

# Modellering af Investeringer i Elsektoren

Jesper Felstedt

&

Morten Middelboe Pedersen

LYNGBY 2005  
EKSAMENSPROJEKT  
NR. 31

**IMM**

Polyteknisk eksamensprojekt, 35 ECTS point  
Informatik og Matematisk Modellering  
Danmarks Tekniske Universitet  
April 2005

# Resumé

Dette polytekniske eksamensprojekt omhandler modellering af investeringer i en liberaliseret kraftvarmesektor (elsektor). I rapporten præsenteres kort den økonomiske teori, som anvendes på et dereguleret marked med fuldkommen konkurrence. Der redegøres for, hvordan investeringer nutidsvurderes, og at et krav til en god investering er, at  $NPV$ -værdien, som beskriver investeringens nutidsværdi, skal være positiv. Der redegøres for de elementer, som skal indgå i beregningen af  $NPV$ -værdien for en investering.

På baggrund af dette formuleres en simpel lineær partiel ligevægtsmodel med mulighed for investeringer, som modellerer udbud og efterspørgsel i kraftvarmesektoren. Det bevises vha. KKT-betingelser, hvilke forudsætninger, som skal være opfyldt for at denne model foretager investeringer, med positiv  $NPV$ -værdi.

Dette anvendes til forbedre modelleringen af investeringer i den partielle ligevægtsmodel Balmorel, som benyttes til at simulere en liberaliseret kraftvarmesektor.

Endelig undersøges effekten af forbedringerne, og den udvidede Balmorel anvendes til et lille case study af investeringer i Litauen.

## Nøgleord:

$NPV$ -værdi, investeringer i kraftvarmesektoren, Balmorel, partielle ligevægtsmodeller, neoklassisk økonomisk modellering, Lineær programmering og KKT-betingelser.



# Abstract

This master thesis concerns the area of modelling investments in a liberalized combined heat and power sector (CHP sector). The thesis shortly presents the economic theory, which describes a deregulated market with perfect competition. It is presented which parameters are used when calculating the net present value (*NPV*) of an investment, and that investments are only undertaken if the *NPV* is positive.

This is used to formulate a simple linear, partial equilibrium model, describing the CHP sector, with the possibility of investments. Using KKT-conditions it is proved, which necessary conditions the model has to fulfill, in order for the *NPV* of investments found by the model, to be positive.

The knowledge from the simple model is used to improve the modelling of investments in the partial equilibrium model, Balmorel, which is used to simulate a liberalized CHP sector.

Finally the effects of the improvements are investigated, and the improved Balmorel is used in a small case study of investments in Lithuania.

## **Keywords:**

Net present value *NPV*, investments in the combined heat and power sector, Balmorel, partial equilibrium models, neoclassical economic modelling, Linear programming and KKT-conditions.



# Forord

Dette polytekniske eksamensprojekt er udført på Institut for Informatik og Matematisk Modellering, Danmarks Tekniske Universitet i perioden 1. september 2004 til 30. april 2005. Projektet omhandler modellering af investeringer i en liberaliseret kraftvarmesektor.

Vores baggrund for at udføre projektet er en civilingeniøruddannelse, hvor vi gennem en lang række kurser har beskæftiget os med matematisk modellering og diskret optimering på det operationelle niveau. Vi havde således kun meget lidt kendskab til økonomisk teori og økonomisk modellering inden vi påbegyndte projektførløbet. Desuden havde vi ingen forhåndskendskab til teknologier og planlægning indenfor kraftvarmesektoren. En stor del af projektførløbet er således gået med at lære disse emner. Processen har derfor været meget interessant og lærerig på mange andre områder indenfor økonomi og energisektoren end de, som direkte berøres i denne rapport.

Rapporten er skrevet til personer med generelt kendskab til operationsanalyse og herunder lineær programmering. For at forstå indholdet er det ikke en nødvendig forudsætning af have et dybere kendskab til energisektoren og økonomisk teori.

Vejledere på projektet var Thomas K. Stidsen, adjunkt, IMM og Hans Ravn, leder af Balmorel projektgruppen. Vi vil gerne takke Thomas K. Stidsen for hans få, men meget hjælpsomme diskussioner omkring modellering i GAMS. Vi vil også gerne takke Hans Ravn for hans mange diskussioner omkring økonomi, Balmorel, kraftvarmesektoren samt hans kommentarer i forbindelse med udarbejdelse af denne rapport.

Jesper Felstedt, s992273,  
Morten Middelboe Pedersen, s991392,  
IMM, DTU, 27. april 2005.





# Indhold

<b>1</b>	<b>Indledning</b>	<b>21</b>
1.1	Problemformulering . . . . .	22
1.2	Oversigt over rapporten . . . . .	23
<b>2</b>	<b>Økonomiske forudsætninger</b>	<b>25</b>
2.1	Prisdannelse . . . . .	26
2.2	Kortsigtede og langsigtede marginale omkostninger . . . . .	27
2.3	Investeringer . . . . .	28
2.3.1	Levetid og finansiering . . . . .	29
2.3.2	Diskonteringsrente og risiko . . . . .	29
2.3.3	Skrotværdi . . . . .	31
2.4	Opsummering . . . . .	31
<b>3</b>	<b>Energitransformation, efterspørgsel og priser</b>	<b>33</b>
3.1	Enheder . . . . .	33
3.2	Lastperioder . . . . .	33
3.3	Varighedskurver . . . . .	34
3.4	Teknologier . . . . .	35
3.4.1	Dampturbiner . . . . .	36
3.4.2	Gasturbineanlæg . . . . .	37
3.4.3	Combined cycle . . . . .	37
3.4.4	Motoranlæg . . . . .	38
3.4.5	Varmekedler . . . . .	38
3.4.6	Vandkraft . . . . .	38
3.4.7	Vindkraft . . . . .	39
3.4.8	Solenergi . . . . .	39
3.4.9	Atomkraft . . . . .	39
3.5	Gruppering af teknologier . . . . .	40
3.6	Omkostninger og priser i kraftvarmesektoren . . . . .	41
3.7	Opsummering . . . . .	42
<b>4</b>	<b>Partiel ligevægtsmodel for kraftvarme</b>	<b>45</b>
4.1	En simpel model . . . . .	45
4.2	Udvidet kraftvarme model . . . . .	50
4.2.1	Marginale omkostninger og investeringer . . . . .	53
4.3	Opsummering . . . . .	54

<b>5 Balmorel</b>	<b>57</b>
5.1 Input . . . . .	59
5.1.1 Tid . . . . .	59
5.1.2 Geografi . . . . .	60
5.1.3 Efterspørgsel . . . . .	61
5.1.4 Primærenergi . . . . .	62
5.1.5 Teknologier . . . . .	62
5.1.6 Investeringer . . . . .	68
5.2 Modellen . . . . .	68
5.3 Simuleringsstruktur . . . . .	71
5.4 Output . . . . .	71
5.5 Opsummering . . . . .	72
<b>6 Udvidelse af Balmorel</b>	<b>75</b>
6.1 Udvidelse af Input . . . . .	76
6.1.1 Teknologier . . . . .	76
6.1.2 Transmissionsforbindelser . . . . .	76
6.1.3 Geografi . . . . .	76
6.2 Udvidelse af Modellen . . . . .	77
6.2.1 Liste over betegnelser . . . . .	77
6.2.2 Investeringer . . . . .	79
6.2.3 Tilbagediskontering . . . . .	82
6.2.4 Diskrete investeringer . . . . .	83
6.2.5 Den udvidede model opsummeret . . . . .	84
6.2.6 <i>NPV</i> -værdi og fortolkning af priser . . . . .	86
6.3 Udvidelse af Simuleringsstruktur . . . . .	87
6.4 Opsummering . . . . .	90
<b>7 Resultater</b>	<b>93</b>
7.1 Data . . . . .	93
7.2 Verifikation af den udvidede Balmorel . . . . .	94
7.2.1 Modellernes størrelse . . . . .	95
7.2.2 Modellernes løsning . . . . .	95
7.3 Løsningstidsanalyse . . . . .	98
7.4 Længere modelhorisont . . . . .	100
7.4.1 Horisontens indflydelse på prisudviklingen for el . . . . .	101
7.5 Ikke sammenhængende modelhorisont . . . . .	103
7.6 Diskrete investeringer . . . . .	106
7.7 Levetid på investeringer og skrotværdi . . . . .	108
7.8 Tilbagediskontering . . . . .	109
7.8.1 Samfundsøkonomisk analyse - Fast lånerente . . . . .	109
7.8.2 Virksomhedsanalyse - Ens diskonterings- og lånerente . . . . .	111
7.9 Opsummering . . . . .	113
<b>8 Case study: Investeringer i Litauen</b>	<b>115</b>
8.1 Efterspørgsel . . . . .	115
8.2 Eksisterende kapacitet . . . . .	116
8.3 Simulering med den oprindelige Balmorel . . . . .	116
8.4 Simulering med den udvidede Balmorel . . . . .	117
8.5 Sammenligning af den oprindelig og den udvidede Balmorel . . . . .	119

