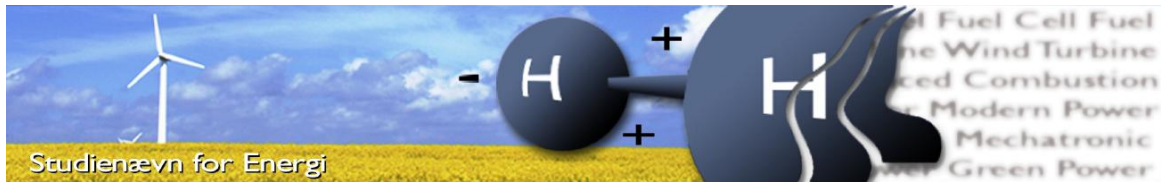


# Effektanalyse af distributionsnetværk, med integration af fremtidens el- termiske belastninger



Afdeling for Energiteknik  
Afgangprojekt, august 2013  
Udarbejdet af Mikael Kieffer Sørensen





<b>Titel:</b>	Effektanalyse af distributionsnetværk med integration af fremtidens el-termiske belastninger
<b>Semester:</b>	Bachelorprojekt
<b>Projekt periode:</b>	01-05-2013 til 15-08-2013
<b>Deltager:</b>	Mikael Kieffer Sørensen
<b>Vejleder:</b>	Filipe Migvel Faria Da Silva
<b>Bi-vejleder:</b>	Weihao Hu
<b>Projekt gruppe:</b>	EE7D

---

Mikael Kieffer Sørensen



**AALBORG UNIVERSITET**  
STUDENTERRAPPORT

<b>Oplagstal:</b>	<b>4</b>
<b>Sideantal:</b>	<b>116</b>
<b>Bilagsantal:</b>	<b>0</b>
<b>Appendiks:</b>	<b>4</b>
<b>Afleveringsdato:</b>	<b>15-08-2013</b>

Dette projekt handler om at undersøge indvirkningen af et større antal varmepumper i et konkret distributionsnet, med det formål, at undersøge om en intelligent styring kan forbedre udnyttelsesgraden.

Til dette er der udarbejdet en forslag til en ny konceptmodel, der kan medvirke til at fastlægge fleksible belastningers fleksibilitet. Denne er anvendt til den udarbejde referencesystem, med gode erfaringer.

Referencesystemet der simulerer tilkobling af varmepumpen til distributionsnettet, med det formål, at leverer et realistisk effektforbrug på timebasis over et år. Systemet er afprøvet ved beregning, og giver en realistisk billede af forbruget.

Derudover er der udarbejdet en simplificerede strategi til en adaptiv intelligent styring, der styrer efter vejrprognoser, COP-værdi og markedspriser, resultaterne var overraskende gode og havde en bedre proformens på alle områder.

Udnyttelsesgraden blev med disse dele testet, og projektet konkludere af den intelligente styring kan forbedre udnyttelsesgraden på det konkret distributionsnet.

*Rapportens indhold er frit tilgængelig, men offentliggørelse (med kildeangivelse) må kun ske efter aftale med forfatteren.*



## Abstract

This project is about the investigation of the impact of a large number of heat pumps in a particular distributions network, in order to investigate whether an intelligent control can improve the utilization in the network.

For this there is developed a new proposal for a concept model that can help to define flexible loads flexibility. This is used for the developed reference system with good experience.

The reference system that simulates the coupling of the heat pump to the distribution network, with the aim to provide an realistically power consumption on an hourly basis over a year. The system is tested by calculation, and gives a realistic picture of consumption.

In addition, a developed and simplified approach for an adaptive intelligent control system that controls by weather forecasts, COP value and market prices, the results were surprisingly good and had a better performer in all areas.

The utilization rate, where with these parts tested and the project concluded that the intelligent control can improve the utilization of the specific distributions network.



# Forord

Denne rapport er udarbejdet på Aalborg Universitet, afdelingen for Energiteknik, foråret 2013 af Mikael Kieffer Sørensen. Rapporten er et bachelorprojekt for diplomingeniør i bæredygtig energiteknik med specialisering i elektrisk energiteknik. Formålet med projektet er at analysere de fremtidige belastninger i et bestemt distributionsnetværk, når der implementeres større andele af el-termiske enheder. Rapporten henvender sig til alle el-ingeniører, der har interesse i beregning og planlægning af distributionsnetværk, samt forsyningselskaber der ejer og vedligeholder distributionsnetværk i Danmark.

Følgende personer skal takkes. En særlig tak til Filipe Migvel Faria Da Silva for hans hjælpsomhed og gode vejledning under projektforløbet. Endvidere en tak til Weihao Hu, der har forslået dette projekt og igennem hele projektet har formået at håndtere de mange fremsatte ideer og kommenteret disse på en sandfærdig måde, selvom ikke alle ideerne var lige anvendelige.

## Referencevejledning

Der vil løbende blive refereret til informationer, der er fundet i litteratur, rapporter, bøger, hjemmesider samt udleveret information fra vejledere. Disse kilder kan findes i litteraturlisten sidst i rapporten. Metoden, som benyttes til referering af kilder er ISO 690, hvilket betyder, at hver kilde får tilknyttet et fortløbende nummer, eks. (1) for kilde nummer 1. Hvis der henvises til den samme kilde flere gange benyttes samme reference nummer. Litteratur, rapporter og bøger i litteraturlisten er specificeret med; Forfatter, titel, ISBN, udgave, bogforlag og udgivelsesår. Hjemmesider er specificeret med; Forfatter, titel på hjemmesiden, URL og dato for udlæsning. Reference på figurer er placeret i den tilhørende figurtekst.

Figurer, ligninger og tabeller nummereres fortløbende og efter, hvilket kapitel de tilhører, f.eks. er figur 2.5 femte figur under kapitel 2. Alle henvisninger og referencer i rapporten benytter disse numre.

Følgende software er brugt i rapporten:

- MATLAB – for behandling af data
- MATLAB – for simulering af modeller

Indholdet på den vedlagte CD-ROM er følgende:

- PDF-fil af rapporten.
- MATLAB filer for udarbejdede programdele.
- MATLAB behandlede datafiler.
- Beregnede test data.
- Udleverede og generelle data.





# Nomenklatur

Symbol	SI enheder	Beskrivelse
$A$	$[m^2]$	Boligareal
$B$	$[m]$	Boligbredde
COP	$[-]$	Coefficient Of Performance
$C_p$	$[J/kg \cdot K]$	Specifik varmekapacitet
$D$	$[^\circ]$	Deklinationsvinkel (solvinkel)
$\Delta E_{Tk}$	$[^\circ C]$	Prognosefejl
$H$	$[m]$	Bolighøjde indvendig
$I_N$	$[A]$	Netstrøm
$J^{(k)}$	$[-]$	Jacobian matrice
$L$	$[m]$	Boliglængde
$P_n$	$[W]$	Den aktive effekt
$P_{Net}$	$[W]$	Den samlede optagene effekt
<i>p. u.</i>	$[-]$	Per unit
$P5 - P16$	$[W]$	Oplyste nodebelastninger på distributionsnettet
$Q$	$[J]$	Energi
$Q_n$	$[VAr]$	Den reaktive effekt
$Q_{ind}$	$[J]$	Den tilførte energi
$Q_{out}$	$[J]$	Den omsatte energi
$Q_{stored}$	$[J]$	Den lagrede energi
$R_m$	$[m^2 \cdot K/W]$	Isolans
$r_n$	$[\Omega]$	Netresistans
$S_n$	$[VA]$	Den tilsyneladende effekt
$S_p$	$[^\circ C]$	Setpunkt
$T$	$[^\circ C]$	Temperatur
$T_{amp}$	$[^\circ C]$	Udvendig temperatur
$T_{ws}$	$[^\circ C]$	Fremløbstemperatur (varmesystem)
$t_i$	$[^\circ C]$	Valgt tanktemperatur
$U$	$[W/m^2 \cdot K]$	U-værdi
$U_n$	$[V]$	Nominelle netspænding
$V$	$[m^3]$	Volumen
$V_i$	$[^\circ]$	Indsfaldsvinkel
$x_n$	$[\Omega]$	Netreaktans

---

$Y$	$[1/\Omega]$	Admitansen
$z_n$	$[\Omega]$	Netimpedans
$\rho$	$[kg/m^3]$	Densitet
$\tau$	$[-]$	Progressionskonstant
$\cos\theta$	$[-]$	Faseforskydningsvinkel

# Indholdsfortegnelse

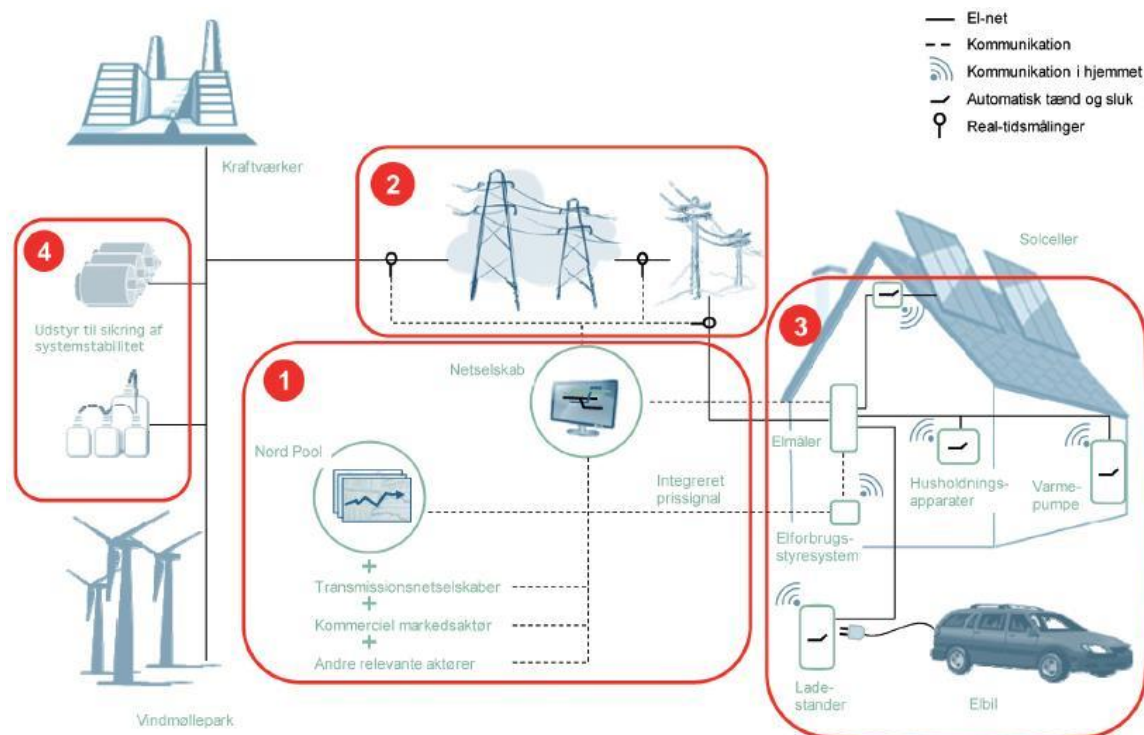
1	Indledning .....	1
2	Problemformulering .....	3
2.1	Problemafgrænsning .....	3
3	Kravspecifikationer .....	4
3.1	Varmepumper .....	4
3.2	Konceptmodel .....	4
3.3	Distributionsnettet .....	5
3.4	Usikkerheder .....	6
4	Beskrivelse og analyse af konceptmodel.....	7
4.1	Konceptmodel for fleksible belastninger .....	7
4.2	Styring af den fleksible belastning.....	9
4.3	Analyse af referencesystem for varmepumpen .....	12
4.3.1	Fastlæggelse af kontekst .....	12
4.3.2	Analyse af varmesystemet med konceptmodellen .....	16
4.3.3	Beskrivelse af beregningsmetoder i referencesystemet .....	18
4.3.4	Beskrivelse af simuleringsofbygning.....	22
4.4	Kontrol og validering af referencesystem .....	27
5	Det konkrete distributionsnet fra HEF .....	28
5.1	Beskrivelse af det konkrete distributionsnet .....	28
5.2	Beskrivelse af beregningsmetode .....	31
5.2.1	Validering af den numeriske model .....	35
5.3	Udarbejdelse af nøgleformler .....	35
5.3.1	Estimering af belastningerne P5-P16 .....	36
5.3.2	Fastlæggelse af nøgleformler for de tre hovedsektorer .....	40
5.3.3	Fastlæggelse af nøgleformel til fremskrivelse af varmepumper .....	41
5.3.4	Samling af nøgleformler og fordelingstal for belastningerne P5-P16.....	44
6	Design af det adaptive styresystem .....	47
6.1	Beskrivelse af de valgte betingelser .....	47
6.1.1	Komfort på rumtemperatur .....	47
6.1.2	Kostpris på fleksmarked .....	48
6.1.3	Effektivitet på varmepumpen.....	49
6.2	Beskrivelse af den intelligente styringsstrategi.....	50
6.3	Beskrivelse af prognoseberegninger for den intelligente styring. ....	52

6.4	Implementeringen af det udarbejdede referencesystem. ....	57
6.4.1	Betingelser og opdeling i grupper .....	57
6.4.2	Ændringer i referencesystemet .....	59
6.4.3	Forskelle på den individuelle og intelligente styring. ....	60
6.5	Beskrivelse af en simpel testsimulering.....	63
7	Analyse af effektflowberegninger.....	66
7.1	Fastlæggelse af test og afgrænsning.....	66
7.2	Beregning af den samlede fremskrevne effekt.....	69
7.3	Beregning af effektflow.....	70
8	Konklusion.....	75
9	Perspektivering .....	77
10	Appendiks 1.....	78
	Den totale tilførte energi $Q_{ind}$ .....	78
	Den totale energiomsætning $Q_{out}$ .....	81
	Den totale lagrede energi $Q_{stored}$ .....	86
	Opstilling og udledning af anvendte formler .....	87
11	Appendiks 2.....	90
	Oversigt over hovedscript "simulering_cal.m" .....	90
	Oversigt over delscript "Delenergi_cal.m" .....	92
	Oversigt over delscript "Ini_bolig.m" .....	92
	Oversigt over delscript "DelLast_cal.m" .....	93
12	Appendiks 3.....	96
13	Appendiks 4.....	101
14	Litteraturliste .....	104

# 1 Indledning

Samfundets strategi om at gøre Danmark 100 % uafhængig af fossile brændstoffer i 2050 ved implementering af forskellige vedvarende energiteknologier i energisektoren, såsom biomasse, vind, sol, varmepumper osv., stiller store krav til den energitekniske infrastruktur. Elsektoren er en central brik i denne strategi, og i henhold til den nyeste energiaftale fra marts 2012, hvor en bred vifte af folketingets partier stod bag, skal 35 % af Danmarks energiforbrug i 2020 komme fra vedvarende energikilder, og 50 % af Danmarks elforbrug komme fra vindenergi. Samtidig med dette, skal de kulfyrede konventionelle kraftværker løbende udfases eller omlægges til kraftvarmeanlæg, der kan udnytte disse energiteknologier (1).

Ud fra disse betragtninger skal elnettet i Danmark gennemgå en fundamental struktur ændring, der i særlig grad kan håndtere den øgede produktion fra vindenergi, som er kendt for en meget fluktuerende el-produktion "Som vinden blæser!". Derudover vil belastningen af elnettet blive yderligere øget, når større dele af samfundet løbende får installeret flere solcelleanlæg (Photovoltaic cells PV), varmepumper, ladere til hybrid- og elbiler osv., efterhånden som teknologierne bliver rentable. Disse faktorer har stor indflydelse på, hvordan strukturændringerne af det overordnede transmissionsnet og det lokale distributionsnet skal udformes i fremtiden.



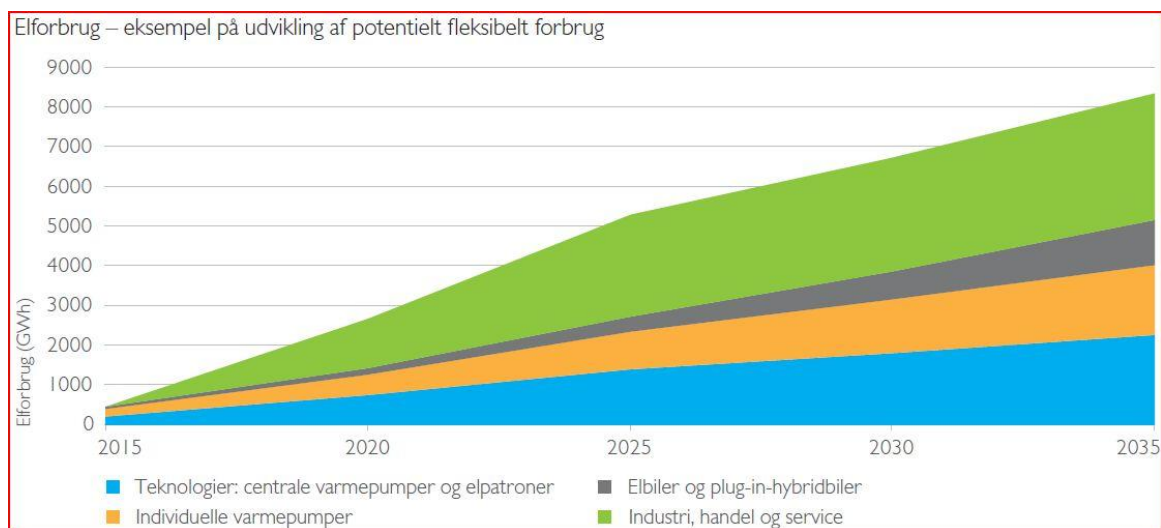
Figur 1.1 Eksempel på et sammensat "Smart grid" (2)

For at opretholde elnettets stabilitet og reducere de økonomiske investeringer er det, som en konsekvens af disse strukturændringer, nødvendigt at introducere nye alternative og fleksible energisystemer på elnettet, der kan balancere og operere fleksibelt på dette stadig mere fluktuerende og komplekse distributionsnet, se Figur 1.1. Disse energisystemer skal være intelligente og kunne forudsige lastniveauet i distributionsnettet på baggrund af historiske målte

data, nuværende målte data og fremtidige estimerede data. Disse systemer er i øjeblikket det bedste svar på, hvordan fremtidens strukturændringer kan imødekommes. Som det ses af Figur 1.1, kan et sådant system opdeles i fire hovedgrupper, hvor der i dette projekt fokuseres på samspillet imellem 2. og 3. hovedgruppe.

- 1) Opsamling, koordinering og dataudveksling imellem elnettets aktører.
- 2) Opsamling og måling af distributionsnettets tilstand.
- 3) Opsamling, afregning og styring af forbruget hos forbrugere, der har tilsluttet forskellige fleksible enheder.
- 4) Tilkobling af udstyr til elnettet, der kan sikre større systemstabilitet, såsom synkronkompensatorer og SVC'er.

Som led i samfundets 2020 strategi og opfølgning på klimakommissionens rapport, har Energinet bestilt en analyse om fleksibelt elforbrug "Kortlægning af potentialet for fleksibelt elforbrug i industri, handel og service", som er udarbejdet af Ea Energianalyse 2011 (3). Af denne fremgår det, at det teoretiske potentiale i 2020 for fleksibelt elforbrug er ca. 2700 GWh/år, eller elforbruget for ca. 500.000 almindelige husstande på landsplan, hvis potentialet kan realiseres fuldt ud på markerne. Disse tal er vist i Figur 1.2.



Figur 1.2 Potentielt fleksibelt elforbrug fra 2015 til 2035 (4)

Som det ses, indgår individuelle varmepumper som en del af dette fleksible elforbrug, og vil derfor potentielt kunne implementeres i distributionsnettet (LV 400V). Udgangspunktet for projektet er derfor, i forhold til at optimere elnettets udnyttelsesgrad, at analysere hvilken indflydelse disse enheder samlet set kan få på et konkret distributionsnet, når der anvendes intelligent styring, der kan flytte belastningen væk fra spidsperioder og samtidig tage højde for den tilstedeværende vindenergi. Herved kan det vurderes, hvor meget det konkrete distributionsnet vil opleve af forbedret lastudnyttelse over en given tidsperiode, med de pågældende belastningsforhold.

Analysen i dette projekt kan derfor danne grundlag for en udviklingsformel, der kan bruges til at estimere fremtidige udvidelser af det konkrete distributionsnet, når der implementeres et større antal fleksible varmepumper kontrolleret med en intelligent styring. Dette kan herefter direkte omsættes til en økonomisk besparelse i investeringen.

## 2 Problemformulering

Danmarks strategi om et fossilfrit samfund i 2050 stiller store krav til elsektorens infrastruktur, og med vedtagelsen af energiaftalen fra marts 2012, skal 50 % af el-produktionen komme fra vindenergi. For at imødekomme disse nye strukturændringer, er det nødvendigt at indføre nye intelligente og fleksible energisystemer i distributionsnettet, der kan være med til at opretholde stabiliteten i elnettet, samt optimere lastniveauet i distributionsnettet, når der er meget vindenergi tilstede. En stor del af de fleksible enheder er varmepumper, der både kan bruges til rumopvarmning og brugsvand.

Projektets udgangspunkt er derfor at analysere disse enheders indvirkning på distributionsnettet, når de implementeres med en intelligent styring, og herved beskrive udnyttelsesgraden i forhold til et konkret distributionsnet hos Himmerland Energiforsyning (HEF) og de gældende belastningsforhold i det tilsluttede område.

*”Når fleksible varmepumper implementeres med intelligent styring, hvor stor indflydelse kan de få for distributionsnettet, i forhold til udnyttelsesgraden?”*

For at analysere dette vil følgende blive gennemført:

- Kravspecifikationer til varmepumper, konceptmodel og distributionsnettet.
- Design af konceptmodel for tilslutning af varmepumper til elnettet.
- Udarbejdelse af model for beregning af effektflow til det konkrete distributionsnet.
- Design af basismodel og reguleringsstrategi for optimal koordinering af varmepumper.
- Detaljeret normal tilstandsanalyse af netbelastningen i det konkrete distributionsnet.

### 2.1 Problemafgrænsning

- De beregnede modeller analyseres kun i forhold til det konkrete distributionsnet.
- Der ses kun på effektflow i distributionsnettet ved normale tilstande, og der ses bort fra for andre dimensionerende faktorer.
- Det konkrete distributionsnet er et radialnet, og det antages, at omkobling til andre tilslutningspunkter (20 kV, 10 kV) ikke er mulig.
- Beregning af de tilkoblede belastninger P5-P16, set i relation til fremtidig udvikling, er ikke oplyst af HEF og udregnes derfor på basis af egne estimerede formler.
- Antallet af potentielle fleksible enheder i det konkrete distributionsnet frem mod 2020 estimeres ud fra tilgængelige oplysninger og statistik for Støvring by og Rebild kommune.

## 3 Kravspecifikationer

For at fastlægge fundamentet for projektet og klargøre, hvad der lægges mest vægt på, opstilles her nogle krav til varmepumperne, konceptmodel og det konkrete distributionsnet. I projektet har detaljeringsgraden af dataene på belastningerne i distributionsnettet P5-P16 en stor betydning for de endelige resultater. Juraen i Danmark omkring datalovgivningen tillader dog ikke tredjemand at få indsigt i forbrugerdata, der kan udpege bestemte forbrugere. Derfor kan de opstillede krav blive begrænset af denne jura og de endelige resultater være påvirket heraf.

### 3.1 Varmepumper

Med henvisning til pilotprojektet "Fra vindkraft til varmepumper" (5), som viste, at der er stor forskel på de installerede varmepumpers aktuelle COP-værdi (Coefficient Of Performance) og den øjeblikkelige energieffektivitet, forudsættes det derfor i dette projekt, at de installerede varmepumpers gennemsnitlige COP-værdi er minimum 3,0 årligt. Endvidere skal varmepumperne have indbygget frekvensstyret pumpesystem, så effektiviteten kan reguleres optimalt ud fra den pågældende udvendige temperatur.

De individuelle varmepumper kan opdeles i tre hovedgrupper luft/luft, luft/vand og væske/vand, hvor den tredje gruppe i daglig tale er et jordvarmeanlæg med et lukket rørsystem nedgravet i jorden, som indeholder en væske/kølemiddel. I dette projekt anvendes kun luft/vand, da denne hovedgruppe kan tilsluttes direkte til den eksisterende varmeinstallation, med enten et gulvvarme- eller radiatorsystem. Luft/luft systemer har en dårlig varmekapacitet, og væske/vand systemer kræver en noget større investering og mere plads for implementering. Det vurderes derfor, at hovedparten af de installerede varmepumper i fremtiden vil være luft/vand systemer, og at de to øvrige grupper ikke har nogen betydning for analysen i dette projekt.

Til varmepumpesystemet er der tilsluttet en højisoleret buffertank på 160 l og højisoleret 110 l varmvandsbeholder til brugsvand. Varmetabet i tankene sættes til et gennemsnit på 5 % set over en tidsperiode på 24 timer. Herudover simuleres varmepumperne med en ekstra højisoleret varmvandstank på 2000 l, som ligeledes har et gennemsnitligt varmetab på 5 %.

Varmepumpen kan producere en varmtvandstemperatur på 80°C, når fremløbstemperaturen til varmepumpen er minimum 26°C.

Varmepumpen har monteret en ekstern styrefunktion, der kan slukke/tænde anlægget med henblik på at lade en selvstændig intelligent styring håndtere den overordnede kontrol, uden dette har indflydelse på brugerens egne indstillinger af anlægget.

### 3.2 Konceptmodel

De brugerbestemte komfortindstillinger er i dette projekt minimum 20°C, maksimum 26°C og setpunkt 23°C, alle målt i en højde af 170 cm over færdigt gulv. Setpunktet, som den individuelle styring vil søge at ramme, dog kun hvis den eksterne intelligente styring tillader dette, ligger imellem minimums- og maksimumgrænserne.

Varmekapaciteten beregnes på baggrund af summen af energien i varmetanke ((50...80)° - 45°C), gennemsnitsværdier af energikapacitet for boliger i Danmark med en gennemsnitlig lokal boligstørrelse på 143 m<sup>2</sup> brutto samt det brugervalgte komfortområde.



Varmeforbruget beregnes ud fra data på udvendige gennemsnitstemperaturer, gennemsnitlig solindstråling, opdeling i energimærkningsklasser og gennemsnitlig boligstørrelse. Boligen modelleres som et stort rum med et setpunkt, hvor varmetabet er fordelt jævnt på loft og alle vægge i forhold til den udvendige temperatur.

Konceptmodellen forudsætter, at varmemeforbruget afregnes pr. time ud fra en strategi om, at tarifafregningen af elforbruget til netselskabet i fremtiden foregår fleksibelt og på timebasis. Dette muliggør implementeringen af den intelligente styring, så forbrugeren kan opleve en reduceret elregning samtidig med, at belastningen styres ud fra ændringer i distributionsnettets tilstand. Det skal dog nævnes, at systemet ikke eksisterer på nuværende tidspunkt, men der arbejdes kraftigt fra Energinets side på at få et lignende system op at køre, så digitaliseret energimåling på timebasis er mulig at styre, og oplysninger om det lokale distributionsnets tilstand er til rådighed for den intelligente styring.

Styring af konceptmodellen må ikke forringe komforten i boligen. Derfor skal de indtastede temperaturgrænser overholdes. Endvidere skal styringen kunne håndtere ændringer i varmekapaciteten og varmemeforbruget i boligen, uden at det påvirker komforten.

Den overordnede intelligente styring af konceptmodellen skal kunne implementeres i alle distributionsnet, hvor der løbende sker ændringer i belastningsforhold og tilstande. Derfor vil en selvregulerende (adaptiv) styring være en optimal løsning.

I varmemeforbruget indregnes en naturlig ventilation på  $0,35 \text{ l/s} \cdot \text{m}^2$ , et varmemeforsyningstab i rørinstallationer på 10 % af det til en hver tid værende varmemeforbrug i boligen, varmetab fra installerede tanke, et internt energitilskud på  $5 \text{ W/m}^2$  for personer og elektrisk udstyr, et energitilskud fra solstråling ud fra målte værdier samt et tab i rørsystem på 20 % af energiforbruget for varmt brugsvand. Der ses dog bort fra energitilførsel fra andre varmekilder i boligen såsom installerede brændeovne, solvarmeanlæg osv., da dette begrænser databehovet for udregningerne betydeligt og vurderes til ikke at få nogen videre indflydelse på analysen af den intelligente styring og udnyttelsesgraden.

### 3.3 Distributionsnettet

Da aktuelle oplysninger og nøjagtigheden af belastningsdata P5-P16 har stor betydning for de endelige resultater, skal alle data brugt i dette projekt være på timebasis og målt i det pågældende distributionsnet. Ligeledes skal temperatur-, sol- og vinddata være gennemsnitsmålinger for det pågældende distributionsområde.

Basisbelastningen på distributionsnettet tager udgangspunkt i data fra 2007, hvilket herefter vil være belastningens udgangspunkt (år nul). Udviklingen af denne belastning frem til 2020, vil blive udregnet på baggrund af nogle specificerede udviklingsformler, som inkluderer en estimering af det øgede antal varmepumpeinstallationer *uden intelligent styring*, fordelt på forskellige belastningsområder såsom landbrug, bolig, industri, offentlige institutioner osv. Denne fordeling er vigtig, da det estimerede antal varmepumper langt fra er fordelt jævnt i disse områder. Endvidere skal alle beregninger på belastningsdata ske med en nøjagtighed på  $10^{-4}$ .

Vindmøllekapaciteten tilsluttet distributionsnettet fra år nul ændres ikke. Dette følger ikke den generelle udvikling i samfundet frem mod 2020, hvor der ifølge energiaftalen marts 2012 (1) på landsplan skal installeres 1800 MW landbaseret vindkraft, hvilket svarer til en nettoforøgelse på

500 MW, når ældre vindkraftsanlæg nedtages sideløbende. Dette svarer til en stigning i forhold til 2011 niveau på ca. 16 %, og i forhold 2007 niveau på ca. 18 %, udregnet på basis af energistyrelsens energistatistik 2011 (6).

Da de maksimale belastningsniveauer i det pågældende distributionsnet ikke kan oplyses af HEF af hensyn til konkurrenceforhold, beregnes disse ud fra belastninger i år nul, hvor de største belastninger i alle linjer fastsættes som de normale normfaktorer anbefalet af Dansk Energi for dimensionering af distributionsnet op fra 10 kV op til 60 kV.

Det pågældende distributionsnet skal ikke ændre struktur eller størrelse frem mod 2020, hvilket ikke er realistisk i praksis, men er i dette projekt en forudsætning for, at analysen kan tydeliggøre virkningen af den intelligente styring og udnyttelsesgraden i distributionsnettet.

### **3.4 Usikkerheder**

Som det fremgår af kravspecifikationerne er næsten alle data baseret på gennemsnitsværdier, estimeringer og vurderinger af tilgængelig information og statistik. Det er derfor klart, at usikkerheden i udregningerne er store. Det er særligt den ukendte sammensætningen af belastningerne P5-P16, der får en stor indflydelse på usikkerheden i denne analyse. Der stilles derfor ingen yderligere krav til usikkerheder udover, at alle beregninger af de brugte data udføres med minimum  $10^{-4}$  nøjagtighed. Det skal derfor understreges, at beregninger i dette projekt ikke er et endeligt resultat, men en estimeret prognose, der kan give en indikation af udnyttelsesgraden på det pågældende distributionsnet i fremtiden, hvis der implementeres et større antal varmepumper med intelligente styring samtidig med, at installation af vindkraft øges. Det vurderes derfor, at usikkerheden i dette projekt ikke kan fastsættes.

Nu hvor fundamentet og rammebetingelserne for projektet og analysen er fastlagt, vil der herefter blive fokuseret på konceptmodellen for varmepumpen, hvor beskrivelse af opbygning og sammensætningen gennemgås, ligesom metoderne til beregning af varmekapaciteten, varmeforbruget og styring af konceptmodel fastlægges.

## 4 Beskrivelse og analyse af konceptmodel

I dette kapitel vil konceptmodellen blive gennemgået og analyseret med udgangspunkt i de rammebetingelser, der er opstillet under kravspecifikationen. Dette skulle gerne resultere i nogle beregningsformler, der på timebasis og ud fra boligmassens forskellige aldersklasser kan udregne de forskellige varmebehov, varmekapaciteter, temperaturer og varmepumpens energiforbrug fra distributionsnettet. Endvidere beskrives varmepumpens styring, der enten håndteres selvstændigt af varmepumpen selv eller sammen med en overordnet ekstern intelligent styring, som får oplysninger om tilstanden i distributionsnettet, vejdata på temperaturer, solindfald og vind samt timebaserede kostpriser fra et centralt serversystem.

Når der i dette projekt refereres til individuelle varmepumper eller fleksible belastninger, henvises der kun til installationer i helårsbeboelse. Der findes også andre installationsområder som f.eks. sommerhuse, campingvogne, værksteder og lagerbygninger osv. Disse har et helt andet belastningsmønster end det normale, men i dette projekt antages energiforbruget til disse enheder at være af ubetydelig størrelse. Derfor antages dette energiforbrug ikke at have indflydelse på analysen. Endvidere, når enhederne betragtes som individuelle, lægges der i denne betydning, at styringen udelukkende afhænger af de lokale tilstande i og omkring den enkelte bolig.

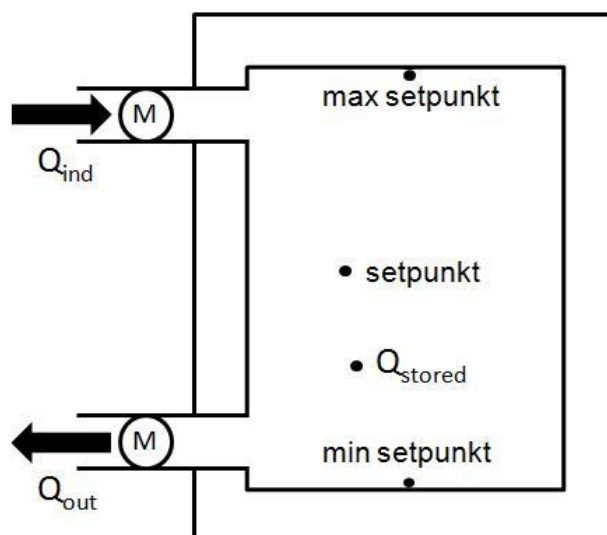
### 4.1 Konceptmodel for fleksible belastninger

Som nævnt i indledningen udgør individuelle varmepumper en del af det potentielle samlede fleksible elforbrug i Danmark. Hvis disse kunne realiseres fuldt ud på markederne, kan det samlede energiforbrug estimeres til ca. 500 GWh/år på landsplan. Dette svarer til produktionen fra havvindmølleparken Horns Rev II.

For at kunne lave en optimal styring af disse fleksible belastninger, er det vigtigt at få defineret de lokale vejforhold og den kontekst de er installeret i. Dette gøres ved hjælp af et fleksibelt og brugerdefineret moduleringsystem, der samtidig også tager højde for, at disse enheder kan kontrolleres af en ekstern intelligent styring, uden det påvirker komforten i boligen. Det er så her konceptmodellen kommer ind i billedet som en simpel og anderledes metode til definition og beskrivelse af disse fleksible belastninger, da der i forvejen ikke eksisterer nogen standardiseret metode til dette.

Grunden til, at dette ikke har været aktuelt før nu, er, at der traditionelt set kun er foretaget udbygning af distributions- og transmissionsnettet på baggrund af de forventede spidsbelastningers størrelser. Men efterhånden som vindenergien er blevet en stor del af elnettet, er fluktuationen i elnettet forøget meget. En intelligent styring af de fleksible belastninger er derfor nu meget aktuell og kan være med til at spare samfundet for mange milliarder kr. på øget udbygning og stabilisering af distributions- og transmissionsnettet.

Idéen er, at konceptmodellen tænkes som et moduleringsystem, der kan simulere forskellige typer af fleksible belastninger, hvor projektet her analyserer varmepumper. I konceptet skal energibalancen for det pågældende system betragtes som en niveaustyring af en tank, hvor tankens indhold er energikapaciteten for den fleksible belastning til alle tidspunkter. Se Figur 4.1.



Figur 4.1 Oversigt over konceptmodellens idegrundlag

I Figur 4.1 er  $Q_{ind}$  den tilførte energi,  $Q_{out}$  er energiomsætningen, og  $Q_{stored}$  størrelsen af den til en hver tid lagrede energi. Min. og maks. setpunkt er energistørrelser, som beregnes ud fra de brugervalgte værdier samt de fysiske begrænsninger på den fleksible belastning. Setpunktet beregnes ligeledes ud fra en brugervalgt størrelse, der beskriver systemets ønskede opnåede arbejds punkt. Energilancen for konceptmodellen kan derfor udtrykkes således. Se ligning 4.1.

$$Q_{ind} + Q_{out} + \frac{d}{dt} Q_{stored} = 0 \quad ( 4.1 )$$

Nu er der stor forskel på forskellige typer af fleksible belastninger, nogle har en stor  $Q_{stored}$ , andre har ingen, nogle er meget dynamiske, mens andre knap så meget, nogle har altid et energiforbrug, mens andre kun bruger energi på valgte tidspunkter. I Tabel 4.1 er nogle af de forskellige fleksible belastninger vist med estimering af den mulige tidsforskydning. Tiderne i tabellen afhænger selvfølgelig meget af antal personer i boligen, hvilken komfort der ønskes, samt hvilket tidspunkt på året der er tale om. Men det giver en indikation af hvor fleksible de forskellige belastninger er.

Typer	Timer
Vaskemaskine	1 – 12
Fryser	4 – 8
Køleskab	2 – 4
Elkomfur	0.5 – 1
Genveksanlæg	2 – 8
Elbiler	8 – 14
Varmepumper	1 – 10

Tabel 4.1 Eksempler på hvor meget fleksible belastninger ca. kan flyttes i tid

Fælles for dem alle er, at de i større eller mindre grad kan forskyde belastningen i tid, uden det påvirker brugerens komfort. Formålet med konceptmodellen er derfor både at kunne estimere belastningsstørrelsen  $P_{Net}$  på distributionsnettet og samtidig estimere, hvordan de individuelle fleksible belastninger fordeler sig over tid. I denne sammenhæng skal estimeringerne som minimum være timebaserede værdier.

Det skal dog påpeges, at ligning 4.1 kan betragtes som en dynamisk udregning, men i dette projekt er det "steady state" størrelser der tales om, altså gennemsnitsstørrelser imellem to målte timebaserede værdier, hvorfor alle de beregnede værdier vil være gennemsnitsværdier.

Når  $P_{Net}$  således er estimeret over en given tidsperiode, danner disse værdier et belastningsmønster, der af den intelligente styring kan bruges til at optimere belastningen i distributionsnettet, når de lokale tilstande og forhold er kendt.  $P_{Net}$  skal her betragtes som den aktive middeleffekt udregnet som Watt, der i forhold til konceptmodellen er  $Q_{ind}$  eller en del af  $Q_{ind}$ . Forholdet imellem disse enheder kan udtrykkes således. Se ligning 4.2.

$$1 \cdot W = 1 \cdot \frac{J}{s} \quad ( 4.2 )$$

Herudover skal  $P_{Net}$  betragtes som det samlede effektforbrug tilsluttet distributionsnettet, og hvis det antages, at alle de fleksible enheder er fordelt jævnt på alle tre faser i distributionsnettet, vil den samlede belastning af nettet kunne udtrykkes med følgende ligning 4.14.3.

$$P_{Net} = U_N \cdot I_N \cdot \sqrt{3} \cdot \cos\theta \quad ( 4.3 )$$

Hvor  $U_N$  er den nominelle spænding fase/fase,  $I_N$  den variable netstrøm,  $\cos\theta$  er faseforskydningsvinklen imellem spænding og strømmen genereret af den fleksible belastning. Vinklen er en vigtig faktor at få fastlagt, da den kan have stor indflydelse på belastningsniveauet i distributionsnettet, men i dette projekt er  $\cos\theta$  fastsat til 1.0.

Opsummeret er konceptmodellen altså en metode til at estimere belastningen på distributionsnettet og samtidig estimere fleksibiliteten af denne belastning. Dette gøres på baggrund af fire overordnede, beregnede og definerede elementer

- $Q_{ind}$ , den totale tilførte energi.
- $Q_{out}$ , den totale omsatte energi.
- $Q_{stored}$ , den totale tilgængelige lagrede energi
- Setpunkter, brugervalgte afgrænsninger og definering af arbejdsområde.

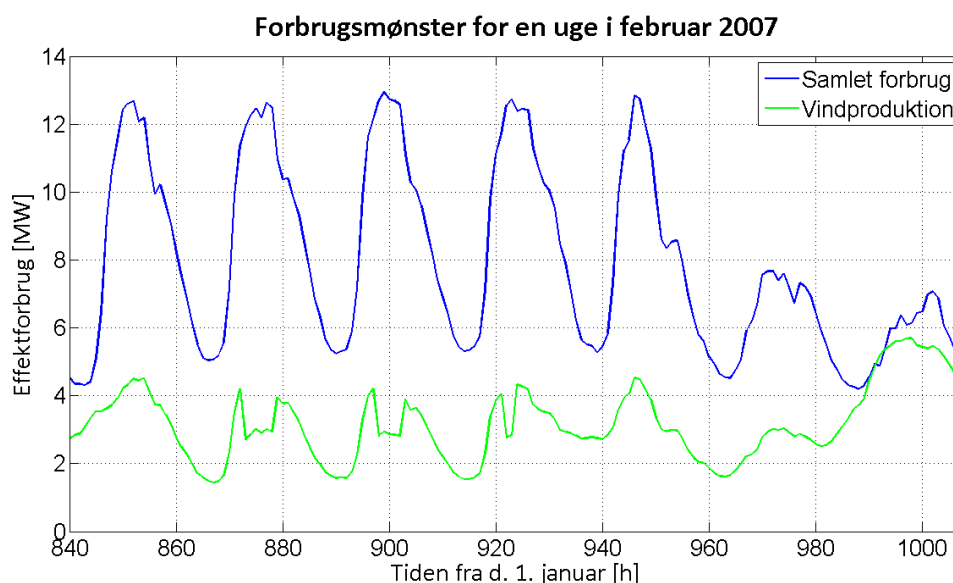
Når de fire elementer er tilstrækkelig estimeret, kan belastningsmønsteret af den fleksible belastning  $P_{Net}$  estimeres. Disse beregninger bruges så aktivt af den intelligente styring til at flytte belastningen væk fra tidspunkter med spidsbelastning, når det forudsættes, at data om tilstande og vejrforhold i de lokale distributionsnet er tilgængelige for styringen.

## 4.2 Styring af den fleksible belastning

Der findes på nuværende tidspunkt ingen standarder for kategorisering af disse fleksible belastninger, men behovet for disse standarder vil ændre sig meget, når Energinet i den

nærmeste fremtid får implementeret den datacentral, der skal levere alle oplysningerne om de lokale distributionsnet.

For at belastningen kan betragtes som fleksibel, defineres minimumskravet for de fleksible belastninger i dette projekt som flytning af belastningen med en time for alle tidspunkter i løbet af et år. En time er valgt, fordi de fleksible belastninger skal operere på det frie spot- og/eller reguleringsmarked, hvor prisen fastsættes pr. time. I øvrigt vil tider mindre end en time ikke medføre nogen mærkbar ændring af belastningsmønstret på distributionsnettet, når spidsbelastningsperioderne varer op til en time. Se Figur 4.2.



Figur 4.2 Forbrug og vindproduktion for en uge i februar

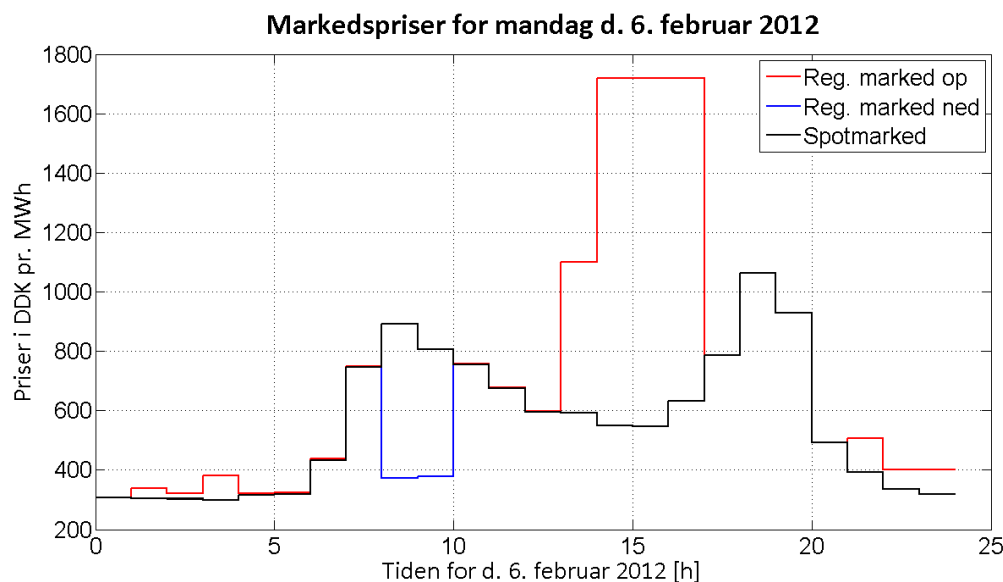
Figur 4.2 viser målte værdier for en almindelig uges samlet belastning, på det konkrete distributionsnet for den første uge i februar 2007, fra mandag d. 05.02. til søndag d. 11.02, ligeledes vises den samlede produktion af vindenergi for samme uge på det konkrete distributionsnet.

