heating control system based metrological forecast at Sandvik site in Sandviken*, 2008. Gävle Universitet
- [Wall, Bülow-Hübe 2003] Wall M, Bülow-Hübe H. *Solar protection in buildings – Part 2: 2000 – 2002*, Rapport EBD-R—03/1, 2003. Lunds universitet, avdelningen för Konstruktion och Arkitektur. Lund
- [Warfvinge et al 2008] Warfvinge C, Nilsson A, Werner E. *Undvik fel och fällor som ökar energianvändningen i byggnader*, 2008. Sveriges byggindustrier.
- [Zimmerman 2009] Zimmerman J P. *End-use metering campaign in 400 households in Sweden - Assessment of the Potential Electricity Savings*, 2009. Enertech, Rimandoule, Frankrike.

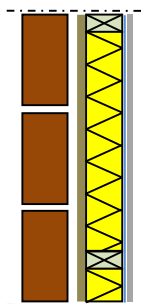
Bilaga 1 – Referensbyggnaden i ett nötskal

I denna bilaga anges kortfattad information om referensbyggnaden. Källor anges i anslutning till respektive uppgift, även om det i flera fall handlar om att källornas information bearbetats och anpassats till det aktuella projektet genom exempelvis medelvärdesbildning av resultat.

Allmänt

3 våningar	45 m x 12 m	540 m ²
18 lgh	6 lgh/vån	83,5 m ² /lgh (90 m ² /lgh inkl. andel av trappuppgång)
Invändig takhöjd	2,5 m	
[Björk et al 2003]		

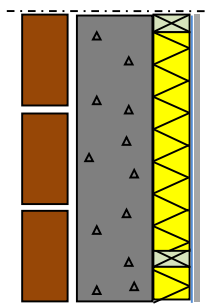
Väggar



Yttervägg – långsida

($U=0,41 \text{ W/m}^2\text{K}$)

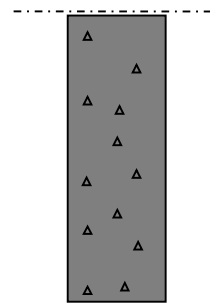
- Tegel 120 mm
- Luftspalt 30 mm
- Internit 3,5 mm
(Här ersatt med gips)
- Träregel 95/45 mm
- Minull 95 mm
- Gips 13 mm



Yttervägg – kortsida

($U=0,41 \text{ W/m}^2\text{K}$)

- Tegel 120 mm
 - Luftspalt 30 mm
 - Betong 120 mm
- [Björk et al 2003] +
[Göteborgs stad 1968]



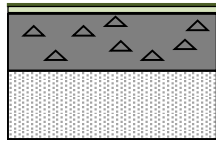
Mellanvägg

($U=3,79 \text{ W/m}^2\text{K}$, men värmetransport ignoreras)

- Betong 160 mm
- [Björk et al 2003]

[Björk et al 2003]

Bjälklag

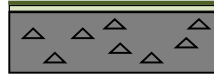


Bottenplatta

($U=0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$)

- Lättklinker 120 mm
(Här ersatt med lättbtg.)
- Betong 150 mm
- Träplatta 20 mm
- Linoleum 5 mm

[Björk et al 2003]



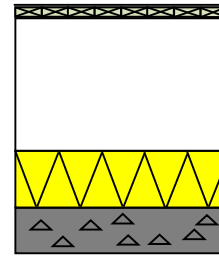
Mellanbjälklag

(Ingen

nettotransmission)

- Betong 160 mm
- Träplatta 20 mm
- Linoleum 5 mm

[Björk et al 2003]



Vindsbjälklag

($U=0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$)

- Betong 120 mm
- Minull 150 mm
- Luft 350 mm
- Råspont 23 mm
- Takpapp 4 mm

[Björk et al 2003]

Köldbryggor

Korrektionsfaktorer för köldbryggor för olika konstruktionsdelar, anslutningar, fönster mm. anges i IDA ICE på byggnadsnivå. Valda indata för detta är hämtade från kurslitteratur från Chalmers [Petersson 2008], som i sin tur baseras på en svensk standard [Svensk standard 2003] där rimliga värden ges i ett spann för respektive företeelse. I detta arbete har den övre (sämre) delen av spannet använts:

- Yttervägg möter innervägg: $0,04 \text{ W/(m K)}$
- Yttervägg möter yttervägg: $0,06 \text{ W/(m K)}$
- Fönsteranslutningar: $0,05 \text{ W/(m K)}$
- Tak möter yttervägg: $0,06 \text{ W/(m K)}$
- Grundkonstruktion möter yttervägg: $0,87 \text{ W/(m K)}$
- Ytterväggar, allmänt påslag: $0,04 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$
- Yttervägg möter inre bjälklag: $0,17 \text{ W/(m K)}$ ^A

^A Egentligen skall värdet här vara $0,05 \text{ W/(m K)}$. Men det angivna värdet är här förhöjt för att kompensera för uteblivna balkonger.