8.6	Simulering med udvidede Balmorel uden mulighed for investering i atomkraft . . . . .	119
8.7	Elpriser . . . . .	120
8.8	Opsummering . . . . .	121
<b>9</b>	<b>Konklusion</b>	<b>123</b>
<b>A</b>	<b>LP formulering af den oprindelige model i Balmorel</b>	<b>129</b>
A.1	Definition af indeks . . . . .	129
A.2	Definition af mængder . . . . .	130
A.3	Definition af variable . . . . .	131
A.4	Definition af konstanter . . . . .	132
A.5	Objektfunktionen . . . . .	133
A.6	Begrænsninger . . . . .	136
A.6.1	. . . . .	136
A.6.2	. . . . .	136
A.6.3	. . . . .	136
A.6.4	. . . . .	136
A.6.5	. . . . .	136
A.6.6	. . . . .	137
A.6.7	. . . . .	137
A.6.8	. . . . .	137
A.6.9	. . . . .	137
A.6.10	. . . . .	138
A.6.11	. . . . .	138
A.6.12	. . . . .	138
A.6.13	. . . . .	138
A.6.14	. . . . .	139
A.6.15	. . . . .	139
A.6.16	. . . . .	139
A.6.17	. . . . .	139
A.6.18	. . . . .	140
A.6.19	. . . . .	140
A.6.20	. . . . .	140
A.6.21	. . . . .	140
A.6.22	. . . . .	140
A.6.23	. . . . .	141
A.6.24	. . . . .	141
A.6.25	. . . . .	141
A.6.26	. . . . .	141
A.6.27	. . . . .	142
A.6.28	. . . . .	142
<b>B</b>	<b>LP formulering af den udvidede model i Balmorel</b>	<b>143</b>
B.1	Nye index . . . . .	143
B.2	Nye mængder og delmængder . . . . .	143
B.3	Nye konstanter . . . . .	144
B.4	Variable . . . . .	145
B.5	Objektfunktionen . . . . .	146
B.6	Modellens begrænsninger . . . . .	148

B.6.1	(A.6.1)	148
B.6.2	(A.6.2)	149
B.6.3	(A.6.3)	149
B.6.4	(A.6.4)	149
B.6.5	(A.6.5)	149
B.6.6	(A.6.6)	149
B.6.7	(A.6.7)	150
B.6.8	(A.6.8)	150
B.6.9	(A.6.9)	150
B.6.10	(A.6.10)	150
B.6.11	(A.6.11)	151
B.6.12	(A.6.12)	151
B.6.13	(A.6.13)	151
B.6.14	(A.6.14)	151
B.6.15	(A.6.15)	152
B.6.16	(A.6.16)	152
B.6.17	(A.6.17)	152
B.6.18	(A.6.18)	152
B.6.19	(A.6.19)	153
B.6.20	(A.6.20)	153
B.6.21	(A.6.21)	153
B.6.22	(A.6.22)	153
B.6.23	(A.6.23)	154
B.6.24	(A.6.24)	154
B.6.25	(A.6.25)	154
B.6.26	(A.6.26)	154
B.6.27	(A.6.27)	154
B.6.28	(A.6.28)	155
B.7	Nye begrænsninger	155
B.7.1		155
B.7.2		155
B.7.3		155
B.7.4		156
B.7.5		156
B.7.6		156
B.7.7		156
B.7.8		156
B.7.9		156
<b>C</b>	<b>Data</b>	<b>157</b>
<b>D</b>	<b>Oversigt over udvidelser i GAMS-koden</b>	<b>161</b>
D.1	Model	161
D.1.1	balmorel_inv.gms	161
D.1.2	balbase2_inv.sim	163
D.1.3	geogr.inc	163
D.1.4	mjvar2.inc	163
D.1.5	sets.inc	163
D.1.6	TECH2.INC	164
D.2	Printinc	164

D.2.1	BAL_1.INC	164
D.2.2	EG_CY.INC	164
D.2.3	EG_GAT.INC	164
D.2.4	EGN_CY.INC	164
D.2.5	EGO_CY.INC	164
D.2.6	EHF_CY.INC	164
D.2.7	EHF_RY.INC	165
D.2.8	EP_RT.INC	165
D.2.9	EP_RY.INC	165
D.2.10	EX_RY.INC	165
D.2.11	GKN_AY.INC	165
D.2.12	HG_AY.INC	165
D.2.13	HG_CY.INC	165
D.2.14	PRT3-BB2.INC	165
D.2.15	XBOTTLE.INC	166
D.2.16	GK_MMP_AY.INC	166
D.3	Logerror	166
D.3.1	BALBASE2.MSS	166
D.3.2	ERROR3.INC	166
D.3.3	ERROR4.INC	166
D.3.4	error5.inc	166
<b>E</b>	<b>Oversigt - filer på CD</b>	<b>167</b>



# Figurer

2.1	Prisen dannes ud fra ligevægt mellem udbud og efterspørgsel [8]. . . . .	27
3.1	Gennemsnitsforbruget pr. time af el i Danmark 04.03.2005 [6]. . . . .	34
3.2	Varighedskurve over elforbruget i ugen fra 04.03.2005 til 10.03.2005 i Danmark. [6]. . . . .	35
3.3	Grafen til venstre viser produktionsmønsteret for de teknologier som producerer el og varme i et fast forhold. Grafen til højre viser produktionsmønsteret for de teknologier som producerer el og varme i et variabelt forhold. . . . .	35
3.4	Procesdiagram over kondensanlæg. . . . .	36
3.5	Procesdiagram over modtryksanlæg. . . . .	37
3.6	Procesdiagram over udtagsanlæg. . . . .	37
3.7	Procesdiagram over combined cycle. . . . .	38
3.8	Procesdiagram over varmekedel. . . . .	39
3.9	Eksempel på konstruktion af total omkostning og udbudskurve ud fra teknologiers individuelle omkostningskurver. . . . .	42
3.10	Eksempel på brug af varighedskurven. . . . .	43
4.1	Eksempel på udbudskurven fra eksemplet i afsnit 3.6 når det tillades at investere i produktionskapacitet. Kortsigtede omkostninger er sammenhængende linier. Langsigtede omkostninger er stiplede. <i>F.</i> eks. ses at den langsigtede omkostning for <i>M</i> er mindre end den kortsigtede for <i>S</i> . En optimal løsning er derfor at investere i <i>M</i> fremfor at producere på <i>S</i> . <i>M</i> 's langsigtede marginale omkostning vil være prissættende i spidslast. <i>M</i> 's kortsigtede i de øvrige perioder. Hvis det ikke er muligt at opfylde hele efterspørgslen ved investering i <i>M</i> , vil <i>S</i> også producere. <i>S</i> 's kortsigtede omkostning vil da være prissættende. Hvis <i>S</i> 's kapacitet opbruges vil modellen investere i <i>G</i> , da <i>G</i> 's langsigtede marginale omkostninger er mindre end <i>S</i> . . . . .	54
5.1	Balmorel datasættet dækker landene omkring Østersøen: Danmark, Norge, Sverige, Finland, (dele af) Rusland, Estland, Letland, Litauen, Polen og (dele af) Tyskland. . . . .	58
5.2	Inputelementer til Balmorel. . . . .	59
5.3	Geografiindelingen og transmission i Balmorel [2]. . . . .	60
5.4	I Balmorel findes ligevægten mellem den modellerede udbudskurve og en repræsentation for efterspørgselskurven. . . . .	61