Maksimumskravet for de fleksible belastninger er der reelt ingen grænser for, men et optimalt bud og indenfor et rimeligt praktisk niveau kunne være 36 timer, hvilket svarer til, hvad der opereres med på spotmarkedet i dag.

På spotmarkedet skal alle købs- og salgsordre være registreret inden kl. 12<sup>00</sup> hver dag. Disse er så gældende for den efterfølgende dag (fra kl. 00<sup>00</sup> til kl. 23<sup>59</sup>), hvilket medfører, som spotmarkedet er i dag, at der skal bydes på elprisen helt op til 36 timer frem i tiden, herefter fastlåses prisen indtil næste budrunde aktiveres.

På reguleringsmarkedet opereres der efter et andet princip, her er det suverænt den netansvarlige, Energinet, der styrer balanceringen af transmissionsnettet. Når forudsigelserne fra produktionen og forbruget afviger, skal der leveres op- eller nedreguleringskraft for at stabilisere transmissionsnettet. På dette marked kan operatørerne med en minimumskapacitet på 10 MW stille en vis del af deres kapacitet til rådighed for reguleringsmarkedet. Prisen skal udbydes kl. 12<sup>00</sup> dagen før og er ligesom ved spotmarkedet gældende fra midnat og de næste 24 timer.

Det sker ofte i Danmark, at der brug for reguleringskraft, da mængden af vindenergi i distributionsnettet er kraftigt forøget de senere år, hvilket har stor indflydelse på stabiliteten i elnettet. Op- og nedreguleringskraften kan dog aktiveres med minutters varsel, og ændringen skal minimum være en time. Priserne på dette marked er dog noget højere end på spotmarkedet, se Figur 4.3, da op- og nedreguleringen skal ske meget hurtigt, den udbudte reguleringskraft skal stå til rådighed for Energinet og må i det reserverede tidsrum ikke bruges til andet.



**Figur 4.3 El-priser fra Nordpol d. 6. februar 2012**

Set fra forbrugernes side afhænger el-prisen af disse markeder, men den afregnes ikke efter disse markeder. Hvis en kWh koster kr.2,00 inklusiv alt, så er ca. kr.1,50 faste afgifter til staten og betaling til vedvarende energitiltag. Hermed er det kun den resterende del på ca. kr.0,50, som er den varierende el-pris. Denne pris udbydes af flere aktører, og det er op til forbrugeren selv at finde den billigste udbyder. Endvidere indeholder den udbudte pris også 25 % moms til staten og dækning af aktørens administrationsomkostninger, dette medfører således, at den reelle spotpris, som den intelligente styring her skal håndtere, er mindre end 20 % af den afregnede kWh til forbrugeren. Den store fastprisandel medfører således en meget lille økonomisk motivation til at flytte belastningen hen over dagen, og den intelligente styring vil ikke være interessant set fra forbrugernes side på de eksisterende markeder.

Styreteknisk er de to eksisterende el-markeder ikke særligt optimale set i forhold til de fleksible belastninger. For det første fordi disse individuelt ikke har en stor effekt, hvilket gør, at reguleringskraft ikke er nogen mulighed. Dette kunne dog ændres, hvis et større antal enheder styres samlet i en gruppe, så minimumeffekten på 10 MW opnås. For det andet er 36 timers fastlåst forudsigelse på spot- og reguleringsmarked forbundet med betydelig dårlig kontrolfleksibilitet og stor usikkerhed. Usikkerheden kunne dog reduceres, hvis styringen benytter tilgængelige vejrprognoser, men disse er også forbundet med en vis usikkerhed 36 timer frem i tiden.

For at få udnyttet de fleksible belastninger fuldt ud og motivere forbrugernes interesse i at flytte belastningen hen over dagen med en implementeret intelligent styring, skal spotmarkedet ændres, eller der skal oprettes et nyt fleksmarked, hvor der arbejdes med flydende tarifafregning med et interval på en time, samtidig skal en stor del af de nuværende faste

afgifter til staten gøres fleksible og følge markedspriserne. For den videre analyse i dette projekt antages det derfor, at dette fleksmarked er oprettet, og den omtalte centrale serverstation, hvor oplysninger om det lokale distributionsnet er til rådighed, er sat i drift.

Styring af de fleksible belastninger vil i projektet blive betragtet fra kundens side. De optimale kontrolparametre, der medregnes i den intelligente styring, når der i dette projekt fokuseres på varmepumper, er som følgende.

- Valgte rumtemperaturer, komfort.
- Prisniveau på fleksmarked, kostpris.
- Varmepumpens effektivitet, COP.
- Vindenergiproduktion, vind.

Gennemgang og opbygningen af den intelligente styring kan ses i kapitel 6

For at kunne analysere virkningen af den intelligente styring på det konkrete distributionsnet i forhold til ændringer i effektflowet skal der udarbejdes et gennemsnitligt referencesystem, hvor varmepumpen er installeret med en normal individuel styring.

Denne simulering skal designes efter indhentede data, statistik for Rebild kommune og bygningsreglementets gennemsnitsværdier.

Dette vil blive gennemgået i det følgende afsnit 4.3, hvor den fremsatte konceptmodel vil blive anvendt til beskrivelse af varmepumpen.

### **4.3 Analyse af referencesystem for varmepumpen**

I dette afsnit analyseres referencesystemet og den kontekst, hvor varmepumpen i gennemsnit forventes at blive installeret. Boligen, der defineres her, eksisterer derfor kun teoretisk og baseres på data fra Rebild kommunes varmeplan oktober 2010 (7), Danmarks statistik boligopgørelse 1. januar 2011 (8), Den lille blå om varme 2008 (9), Harmonisering af grundlaget for beregning af energitilskud fra vinduer (10) og diverse faglitteratur. Analysen beskriver alle vigtige antagelser og beregningsmetoder i dette afsnit, men den detaljerede gennemgang og beregning af de anvendte formler vedlægges i 10Appendiks 1. Ligeledes er Matlab simuleringsfilen og tilhørende underfiler vedlagt på Cd'en bagerst i rapporten.

Udgangspunktet for referencesystemet er derfor at simulere installationen af en varmepumpe i en helårsbolig for Støvring kommune 2007 tilkoblet det konkrete distributionsnet hørende under HEF. Der er dog siden 2007 foretaget sammenlægning af kommuner landet over, og området hører nu under Rebild kommune, hvilket forklarer brugen af varmeplan for Rebild kommune.

Fremgangsmetoden til analyse af referencesystemet vil være som følgende.

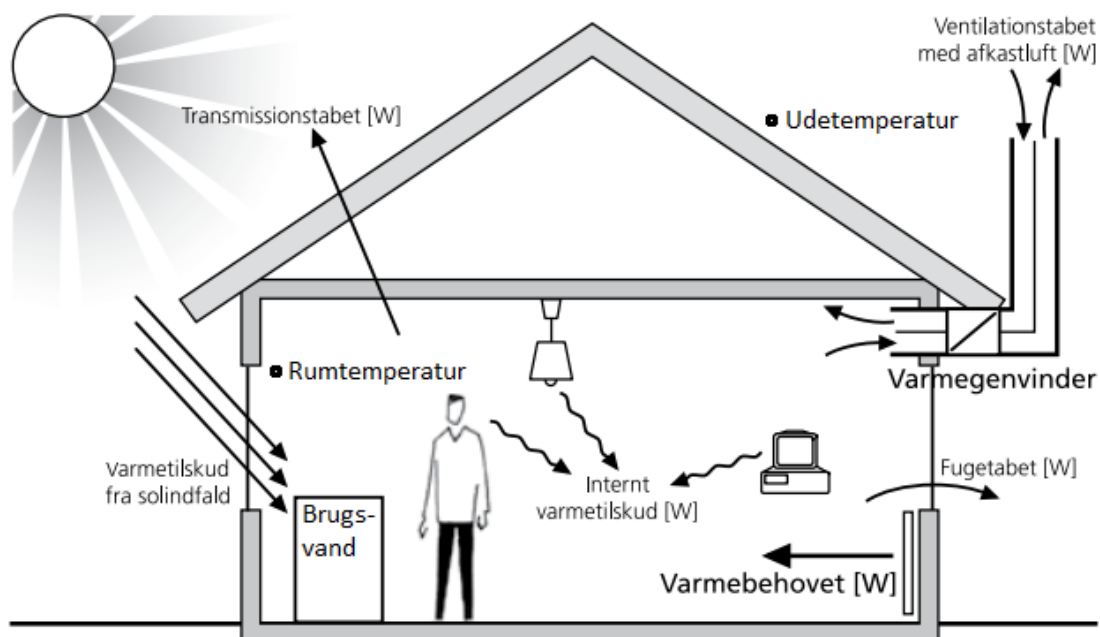
- Fastlæggelse af kontekst.
- Analyse af varmesystemet med konceptmodellen.
- Beskrivelse af beregningsmetoder.
- Beskrivelse af simuleringsobygning.

#### **4.3.1 Fastlæggelse af kontekst**

Ved konteksten menes de fysiske omgivelser, som varmepumpen er installeret i og skal operere under, dette er eksempelvis boligstørrelse, væg arealer, varmebehovet, alder på boligen, antal



beboere i boligen, størrelser på vandtanke osv. Der er stor forskel på disse værdier fra bolig til bolig, så for det pågældende område skal der estimeres nogle gennemsnitsværdier, der kan bruges i simuleringen. I Figur 4.4 er der vist en illustration over nogle af de forhold, der har indflydelse på det samlede varmeforbrug.



Figur 4.4 Illustration over omgivelsernes påvirkning af varmeforbruget (11)

Først fastlægges bruttoarealet på boligen iht. Danmarks statistik boligopgørelse 1. januar 2011 (8), brutto bredden, brutto længden og indvendig netto højde. Med disse data kan alle de fysiske størrelser beregnes. Herefter fastlægges vinduesarealet, det aktuelle glasareal, solafskærmningskonstanten, der beskriver, hvor meget sollys der faktisk kommer igennem gardiner, persiener, udhæng, bevoksning, samt hvordan disse er fordelt i boligen på henholdsvis nord, syd, øst og vest. De vigtige data kan ses i Tabel 4.2.

Beskrivelse	Værdier
Brutto boligareal, $A$ [ $m^2$ ]	143
Brutto boligbredde, $B$ [ $m$ ]	8
Brutto boliglængde, $L$ [ $m$ ]	17,875
Netto bolighøjde, $H$ [ $m$ ]	2,50
VinduesA 25 % af $A$ [ $m^2$ ]	35,75
Glasarealet 75 % af vinduesA [ $m^2$ ]	26,8125
Afskærmningskonstant [–]	0,5
Fordeling af vinduesA N, S, Ø, V [%]	25; 25; 25; 25;

Tabel 4.2 Valgte boligværdier i referencesystemet

Gennemsnitsværdier for vinduesarealet, glasarealet, afskærmningskonstanten og fordeling af vinduer er beregnet ud fra normværdier beskrevet i bygningsreglementet BR79, BR00, BR06, BR08, BR10. Boligen betragtes som et stort rum, hvor varmebehovet, varmetilskud og varmelevering er homogent fordelt i hele boligen, ligeledes er alle linjetab homogent fordelt på alle flader. Dette er en kraftig simplificering af referencesystemet, men da der i dette projekt ikke arbejdes med dynamiske modeller, antages dette at være tilstrækkeligt for denne analyse.

Herefter fastlægges gennemsnitsværdier på konstanter til beregning af varmebehovet, størrelserne på det forbrug der er i boligen, samt forskellige tankstørrelser. Værdierne er fastsat ud fra Rebild kommunes varmeplan for oktober 2010 (7), model for adfærdens effekt for energiforbruget (12), DS418-6 beregning af bygningers varmetab samt normværdier beskrevet i bygningsreglementet BR79, BR00, BR06, BR08, BR10. De vigtigste værdier kan ses i Tabel 4.3 og Tabel 4.4.

Beskrivelse	Boligmassen alder						
	Gr.1	Gr.2	Gr.3	Gr.4	Gr.5	Gr.6	Gr.7
<i>Varmebehov for Gr. 1 – 7</i>							
– <i>Boligområdet</i> [KWh/m <sup>2</sup> ]	207	214	202	156	113	86	72
– <i>Serviceområdet</i> [KWh/m <sup>2</sup> ]	146	150	183	131	122	93	86
– <i>Industriområdet</i> [KWh/m <sup>2</sup> ]	120	120	120	102	97	66	66
– <i>Landbrugsområdet</i> [KWh/m <sup>2</sup> ]	45	45	45	36	33	22	22
<i>Fordeling af boligmassen</i> [%]	9,3	3,7	2,6	9,3	14,8	35,9	24,4
<i>Vindue U – værdier</i> [W/m <sup>2</sup> · K]	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,05	1,2

Tabel 4.3 Varmebehov fordelt på syv aldersgrupper og fire belastningstyper samt gennemsnitsberegning af U-værdier for vinduer med en estimeret levetid på 30 år. De 2,9 er maksimumsværdier fastsat i BR79.

Beskrivelse	Værdier
<i>Varmebehovsfordeling på områder</i> [%]	75,1; 15,0; 8,5; 1,4;
<i>Varmekapaciteten i boligen</i> [Wh/m <sup>2</sup> · K]	100
<i>Naturlig ventilation</i> [l/m <sup>2</sup> · s]	0,35
<i>Varmetilskud fra andet</i> [W/m <sup>2</sup> ]	5,0
<i>Årligt forbrug af varmt brugsvand</i> [l/m <sup>2</sup> ]	250,0
<i>Buffertank varmpumpe</i> [l]	160,0
<i>Brugsvandstank</i> [l]	110,0
<i>Option varmtvandstank</i> [l]	2000,0

Tabel 4.4 Varmebehovsfordeling i forhold til de fire belastningstyper, varmekapaciteten middel tung, forbrugsværdier i boligen, størrelse af buffertank, brugsvandstank og som option ekstra varmtvandstank.

Den naturlige ventilation antages at være konstant hen over døgnet. Dog er der ved rumtemperaturer større end 1°C fra styringens aktuelle setpunkt medtaget tvunget ventilation i referencesystemet, der er fastlagt til fem gange den naturlige ventilation, som ca. svarer til en halvering af solindfaldet. Vedrørende forbruget af varmt vand er der lavet en fordelingsnøgle hen over et døgn, da forbruget har en del indflydelse på varmepumpens driftstilstand. Denne estimerede nøgle er fastlagt på baggrund af beregninger på forbrugsmønster hen over et døgn.

- 15 % af et døgns forbrug fordeles over de 24 timer, 85 % tilbage af et døgns forbrug.
- 55 % af de 85 % fordeles på 3 morgentimer 05-08, 38,25 % tilbage af et døgns forbrug.
- 15 % af de 85 % fordeles på 2 middagstimer 12-14, 25,50 % tilbage af et døgns forbrug.
- 30 % af de 85 % og den sidste del fordeles på 3 aftentimer 17-20.

Herefter fastlægges varmesystemets teoretiske opbygning, hvilket er nødvendig for at kunne simulere referencesystemets varmestyring. Det antages derfor, at boligen har installeret et to-strengs rørsystem, hvor der er tilsluttet både gulvvarme og radiatorer. Fremløbstemperaturen i rørsystemet sættes derfor til 45°C. Der bliver ved installationen af varmepumpen i boligen monteret en mekanisk differentialtrykregulering på rørsystemet ud i boligen, og trykreguleringen indstilles således, at temperatur forskellen bliver maksimalt 8°C.

Der er installeret en cirkulationspumpe på rørsystemet, som fordeler varmebehovet i rørsystemet på alle tanke. Pumpen styres af boligens varmebehov, og hvis rumtemperaturen er 0,3°C større end den brugervalgte rumtemperatur +/- tillæg fra den intelligente styring, stopper pumpen. Det maksimale flow, som cirkulationspumpen kan levere, er fastsat til 12 l/min.

De anvendte tanke antages for at være godt isolerede, svarende til 200 mm rockwool isolering. Et konstant varmetab estimeres på tankende ud fra en naturlig konvektion, og R-værdi fastsættes ud fra tilgængelige data ved Rockwool. Endvidere placeres en motorventil på alle tanke, således at varmforsyningen kan lukkes ved valgt maksimumtemperatur og åbnes ved valgt minimumtemperatur. Disse temperaturgrænser kan ses i Tabel 4.5.

Beskrivelse	Minimum	Maksimum
<i>Brugsvandtank [T]</i>	50	70 – 80
<i>Varmtvandstank (Option) [T]</i>	50	70 – 80
<i>Buffertank [T]</i>	50	70 – 80

**Tabel 4.5 Temperaturgrænser for styring af ventiler**

Endvidere styres ventilerne således, at når de er åbne, får de tilført den mængde energi fordelt på tankene i forhold til størrelsen af varmekapacitet, der er plads til på det pågældende tidspunkt. Dette efterligner det flow, der vil opstå i rørsystemet, når der er henholdsvis stor og lille temperaturforskel i tankene ud fra den fastsatte maksimale vandtemperatur. Det antages dog, at temperaturen er ens i hele tanken, og at denne ændring sker, så snart der tilføres energi. Dette er en simplificering, da temperaturen i tankene altid vil dele sig i et varmt og koldt område på grund af dynamikken i det varme vand. Der arbejdes dog kun med gennemsnits værdier her, og det antages ikke at have nogen betydelig indflydelse på analysen i dette projekt.

Til sidst fastlægges størrelsen og effektiviteten af varmepumpen, som er valgt til maksimal ydelse på **15 kW** og en beregningsmetode til fastlæggelse af COP-værdien med udgangspunkt i den udvendige temperatur ( $T_{amp}$ ) og fremløbstemperaturen ( $T_{WS}$ ). Se ligning 4.4.

$$COP(T_{amb}, T_{WS}) = COP_0 + \alpha_1 T_{amb} + \alpha_2 T_{WS} + \alpha_3 T_{amb}^2 + \alpha_4 T_{WS}^2 + \alpha_5 T_{amb} T_{WS} \quad ( 4.4 )$$

Hvor  $COP(T_{amb}, T_{WS})$  er varmepumpens endelige COP-værdi,  $COP_0$  og  $\alpha_1 \rightarrow \alpha_5$  er konstanter, der er angivet i Tabel 4.6 og  $T_{amb}, T_{WS}$  er temperatur og indsættes direkte i ligningen som °C.

Konstanter	$COP_0$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$
Størrelse	8,24	$1,58e^{-1}$	$-1,95e^{-1}$	$1,01e^{-3}$	$1,48e^{-3}$	$-2,33e^{-3}$

Tabel 4.6 Konstanter til beregning af COP-værdien, der henvises til litteraturlisten vedrørende denne formel (13)

Hermed er de fysiske forhold for varmepumpen fastlagt, og herefter vil analysen af varmesystemet med konceptmodellen blive gennemgået.

### 4.3.2 Analyse af varmesystemet med konceptmodellen

I dette afsnit, med udgangspunkt i den fremsatte konceptmodel, vil varmepumpen som den fleksible belastning her blive analyseret og få fastlagt energibalancen og dermed de delenergi, der medtages i varmesystemets beregninger.

Med udgangspunkt i den fastlagte kontekst udvælges de vigtigste delenergi, der indgår i de tre totalenergi bestemt i ligning 4.1. Se Tabel 4.7.

Delenergi og typer	Benævnelse
<b>Den totale tilførte energi</b>	<b><math>Q_{ind}</math></b>
Tilført energi fra varmepumpe	$Q_{pump}$
Tilført energi fra solindfald	$Q_{sun}$
Tilført energi fra andet	$Q_{other}$
<b>Den totale energi omsætning</b>	<b><math>Q_{out}</math></b>
Omsat energi igennem bygningen	$Q_{build}$
Omsat energi ved ventilation	$Q_{vent}$
Omsat energi ved varmt brugsvand	$Q_{vv}$
Omsat energi ved diverse tab	$Q_{tab}$

<b><i>Den totale lagrede energi</i></b>	<b><math>Q_{stored}</math></b>
<i>Lagret energi i bygning</i>	$Q_{storedbyg}$
<i>Lagret energi i luften inde i boligen</i>	$Q_{air}$
<i>Lagret energi i brugsvandstank</i>	$Q_{storedbv}$
<i>Lagret energi i varmtvandstank</i>	$Q_{storedtank}$
<i>Lagret energi i buffertank</i>	$Q_{storedvp}$
<i>Lagret energi i isolering på tanke</i>	$Q_{iso}$

**Tabel 4.7 Delenergi der indgår i varmesystemet**

Hermed er alle de vigtigste delenergi fastlagt, dog skal der yderligere tages stilling til, hvilke tab der skal medregnes i  $Q_{tab}$ . Dette er som tidligere nævnt varmetab fra tanke samt et rørtab ud i boligen, der estimeres til 10 % af det på tidspunktet beregnede energiflow forsynet til boligen. Alle disse delenergi skal udregnes pr. time, da de anvendte måleværdier på udetemperaturer og solbelysning er timebaserede.

Herefter skal grænserne i lagerkapacitet identificeres ud fra de brugervalgte maksimum- og minimumsværdier, ligesom det brugervalgte normale driftsområde skal identificeres. For varmepumpen og dermed for dette referencesystem vil det selvfølgelig være de ønskede rumtemperaturer, brugeren har valgt, som bestemmer disse værdier. De valgte temperaturer er vist i Tabel 4.8.

<b>Beskrivelse</b>	<b>Temperatur</b>
<i>Maksimumtemperatur [T]</i>	26
<i>Driftstemperatur [T]</i>	23
<i>Minimumstemperatur [T]</i>	20

**Tabel 4.8 Temperaturgrænser i referencesystemet**

I forhold til konceptmodellen opstilles der herefter ligevægtsligninger for alle de nødvendige punkter i det fysiske varmesystem således, at alle de valgte delenergi er medtaget. Hermed vil  $Q_{pump}$  udtrykke den manglende tilførte energi fra nettet, hvorefter  $P_{Net}$  kan beregnes for alle timebaserede værdier. I referencesystemet vil et godt sted at starte være inde i boligen og derefter fortsætte ud til varmepumpen. På denne måde huskes alle delenergi, og antallet af ligninger reduceres. Herunder kan nogle af delenergiene blive overflødige, eller måske slås sammen, hvilket kun simplificerer beregningerne.

Endvidere skal alle lagerkapaciteter fastlægges på baggrund af de valgte temperaturer, ligesom lagerændringerne, der sker fra time til time, skal beregnes hvilket også fremgår af ligning 4.1. En god kontrol af de opstillede ligninger vil være at anvende de beregnede timeværdier med de opstillede ligninger og herefter bruge ligning 4.1 til at beregne en restværdi. Er denne for stor, vil ligningerne være forkerte, eller der er sket en fejl ved indkodning i Matlab. Til dette skal det

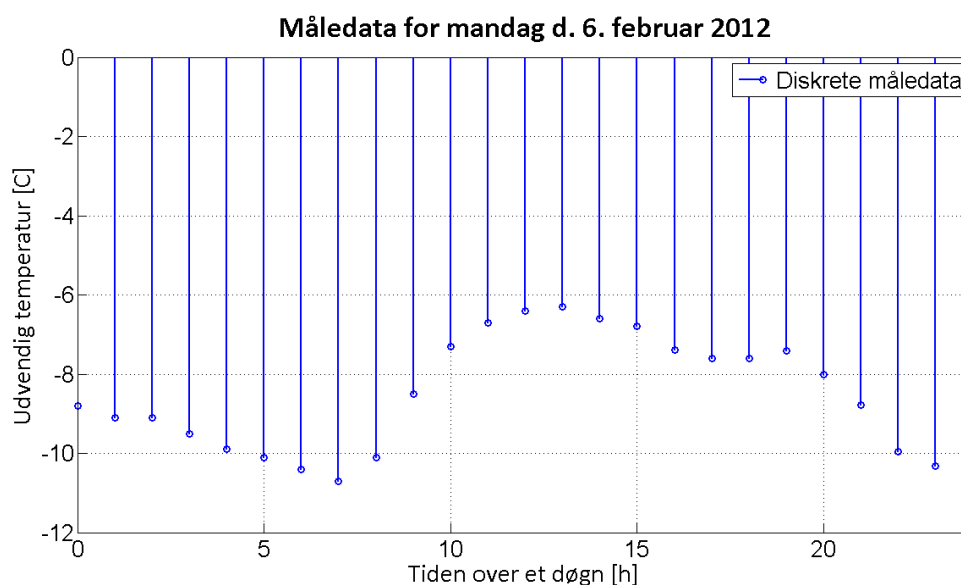
oplyses, at referencesystemet altid regner tilført energi som positive værdier og alt andet som negative værdier. Som nævnt udledes ligningerne ikke her, men vedlægges i Appendiks 1.

Næste punkt er beskrivelse af beregningsmetoder, som er brugt i referencesystemet til beregning af de anvendte data.

### 4.3.3 Beskrivelse af beregningsmetoder i referencesystemet

I dette afsnit beskrives de metoder, der er anvendt til beregning af de timebaserede værdier, som bruges i referencesystemet under simulering. Endvidere beskrives, hvordan rådata og de medtagne delenergi er bearbejdet, inden de anvendes i simuleringen.

Nu er tids- og timebaserede værdier efterhånden nævnt en del gange tidligere i dette projekt, og baggrunden for dette er, at alle beregninger i referencesystemet er baseret på to målte tidsserier, nemlig den udvendige temperatur i Støvring og solstråling i Aalborg fra 2012. Disse måledata er diskrete med en tidsperiode på en time imellem hver måling, hvilket betyder, at der for 2012 er 8784 målepunkter (skudår). I Figur 4.5 er vist nogle af de diskrete måledata på de udvendige temperaturer.



Figur 4.5 Måledata på udvendige temperaturer d. 6. februar 2012

Når et system skal simuleres med nogle diskrete data, er værdierne imellem disse punkter reelt ikke defineret, derfor skal der under simuleringen beregnes nogle gennemsnitsværdier, der med en acceptabel nøjagtighed beskriver disse værdier, således at overgangen imellem to diskrete værdier får mindst mulig indflydelse på systemets resultat.

Den beregningsmetode, som er anvendt ved udregning af delenergi og måledata, og som er antaget for acceptabel, er en lineær sammenhæng imellem to diskrete værdier. Dette vil derfor sige, at den gennemsnitlige værdi, der er imellem  $h_1$  til  $h_2$ , kan beregnes således. Se ligning 4.5.

$$h'_1 = \frac{h_1 + h_2}{2} \quad ( 4.5 )$$

Som eksempel på denne beregningsmetode, er der i Tabel 4.9 angivet seks diskrete måleværdier fra Figur 4.5, hvor de anvendte værdier i referencesystemet beregnes.

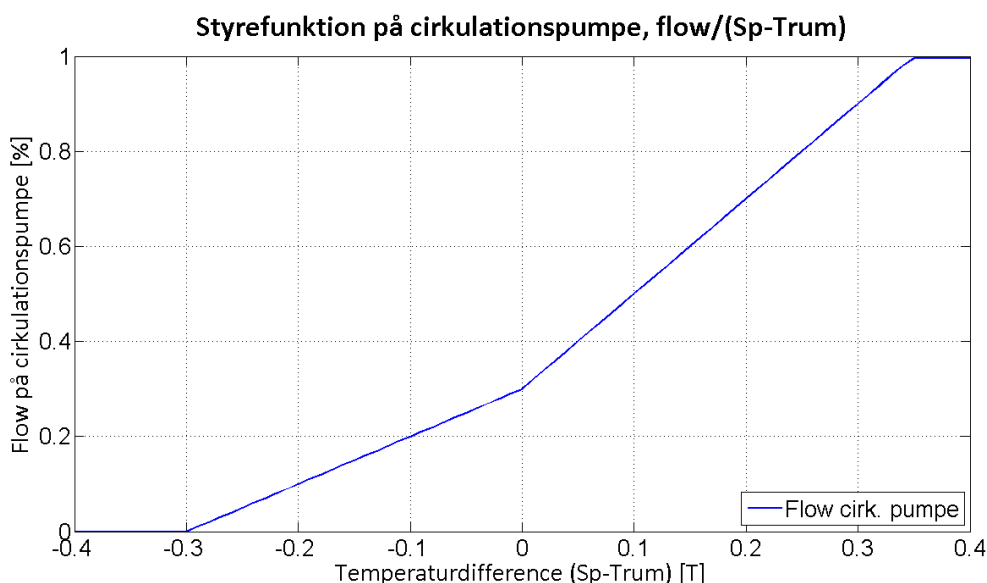
Tid	5	6	7	8	9	10
Måleværdi	-10,1	-10,4	-10,7	-10,1	-8,5	-7,3
Beregnet	-10,25	-10,55	-10,4	-9,3	-7,9	-

Tabel 4.9 Beregningseksempel på diskrete måleværdier

Som det ses i tabellen, indsættes den udregnede værdi til venstre i forhold til to målepunkter, dette sikrer, at værdierne altid udtrykker beregninger for næste time frem i tiden. Med denne metode er det dog væsentligt, at der for hver af de benyttede delenergi kun fortages en gennemsnitsudregning, så alle værdier udtrykker samme tidsperiode.

Som beskrevet under de fysiske forhold er der i referencesystemet implementeret en simuleret cirkulationspumpe, som fordeler varmebehovet fra boligen til rørsystemet og tanke. Da denne pumpe er styret af to algoritmer, hvori den brugervalgte rumtemperatur er en styrende parameter, skal der fortages en numerisk iteration, der kan beregne det gennemsnitlige energiflow, der udgør den tilsvarende energiomsætning i boligen på det givne tidspunkt.

Til dette er der valgt en numerisk "bi-section" metode, da tidsområdet er kendt på forhånd og dermed de grænser, hvori iterationen skal udføres. Metoden er enkel og består i at halvere den udregnede fejl, som så lægges til/trækkes fra den venstre afgrænsning, hermed flyttes højre afgrænsning, og en ny iteration kan udføres. Dette fortsættes, indtil fejlen er mindre end den fastlagte på  $10^{-4}$ . Hermed opnås et nemt og præcist gennemsnitsflow på cirkulationspumpen. De algoritmer, der styrer flowet, er udregnet i Figur 4.6, der udtrykker flowet som funktion af temperaturdifferencen imellem valgt setpunkt og rumtemperatur.



Figur 4.6 Styrefunktionen der kontrollerer cirkulationspumpens flow, udtrykt som flow/(Sp-Trum)

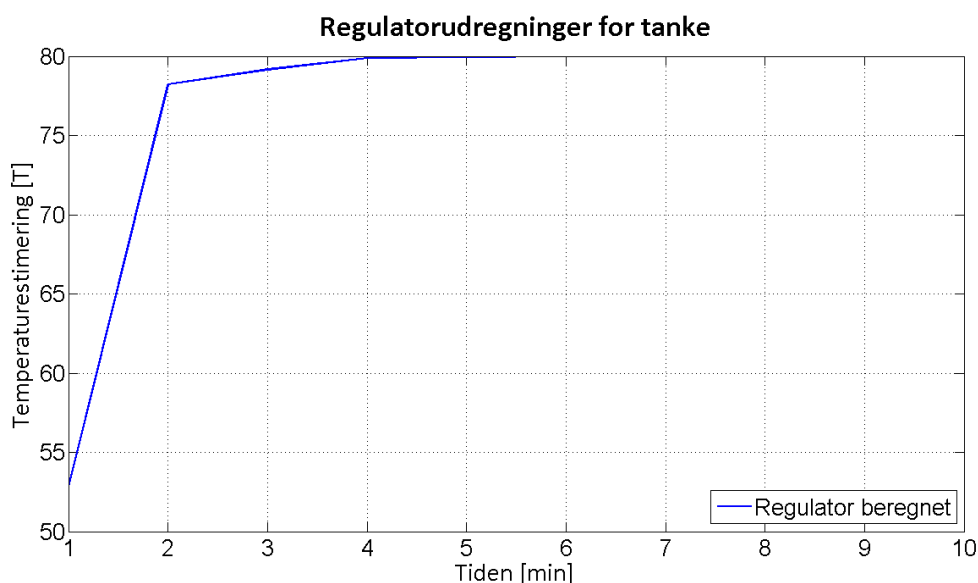
Hastigheden på varmepumpen blev beregnet ligesom den ovenfor nævnte beregning til cirkulationspumpen for hver af de timebaserede værdier. Den samlede hastighed er dog delt op i to hastigheder, en grundhastighed der fastlægges i forhold til det samlede energiforbrug, og en

variabel hastighed der beregnes af en simuleret PI-regulator i forhold til varmekapaciteten i tanke og disses maksimale brugervalgte temperaturgrænser.

Alt, der er beskrevet indtil nu i afsnit 4.3, blev implementeret i to delscripts og et simuleringsscript, hvor der blev tilføjet en del hjælpetekst for at kunne holde rede på de forskellige dele af simuleringen. Endvidere blev beregningerne kontrolleret løbende med en energibalance for at se, om formlerne var rigtige, og om der var nogle indtastningsfejl. Dette viste sig at være en god ide, da nogle af fortegnene var indtastet forkert. Derudover blev der lavet et oversigtsplot, som gemte alle de vigtigste udregninger. Efter alle rettelserne blev referencesystemet simuleret flere gange. Der tegnede sig herved et billede, der viste, at hastighederne på varmepumpen var ustabile, og temperaturerne i tankene varierede meget ud over de definerede temperaturgrænser på tankene.

Ustabiliteten blev lokaliseret til at være beregningerne, da de kun var baseret på målte timeværdier, og der på en time kan være stor ændring på værdier i referencesystemet. Ustabiliteten var derfor også mest udbredt med simuleringer uden ekstra varmvandstank, da ændringer i værdierne her er størst. Det blev derfor besluttet at ændre hele simuleringen af varmepumpen, så beregningerne blev udført pr. minut imellem to timeværdier. Til dette formål blev der implementeret et nyt delscript, der delte den lineære sammenhæng imellem to timeværdier op i 60 enheder, hvori den ovennævnte hastighedsberegning og PI-regulatorerne blev udført. Dette ændrede simuleringresultaterne markant og viser nu nogle tilfredsstillende værdier.

Stepresponsen af de PI-regulatorer der styrer den variable hastighed er vist i Figur 4.7.



Figur 4.7 Steprespons på PI-regulator tæt på maksimal tanktemperatur 80°C

Det skal lige nævnes, at temperaturændringen udtrykker energiomsætning til lagerkapacitet, men da varmepumpens størrelse er fysisk begrænset, vil responsen kun opstå tæt på den maksimale temperaturgrænse i tankene, som i figuren her er sat til 80°C.

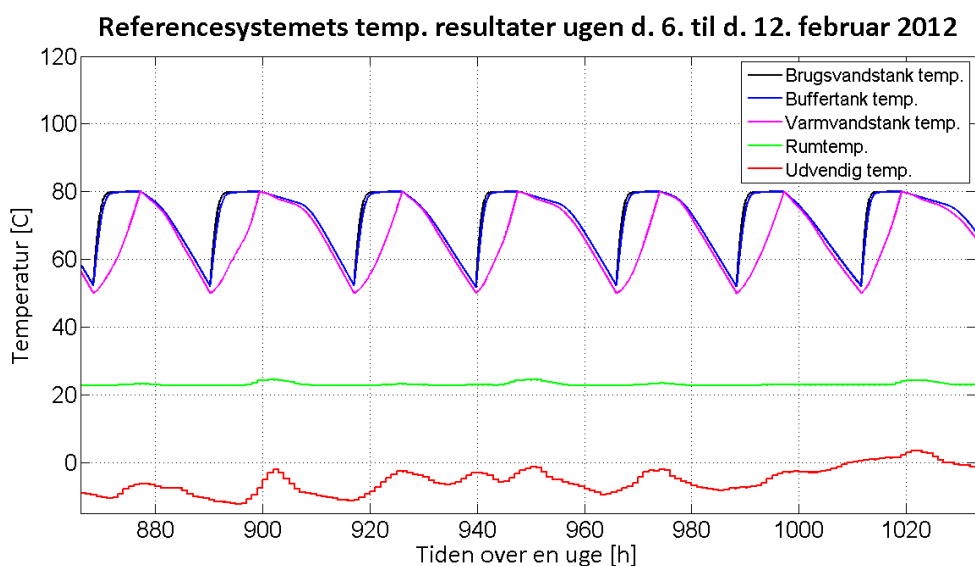
Med disse ændringer implementeret overholder referencesystemet alle kravspecifikationerne tilfredsstillende, og beregninger af effektbelastninger fra varmepumpen kan implementeres i det konkrete distributionsnet. Det skal dog igen understreges, at beregningerne i referencesystemet



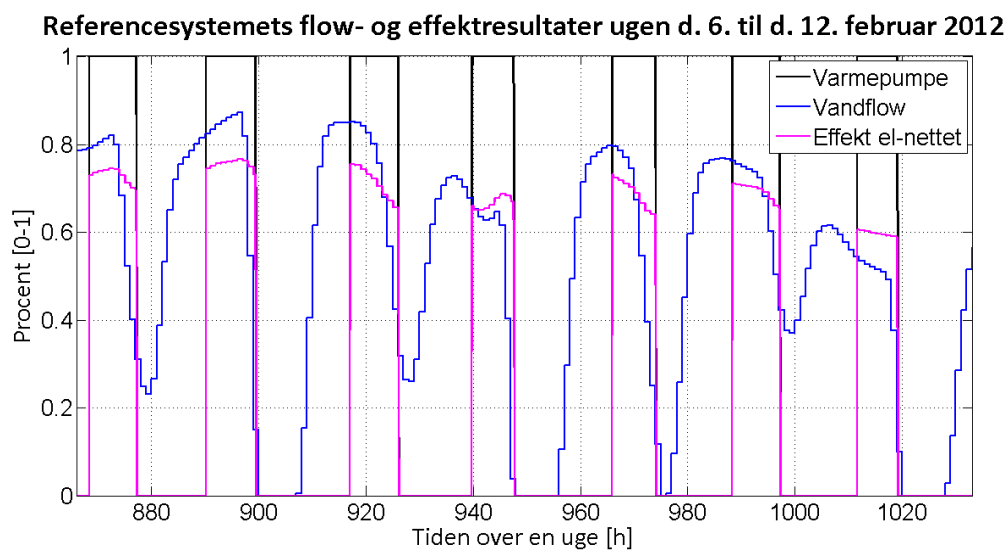
er baserede på "steady state" værdier og kunne gøres mere præcise, hvis der blev brugt dynamiske beregninger. I de to efterfølgende Figur 4.8 og Figur 4.9 er de vigtigste udregnede resultater vist med en individuel styret varmepumpe for ugen mandag d. 6. til søndag d. 12. februar 2012 med de i Tabel 4.10 brugervalgte data.

Beskrivelse	Temperatur
<i>Driftstemperatur [T]</i>	23
<i>Maksimumtemperatur [T]</i>	80
<i>Ekstra varmvandstank</i>	<i>ja</i>

Tabel 4.10 brugervalgte data brugt i vist simuleringsresultat



Figur 4.8 Beregningsresultater på temperaturer fra referencesystemet med en individuel styring



Figur 4.9 Beregningsresultater på flow og varmepumpe fra referencesystemet med en individuel styring

I Figur 4.8 er vist alle de beregnede temperaturer og den anvendte udvendige temperatur. I Figur 4.9, er vist den udregnede effektbelastning  $P_{Net}$ , den producerede energitilførsel  $Q_{pump}$  og cirkulationspumpens hastighed, alle omregnet til samme forhold 0-1 (0–100 %).

Referencesystemet er nu gennemgået og fastlagt. Det næste, der herefter vil blive gennemgået, er den overordnede struktur i simuleringsmodellen, hvilket gøres med flowchart, som giver et godt overblik over programopbygningen i Matlab.

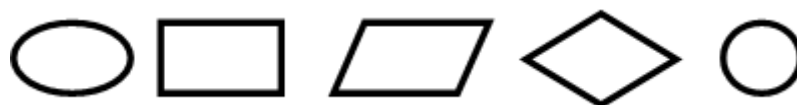
#### 4.3.4 Beskrivelse af simuleringsofbygning

I det følgende beskrives opbygningen af referencesystemet med flowchart, som beskriver de delfunktioner i Matlab programmet, der ligger til grund for beregningerne af belastninger på det konkrete distributionsnet. Udgangspunktet for flowchart'et er derfor det fastlagte referencesystem inklusiv alle de løbende ændringer, der er foretaget under udvikling af programmet.

Flowchart er med tiden blevet et meget omfattende og til tider misforstået værktøj, som bruges til mange former for fremvisning og beskrivelse, men grundlæggende er det en logisk og grafisk beskrivelse af et eller andet systems sammenhæng, uden detaljerede tekniske beskrivelser. Fordelen er, at der med meget få funktionsblokke kan dannes et godt overblik over systemet, uden at det på forhånd er nødvendigt at have indgående kendskab til det pågældende system.

Her er det referencesystemet programmeret i Matlab, der skal beskrives, og detaljeringsgraden er på et overordnet plan. Der medtages således kun de vigtigste dele, så der kan dannes det nødvendige overblik over systemet. Referencesystemet beskrives med fem grundlæggende funktionsblokke, som har følgende funktioner. Se Figur 4.10.

- **Ovalen**, som betegner start og slut.
- **Rektanglet**, som betegner en handling.
- **Parallelogrammet**, som betegner indlæsning og udlæsning.
- **Romben**, som betegner et valg.
- **Cirklen**, som betegner en forbindelse eller "Gå til".

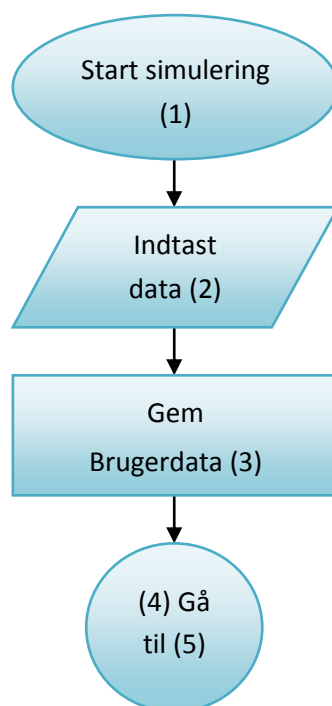


Figur 4.10 De fem blokfunktioner anvendt til flowchart

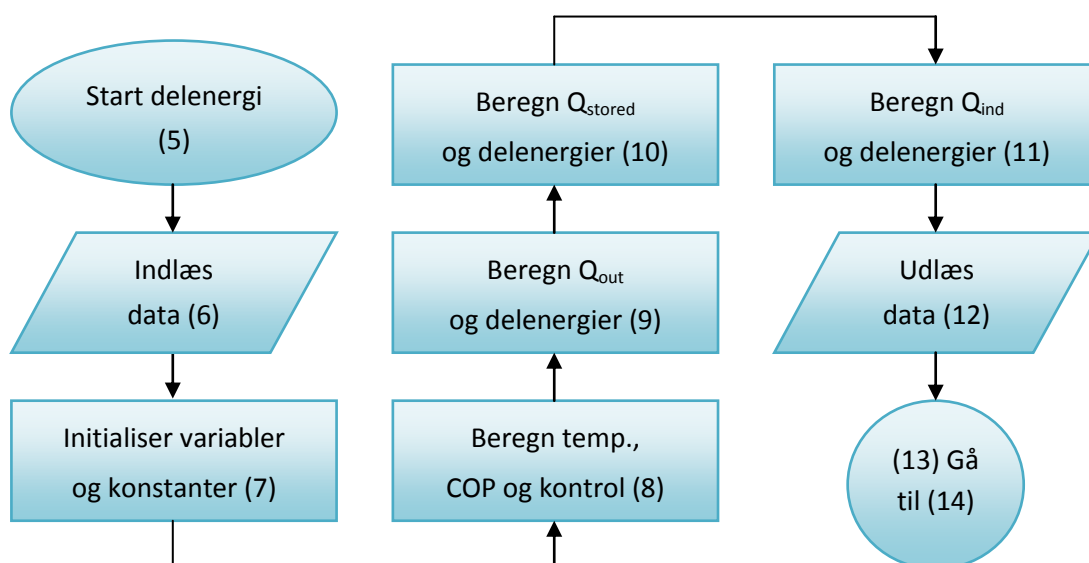
For at gøre dette overskueligt deles hele systemet op i mindre udsnit og samtidig nummereres alle blokkene fortløbende, fra top til bund. Numrene vil derefter i hver del blive beskrevet. De samlede flowcharts på referencesystemet kan findes i Appendiks 2, ligesom de beskrevne Matlab hoved- og delscripts kan findes på CD'en bagerst i rapporten.