Infiltration (luftläckage)

Infiltrationen för referensbyggnaden är angiven på så kallad byggnadsnivå i IDA. Där har vindtrycksrelaterad infiltration valts med värdet $0,8 \text{ l/(s}\cdot\text{m}^2)$ vid tryckskillnaden 50 Pa.

Infiltration och resonemang kring val av storlek, statistik, mm finns mer utförligt beskrivet i huvudtexten.

Eftersom infiltrationsprincipen är vindtrycksrelaterad kopplas den till en så kallad vindtrycksprofil. Man kan manuellt välja att lägga in vindtryckskoefficienter för olika väderstreck och delar av klimatskal. Här väljs dock en av de tre fördefinierade vindprofiler som finns i IDA. Den valda vindprofilen kallas ”semi-exposed”.

Fönster

Alla fönster är 2-glas, kopplade	[Björk et al 2003]
Ingen yttre solavskärmning finns	[Göteborgs stad 1968]
Vissa fönster vädras efter bestämt schema	[Engvall et al 2009]
Persienner används för vissa fönster efter bestämt schema	[Engvall et al 2009]
• $U = 2,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ (samma för glas och karm)	[Boverket, 2010 a]
• SHGC (solfaktor) = 0,76 (absolutvärde)	[IDA ICE, standardvärde]
• T (direkttransmitterad andel) = 0,6764 (absolutvärde)	[IDA ICE, standardvärde]
• Förekommande persienner är mellanliggande	[kommunikation med Ryds glas]
• Solfaktor stängd persienn = 0,24 (80°)	[Wall, Bülow-Hübe 2003]
• Solfaktor halvöppen persienn = 0,38 (45°)	[Wall, Bülow-Hübe 2003]

Fönsterarean motsvarar 25 % av väggarean. Mer i detalj ser den typiska lägenheten ut såhär:

Sovrumsfönster	1,3 x 1,4 m x 2 st
Köksfönster	1,8 x 1,4 m
Vardagsfönster	1,4 x 1,4 m x 2 st.
Altandörr	0,9 x 2,2 m (40 % fönster, resten karm)
Toalettörr (gavel)	0,7 x 0,6 m

Av simuleringsskäl sätts fönstren på väggen för sovrums och kök ihop till ett enda ($3,1 \times 1,4 \text{ m}$) och på väggen för vardagsrum och sovrumsfönster sätts altandörr och två vardagsrumsfönster ihop till ett enda fönster ($4,2 \times 1,4$). Sovrumsfönstret behålls dock. Altandörrens karm fördelas ut över hela fönstret på vägg 3. [Björk et al, 2003]

Värmesystem

- Fjärrvärme	[Boverket, 2010 a]
- Vattenburen värme	[Boverket, 2010 a]

Luftbehandling

- CAV system [Boverket 2010 b]
- F-ventilation [Boverket 2010 b]
- 0,39 l/sm² [Tolstoy et al 1993]
- Kontinuerlig drift [Göteborgs stad 1968]
- Frånluftsdon i kök och badrum [Göteborgs stad 1968]

Belysning

Maximalt uttag: 151 W/lgh (se nedan) [Zimmerman 2009]

26 % av maximalt uttag kl 23-07, 54 % kl 07-15, 100 % kl 15-23 [Zimmerman 2009]

Enligt Övferholm och omräknat med avseende på antal personer enligt SVEBY används 790 kWh/hushåll vilket i medel är 90 W/lgh. Zimmerman visar en normal belastningskurva för ett hushåll. Tyvärr stämmer inte det aktuella hushållets medeleffekt med rikssnittet, men ett användarmönster framträder. Detta användarmönster ligger bakom tidsfaktorerna för det tidsschema som används i IDA ICE.