5.5	Graf over mulige produktionsmønstre for kondensanlæg. . . . .	63
5.6	Graf over mulige produktionsmønstre for modtryksanlæg. . . . .	63
5.7	Graf over mulige produktionsmønstre for udtagsanlæg. . . . .	64
5.8	Graf over mulige produktionsmønstre for varmekedler. . . . .	64
5.9	Graf over mulige produktionsmønstre for varmepumper. . . . .	65
5.10	Grafer over mulige produktionsmønstre for el- og varmelagre. El-lageret er grafen til venstre. . . . .	65
5.11	Grafen viser, hvordan vindkraft, vandkraft og solenergi producerer. Prikken angiver den på forhånd fastlagte produktionen. . . . .	66
5.12	Navnekonvention for teknologier i det nuværende datasæt.[27] . . . . .	66
5.13	Flowdiagram over Balmorel. . . . .	73
6.1	Den årlige mængde skrottet kapacitet findes som differencen mellem totale endogen kapacitet korrigeret for skrottet kapacitet i det forgående år og endogen kapacitet korrigeret for skrottet kapacitet i det nuværende år overført fra forgående år. En eventuel ny investering foretaget i det nuværende år indgår ikke beregningerne. Der ses bort fra skrotning af exogen kapacitet, da det ikke påvirker løsningen at indføre skrotværdi på dette. . . . .	80
6.2	Illustration af forskellige horisonter. . . . .	88
6.3	Simuleringshorisont på 10 år med 1 årig modelhorisont, hvilket svarer til den oprindelige model. . . . .	88
6.4	Simuleringshorisont 10 år med 5 årig modelhorisont og årsafstand 1, 1, 1, 1. . . . .	89
6.5	Simuleringshorisont på 10 år med 4 årig modelhorisont og årsafstand på hhv. 1, 2, 3 år. . . . .	89
6.6	Simuleringshorisont på 10 år med fuld horisont. . . . .	89
6.7	Flowdiagram over den nye simuleringsstruktur i den udvidede Balmorel. . . . .	90
7.1	Graf over det totale variation for hver tidsperiode på efterspørgslen. . . . .	94
7.2	Årlige produktion pr. land og teknologi fundet af den oprindelige Balmorel og de 2 kørsler af den udvidede Balmorel. . . . .	97
7.3	Grafer over hhv. Cplex løsningsetid og Gams generation tid for den oprindelige Balmorel, den udvidede Balmorel med modelhorisont 1 og den udvidede model med fuld horisont. . . . .	99
7.4	Udviklingen af den totale løsningsetid ved forskellige modelhorisonter. . . . .	100
7.5	Samlede investeringer (MW) i hhv. el og varme . . . . .	101
7.6	Prisudviklingen for el. . . . .	102
7.7	Samlede investeringer med horisont på 4 år, ved forskellig årsafstande, for Danmark, Norge og Sverige. . . . .	104
7.8	Samlede investeringer med horisont på 4 år, ved forskellig årsafstande, for Estland, Letland og Litauen. . . . .	105
7.9	Graf over informationerne i tabel 7.6. . . . .	107
7.10	Prisforløbet ved diskrete og relaxerede investeringer i DK 2005 - 2025, modelhorisonten er 1 år. . . . .	107



7.11	Endogen fundet kapacitet af HO-B0-NG i NO_S_Rural samt den totale mængde HO-B0-NG i NO_S_Rural fundet endogen med fuld modelhorisont. . . . .	108
7.12	Endogen fundet kapacitet af HO-B0-NG i NO_S_Rural samt den totale mængde HO-B0-NG i NO_S_Rural fundet endogen med en horisont på 5 med årsafstand 5. . . . .	109
7.13	Samlede investeringer år 2005 - 2025 ved forskellige diskonteringsrenter. . . . .	110
7.14	Prisudvikling 2005 - 2025 med en diskonteringsrente på hhv. 5% og 11% . . . . .	110
7.15	Investeringer 2005 - 2020 med en diskonteringsrente og lånerente på hhv. 5%, 8% og 11% . . . . .	111
7.16	Prisudviklingen 2005 - 2025 hvor diskonteringsrente og lånerente er sat til hhv. 5%, 8% og 11% . . . . .	112
8.1	Varighedskurve over efterspørgslen på el i Litauen år 2005. . . . .	116
8.2	Kapaciteter incl. investeringer foretaget med den oprindelige Balmorel. . . . .	117
8.3	Kapaciteter incl. investeringer foretaget med den udvidede Balmorel. . . . .	118
8.4	Kapaciteter incl. investeringer foretaget med den udvidede Balmorel uden mulighed for investering i atomkraft. . . . .	120
8.5	Prisudviklingen fra den oprindelige Balmorel samt de 2 kørsler med den udvidede Balmorel. . . . .	121



# Tabeller

3.1	Enheder som benyttes i kraftvarmesektoren. . . . .	33
3.2	Inddeling af tiden i lastperioder øst for Storebælt i Treledstariffen. [24] . . . . .	34
3.3	Teknologiernes egenskaber. *) Da primærenergierne er forureningsfri og gratis er virkningsgraderne ikke så vigtige . . . . .	40
3.4	Opsummering af teknologiernes overordnede økonomiske parametre. . . . .	41
7.1	Tabel over sammenslutningen af sæsoner. . . . .	94
7.2	Tabel over sammenslutningen af tider. . . . .	95
7.3	Tabel over forskellen problemstørrelse i oprindelige og den udvidede model i Balmorel. . . . .	96
7.4	Tabel over forskellen i objektfunction i oprindelige og udvidede Balmorel løst med dual simplex. . . . .	96
7.5	Tabel over forskellen i objektfunction i oprindelige og den udvidede Balmorel løst med primal simplex. . . . .	98
7.6	Tabel over forskellen mellem diskrete og relaxerede investeringer i DK 2005 - 2025, tidshorisonten er 1 år. . . . .	106
8.1	Tabel over eksisterende kapacitetet i Litauen. . . . .	117
C.1	Tabel over de informationer vi har tilføjet det nuværende datasæt.160	



# Kapitel 1

## Indledning

I Danmark var de første energiforsyningselskaber privatejede og uregulerede, men fra slutningen af forrige århundrede begyndte den tradition, som præger den danske energisektor i dag, nemlig at langt de fleste selskaber i både el-, gas- og varmesektoren er forbrugerejede andelsselskaber eller kommunale forsyningsvirksomheder. Frem til energikrisen i 70'erne var energi relativt billigt og behovet for beskyttelse af forbrugerne begrænset. Krisen i 70'erne og opmærksomheden omkring forsyningsmæssige problemer og senere opmærksomheden omkring miljømæssige aspekter af energiforbruget betød, at energien blev dyrere. Dette har ledt til energiprislove, som siden 70'erne har reguleret priserne på energi [19].

I Danmark har disse reguleringer haft en positiv funktion. Prisreguleringen har på kort sigt holdt energipriserne nede, og på længere sigt givet energiselskaberne mulighed for at tilrettelægge investeringer med fuld sikkerhed for finansiering via gunstige henlæggelses- og afskrivningsregler. Energiplanlægningen har bl.a. muliggjort en udbygning af både fjernvarmesystemer og naturgasnettet i store dele af Danmark, således at økonomien og energiudnyttelsen i disse net er præget af stordriftsfordele og af en høj og konstant udnyttelse af nettenes kapacitet [19].

En stor del af beslutningstagerne har imidlertid grund til at tro, at de samfundsmæssige mål og forbrugerbeskyttelsen fremover bedst sikres på en anden måde end hidtil. Derfor er det besluttet, at den danske energisektor skal liberaliseres. Årsagerne hertil er især, at energisystemerne i de omkringliggende lande i disse år liberaliseres (bl.a. styret af EU-direktiver), at fjernvarme- og naturgassystemerne er ved at være så udbyggede, at selskaberne på disse områder i princippet vil kunne klare sig i fri konkurrence, og at hvile-i-sig-selv princippet erfaringsmæssigt ikke i tilstrækkelig grad har givet incitamenter til effektivitetsforbedringer mv. [19]

Danmark er afhængig af udviklingen i de omkringliggende lande, fordi elforsyningen i landene omkring Østersøen er tæt forbundet. Strømafbrydelsen på Sjælland d. 23. september 2003 er et eksempel på dette. En fejl i Sverige betød pludselig kapacitetsmangel, som også gik ud over Sjælland. Desuden har energisektorerne i landene omkring Østersøen meget til fælles. De øvrige lande i Norden har haft prisreguleringsordninger meget lig de danske, mens lande i den

tidligere Sovjet Union har benyttet sig af andre former for prisregulering. Fælles for landene er, at energisektorene er blevet, eller skal, liberaliseres inden for de nærmeste år. Danmarks største elproducenter sælger idag deres produktion på markedsvilkår. I praksis vil det sige, at producentene er overgået til et system, hvor producenter og forbruger handler på et marked. Danmarks producenter byder ind på det fælles nordiske marked Nordpool<sup>1</sup>. Danmarks mindre elproducenter (ofte decentral kraftvarmeanlæg) kan, men skal ikke endnu, sælge deres produktion på markedsvilkår. Liberaliseringsprocessen i Danmark sker gradvis, og det er hensigten at alle producenter på sigt skal sælge på markedsvilkår.