Beskrivelse af referencesystemet starter i hovedscript'et "*simulering\_cal.m*", hvor hovedparten af udregningerne foregår. Dette forudsætter dog, at måledata på de udvendige temperaturer og solstråling er tilgængelige som ".xls" fil i samme kartotek, hvor alle Matlab filerne er placeret.

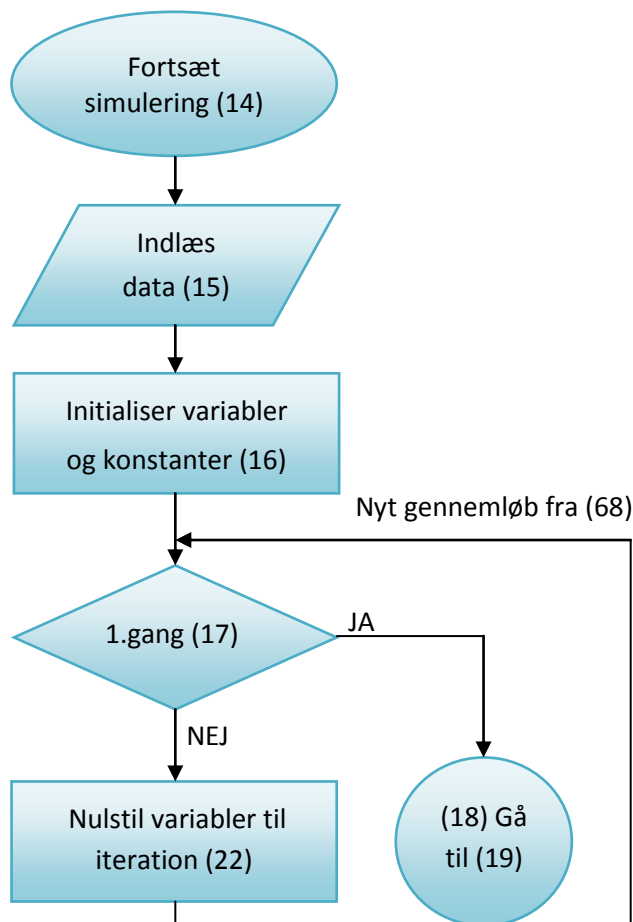
**Første del** af referencesystemet er opstart (1), indtastning af brugerdata (2), hvor der skal vælges henholdsvis setpunkt (21-25°C), ekstra varmvandstank (j/n) og maksimal tanktemperatur (70-80°C), herefter gemmes de valgte brugerdata (3), hvorefter delscript'et "Delenergi\_cal.m" afvikles (4).



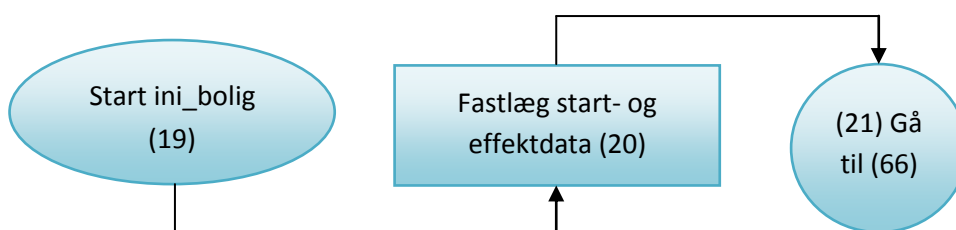
**Anden del** er effektberegninger, hvor delscript'et starter op (5), bruger- og måledata indlæses (6), alle variabler og konstanter der bruges i effektberegninger fastlægges (7), måledata på temperaturer og COP-værdier beregnes, endvidere beregnes en kontrol af varmebehovet i boligen (8), beregning af alle delenergier under  $Q_{out}$  (9), beregning af alle delenergier og varmekapaciteter under  $Q_{stored}$  (10) samt alle delenergier under  $Q_{ind}$  (11). Til sidst gemmes alle beregnede data (12), og der hoppes tilbage til (14) i hovedscript'et (13).



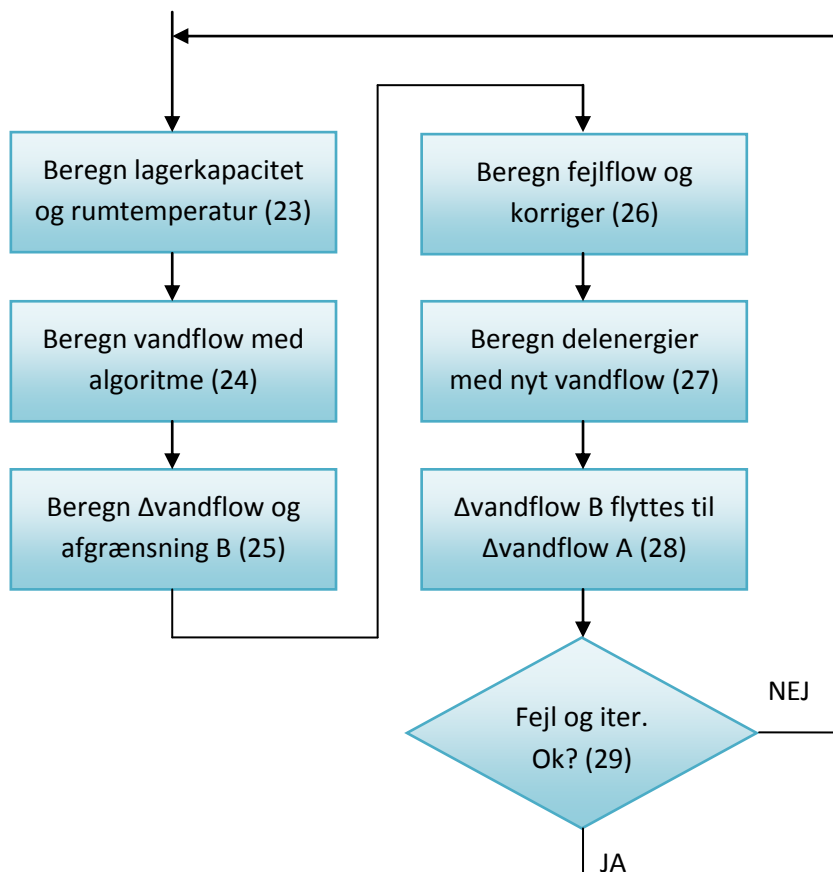
**Tredje del** består af følgende, simuleringsscript'et fortsættes (14), beregnede delenergi indlæses (15), alle variabler og konstanter der bruges i simuleringen fastlægges (16). Herefter vælges, om det er første gang simulering kører (17), hvis nej, nulstilles variabler til iterationen og beregninger af vandflowet (22), hvis ja, "Ini\_bolig.m" afvikles (18).



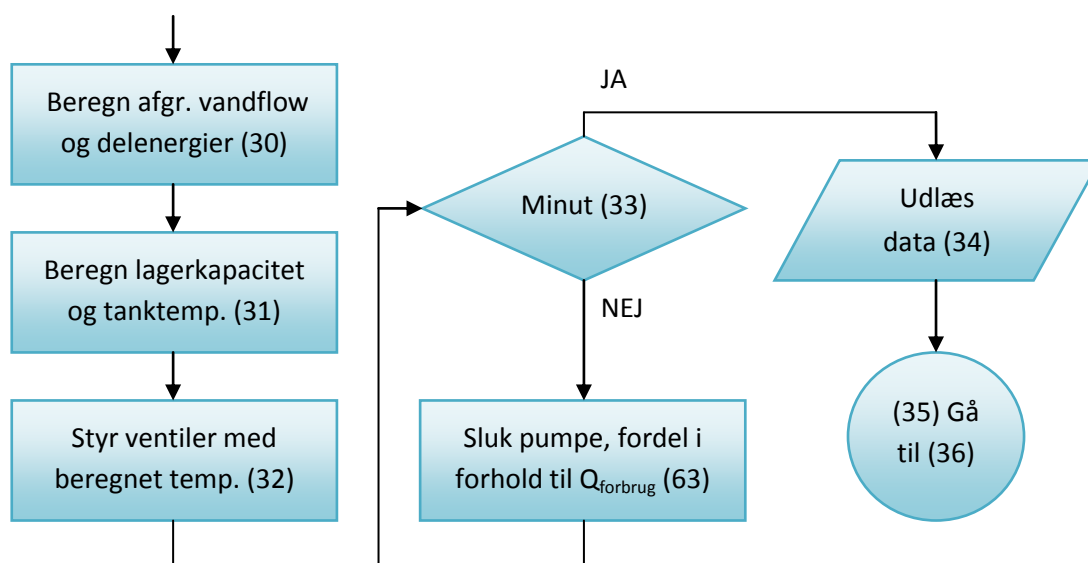
**Fjerde del** er fastlæggelse af alle startværdier samt beregning af de første timeværdier. Starter delscript'et "Ini\_bolig.m" (19), fastlægger alle startværdier og beregner effektdata (20), der hoppes tilbage til (66) i hovedscript'et (21).



**Femte del** udgør beregning af det gennemsnitlige vandflow for tidsperiode A -> B, hvor der regnes fra tidsperiode B. Som det er beskrevet tidligere, udføres dette med numerisk iteration og beregningerne fortsættes, indtil fejlen er mindre end  $10^{-4}$ . Først udregnes lagerkapaciteten og rumtemperatur (23), herefter udregnes vandflow med styring (24), derefter beregnes forskel i vandflow B fra A -> B og flytter afgrænsningen B (25), fejlflowet beregnes og korrigeres hvis negativ (26), delenergi beregnes med ny vandflow (27), forskel i vandflow B flyttes til forskel i vandflow A (28), kontrol af fejlflow og iterationer J/N (29).



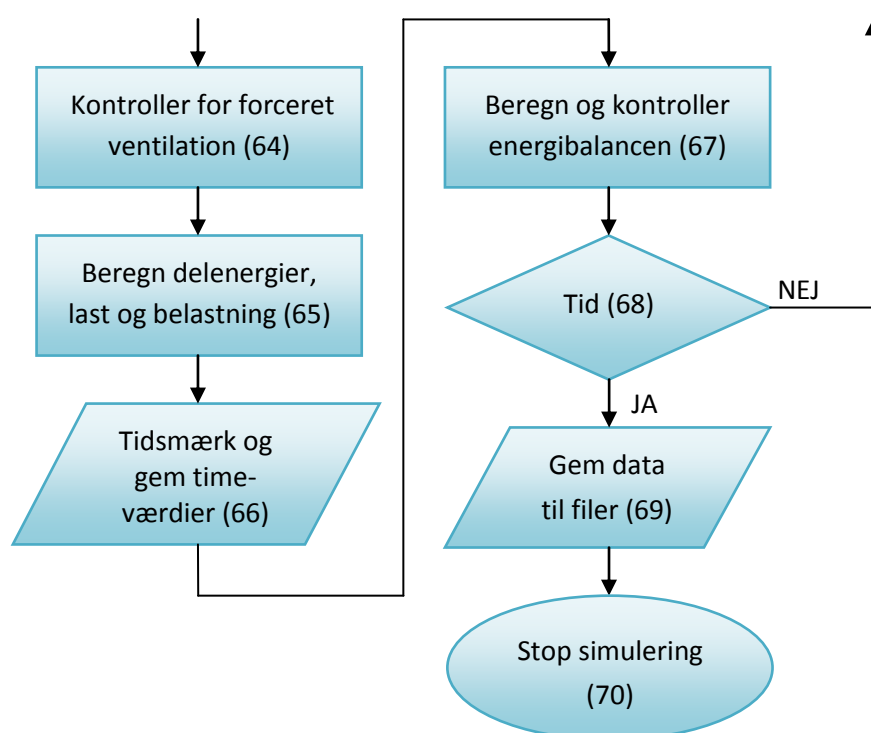
**Sjette del** afgrænser det beregnede vandflow, og alle delenergi korrigeres med nyt vandflow (30). Herfra påbegyndes beregningerne til styringen af varmepumpen, men delværdier skal fastlægges først, før dette er muligt. Med de korrigerede delenergi estimeres lagerkapaciteten i tanke og de tilhørende temperaturer for tidsperioden A -> B (31), herefter estimeres ventilpositionen ud fra beregnede temperaturer (32), Her foretages der et valg, skal der regnes på minuttider J/N (33), hvis ja, overføres de beregnede timeværdier til minutværdier (34), og delscript'et "DelLast\_cal.m" indlæses (35). Hvis nej, er varmepumpen slukket, og varmebehovet fordeles på tankene i forhold til den disponible lagerkapacitet (63).



**Syvende del** omhandler alle beregninger til minutværdier, dette vil ikke blive vist her, men er vedlagt i Appendiks 2, dog vil alle de vigtige dele blive gennemgået her. Alle værdierne, som udregnes under tidsperioden A -> B, bliver opdelt i 60 deludregninger, hvilket bare er en udvidelse af beregningerne for en mindre tidsperiode A1 -> B60. Dog er vandflowet og rumtemperaturen som nævnt allerede fastlagt og er derfor konstant i alle beregningerne her.

Endvidere fastlægges og beregnes lastniveauet på varmepumpen ud fra de beregnede temperaturændringer i tanke, den nævnte PI-regulator samt den totale varmeomsætning  $Q_{\text{forbrug}}$ , som er konstant for tidsperioden A -> B.  $Q_{\text{forbrug}}$  indeholder alle varmetab på tanke, brugsvandsforbruget og energiomsætning i bygningen. Når lastniveauet er fastlagt, kan alle minutværdier for delenergier og belastningen på distributionsnettet beregnes. Når delscript'et er udført og programmet vender tilbage til hovedscript'et, overføres alle de nødvendige delberegninger til timeværdien B, og beregninger i hovedscript'et fortsætter.

**Ottende og sidste del** omhandler afslutningen af et gennemløb for tidsperiode A -> B. Det første, der sker, efter delscript'et og overførslen af delværdier (62) eller fordeling af varmebehovet (63), er kontrol af rumtemperatur for forceret ventilation (64), herefter fastlægges alle delenergier, lastniveauet og belastningen på nettet for tidspunktet B (65). Alle beregnede værdier gemmes for tidspunktet B (66), herefter udføres kontrolberegning på energibalancen (67), og til sidst vælges om alle tider er beregnet J/N (68). Hvis nej, starter et nyt gennemløb tilbage til (17), hvis ja, gemmes alle de udregnede data i filer (69). Hovedscript'et er hermed færdigafviklet, og alle data er udregnet og gemt.



Referencesystemet er nu gennemgået, analyseret og beskrevet, ligesom strukturopbygningen i Matlab er beskrevet. Det næste der vil blive fokuseret på, er hvordan dette referencesystem er betragtet som valideret og kontrolleret.

#### 4.4 Kontrol og validering af referencesystem

Da hele referencesystemet er opbygget omkring en teoretisk gennemsnitsbolig, der ikke eksisterer i virkeligheden, kan systemet ikke valideres med målinger og praktiske test. Kontrollen og valideringen af referencesystemet har derfor bestået i at undersøge og kontrolberegne alle data efter ændringer og at se, om der er sket fejl i indtastning og kodning. Da systemet er opbygget efter ligevægtsligninger, har den største del af kontrollen bestået i at foretage en energibalanceberegning på systemet med de udarbejdede energiligninger i Appendiks 1.

Dette er udført således, at der ved hver timegennemregning, er udregnet en energibalance både fra forsyningsnettet til boligen og tilbage igen. Disse to beregninger er så sammenlignet, og fejl på alle disse data er beregnet. Ligeledes er de to kontrolberegninger sammenlignet med egne udregninger og fejlene er lokaliseret her. For disse tre fejlmatricer er den største fejl fundet og målt med den ønskede fejlmargen, som her er sat til  $10^{-8}$ . Hvis fejlen er større end dette, er det undersøgt, hvad denne fejl skyldes, og dette er så rettet i koden.

Dette har vist sig at være en effektiv måde at finde fejlene på, op der er herved rettet mange fejl, som dels har været fortegnfejle, forkert formelformulering eller glemte delenergi. Derudover har kontrollen bestået i at afprøve de enkelte programdele hver for sig for at kontrollere hensigten med den enkelte del, og der er udført testplot af grafer for at se udviklingen af beregningerne. Disse kontrolforanstaltninger har medført en sikker og stabil beregning, og dette anses for at være tilfredsstillende til dette projekt. For en evt. fremtidig udvikling af dette referencesystem vil det være særdeles nyttigt at udfører praktiske forsøg af forskellige varmepumper for at korrigere beregninger i referencesystemet.

## 5 Det konkrete distributionsnet fra HEF

I dette kapitel beskrives det konkrete distributionsnet, som den beregnede belastning i referencesystemet skal implementeres i. Her vil alle udleverede data på systemet blive beskrevet, og en detaljeret beregning af spændingsniveauer, effektflow og linjetab over en tidsperiode på et år vil blive fastlagt. Dette gøres på baggrund af udleverede målte og timebaserede belastningsdata P5-P16 for 2007, som her betragtes som år nul, og oplyste impedanser på de forskellige linjestrækninger.

Beregning af disse værdier er en ikke lineær problemstilling, som er for kompleks at beregne med almindelig analytisk matematik. Derfor er der opbygget en matematisk numerisk model i Matlab, der kan udregne disse værdier hurtigt og sikkert. Denne model vil også blive beskrevet her.

Til sidst vil målte og beregnede belastninger blive fremskrevet til 2020 ud fra energistatistik for 2011, tilgængelige data og analyse af belastningsmønster på P5-P16. Der estimeres fire nøgleformler, en for husholdning, en for fremstillingsvirksomheder, en for handel og service, som svarer til, hvordan grupperne i varmemeforbruget for Rebild kommune er opdelt, hvor landbruget er lagt ind under fremstillingsvirksomheder. Endvidere estimeres en nøgleformel for installation af varmepumper. Disse nøgleformler er nødvendige for at kunne analysere effekten af en implementeret intelligent styring på det konkrete distributionsnet. Fremgangsmåden er derfor som følgende

- Beskrivelse af det konkrete distributionssystem.
- Beskrivelse af metoden til beregning af spænding, effektflow og linjetab.
- Udarbejdelse af nøgleformler.
- Validering af den numeriske model

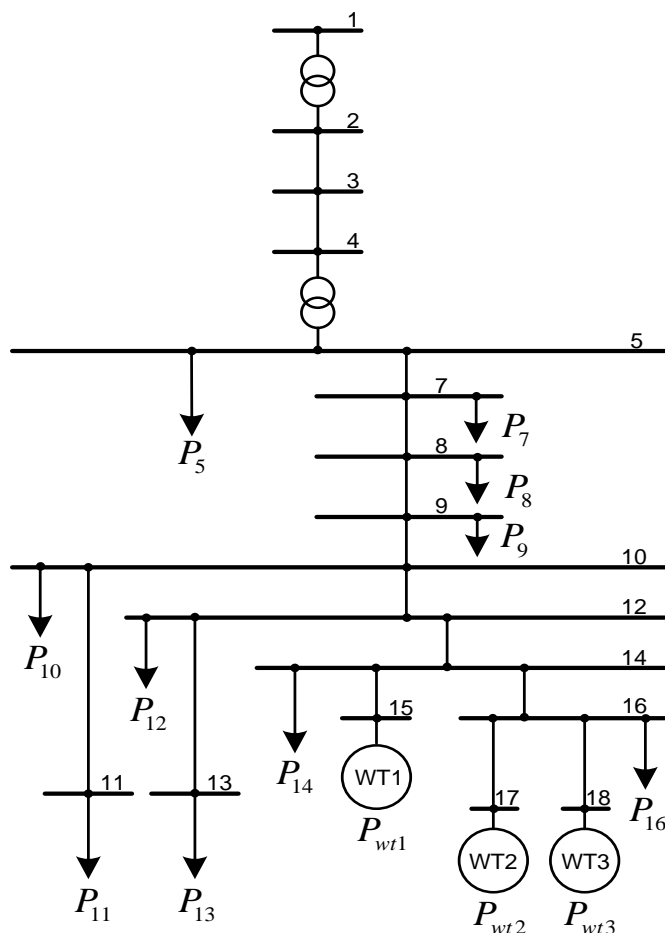
### 5.1 Beskrivelse af det konkrete distributionsnet

Distributionsnettet er et lille isoleret mellemspændingsnet fra 60 KV til 10 KV, og der indgår således ingen målinger og beregninger på lavspændingsnettet 0,4 KV. Systemet er opbygget som et radialnet, og der indgår to transformere, en 60/20 kV og en 20/10 KV.

De udleverede måledata på belastningerne P5-P16 anses derfor for at være den samlede belastning på primær side på den pågældende node omregnet til p.u. enheder. Alle belastninger er desuden kun tilsluttet 10 KV. Derudover anses distributionsnettet for at overholde de kravspecifikationer, som allerede er fastlagt.

Til systemet er der yderligere tilsluttet tre vindturbiner  $P_{WT1}$ - $P_{WT3}$ , som hver især har en maksimal produktionseffekt på 2,0 MVA, disse er tilsluttet yderst i radialnettet. Selve strukturen i radialnettet er opbygget af 18 noder, hvor der fra node 5 er tilsluttet en belastning på alle noder. Det skal dog påpeges, at node 6 er ikke eksisterende, så det samlede antal belastninger, noder og generatorer er henholdsvis 10, 17 og 3. Derudover er der til node 1 tilsluttet et uendelige transmissionsnet, der således fungerer som referencenode i effektflow beregningerne. I Figur 5.1 er hele strukturen af det omtalte distributionsnet skitseret.





Figur 5.1 Strukturen af det konkrete distributionsnet

Som det ses af Figur 5.1 er alle noder forbundet med hinanden, enten udført med kabler, luftledninger eller krydsfelter i transformestationer. Specifikationerne på forbindelserne er ikke oplyst af HEF, men alle modstandsværdier for disse linjer er udleveret omregnet i p.u. enheder. I Tabel 5.1 er alle linjeresistanser og -reaktanser vist, som er udleveret til dette projekt.

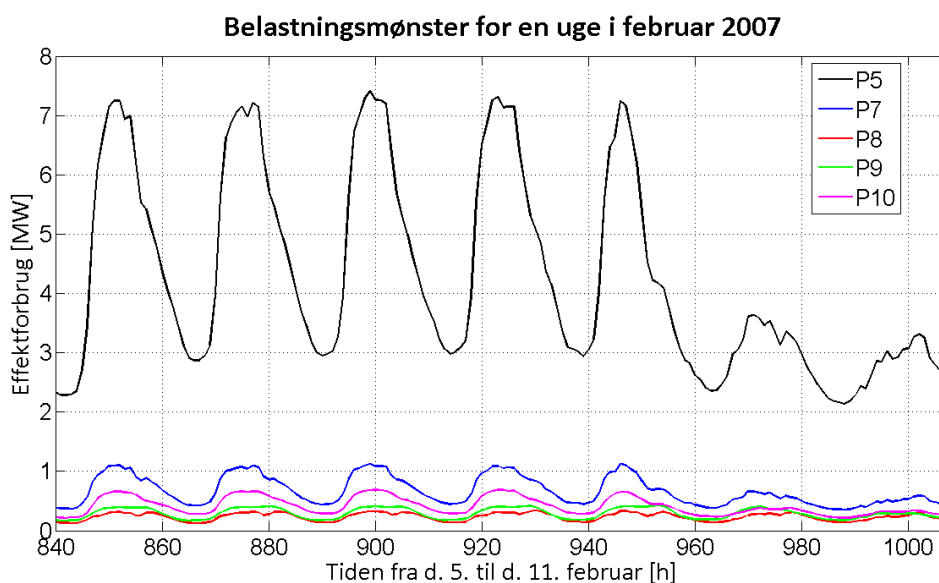
Noder	Resistans (p.u.)	Reaktans (p.u.)	Linje ladning (p.u.)
1 – 2	0.01250	0.12437	0
2 – 3	0.01187	0.01826	0.01301
3 – 4	0.07661	0.10637	0.00121
4 – 5	0.02530	0.44730	0
5 – 7	0.00336	0.00158	0
7 – 8	0.04784	0.02242	0.000085
8 – 9	0.12184	0.05711	0.00022
9 – 10	0.03365	0.02264	0

10 – 11	10.05036	39.79559	0
10 – 12	0.18194	0.13912	0
12 – 13	10.00038	39.96833	0
12 – 14	0.08182	0.02043	0.000115
14 – 15	0.10000	0.57741	0
14 – 16	0.01810	0.00453	0
16 – 17	0.10000	0.57741	0
16 – 18	0.10183	0.57786	0

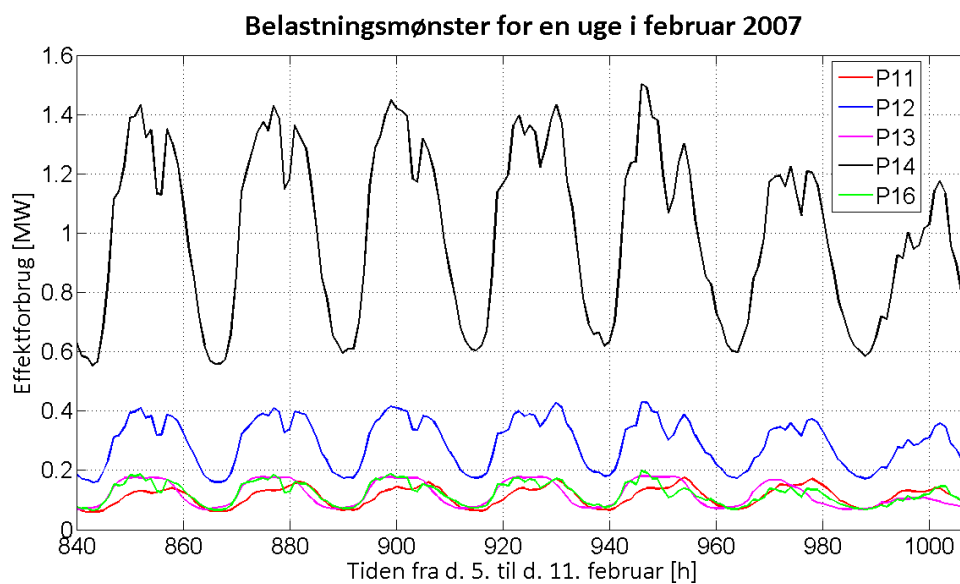
Tabel 5.1 Oplyste resistanser og reaktanser i distributionsnettet

Belastningerne P5-P16, som er tilsluttet distributionsnettet, er som nævnt udleveret med timebaserede værdier og udtrykker gennemsnitsværdier på den aktive effekt. Der er således ikke oplyst nogen faseforskydningsvinkel på de forskellige belastninger, dette kan have en del indflydelse på analysen i dette projekt, da de reelle belastninger ikke kan fastlægges så nøjagtigt, som det var tiltænkt. Endvidere er der ikke udleveret nogen oplysninger om, hvilke sektorer belastningerne P5-P16 er sammensat af, og da varmepumperne her kun analyseres i forhold til installationer i boliger, vil dette også få en vis indflydelse på analysen.

For at reducere disse indflydelser en del er der under afsnit 5.3 udarbejdet nøgleformler og foretaget en analyse af belastningsmønstrene på P5-P16, som så er sammenlignet med gennemsnitlige forbrugsmønstre på forskellige sektorer. Derved er det estimeret, hvor stor en andel husholdningssektoren udgør af de enkelte belastninger P5-P16. I Figur 5.2 og Figur 5.3 er måleværdierne på belastningerne P5-P16 for første uge i februar 2007 udskrevet.



Figur 5.2 Belastningsmønstre for P5-P10 en uge i februar 2007



Figur 5.3 Belastningsmønster for P11-P16 en uge i februar 2007

Som det ses i figurerne, har hver belastning næsten det samme mønster hen over en dag, dog er alle belastninger på nær P12 væsentligt reduceret hen over weekend, hvilket hænger sammen med, at de forskellige sektorer er mere eller mindre lukket ned hen over en weekend. I figurerne er der kun vist for en uge, så der kan ikke drages nogle endelig konklusion, men de viser tre tendenser, som er værd at hæfte sig ved. Den første er, at P5 belastningen står for ca. 2/3 af den samlede belastning og har et udpræget belastningsmønster som industri, ligeledes går dette mønster igen på nogle af de andre belastninger. Dette ses af, at belastningen peak'er kraftigt fra kl. 10-15. For det andet har nogle af belastningerne et udpræget belastningsmønster som husholdning, dette ses tydeligst af P12 og P14, da belastningen peak'er omkring kl. 17-19, hvor den såkaldte kogetime er i husholdningen. For det tredje har nogle belastninger et blandingsmønster, som gør det svært at identificere størrelsen på husholdningssektoren, og for disse belastninger vil en procentstørrelse blive estimeret.

For at kunne komme videre med analysen skal det pågældende distributionsnet analyseres med henblik på at få fastlagt spændingsniveauerne på alle noder, effektflow og linjetab på alle linjer. Alle disse beregninger skal så udføres for alle de timebaserede værdier, så de kan danne grundlaget for år nul. Dette gennemgås derfor i det følgende afsnit.

## 5.2 Beskrivelse af beregningsmetode

I det følgende vil beregningsmetoden til fastlæggelse af spændingsniveauet, effektflow og linjetab i det konkrete distributionsnet blive gennemgået. Ligeledes vil den numeriske beregning "Newton-Rapson", som er anvendt til beregning af distributionsnettet, blive gennemgået. Metoden omsættes derefter til et Matlab script, som er tilpasset det konkrete distributionsnet, og beregningerne udføres derefter med en nøjagtighed på  $10^{-5}$ . Dette Matlab script "Powerflow\_cal2013.m" er et tilrettet script, som er sammensat af dele fra Power System Analysis, 3. udgave, kapitel 6 af Hadi Saadat (14), som er vedlagt på CD'en bagerst i rapporten.

Effektflowberegning er rygraden i alle transmissionssystemer, og er nødvendig for at planlægge, vedligeholde og operere i disse systemer. Grundviden omkring effektberegning er derfor en forudsætning for at kunne opbygge en metode for numerisk iteration på et sådant system.

Kredsløbsligninger kan opstilles på mange måder, men her anvendes den mest almindelige til effektflowberegning, som er knudepunktsmetoden, der bygger på Kirchoff's strømlov (Kirchoff's Current Law, KCL). Ligninger opstilles ud fra strukturen i det konkrete distributionsnet og med admittance'n på de individuelle forbindelser. Dette er kendt som effektflowligningerne, og er udgangspunktet i den videre beregning. Så første skridt er, at de oplyste modstande skal omregnes til admittance'r. Se ligning 5.1.

$$z_n = \frac{1}{y_n} \Leftrightarrow y_n = \frac{1}{z_n} = \frac{1}{r_n + jx_n} \quad ( 5.1 )$$

Herefter opstilles et antal af komplekse ligninger, der skal være lig med antallet af noder i det konkrete netværk. Når disse ligninger er fastlagt, kan den samlede admittance-matrice  $Y_{bus}$  blive isoleret og dannet, så der fremkommer følgende ligning 5.2.

$$\vec{I}_{bus} = \vec{Y}_{bus} \cdot \vec{V}_{bus} \quad ( 5.2 )$$

Hvor  $\vec{I}_{bus}$  er den påtrykte strømvektor og  $\vec{V}_{bus}$  er spændingsvektoren målt fra referencenoden. Men da denne metode er meget ineffektiv, anvendes i stedet en indbygget funktion i Matlab, som bruger triangulær faktorisering og Gaussian elimination, da værdierne i forvejen er udregnet som matricer. Denne funktion reducerer beregningstiden og nøjagtigheden betydeligt. Nedenfor vises forskellen.

- Den ineffektive metode:

$$\vec{Z}_{bus} = \frac{1}{\vec{Y}_{bus}} \text{ og } \vec{V}_{bus} = \vec{Z}_{bus} \cdot \vec{I}_{bus}$$

- Den effektive metode:

$$\vec{V}_{bus} = \vec{Y}_{bus} \setminus \vec{I}_{bus}$$

Som det ses af den sidste metode, som er den anvendte, skal  $\vec{I}_{bus}$  fastlægges for at kunne beregne  $\vec{V}_{bus}$ . Denne findes ud fra de oplyste belastninger P5-P16 ved anvendelse i ligning 5.3.

$$P_n - jQ_n = V_n^* \cdot I_n \Rightarrow I_n = \frac{P_n - jQ_n}{V_n^*} \quad ( 5.3 )$$

Nu kunne alle beregningerne reelt udføres manuelt, men dette ville være en uoverskuelig opgave, hvorfor formlerne omskrives til en numerisk Newton-Rapson metode, så et Matlab script kan udvikles, og alle ligningerne kan beregne hurtigt og sikkert. Ved brug af Taylor's serie kan følgende ligninger opskrives.

$$\Delta c^{(k)} = c - f(x^{(k)}) \quad ( 5.4 )$$

$$\Delta x^{(k)} = \frac{\Delta c^{(k)}}{\left(\frac{df}{dx}\right)^{(k)}} \quad ( 5.5 )$$

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \Delta x^{(k)} \quad ( 5.6 )$$

Indsættes ligning 5.4 og 5.5 i 5.6 og omarrangeres med Jacobian metoden fremstår det komplette Newton-Rapson udtryk, der bruges som udgangspunkt til de videre beregninger af effektflowligninger. Se ligning 5.7.

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \frac{c - f(x^{(k)})}{\left(\frac{df}{dx}\right)^{(k)}} = x^{(k)} + \frac{\Delta C^{(k)}}{J^{(k)}} \Rightarrow$$

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + [J^{(k)}]^{-1} \cdot \Delta C^{(k)} \quad ( 5.7 )$$

Hvor  $x$  er værdien som ønsket fundet,  $k$  er iterationsnummeret,  $c = 0$  og  $J$  er Jacobian-matricen. Ligesom det er beskrevet før, anvendes en indbygget funktion i Matlab, som bruger triangulær faktorisering og Gaussian elimination til at beregne den aktuelle fejl, da beregning af den inverse Jacobian ellers ville være tung og øge beregningstiden kraftigt. Jacobian-matricen er opbygget af elementer med de partielle afledede værdier evalueret i  $x$ . Dette ses i følgende udtryk 5.8.

$$J^{(k)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad ( 5.8 )$$

Alle numeriske metoder kræver en begyndelsesværdi til at starte beregningerne på, og hvad angår Newton-Rapson metoden, skal denne være rimelig tæt på den værdi, der konvergeres imod, da dette ellers kan medføre, at iterationen divergerer. Ved effektflowberegning kendes den nominelle spænding på distributionsnettet, og spændingen vil herved variere omkring denne værdi. Derfor anvendes 1,0 p.u. som begyndelsesværdi i metoden og der sikres således konvergering.

Ved effektflowsystemer er de beregnede værdier komplekse. Derfor skal både størrelsen og vinklen på spændingen bestemmes, så metoden i ligning 5.7 kan anvendes således, se ligning 5.9 og 5.10.

$$|V_n^{(k+1)}| = |V_n^{(k)}| + \Delta |V_n^{(k)}| \quad ( 5.9 )$$

Hvor  $V_n$  er den numeriske størrelse af spændingen på den pågældende node.

$$\theta_n^{(k+1)} = \theta_n^{(k)} + \Delta \theta_n^{(k)} \quad ( 5.10 )$$

Hvor  $\theta_n$  er vinklen på spænding i den pågældende node. Ændringerne i spænding og vinkel udregnes med den sammensatte Jacobian-matrice og ændring i effektflowet. Dette kan udtrykkes matematisk således, se ligning 5.11.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad ( 5.11 )$$

Som det ses består Jacobian nu af fire forskellige dele, da både spændingen og effekten skal udregnes som polare værdier. Ændringerne i de polare effektværdier beregnes som følgende. Se ligning 5.12 og 5.13.

$$\Delta P_n^{(k)} = P_n^{\text{målt}} - P_n^{(k)} \quad ( 5.12 )$$

Hvor  $(P_n^{\text{målt}}, Q_n^{\text{målt}})$  er den aktuelle belastning og  $(P_n^{(k)}, Q_n^{(k)})$  er de beregnede værdier.

$$\Delta Q_n^{(k)} = Q_n^{\text{målt}} - Q_n^{(k)} \quad ( 5.13 )$$

Til beregning af de polare effekter, benyttes ligning 5.2 omformet til en sum af elementer på polar form, se ligning 5.14. Denne indsættes i ligning 5.3, hvorefter ligning 5.15 fremkommer.

$$I_i = V_i \cdot \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} \cdot V_j = \sum_{j=1}^n Y_{ij} \cdot V_j \Rightarrow \quad ( 5.14 )$$

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| \cdot |V_j| \angle \theta_{ij} + \varphi_j, \quad j \neq i$$

$$P_i - jQ_i = |V_i| \angle -\varphi_i \cdot \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| \cdot |V_j| \angle \theta_{ij} + \varphi_j \quad ( 5.15 )$$

Ved at opdele ligning 5.15 i en aktiv effekt og reaktiv effekt, fremkommer de to ligninger 5.16 og 5.17, der benyttes til beregning af de polare effekter  $(P_n^{(k)}, Q_n^{(k)})$ .

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| \cdot |V_j| \cdot |Y_{ij}| \cdot \cos(\theta_{ij} - \varphi_i + \varphi_j) \quad ( 5.16 )$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n |V_i| \cdot |V_j| \cdot |Y_{ij}| \cdot \sin(\theta_{ij} - \varphi_i + \varphi_j) \quad ( 5.17 )$$

Ud fra disse to ligninger kan de partielle afledte dele (J1-J4) i Jacobian-matricen findes. Disse ligninger visse ikke her, da det kun er afledte værdier af de allerede fastlagte ligninger 5.16 og 5.17. Herved er alle de benyttede formler i Matlab script'et beskrevet, ligesom metoden, der er benyttet, er gennemgået (14).

For at opsummere beskrivelsen og de udledte formler, vil der for hver af de timebaserede belastninger P5-P16, der skal beregnes, være følgende fremgangsmåde.

1. Alle startværdier sættes til en spænding på 1,0 p.u. og en vinkel på 0, ligesom referencenoden (nr. 1) og generatortilslutninger sættes til 1,0 p.u. med vinkel 0. De målte belastninger overføres til busdata.
2. På belastningsnoder beregnes først  $(P_i^{(k)}, Q_i^{(k)})$  og derefter  $(\Delta P_i^{(k)}, \Delta Q_i^{(k)})$ .
3. På generatornoder beregnes  $(P_i^{(k)}, \Delta P_i^{(k)})$ .
4. Alle elementer i Jacobian-matricen (J1, J2, J3 og J4) beregnes.
5. Med indbygget funktion i Matlab løses alle ligningerne direkte ( $DX=A\backslash DC'$ )
6. Udregner de nye værdier på størrelse og vinkel af spændingen.
7. Undersøger om den tilbageværende fejl  $(\Delta P_i^{(k)}, \Delta Q_i^{(k)})$  er mindre end den specificerede  $10^{-5}$ , hvis ikke gentages fra punkt 2, ellers startes en ny timebaseret beregning i punkt 1.

Hermed er beskrivelse af beregningsmetode til effektflowberegningerne fuldført, og Matlab scriptet kan udarbejdes. Det skal dog nævnes, at der skal foretages en del forberedelse af data i Matlab, før det endelige script kan virke. Dette gennemgås ikke her, men kan ses i starten af scriptet "Powerflow\_cal2013.m".

### 5.2.1 Validering af den numeriske model

For at kontrollere, at det udarbejdede script "Powerflow\_cal2013.m" er opbygget og sammensat på en korrekt måde, samt at kontrollere for indtastningsfejl, skal den numeriske beregningsmodel valideres. Denne kontrol og validering blev udført ved at beregne et verificerende IEEE effektflowsystem med 4 noder. Den udførte beregning viste en maksimal afvigelse på  $10^{-3}$ , hvilket betragtes som godkendt. Det aktuelle effektflowsystem er vedlagt på CD'en bagerst i rapporten.

Nu hvor effektflowberegninger i distributionsnettet kan udføres, skal alle belastningerne opdeles i sektorer og fremskrives til 2020, således at grundbelastningen frem til 2020 kan fastlægges. Dette vil blive gennemgået i næste afsnit.

### 5.3 Udarbejdelse af nøgleformler

I det følgende fastlægges fire nøgleformler, der tilsammen beskriver belastningernes udvikling frem mod 2020 i det konkrete distributionsnet. Dette gøres på baggrund af Energistyrelsens årlige energistatistik 2011 (6) på tre hovedsektorer, som er husholdning, industri samt handel og service. Derudover analyseres belastningsmønstrene på P5-P16 i forhold til gennemsnitsforbrugsmønstre for forskellige sektorer, og der estimeres hvor stor en andel, husholdningen udgør af de konkrete belastninger P5-P16. Dette gøres for at fordele antallet af de estimerede fleksible enheder, som her er varmepumper, på det konkrete distributionsnet. Herved fordeles enhederne ud fra de lokale forhold i det pågældende område, og der opnås en bedre simulering.

Herudover fremgår det af Rebild kommunes varmeplan 2010 (7), at ca. 55 % af boligerne er forsynet med fjernvarme eller naturgas, og da varmepumper kun anses for relevant for boliger med individuelt oliefyr eller gammelt brændselsfyr, kan placering af disse enheder på P5-P16 få indflydelse på analysen af lastniveauet. Det har dog ikke været muligt i det konkrete distributionsnet at få fastlagt, hvordan disse 55 % er fordelt. Det er under besigtigelse af

området blevet fastlagt, at P5 forsyner Støvring by og den tilhørende industri i og omkring Støvring, og da næsten alle er tilsluttet fjernvarmen her, antages det derfor, at ingen varmepumper installeres på P5. I de resterende belastninger P7-P16 antages det, at alle kan få installeret varmepumpe, da fjernvarmen er begrænset til Støvring by og industriområdet, dog stadig i forhold til fordelingen af sektorer og belastningernes størrelse.

Fremgangsmåden for fastlæggelse af disse nøgleformler er som følgende.

- Estimering af belastningerne P5-P16's fordeling på sektorer.
- Fastlæggelse af nøgleformlerne for fremskrivelse af de tre hovedsektorer.
- Fastlæggelse af nøgleformel til fremskrivelse af varmepumper.
- Beregning af de sammensatte fremskrivningsformler for belastningerne P5-P16.

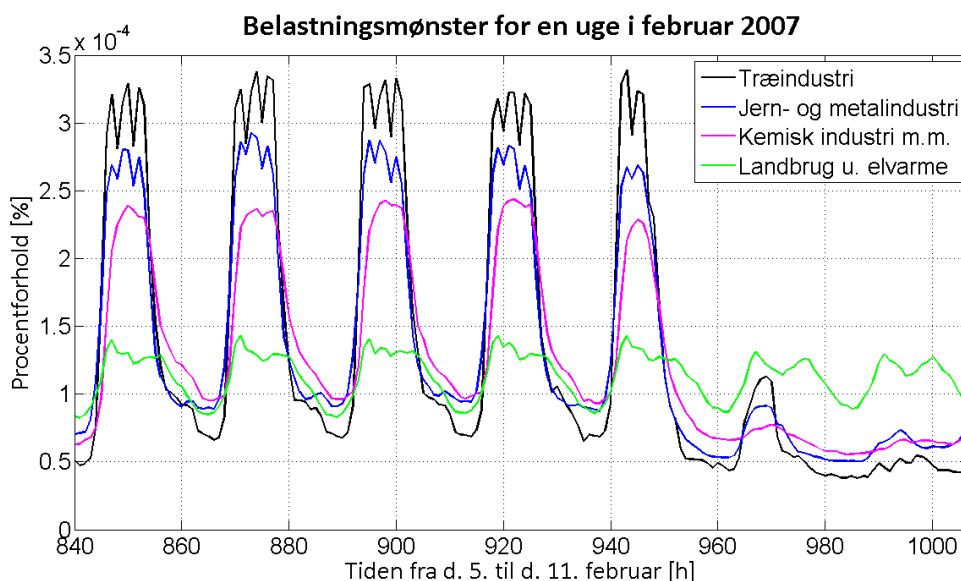
### 5.3.1 Estimering af belastningerne P5-P16

I det konkrete distributionsnet er der tilsluttet nogle belastninger P5-P16. Da belastningerne kun er oplyst som 10 kV værdier, vil disse både geografisk og typemæssigt forsyne forskellige forbrugsområder. Belastningsmønsteret på P5-P16, se Figur 5.2 og Figur 5.3, kan derfor være sat sammen af flere forbrugssektorer, som hver især kan variere meget i løbet af et år. F.eks. vil markvandingsanlæg kun være aktive i korte spidsperioder om sommeren, ligesom gartnerier næsten intet forbrug har om sommeren, men stiger kraftigt fra sensommeren til sent forår.