Personer

2,2 personer/lgh [kommunikation med SCB, Andö]
Närvarotid vardagar 15 h/dygn, helger 18 h/dygn . [Sveby 2009]

Här antaget och översatt med:

Vardagar är 33 % borta kl. 07-19 och 50 % borta kl. 19-21. [eget antagande]

Helger är 50 % borta kl. 09-21. [eget antagande]

Metabolism: 1,2 ± (sensibel: 70 W/m² kropp) [Svensk standard 2007 b]

Variabel Beklädnad, CLO: Vinter: 1,2 Sommar: 0,5 [INNOVA, 1996]

Apparater

Max: 434 W/lgh [Zimmerman 2009]

Maxeffekt kl. 15-23; 65 % av max kl. 07-15; 47 % av max kl. 23-07

[Zimmerman 2009]

Enligt SVEBY använder varje hushåll totalt 2000 kWh/lägenhet + 800 kWh/person. I referensbyggnadens fall blir det 3760 kWh/lägenhet.

- Kyl och frys: 902 kWh
- Belysning: 790 kWh
- Tork och tvätt: 263 kWh
- Standby: 116 W (1016 kWh)

Reduceras hushållselenergianvändningen med belysning och tvätt återstår 2700 kWh. Medeleffekten blir 308 W/lgh.

Zimmerman visar en normal belastningskurva för ett hushåll. Tyvärr stämmer inte det aktuella hushållets medeleffekt med rikssnittet, men ett användarmönster framträder. Detta användarmönster ligger bakom tidsfaktorerna för det tidsschema som används i IDA ICE.

Radiatorer

Under varje fönster finns en radiator som är exakt lika bred som fönstret. Varje radiator har därtill höjden 0,6 m.

Framledningstemp/returledningstemp: 60/40 [eget antagande]
n (effektkurvans exponent) = 1,28 [IDA ICE, standardvärde]
P-band = 2 (för vissa simulerade fall saknas termostatventil)

Värmeenergianvändning: 30 kWh/m² [Aronsson 1996]
VVC-förluster (internvärme): 25 W/lgh [kommunikation med SP, Ruud]
Värmeförluster av VVC ansätts i IDA som W/m².

Enligt Aronsson är genomsnittliga värmeförluster för VVC ca 300-400 kWh/lgh (här ansatt till 350 kWh/lgh). Vidare menar Ruud på SP att VVC konstant tillför varje lägenhet ca 25 W (220 kWh årligen). Andelen VVC-värme som tillförs lägenheterna är alltså: $220/350 = 63 \%$.

Energi för värmning av tappvarmvatten analyseras inte vidare i detta arbete. Att det alls tas upp här i denna sammanfattning för indata beror på att byggnaden på så vis kan justeras in så dess värmeenergiprestanda överensstämmer med relevant nationell jämförelsestatistik.

Rumstemperatur

Lägsta tillåtna inomhustemperatur i någon av referensbyggnadens lägenheter: 20,0 °C.

Medel för uppvärmningssäsongen (med motsvarande normal reglerstrategi, dvs. Fall 1B): 22,3 °C. [Tolstoy et al 1993], [Boverket 2010 b]

Solavskärmning

Antal vardagsrumsfönster där...	Vardagsrumsfönster i olika väderstreck			
	Norr	Öst	Syd	Väst
..persienner saknas eller är helt uppdragna	18 st	7 st	9 st	8 st
..persienner är helt nerdragna men uppvecklade	0 st	10 st	7 st	9 st
..persienner är helt nerdragna och stängda	0 st	1 st	2 st	1 st

Vädring

Vädringskategori	Aldrig/ mkt lite	Lite	Medel	Mycket	Väldigt mycket
Antal vädrade lägenheter	4	3	2	6	3
Klockslag	-	-	07.30 – 08.30 17.30 – 18.00	06.30 – 07.30 17.30 – 18.30	07.00 – 19.00
Öppningsandel	-	-	5,6 %	4,6 %	3,2 %

Bilaga 2 – Förångning från fasad

I beräkningsprogrammet IDA ICE regnar det aldrig. Följaktligen beaktas här inte förångning från fuktiga väggar och tak. Vid samtal med representanter för de företag som säljer väderprognosstyrning som konceptet idag, visade det sig dock att de tar hänsyn till regn och fuktiga fasader. För att utvärdera huruvida fuktiga väggars och taks inverkan på värmeeffektbehovet är negligerbart eller ej, görs här därför en överslagsberäkning. Notera att beräkningen bygger på ett antal grovhuggna antaganden, som här dock bedöms vara tillräckligt noggranna för att ligga till grund för ett preliminärt svar på om förångning med gott samvete kan försummas eller inte.