Liberaliseringen betyder, at der opstår en række interessante spørgsmål. Hvordan opretholdes forsynings sikkerheden? I Sverige og Norge har liberaliseringen medført skrotning af en række kraftværker, som ikke var rentable, hvilket har givet en hvis bekymring for forsynings sikkerheden, da der ikke er opført nye produktionsenheder uden særlige tilskudsordninger [7]. Et andet område, der i de seneste år, har været stor fokus på, er miljøet. Der indgås aftaler mellem lande om sænkning af udledning af drivhusgasser, mest omtalt er nok Kyoto-aftalen<sup>2</sup>. Hvordan bliver sammenspillet med disse beslutninger i en liberaliseret elsektor? Og hvordan påvirker de prisen?

Liberalisering af energisektorerne og førnævnte spørgsmål, betyder at der er opstået et behov for effektive simulerings- og analyseværktøjer, som kan anvendes i analyser af en liberaliseret elsektor. Et værktøj, som er udviklet til dette formål, er Balmorel[1], som dette eksamensprojekt omhandler. En af mulighederne i Balmorel er, at modellen ud fra en mængde mulige teknologier, foretager investeringer. Måden det er modelleret på, er dog blevet kritiseret, fordi man i flere tilfælde har oplevet, at modellen foretager uhensigtsmæssige investeringer. Med udgangspunkt i disse problemer, er ideen til dette eksamensprojekt opstået, ved at udviklerne af Balmorel, gennem et stykke tid har haft et ønske om at forbedre og udvide modellens håndtering af investeringer.

## 1.1 Problemformulering

Formålet med eksamensprojektet er at forbedre håndteringen af investeringer i Balmorel. Der er to elementer i dette.

For det første foretages investeringer i den eksisterende Balmorel på en måde, der ikke sikrer en optimal sammenhæng over tid. På nuværende tidspunkt anvender Balmorel kun det år, som en investering foretages i, til at vurdere om den er gunstig. Herefter antages at situationen ikke bliver dårligere i de efterfølgende år. Denne antagelse er ikke tilstrækkelig, for selvom prisudvikling i ét

<sup>1</sup>Oprindelige Norsk elbørs ved navn "Statnett Marked" oprettet i 1993. I dag hedder børsen Nordpool og elproducenter, fra Danmark, Norge, Sverige og Finland sælger deres el på den [6].

<sup>2</sup>Aftale mellem verdens mere velstående industrilande, der i FN's Kyoto-protokol har forpligtet sig til at mindske deres udslip af klimagasser. Der er stor forskel på, hvor meget de forskellige lande skal gøre. Verdens fattige lande - udviklingslandene - er ikke omfattet af aftalen. På lang sigt er det dog hensigten, at også udviklingslandene skal påtage sig en forpligtelse. EU-landenes udslip skal være 8 pct. mindre i 2012 end i 1990. USA skal i følge aftalen skære 7 pct. væk, mens Japan og Canada skal mindske deres udslip af drivhusgasser med 6 pct [5].

år betyder at en investering giver overskud, er der i modellen ingen garanti for at denne udvikling fortsætter. Der er således ingen sikring af, at hvis en investering i dette år vurderes positivt, så vil det også vise sig at være en fornuftig investering set over en længere årrække.

For det andet er investeringsbeslutningerne i Balmorel, lige som modellen som helhed, repræsenteret ved lineære sammenhænge. Dette betyder, at størrelsen af et nyt kraftværk kan antage værdier inden for et interval. Imidlertid er dette ikke realistisk i praksis. Forskellige typer af kraftværker leveres i bestemte størrelser, eller i hvert fald inden for typiske størrelser.

I eksamensprojektet undersøges det, hvorledes Balmorel-modellen kan forbedres på disse to punkter, og der udvikles en modelversion, der indeholder disse elementer.

## 1.2 Oversigt over rapporten

I kapitel 2 overvejes, hvilken økonomisk teori, som kan anvendes på et dereguleret elmarked, og hvilken økonomisk teori, som anvendes på investeringer.

I kapitel 3 introduceres og forklares i korte træk nogle af de mest udbredte teknologier, som benyttes til el- og varmeproduktion i kraftvarmesektoren. Der redegøres for, hvordan deres økonomiske parametre såsom produktionsomkostninger og investeringsomkostninger er i forhold til hinanden. Desuden introduceres begreber fra kraftvarmesektoren. Detaljeringsniveauet er her valgt, så det er afstemt efter den modellering, der findes i Balmorel (som er beskrevet i afsnit 5.2). Kapitlet afsluttes med simpelt eksempel, der illustrerer sammenspillet mellem efterspørgsel, teknologier og priser i kraftvarmesektoren.

Efter således at have beskrevet de økonomiske og teknologiske byggesten for arbejdet udvikles i kapitel 4 en partiel ligevægtsmodel for udbud og efterspørgsel i kraftvarmesektoren. Modellen vil på matematisk form, ligge til grund for den forbedrede håndtering af investeringer i Balmorel. Kapitlet afsluttes med en redegørelse for, hvilke forudsætninger modellen skal opfylde, for at der foretages fornuftige investeringer, samt en redegørelse for fortolkningerne af skyggepriser.

I kapitel 5 beskrives den oprindelige Balmorel. I kapitel 6 beskrives udvidelsen af Balmorel på baggrund af beskrivelsen af den matematiske model i kapitel 4 og den oprindelige Balmorel i kapitel 5.

I kapitel 7 verificeres det, at modellen fungerer efter hensigten, og effekterne af udvidelserne undersøges. Endelig vises det i kapitel 8 ved et lille case study af investeringer i Litauen, at den udvidede Balmorel giver forbedrede resultater i forhold til den oprindelige Balmorel. Dette er interessant, bl.a. fordi der netop er udført en tilsvarende analyse med Balmorel [30].

I Kapitel 9 opsummeres resultaterne og konklusionen på projektet præsenteres.





## Kapitel 2

# Økonomiske forudsætninger

I dette afsnit præsenteres de økonomiske begreber, som den øvrige del af projektet baserer sig på. Hvis læseren af denne rapport kender til *neoklassisk økonomisk teori*<sup>1</sup>, og kender de begreber, der opereres med i forbindelse med investeringsovervejelser, vil læseren være bekendt med en stor del af informationerne i dette afsnit.

Økonomien beskrives ud fra aktørenes opførsel. Det antages at alle aktører handler rationelt, hvilket vil sige at de altid søger at øge deres egen gevinst. Udbydere på markedet vil således altid maksimere deres *profit*, der defineres som indtægter fratrukket udgifter. Forbrugerne vil maksimere deres *nytte*, som er et udtryk for den gevinst forbrugerne opnår ved at købe varerne. Derudover antages det, at *økonomien er fri*. Det vil sige intet i økonomien, herunder også aktørenes opførsel, reguleres direkte. Reguleringsmekanismer i form af skatter, afgifter og tilskud kan forekomme, men skal være fælles for alle aktører. Dette projekt omhandler investeringer i en liberaliseret elsektor, så med mindre andet er nævnt antages det at økonomien er fri.

Et begreb i neoklassisk økonomi er *markedsmekanismen*. Et *marked* er det sted forbrugere og udbydere (producenter, importører eller lign.) hhv. køber og sælger varer. Et marked kan defineres som et netværk mellem købere og sælgere, der alle er bekendte med de almindelige handelsbetingelser [8]. I det følgende antages at markedet er frit, hvilket vil sige, at den pris på en vare, som forbruger og udbyder bliver enige om, ikke reguleres f. eks. fra politisk side. Prisdannelsen på et frit marked sker på baggrund af udbudet på markedet og forbrugernes efterspørgsel. Hvis der findes flere udbydere på et marked, og der ikke findes indbyrdes aftaler mellem udbydere som f. eks. karteldannelse siges markedet at være i *fuldkommen konkurrence*. I det følgende antages at betingelserne for at et marked er i fuldkommen konkurrence altid er opfyldt. For at beskrive udbyderopførsel og forbrugeropførsel anvendes begreberne *udbudskurve* og *efterspørgselskurve*.