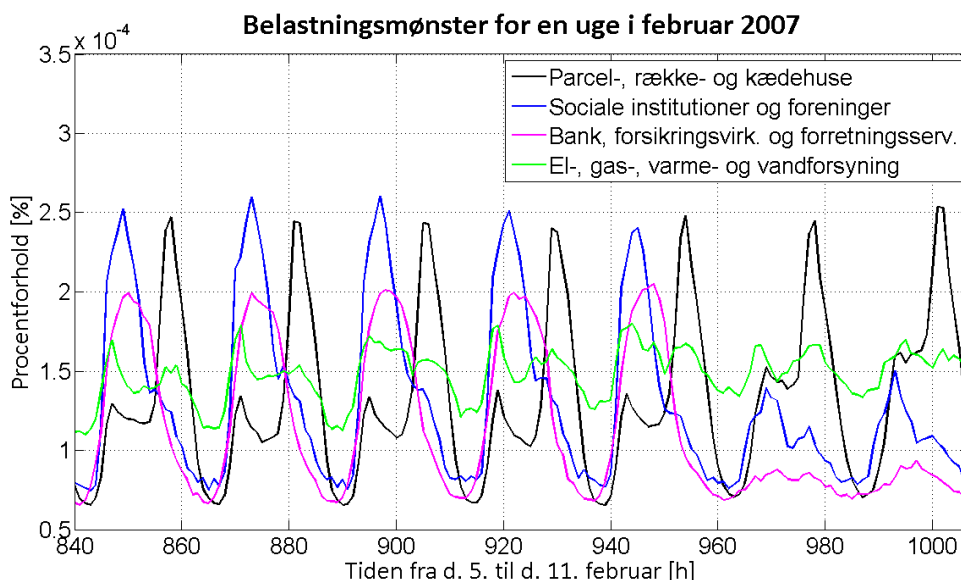
Perioden, som her er valgt som referenceuge, er første uge i februar, der er en almindelig produktionsuge, som ligger midt i vinterhalvåret. Den har næsten det højeste energiforbrug, set over et år, og så er forbruget næsten ens fra dag til dag. Derudover opdeles den samlede belastning kun i tre hovedgrupper husholdning, industri samt handel og service, der tilsammen udgør 100 % af belastningen, og fordeles i forhold til den største spidsbelastningsperiode, da det er denne periode, der er den dimensionerende faktor i forhold til lastniveauet i distributionsnettet.

Udover fordelingen af de tre sektorer fordeles det anslåede antal af installerede varmepumpeenheder frem mod 2020 på de pågældende belastninger P7-P16 i forhold til størrelsen af belastningen i husholdningssektoren. Antallet af varmepumpeenheder fastlægges ud fra Rebild kommunes varmerapport 2010 (7) og en estimeret implementeringsfaktor i 2020, da det ikke er alle de mulige boligenheder, der vil få installeret varmepumpe inden 2020. Ved estimering af belastningerne P5-P16 benyttes udleverede forbrugsmønstre fordelt på 30 sektorer, der viser middelværdien på landsplan for 2007. I Figur 5.4 og Figur 5.5 er vist nogle af de mest relevante mønstre i forhold til P5-P16.





Figur 5.4 Belastningsmønster for nogle industri- og landbrugssektorer



Figur 5.5 Belastningsmønster på husholdning samt handel og service sektorer

Alle belastningsmønstre for de 30 sektorer og for den pågældende referenceuge er udskrevet og vedlagt i Appendiks 3.

Først fastlægges antallet af installerede varmepumpeenheder i 2020 for det konkrete distributionsnet. Fra Rebild kommunes varmeplan er der 10.994 boligenheder, der har et varmebehov. Af disse er 54,2 % (5959) allerede opvarmet med enten fjernvarme, naturgas eller har installeret varmepumpe. Befolkningsantallet i Støvring kommune lige før sammenlægningen 2007 var 12.669. Befolkningsantallet lige efter sammenlægningen og den nuværende Rebild kommune 2007 er 28.633. Da HEF oprindelig forsynede Støvring kommune, medfører forholdet i befolkningstallet på ca. 44 %, at de resterende (44 % af 5035), som er 2215 boligenheder, er estimeret til at høre under det konkrete distributionsnets område. Implementeringsfaktoren opdeles i tre scenarier 25 %, 50 % og 75 %, hvor den sidste procentsats er sat optimistisk. De udregnede størrelser er vist i Tabel 5.2.

Beskrivelse	Enheder
1. scenarie 25 %	554
2. scenarie 50 %	1108
3. scenarie 75 %	1662

**Tabel 5.2 Antallet af installerede enheder i 2020 ved tre scenarier**

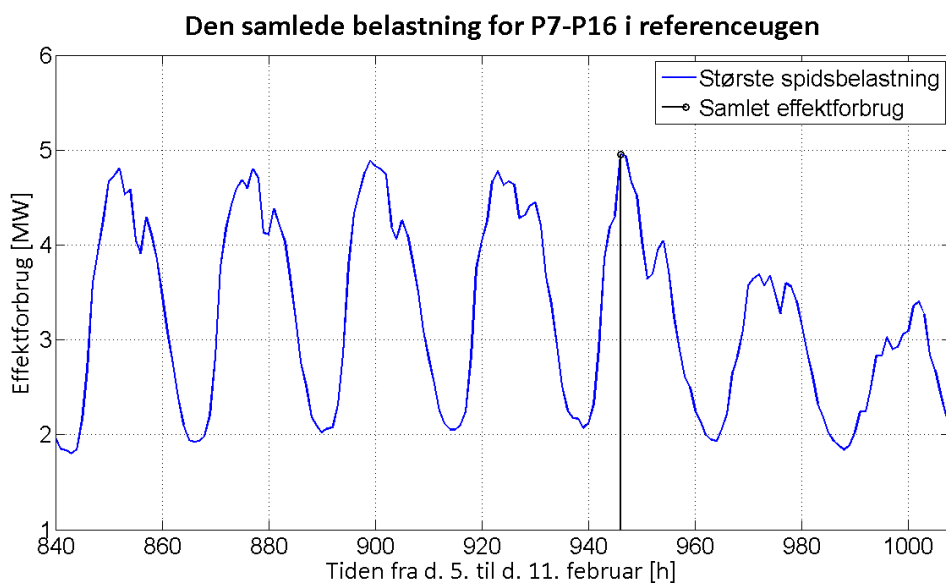
Herefter opdeles og estimeres belastningerne P7-P16, som nævnt i forhold til forskellige sektors belastningsmønstre, i de tre hovedsektorer, husholdning, industri samt handel og service, der tilsammen udgør 100 % af de enkelte belastninger. Disse værdier er vist i Tabel 5.3.

Belastninger	Husholdning	Industri	Handel og service
P5	15 %	75 %	10 %
P7	20 %	70 %	10 %
P8	40 %	20 %	40 %
P9	20 %	35 %	45 %
P10	25 %	25 %	50 %
P11	70 %	10 %	20 %
P12	50 %	30 %	20 %
P13	10 %	45 %	45 %
P14	50 %	30 %	20 %
P16	45 %	35 %	20 %

**Tabel 5.3 Fordeling af belastningerne P7-P16 i de tre hovedsektorer**

De estimerede værdier i Tabel 5.3, bygger alene på vurdering af belastningsmønstrene ved visuel gennemgang. Der er således ikke foretaget nogen matematisk sammenligning af værdierne i kurverne. Dette vil selvfølgelig være behæftet med del usikkerhed og kan have indflydelse på effektflowanalysen.

Nu skal varmepumpeenhederne fordeles på belastningerne P7-P16 i forhold til den tildelte procentsats for husholdningssektoren og effektstørrelsen af den aktuelle belastning. Dette gøres ved at summere alle belastninger P7-P16 for den pågældende referenceuge, og derefter udpege det tidspunkt, der samlet har den største spidsbelastning. I Figur 5.6 er vist den beregnede samlede belastning, med indlagt visning af den maksimale spidsbelastning.



**Figur 5.6 Beregnet samlet belastning P7-P16 for den valgte referenceuge**

For det viste tidspunkt omregnes alle belastningerne P7-P16 til en procentstørrelse af den samlede spidsbelastning med de valgte fordelingsstal i Tabel 5.3 for husholdningssektoren og størrelsen på den aktuelle belastning. Den beregnede procentstørrelse ganges så med antallet af maksimale varmepumpeenheder for scenarie (1-3). Hermed fordeles enhederne på belastningerne P7-P16 i forhold til det konkrete distributionsnet. Udregningen er vist i Tabel 5.4.

Belastning	Effekt (MW)	Størrelse (%)	Scenarie 1	Scenarie 2	Scenarie 3
P7	0,2246	12,70	70	141	211
P8	0,1326	7,50	42	83	125
P9	0,0811	4,59	25	51	76
P10	0,1625	9,19	51	102	153
P11	0,0939	5,31	29	59	88
P12	0,2150	12,16	67	135	202
P13	0,0181	1,02	6	11	17
P14	0,7513	42,51	236	470	707
P16	0,0888	5,02	28	56	83
<b>Total</b>	<b>1,7679</b>	<b>1,0</b>	<b>554</b>	<b>1108</b>	<b>1662</b>

**Tabel 5.4 Beregning og fordeling af antal varmepumpeenheder på P7-P16 for scenarierne 1 til 3**

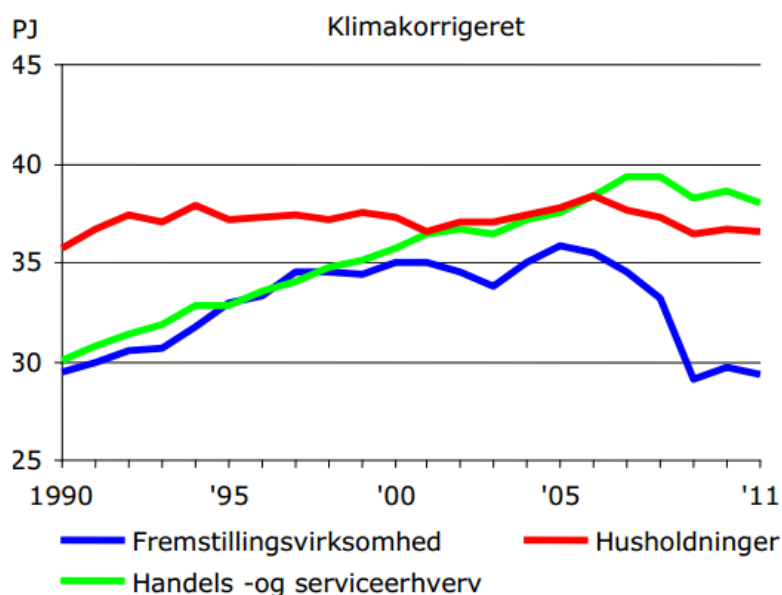
Hermed er estimering af belastningerne P5-P16 og fordeling i forhold til hovedsektorer gennemgået. Herefter skal de tre nøgleformler for fremskrivning til 2020 af disse tre hovedsektorer fastlægges. Dette gennemgås i efterfølgende afsnit.

### 5.3.2 Fastlæggelse af nøgleformler for de tre hovedsektorer

Nøgleformlerne for fremskrivning af de tre hovedsektorer til 2020 fastlægges ud fra energistyrelsens årsrapport 2011 (6) og Danmarks energifremskrivning 2012 (15), hvor 2003 er udgangspunktet, 2011 er hældningspunktet og 2007 er år nul. Der ses bort fra nedgange i energiforbruget for 2008, 2009 og 2010, da dette hovedsageligt skyldes den globale krise, hvilket kan have indflydelse på energiforbruget. Derudover er det antaget, at en lineær sammenhæng imellem 2003 og 2020 er tilstrækkelig for analysen i dette projekt.

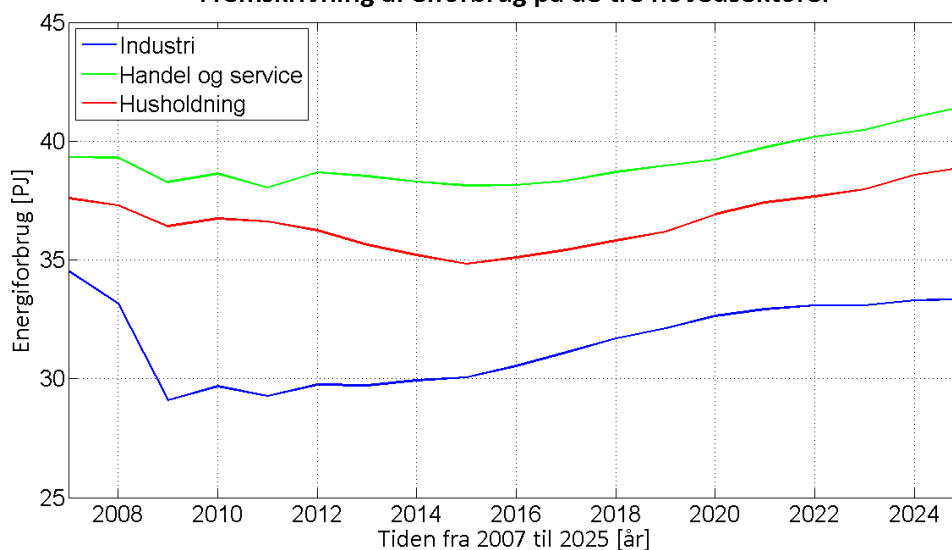
I Figur 5.7 er elforbruget fra 1990 til 2011 for de tre hovedsektorer vist. Det kan ses, at handel og service sektoren har haft en mindre stigning, industrisektoren har haft et større fald, mens husholdning har haft et lille fald i elforbruget.

#### Endeligt elforbrug på anvendelsesområder



Figur 5.7 Elforbruget på de tre hovedsektorer fra 1990 til 2011 (6)

#### Fremskrivning af elforbrug på de tre hovedsektorer



Figur 5.8 Fremskrivning af elforbruget på de tre hovedsektorer

Når der ses frem mod 2020 fra 2011, ændre billedet sig, som det kan ses af Figur 5.8, her er der for handel og service sektoren estimeret en mindre stigning, for industrisektoren en mindre stigning og for husholdningen en lille stigning. Tallene, der ligger til grund for disse kurver, er taget fra Danmarks energifremskrivning (15), som der henvises til i denne rapport. Denne fil "National\_DK\_11102012.xls" er vedlagt på CD'en bagerst i rapporten.

Sammenstilles kurverne i Figur 5.7 og Figur 5.8 fra 2003 til 2020, kan der beregnes tre nøgleformler for fremskrivningen af elforbruget på henholdsvis husholdning, industri samt handel og service sektorerne. Disse formler vil så tilsammen beskrive grundbelastningen i distributionsnettet, uden tilslutning af de estimerede varmepumpeenheder, da fremskrivningen i Figur 5.8 er uden tillæg af elforbrug fra varmepumper og elbiler.

Hældningen i nøgleformlerne beregnes ud fra x og y koordinater for 2003 og 2020 omregnet til en procentstørrelse, og skæringspunktet på y-aksen er elforbruget i 2007 lig med 1,0 (100 %). Der er beregnet følgende nøgleformler. Se ligningerne 5.18, 5.19 og 5.20.

#### **Husholdning:**

$$\begin{aligned} P_{Hus} &= -0,00028 \cdot (\text{år} - 2007) \cdot P_{Hus}^0 + P_{Hus}^0 \Rightarrow \\ P_{Hus} &= (1 - 0,00028X_{\text{år}}) \cdot P_0 k_{Hus} \end{aligned} \quad ( 5.18 )$$

#### **Industri:**

$$\begin{aligned} P_{Ind} &= -0,00214 \cdot (\text{år} - 2007) \cdot P_{Ind}^0 + P_{Ind}^0 \Rightarrow \\ P_{Ind} &= (1 - 0,00214X_{\text{år}}) \cdot P_0 k_{Ind} \end{aligned} \quad ( 5.19 )$$

#### **Handel og service:**

$$\begin{aligned} P_{H\&S} &= 0,00518 \cdot (\text{år} - 2007) \cdot P_{H\&S}^0 + P_{H\&S}^0 \Rightarrow \\ P_{H\&S} &= (1 - 0,00518X_{\text{år}}) \cdot P_0 k_{H\&S} \end{aligned} \quad ( 5.20 )$$

Hvor  $X_{\text{år}}$  er fremskrivning i antal år, hvor 2007 er lig med nul, 2020 er lig med 13,  $P_0$  er begyndelsesværdien for den aktuelle belastning og  $K_{Hus}$ ,  $K_{Ind}$  og  $K_{H\&S}$  er fordeling af belastningen i de tre hovedsektorer i henhold til Tabel 5.3.

Hermed er de tre nøgleformler til de tre hovedsektorer fastlagt. Det skal dog nævnes, at disse formler skal betragtes som en prognose på et muligt fremtidigt elforbrug. Endvidere vil hældningerne ændre sig betydeligt, hvis der beregnes længere frem til f.eks. 2030. Men da de 50 % vindenergi skal være implementeret i 2020, ifølge Energiaftalen fra 2012 (1), fastholdes denne grænse.

Herefter skal nøgleformlen for fremskrivning af installerede varmepumpeenheder fastlægges, dette gøres i efterfølgende afsnit.

### **5.3.3 Fastlæggelse af nøgleformel til fremskrivelse af varmepumper**

Nu hvor grundbelastningen for de tre hovedsektorer i distributionsnettet er på plads, skal der fastlægges en nøgleformel til fremskrivning af det installerede antal varmepumper, således at den samlede belastning på P5-P16 kan beregnes frem mod 2020. Med udgangspunkt i

Energiaftalen fra 2012 (1) og Smart Grid Strategi 2013 fra Klima-, Energi-, og Bygningsministeriet (4) er der estimeret følgende progressioner i udviklingen.

- 10 % fra 2003 til 2013.
- 25 % fra 2013 til 2016.
- 40 % fra 2016 til 2020.

Grunden til disse ændringer på kurven er, at der fra 2013 ikke længere må installeres oliefyr i nye boliger, og dette er vurderet til at få en positiv indflydelse på udviklingen. Endvidere er det fra 2016 vedtaget, at det ikke skal være muligt at få oliefyr i eksisterende boliger, hvis der i området allerede er fjernvarme eller naturgas. Dette er også vurderet til at få en positiv indflydelse på udviklingen. Med disse estimeringer kan den samlede udvikling beregnes, hvilket er vist i Figur 5.9, her er y-aksen antal varmepumper og x-aksen er antal år, hvor 2003 er lig med nul og 2020 er maksimumantallet ifølge fordelingen vist i Tabel 5.4. Med disse progressioner og en y-værdi fra 0-1, der er lig x-værdien fra 0-1, vil y-værdien i 2020 ( $x=17$ ) være lig med følgende beregning, se beregning 5.21.

$$y_{2020} = (13 - 3) \cdot 0,1 + (16 - 13) \cdot 0,25 + (20 - 16) \cdot 0,4 = \underline{3,35} \quad ( 5.21 )$$

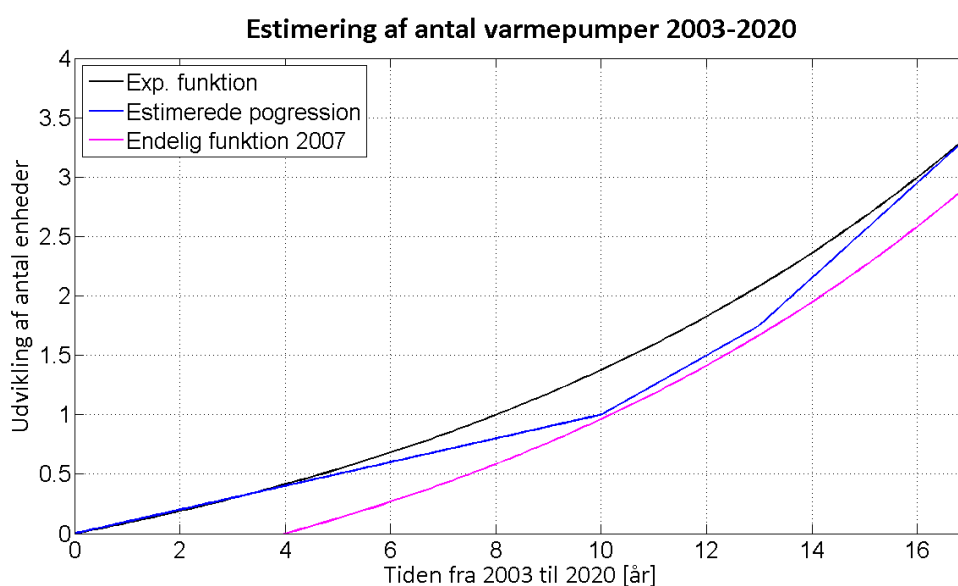
Med denne værdi kan der beregnes et logaritmisk udtryk, som med  $(x,y) = (17, 3,35)$  går igennem nul i 2003 på følgende måde, se ligning 5.22.

$$Y_{vp} = 10^{(\tau \cdot X_{\text{år}})} - 1 \quad ( 5.22 )$$

For at finde progressionskonstanten  $\tau$  indsættes de kendte værdier  $x$  og  $y$  i ligning 5.22 og  $\tau$  kan beregnes, se beregning 5.23.

$$3,35 = 10^{(\tau \cdot 17)} - 1 \Rightarrow \text{Log}(4,35) = \tau \cdot 17 \Rightarrow$$

$$\tau = \frac{\text{Log}(4,35)}{17} = \underline{0,0376} \quad ( 5.23 )$$



Figur 5.9 Beregning af de estimerede progressioner, logaritmisk funktion og den endelige funktion fra 2007

Hermed bliver udtrykket som ligning 5.24 og beregningen af udtrykket er vist i Figur 5.9 til sammenligning med de estimerede tre progressioner.

$$Y_{vp} = 10^{(0,0376 \cdot X_{\text{år}})} - 1 \quad ( 5.24 )$$

Som det ses af figuren, er den logaritmiske funktion også påført forskudt på y-aksen. Da udgangspunktet i analysen er 2007, skal funktionen forskydes med værdien af  $Y_{vp}(x=4)$ . Dette gøres ved at lægge værdien til 1 fra 5.24. Udtrykket bliver da som følgende, se ligning 5.25.

$$Y_{vp} = 10^{(0,0376 \cdot X_{\text{år}})} - 1.4138 \quad ( 5.25 )$$

Med denne funktion fastlægges nu det endelige fordelingskema, der er omregnet til en procentstørrelse, som bruges til at bestemme det faktiske antal varmepumper fastlagt i Tabel 5.4, hvor 2007 er lig med nul og 2020 er lig med 100 %. Skemaet anvendes, når den samlede belastning P5-P16 beregnes ud fra de estimerede fremskrivninger og distributionsnettets lastniveau ud fra dette kan analyseres. De beregnede fordelingsstal fra 2007 til 2020 kan ses i Tabel 5.5.

Aktuelle år	Funktionsværdi	Procentstørrelse
2007	0,0	0,0
2008	0,12786	0,0434
2009	0,26729	0,0908
2010	0,41932	0,1425
2011	0,58510	0,1988
2012	0,76588	0,2602
2013	0,96300	0,3272
2014	1,17795	0,4002
2015	1,41234	0,4799
2016	1,66793	0,5667
2017	1,94663	0,6614
2018	2,25054	0,7646
2019	2,58193	0,8772
2020	2,94328	1,0

Tabel 5.5 Fordelingstabel til beregning af antal varmepumper

Nu hvor nøgleformlen og dermed fordelingskemaet er fastlagt, mangler der kun en sidste vigtig estimering, for at den endelige belastning fra fremskrivningen af varmepumper kan beregnes.

Dette er en vurdering af en samtidighedsfaktor for de installerede varmepumper, hvilket er en normal procedure, når et større antal belastninger tilkøbes et distributionsnet. Samtidighedsfaktoren har stor indflydelse på, hvordan distributionsnettet dimensioneres og udtrykker i hvor stor en grad, de tilsluttede belastninger forventes at være i drift samtidigt. I den sammenhæng svarer en faktor på 1,0 til 100 % samtidighed. For varmepumperne i denne analyse er der vurderet følgende.

### **Samtidighedsfaktoren = 0,8**

Hermed er alle nøgleformler og fordelingstal fastlagt, og belastningerne P5-P16 kan fremskrives til 2020. For at samle alle førnævnte estimeringer skal der laves en sammenskrivning af alle formler og fordelingstal, dette gøres i efterfølgende afsnit.

#### **5.3.4 Samling af nøgleformler og fordelingstal for belastningerne P5-P16.**

Med udgangspunkt i estimeringerne fastlagt i afsnit 5.3.1 til 5.3.3 udarbejdes der her et samlet udtryk, der med kendskab til begyndelsesværdierne og hvilket scenarie der ønskes, direkte kan beregne belastninger P5-P16. Derudover beregnes fremskrivningen for alle belastningerne P5-P16 for det tidspunkt i referenceugen, der havde den største samlede maksimale spidsbelastning, hvilket også var udgangspunktet ved fordeling af varmepumpeenhederne på de tre scenarier. Først samles alle grundbelastningerne for de tre hovedsektorer med de tre nøgleformler og fordelingsprocenterne i Tabel 5.3, se ligning **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet..**

$$\begin{aligned}
 P_{GB} &= P_{Hus} + P_{Ind} + P_{H\&S} \Rightarrow \\
 P_{GB} &= (1 - 0,00028X_{\text{år}}) \cdot P_0 k_{Hus} + (1 - 0,00214X_{\text{år}}) \cdot P_0 k_{Ind} + \\
 &\quad (1 - 0,00518X_{\text{år}}) \cdot P_0 k_{H\&S} \Rightarrow \\
 P_{GB} &= P_0 (-0,00028X_{\text{år}} k_{Hus} - 0,00214X_{\text{år}} k_{Ind} + 0,00518X_{\text{år}} k_{H\&S} + 1)
 \end{aligned} \tag{ 5.26 }$$

Hvor  $P_{GB}$  er grundbelastningen. Herefter lægges belastningen for det estimerede antal varmepumper på grundbelastningen, se ligning 5.27.

$$\begin{aligned}
 P_B &= P_{GB} + P_{vp} \Rightarrow \\
 P_B &= P_0 (-0,00028X_{\text{år}} k_{Hus} - 0,00214X_{\text{år}} k_{Ind} + 0,00518X_{\text{år}} k_{H\&S} + 1) + \\
 &\quad P_{Net} \cdot VP_S \cdot S_f \Rightarrow \\
 P_B &= P_0 (-0,00028X_{\text{år}} k_{Hus} - 0,00214X_{\text{år}} k_{Ind} + 0,00518X_{\text{år}} k_{H\&S} + 1) + \\
 &\quad \underline{P_{Net} \cdot VP_S \cdot 0,8}
 \end{aligned} \tag{ 5.27 }$$

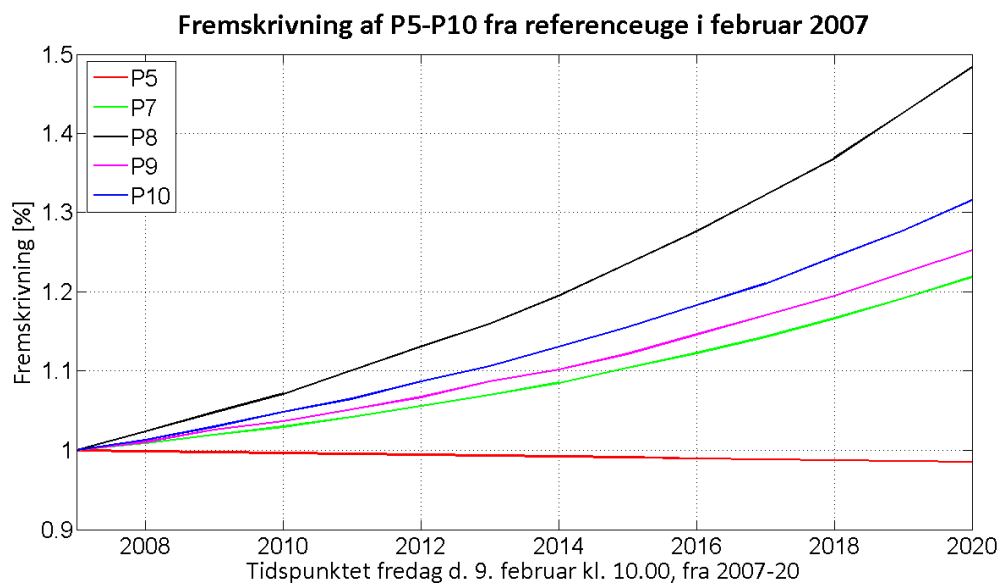
Hvor  $P_B$  er den samlede fremskrevne belastning,  $P_{vp}$  er den samlede belastningen, omregnet til netbelastning, fra de implementerede varmepumper,  $P_{Net}$  er varmepumpens aktuelle forbrug beregnet i referencesystemet,  $VP_S$  er det beregnede hele antal installerede varmepumper udregnet efter fordelingen i Tabel 5.5 og  $S_f$  er den vurderede samtidighedsfaktor. Beregning af det aktuelle antal varmepumper fastlægges efter ligning 5.28, dog op- eller nedrundes til hele antal, hvis dette er nødvendigt.

$$VP_S = VP_{maks} \cdot K_{\text{år}} \tag{ 5.28 }$$

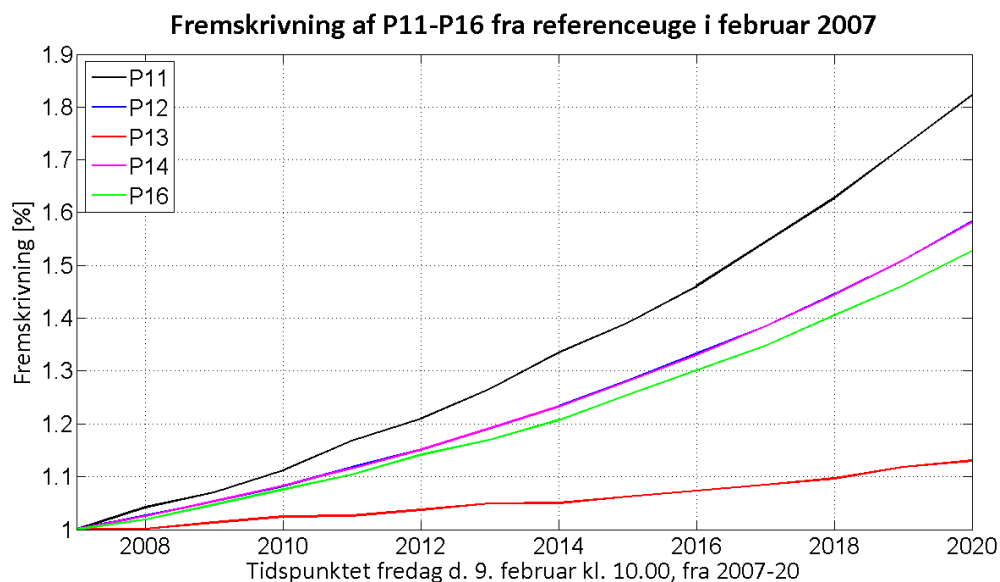


Hvor  $VP_{maks}$  er det beregnede antal fra Tabel 5.4, og  $K_{\text{år}}$  er den beregnede fordeling i Tabel 5.5. Alle belastningerne P5-P16 er fremskrevet med ligningerne 5.27 og 5.28 for det valgte tidspunkt i referenceceugen, der har den største spidsbelastning. Fremskrivningen regnes ud fra scenarie 2, en aktiv varmepumpe og en COP-værdi svarende til den anvendte udvendige temperatur på  $-2,45^{\circ}\text{C}$  (2012).

Alle de beregnede værdier er vist i Figur 5.10 og Figur 5.11, hvor værdierne er omregnet til en procentsats i forhold til udgangspunktet 2007, således at de enkelte belastninger kan sammenlignes indbyrdes.



Figur 5.10 Fremskrevet belastning af P5-P16 for referenceceugen på det maksimale spidsbelastningstidspunkt



Figur 5.11 Fremskrevet belastning af P11-P16 for referenceceugen på det maksimale spidsbelastningstidspunkt

Som det ses i figurerne, stiger det estimerede effektforbrug meget forskelligt på de ti belastninger P5-P16. Dette vil også være at forvente, da belastninger er sammensat med forskellige hovedsektorer, og størrelsen af dem varierer meget. Nu er beregningen med vilje lagt på et meget kritisk tidspunkt, hvilket også afspejler sig i kurverne, men dette giver et bedre

billede af de belastninger, der har den største betydning for den videre analyse af lastniveauet i det konkrete distributionsnet.

Hermed er nøgleformlerne for fremskrivning af belastningerne P5-P16 samt fordelingstal for de tre hovedsektorer estimeret og gennemgået. Med disse kan de samlede effektflowberegninger foretages for det konkrete distributionsnet, og en analyse af lastniveauet kan foretages, når der implementeres en overordnet intelligent styring. Denne styring vil blive beskrevet og gennemgået i næste kapitel.

## 6 Design af det adaptive styresystem

I dette kapitel vil der blive udarbejdet et forslag til, hvordan en basismodel og en reguleringsstrategi kan udføres for at opnå en optimal intelligent styring af de estimerede antal installerede varmepumper i fremtiden. Dette således at de kommende belastninger fordeles så optimalt som muligt på det konkrete distributionsnet, og lastniveauet omkring spidsbelastningernes peakperioder reduceres. Dette gøres under hensyn til de fire nævnte betingelser i afsnit 4.2, som er følgende.

- Valgte rumtemperaturer, komfort.
- Prisniveau på fleksmarked, kostpris.
- Varmepumpens effektivitet, COP.
- Vindenergiproduktion, vind.

Målet med dette projekt er i sig selv er ikke at udarbejde den bedste intelligente styring, men at anvende en intelligent styring i det opbyggede referencesystem for at undersøge, hvor stor en indflydelse dette kan få på lastniveauet i det konkrete distributionsnet, når der implementeres et større antal varmepumper i fremtiden.

For at udarbejde denne styring vil der efterfølgende blive gennemgået følgende.

- Beskrivelse af de valgte betingelser og opstilling af grænseværdier.
- Beskrivelse af den intelligente styringsstrategi i forhold til den individuelle styring.
- Beskrivelse af prognoseberegninger, som den intelligente styring anvender.
- Beskrivelse af implementeringen i det udarbejdede referencesystem.
- Beskrivelse af en simpel testsimulering

### 6.1 Beskrivelse af de valgte betingelser

I dette afsnit beskrives de betingelser, som er valgt til de styrende parametre for den intelligente styring. Derudover beskrives nogle fordele og ulemper ved disse betingelser i forhold til fleksibiliteten, ligesom de sammenlignes for at udpege indbyrdes forhold, der gør sig gældende, når betingelserne anvendes i samme styring. Derudover fastlægges grænseværdier for disse betingelser for den videre implementering i det eksisterende referencesystem.

#### 6.1.1 Komfort på rumtemperatur

Rumtemperaturen er brugerdefineret og har stor betydning for opfattelsen af det samlede varmesystems komfort. Det er derfor vigtigt, at styring kan overholde de valgte grænser. I det opbyggede referencesystem er setpunktet valgt til 23°C, ligesom maksimum- og minimumsværdierne er valgt til henholdsvis 26°C og 20°C. Den intelligente styregrænse omkring setpunktet er derfor fastsat til +/- 2°C, hvilket medfører, at de intelligente styringsgrænseværdier for komforten er fastsat til følgende.

***Grænseværdierne er maksimum 25°C og minimum 21°C.***

Det er klart, at fleksibiliteten på varmepumpen afhænger meget af den aktuelle rumtemperatur og de brugervalgte grænser, jo mindre grænsedifference, jo mindre fleksibilitet og omvendt jo større grænsedifference, jo større fleksibilitet. Men de valgte grænser er gennemsnitsværdier for danske boliger.

Hvis rumtemperaturen sammenlignes med COP-værdien, vil en opretholdelse af et givet setpunkt om natten være i strid med COP-værdien, da den udvendige temperatur om natten er meget lavere end om dagen, og derfor vil en luft/vand varmepumpe have en lavere COP-værdi og dermed en dårligere effektivitet om natten. Dette taler således for en sænkning af rumtemperaturen om natten.

Men sammenholdes rumtemperaturen med fleksmarkedet, vil elprisen om natten være lavere end om dagen, og på særlige tidspunkter i dagtimerne kan elprisen være meget høj. Dette taler således for en høj rumtemperatur om natten. Det kan dog konkluderes, at rumtemperaturen har den højeste prioritet i den intelligente styring, og den afgrænser således det endelige styresignal. Vedrørende vindhastigheder hænger disse meget sammen med fleksmarkedet, men dette beskrives under fleksmarkedet.

### **6.1.2 Kostpris på fleksmarked**

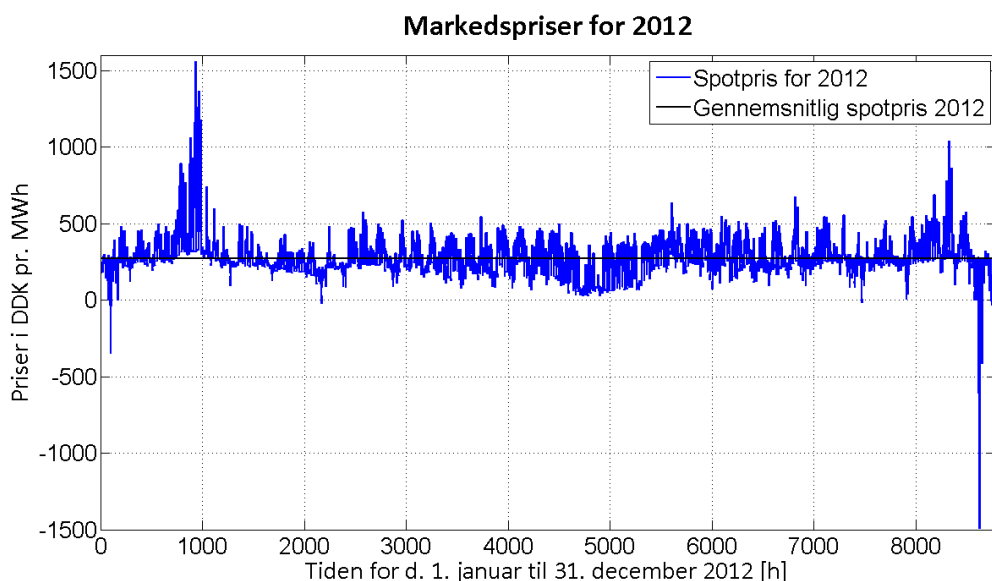
Elprisen er en markedsbestemt størrelse og som sådan væsentlig for brugeren, men som nævnt tidligere er afgiftssystemet i Danmark skruet sådan sammen, at det kun er en lille del af den samlede kostpris hos forbrugeren, der kan handles, så incitamentet for brugeren er fra starten væsentligt forringet. Flere analyser, heriblandt Fra vindkraft til varmepumpe Energinet (5), peger også på, at det fra forbrugers side ikke er rentabelt at anskaffe sig en intelligent styring, medmindre den intelligente styring allerede fra start er implementeret i de enkelte varmepumper.

Grunden til, at betingelsen alligevel er taget med, er den meget tætte sammenhæng med den større og større andel af implementeret vindenergi i distributionsnettet, der som nævnt i 2020 skal være 50 % af Danmarks elproduktion. Jo større andel vindenergi, jo mere dikteres elmarkederne af denne vindenergi (5), hvor der ved megen vindenergi er lave elpriser og ved lidt vindenergi høje elpriser. På denne måde vil den intelligente styring indirekte tage højde for den aktuelle vindenergiproduktion, når kostprisen er en betinget faktor i styringen. Det antages derfor, at der er taget højde for vindenergiproduktionen, når den betingede kostpris er medtaget. I den intelligente styring er grænseværdierne for kostprisen fastsat til følgende.

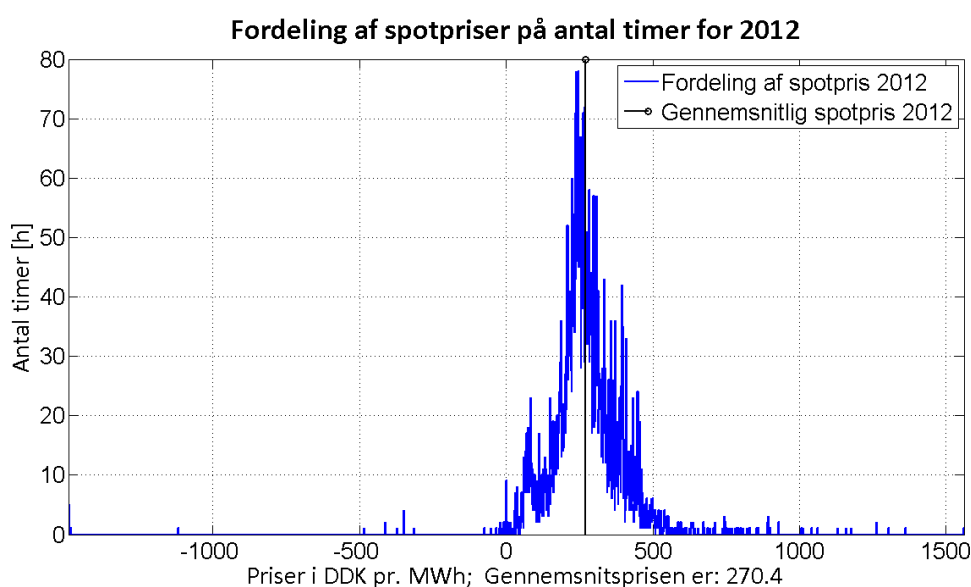
***Grænseværdierne er maksimum kr. 470 og minimum kr. 70 pr. MWh.***

Disse grænser er fastsat ud fra beregning af den gennemsnitlige kostpris på spotmarkedet fra 2012, hvilket også er anvendt til beregningerne i referencesystemet. På henholdsvis Figur 6.1 og Figur 6.2 kan den samlede gennemsnitlige kostpris aflæses, samt på hvilken måde kostpriserne fordeler sig i forhold til hyppigheden af de enkelte priser beregnet for hele 2012. Da den beregnede gennemsnitspris er kr. 270,4, er grænserne sat til henholdsvis lav grænse under ca. 5 % hyppighed og høj grænse over ca. 95 % hyppighed.

Som nævnt ovenfor vil en høj elpris få styringen til at sætte et lavere setpunkt for rumtemperatur, og sammenlignet med COP-værdien for samme periode, vil styring gå efter et højere setpunkt for rumtemperatur. Kostpris og COP-værdi er derfor modstridende og vil med den optimale styring finde en mellemvej om aften, tidlig morgen, formiddagen og eftermiddagen før kogetidspunktet.



**Figur 6.1** Kostpriser for spotmarkedet for 2012 med beregnede gennemsnitspriser



**Figur 6.2** Fordeling af spotpriser på hyppighed for 2012

### 6.1.3 Effektivitet på varmepumpen

Effektiviteten på en luft/vand varmepumpe afhænger meget af den udvendige temperatur, og det er i brugerens interesse, at varmepumpen kører så effektivt som muligt. Om vinteren har dette indflydelse på fleksibilitet af varmepumpen, da den her har en gennemsnitlig lavere COP-værdi og derfor en lavere produktion af energi, hvilket tvinger varmepumpen til at køre mere. Om sommeren har den en stor effektivitet, men til gengæld skal der ikke produceres særlig megen energi, faktisk kan nogle ejendomme frakoble varmepumpen om sommeren. Den største indflydelse, effektiviteten vil få i den intelligente styring, er om foråret og om efteråret, da der her er de bedste betingelser for at udnytte varmepumpens effektivitet maksimalt. De valgte COP-grænseværdier i den intelligente styring for henholdsvis en udvendig temperatur på minimum  $-12,7^{\circ}\text{C}$  og maksimum  $20^{\circ}\text{C}$  er udregnet med ligning 4.4 og fastsat til følgende.