Strategin blir att ta reda på hur klimatskalets ytemperatur påverkas av fuktinnehåll och förångning. Sänker förångning från regnvatten klimatskalets ytemperatur så mycket att det nämnvärt påverkar värmebalansen? För att besvara frågan behövs ett antal indata så som rumstemperatur, utomhustemperatur, klimatskalets fuktinnehåll (ytmaterial), solintensitet, marktemperatur, mm. Den största förenklingen som här görs är att ett enda tillfälle betraktas, å andra sidan är det ett medeltillfälle för hela eldningssäsongen, som här antas pågå oktober till och med april. Samtliga värden för beräkningen är därför dygnsmedelvärden för den perioden.

För överslagsberäkningen placeras referensbyggnaden i Stockholm, vars utemedeltemperatur för eldningssäsongen är 1,1 °C. Luftens relativa fuktighet under eldningssäsongen pendlar mellan 70 - 90 %. Att beräkna ett medelvärde för relativ fuktighet blir fel, eftersom begreppet är just relativt. Bättre då att använda sig av en representativ månad ur ett temperaturperspektiv, vilket visar sig vara december vars relativa fuktighet är 87 %. För uppgifter om klimatdata används som underlag här den minst sagt innehållsrika boken med det för tillfället passande namnet *Klimatdata*, som kom ut i början på sjuttioalet [Taesler 1972]. Boken bygger i huvudsak på kontinuerliga mätningar från perioden 1931-1960.

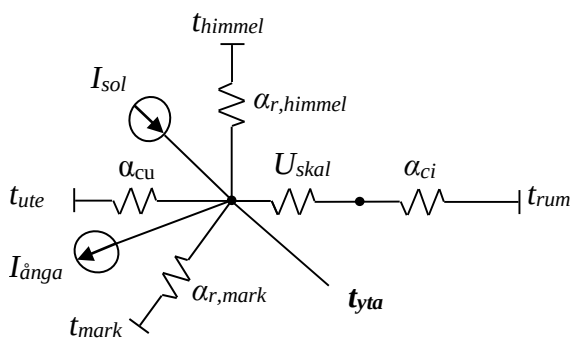
En byggnads klimatskal utbyter utvändigt sett värme genom konvektion, strålning och förångning.

Det konvektiva värmeutbytet drivs av temperaturdifferensen mellan klimatskalets och luftens temperatur och påverkas ganska kraftigt av vindhastighet. Samtidigt sker ett långvågigt strålningsutbyte mot himlen och omgivande ytor, så som andra byggnader, mark, träd, mm. Vidare tillförs klimatskalet kortvågig värmestrålning från solen och därutöver finns även ett evaporativt värmeutbyte (förångning) från en fuktig fasad till luften där drivkraften är ytornas och luftens olika fuktinnehåll.

Den beskrivna värmebalansen illustreras bra med så kallad kretsanalogi, se Figur 1. För att kunna beräkna klimatskalets ytemperatur behövs ytterligare några klimatdata, utöver de som redan tagits upp, närmare bestämt: solintensitet, molnmängd och vindhastighet. Med samma förutsättningar och källa som tidigare fås att den dygnsgenomsnittliga solintensiteten på byggnadens alla väggar är 91 W/m² förutsatt att det är klart väder. Periodens genomsnittliga molnmängd anges vara 0,71. Denna faktor reducerar solintensiteten med 71 % vilket gör att

den verkliga medelsolintensiteten blir ynka 26 W/m^2 sett över hela perioden, utslaget över dag och natt. Av förenklingsskäl görs här inga ytterligare reduktioner för solvinklar, och taket som är ca 20 % av referensbyggnadens klimatskal ovan mark tilldelas samma solintensitet som de vertikala väggarna. Detta är som sagt en förenkling, alternativet hade varit att räkna fram en medelsolvinkel för byggnaden, men det är onödigt bökit för en överslagsberäkning som denna. Periodens medelvindhastighet är ca 3 m/s.

Slutligen antas att värmelagring i klimatskal kan bortses från och att rumstemperaturen under eldningssäsongen är 20°C konstant.