Udbudskurven for et marked viser mængden af en vare, udbydere er villige til at producere til forskellige priser. Kurven er voksende, således ved en lav

---

<sup>1</sup>Indenfor økonomisk teori findes forskellige opfattelser og traditioner. Yderligere information kan f. eks. findes i [8].

pris udbydes en lille mængde, og ved en høj pris udbydes en større mængde (se figur 2.1). Et markedes udbudskurve er sammensat af udbydernes individuelle udbudskurver. [8]

Efterspørgselskurven for et marked viser mængden af en vare, forbrugerne er villige til at aftage ved forskellige priser. Jo lavere prisen på varen er, desto større mængde af varen er forbrugerne villige til at aftage. Derfor er efterspørgselskurven en aftagende kurve (se figur 2.1). For at beskrive efterspørgselskurver anvendes *elasticiteter*. Der findes forskellige typer elasticiteter<sup>2</sup>, som anvendes ved forskellige problemstillinger. I denne rapport anvendes udelukkende *priselasticiteten* (også kaldt *egenpriselasticiteten*). Priselasticiteten er et mål for, hvor følsom efterspørgslen på en vare er, med hensyn til prisændringer. Sammenhængen mellem efterspørgselskurven for en vare og priselasticiteten for varen findes vha. følgende udtryk [8]:

$$e_p = \frac{\frac{\Delta x}{x}}{\frac{\Delta p}{p}} \quad (2.1)$$

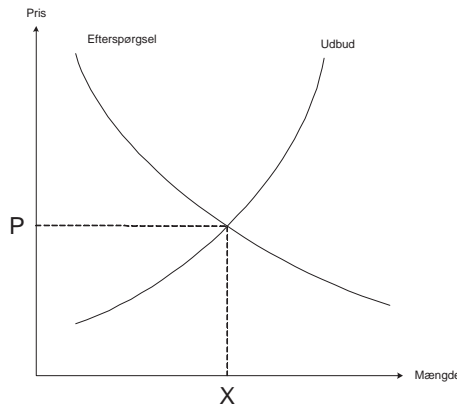
Hvor  $x$  er mængden og  $p$  er prisen. Priselasticiteten beskriver forholdet mellem relative ændringer. Hvis prisen ændres med 1 %, vil efterspørgslen ændres procentvis med priselasticiteten. Har en vare  $e_p = -2$ , betyder det, at en prisstigning på 1 % får efterspørgslen til at falde med 2 %. Bemærk at da kurven er aftagende, er  $e_p \leq 0$ . Hvis  $e_p = 0$  siges efterspørgslen af være uelastisk, hvilket betyder, at efterspørgselskurven er lodret, svarende til at mængden af en vare, som efterspørges, er konstant uanset prisen. Priselasticiteten for el formodes at være relativ lav, f.eks.  $-0.1$  eller mindre.

## 2.1 Prisdannelse

På et marked med fuldkommen konkurrence i ligevægt dannes prisen på en vare, i en given periode, ud fra ligevægten mellem udbuds- og efterspørgselskurverne for markedet. Ligevægten findes der, hvor kurverne skærer hinanden. Skæringspunktet, som også kaldes *markeds krydset*, angiver prisen og mængden, som bliver solgt på markedet (se figur 2.1). Når der kun betragtes ét marked eller nogle få markeder, og det antages at disse fungerer uafhængigt (eller tilnærmelsesvist uafhængigt) af andre markeder, siges ligevægten at være en *partiel ligevægt*.

Ved fuldkommen konkurrence kan udbyderne ikke påvirke priserne på varerne. Der eksisterer en given pris på markedet. Hvis en udbyder A forsøger at sælge til en højere pris end markedsprisen, vil forbrugerne købe hos en anden udbyder B, og udbyder A får ikke solgt noget. Hvis udbyder A vil have sine vare solgt må prisen være markedsprisen. A er således tvunget til at indstille omkostningerne ved sit produktionsapparat til at kunne producere varer, som kan sælges til markedsprisen. For den enkelte udbyder er prisen således givet.

<sup>2</sup>Andre typer elasticiteter er f. eks. krydselasticitet og substitutions elasticitet mellem forskellige produkter [8].



Figur 2.1: Prisen dannes ud fra ligevægt mellem udbud og efterspørgsel [8].

Et marked kan komme i uligevægt ved en ændring af enten udbudet eller efterspørgslen. Antag at der haves et marked i ligevægt. En stigning i f. eks. efterspørgslen vil forårsage en parallelforskydning af efterspørgselskurven mod højre, hvorved ligevægtsprisen vokser. Der opstår således en overefterspørgsel (også kaldet vareknaphed) ved den gamle ligevægtspris, og markedet er således ikke længere i ligevægt. Overefterspørgslen giver et opadrettet pres på prisen. Prisstigningen øger den udbudte mængde og reducerer den efterspurgte mængde således overefterspørgslen elimineres. Markedet er således igen i ligevægt. Markedsituationen vil altid bevæge sig mod ligevægt. Udbudet og efterspørgslen og dermed også ligevægten varierer over tid.

## 2.2 Kortsigtede og langsigtede marginale omkostninger

Udbydere på et marked vil søge at maksimere deres profit. Udgifterne vil være sammensat af variable udgifter ved produktionen  $x$ , og en fast udgift tilknyttet produktionsapparatet  $F$ , som skal betales under alle omstændigheder. Profitten betegnes  $P(x) = I(x) - U(x, F)$ . Det kan argumenteres for, at indtægterne og udgifterne, vil have et udseende, som betyder, at profitten har et maksimum[8]. Under forudsætning af at  $P(x)$  er differentiabel, findes maksimum, hvor  $\nabla P(x) = 0 \Rightarrow \frac{\partial I(x)}{\partial x} = \frac{\partial U(x, F)}{\partial x}$ . En udbyder vil på et marked i fuldkommen konkurrence altid udbyde til sin marginale omkostning. Ligevægtsprisen ved fuldkommen konkurrence i markedskrydset vil være de marginale omkostninger på den sidst producerede enhed. I ovenstående formulering betragtes  $F$  som konstant. Når  $F$  er konstant, betegnes den som en *allerede afholdt udgift*. Det er tilfældet, hvis produktionsapparatet er bygget, og det er muligt at producere den efterspurgte mængde  $x$ .

Når  $F$  er konstant betegnes den marginale omkostning, som den *kortsigtede marginale omkostning*, og den vil i det tilfælde være lig de marginale variable omkostninger:  $\frac{\partial U(x)}{\partial x}$ . Det vil imidlertid være sådan, at på længere sigt, er det

muligt, at investere i produktionsapparatet, således den faste udgift ændrer sig. På længere sigt, vil den "faste" udgift være en funktion af bl.a.  $x$ :  $F(x)$ , således de marginale omkostninger også vil afspejle den faste udgift:  $\frac{\partial U(x, F(x))}{\partial x}$ . Denne marginale omkostning betegnes den *langsigtede marginale omkostning*.

En interessant ting er, at på kort sigt er der ingen garanti for, at profitten er positiv. Hvis markedsprisen falder til et niveau, hvor profitten er negativ, må en virksomhed spørge sig selv, om den skal producere alligevel? Svaret er ja, hvis tabet ved at producere er mindre end den faste udgift  $F$ , ellers nej. Det vil sige, at på kort sigt vil markedsprisen være den kortsigtede marginale omkostning.

På længere sigt er det dog ikke rentabelt for en virksomhed at producere på denne måde. Da den mister penge, vil den med tiden gå konkurs, og forsvinde fra markedet. Dette kan give anledning til mangel på kapacitet og dermed en prisstigning. Eller det kan give anledning til, at der investeres i et andet produktionsapparat, med den egenskab, at den kan producere ved markedsprisen og have positiv profit og dermed få dækket den faste udgift.

Ligevægten på et marked vil indstille sig på de langsigtede marginale omkostninger på sidst producerede enhed. Bemærk at det eneste krav, som stilles til den langsigtede marginale omkostning er, at den faste udgift dækkes. Hvis dette er opfyldt ved de kortsigtede marginale omkostninger, vil de være lig de langsigtede.

## 2.3 Investeringer

En udbyder foretager kun investeringer, hvis disse vurderes at give overskud. I princippet vil det sige, at når forventede indtægter og udgifter opgøres i investeringens levetid, bør indtægterne være større end udgifterne. Helt så simpelt er det dog ikke. Der findes mange forskellige typer investeringer. Sikre og usikre - investeringer med højt afkast og investeringer med lavt afkast o.s.v. Når en investering vurderes, må disse faktorer tages med.