**Grænseværdierne er maksimum 3,93 og minimum 1,95.**

## 6.2 Beskrivelse af den intelligente styringsstrategi

I dette afsnit beskrives strategien, som er anvendt i den intelligente styring, ligesom forskellene imellem denne og den individuelle styring beskrives. Dette gøres ud fra de i afsnit 6.1 nævnte betingelser, kravspecifikationer i kapitel 3 samt beskrivelsen og det udarbejdede referencesystem i kapitel 4.

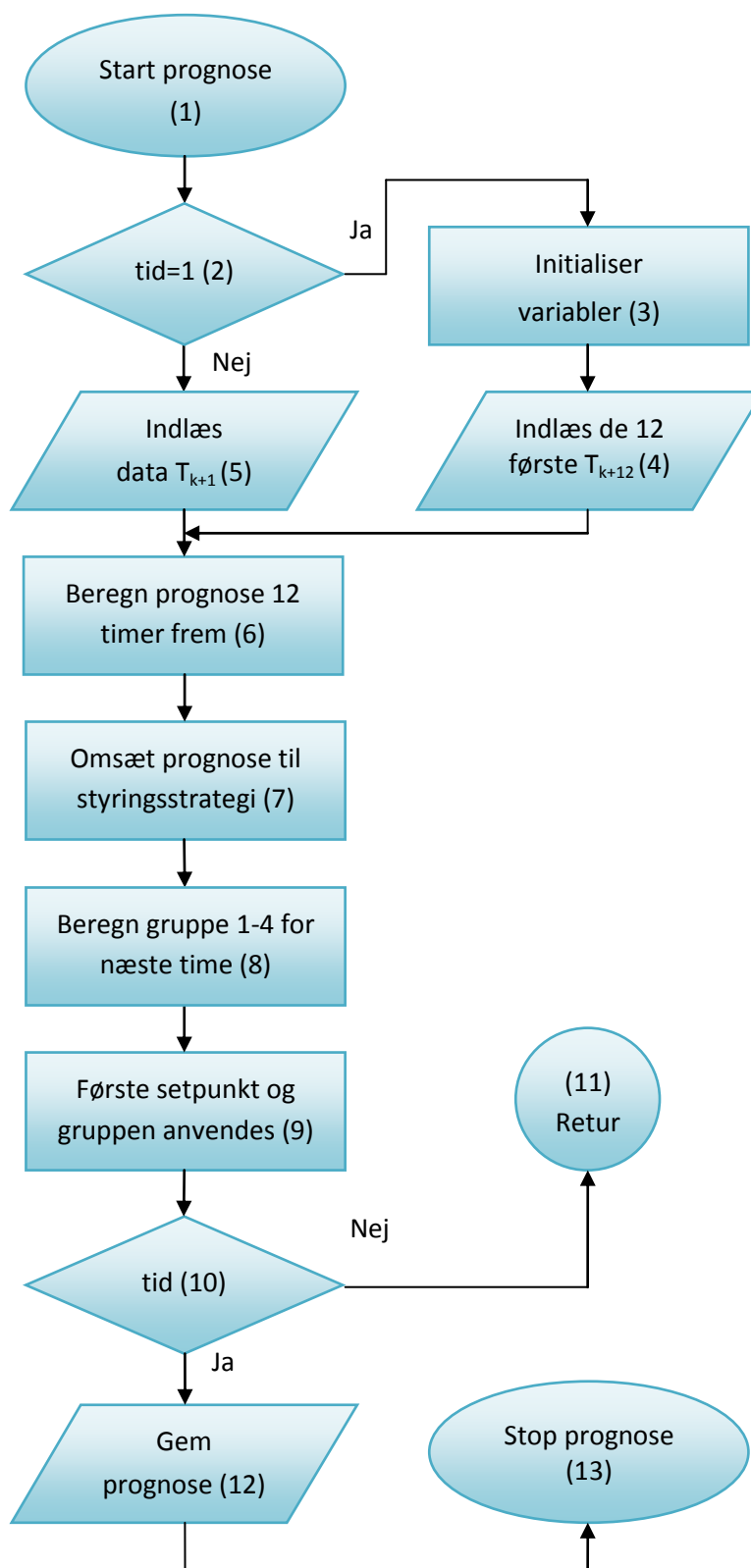
Da referencesystemet er opbygget ud fra beregninger med gennemsnitsværdier, og formlerne er opbygget efter en ny konceptmodel, der tager udgangspunkt i energiflow og ligevægtsligninger, og der ikke i dette projekt er set på dynamikken i varmesystemet, er der ikke udarbejdet noget funktionsudtryk for det samlede varmesystem. Den almindelige fremgangsmetode til at beregne den optimale kontrol kan derfor ikke anvendes til beregning af styringsbetingelserne for den individuelle styring i dette referencesystem. Der er derfor udarbejdet en anden simplificeret beregningsmetode, som er anvendt i referencesystemet til den overordnede styring, og som fungerer som en overbygning "subrutine" til det eksisterende referencesystem.

Denne "subrutine" hedder "Prog\_cal.m" og kan findes på Cd'en bagerst i rapporten. Den fungerer som en selvstændig intelligent styring, der kontrollerer den individuelle styring ved fastsættelse af nye setpunkter og flytning af grænser i tankene. Den gør det ved at beregne et styringsmønster 12 timer frem i tiden, der er baseret på simulerede vejrdata fra DMI for udvendige temperaturer og oplysninger om "flekspriser" fra den oprettede centrale serverstation.

Simuleringen af vejrdata foregår ved at generere et tilfældigt tal, der afviger +/- 5 % fra de anvendte måledata i referencesystemet fra 2012. Dette kan på den 12. time, hvis alle de genererede tal har sammen retning og maksimumværdi, i værste fald medføre helt op til 71 % afvigelse. Sandsynligheden for dette er dog lav, og metoden anses her for at være en mere realistisk prognose af vejret. Derudover er der for vejrdata, som nævnt ovenfor, opsat grænseværdier, og hvis det genererede tal ligger udenfor grænserne, bliver tallet korrigeret til den aktuelle grænseværdi. Vedrørende flekspriser er der her anvendt spotpriser fra 2012, og der foretages ingen korrigerende af værdierne.

Den anvendte strategi er blevet berørt lidt under førnævnte beskrivelse af betingelserne, men vil blive gennemgået fra start til slut her, først ved hjælp af et overordnet flowchart, dernæst vil et eksempel blive beregnet og beskrevet. Strukturen af den overordnede intelligente styring er opbygget med de fem flowchatblokke, der tidligere er brugt til beskrivelse af referencesystemet, og vil igen her kun blive beskrevet med overordnede funktioner. Strukturen er vist i Figur 6.3.

Når simuleringen kalder "subrutine" (1), starter prognosen, herefter undersøges om det er 1. kald, J/N (2), hvis ja, initialiseres alle variabler (3), og derefter indlæses de første 12 værdier (4), hvis nej, indlæses ny værdi, og første værdi fjernes, når prognosefejlen er beregnet (5), så beregnes/korrigeres prognose med prognosefejlen 12 timer frem (6), den samlede styringsstrategi dannes/ændres (7), og det beregnes/korrigeres hvilken gruppe 1-4 tankene skal arbejde under i næste time (8), dernæst implementeres setpunkterne og gruppeværdierne (9), og det kontrolleres om alle tidspunkter er beregnet, J/N (10), hvis nej, returneres til simuleringen (11), hvis ja, gemmes de beregnede prognosedata (12), og til sidst afsluttes scriptet (13).



Figur 6.3 Strukturen af den overordnede styring

Som det fremgår af strukturopbygningen, udregnes et setpunkt og en tilhørende gruppe fra 1-4, som den individuelle styring skal indrette sig efter, og styringen er hermed omdannet til en master/slave med flydende grænser, der hele tiden ændrer sig efter prognosen, som igen afhænger af de opstillede betingelser. Vedrørende gruppeopbygningen og de tilhørende

afgrænsende betingelser for tidspunkterne, varmepumpen og setpunktet vil dette blive gennemgået under implementeringen af den intelligente styring. For at præcisere den anvendte metode vil der efterfølgende blive gennemgået et eksempel, hvor alle dele i den ovennævnte struktur gennemgås for en tilfældig periode i referencesystemet.

Strategien i strukturen er, at der på baggrund af kendte tilstande i vejret, den herved beregnede COP-værdi på varmepumpen og kendte priser i fleksmarked kan beregnes en mere effektiv styringsplan for den individuelle varmepumpe indenfor en begrænset tidsperiode. Dette skulle gerne medføre, at belastningen flyttes væk fra spidsperioder, en bedre effektivitet på varmepumpen udnyttes, og forbrugeren oplever en mindre elregning, uden at der opleves en forringet komfort i boligen. Denne strategi er baseret på, at der ved rumopvarmning af boliger og i det tilhørende varmesystem kan oplagres en større energimængde, der kan udnyttes af den intelligente styring til at fremskynde eller forsinke den tilførte energi til boligen.

### **6.3 Beskrivelse af prognoseberegninger for den intelligente styring.**

Med udgangspunkt i strukturen Figur 6.3 beskrives her den beregningsmetode, som er anvendt til at fastlægge prognosевærdier frem i tiden. Dette gøres ved af gennemgå hele korrektionsprocessen med et eksempel. Når hovedsimuleringen starter på et nyt beregningsforløb, kaldes denne "subrutine", og det antages, at det ikke er første gang. Fra sidste gennemløb  $T_{k-1}$  er der korrigeret 12 timebaserede værdiprognoser for henholdsvis udvendig temperatur, priser fra fleksmarked, samlet globalt styremønster og samlet lokalt styremønster omsat til rumtemperatur i den anvendte gruppe 1-4's setpunkter.

Den første værdi i kontrolplanen er nu udført, og der skal beregnes nye værdier. I Tabel 6.1 er værdierne vist for de udvendige temperaturer omregnet til COP-værdier i %, flekspriser omregnet i %, det samlede globale omsætningsforhold i % og den samlede lokale kontrolplan for rumtemperaturens setpunkt er beregnet. Procentforholdet er beregnet med grænseværdierne fastlagt under afsnit 6.1, hvor den viste værdi er et, hvis den estimerede værdien er lig med eller over maksimumgrænsen, og nul hvis denne værdi er lig med eller under minimumsgrænsen. Beregningen er foretaget med udgangspunkt i de 12 første timer for mandagen i 4. uge i januar måned, fra kl. 00<sup>00</sup> til kl. 12<sup>00</sup>

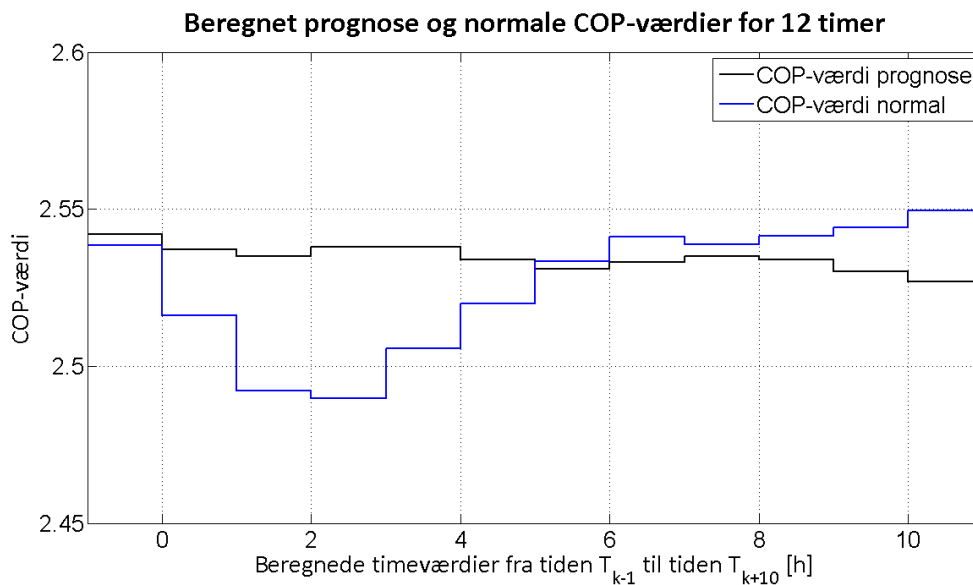


<b>Prognosetider</b> <b>12 timer</b>	<b>COP (%)</b> <b>Globalt</b>	<b>Flekspris (%)</b> <b>Globalt</b>	<b>Samlet (%)</b> <b>Globalt</b>	<b>Kontrolplan</b> <b>Lokalt Sp</b>
$T_{K-1}$	<b>0,645</b>	<b>0,529</b>	<b>0,5870</b>	<b>22,56</b>
$T_K$	0,646	0,560	0,6030	23,98
$T_{K+1}$	0,645	0,578	0,6115	24,73
$T_{K+2}$	0,646	0,583	0,6145	25,00
$T_{K+3}$	0,646	0,583	0,6145	25,00
$T_{K+4}$	0,645	0,565	0,6050	24,16
$T_{K+5}$	0,644	0,547	0,5955	23,31
$T_{K+6}$	0,645	0,540	0,5925	23,04
$T_{K+7}$	0,645	0,529	0,5870	22,56
$T_{K+8}$	0,645	0,510	0,5775	21,71
$T_{K+9}$	0,644	0,501	0,5725	21,27
$T_{K+10}$	0,643	0,496	0,5695	21,00

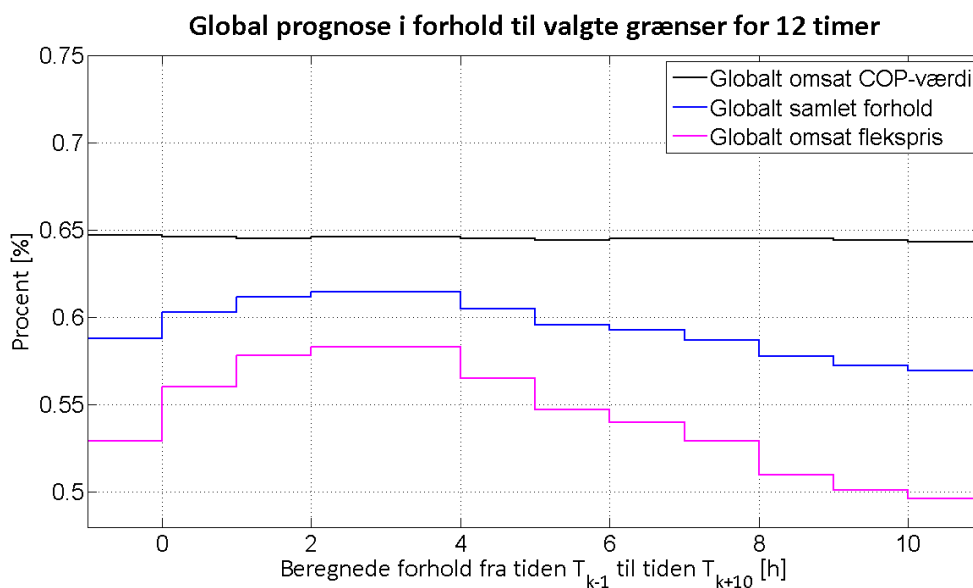
**Tabel 6.1** Prognoseværdier for 12 timer, COP i %, flekspris i %, samlet globalt i % og kontrolplan med setpunkter

Som det ses af tabellen, falder setpunktsværdierne hen imod morgen og formiddag, da elpriserne er stigende, og COP-værdien er næsten konstant. Den fremhævede række er de værdier, der er udført i referencesystemet, hvor kontrolplan (sidste kolonne) beregnede værdi er den styrende setpunkt (Sp). Grunden til, at det globale styringsmønster er omsat til et lokalt styringsmønster med ydergrænser, er, at uanset om de aktuelle forhold ikke er gunstige, så skal varmepumpen aktiveres indenfor de næste 12 timer under normale omstændigheder, og setpunktet bliver derfor mere følsom overfor de næste 12 timer, og vil med disse bedre finde et mere optimalt niveau for den intelligente styring i denne periode.

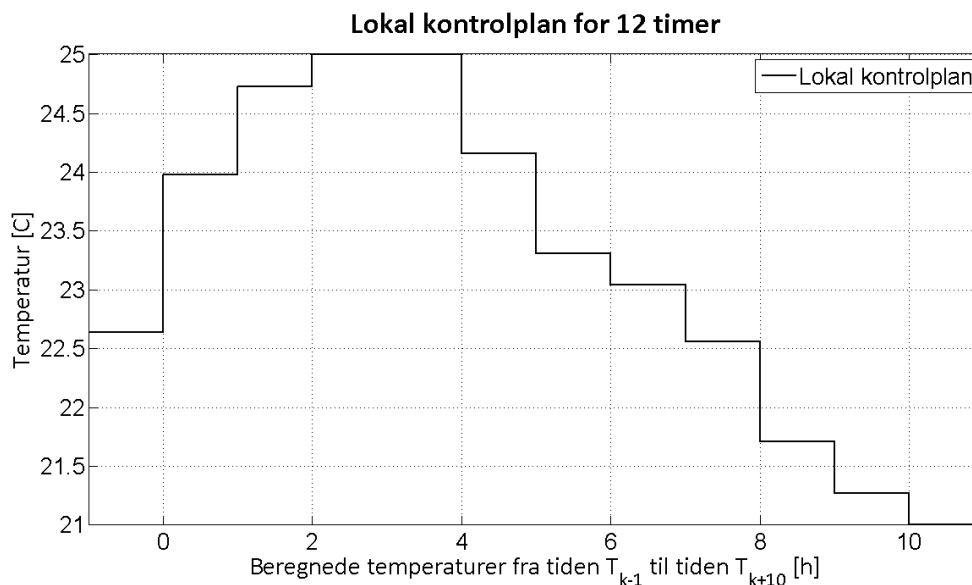
Derudover er det vigtigt at forstå, at prognosetallene i tabellen kun er "en" mulig tilstand på det aktuelle tidspunkt, og da de udvendige temperaturer er genereret med tilfældige tal (+/- 5 %), vil den aktuelle tilstand i referencesystemet afhænge af tidligere tilstande, og derved ændrer resultaterne sig hver gang, der beregnes et nyt år. Dette er kendetegner en adaptiv intelligent styring, der ud fra aktuelle forhold ændrer sin styrestrategi og derved hele tiden korrigerer styringen. For at visualisere tallene i Tabel 6.1 er der efterfølgende vist tre grafer, der viser henholdsvis Figur 6.4 aktuelle COP-værdier og prognose COP-værdier, Figur 6.5 omsætningsforhold globalt for COP-værdier, prisværdier og det samlede globale forhold samt Figur 6.6 den samlede lokale kontrolplan.



Figur 6.4 Prognose og normale COP-værdier for de beregnede 12 timer, fra  $T_{k-1}$  til  $T_{k+10}$



Figur 6.5 Global prognose beregnet ud fra de valgte grænseværdier fra afsnit 6.1



**Figur 6.6 Den beregnede lokale kontrolplan for 12 timer**

Som det ses af Figur 6.6, er prognosen for referencesystemet, at varmepumpen skal fylde energilageret fra kl. 1 til kl. 5 for så derefter gradvis at reducere energilageret. Nu er  $T_{k-1}$  allerede udført, så der skal laves en ny prognose for  $T_{k+11}$ . Men inden denne værdi påføres, korrigeres alle eksisterende værdier med prognosefejlen imellem  $T_{k-1}$  og den kendte/målte værdi i  $T_k$ , herved tilrettes hele kontrolplanen, og den sidste påførte værdi bliver mere præcis. Som det ses i Figur 6.4 er prognosen af COP-værdien større end den aktuelle COP-værdi, dermed bliver fejlen trukket fra  $T_k$  med følgende beregning, se ligning 6.1.

$$\Delta E_{T_k} = T_k - T_{k-1} \quad (6.1)$$

Hvor  $\Delta E_{T_k}$  er prognosefejlen,  $T_k$  den aktuelle værdi og  $T_{k-1}$  er den udførte prognoseværdi.

$$T_{k_{ny}} = T_k + \Delta E_{T_k} \quad (6.2)$$

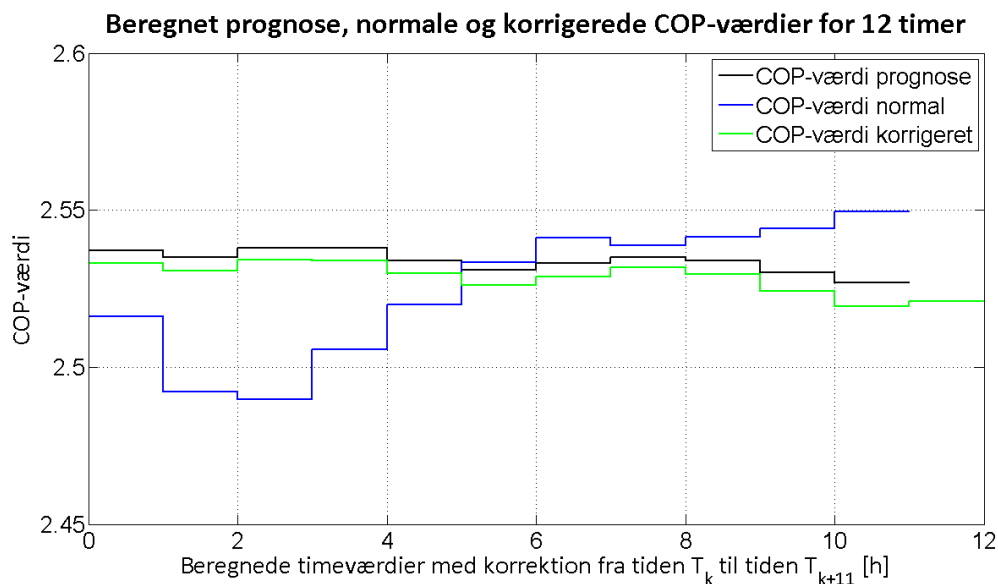
Hvor  $T_{k_{ny}}$  er den nye aktuelle og korrigerede værdi

Dette er dog ikke nok, da de eksisterende prognoseværdier fra  $T_{k+1}$  til  $T_{k+10}$  har stigende fejlmargen. Prognoseværdierne skal derfor korrigeres i forhold til den stigende fejlmargen, og samtidig korrigeres med hensyn til, om de på det pågældende tidspunkt er stigende eller faldende, ligesom de forrige fejlværdier medregnes løbende. Dette kan beskrives således, se ligning 6.3.

$$\Delta E_{T_{k(n)}} = \Delta E_{T_{k(n-1)}} \cdot \left( \left( \frac{T_{k(n)} - T_{k(n-1)}}{T_{k(n-1)}} \right) \cdot (1,05)^n \right); [n = 1 \rightarrow 11] \quad (6.3)$$

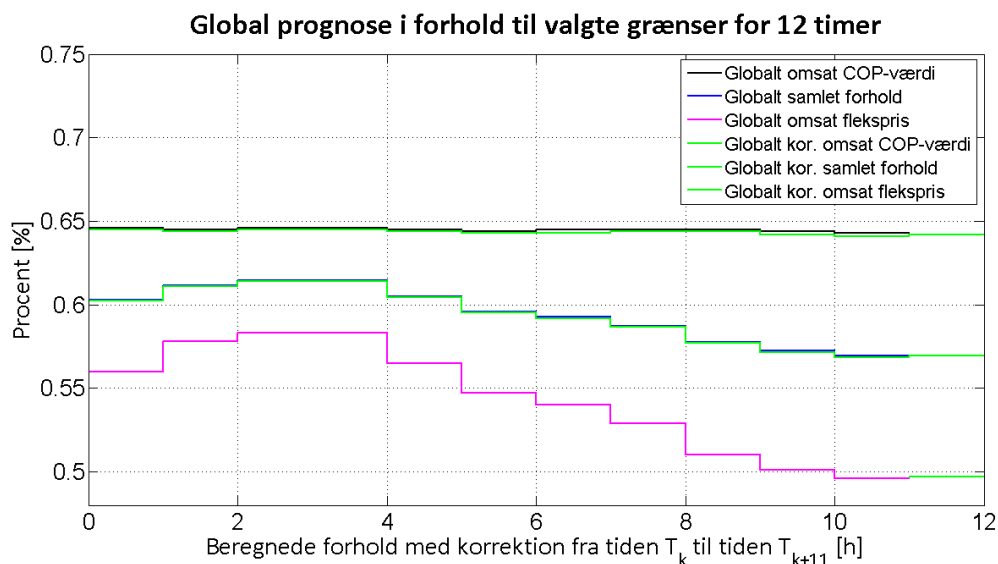
Hvor  $\Delta E_{T_{k(n)}}$  er den samlede prognosefejl på det aktuelle tidspunkt,  $\Delta E_{T_{k(n-1)}}$  er den forrige korrigerede prognoseværdi,  $T_{k(n)}$  er prognoseværdien i tidspunktet,  $T_{k(n-1)}$  er den forrige prognoseværdi, og  $n$  er antallet af timer frem i tiden og ved  $T_{k+1}$  er  $n=2$ .

Når korrektionen er foretaget tilføjes den nye timeprognose for  $T_{k+11}$ , og den gamle for  $T_{k-1}$  fjernes, hermed er der 12 nye prognoseværdier, og den tilrettede lokale kontrolplan kan beregnes og implementeres i varmesystemet. I Figur 6.7, Figur 6.8 og Figur 6.9 er denne korrektion vist i de samme figurer som før, hvorved de beregnede korrektioner kan aflæses direkte.



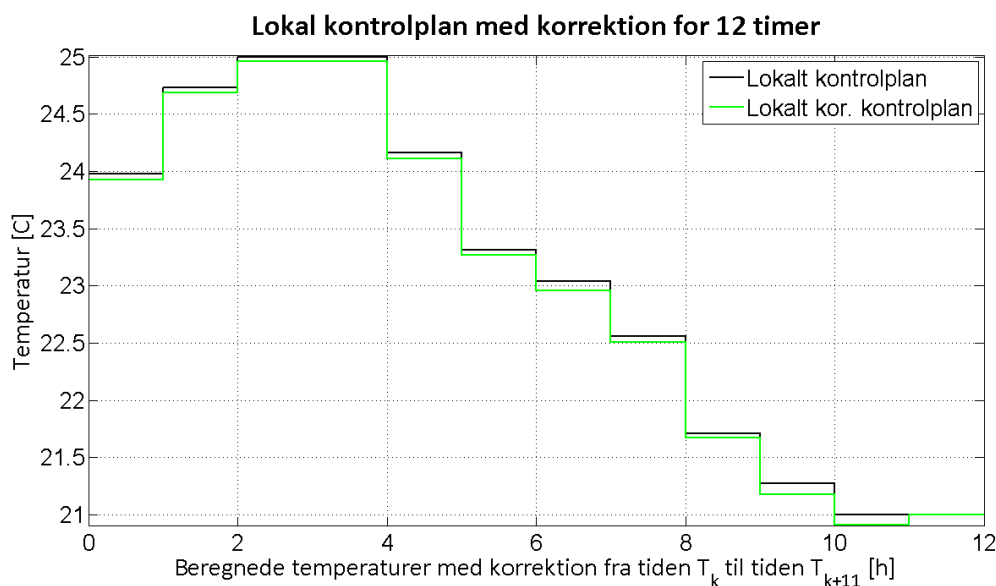
**Figur 6.7 De beregnede COP-værdier og den korrigerede COP-værdi fra  $T_k$  til  $T_{k+11}$**

I Figur 6.7 kan det ses, at fejlkorrektionen får større betydning, jo længere frem i tiden der beregnes, hvilket også ville være gældende, hvis der var brugt rigtige prognosevejrdata fra DMI.



**Figur 6.8 Prognose på de globale forhold med påført beregnede korrektioner fra  $T_k$  til  $T_{k+11}$**

Som det ses er korrektionen lille, da ændringen på den udvendige temperatur er lille, alligevel ændrer forholdet sig en del, da fleksprisen stiger hen på formiddagen, når de forskellige industrier får sat produktionen i omdrejninger.



**Figur 6.9 Den lokale kontrolplan med korrektioner fra  $T_k$  til  $T_{k+11}$**

I figuren er der ikke foretaget den korrekte omformning fra globalt til lokalt niveau, da korrektionerne i dette tilfælde er forholdsvis små, og det derved er lettere at se de forskellige ændringer af setpunkterne til referencesystemet. Når den rigtige omformning er foretaget, befinder systemet sig i en gruppe fra 1-4, se Tabel 6.2, med andre definerede top- og bundgrænser, ligesom der er tilknyttet flere afgrænsninger til systemet under bestemte omstændigheder. Disse beskrives i efterfølgende afsnit. Nu er beregningsmetoden i "subrutine" til estimering af 12 timers prognosen gennemgået, hermed kan det aktuelle setpunkt beregnes, og den beregnede gruppe 1-4 implementeres, i referencesystemet. Dette gennemgås i næste afsnit, hvor også forskellen imellem den individuelle styring og den intelligente styring gennemgås.

#### **6.4 Implementeringen af det udarbejdede referencesystem.**

I det følgende vil der kort blive gennemgået, hvilke ændringer der er foretaget i referencesystemet, for at den intelligente styring kan fungere, samt hvilke begrænsninger der er observeret under implementeringen. For at beskrive dette vil følgende punkter blive gennemgået.

- Anvendte betingelser, gruppeopdeling og beregning af den endelig setpunkt.
- Ændringer i referencesystemet.
- Forskelle på den individuelle og intelligente styring.

Der er under afprøvningen af systemet foretaget mange test med forskellige former for betingelser og afgrænsninger for at se, om der ved nogle var større ændringer end ved andre. Disse betingelser og afgrænsninger vil ikke blive gennemgået her, og i rapporten beskrives kun de anvendte i referencesystemet.

##### **6.4.1 Betingelser og opdeling i grupper**

Først skulle de udregnede prognosesetpunkter omsættes til en kontrolplan på lokalt niveau. Med lokalt menes, at der kun ses på de estimerede 12 timer frem i tiden og herved findes ud af, hvad den individuelle styring skal styre efter. Hvis referencesystemet betragtes for sig selv, er

det opbygget i to dele. Den ene del hvor boligen omsætter energien og har direkte forbindelse til rumtemperaturen, som er en styrende faktor for komforten, og den anden del varmesystemet som omsætter energien i tankene enten som tab eller forbrug, og hertil er varmepumpen tilkoblet og forsyner varmesystemet med den nødvendige energi. Denne del styres af tanktemperaturerne, som skal overholde en top- og bundtemperatur, og derfor kan varmepumpen godt køre selvom der ikke omsættes energi i boligen, og den kan være slukket, når der omsættes energi. For at imødekomme denne todeling, blev de beregnede prognoseværdier omsat til to styrende faktorer i referencesystemet, gruppeopdeling af top- og bundgrænser og beregning af styrende setpunkter til cirkulationspumpen.

Grupperne er fundet ud fra det beregnede globale prognoseforhold, som er beskrevet under beregningsmetoden, ved at udføre en hyppighedstest på de mest forekommende værdier fra 0-1. Testen er udført flere gange, og da denne er baseret på tilfældige generede beregninger, ligeledes beskrevet under beregningsmetoden, dannes der herved et billede af de beregnede værdier ligesom ved grænseværdier til kostpriserne, se Figur 6.2. Ud fra billedet er der fastlagt følgende grupper og grænseværdier, når der forvælges en tanktemperatur på 80°C, se Tabel 6.2.

Beskrivelse	Grænseværdi	Forhold	Topændring	Bundændring
Gruppe 1	$X \geq 0,8$	God	0°C	+15°C
Gruppe 2	$0,6 \leq X < 0,8$	Middel	-5°C	+10°C
Gruppe 3	$0,4 \leq X < 0,6$	Dårlig	-10°C	+5°C
Gruppe 4	$X < 0,4$	Meget dårlig	-15°C	0°C

Tabel 6.2 Gruppeopdeling med grænseværdier, forhold, top- og bundændringer

Som det ses i tabellen, flyttes begge grænser symmetrisk og følger derved det globale beregnede forhold løbende. Da den individuelle styring i referencesystem fungerer som en traditionel on/off tankstyring, vil dette medføre flere tænd/sluk perioder, men til gengæld følger varmepumpen bedre det beregnede optimum.

Når gruppen for det aktuelle tidspunkt er beregnet, skal setpunktsværdierne fra prognosen omsættes til setpunkter i den pågældende gruppe. Ligesom ved tankene beregnes rumtemperaturens top- og bundgrænse, således at de 12 estimerede prognosetemperature kan omsættes til den fastlagte gruppe. I Tabel 6.3 er vist værdier for top- og bundgrænsekorrektioner på de fire grupper, disse fratrækkes/tillægges de aktuelle maksimum- og minimumsgrænser.

Beskrivelse	Grænseværdi	Rumtop	Rumbund
Gruppe 1	$X \geq 0,8$	0°C	+2°C
Gruppe 2	$0,6 \leq X < 0,8$	- 2/3 °C	+ 4/3 °C
Gruppe 3	$0,4 \leq X < 0,6$	- 4/3 °C	+2/4 °C
Gruppe 4	$X < 0,4$	-2°C	0°C

**Tabel 6.3 Korrektioner for rumtemperatur top- og bundgrænser fordelt på gruppe 1-4**

Når de 12 timeværdier er omsat til den pågældende gruppe, beregnes den endelige implementerede setpunktsværdi, som cirkulationspumpen til boligen styrer efter den næste time. Beregningen af det endelige setpunkt er vist i ligning 6.4 og er gennemsnitsværdien af alle de 12 timers estimerede værdi omsat til den pågældende gruppe.

$$Sp_{(1,tid)} = \left( \frac{\sum_{n=1}^{12} T_k(n)}{12} \right) \quad ( 6.4 )$$

Hvor  $Sp_{(1,tid)}$  er det anvendte setpunkt,  $T_k(n)$  er de estimerede temperaturer.

Med disse grupper og det beregnede setpunkt kunne den intelligente styring fungere fint, der er dog som overbygning i styringen tilføjet yderligere afgrænsninger i forhold til restriktioner for tidspunkter på et døgn. Efter gennemgang af belastningsmønstrene under estimeringen af belastningsfordelingen i afsnit 5.3 er der dannet et billede af de mest belastede tidspunkter over et døgn, når der antages et gennemsnitsbillede af disse mønstre i forhold til de tre hovedsektorer, som anvendes i denne analyse. Tidspunkterne er som følgende.

- **Fra kl. 7<sup>00</sup> til kl. 13<sup>00</sup> første spidsperiode for industri.**
- **Fra kl. 17<sup>00</sup> til kl. 19<sup>00</sup> anden spidsperiode for kogetidspunkt på boliger.**

Når disse tidspunkter indtræffer, reduceres den aktuelle beregnede gruppe til gruppe 4, hvis den beregnede gruppe ikke er estimeret til gruppe 1, herudover reduceres den første timeværdi i de 12 prognoseværdier til minimumsrumtemperaturen for boligen. Dette medfører, at næste gang prognosen skal beregnes, medregnes der en større fejl, som korrigeres ind på de 11 resterende timeværdier, og det samlede gennemsnitssetpunkt bliver da reduceret væsentligt. Grunden til denne restriktion, er at belastningen skal flyttes væk fra spidsbelastningsperioderne, hvis det er muligt for varmepumpen. Denne sidste restriktion kan tilrettes i forhold til det konkrete distributionsnet, og når den centrale serverstation er idriftsat, kan disse tidspunkter løbende ændres efter lastforholdene. I denne analyse implementeres de to førnævnte tidsperioder, og de er faste i hele beregningsperioden.

#### 6.4.2 Ændringer i referencesystemet

Ved implementering af "subrutine" er der foretaget meget få ændringer i referencesystemet, men de er vigtige for, at den intelligente styring kan fungere efter hensigten. I "simulering\_cal.m" scriptet placeres denne "subrutine" som det allerførste, efter at simuleringen er initialiseret ved første gennemløb. Derfor skal prognosen af de første 12 værdier beregnes i "Ini\_bolig.m", ligesom alle variabler, der er anvendt til prognosen, er placeret her.

Scriptet "Prog\_cal.m" mødes derfor først i andet gennemløb, og de første 12 prognoseværdier korrigeres derfor en gang, inden de anvendes aktivt i styringen. Sidst i "subrutine" beregnes de førnævnte grupper, top- og bundgrænser korrigeres, og de anvendte tidspunktsrestriktioner undersøges, og hvis aktuelt påføres disse grupperingen og prognoseværdien.

Tilbage i simuleringen lige efter "Prog\_cal.m" beregnes den endelige setpunktsværdi som angivet i ligning 6.4. Denne værdi overføres til referencesystemets setpunkt og er herefter den gældende. Derudover er der i starten af simuleringen påført et valg, om der ønskes intelligent styring eller ikke, dette valg benyttes som kontrol af, om "subrutine" skal køre eller ikke. Den

nye beregnede setpunktsværdi, som ved den individuelle styring er konstant, er nu variabel og styres af "subrutine". Da der i referencesystemet er implementeret tre styreventiler som simulering af trykdifference i tankene, skal alle styregrensene til kontrol af disse ventiler korrigeres med de nye beregnede top- og bundgrænser, således at grupperne 1-4 kan få effekt. Disse er således tillagt eller fratrukket de pågældende grænser.

Til sidst indgår der ved beregning af fejlværdier til PI-reguleringen en topgrænse, som bruges til at beregne næste lastændring af varmepumpen. Denne værdi korrigeres også med den beregnede topgrænseværdi, og PI-reguleringen kan herefter beregne den rigtige fejl ud fra de variable gruppegrænser. Med disse ændringer implementeret fungerer den intelligente styring korrekt. Test af referencesystemet og den implementerede intelligente styring beskrives under afsnit 6.5.

### **6.4.3 Forskelle på den individuelle og intelligente styring.**

Som udgangspunkt er hele referencesystemet opbygget efter den forslåede konceptmodel, der betragter hele systemet som et energilager med brugervalgte grænser med det formål at estimere et systems fleksibilitetsevne i forhold til at flytte belastningen i tid. Derfor er den individuelle styring opbygget som en tankstyring, hvor varmepumpen tænder ved bundgrænsen på de definerede energitanke med en beregnet temperatur på 50°C og slukker ved en valgbare topgrænse ved en beregnet temperatur imellem 70-80°C. Dette betyder, at varmepumpen næsten altid kører 100 % eller er slukket. Det eneste tidspunkt, hvor hastigheden reduceres, er, når temperaturen nærmer sig topgrænsen, og PI-kontrollen laver et kontrolleret stop for at reducere grænseoverskridelsen væsentlig.

Dette er ikke tilfældet ved en rigtig luft/vand varmepumpe, da den mindst en gang i timen skal have afrimet køleribberne og derved ikke kan producere energi samtidig. Derudover er de 80°C tanktemperatur meget optimistisk sat, da dette nok kan lade sig gøre at producere, men det vil i et rigtigt system være på bekostning af en væsentlig reduceret COP-værdi. Disse faktorer er ikke medregnet i referencesystemet, da de varierer meget på de forskellige typer af varmepumper. Det er dog antaget, at da den ekstra energi til den overvurderede temperaturgrænse i tankene skulle leveres fra en el-patron i stedet for varmepumpen med en omsætningsfaktor på 1:1, vil beregningerne i referencesystemet samlet set have en undervurderet optagende effekt på distributionsnettet. Prognosen på den fremtidige belastning i det konkrete distributionsnet vil derfor være mere afbalanceret.

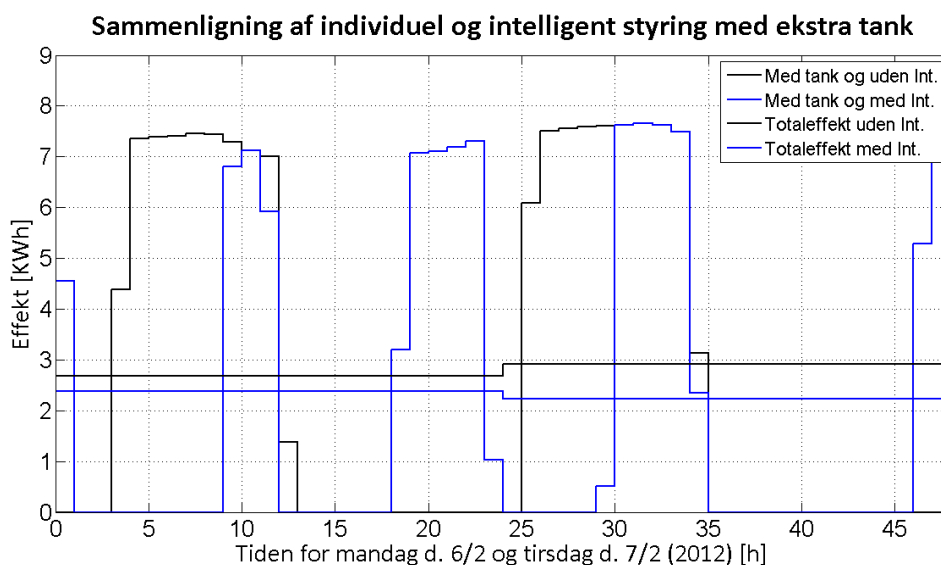
Med disse betragtninger, der gælder både for den individuelle styring og den intelligente overbygning, kan referencesystemet ses som en gennemsnitsværdi for et installeret varmepumpesystem, der er tilkoblet en gennemsnitsbolig i det konkrete område med et gennemsnitligt årligt varmebehov. Den største forskel på de to styringer er de ydre påvirkninger, som medregnes under styringen. På den individuelle er det udvendig temperatur, solindfald og brugervalg, på den intelligente er det herudover kostpriser, COP-værdi og fremtidige vejrprognoser. Derudover har den intelligente styring flydende grænseværdier både på setpunkter samt top- og bundgrænser i tankene.

Disse påvirkninger og ændringer medfører stor forskel i resultaterne, særligt skal det nævnes, at når der beregnes med intelligent styring, er effekten på nettet flyttet væk fra spidsperioderne og er nu placeret om aftenen, natten og om eftermiddagen, hvilket endvidere har medført

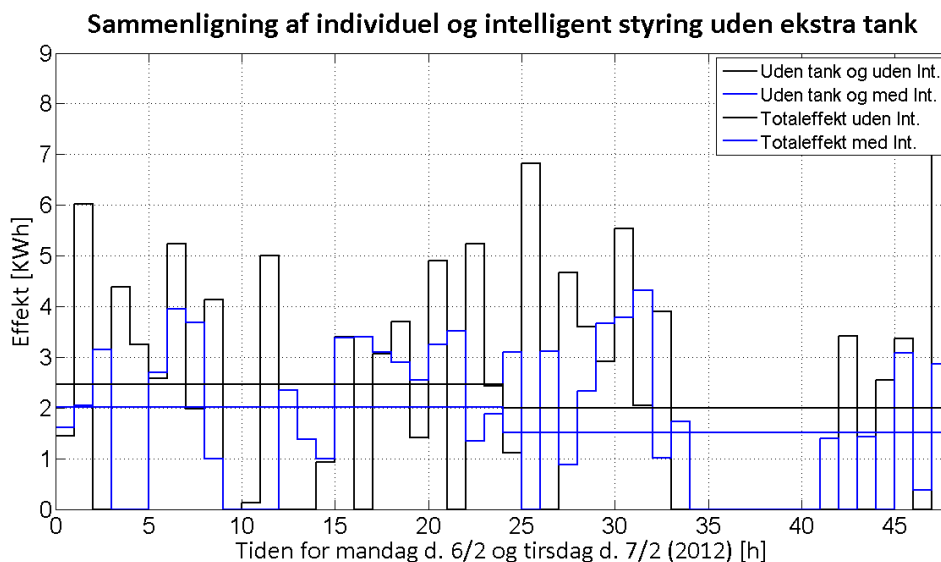


reduceret effektforbrug og kostpris. Denne tendens er dog mest udpræget i beregninger med valg af ekstra tank, da den intelligente styring her har en større lagerkapacitet at arbejde med og dermed større fleksibilitet på varmepumpen.