Figur 1 Kretsanalogi för beräkning av klimatskalets ytemperatur

För att få fram värden för de ingredienser i Figur 8.2 som fortfarande är okända används ett antal vedertagna, men ofta förenklade samband (vissa av dem även något anpassade efter den aktuella uppgiften här). De fysikaliska sambanden bygger på studielitteraturen *Introduction to Building Physics* [Hagentoft 2001], där även uppgifter om materialdata hämtas:

Värmeutbyte mot himmelstemperatur (långvågig strålning)

Vid klart väder är himlens temperatur alltid lägre än luftens temperatur. Sett ur ett byggnadsperspektiv blir inverkan på strålningsförlusterna till den relativt kalla himlen större ju större del av byggnadens klimatskal som "ser" himlen. Ett horisontellt tak "ser" en större andel himmel än vad en vertikal fasadvägg gör. Vidare är himlens temperatur lägre vinkelrätt ovanför en horisontell yta än vad den är vinkelrätt mot en fasad, där strålningsutbytet sker genom en längre sträcka genom den "smutsiga" atmosfären. Följaktligen är en stor men låg byggnad med platt tak mer utsatt för värmeutstrålning mot himlen än en lika stor, men hög byggnad med liten takarea. För att ta hänsyn till de geometriska förutsättningarna vid beräkning av värmeutstrålning mot himlen tas en genomsnittlig och viktad himmelstemperatur fram för hela klimatskalet, se ekv 8.6, där det antas att bara halva fasadarean "ser" himlen, resten av fasaden "ser" marken. Mer om värmestrålningsutbyte mot mark senare.

Beräkningen av himmelstemperaturen baseras på följande två samband för klart väder:

$$t_{himmel, horisontal} = 1,2 \cdot t_{ute} - 14 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{ekv 8.4})$$

$$t_{himmel, vertikal} = 1,1 \cdot t_{ute} - 5 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{ekv 8.5})$$

Himmelstemperaturen för en genomsnittlig del av en byggnads klimatskal kan därför tecknas:

$$t_{himmel} = \frac{(1,2 \cdot t_{ute} - 14) \cdot A_{tak} + (1,1 \cdot t_{ute} - 5) \cdot \frac{A_{fasad}}{2}}{A_{tak} + \frac{A_{fasad}}{2}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{ekv 8.6})$$

Som Figur 8.2 antyder behövs även kännedom om värmeöverföringskoefficient för strålning, α_r , till himlen. Notera att resonemanget fortfarande bara beaktar klart väder.

$$\alpha_r = 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot \bar{T}_m^3 \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C})] \quad (\text{ekv 8.7})$$

Där $\bar{T}_m$ är medeltemperaturen för alla ytor som deltar i värmeutbytet (här räknas himlen som en yta).

$$\bar{T}_m^3 = (273 + \frac{t_{yta} + t_{himmel}}{2})^3 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{ekv 8.8})$$

Eftersom klimatskalets ytemperatur ännu är okänd gissas den första gången och när beräkningarna i slutet kommit fram till ett värde för ytans temperatur finjusteras beräkningarna ännu en eller ett par gånger, en så kallad iterativ process. Det relativa strålningstalet, ε , för referensbyggnadens röda tegel sätts till 0,93 för långvågig strålning och Stefan Boltzmanns konstant, σ , som beskriver värmestrålningen från en kropp är $5,67 \cdot 10^{-8}$.

Hur är det då när det inte är klart väder, dvs. som oftast? Klimatstatistiken enligt tidigare visade att molnmängden, M , är hela 71 % för eldningssäsongen. För att få med det i beräkningarna reduceras här värmeöverföringskoefficienten för långvågig strålning med molnmängden. Det slutliga uttrycket för värmeöverföringskoefficienten blir då:

$$\alpha_{r, himmel} = (1 - M) \cdot 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot \bar{T}_m^3 \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C})] \quad (\text{ekv 8.9})$$

Värmeutbyte mot marktemperatur (långvågig strålning)

Referensbyggnadens tak har inget som helst strålningsutbyte mot marken, men det har fasaderna, dock bara till hälften enligt tidigare och i likhet med strålningsutbytet mot himlen beror strålningsutbytet mot mark på en värmeöverföringskoefficient.

Markens temperatur är av uppenbara skäl en viktig ingrediens i detta sammanhang. Om man någon gång borde beakta värmelagring så kanske det är här. Berg i dager har sannolikt ofta en helt annan temperatur än exempelvis ett träd eller en gräsmatta. Av förenklingsskäl antas här helt sonika att markens temperatur är den samma som luftens temperatur, plus en grad.