Indtægterne ved en investering betragtes som en strøm af penge over tid. Hvis  $I_0, I_1, \dots, I_n$  angiver den forventede pengestrøm ved en investering med en *økonomisk levetid* på  $n$  år, og hvis  $r$  angiver den *diskonteringsrente*, hvormed investoren vurderer fremtidig indkomst i forhold nutidig indkomst, bliver nutidsvurderingen  $I_{pv}$  af indtægten på investeringen:

$$I_{pv} = \frac{I_0}{(1+r)^0} + \frac{I_1}{(1+r)^1} + \dots + \frac{I_n}{(1+r)^n} = \sum_{y=0}^n \frac{I_y}{(1+r)^y} \quad (2.2)$$

Tilsvarende skal fremtidige udgifter ved en investering også vurderes i forhold til nutiden.  $m$  angiver det antal år, hvor investor har udgifter på investeringen. Oftest vil det være naturligt at vælge  $m \leq n$ .

$$U_{pv} = \frac{U_0}{(1+r)^0} + \frac{U_1}{(1+r)^1} + \dots + \frac{U_m}{(1+r)^m} = \sum_{y=0}^m \frac{U_y}{(1+r)^y} \quad (2.3)$$

Ud fra differencen mellem  $I_{pv}$  og  $U_{pv}$  findes  $NPV$  (Net Present Value):

$$NPV = I_{pv} - U_{pv} = \sum_{y=0}^n \frac{I_y}{(1+r)^y} - \sum_{y=0}^m \frac{U_y}{(1+r)^y} \quad (2.4)$$

$NPV$ -værdien skal være positiv for at en investering foretages.  $NPV$ -værdien er ganske elegant udtrykt i ovenstående, men det introducerer nogle komplicerede begreber, såsom levetid, risiko, diskonteringsrente, finansiering osv.

### 2.3.1 Levetid og finansiering

I  $NPV$ -udtrykket indgår parametrene  $n$  og  $m$ , som angiver hhv. investeringens økonomiske levetid og den periode, hvor investor har udgifter på investeringen. En investerings økonomiske levetid er den tid, som investor medtager i sin analyse af investeringsbeslutningen. Dvs. hvis en investor beslutter, at  $NPV$ -værdien af investeringen skal være positiv, når halvdelen af investeringens levetid er gået, vælges en økonomisk levetid, som er halvdelen af investeringens levetid, og denne værdi benyttes i udregningen af  $NPV$ -værdien. Hvis investeringen er et produktionsanlæg, vil det være oplagt at vælge anlæggets forventede *tekniske levetid* til at være den økonomiske levetid.

Ved nogle investeringer skal hele investeringsudgiften falde på én gang det første år. I dette tilfælde, vil  $U_0$  være den totale investeringsudgift. Ved investeringer i produktionsanlæg er en typisk finansieringsform at låne penge, således den totale investeringsudgift deles ud over en årrække i form af afdrag på et lån. Når denne finansieringsform anvendes, vælges oftest en løbetid på lånet svarende til anlæggets tekniske levetid, således  $m = n$ . I resten af denne rapport antages det, at investeringer finansieres af et fastrente annuitetslån med en løbetid på investeringens tekniske levetid, således økonomisk og teknisk levetid er ens. Ved en *lånerente* på  $r_l$ , kan de årlige afdrag i % af det totale lånebeløb beregnes vha. annuitetsformlen:

$$\text{"annuitet"} = \frac{r_l}{1 - (1 + r_l)^n} \quad (2.5)$$

hvor  $n$  angiver den tekniske levetid, som svarer til løbetiden på lånet.

### 2.3.2 Diskonteringsrente og risiko

En af de svære ting ved  $NPV$  beregninger er at bestemme hvilken rente,  $r$ , der skal anvendes til nutidsvurderingen. Dette område er der skrevet omfattende økonomiske afhandlinger og lærebøger om. En af de bedre, omend den er meget overordnet, findes i kapitel 18 i [10].

Valget af *diskonteringsrente*,  $r$ , er knyttet til risikoen ved en investering. Diskonteringsrenten defineres som det forventede afkast for investors næstbedste alternative investeringsprojekt [10]. En investor må altså foretage en gruppering af sine investeringmuligheder efter risikoen forbundet med dem. Normalt betegnes køb af statsobligationer (med mindre staten er ved at gå konkurs), som en sikker investering. Hvis en investering vurderes til at være sikker, benyttes den diskonteringsrente som svarer til afkastet på en statsobligation. Jo mere usikker

investeringen er, desto større diskonteringsrente skal anvendes.

Når usikkerheden ved et investeringsprojekt skal vurderes, benyttes ofte CAPM-modellen (The Capital Asset Pricing Model)[10]. Usikkerheden vurderes ved at sammenligne en bestemt investering med en investering i hele markedet. Ved at investere i hele markedet kan en del af risikoen minimeres, idet eventuelle tab, som vil være på en del af aktiemarkedet, vil blive opvejet af gevinster på andre dele af markedet [10]. Denne del kaldes diversificerbar risiko. Der vil dog altid være en vis risiko tilbage, som ikke kan minimeres ved at investere i hele markedet. Denne risiko kaldes ikke-diversificerbar. Da der findes en sådan risiko vil investor kræve en risikopræmie  $r_p^m$  for at investere i hele markedet i stedet for risikofrie statsobligationer. Hvis risikofri rente er  $r_f$  og hvis markedets afkast er  $r_m$  fås:

$$r_p^m = r_m - r_f \quad (2.6)$$

Hvis investor overvejer at foretage en investering med et afkast på  $r_i$ , skal risikopræmien for den investering  $r_p$  være proportional med risikopræmien i hele markedet:

$$r_p = r_i - r_f = \beta r_p^m = \beta(r_m - r_f) \quad (2.7)$$

Hvilket omskrives til:

$$r_i = r_f + \beta(r_m - r_f) \quad (2.8)$$

Hvis den korrekte  $\beta$ -værdi <sup>3</sup> for et investeringsprojekt kendes, kan den korrekte diskonteringsrente  $r$  findes ved:

$$r = r_f + \beta(r_m - r_f) \quad (2.9)$$

At finde en fornuftig  $\beta$  og dermed diskonteringsrente for et investeringsprojekt er meget kompliceret. En virksomhed vil dog kunne finde et estimat for sin egen  $\beta$ -værdi, enten ved at regne den ud, eller ved at købe sig til informationen. Flere økonomer har argumenteret, at for en virksomhed er et fornuftigt valg af diskonteringsrente det vægtede gennemsnit mellem den forventede rente på virksomhedens aktier, og den rente som virksomheden udsteder obligationer til. Obligationsrenten er et udtryk for, hvor risikabelt investorer opfatter det at investere i virksomheden. Hvis f.eks. Disney overvejer et investeringsprojekt, som skal finansieres 50 % af salg af aktier og 50 % af udstedelse af obligationer fås følgende regnestykke hvor data stammer fra 2003 [10]:

- $\beta_{Disney}$ : 0.99
- $r_f$ : 0.05
- $(r_m - r_f)$ : 0.08
- obligationsrente = 0.07

---

<sup>3</sup>Statistisk defineres  $\beta = \frac{\text{COV}(r_i, r_m)}{\text{var}(r_m)}$  [10]

Det forventede afkast på Disney aktier kan således beregnes:

$$r_{Disney} = r_f + \beta(r_m - r_f) = 0.05 + 0.99 \cdot 0.08 = 0.1292 \quad (2.10)$$

og diskonteringsrenten bliver:

$$r = 0.5r_{Disney} + 0.5 \cdot 0.07 = 0.5 \cdot 0.1292 + 0.5 \cdot 0.07 = 0.0996 \quad (2.11)$$

Hvis hele finansieringen skete ved udstedelse af obligationer ville diskonteringsrenten være 0.07, hvilket er obligationsrenten, som fortæller, hvilken rente Disney kan låne til. Dette stemmer fint overens med at diskonteringsrenten er et udtryk for risiko. At udstede obligationer vil sige, at virksomheden låner penge til finansieringen. Derved overlades risikoen ved investeringen til køberne af obligationerne, idet det i princippet er køberne af obligationer, som mister deres penge, hvis investeringen går galt.

Hvis investor er en stat, som også medtager nytte i beregninger, eller hvis investeringsvurderingen sker med et samfundsøkonomisk perspektiv, kan formel (2.9) ikke anvendes. At finde en rimelige diskonteringsrente i dette tilfælde er mere kompliceret. I Danmark anbefaler Finansministeriet, at der anvendes en diskonteringsrente på 6 % [23]. Det er vigtigt at bemærke at ligesom indtægter og udgifter skulle tilbagediskonteres for at finde *NPV*-værdien af en investering, skal nytten ved samfundsøkonomiske analyser også tilbagediskonteres.