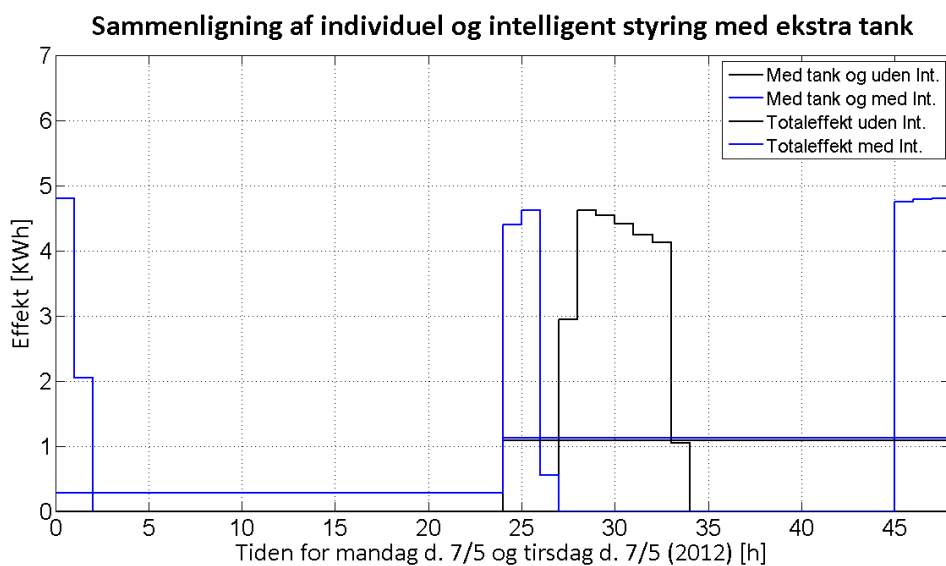
I Figur 6.10, Figur 6.11, Figur 6.12 og Figur 6.13 er alle de beregnede effekter vist for to forskellige uger, den ene fra referenceugen en vinteruge i februar med lave temperaturer, den anden i maj ved sommertid med høje temperaturer. Derudover er de opdelt for tilvalg med eller uden ekstra tank. Kurverne i figurerne er udført som trappeform, da alle værdier er gennemsnitseffekt over en time.



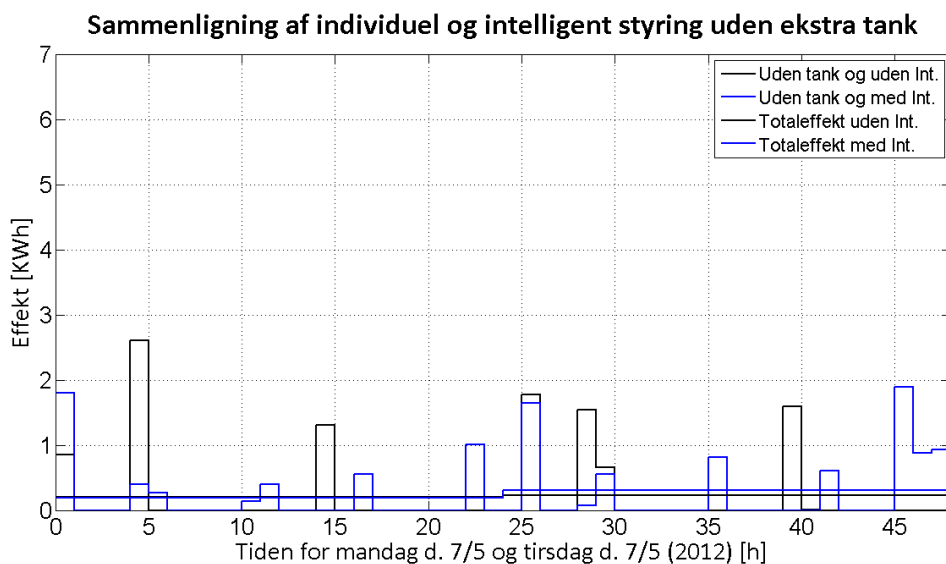
Figur 6.10 Sammenligning imellem den individuelle og den intelligente styring for to dage i februar med ekstra tank



Figur 6.11 Sammenligning imellem den individuelle og den intelligente styring for to dage i februar uden ekstra tank



Figur 6.12 Sammenligning imellem den individuelle og den intelligente styring for to dage i maj med ekstra tank



Figur 6.13 Sammenligning imellem den individuelle og den intelligente styring for to dage i maj uden ekstra tank

Når der ses på forskellen imellem de to valgte uger, er effektforbruget væsentligt reduceret i maj måned. Dette hænger sammen med, at varmebehovet i boligen er reduceret, og samtidig er effektiviteten på varmepumpen forøget meget. Derudover kan det ses at boligen med tank har større effektforbrug end den uden, men at antallet af varmepumpens start/stop er væsentlig mindre end i boligen uden tank. Effektforbruget på installationer med tank kunne dog reduceres, hvis disse lukkes ned igennem sommeren, da varmepumpen så ikke skal opretholde varme i disse tanke.

Derudover kan der ses en tydelig forskel på den individuelle og intelligente styring, hvor den intelligente styring har flyttet den største del af effekten væk fra spidsperioderne. Den skal dog i nogen grad, når det er meget koldt, producere energi indenfor spidsbelastningsperioderne, men formår stadig at flytte noget af effekten væk. Endvidere kan det ses, at den ekstra tank stabiliserer driften af varmepumpen, men at det samlede effektforbrug er større pga.

varmetabet fra tanken. De væsentlige forskelle er nu gennemgået, og det næste, der nu skal udføres, er en samlet test af referencesystemet med den implementerede intelligente styring, dette gøres i efterfølgende afsnit.

## 6.5 Beskrivelse af en simpel testsimulering

I det efterfølgende vil der blive vist nogle resultater, der viser, hvordan den intelligente styring i referencesystemet arbejder med setpunktet og top- og bundgrænser. Derudover vil alle kombinationsmuligheder i referencesystemet blive udregnet, dog med undtagelse af temperatur valg, og alle resultaterne vil blive sammenlignet. De værdier, der beregnes, er som følgende.

- Den årlige gennemsnitsrumtemperatur, samt dennes minimum og maksimum.
- Det totale årlige effektforbrug.
- Den totale årlige kostpris på fleksmarked.

De test der er udført på referencesystemet er udført med følgende brugervalg, hvor  $S_p$  i tabellen brugerens valgte setpunkt og  $T_{temp}$  er den valgte maksimal temperatur i tanke, derudover skal det nævnes at tabellen kun viser de testtyper der er beregnet, se Tabel 6.4.

Beskrivelse	Med tank uden int.	Med tank med int.	Uden tank uden int.	Uden tank med int.
$S_p = 21 / T_{temp} = 70$	X	X	X	X
$S_p = 23 / T_{temp} = 70$	X	X	X	X
$S_p = 25 / T_{temp} = 70$	X	X	X	X
$S_p = 21 / T_{temp} = 75$	X	X	X	X
$S_p = 23 / T_{temp} = 75$	X	X	X	X
$S_p = 25 / T_{temp} = 75$	X	X	X	X
$S_p = 21 / T_{temp} = 80$	X	X	X	X
$S_p = 23 / T_{temp} = 80$	X	X	X	X
$S_p = 25 / T_{temp} = 80$	X	X	X	X

Tabel 6.4 Oversigt over de valgte kombinationer, der er beregnet

Beregningerne med den intelligente styring er foretaget flere gange, da der indgår tilfældige generede tal, hvorfor det et gennemsnit af disse beregninger, der er resultatet. Alle beregningsresultater er vedlagt i Appendiks 4. De fire bedste er vist i Tabel 6.5.

	Resultater fra referencesystemets fire systemer				
Beskrivelse	Temp. rum	Min. temp.	Maks. temp.	Årlig effekt	Kostpris
Enheder	[°C]	[°C]	[°C]	[kWh]	[DDK]
<i>Med tank uden int.</i>	21,53	20,65	24,16	8.813,00	2.434,00
<i>Med tank med int.</i>	23,43	20,85	26,44	8.718,00	2.197,00
<i>Uden tank uden int.</i>	21,53	20,65	24,16	5.696,00	1.601,00
<i>Uden tank med int.</i>	21,46	19,16	24,43	5.358,00	1.497,00

Tabel 6.5 De fire bedste systemer beregnet med referencesystemet

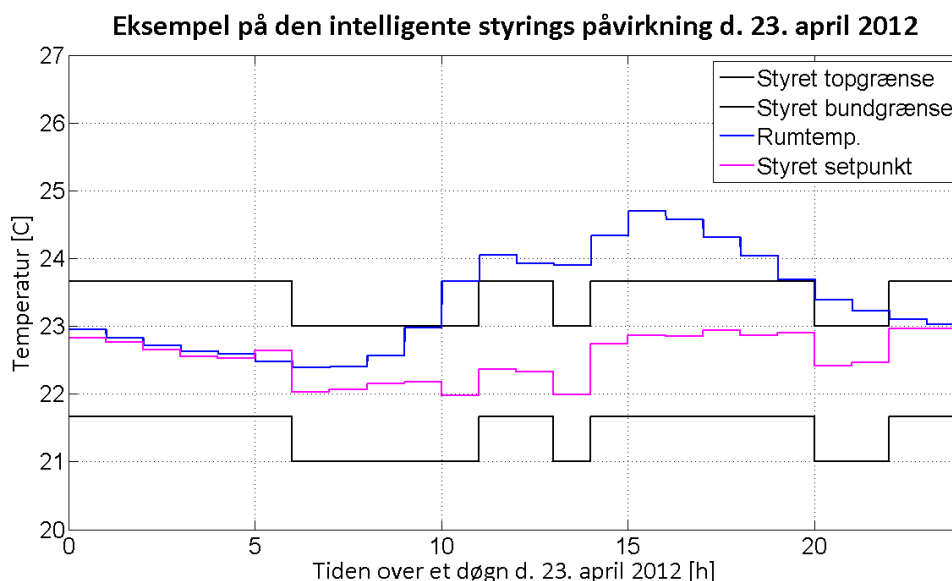
En klar konklusion af resultaterne er, at selvom der installeres en ekstra tank på 2000 l, og fleksibiliteten af varmesystemet derved øges, bliver omkostningerne samlet set for høje, da tabene fra tankene forøges væsentligt. Denne øgede omkostning, kan selv med øgede fleksibilitet, ikke hentes hjem ved anvendelse af den intelligente styring.

Endvidere har den intelligente styring forbedret alle testresultaterne i forhold til testene uden intelligent styring, dette er bedre end forventet. Det overraskende er nok, at der ved testen med en ekstra tank, er opnået det bedste resultat med høj tank- og rumtemperatur, hvilket ikke er tilfældet ved de øvrige test. Dette peger på, at der for dette referencesystem kan være en større gevinst ved at have en stor lagerkapacitet, hvis tabene kan begrænset.

Et eksempel på dette kunne være et større energilager i boligen ved at anvende nye bygningsmaterialer med høj varmekapacitet. For de tre andre systemer er det ikke overraskende, at de bedste værdier opnås ved lave temperaturer, da energiomsætningen igennem boligen er mindre her.

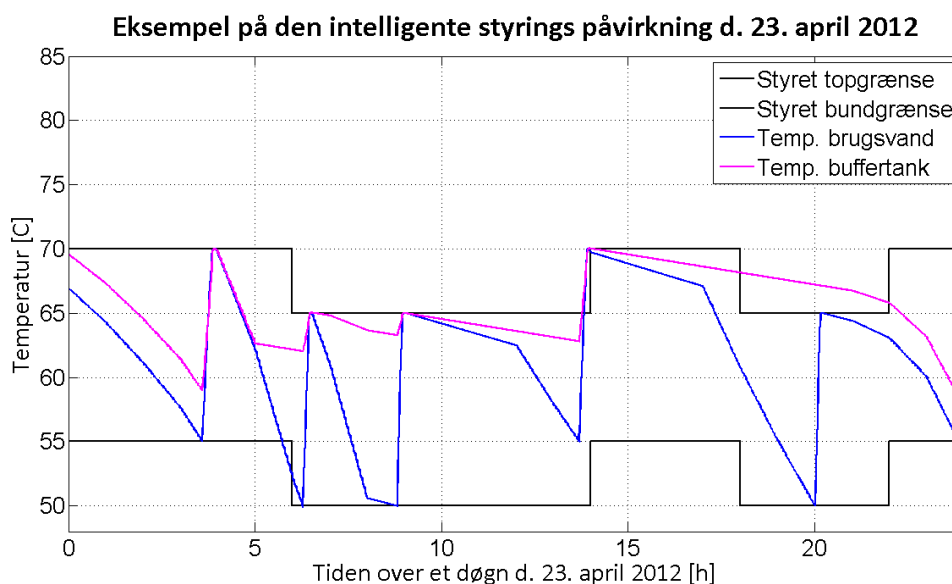
For den videre analyse af det konkrete distributionsnet anvendes der i referencesystemet kun varmesystem uden ekstra tank. Det kunne dog ved et fremtidigt projekt være interessant at undersøge, om det faktisk kunne betale sig at ændre buffertanken på varmepumpe til en bestemt størrelse for derved at opnå en bedre nyttevirkning under bestemte forhold.

For at visualisere virkningen af den implementerede intelligente styring i referencesystemet vises her et eksempel fra d. 22. april 2012, se Figur 6.14 og Figur 6.15, hvor de beregnede grænser og det styrende setpunkt er påført. Eksemplet viser tydeligt, hvordan den intelligente styring arbejder med systemet.



**Figur 6.14** Virkning på rumtemperatur, grænseværdier og styrende setpunkt

De viste beregninger er foretaget med et setpunkt på 23°C, en maksimal tanktemperatur på 80°C og uden ekstra tank. På figurerne er det tydeligt at se, hvor de valgte tidspunktsbegrænsninger får virkning på referencesystemet, ligesom det fremgår, at varmepumpen stopper, når temperaturerne i Figur 6.15 rammer den beregnede topgrænseværdi, og starter, når temperaturen rammer bundgrænseværdien. Som det ses i Figur 6.14, er rumtemperaturen stigende fra formiddagen hen på eftermiddagen, hvilket er et typisk billede for årstiden, da solindfaldet har størst virkning på indeklimaet om foråret og efteråret, hvor indfaldsvinkelen fra solen er størst.



**Figur 6.15** Virkning på temperaturer i brugsvandstank og buffertank samt grænseværdier

Nu er den intelligente styring fastlagt og gennemgået og vil efterfølgende blive anvendt til analyse af det konkrete distributionsnet. Her undersøges det, hvor stor indflydelse en intelligent styring har på lastniveauet og udnyttelsesgraden, når der implementeres et større antal estimerede varmepumper i fremtiden.

## 7 Analyse af effektflowberegninger

I dette kapitel vil det konkrete distributionsnet blive analyseret med henblik på at få klarlagt, hvilken betydning et større antal implementerede varmepumper har for udnyttelsesgraden, når disse samtidigt installeres med en intelligent styring. Dette gøres under hensyn til de kravspecifikationer, der er fastlagt under kapitel 3 samt de lokale forhold, der fundet for området hvor det konkrete distributionsnet, som er Støvring og omegn i Rebild kommune, er placeret.

Som et simuleret energiforbrug for disse varmepumper er der på baggrund af en tilgængelig varmerapport, BR00-10, opsamlede måledata på temperaturer og solindfald og tilgængelig faglitteratur udarbejdet et referencesystem for et varmesystem på en gennemsnitsbolig for det lokale område. Dette referencesystem, som er opbygget i kapitel 4, beregner den optagne effekt på timebasis for et helt år, hvor temperaturer og solindfald er måledata fra henholdsvis Støvring og på Aalborg Universitet 2012.

For at kunne beregne et mere realistisk billede af den samlede effektflow, er alle oplyste belastninger på det konkrete distributionsnet P5-P16 blevet gennemgået og opdelt i tre hovedsektorer. Der er herefter estimeret tre fremskrivningsformler af disse hovedsektorer til 2020. Herudover er antallet af varmepumpeenheder estimeret i 2020, og der er her ligeledes estimeret en fremskrivningsformel. Tilsammen udgør disse formler udviklingen af belastningen P5-P16 i det konkrete distributionsnet. Disse fremskrivningsformler og det konkrete distributionsnet samt metoden, der anvendes til effektflowberegningen, er beskrevet i kapitel 5.

For at anvende en intelligent styring på varmepumperne og derved kunne analysere udnyttelsesgraden i det konkrete distributionsnet med udgangspunkt i det opbyggede referencesystem, har det været nødvendigt at udarbejde et simplificeret adaptivt styresystem, der kunne simulere en overordnet styring af referencesystemet. Dette styresystem er udarbejdet i kapitel 6.

Med disse dele fastlagt kan det konkrete distributionsnet nu beregnes og analyseres frem til år 2020, og virkningen af den intelligente styring under forskellige årstider og vejrtilstande i forhold til udnyttelsesgraden kan fastlægges.

Fremgangsmåden for dette er som følgende.

- Fastlæggelse af test, referenceuger og afgrænsninger.
- Beregning af den samlede fremskrevne effekt fra 2007 til 2020.
- Beregning af effektflow fra 2007 til 2020 og fastlæggelse af .

### 7.1 Fastlæggelse af test og afgrænsning

I dette afsnit fastlægges de test, der vil blive udført på det konkrete distributionsnet. Endvidere udvælges fire forskellige referenceuger, som er placeret henholdsvis vinter, forår, sommer og efterår for at se virkningen under forskellige vejrforhold og belastningsperioder. Derudover fastlægges de begrænsninger, som beregningerne er udført under.

For at begrænse testenes omfang er der udvalgt fire referenceuger, som der ses nærmere på. Ugerne er udvalgt med udgangspunkt i belastninger P5-P16 udleveret af HEF fra 2007. Datoerne fra dette år er anvendt, når referencesystemets udregnede belastninger skal tilføjes.

#### Første uge:

Er en uge i vinterperioden først i februar fra d. 5. til d. 11., hvor der i referencesystemet er anvendt temperaturer, der er meget lave, derudover er den producerede vindenergi i det konkrete distributionsnet middel. Dette vil sætte varmepumperne under pres, og der forventes en høj belastningsgrad både med og uden den intelligente styring.

#### Anden uge:

Er en uge i forårsperioden sidst i april d. 23. til d. 29., hvor der i referencesystemet er anvendt middeltemperaturer, derudover er den producerede vindenergi i det konkrete distributionsnet lav/middel. Dette vil, da varmepumperne er middel belastet, uden en intelligent styring medføre en forventet høj belastningsgrad. Men med aktiv intelligent styring forventes dette at blive ændret til en middel belastningsgrad.

#### Tredje uge:

Er en uge i sommerperioden med fuld produktion først i august d. 6. til d. 12., hvor der i referencesystemet er anvendt høje temperaturer, derudover er den producerede vindenergi lav/middel. Da der ikke skal produceres særlig megen energi til varmen, vil belastningen ikke blive ændret særlig meget. Varmepumperne er lavt belastet, og der forventes uden en intelligent styring en lav belastningsgrad. Med en aktiv intelligent styring forventes dette ikke ændret.

#### Fjerde uge:

Er en uge i efterårsperioden med fuld produktion midt i november d. 12. til d. 18., hvor der i referencesystemet er anvendt middeltemperaturer, derudover er den producerende vindenergi i det konkrete distributionsnet høj. Dette vil, da varmepumperne er middel belastet uden en intelligent styring, medføre en forventet høj belastningsgrad. Men med aktiv intelligent styring forventes dette at blive ændret til en middel belastningsgrad.

Disse fire uger vil blive testet med og uden intelligent styring, hvor referencesystemet med den intelligente styring er udført 20 gange, og den gennemsnitlige værdi af disse test anvendes til effektflowanalysen.

De anvendte parametre fra de to bedste referencetest, der blev udført under kapitel 6, er som følgende.

Beskrivelse	Temperatur
<i>Driftstemperatur [°C]</i>	21
<i>Maksimumtemperatur [°C]</i>	70
<i>Ekstra varmvandstank</i>	<i>Nej</i>

Tabel 7.1 Parametre anvendt i referencetesten med og uden intelligent styring

Disse resultater fremskrives fra 2007 til 2020 med den beregnede nøgleformel, men da dette er på årsbasis, udføres derfor kun 13 forskellige fremskrivninger, en for hvert år der er gået. På denne måde sker der kun ændring ved årsskiftet. Denne fremskrivning deles op i de tre fastlagte scenarier, og i Tabel 7.2 viser en oversigt over de udførte test.

Beskrivelse år	Uden int.	Uden int.	Uden int.	Med int.	Med int.	Med int.
	25 %	50 %	75 %	25 %	50 %	75 %
2008	X	X	X	X	X	X
2009	X	X	X	X	X	X
2010	X	X	X	X	X	X
2011	X	X	X	X	X	X
2012	X	X	X	X	X	X
2013	X	X	X	X	X	X
2014	X	X	X	X	X	X
2015	X	X	X	X	X	X
2016	X	X	X	X	X	X
2017	X	X	X	X	X	X
2018	X	X	X	X	X	X
2019	X	X	X	X	X	X
2020	X	X	X	X	X	X

**Tabel 7.2 Oversigt over beregnede fremskrevne belastninger der skal beregnes**

De aktuelle timebelastninger beregnes efter de udarbejdede tabeller i kapitel 5, som er Tabel 5.2, Tabel 5.3, Tabel 5.4 og Tabel 5.5 samt de fire udarbejdede nøgleformler. Den samlede beregnede belastning fra referencesystemet skal dog inden sammenlægning med P7-P16 omformes til p.u., før den samlede belastning kan findes. Det skal dog nævnes her, at mens de anvendte temperatur- og solindfaldsdata samt spotpriserne i referencesystemet er fra 2012, er vindhastighederne på de oplyste belastninger P5-P16 fra 2007, da belastningerne er målt i 2007. Herudover vil et nyt år blive udregnet med de samme referencedata, og dette er simplificering, der kan have indflydelse på analysen. Da referencesystemet er udarbejdet som et gennemsnitssystem, antages det ikke at få nogen væsentlig betydning for denne analyse.

Det er fra HEF ikke er oplyst, hvor stor belastningsgrad de enkelte noder oplever under de udleverede målte belastninger P5-P16. Udgangspunktet er derfor, at referencen udgør den største belastning, der forekommer på de forskellige noder set over hele år 2007, og de vil blive anvendt til alle de efterfølgende beregninger. Referenceværdierne er antaget til.



### Belastningsgrad fastsat til 70 % af den maksimale ydelse på distributionsnettet!

Efter beregning af alle de valgte test udføres der for hver af disse en beregning af effektflowet med det udarbejdede script "Powerflow\_cal2013". Resultaterne fra de fire referenceuger omsættes i forhold til den fastlagte belastningsgrad, og sammenligningen af de to anvendte varmesystemer i de valgte referenceuger kan påbegyndes. Det vil på denne måde være muligt at se udviklingen på de forskellige noder. Vis de estimerede installerede varmepumper følger fremskrivningen, endvidere at se hvornår der sker overskridelse af den maksimale ydelse, og på dette grundlag kan fremtidige udvidelser af det konkrete distributionsnet estimeres og planlægges.

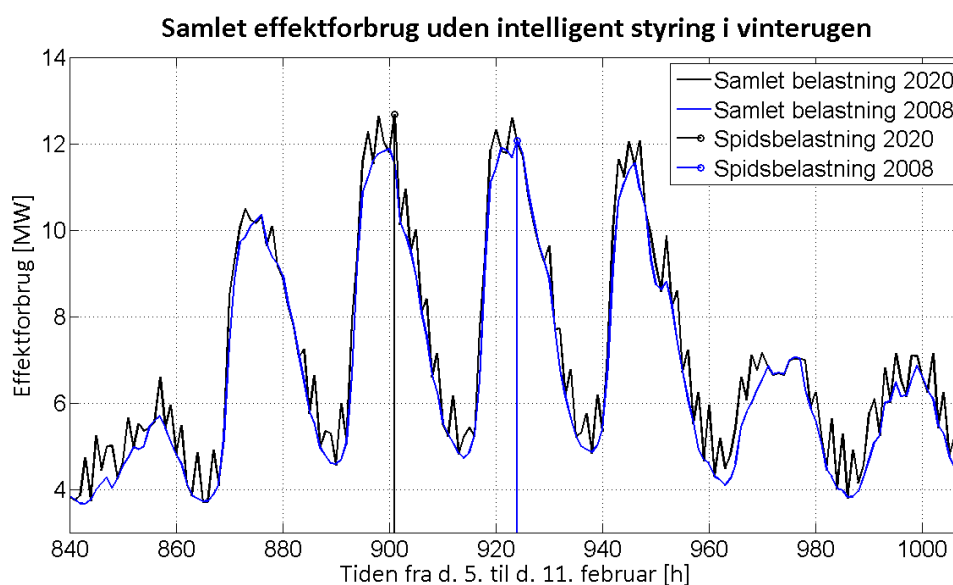
Hermed er afgrænsningen at de valgte beregninger gennemgås, ligesom fremgangsmetoden er beskrevet og gennemgås. I den efterfølgende afsnit udføres alle de samlede fremskrevne belastninger for de valgte test.

## 7.2 Beregning af den samlede fremskrevne effekt

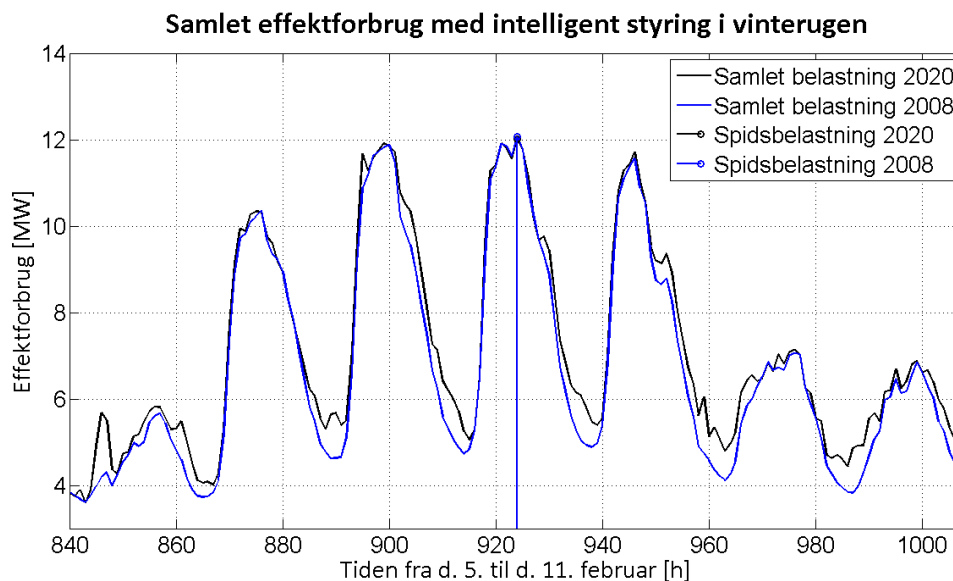
I dette afsnit beskrives kort hvordan den samlede effekt er udarbejdet, ligesom der vises et eksempel på de udregnede værdier. Første beregnes gennemsnittet af referencesystemets resultater for alle timeværdier, derefter opsættes disse til p.u. enhed, således at de kan lægges sammen med grundbelastningen P5-P16. Derefter beregnes de fremskrevne grundbelastninger for 2007 til 2020 med de udarbejdede nøgleformler fra kapitel 5.

Herefter beregnes timeværdierne på effektforbruget fra referencesystemet og fremskrives med det estimerede antal varmepumper, ud fra fordelingstabellen, den valgte scenarie (25, 50, 75 %) og den fastlagte samtidighedsfaktoren, dette gøres således for 2008 til 2020.

Disse to beregnede værdier lægges sammen og den samlede belastning for den pågældende time er fastlagt. Som eksempel på de beregnede værdier, vises for reference ugen om vinteren, den beregnede samlede effekt og de timeværdier der har den største spidsbelastning (2008 og 2020), både med og uden intelligent styring, se henholdsvis Figur 7.1 og Figur 7.2. De viste værdier er med en implementeringsgrad på 75 %.



Figur 7.1 Den samlede beregnede effekt uden den intelligente styring for vinter ugen



**Figur 7.2** Den samlede effekt med den intelligente styring for vinter ugen

Det kan ses af de beregnede værdier, at den intelligente styring begrænser, stabiliserer og flytter belastningen væk fra spidsperioder, det kan derfor konkluderes, at den adaptive styring har væsentligt indflydelse på spidsbelastningstidspunkterne, og set ud fra timeværdier en stor betydning for stabiliteten. Det skal dog nævnes, at der her ikke er analyseret på korte tidsintervaller 0-10 sekunder, da der sandsynligvis kan opstå store peak's belastninger hvis flere varmepumper på samme node indkobles samtidigt.

### 7.3 Beregning af effektflow

I det efterfølgende vil kort beskrivelse af effektflow beregninger blive beskrevet, og derefter vil de fire referenceuger i det konkrete distributionsnet blive gennemgået. Her vil der blive beregnet hvor meget den intelligente styring kan ændrer udnyttelsesgraden, hvis det estimerede antal varmepumper bliver implementeret, og i hvilken periode den virker bedst. Derudover vil de enkelte strækninger blive undersøgt for spændingsfald, da dette giver et billede af hvor de svageste dele er i distributionsnettet er.

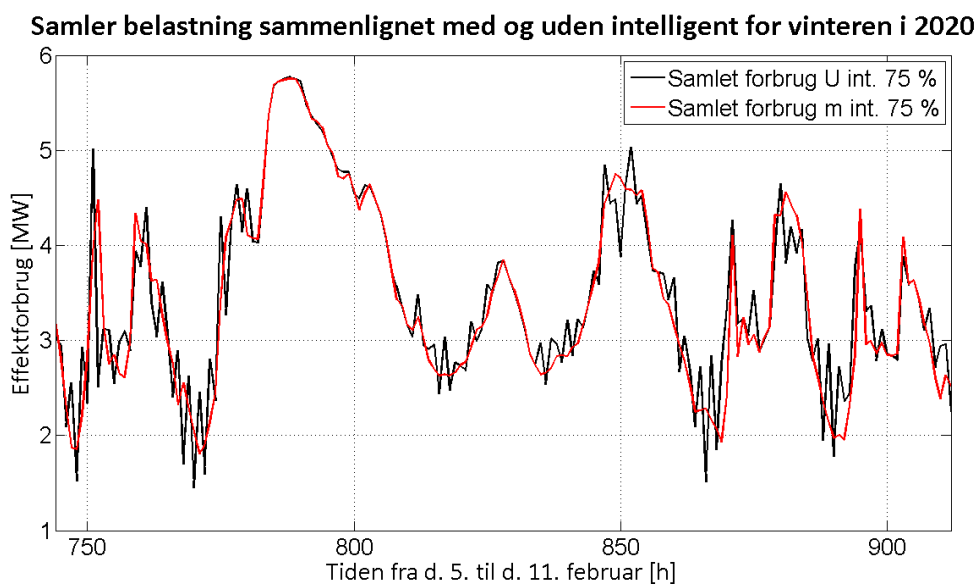
Når de samlede belastninger er beregnet, skal alle belastningerne beregnes med den udarbejdede effektflow script "Powerflow\_cal2013.m", både hvad angår noder og linjetab. Derefter med udgangspunkt i år nul, omregnes alle værdier til et forholdstal fra 1 og opefter, ud fra de maksimale værdier der er antaget til de 70 % udnyttelsesgrad. Hvis tallet så er større end et, er der sket en forøgelse af udnyttelsesgraden, og herved kan alle strækninger undersøges for at se hvilke der er størst belastet, og på den måde står for udvidelse eller udskiftning i den nære fremtid.

Herefter sammenlignes de værst belastede punkter med hinanden, for de fire referenceuger med eller uden intelligent styring, samt de tre scenarier, i forhold til at sammenligne ændringen i de beregnede udnyttelsesgrader, hvis de estimerede antal varmepumper implementeres.

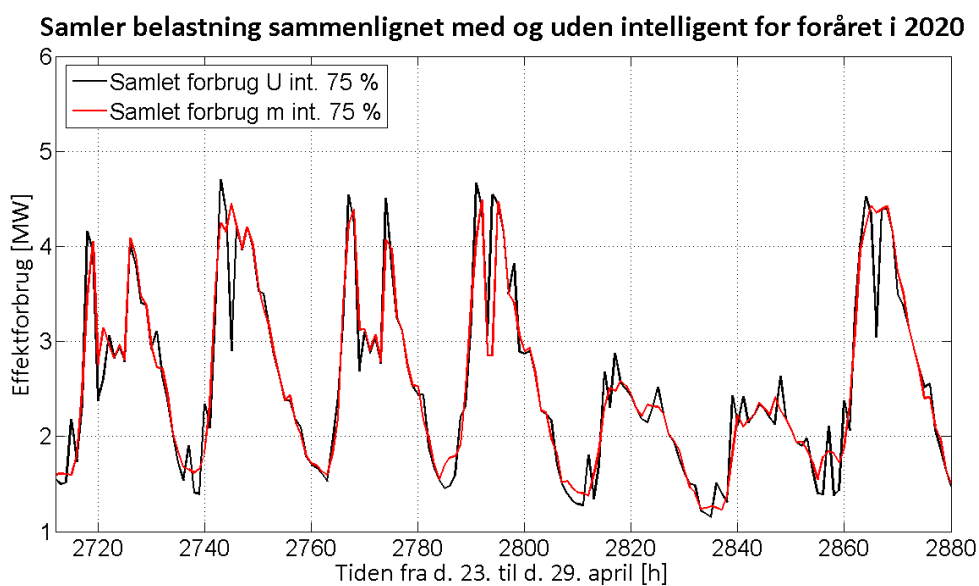
Det blev dog ved slutningen af projektet besluttet at reducerer på beregninger, da det var meget tidskrævende at lave nogle gennemskuelige grafer og der ved implementering var stor mængde

af data, der skulle behandles inden for den nomineret tid. Der er derfor kun medtaget det mest vigtige for udnyttelsesgraden af det konkrete distributionsnet.

Først er der lavet en graf over den samlede belastning for de fire referenceuger, hvor der kun medtages for 75 % implementering, da dette viser den bedste forskel på kurverne, endvidere medtages kun fremskrivning i 2020, se Figur 7.3, Figur 7.4, Figur 7.5 og Figur 7.6. Herudover er der for hele året undersøgt for den værste tilfælde vedr. belastningsgraden, på alle linjetab, og dette er derefter opsat til en belastningsgrad, både med og uden intelligent styring. Dette er gjort med de tre scanier, der blev fastlagt til 25, 50 og 75 % implementering. Dette kan ses i Figur 7.7 og Figur 7.8.

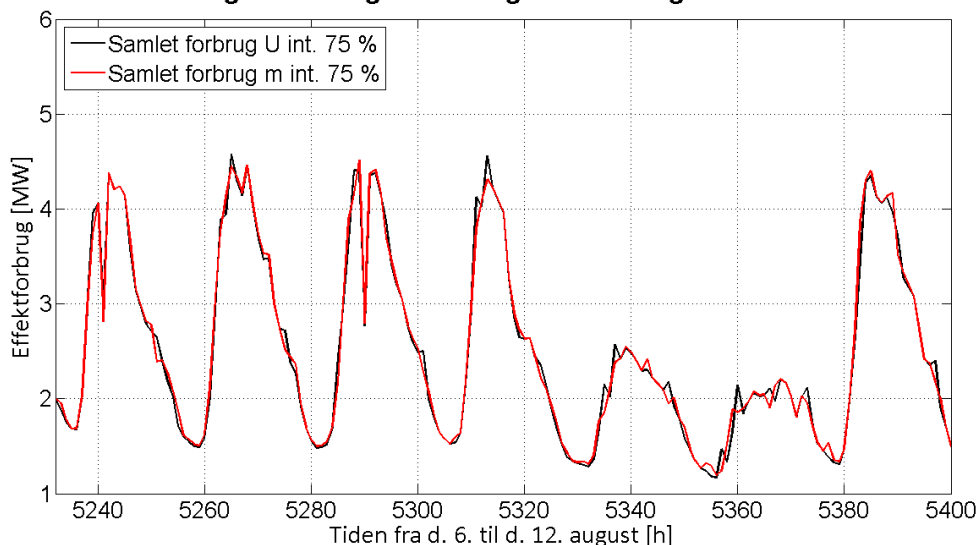


Figur 7.3 Samlet belastning for vinterugen med og uden styring 2020



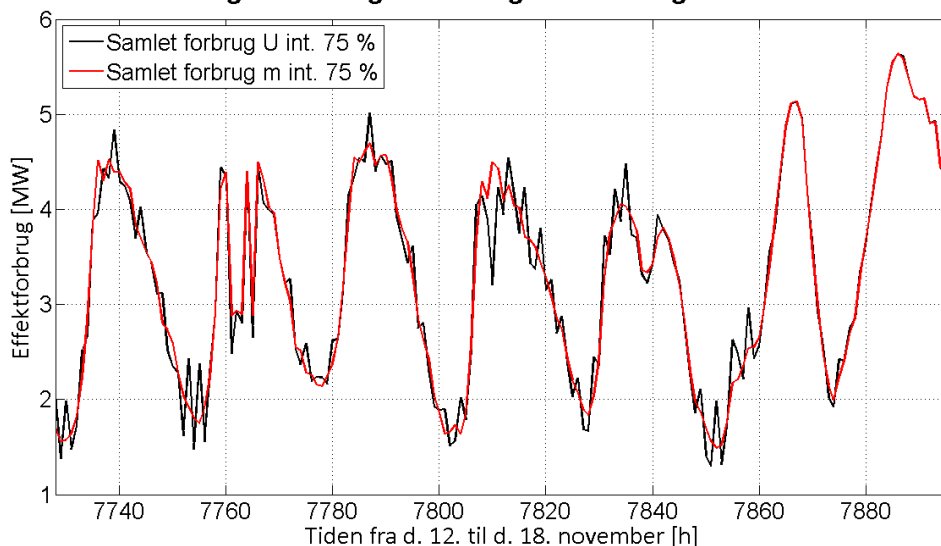
Figur 7.4 Samlet belastning for forårsugen med eller uden styring 2020

Samler belastning sammenlignet med og uden intelligent for sommeren i 2020



Figur 7.5 Samlet belastning for sommerugen med eller uden styring 2020

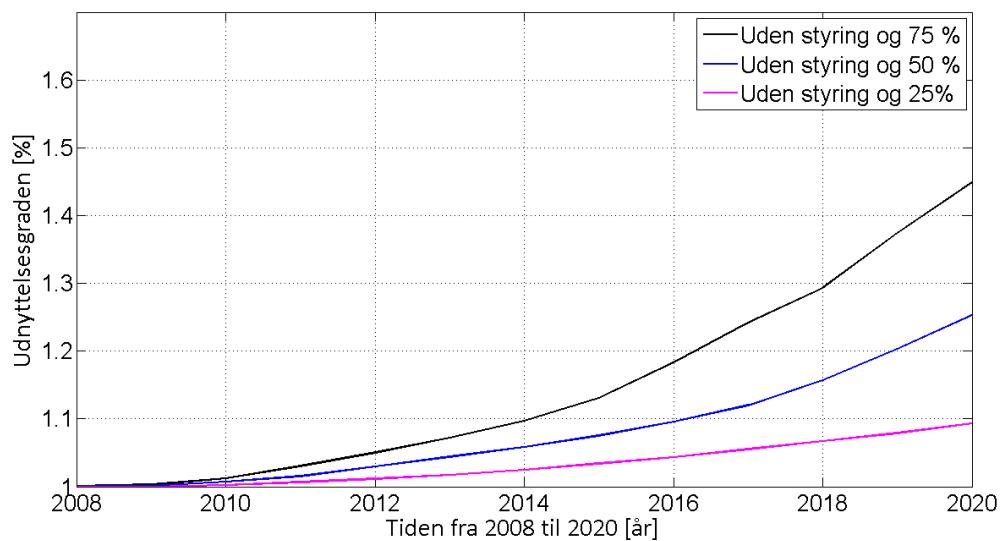
Samler belastning sammenlignet med og uden intelligent for efteråret i 2020



Figur 7.6 Samlet belastning for efterårsugen med eller uden styring 2020

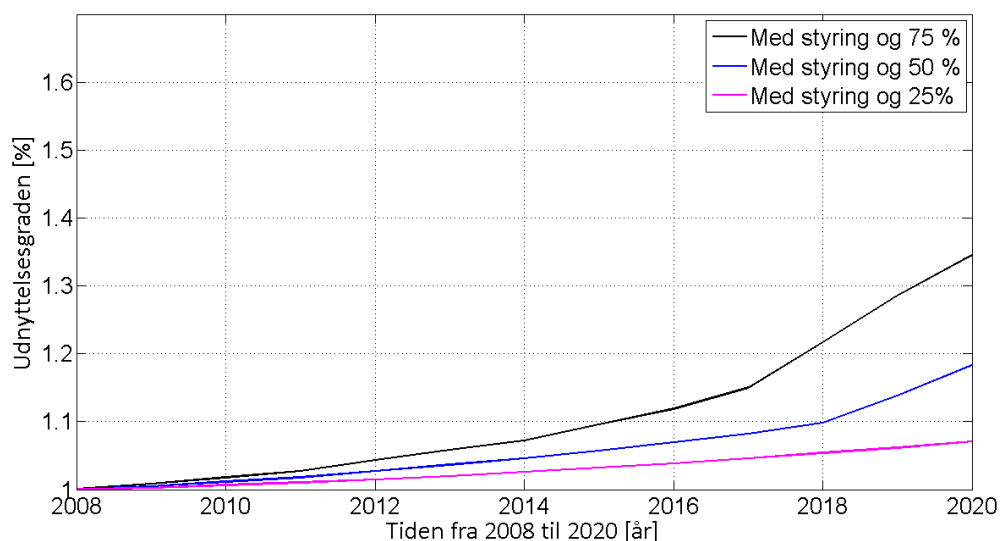
Som det ses af på figurerne, er der stor forskel på de forskellige uger, og som forventet er der om sommeren næsten ingen forskel, da ikke skal producerer varme. For efterårsugen er der et større forbrug, og varmepumpen med den intelligente styring formår af fjerne de forekommende peak's, og den har på timebasis, også en udglattende effekt på belastningsperioderne. Om foråret er den noget mere ustabil, den formår dog at fjerne nogle af de forekommende belastningsspidser. Det mest interessante er vintermåneden, da der her var for en forventet lav indpasningsevne, pga. det meget kolde vejr, men den formår faktisk at fjerne de fleste små peak's, og udjævne belastninger hen over ugen, det kan hermed konkluderes, at den intelligente styring kan fjerne en vis mængde energi væk fra spidsbelastningsperioderne og den på timebasis har en stabiliserende indflydelse på det konkrete distributionsnet, men at dette også er svingende set over et år.

### Fremskrivning af belastning uden intelligent styring omsat til udnyttelsesgrad



Figur 7.7 Den estimerede udnyttelsesgrad frem til 2020 uden intelligent styring

### Fremskrivning af belastning med intelligent styring omsat til udnyttelsegrad



Figur 7.8 Den estimerede udnyttelsegrad frem til 2020 med intelligent styring

Som det kan ses af figurerne, så reducerer den intelligente styring det fremtidige behov for udvidelse af det konkrete distributionsnet i alle tre scenarie. Men reduktionen er ikke stor nok til, at der helt kan undgås en udvidelse på det konkrete distributionsnet. Det er dog så væsentligt, hvis estimeringen af varmepumper holder, vil der kunne reducere væsentligt på de planlagte udgifter på fremtidige udvidelser, den gennemsnitlige reduktion i procent er beregnet og vist i Tabel 7.3. Tallene der udregnes er baseret på alle de før nævnte test, og er udregnet som en procentsats, der fortæller hvor meget reduktion den intelligente styring, der er udarbejdet i dette projekt, kan opnå, under de allerede fastlagte betingelser for det konkrete distributionsnet, at reducere den tilsluttede merbelastning fra de estimerede antal varmepumper frem til 2020. Vindenergi implementering, der fra starten af denne analyse blev lagt op til, indgår altså ikke direkte i disse konklusioner, men er medregnes indirekte, da den adaptive intelligente styring styre efter kostpriser på elmarked, hvilket i en større omfang følger

vindenergiproduktionen, højre priser lav energiproduktion og omvendt lave priser meget energiproduktion. Og da styringen gerne vil kører ved lave priser tager den højde for den tilstedeværende producerede vindenergi.

Beskrivelse	25 %	50 %	75 %
<i>Uden intelligent styring</i>	9,5	24	44
<i>Med intelligent styring</i>	7,5	17	26
<i>Intelligent reduction</i>	<b>2,5</b>	<b>7</b>	<b>18</b>

**Tabel 7.3** Tabel med endelige reduktion i fremdigt udvidelse

Nu er alle punkter i problemformulering analyseret, gennemgået og beskrevet. Det sidste der mangles er en samlet konkluderer på det udførte arbejde, hvilket er den næste kapitel og efterfølgende sidste kapitel er perspektivering.

## 8 Konklusion

I dette projekt er der arbejdet med implementering af fleksible belastninger, herunder varmepumper, i et konkret distributionsnet med henblik på at analysere indvirkningen på denne, når et større antal enheder installeres. Formålet er at undersøge om varmepumper kan anvendes som en stabiliserende faktor, når der i den kommende fremtiden skal installeres op til 50 % vindenergi i forsyningsnettet, hvilket øger behovet for anvendelse af stabiliserende anlæg.

For at kunne analysere varmepumpens indvirkning, er der igennem projektet arbejdet med flere forskellige dele, der tilsammen dækker denne analyse. Så for at afdække det gennemgæet arbejde konkluderes der her på det færdige resultat.