Värmeutbyteskoefficienten för värmestrålningen beräknas här enligt ekv 8.7 tidigare.

Värmetillförsel från sol (kortvågig strålning)

Solvärmen mot klimatskalet är naturligtvis väldigt beroende på vilken vägg som avses, men uppgiften om 26 W/m² (molnighet beaktat) som uppgavs innan gäller som ett genomsnitt för alla väggar. Här antas att hela byggnaden har samma absorptionsfaktor, α_{sol} , för solens kortvågiga strålning och den ansätts till ett värde som motsvarar den röda tegelväggens, vilket är 0,75. Då fås följande uttryck för tillförd solvärme till en medelyta på referensbyggnaden:

$$I_{sol} = \alpha_{sol} \cdot I_{sol,0} \quad [\text{W/m}^2] \quad (\text{ekv 8.10})$$

Värmeutbyte mot uteluften (konvektion)

Det konvektiva värmeutbytet mot uteluften är jämnt fördelat över hela klimatskalet.

Värmeöverföringskoefficienterna för konvektion beräknas här som:

$$\alpha_{cu} = \frac{5 + 4,5 \cdot u - 0,14^2 + 5 + 1,5 \cdot u}{2} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})] \quad (\text{ekv 8.10})$$

Detta ger ett medelvärde för lovart- och läsidan, där u är vindhastigheten i m/s och får gälla för hela klimatskalets area.

Evaporativt värmeutbyte mot uteluften (förångning)

Så närmar vi oss pudelns kärna: förångningen från fasad.

Resonemanget bygger på en jämförelse av fuktinnehåll vid klimatskalets yttersta skikt mot uteluften och uteluftens fuktinnehåll, eftersom skillnaden dem emellan är den drivande potentialen enligt tidigare. Fuktinnehållet i klimatskalets yttersta skikt är starkt beroende av materialet. Just vid regn och strax därefter är det rimligt att anta att klimatskalets yta är en våt yta oavsett material, men uttorkningsförloppet därefter är starkt materialberoende och hänger samman med materialens porstorleksfördelning. Små porer har förmågan att suga åt sig och binda fukt, stora porer kan det inte. Därför är det rimligt att tro att material med stor andel småporer är fuktmättade i större utsträckning och över längre tid än vad fallet vore för material med mestadels stora porer. Referensbyggnadens brända tegel har stora porer och skulle efter ett regn därför inte vara lika fuktmättat som exempelvis en putsad fasad, där putsens cementpasta utslutande består av små och vattensugande porer [Burstrom 2007].

Om referensbyggnaden hade haft en putsad fasadyta, skulle skillnaden i förångning mellan upphållsväder och regn bli låg. Förvisso skulle förångningen från fasaden över tid bli stor, men snabba förändringar som inträder i och med regn och efterföljande torkning skulle bli små och det är just den förändringen som är av intresse här eftersom det är värmesystemets förmåga att kompensera för förändringar som analyseras. Referensbyggnadens tegelfasad är dock normalt sett inte mättad och skillnaden i förångning blir därmed större mellan regn- och uppehållsväder än för putsade fasader.

För att vara på säkra sidan antas här att fasadens ytskikt vid regn blir helt blöt och att luften allra närmast klimatskalets yta får en relativ fuktighet på 100 %, baserat på klimatskalets ytemperatur. Just när det regnar antas att förångningen från klimatskalet är låg eftersom luftens relativa fuktighet då också är ca 100 %, förvisso baserad på luftens temperatur, men ändå. En tid efter regnet antas här att fasaden fortfarande är helt blöt, samtidigt som uteluftens relativa fuktighet lite kvickare sjunker ner till ett ”normalläge”, som för eldningssäsongen i Stockholm var ca 87 % enligt tidigare.