### 2.3.3 Skrotværdi

Foruden indtægter og udgifter i en investerings levetid, bør det overvejes, om investeringen har en værdi når levetiden udløber. Denne værdi betegnes *skrotværdi*, og er positiv, hvis investeringen kan sælges videre og dermed genere en indtægt. Ofte vil skrotværdien være negativ, fordi det koster en beløb at skrotte investeringen. Hvis investeringen er et produktionsanlæg kan skrotværdien inkludere udgifter til oprydning af forurening, betaling for nedrivning mv. For mange investeringer er skrotværdien meget lille i forhold til de totale indtægter og udgifter i investeringens økonomiske levetid, og den kan derfor ses bort fra. Dette forstærkes yderligere af at skrotværdien nutidsvurderes ved tilbagediskontering.

## 2.4 Opsummering

I dette kapitel er præsenteret de økonomiske forudsætninger og begreber, som resten af projektet baseres på. Desuden er beskrevet de økonomiske aspekter af investeringsproblematikken, som anvendes ved vurdering af investeringer. Forventede indtægter og udgifter nutidsvurderes ved at tilbagediskontere beløbene. Hvis nutidsvurderingen af indtægten forventes at være større end nutidsvurderingen af udgifterne, således *NPV*-værdien er positiv, er det en god investering, ellers ikke. En model med fuld information bør derfor ikke foretage investeringer, hvor dette ikke er opfyldt. Hvis skrotværdien er stor i forhold til forventede indtægter og udgifter, skal den også medtages i *NPV*-værdien.





## Kapitel 3

# Energitransformation, efterspørgsel og priser

I dette kapitel introduceres og forklares i korte træk nogle af de mest udbredte teknologier, som benyttes til el- og varmeproduktion i kraftvarmesektoren. Hensigten med kapitlet er at give læser en forståelse af, hvordan teknologierne fysisk er konstrueret, og hvordan deres økonomiske parametre såsom produktionsomkostninger og investeringsomkostninger er i forhold til hinanden. Dette giver baggrunden for at forstå den måde, teknologier er modelleret i Balmorel. Desuden introduceres de begreber fra kraftvarmesektoren, som anvendes i denne rapport. Dette er vigtigt, da de matematiske modeller, som præsenteres senere i rapporten, er baseret på denne begrebsverden.

### 3.1 Enheder

SI-enheden for energi er Joule (J). Effekt måles i Watt (W), som er energi pr. sekund (J/S). Det er disse enheder, som ligger til grund for de enheder, der anvendes i kraftvarmesektoren. Tabel 3.1 lister de mest anvendte enheder, samt deres ækvivalente SI-enheder. Størrelsesordenen af mængderne i kraftvar-

Enhed	Betegnelse	SI-enhed	Anvendelse
W	Watt	J/S	Kapacitet
Wh	Watttime	3,6 kJ	Total energiforbrug/produktion
Wh/h	Watttime pr. time	J/S	Gnm. snit. energiforbrug/produktion

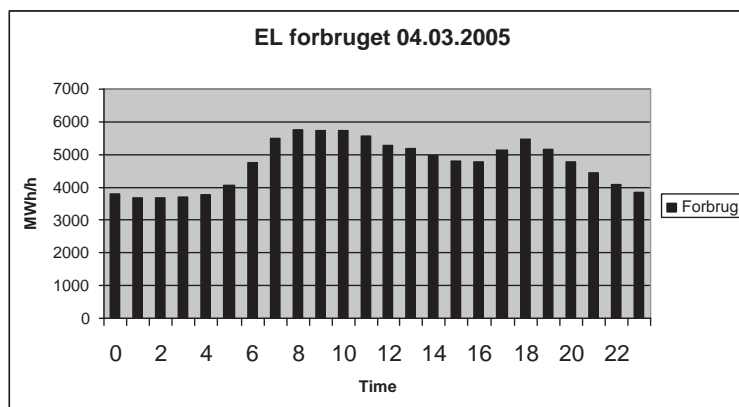
Tabel 3.1: *Enheder som benyttes i kraftvarmesektoren.*

mesektoren er oftest af størrelsesordenen Mega eller Giga. Enhederne vil oftest optræde som hhv. MW, MWh og MWh/h.

### 3.2 Lastperioder

Forbruget af el og varme varierer meget i løbet af et år. Om sommeren er forbruget lavt i forhold til om vinteren, fordi temperaturen er højere og det er

længere lyst. Ser man på et enkelt døgn, så varierer forbruget ligeledes meget. F.eks. er der et højt forbrug i den periode, hvor folk kommer hjem fra arbejde og skal lave mad, mens forbruget er lavt om natten, når folk sover. Figur 3.1 viser forbruget i hver time for Danmark 04.03.2005. På grund af disse variationer i



Figur 3.1: Gennemsnitsforbruget pr. time af el i Danmark 04.03.2005 [6].

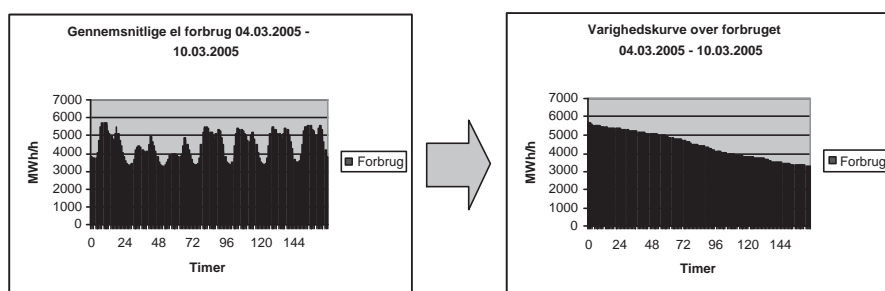
forbruget over et døgn, kan det inddeles i lastperioder. Det kunne f.eks. være spids-, høj- og lavlast som det er tilfældet i den nuværende prisreguleringslov, treledstariffen [24]. Fordeling af lastperioder øst for Storebælt i treledstariffen ses på tabel 3.2:

Spidslast	oktober - marts april - september	Hverdage 8 - 12 og 17 - 19 Hverdage 8 - 12
Højlast	oktober - marts april - september	Hverdage 6 - 8, 12 - 17 og 19 - 21 Hverdage 6 - 8, 12 - 21
Lavlast	øvrige tid	

Tabel 3.2: Inddeling af tiden i lastperioder øst for Storebælt i Treledstariffen. [24]

### 3.3 Varighedskurver

Varighedskurver bruges meget i kraftvarmesektoren. De bruges f.eks. til at vise antallet af timer eller %-del af en periode, forbruget eller prisen på el, har været over et bestemt niveau. Varighedskurven over forbruget over en uge konstrueres ud fra en graf, som viser det gennemsnitlige forbrug for hver time på ugen. Denne graf bliver sorteret efter størrelse, så der fremkommer en aftagende kurve. Figur 3.2 viser varighedskurven for Danmark 04.03.2005 til 10.03.2005.



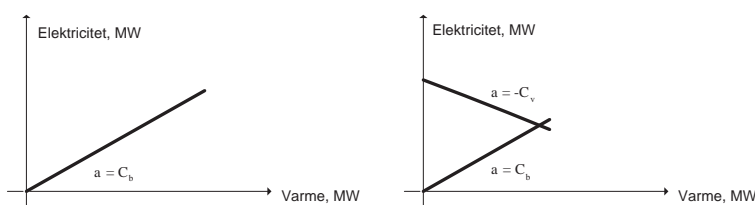
Figur 3.2: Varighedskurve over elforbruget i ugen fra 04.03.2005 til 10.03.2005 i Danmark. [6].

### 3.4 Teknologier

Kraftvarmesektoren benytter sig af mange forskellige typer teknologier. I det følgende beskrives de mest almindelige teknologier, og der gennemgås uden for mange detaljer, den fysiske proces i de forskellige teknologier. Beskrivelserne danner baggrund for modelleringen af teknologityper i Balmorel.

Nogle teknologier producerer kun el, nogle kun varme, men de fleste kan producere begge dele. For teknologier, som producerer både el og varme benyttes følgende betegnelser:

- Modtrykskoefficienten,  $C_b$ , er defineret som max. elkapacitet over max. varmekapacitet. Det er altså et udtryk for det maksimale forhold mellem el og varme.
- $C_v$  koefficienten, er defineret som max. elkapacitet når min. mængde damp ledes fra turbinen fratrukket max. elkapacitet når max. mængde damp ledes ud fra turbinen, divideret med max. varmekapacitet.



Figur 3.3: Grafen til venstre viser produktionsmønstret for de teknologier som producerer el og varme i et fast forhold. Grafen til højre viser produktionsmønstret for de teknologier som producerer el og varme i et variabelt forhold.