Det første der er udarbejdet i projektet, er en ny og anderledes måde at definere og fastlægge forskellige fleksible systemer med, også kaldet konceptmodellen. Denne model er benyttet til at beskrive varmesystemet og varmepumpens virkemåde, og til at opstille alle benyttede ligevægtsligninger der er anvendt i dette projekt. Modellen er en teoretisk betragtning, og på denne måde igen ny opfindelse, men en anderledes måde at anskue fleksible belastninger med. Konceptmodellen har fungeret godt til formålet i dette projekt, men den har også sine begrænsninger, da den er baseret på energiflow, kan den eksempelvis ikke håndtere tidsforskydelser uden omsat energi, hvilket er tilfældet ved andre typer af fleksible belastninger.

Derefter blev der kort analyseret på elmarkerne, for at påbegynde de første studier af den styring der skulle styre varmepumpen. Her blev det konstateret, at tilstandene på elmarkerne ikke var gunstige for en intelligent styring af den fleksible varmepumpe, da der endnu ikke er et timebaseret elmarked med variable priser.

Da der ved analysen af det konkrete distributionsnet, skal være kendskab til varmepumpens effektforbrug på timebasis, blev der udarbejdet et større referencesystem, der simulerer et effektforbrug på en bolig over et år, baseret på statistik på det lokale område, Rebild kommune, målte udvendige temperaturer fra Støvring, soldata fra Aalborg Universitet, og udarbejdning af en teoretisk gennemsnitsbolig for det lokale område. Efter nogen indkøringsproblemer, fungerer systemet over forventning, og giver et meget realistisk billede af den optagende effekt. Den har dog det minus, da den er formet efter konceptmodellen, tager den ikke højde for de dynamiske tidskonstanter i varmesystemet, hvilket for systemet til at reagere for hurtigt.

Herefter blev det konkrete distributionsnet analyseret, og til beregning af energiflowet i dette net, blev der udarbejdet et modificeret program i Matlab, baseret på Newton-Rapson metoden. Denne fungerede optimal, og er et godt stykke værktøj til fremtidige projekter. Herudover blev der udarbejdet nogle nøgleformler, til estimering af den fremtidige belastning i det konkrete distributionsnet, der sammen med de estimerede antal varmepumper, kunne beregne belastningen frem til år 2020, herved kunne udnyttelsesgraden i det konkrete distributions blive fastlagt.

Herefter blev der udarbejdet et simplificeret strategi til implementering af en adaptiv intelligent styring, der på baggrund af prognoser på vejret skulle forudsige et styremønster, til referencesystemet, så belastningerne blev flyttet væk fra spidsperioder, reducerede forbrugersens kostpris, udnyttede COP-værdien på varmepumpen bedre, og tilgodeser de brugervalgte setpunkter. Dette lykkes langt bedre end forventet, da den intelligente var bedre på

alle de udførte test, både på reduceret optagende effekt og mindre kostpris, ligesom de brugervalgte setpunktsværdier blev overholdt indenfor de fastlagte grænser på +/- 2°C. Det kan dermed konkluderes, at den intelligente styring er et godt alternativ til den almindelige styring.

Til sidst blev alle dele afprøvet på det konkrete distributionsnet, med henblik på at klarlægge hvilken indvirkning et større antal varmepumper har på et distributionsnet, samt undersøge om den intelligente styring kan forbedre udnyttelsesgraden i dette net. Her opstod der nogle problemer med sammenføringen af de store mængder af data, fra de forskellige systemer, og måtte reduceres i de påtænkte test. Men hovedformålet blev undersøgt, og det kan konkluderes, at når et større antal varmepumper implementeres i det konkrete distributionsnet, kan den intelligente styring forbedres udnyttelsesgraden, se Tabel 7.3. Dette skal forstås på den måde, at det kommende effektforbrug forøges, bare ikke med den samme proportion, hvis den intelligente styring er implementeret. Derudover har den på timebasis en udglattende og stabiliserende effekt på det konkrete distributionsnet, her er der ikke analyseret på meget korte tidsintervaller 0-10 sekunder.



## 9 Perspektivering

Under udarbejdelse af analysen er der på forskellige områder fremkommet aspekter, som kan forbedres eller uddybes for et videre studie på dette felt. Nogle af disse er beskrevet i dette kapitel.

### Referencesystemet

Det udarbejdede referencesystem er baseret på "steady state", hvorfor et dynamisk system, der beskriver varmesystemet mere præcist, kunne forbedre referencesystemet væsentligt og kunne herved bruges til at afprøve forskellige styringsstrategier. Endvidere kunne systemet afprøves på forskellige varmepumper i et praktisk forsøg for at korrigere de anvendte data.

### Ekstra varmekapacitet

Det blev under testen af den implementerede intelligente styring observeret, at denne ved anvendelse af ekstra tank foretrak at køre ved høje temperaturer for både setpunkt og tanktemperatur. Det kunne derfor være interessant at undersøge, om der ved forskellige tankstørrelser findes et optimum for varmepumpen, så den med en intelligent styring kan operere mere optimalt på distributionsnettet.

### Den intelligente styring

Den udarbejdede simplificerede adaptive styring er opbygget til en varmepumpeinstallation, og da der i dette projekt kun er undersøgt forhold på 10 KV siden, ville det være interessant at se, hvad der sker på distributionsnettet på lavspændingssiden, hvis den intelligente styring blev udbygget til også at kunne håndtere kommunikation imellem indbyrdes varmepumper. Da opstart af flere varmepumper samtidig, hvilket er observeret i denne analyse, kan generere væsentlige forstyrrelser i distributionsnettet, særligt på lavspændingssiden, kunne dette afhjælpes ved forsinket start af mindre grupper af varmepumper ved kommunikation imellem flere intelligente styringer.

### Store varmelagre

Der blev ved sidste test observeret en stor forskel på udnyttelsen af den producerede vindeenergi på de fire valgte referenceuger, og det meget varierende forbrug fra varmepumperne er samlet set ikke en særlig god anvendelse af vindenergien. Det kunne derfor undersøges, hvor stor en effekt med et meget stort samlet selvstændigt varmelager kunne få på et lokalt distributionsnet, med henblik på at udnytte væsentligt mere produceret vindenergi hen over en sæson, hvor varmelageret så kan levere varme til forbrugeren.

## 10 Appendiks 1

I dette appendiks beskrives, opstilles og gennemgås alle delenergier og formler, der er anvendt i referencesystemet. Først gennemgås alle delenergier enkeltvis, og der beskrives hvilke elementer der er medtaget i disse beregninger. Herefter opstilles alle formler, der er anvendt i referencesystemet, hvor ligninger opstilles med start i boligen.

### Den totale tilførte energi $Q_{ind}$

#### Tilført energi fra varmepumpe $Q_{pump}$

$$Q_{pump} = P_{maks} \cdot Last_{vp} \cdot 3600 \quad ( 10.1 )$$

Hvor  $P_{maks}$  er den maksimale ydelse af varmepumpen,  $Last_{vp}$  er det aktuelle beregnede lastniveau på varmepumpen og er et tal imellem 0-1, hvor 1 er 100 % last og 0 er slukket. De 3600 er omregning fra Watt til Joule, hvis der regnes pr. time. Dette tal ændres til 60, hvis der regnes pr. minut.

#### Tilført energi fra andet $Q_{other}$

$$Q_{other} = Varmetilskud \cdot A \cdot 3600 \quad ( 10.2 )$$

Hvor varmetilskud er  $5 W/m^2$  udregnet som en gennemsnitsværdi over et år, og  $A$  er boligens bruttoareal, som er fastlagt i Tabel 4.2 og Tabel 4.4. De 3600 er omregning fra Watt til Joule, som altid er pr. time.

#### Tilført energi fra solindfald $Q_{sun}$

Solindfaldet i boligen har stor indflydelse på rumtemperatur og energiomsætning i boligen. Derfor er der medtaget flere faktorer ved fastlæggelse af det endelige solindfald.

- Fastlæggelse af indfaldsvinkel på vinduet hen over et år.
- Fastlæggelse af korrektionsfaktorer iht. BR00-10 for reflekteret, diffust og direkte sollys.
- Beregning af delværdier iht. BR00-10's årlige gennemsnitsværdier  $KWh/m^2$ .
- Korrigering af de anvendte måledata i forhold til disse værdier, se Tabel 10.1.
- Sammenlægning af alle delværdier og korrigering af det samlede energitilskud med solafskærmningsfaktor.

Først fastlægges solens indfaldsvinkel på vinduet i et lodret plan, se ligning 10.3.

$$V_i = 90 - B_g - D \quad ( 10.3 )$$

Hvor  $V_i$  er indfaldsvinklen,  $B_g$  er områdets breddegrad (N57° Aalborg), og  $D$  er deklinationsvinklen, som er solens vinkel målt fra det vandrette plan igennem jordens ækvator. Dette er 23.45° til -23.45° hen over et år og beregnes med nøjagtighed på +/- 1° som følgende (16), se ligning 10.4.

$$D = 23.45 \cdot \sin\left(\frac{(284 + n) \cdot 360}{365}\right) \quad ( 10.4 )$$

Hvor  $n$  er antal dage inde i året, og hvor  $n=1$  d. 1. januar og  $n=365$  d. 31. december. Da de anvendte soldata er fra 2012, medregnes en gennemsnitsværdi for d. 29/2, da 2012 er et skudår.

Herefter fastlægges korrektionsfaktorerne med reflekteret, diffust og direkte sollys. Dette gøres iht. BR00-10, hvor der for reflekteret og diffust sollys kan regnes med en konstant faktor på  $f_{q2sun} = 0,86$ , men for direkte sollys skal der benyttes følgende ligning 10.5 (10).

$$f_{q1sun} = 1 - \tan^{Glaskonstant} \left( \frac{V}{2} \right) \quad ( 10.5 )$$

Hvor  $f_{q1sun}$  er korrektionsfaktor for direkte sollys pr. dag, glaskonstanten er den valgte glastype, som i referencesystemet er valgt til 3,  $V$  er den beregnede indfaldsvinkel fra ligning 10.3. Herefter opdeles det målte sollys i to dele, det direkte sollys og det samlede reflekterede og diffuse sollys. Dette gøres ud fra forhold på gennemsnitsværdierne i Tabel 10.1 (10), se ligning 10.6. Her skal det nævnes, at da vinduesarealet er valgt med 25 % fordeling i alle retninger iht. Tabel 4.2, kan det samlede forhold beregnes som summen af værdierne for det reflekterede, diffuse og direkte sollys.

Retning\Type	Direkte	Diffus	Reflektion
<i>Nord</i>	25	213	100
<i>Syd</i>	470	338	100
<i>Øst</i>	283	287	100
<i>Vest</i>	266	287	100
<i>Total</i>	1044	1125	400

Tabel 10.1 Gennemsnitsværdier på energitilskud for solindfald [ $\text{KWh/m}^2$ ] årlig opdelt i retning og type.

$$Q_{sunforhold1} = \frac{Q_{sundel2} + Q_{sundel3}}{Q_{sundel1} + Q_{sundel2} + Q_{sundel3}} \quad ( 10.6 )$$

Hvor  $Q_{sunforhold1}$  er konstanten, der fordeler det målte sollys i de to delværdier, og  $Q_{sundel1-3}$  er den samlede årlige tilførte energi for henholdsvis reflekteret, diffuse og direkte sollys for alle de fire retninger. Herefter beregnes alle de målte sollysdata, og der fortages en middelberegning som anført i ligning 4.5.

Efter denne fordeling skal de beregnede værdier korrigeres i forhold til den samlede årlige gennemsnitlig tilførte energi i Tabel 10.1. Dette gøres først ved at finde to nye forhold, se ligning 10.7 og 10.8.

$$Q_{sunforhold2} = \frac{Q_{sundel3} \cdot 1000}{\sum_{n=1}^{8784} Q_{sundir(n)}} \quad ( 10.7 )$$

Hvor  $Q_{sunforhold2}$  er nedreguleringsfaktoren for det direkte sollys,  $Q_{sundel3}$  er tabelværdien for det totale direkte sollys, og  $Q_{sundir(n)}$  er de enkelte beregnede timeværdier for det direkte sollys i 2012.

$$Q_{sunforhold3} = \frac{(Q_{sundel2} + Q_{sundel3}) \cdot 1000}{\sum_{n=1}^{8784} Q_{sundif+ref(n)}} \quad ( 10.8 )$$

Hvor  $Q_{sunforhold3}$  er nedreguleringsfaktoren for det reflekterede og diffuse sollys,  $Q_{sundel2-3}$  er tabelværdien for det totale reflekterede og diffuse sollys, og  $Q_{sundif-ref(n)}$  er de enkelte beregnede timeværdier for det samlede reflekterede og diffuse sollys i 2012.

Korrektionen foretages ved at gange forholdet på de enkelte timebaserede værdier, se ligning 10.9 og 10.10.

$$\sum_{n=1}^{8784} Q_{sundir(n)} = \sum_{n=1}^{8784} Q_{sundir(n)} \cdot Q_{sunforhold2} \quad ( 10.9 )$$

$$\sum_{n=1}^{8784} Q_{sundif+ref(n)} = \sum_{n=1}^{8784} Q_{sundir(n)} \cdot Q_{sunforhold3} \quad ( 10.10 )$$

Til sidst korrigeres og sammenlægges de to delenergi, og den samlede tilførte energi fra solindfald beregnes. Først regnes de enkelte timebaserede værdier om til et forhold af den samlede tilførte delenergi, se ligning 10.11 og 10.12.

$$Q_{sunelef1(n)} = \frac{\sum Q_{sundir(n)}}{\sum_{m=1}^{8784} Q_{sundir(m)}}; [n = 1 \rightarrow 8784] \quad ( 10.11 )$$

$$Q_{sunelef2(n)} = \frac{\sum Q_{sundif+ref(n)}}{\sum_{m=1}^{8784} Q_{sundif+ref(m)}}; [n = 1 \rightarrow 8784] \quad ( 10.12 )$$

Hvor  $Q_{sunelef1(n)}$  er alle de timebaserede værdiforhold for direkte sollys,  $Q_{sunelef2(n)}$  er alle de timebaserede værdiforhold for reflekteret og diffust sollys,  $n$  er den aktuelle timeværdi, og  $Q_{sundir(m)}$  er delenergi for det samlede direkte sollys i 2012. Ligeledes er  $Q_{sundif+ref(m)}$  delenergi for det samlede reflekterede og diffuse sollys i 2012.

Herefter beregnes den korrigerede delenergi som følgende, se ligning 10.13 og 10.14.

$$Q_{sundir(n)} = Q_{sunelef1(n)} \cdot fq1sun(n) \cdot \sum_{m=1}^{8784} Q_{sundir(m)}; \quad ( 10.13 )$$

$$[n = 1 \rightarrow 8784]$$

$$Q_{sundif+ref(n)} = Q_{sunelef2(n)} \cdot fq2sun \cdot \sum_{m=1}^{8784} Q_{sundif+ref(m)}; \quad ( 10.14 )$$

$$[n = 1 \rightarrow 8784]$$

Herefter sammenlægges de to delenergi og omregnes fra W/m<sup>2</sup> til J/h, og der korrigeres for solafskærmning, se ligning 10.15.

$$Q_{sun(n)} = (Q_{sundir(n)} + Q_{sundif+ref(n)}) \cdot 3600 \cdot A \cdot solafskærmning \quad ( 10.15 )$$

$$; [n = 1 \rightarrow 8784]$$

Hvor  $Q_{sun(n)}$  er den anvendte værdi i referencesystemet, de 3600 er omregning fra sekunder til timeværdi, A er den valgte bruttoareal på boligen og solafskærmningsfaktor, der svarer til en middelaftskærmning, og n er den aktuelle timebaserede værdi i 2012.

## Den totale energiomsætning $Q_{out}$

### Omsat energi igennem bygning $Q_{build}$

Energiomsætningen ud igennem boligens vægge, gulve, lofter og vinduer er også vigtig, da det er her, den største energiomsætning i boligen foregår. Derfor er der også medtaget flere faktorer i disse beregninger. Alle beregninger i efterfølgende afsnit er fundet i Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences, 3. udgave (17).

- Fastlæggelse af det årlige varmebehov for det konkrete område, de pågældende konvektionsværdier iht. BR00-10 og U-værdierne for de anvendte vinduer i de syv aldersgrupper og de 4 hovedsektorer.
- Konvertering af alle R-værdier til h-værdier og beregning af den gennemsnitlige udvendige temperatur for et år for de anvendte data.
- Beregning af fordelingstal for væg, gulv og loft for de anvendte arealstørrelser, se Tabel 4.2, således at de rigtige modstandsstørrelser kan fastlægges.
- Fastlæggelse af energiomsætningen på vinduer, som fratrækkes det samlede varmebehov.
- Beregning og fastlæggelse af den samlede ledemodstand (h- og k-værdier)  $R_m$ , i forhold til det udregnede fordelingstal.
- Beregning af det samlede varmebehov for alle syv aldersgrupper fordelt i forhold til de fire hovedsektorer ud fra de anvendte målte timebaserede temperaturer fra 2012 og omsætning af de beregnede værdier fra W til J/h.

Først fastlægges varmebehovet ud fra Rebild kommunes varmeplan (7), fordeling af aldersgrupper og fordeling i fire hovedgrupper, se Tabel 10.2.

Beskrivelse	Boligmassens alder						
	Gr.1	Gr.2	Gr.3	Gr.4	Gr.5	Gr.6	Gr.7
Varmebehov for Gr. 1 – 7							
– Boligområdet [KWh/m <sup>2</sup> ]	207	214	202	156	113	86	72

– Serviceområdet [ $KWh/m^2$ ]	146	150	183	131	122	93	86
– Industriområdet [ $KWh/m^2$ ]	120	120	120	102	97	66	66
– Landbrugsområdet [ $KWh/m^2$ ]	45	45	45	36	33	22	22
Fordeling af boligmassen [%]	9,3	3,7	2,6	9,3	14,8	35,9	24,4
Vindue U – værdier [ $W/m^2 \cdot K$ ]	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,05	1,2

Tabel 10.2 Varmebehov fordelt på syv aldersgrupper og fire belastningstyper samt gennemsnitsberegning af U-værdier for vinduer med en estimeret levetid på 30 år. De 2,9 er maksimumsværdier fastsat i BR79.

Beregning af det årlige varmebehov, se ligning 10.16.

$$Boligbehov(n) = Varmebehov(n) \cdot A; [n = 1 \rightarrow 7] \quad ( 10.16 )$$

Hvor  $Boligbehov(n)$  er det årlige varmebehov for hver af de syv grupper,  $Varmebehov(n)$  er boligsektorens årlige varmebehov pr.  $m^2$  for hver af de syv grupper,  $A$  er det valgte bruttoareal og  $n$  nummeret på aldersgruppen.

Herefter fastlægges isolanser for konvektionsværdier og U-værdier for vinduerne se Tabel 10.2 og Tabel 10.3.

Placering\Type	Vægge	Gulve	Lofter	Vinduer
Indvendig [ $m^2K/W$ ]	0,13	0,17	0,10	0,13
Udvendig [ $m^2K/W$ ]	0,04	0,04	0,04	0,04

Tabel 10.3 Isolanser for konvektionsovergange anvendt for boliger.

Herefter omregnes isolanserne til h-værdier, se ligning 10.18 og 10.18, og efterfølgende beregnes den gennemsnitlige udvendige årlige temperatur, se ligning 10.19.

$$R_{vin} = U_{vin}^{-1} \quad ( 10.17 )$$

Hvor  $U_{vin}$  er U-værdierne fra Tabel 4.2 og  $R_{vin}$  er de modsvarende modstandsværdier.

$$h_{værdier} = Conv\_modstand^{-1} \quad ( 10.18 )$$

Hvor  $Conv\_modstand$  er modstandsværdierne i Tabel 10.3, og  $h_{værdier}$  er de modsvarende varmeoverføringskoefficienter

$$summatempdt = \left( \sum_{n=1}^{8784} temptime(n) \right) / 8784 \quad ( 10.19 )$$

Hvor  $summatempdt$  er den gennemsnitlige årlige temperaturredifference imellem de timebaserede udvendige temperaturværdier og det valgte setpunkt,  $temptime(n)$  er de enkelte timebaserede temperaturredifferencer, og  $n$  er det aktuelle timenummer.

Nu kan beregning af alle isolanser ( $R_m$ ) påbegyndes, så boligvarmebehovet på de tre fastlagte boligarealer vægge, gulve og lofter kan beregnes. Da den samlede U-værdi for vinduerne er fastlagt, se Tabel 10.2, skal denne ikke med i fordelingsberegningen. Fordelingen beregnes, fordi der ikke er noget kendskab til U-værdier for vægge, gulve og lofter for bolighederne i Rebild kommune. Derfor beregnes isolanserne på baggrund af de oplyste varmebehov i Tabel 10.2, og den samlede enkelte isolans for henholdsvis vægge, gulve og lofter antages at være af samme størrelse. Fordeling beregnes med ligning 10.20 og ligning 10.21.

$$hconv(n) = (hværdier(1,n) + hværdier(2,n)) \cdot A(1,n); [n = 1 \rightarrow 3] \quad ( 10.20 )$$

Hvor  $hconv(1,n)$  er fordelings-tallet på vægge, gulve og lofter,  $hværdier(1 \rightarrow 2,n)$  er indvendige og udvendige varmeoverføringskoefficienter beregnet med ligning 10.18, og  $A(1,n)$  er bruttoarealet for henholdsvis vægge, gulve og lofter.

$$hconv123 = \sum_{n=1}^3 hconv(n) \quad ( 10.21 )$$

Hvor  $hconv123$  er det samlede fordelings-tal på væg, gulv og loft.

Alle efterfølgende beregninger til fastlæggelse af  $Q_{build}$  tager udgangspunkt i ligning 10.22.

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T \rightarrow \dot{Q} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{total}}; [W] \quad ( 10.22 )$$

Først fastlægges energiomsætningen igennem vinduesarealet for alle syv aldersgrupper, se ligning 10.23, herefter fratrækkes disse værdier det samlede boligvarmebehov (se ligning 10.16), se ligning 10.24. Herefter fordeles det resterende energibehov med de udregnede fordelings-tal fra ligning 10.20 på henholdsvis vægge, gulve og lofter, og den endelige  $R_m$  kan fastlægges efter ligning 10.25.

$$Qt(4,n) = \frac{summatempdt}{R_m(4,n) + Conv_{modstand(4)}} \cdot \frac{365 \cdot 24 \cdot A(4)}{1000}; [n = 1 \rightarrow 7] \quad ( 10.23 )$$

Hvor  $R_m(4,n)$  er lig med  $R_{vin}$  for de syv aldersgrupper, og  $n$  er gruppe nummeret.

$$Boligdelbehov(n) = Boligbehov(n) - Qt(4,n); [n = 1 \rightarrow 7] \quad ( 10.24 )$$

Hvor  $Boligdelbehov(n)$  er det resterende varmebehov på de syv aldersgrupper.

$$R_m(m,n) = \frac{summatempdt \cdot 365 \cdot 24 \cdot A(m)}{\frac{hconv(m)}{hconv123} \cdot Boligdelbehov(n) \cdot 1000} - Conv_{modstand(m)}; \quad ( 10.25 )$$

$$[m = 1 \rightarrow 3], [n = 1 \rightarrow 7]$$

Hvor  $R_m(m,n)$  er de endelige modstandsværdier for alle syv aldersgrupper og fordelt på henholdsvis vægge, gulve og lofter. Der er således tre  $R_m$ -værdier for hver af de syv aldersgrupper.

Nu kan alle de timebaserede værdier for  $Q_{build}$  fastlægges med de beregnede modstandsværdier og differencetemperaturer samtidigt med, at der tages højde for aldersgrupper, den valgte fysiske boligstørrelse og formen på boligen.

Først beregnes alle delenergiene for de syv aldersgrupper og de fire arealtyper for den enkelte timebaserede differencetemperatur, se ligning 10.26. Herefter sammenlægges værdierne pr. aldersgruppe, og der ganges med varmfordelingen fra Rebild kommune, se Tabel 10.2, herefter omsættes værdien til J/h, se ligning 10.27.

$$Q_{outdel}(m,n) = \frac{temptime(a) \cdot A(m)}{R_t(m,n)}; [m = 1 \rightarrow 4], [n = 1 \rightarrow 7] \quad ( 10.26 )$$

Hvor  $Q_{outdel}(m,n)$  er delenergiene pr. time fordelt på aldersgrupper og arealtype, og  $temptime(a)$  er den aktuelle differencetemperatur på hver timebaseret måling.

$$Q_{build}(a) = \left( \sum_{n=1}^7 \left( \left( \sum_{m=1}^4 Q_{outdel}(m,n) \right) \cdot \left( \frac{Vford(n)}{100} \right) \right) (n) \right) \cdot 3600 \quad ( 10.27 )$$

Hvor  $Vford(n)$  er fra Tabel 10.2, og de 3600 er omregning af W til J/h. Beregning af  $Q_{build}(a)$  gøres for alle 8784 timebaserede måleværdier fra 2012.

#### Omsat energi ved ventilation $Q_{vent}$

Ved ventilation forstås den energi der mistes, når luften i boligen udskiftes, og her antages det, at luften udskiftes med anden luft, som har samme temperatur som den pågældende udvendige temperatur på det pågældende tidspunkt. Hermed er  $Q_{vent}$  lig med varmekapaciteten i den udskiftede luft, se ligning 10.28.

$$Q_{vent}(n) = Cp_{23} \cdot \rho_{23} \cdot \left( \frac{vent \cdot A}{1000} \right) \cdot temptime(n) \cdot 3600; [n = 1 \rightarrow 8784] \quad ( 10.28 )$$

Hvor  $Cp_{23}$  er den specifikke varmekapacitet af atmosfærisk luft ved 23°C,  $\rho_{23}$  densiteten af atmosfærisk luft ved 23°C,  $vent$  er den valgte ventilationshastighed ( $l/s \cdot m^2$ ),  $A$  er boligens bruttoareal,  $temptime(n)$  er den aktuelle temperaturdifference, og de 1000 er omregning af liter til  $m^3$ , og de 3600 er omregning af W til J/h.

#### Omsat energi ved varmt brugsvand $Q_{vv}$

Ved varmt brugsvand forstås den energi der mistes, når beboerne i boligen bruger varmt vand. Her antages det, at det udskiftede vand, der kommer ind i boligen, er 8°C. Ligesom ved ventilationen er  $Q_{vv}$  lig med varmekapaciteten i det udskiftede vand. Herudover er det valgt at fordele energiomsætningen pr. døgn i forskellige spidsperioder, da dette ligner et mere reelt forbrugsmønster med følgende fordeling.

- 15 % af et døgn forbrug fordeles over de 24 timer, 85 % tilbage af et døgn forbrug.
- 55 % af de 85 % fordeles på 3 morgentimer 05-08, 38,25 % tilbage af et døgn forbrug.
- 15 % af de 85 % fordeles på 2 middagstimer 12-14, 25,50 % tilbage af et døgn forbrug.
- 30 % af de 85 %, som er den sidste del, fordeles på 3 aftentimer 17-20.



Til døgnomsætningen tillægges et tab på 20 %, da der i mange ældre boliger er langt ud til aftapningspunktet, og der således ved hver aftapning både før og efter sker en energiomsætning i rørene. Døgnomsætningen beregnes med ligning 10.29.

$$Q_{vvdag} = C_{p_{55}} \cdot \rho_{55} \cdot \left( \frac{\text{brugsvand} \cdot A}{365} \right) \cdot (t_i - 8) \cdot 1.2 \quad ( 10.29 )$$

Hvor  $C_{p_{55}}$  er den specifikke varmekapacitet for vand ved 55°C,  $\rho_{55}$  densiteten af vand ved 55°C, *brugsvand* er det valgte årlige forbrug af varmt vand ( $l/m^2$ ),  $A$  er boligens bruttoareal,  $t_i$  er den valgte maksimale temperaturgrænse i tanke ,og de 1,2 er det medregnede tab i rør.

For at beregne fordelingen af  $Q_{vvdag}$  hen over et døgn i henhold til den specificerede fordeling, benyttes ligning 10.30. Dette mønster vil så gentage sig hen over et år.

$$Q_{vv}(n) = \frac{Q_{vvdag} \cdot 0,15}{24} + Q_{fordeling}(n); [n = 1 \rightarrow 24]$$

$$Q_{fordeling}(n) = \begin{cases} \frac{(Q_{vvdag} \cdot 0,85) \cdot 0,55}{3}; & 5 \leq n \leq 7 \\ \frac{(Q_{vvdag} \cdot 0,85) \cdot 0,15}{2}; & 12 \leq n \leq 13 \\ \frac{(Q_{vvdag} \cdot 0,85) \cdot 0,30}{3}; & 17 \leq n \leq 19 \end{cases} \quad ( 10.30 )$$

Hvor  $Q_{vv}(n)$  er den endelige timebaserede værdi, og  $Q_{fordeling}(n)$  er de tre valgte spidsbelastningstillæg indenfor den valgte tidsperiode.

#### Omsat energi ved diverse tab $Q_{tab}$

Når der her nævnes "energitab", er der reelt tale om en flytning af energi fra det varme medie til det kolde medie iht. de termodynamiske love. Da denne omsatte energi skal tilføres det kolde medie for at opretholde den samme temperatur, skal der således tilføres mere energi. For at nedsætte denne omsætning kan der imellem det kolde og varme medie påføres isolering med meget lav varmeledningsevne. På denne måde kan "energitabet" nedsættes. I referencesystemet medtages som nævnt ovenfor 20 % energitab i rør til varmt brugsvand, 10 % energitab i rør ved varmtvandsflowet ind i boligen samt energitab fra de installerede tanke til brugsvand, buffertank og ekstra varmvandstank. Energitabet i rør ind til boligen medtages senere under opstilling af formler for referencesystemet.

Men energitabet fra tankene er en vigtig del af referencesystemet, og der er derfor fastlagt yderligere specifikationer på denne tank, se Tabel 10.4. Tanken er en cylindertank med lodrette ender, og det antages, af tanken er højisoleret, ligesom energiomsætningen foregår med naturlig konvektion.

Specifikationer	Værdier
Indvendig længde $L_{tank}$	2,168 m
Indvendig radius $r_1$	0,542 m

<i>Udvendig radius <math>r_3</math></i>	0,792 m
<i>Isolering tykkelse</i>	0,25 m
<i><math>K_{isolering}</math></i>	0,043 W/m · K
<i>Indvendig temperatur <math>T_{\infty 1}</math></i>	80°C
<i>Udvendig temperatur <math>T_{\infty 2}</math></i>	14,2°C
<i><math>C_{pvand_{80}}</math></i>	4197 J/kg · K
<i><math>\rho_{vand_{80}}</math></i>	0,975 kg/m <sup>2</sup>
<i>Indvendig konvektion <math>R_{si}</math></i>	0,0
<i>Udvendig konvektion <math>R_{se}</math> DS 418</i>	0,13 m <sup>2</sup> °K/W
<i>Beregnet <math>R_{cylinder}</math></i>	0,6443 °K/W
<i>Beregnet <math>R_{Ende}</math></i>	19,9716 °K/W

Tabel 10.4 Yderligere specifikationer på varmvandstank

Med disse fastlagte og beregnede værdier kan energitabet fra tanke beregnes som vist i ligning 10.31 og 10.32.

$$Q_{varmetabtank} = \left( \frac{(T_{\infty 1} - T_{\infty 2})}{R_{cylinder}} + \frac{(T_{\infty 1} - T_{\infty 2})}{R_{Ende}} \cdot 2 \right) \cdot A_{tank} \cdot 3600 \quad ( 10.31 )$$

Hvor  $A_{tank}$  er overfladearealet på tanken, og de 3600 er omregning fra W til J/h, og de resterende værdier er fra Tabel 10.4.

$$A_{tank} = L_{tank} \cdot 2 \cdot r_1 \cdot \pi + 2 \cdot r_1^2 \cdot \pi \quad ( 10.32 )$$

Ved beregning af energitabet for buffertank og brugsvandstank ganges forholdet på tankstørrelserne med det beregnede energitab. Det beregnede energitab for tanken er:

$$\mathbf{Varmetabtank (2000 l) = \underline{3823,2 KJ}}$$

## Den totale lagrede energi $Q_{stored}$

### Lagret energi i bygning $Q_{storedbyg} + Q_{air}$

Energilageret i bygningen består af oplagret energi i bygningsdele og energien i luften inde i boligen. Boligens varmekapacitet er sat til middeltung bygning svarende til 100 Wh/K · m<sup>2</sup> iht. BR00-BR10, endvidere beregnes mængden af luft i boligen ud fra de fastlagte boligstørrelser. Den samlede varmekapacitet er udregnet med ligning 10.33 for en reference til 18°C i boligen.

$$Q_{storedbyg} = \text{Varmekapbyg} \cdot A \cdot 3600 \cdot (Sp - 18) + C_{pluft23} \cdot \rho_{luft23} \cdot luftvol \cdot (Sp - 18) \quad ( 10.33 )$$

**Lagret energi i bygning  $Q_{storedbv}$** 

Energilageret i brugsvandstanken består af energien i det varme vand, hvor størrelsen på tanken er 110 l og udregnet med ligning 10.34, hvor referencen for  $T_{min}$  er sat 45°C, da dette er den mindste værdi, referencesystemet kan komme ned på.

$$Q_{storedbv} = C_{p_{vand80}} \cdot \rho_{vand80} \cdot 110 \cdot (ti - 45) \quad ( 10.34 )$$

Hvor  $ti$  er den brugerbestemte maksimumgrænse i tanken.

**Lagret energi i bygning  $Q_{storedvp}$** 

Energilageret i buffertank udregnes på samme måde som for brugsvandtanken, se ligning 10.35.

$$Q_{storedvp} = C_{p_{vand80}} \cdot \rho_{vand80} \cdot 160 \cdot (ti - 45) \quad ( 10.35 )$$

**Lagret energi i bygning  $Q_{storedtank} + Q_{iso}$** 

Energilageret i den ekstra store varmtvandstank består af energien i det varme vand og varmekapaciteten i den omkring liggende isolering,  $T_{min}$  er som ved de andre tanke 45°C og er som nævnt sat til en størrelse på 2000 l. Beregning er udført med ligning 10.36 og 10.37 samt de fastlagte værdier fra Tabel 10.4.

$$V_{isolering} = (r3^2 \cdot \pi \cdot (L_{tank} + 2 \cdot (r3 - r1))) - (r1^2 \cdot \pi \cdot L_{tank}) \quad ( 10.36 )$$

Hvor  $V_{isolering}$  er volumen på den anvendte isolering.

$$Q_{varmekaptank} = C_{p_{vand80}} \cdot \rho_{vand80} \cdot 2000 \cdot (ti - 45) + C_{p_{uld}} \cdot \rho_{uld} \cdot V_{isolering} \cdot (ti - 45) \quad ( 10.37 )$$

Hvor  $Q_{varmekaptank}$  er den samlede varmekapacitet for den ekstra tank og  $ti$  er den brugervalgte maksimale temperaturgrænse.

**Opstilling og udledning af anvendte formler**

Med udgangspunkt i konceptmodellen og de ovenfor nævnte delenergier opstilles her alle anvendte ligevægtsligninger i referencesystemet for at beskrive det anvendte varmesystem og den optagne effekt  $P_{Net}$  fra det konkrete distributionsnet.

Først beskrives energiflowet ind i boligen som følgende, se ligning 10.38.

$$\begin{aligned} Q_{ind} - Q_{out} - dQ_{stored} &= 0 \Rightarrow Q_{ind} = Q_{out} + dQ_{stored} \Rightarrow \\ Q_{flowbyg} &= Q_{out} + dQ_{stored} = (C_{p_{vand55}} \cdot \rho_{vand55} \cdot m_{flow} \cdot \Delta T) \cdot Q_{tab} \Rightarrow \quad ( 10.38 ) \\ Q_{flowbyg} &= \underline{(C_{p_{vand55}} \cdot \rho_{vand55} \cdot m_{flow} \cdot (T_{frem} - T_{retur}) \cdot 1,1} \end{aligned}$$

Hvor  $m_{flow}$  er det aktuelle masseflow på timebasis,  $T_{frem}$  og  $T_{retur}$  er henholdsvis frem- og returløbstemperaturen i varmesystemet, og de 1,1 er som nævnt de 10 % energitab i rørene ud i boligen.

Herefter skal den lagrede energi i boligen beskrives, dette gøres ud fra ligning 10.38, og alle delenergier for  $Q_{out}$  ude i bygningen indsættes, se ligning 10.39.

$$\begin{aligned}
 Q_{ind} - Q_{out} - dQ_{stored} &= 0 \Rightarrow Q_{flowbyg} + Q_{ind} = Q_{out} + dQ_{stored} \Rightarrow \\
 dQ_{stored} &= Q_{flowbyg} + Q_{ind} - Q_{out} \Rightarrow \\
 dQ_{storedbyg} &= Q_{flowbyg} + Q_{sun} + Q_{other} - Q_{vent} - Q_{build} - Q_{tab} \Rightarrow \quad ( 10.39 ) \\
 \underline{dQ_{storedbyg} &= Q_{flowbyg} \cdot \left(\frac{100}{110}\right) + Q_{sun} + Q_{other} - Q_{vent} - Q_{build}}
 \end{aligned}$$

Hvor  $dQ_{storedbyg}$  er ændring af lagret energi i bygningen, og 100/110 er det omregnede energitab i rørene.

Herefter beskrives energiflowet fra bygningen til varmepumpeoutput med udgangspunkt i konceptmodellen. Først fastlægges  $Q_{ind}$ , se ligning 10.40.

$$Q_{ind} = \underline{Q_{pump} = P_{maks} \cdot Last_{vp} \cdot 3600} \quad ( 10.40 )$$

Hvor  $P_{maks}$  er den maksimale varmepumpeeffekt,  $Last_{vp}$  det aktuelle lastniveau på varmepumpen. Og de 3600 er omregning fra W til J/h.

Herefter fastlægges ændringen af den lagrede energi i tankene med de tilhørende energitab og energiomsætninger, se ligningerne 10.41, 10.42 og 10.43.

$$\begin{aligned}
 Q_{ind} - Q_{out} - dQ_{stored} &= 0 \Rightarrow dQ_{stored} = Q_{ind} - Q_{out} \Rightarrow \\
 dQ_{storedbv} &= Q_{pump} \cdot mv1 - Q_{flowbyg} \cdot mv1 - Q_{vv} - Q_{tab} \cdot \left(\frac{110}{2000}\right) \Rightarrow \quad ( 10.41 ) \\
 \underline{dQ_{storedbv} &= (Q_{pump} - Q_{flowbyg}) \cdot mv1 - Q_{vv} - Q_{tab} \cdot \left(\frac{110}{2000}\right)}
 \end{aligned}$$

Hvor  $mv1$  er motorventilen, der er anvendt i referencesystemet, og  $Q_{tab}$  er det nævnte energitab fra tanken med det pågældende forhold.

$$\begin{aligned}
 Q_{ind} - Q_{out} - dQ_{stored} &= 0 \Rightarrow dQ_{stored} = Q_{ind} - Q_{out} \Rightarrow \\
 dQ_{storedtank} &= Q_{pump} \cdot mv2 - Q_{flowbyg} \cdot mv2 - Q_{tab} \cdot \left(\frac{2000}{2000}\right) \Rightarrow \quad ( 10.42 ) \\
 \underline{dQ_{storedtank} &= (Q_{pump} - Q_{flowbyg}) \cdot mv2 - Q_{tab} \cdot \left(\frac{2000}{2000}\right)}
 \end{aligned}$$

Hvor  $mv2$  er motorventilen, der er anvendt i referencesystemet, og  $Q_{tab}$  er det nævnte energitab fra tanken med det pågældende forhold.

$$\begin{aligned}
 Q_{ind} - Q_{out} - dQ_{stored} &= 0 \Rightarrow dQ_{stored} = Q_{ind} - Q_{out} \Rightarrow \\
 dQ_{storedvp} &= Q_{pump} \cdot mv3 - Q_{flowbyg} \cdot mv3 - Q_{tab} \cdot \left(\frac{1600}{2000}\right) \Rightarrow \quad ( 10.43 ) \\
 \underline{dQ_{storedvp} &= (Q_{pump} - Q_{flowbyg}) \cdot mv3 - Q_{tab} \cdot \left(\frac{160}{2000}\right)}
 \end{aligned}$$

Hvor  $mv3$  er motorventilen, der er anvendt i referencesystemet, og  $Q_{tab}$  er det nævnte energitab fra tanken med det pågældende forhold.

Da der under beregning af hastigheden på varmepumpen benyttes nogle simple PI-regulatorer, skal der ved dette bruges et samlet  $Q_{out}$  for hele varmesystemet, dette er vist i ligning 10.44.

$$Q_{out} = Q_{forbrug} = Q_{flowbyg} + Q_{vv} + Q_{tab1} \cdot \left(\frac{110}{2000}\right) + Q_{tab2} \cdot \left(\frac{2000}{2000}\right) + Q_{tab2} \cdot \left(\frac{160}{2000}\right) \quad ( 10.44 )$$

Det skal dog nævnes, at  $Q_{tab2}$  kun medregnes, hvis der i referencesystemet er valgt ekstra tank.

Til sidst beskrives den optagne effekt  $P_{Net}$  fra distributionsnettet, se ligning 10.45.