I den kommande jämförelsebetraktelsen beräknas skillnaden för byggnadens värmebehov med avseende på regnblöta klimatskal som:

$$\Delta \dot{Q}_{\text{värmebehov}} = U \cdot A \cdot (t_{yta, \text{torr}} - t_{yta, \text{blöt}}) \quad [\text{W}] \quad (\text{ekv 8.11})$$

Innan vi kommer dit måste vi alltså känna till ytemperaturerna då det regnat respektive varit uppehållsväder en tid. För att kunna beräkna dem måste vi tyvärr först veta hur mycket vatten som förångas från klimatskalet. Vätskemassflödet, g , beräknas som:

$$g = (x_{m(t_{yta})} - x_{(t_{ute})}) \cdot \frac{\alpha_{cu}}{c_{pl}} \quad [\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})] \quad (\text{ekv 8.12})$$

Där $x_{m(t_{yta})}$ är luftens vatteninnehåll [$\text{kg}_{\text{vatten}}/\text{kg}_{\text{luft}}$] alldeles i anslutning till ytskiktet. Uteluftens vatteninnehåll betecknas $x_{(t_{ute})}$ medan luftens värmekapacitet [$\text{J}/(\text{kg } ^\circ\text{C})$] betecknas c_{pl} . Den konvektiva värmeöverföringskoefficienten, α_{cu} , beräknas enligt ekv 8.10 tidigare.

Eftersom ekv 8.12 behöver uppgifter om klimatskalets ytemperatur, som ännu inte kunnat beräknas, blir det även här frågan om en iterativ process.

Värmeeffekten som avges från klimatskalets yta pga. förångning beräknas därefter som:

$$I_{\text{ånga}} = g \cdot r \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (\text{ekv 8.13})$$

Där ångbildningsvärmes, r , är 2 500 [kJ/kg] för det aktuella temperaturområdet.

Beräkning av klimatskalets yttemperatur

Nu när alla indata och beräkningssamband är kända, kan en sammanvägd ekvation för ytans temperatur, baserad på kretsanalogin i Figur 8.2, tas fram. Eftersom vätskemassflödet och värmekoefficienterna för strålning beror av den efterfrågade ytans temperatur, blir alltså lösningen enligt tidigare en iterativ process.

$$t_{yta} = \frac{\frac{d}{\lambda_{skal}} \cdot t_{rum} + \alpha_{cu} \cdot t_{ute} + \alpha_{r,himmel} \cdot t_{himmel} + \alpha_{r,markr} \cdot t_{mark} + I_{sol} - g \cdot r}{\frac{d}{\lambda_{skal}} + \alpha_{cu} + \alpha_{r,himmel} + \alpha_{r,mark}} \quad (\text{ekv 8.14})$$

Om klimatskalets yta är torr blir den sista delen i täljaren ($g \cdot r$) lika med noll. Med referensbyggnadens area, värmeisoleringsförmåga, osv. fås följande temperaturer för medelfallet vid uppehållsväder respektive direkt efter regnväder:

$$t_{yta, "torr"} = 2,1 \text{ } ^\circ\text{C} \quad t_{yta, blöt} = 1,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Beräkning av värmeeffektförluster och sänkt inomhustemperatur

Som tidigare nämnts avses här, och i beräkningarna ovan, en situation där det har regnat under en period och fasaden blötts upp ordentligt, men där det övergått till uppehållsväder och uteluften antagit sitt medeltillstånd för säsongen beträffande temperatur, relativ fuktighet, mm.

Enligt ekv 8.11 nyss ökar byggnadens totala värmeeffektbehov med ca 450 W då klimatskalet är blött jämfört med då det är "torrt", vilket motsvarar ca 0,3 W/m² tempererad golvarea (A_{temp}).

Hur mycket påverkas då rumstemperaturen av detta? Baserat på ekv 7.21 i Kapitel 7, med givna indata för referensbyggnaden med avseende på värmeisolering, luftläckage och ventilationsflöde, fås att rumstemperaturen sjunker ca 0,2 °C förutsatt att värmesystemet inte kompenserar för den extra värmeförlusten.

Kan man då hävda att inverkan av regn kan negligeras? Spontant framstår både 0,3 W/m² och 0,2 °C som överkomligt och till det kan även nämnas att beräkningsresultaten utgår från att samtliga fasader blir blöta, från marknivå till tak vilket i praktiken skulle kräva vinkelrätt slagregn från alla väderstreck, alltså en situation som inte ens den mest hårdade västkustbo upplevt! Vid mer rimliga antaganden om att taket och kanske en, eller max en och en halv, fasad blöts upp vid regn fås betydligt lägre inverkan utslaget på hela byggnaden. Sannolikt skulle även det kunna ses som ordentligt tilltaget med tanke på att det nästan alltid finns ett överskjutande takslut som skyddar åtminstone delar av fasaden.

Sammanfattningsvis konstateras därför att det är helt acceptabelt att negligera förångning från fasad och att den regnfria tillvaron i IDA ICE duger gott även här.