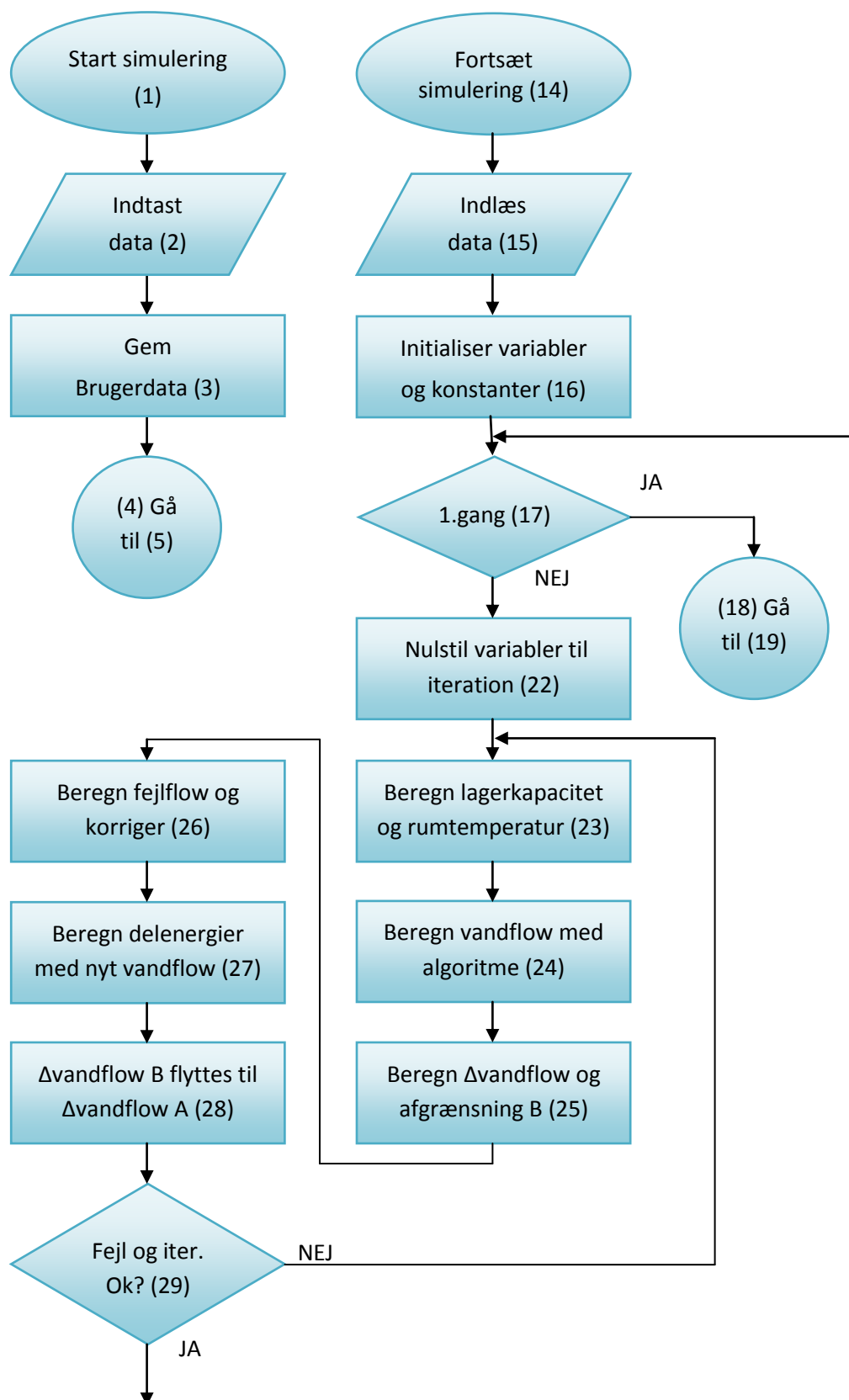
$$\begin{aligned} Q_{ind} - Q_{out} &= 0 \Rightarrow Q_{ind} = Q_{out} \Rightarrow \\ P_{Net} \cdot COP(T_{air}, T_{frem}) \cdot 3600 &= Q_{pump} \Rightarrow \\ P_{Net} &= \frac{P_{maks} \cdot Last_{vp} \cdot 3600}{COP(T_{air}, T_{frem}) \cdot 3600} \Rightarrow \\ P_{Net} &= \frac{P_{maks} \cdot Last_{vp}}{COP(T_{air}, T_{frem})} \end{aligned} \quad ( 10.45 )$$

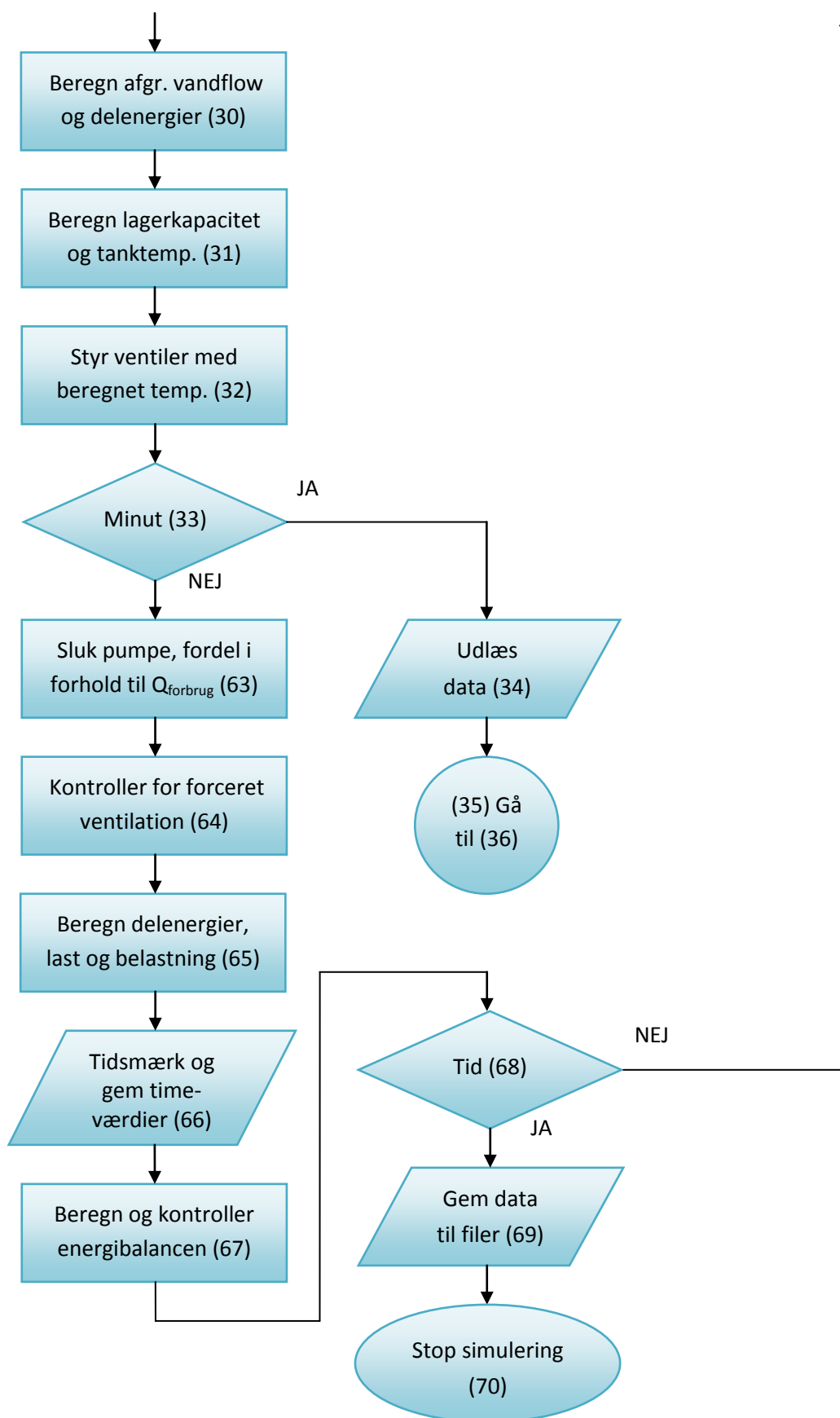
Hvor  $COP(T_{air}, T_{frem})$  er beregnet efter ligning 4.4 og de konstanter, der er angivet i Tabel 4.6.

Hermed er alle anvendte ligninger i referencesystemet fastlagt samt alle delenergies beskrevet og gennemgået.

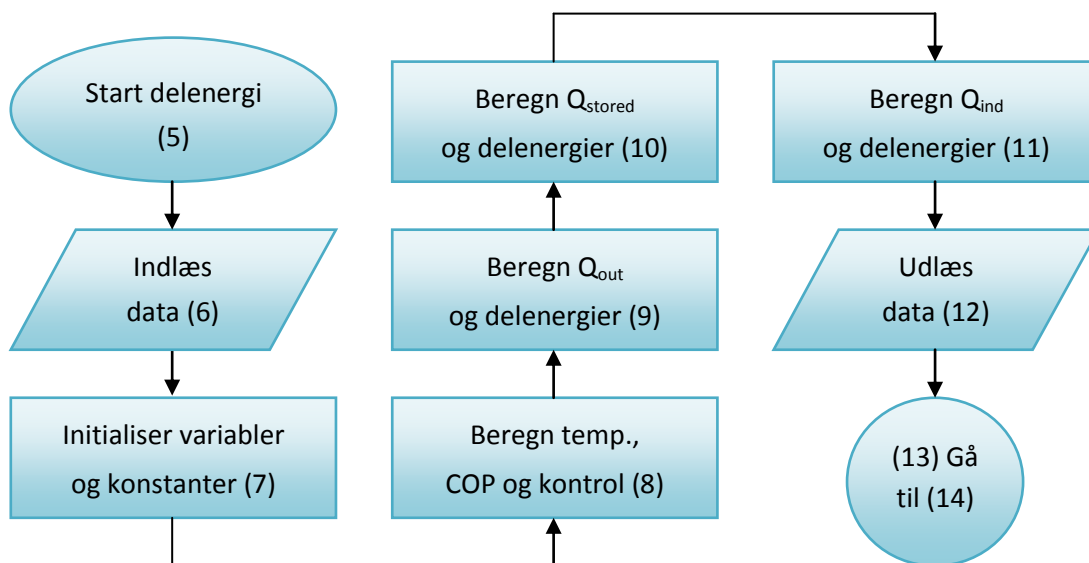
# 11 Appendiks 2

## Oversigt over hovedscript "simulering\_cal.m"

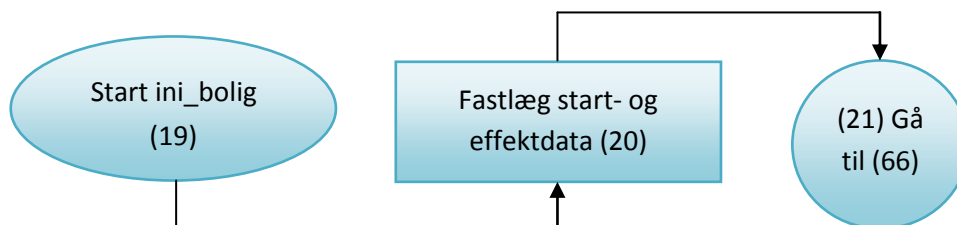




## Øversigt over delscript "Delenergi\_cal.m"

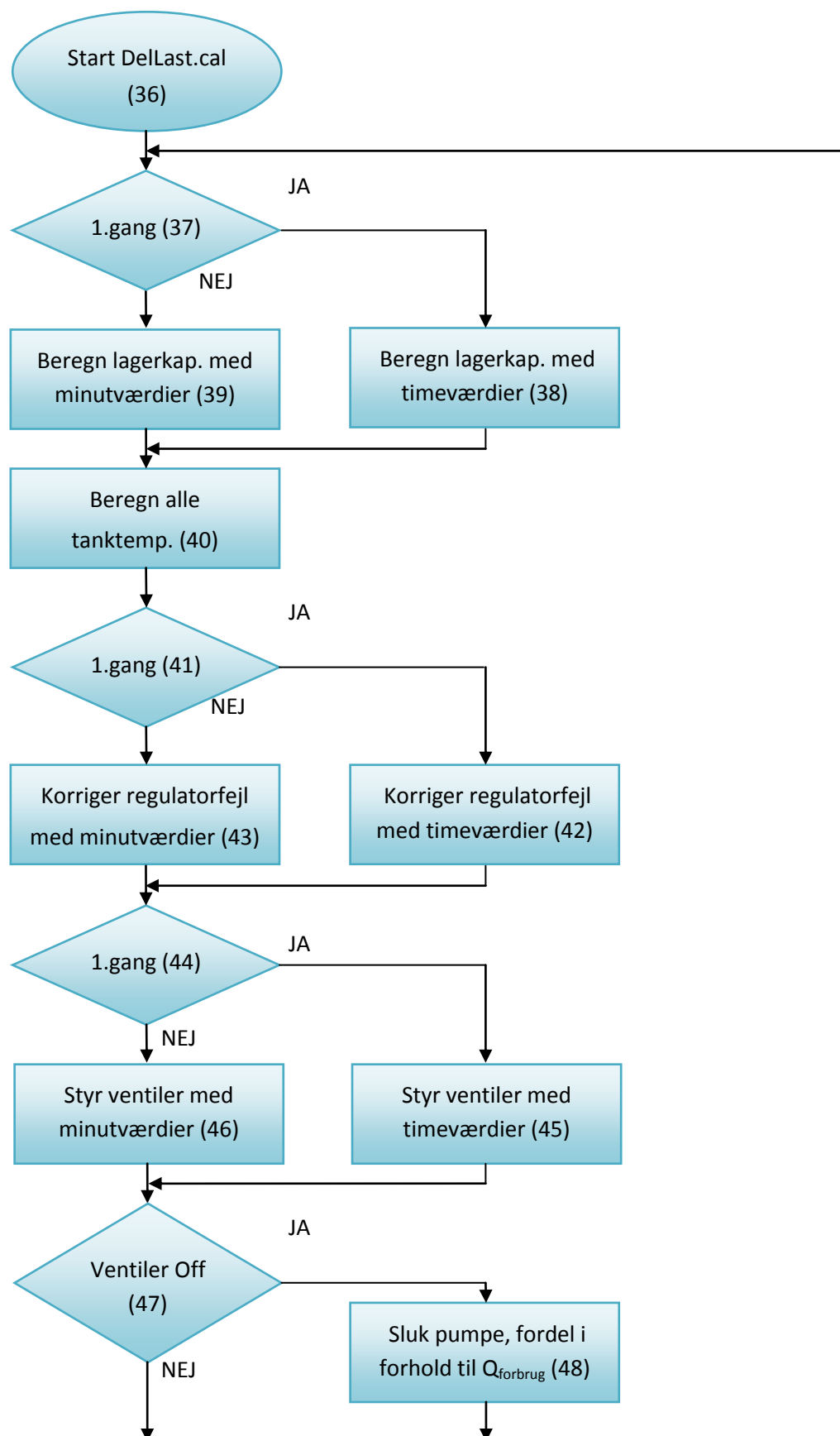


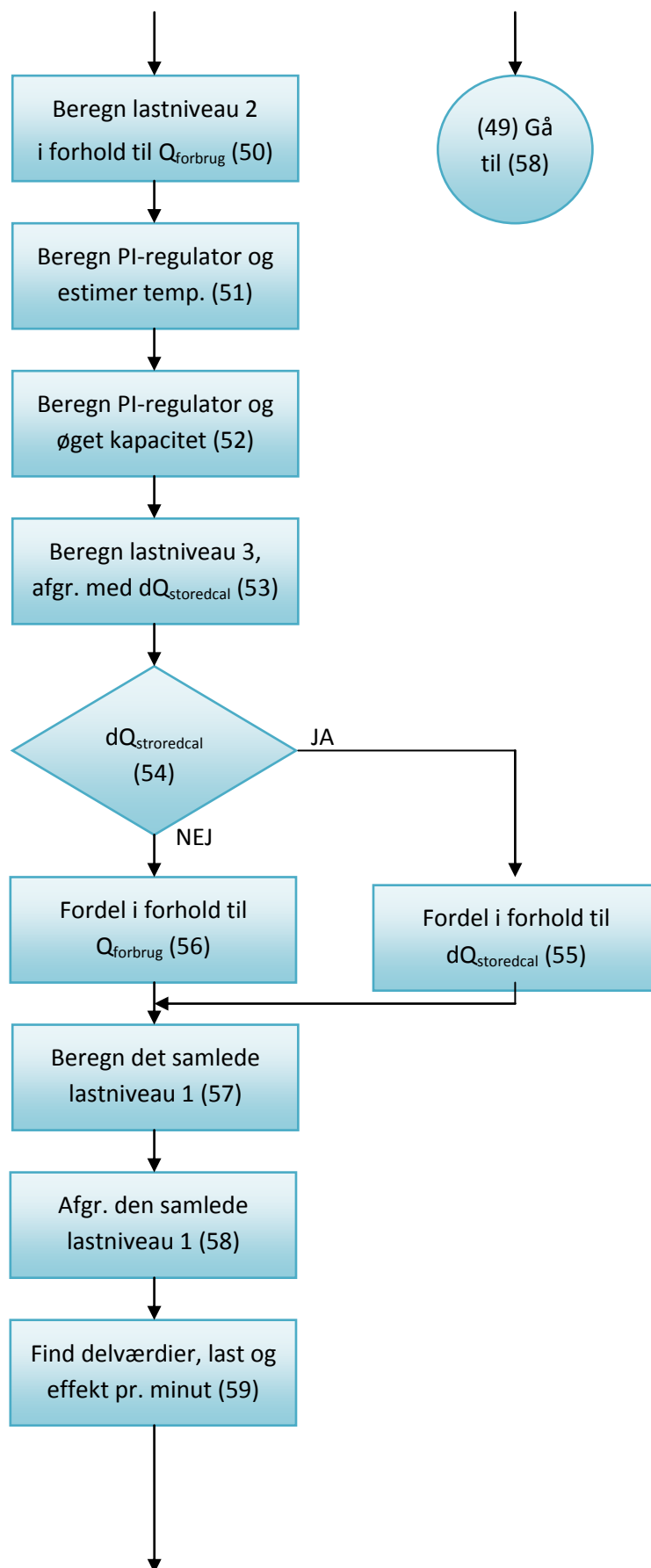
## Øversigt over delscript "Ini\_bolig.m"

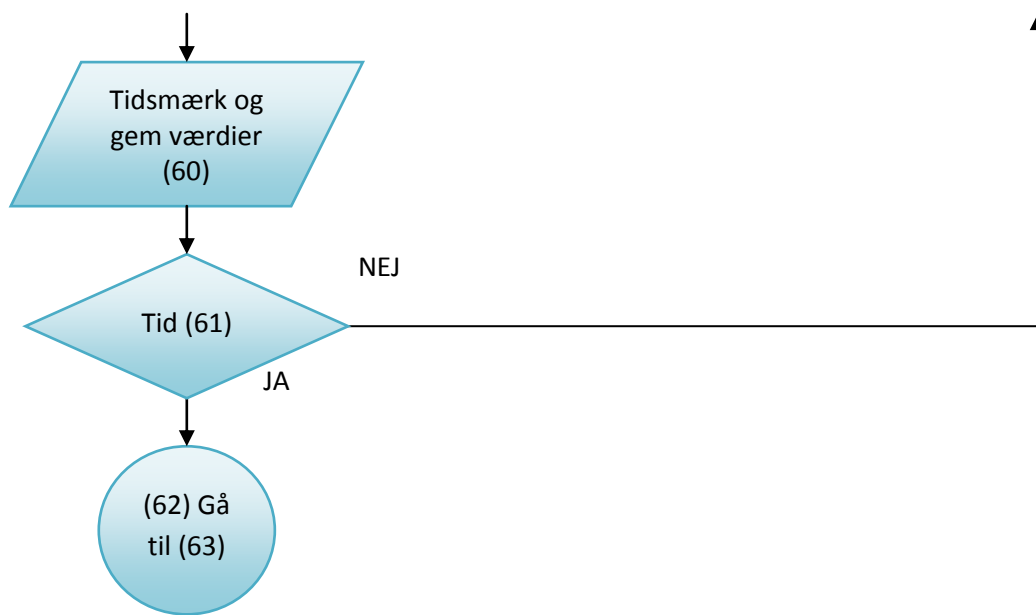




## Oversigt over delscript "DelLast\_cal.m"

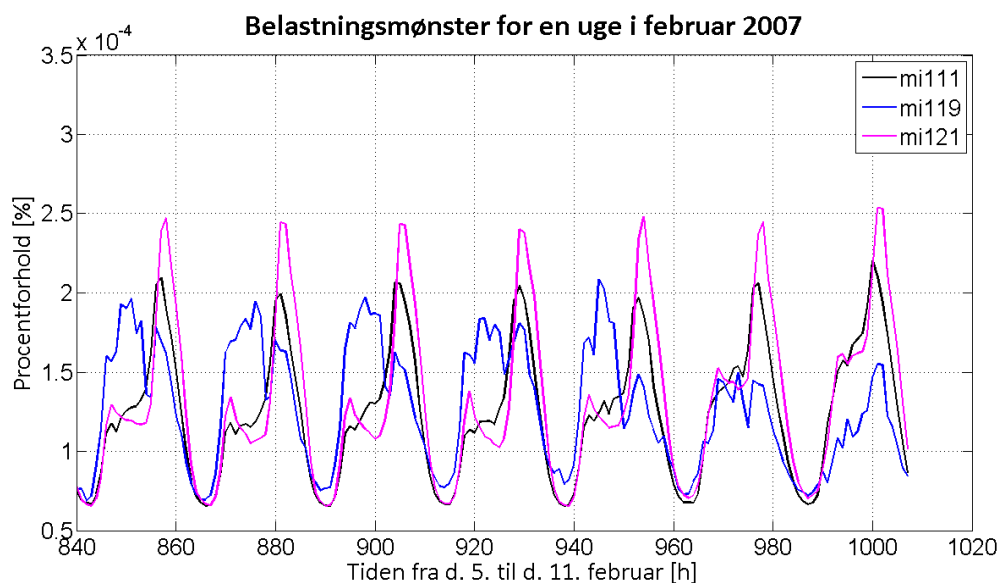




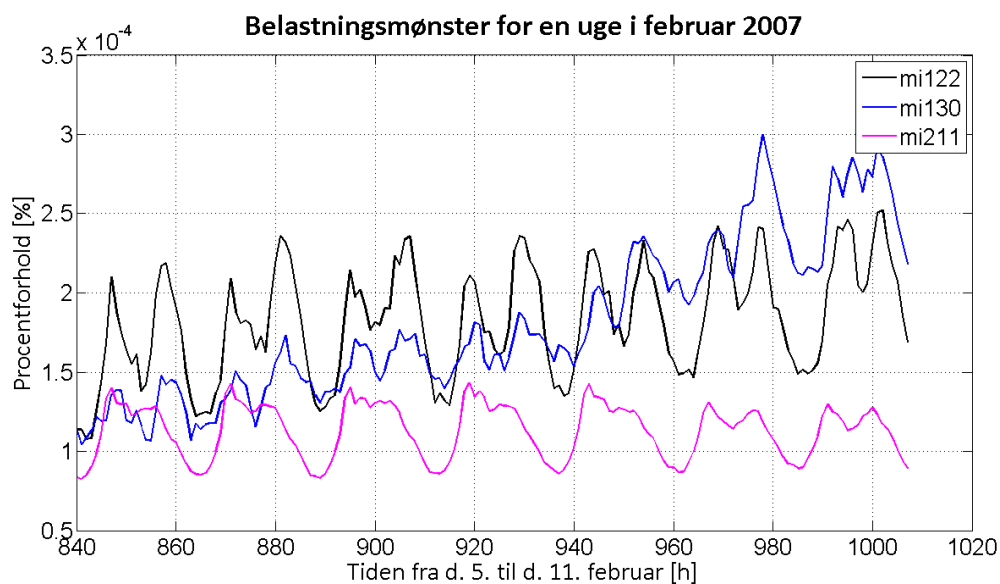


## 12 Appendiks 3

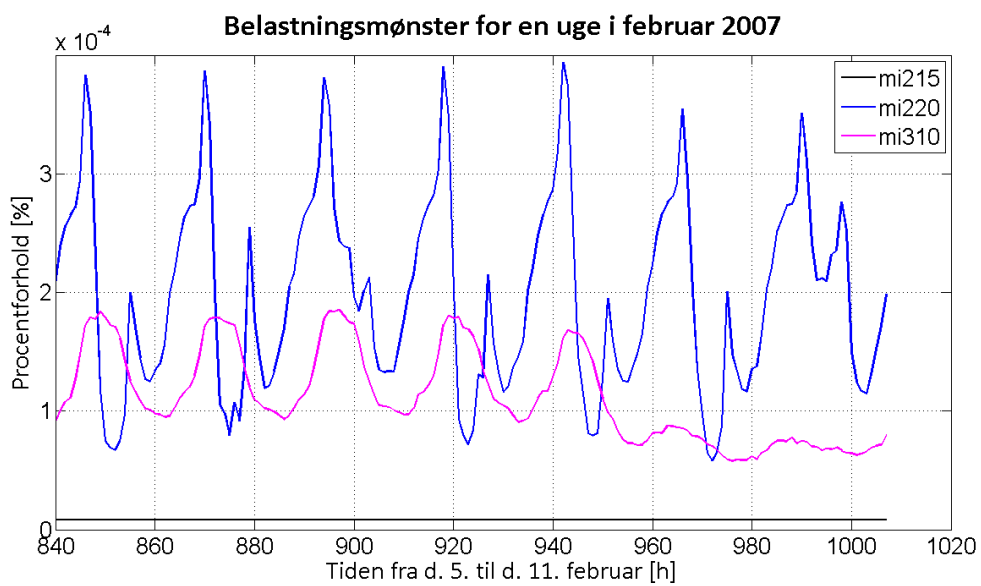
Alle mærkninger, der er påført de enkelte figurer, henviser til mærkninger på de enkelte tidsserier og er vedlagt på CD'en med navnet "kurver\_2007".



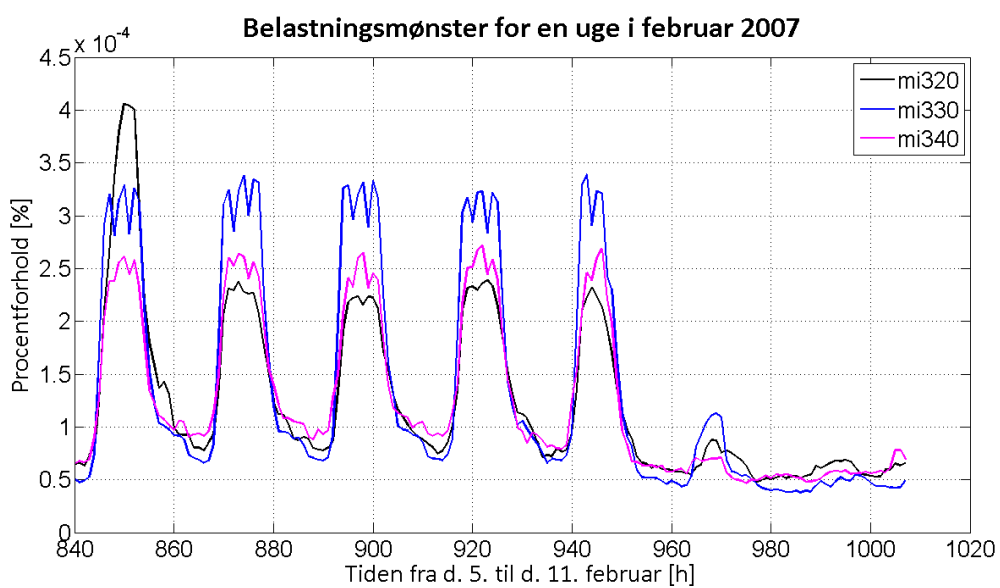
Figur 12.1 Belastningsmønstre 1-3 af 30



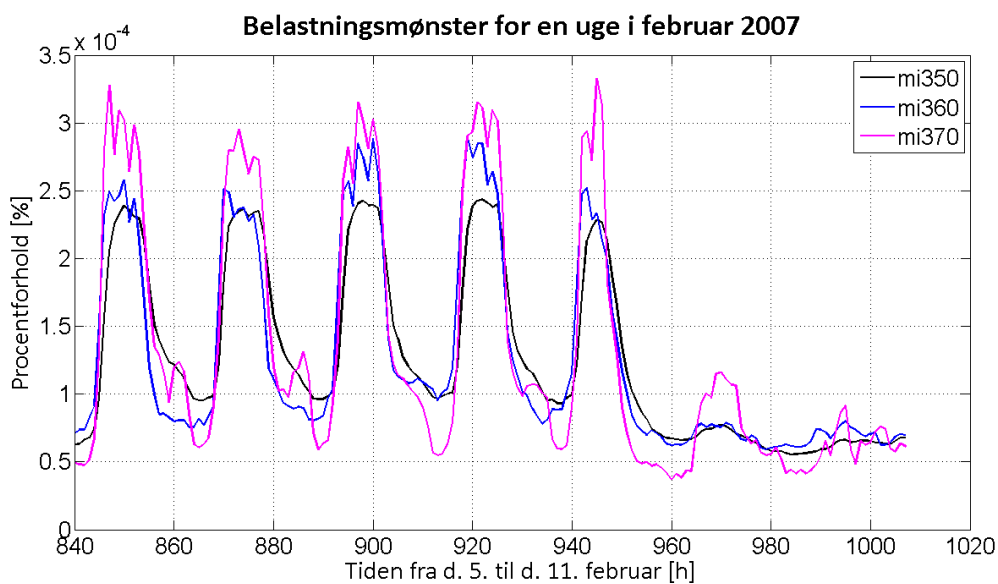
Figur 12.2 Belastningsmønstre 4-6 af 30



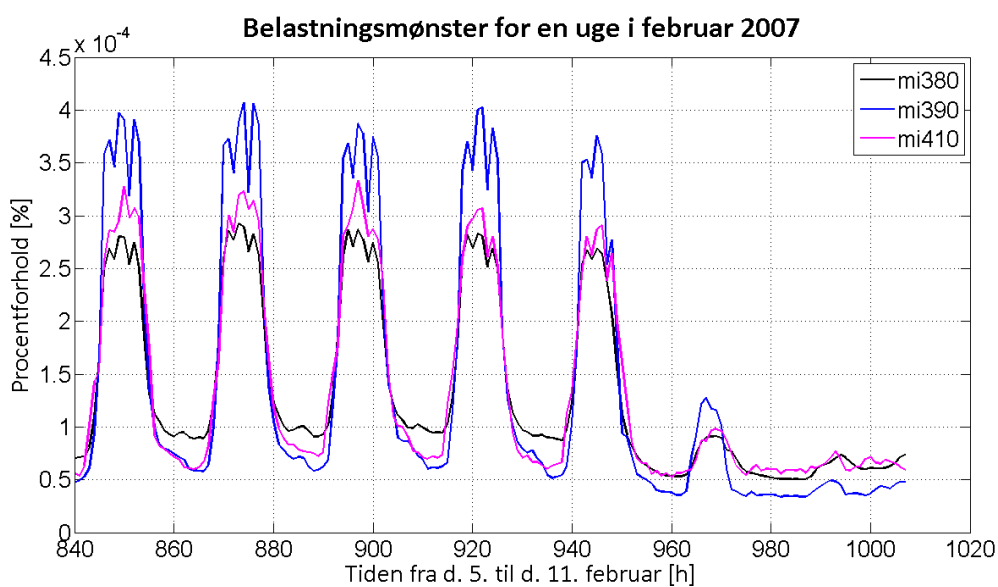
Figur 12.3 Belastningsmønster 7-9 af 30



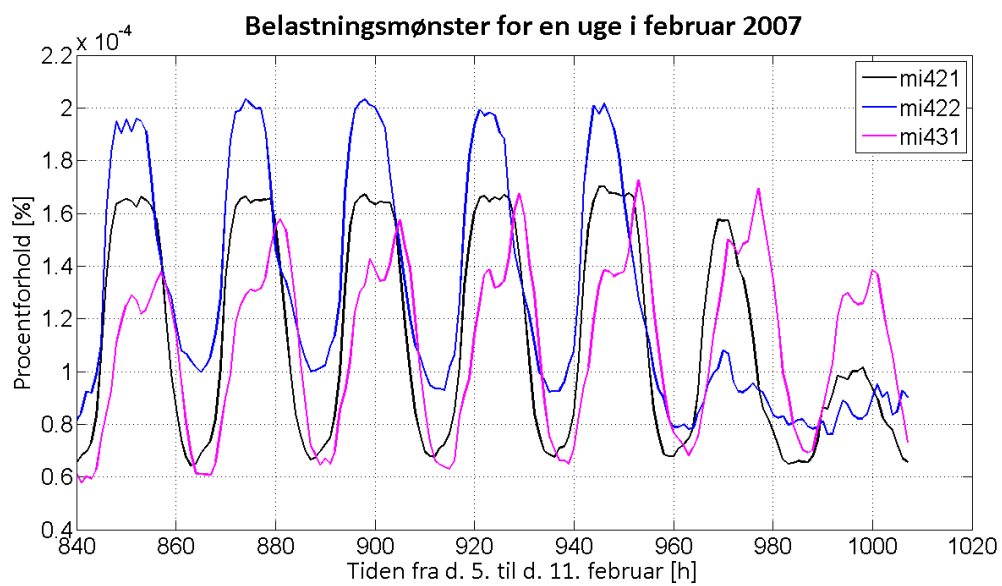
Figur 12.4 Belastningsmønster 10-12 af 30



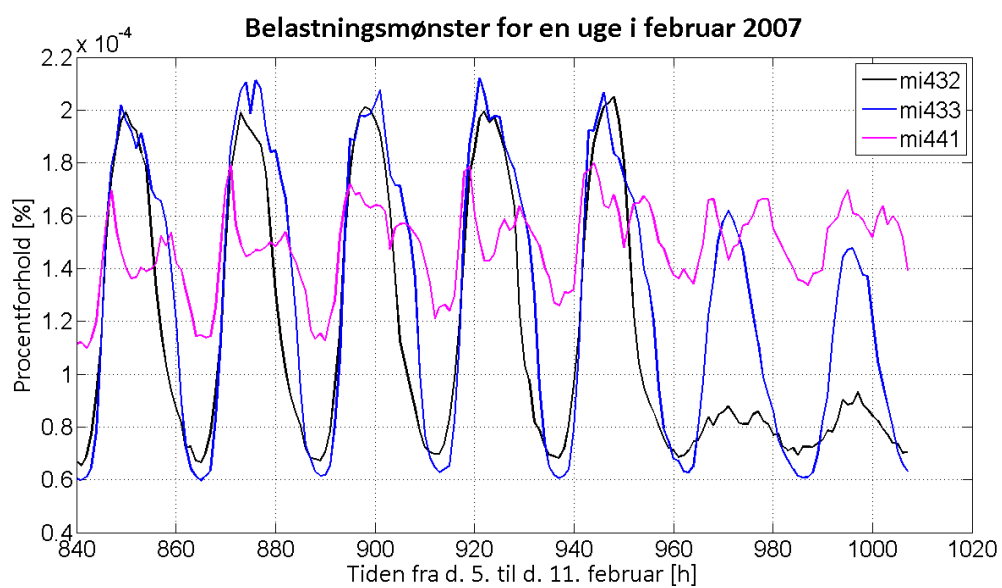
Figur 12.5 Belastningsmønstre 13-15 af 30



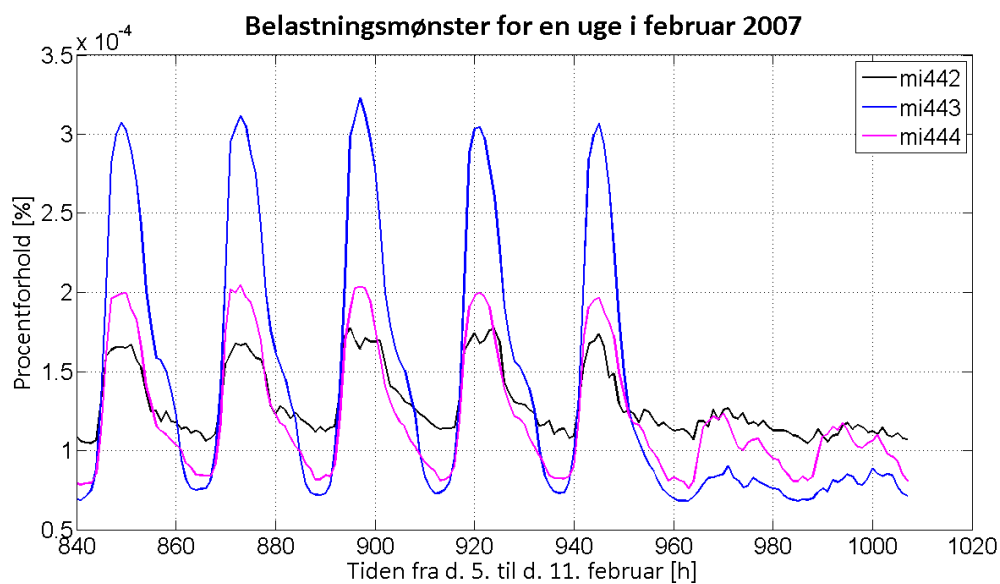
Figur 12.6 Belastningsmønstre 16-18 af 30



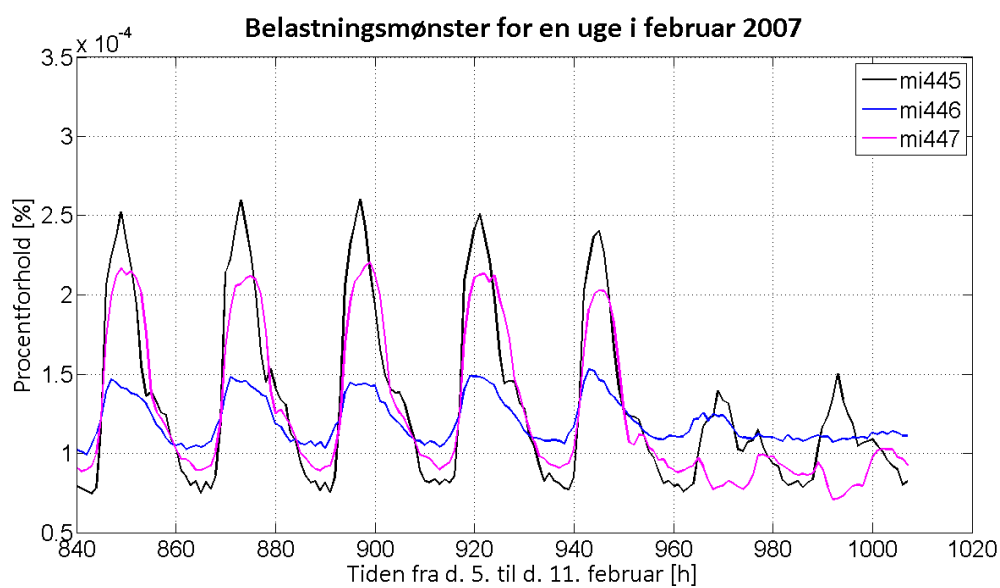
Figur 12.7 Belastningsmønster 19-21 af 30



Figur 12.8 Belastningsmønster 22-24 af 30



Figur 12.9 Belastningsmønstre 25-27 af 30



Figur 12.10 Belastningsmønstre 28-30 af 30



## 13 Appendiks 4

Alle efterfølgende viste resultater er beregnet med det udarbejdede referencesystem, og beregningerne er udført med de kombinationer, som er vist i Tabel 6.4. Endvidere er alle kombinationer med intelligent styring foretaget flere gange og er derfor gennemsnitsværdier. For at overskueliggøre resultaterne samles de i fire tabeller et for hvert system. Det bedste resultat for hvert af disse systemer er fremhævet. Alle beregningerne er baseret på målte udvendige temperaturdata fra Støvring 2012, solindfald fra vejrstation på Aalborg Universitet 2012 og spotmarkedspriser fra 2012.

	Resultater for referencesystemet med tank og uden intelligent styring				
Beskrivelse	Temp. rum	Min. temp.	Maks temp.	Årlig effekt	Kostpris
Enheder	[°C]	[°C]	[°C]	[KWh]	[DDK]
<b><u>Sp21/T70</u></b>	<b><u>21,53</u></b>	<b><u>20,65</u></b>	<b><u>24,16</u></b>	<b><u>8.813</u></b>	<b><u>2.434</u></b>
Sp23/T70	23,50	22,67	26,03	8.906	2.480
Sp25/T70	25,48	24,69	27,93	9.062	2.559
Sp21/T75	21,53	20,65	24,16	8.869	2.453
Sp23/T75	23,50	22,67	26,03	8.932	2.451
Sp25/T75	25,48	24,69	27,93	9.068	2.507
Sp21/T80	21,53	20,65	24,16	8.891	2.516
Sp23/T80	23,50	22,67	26,03	8.963	2.543
Sp25/T80	25,48	24,69	27,93	9.110	2.578

Tabel 13.1 Beregninger fra system nr. 1

	Resultater for referencesystemet med tank og med intelligent styring				
Beskrivelse	Temp. rum	Min. temp.	Maks temp.	Årlig effekt	Kostpris
Enheder	[°C]	[°C]	[°C]	[KWh]	[DDK]
<i>Sp21/T70</i>	21,46	19,16	24,50	8.501	2.303
<i>Sp23/T70</i>	23,44	21,15	26,48	8.582	2.319
<i>Sp25/T70</i>	25,41	23,21	28,38	8.719	2.338
<i>Sp21/T75</i>	21,45	18,88	24,51	8.569	2.253
<i>Sp23/T75</i>	23,44	21,16	26,43	8.634	2.264
<i>Sp25/T75</i>	25,42	23,19	28,39	8.776	2.286
<i>Sp21/T80</i>	21,46	19,11	24,50	8.637	2.194
<b><u>Sp23/T80</u></b>	<b><u>23,43</u></b>	<b><u>20,85</u></b>	<b><u>26,44</u></b>	<b><u>8.718</u></b>	<b><u>2.197</u></b>
<i>Sp25/T80</i>	25,41	23,16	28,36	8.853	2.220

Tabel 13.2 Beregninger fra system nr. 2

	Resultater for referencesystemet uden tank og uden intelligent styring				
Beskrivelse	Temp. rum	Min. temp.	Maks temp.	Årlig effekt	Kostpris
Enheder	[°C]	[°C]	[°C]	[KWh]	[DDK]
<b><u>Sp21/T70</u></b>	<b><u>21,53</u></b>	<b><u>20,65</u></b>	<b><u>24,16</u></b>	<b><u>5.696</u></b>	<b><u>1.601</u></b>
<i>Sp23/T70</i>	23,50	22,67	26,03	5.787	1.608
<i>Sp25/T70</i>	25,48	24,69	27,93	5,932	1.637
<i>Sp21/T75</i>	21,53	20,65	24,16	5.741	1.612
<i>Sp23/T75</i>	23,50	22,67	26,03	5.831	1.622
<i>Sp25/T75</i>	25,48	24,69	27,93	5.969	1.649
<i>Sp21/T80</i>	21,53	20,65	24,16	5.779	1.627
<i>Sp23/T80</i>	23,50	22,67	26,03	5.869	1.639
<i>Sp25/T80</i>	25,48	24,69	27,93	6.016	1.668

Tabel 13.3 Beregninger fra system nr. 3

	Resultater for referencesystemet uden tank og med intelligent styring				
Beskrivelse	Temp. rum	Min. temp.	Maks temp.	Årlig effekt	Kostpris
Enheder	[°C]	[°C]	[°C]	[KWh]	[DDK]
<b><u>Sp21/T70</u></b>	<b><u>21,46</u></b>	<b><u>19,16</u></b>	<b><u>24,43</u></b>	<b><u>5.358</u></b>	<b><u>1.497</u></b>
<i>Sp23/T70</i>	23,44	21,16	26,42	5.441	1.510
<i>Sp25/T70</i>	25,42	23,17	28,43	5.571	1.536
<i>Sp21/T75</i>	21,46	19,15	24,51	5.398	1.508
<i>Sp23/T75</i>	23,44	21,19	26,43	5.474	1.515
<i>Sp25/T75</i>	25,42	23,22	28,45	5.604	1.544
<i>Sp21/T80</i>	21,46	19,11	24,47	5.441	1.517
<i>Sp23/T80</i>	23,43	20,84	26,40	5.517	1.529
<i>Sp25/T80</i>	25,42	23,16	28,37	5.645	1.551

Tabel 13.4 Beregninger fra system nr. 4

## 14 Litteraturliste

1. **Klima-, Energi- og Bygningsministeriet.** Energiaftalen i korte træk. [Online] [Citeret: 21. 05 2013.] <http://www.ens.dk/sites/ens.dk/files/politik/dansk-klima-energipolitik/politiske-aftaler-paa-energiomraadet/energiaftalen-22-marts-2012/Faktaark%201%20Energiaftalen%20kort%20fortalt.pdf>.
2. **Energinet.dk og Dansk Energi.** *Smart Grid i Danmark*. s.l. : Energinet.dk og Dansk Energi, 2010.
3. **Energianalyse, Ea.** *Kortlægning af potentialet for fleksibelt elforbrug i industri, handel og service*. København K : Ea Energianalyse, 2011.
4. **Klima-, Energi- og Bygningsministeriet.** *Smart Grid Strategi*. 1470 København K : Klima-, Energi- og Bygningsministeriet, 2013.
5. **Energinet.dk.** *Fra vindkraft til varmepumper*. Fredericia : Energinet.dk, Juli 2012.
6. **Energistyrelsen.** *Energistatistik 2011*. 1256 København K : Energistyrelsen, 2012.
7. **Rambøll.** *Status og plan for varmeforsyning I*. 9000 Aalborg : Rambøll, Oktober 2010.
8. **Statistik, Danmark.** *Boligopgørelse 1. januar 2011*. København : Danmark Statistik, august 2011. ISSN 0106-9799.
9. **Claus M. Hvenegaard, Otto Paulsen, Hans Andersen, Jørn Borup Jensen.** *Den lille blå om Varme*. s.l. : Dansk Energi, 2008. ISBN 978-87-91326-00-4.
10. **Toeke Rammer Nielsen, Svend Svendsen.** *Harmonisering af grundlaget for beregning af energitilskud fra vinduer*. København : BYG DTU, 2003. ISSN 1393-402x.
11. **A/S, Broen.** [www.broen.dk](http://www.broen.dk). *Broen, Intelligent Flow Solutions*. [Online] Broen A/S. [Citeret: 8. Juli 2013.] <http://www.broen.dk/Sitertools/~media/ProductBase/BI/Dokumentation/Varmeinstallationer-info.ashx>.
12. **Rose, Jørgen.** *Model for adfærdens effekt for energiforbruget*. København SV : Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet, 2013. ISBN 978-87-92739-21-6.
13. **Clara Verhelst, David Degrauwe, Filip Logist, Jan Van Impe, Lieve Helsen.** Multi-objective optimal control of air-to-water heat pump for residential heating. *Tsinghua University Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg*. 2011, Årg. 5, 3.
14. **Saadat, Hadi.** *Power System Analysis, 3. Edition*. s.l. : PSA Publishing, 2010. ISBN: 978-0-9845438-0-9.
15. **Energistyrelsen.** *Danmarks Energifremskrivning 2012*. 1256 København K : Energistyrelsen, 2012. ISBN: 978-87-7844-941-2.
16. **Formel.dk.** [Formel.dk](http://www.formel.dk). *Formel*. [Online] 2001. [Citeret: 5. Juni 2013.] <http://www.formel.dk/solen/deklinationen.htm>.
17. **Cengel, Yunus A., Turner, Robert H. og Cimbala, John M.** *Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences*. New York : McGraw-Hill, 2008. ISBN: 978-007-126631-4.