$C_b$  koefficienten benyttes for de teknologier som producerer el og varme i et fast forhold.  $C_b$  koefficienten er hældningen på den linie, som viser de mulige produktionsmønstre, og udtrykker det maksimale forhold mellem el og varme. Dette kan ses på figur 3.3, grafen til venstre.

For teknologier hvor forholdet mellem el og varme produktionen kan varieres, er både  $C_b$  og  $C_v$  koefficienterne vigtige. Her angiver  $C_b$  igen det maksimale forhold mellem el og varme, og  $C_v$  angiver en øvre grænse for den mængde el, der kan produceres, når der samtidig skal produceres en vis mængde varme. Dette er illustreret på figur 3.3, grafen til højre.

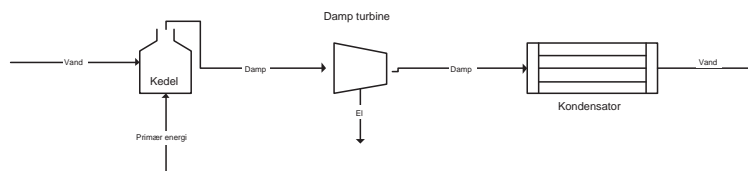
Det skal bemærkes, at ved de angivne  $C_b$  og  $C_v$  værdier, antages det, at teknologierne producerer effektivt. Dvs. de producerer de ønskede mængder af el og varme bedst muligt.

### 3.4.1 Dampturbiner

Dampturbiner står for en meget stor del af el- og varmeproduktionen idag. Der findes tre typer af dampturbineanlæg: kondensanlæg, modtryksanlæg og udtagsanlæg.

#### Kondensanlæg

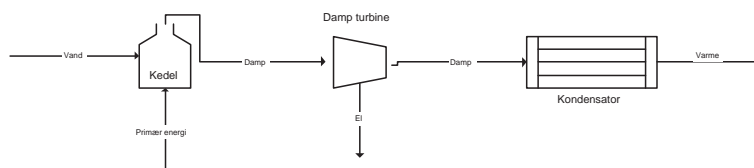
Denne type bruges udelukkende til at producere el. Princippet i kondensanlæg er, at vand varmes op i en kedel og bliver til damp med højt tryk og høj temperatur. Denne damp bliver ført gennem en dampturbine, der driver en generator, som producerer el. Når dampen har passeret turbinen, bliver den ført ind i en vandkølet kondensator, som køler dampen ned, så det igen bliver til vand. Processen kan ses på figur 3.4. Kondensanlæg har en virkningsgrad på 45% - 55% afhængig af primærenergi (brændsel) og belastning. Udnyttelsesgraden er størst ved en belastning på 100%. Kondensanlæg findes i størrelser fra 10 MW - 500 MW [17].



Figur 3.4: Procesdiagram over kondensanlæg.

#### Modtryksanlæg

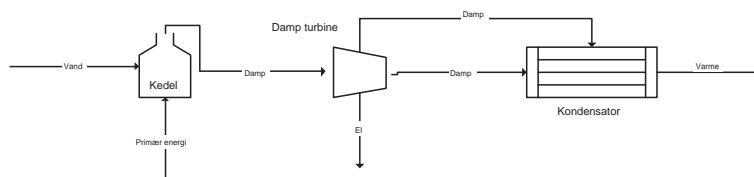
Modtryksanlæg producerer både el og varme. Processen er den samme som ved kondensanlæg, men den damp, som kommer ud af turbinen har en højere temperatur. Det betyder, at det vand, der er i kondensatoren, bliver tilstrækkeligt varmt, til at det kan bruges til fjernvarme. Forholdet mellem el- og varmeproduktionen er konstant ved forskellige produktionsniveauer, og bestemmes af  $C_b$  koefficienten. Processen kan ses på figur 3.5, og produktionsmønstre kan ses på figur 3.3 grafen til venstre. Elvirkningsgraden er mindre end ved kondensanlæg, da en del af energien bruges til fjernvarmeproduktion, men den totale virkningsgrad er højere idet spildvarmen udnyttes. Modtryksanlæg findes i størrelser fra 10 MW til 500 MW [17].



Figur 3.5: Procesdiagram over modtryksanlæg.

### Udtagsanlæg

Udtagsanlæg producerer også både el og varme. processen minder om kondensanlæg, men det er her muligt at lede noget af dampen direkte ud af turbinen, før det skal bruges til at drive generatoren. Den damp, der ledes ud af turbinen, ledes over i kondensatoren, og bruges til varmeproduktion, på samme måde som modtryksanlæg. Da den mængde damp, der ledes ud af turbinen, kan varieres, er der ikke et fast forhold mellem el- og varmeproduktionen. Det medfører, at udtagsanlæg er mere fleksible i forhold til modtryksanlæg. Ledes der ikke damp ud af turbinen, fungerer udtagsanlæg ligesom kondensanlæg. Dvs. at virkningsgraden for el kan være lige så god som for et kondensanlæg. Produces der både el og varme er virkningsgraden for elproduktionen mindre. Størrelsen på udtagsanlæg varierer også fra 10 MW til 500 MW [17]. Processen kan ses på figur 3.6, og produktionsmønstre på figur 3.3 grafen til højre.



Figur 3.6: Procesdiagram over udtagsanlæg.

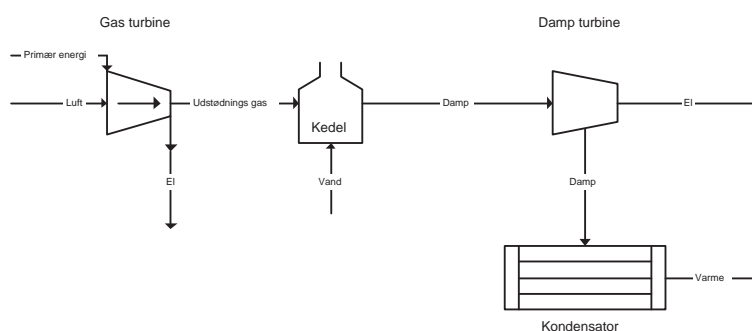
### 3.4.2 Gasturbineanlæg

En gasturbine er i princippet en stor jetmotor. Gasturbinen driver en generator, som producerer el. Udstødningsgassen har en temperatur mellem 400 og 600 grader, og benyttes til at producere varme. Forholdet mellem el og varmeproduktionen er ikke nødvendigvis fast, men kan godt være det. Gasturbineanlæg findes i størrelser op til 300 MW, men anlæggene bygges sjældent med en kapacitet som overstiger 15 MW, idet større anlæg ikke kan konkurrere med combined cycle anlæg med samme kapacitet. Elvirkningsgraden ligger mellem 20 - 42% afhængig af anlæggets størrelse [17].

### 3.4.3 Combined cycle

Combined cycle teknologien producerer både el og varme. Det er en teknologi, hvor to teknologier er kombineret, for at få en højere udnyttelsesgrad af primærenergien (brændstof), der benyttes. Combined cycle er en gasturbine i

forlængelse af et kondens-, modtryks- eller udtagsanlæg. Gasturbinen producerer kun el. Det efterfølgende anlæg kan producere både el og varme. Anlægget, som er i forlængelse af gasturbinen, bruger udstødningsgassen fra gasturbinen som primærenergi. Det er udstødningsgassen, som varmer vandet i kedlen, og på den måde fortsætter processen. Den samlede virkningsgrad for elproduktionen varierer fra 80% til 90%, afhængig af gasturbinens størrelse og det efterfølgende anlæg. Største virkningsgrad for el opnås, hvis det efterfølgende anlæg er et kondensanlæg. Opstartstiden for selve gasturbinen er ikke så lang, men for hele anlægget er den som et kondensanlæg. Opstartsomkostningerne er mindre end damp turbineanlæg, da gasturbinen producerer el næsten med det samme. Virkningsgraden for gasturbinen varierer fra 20% til 42% afhængig af turbinens størrelse. Processen kan ses på figur 3.7.



Figur 3.7: Procesdiagram over combined cycle.

### 3.4.4 Motoranlæg

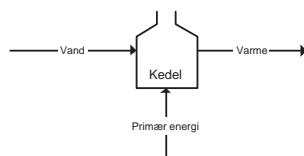
Motoranlæg består af store forbrændingsmotorer, som det kendes fra f.eks. biler, og de producerer både el og varme. For motoranlæg er der et fast forhold mellem el og varmeproduktionen. Som primærenergi benyttes oftest naturgas eller diesel olie. Gasmotorer findes i størrelser fra et par kW op til ca. 5 MW og har en elvirkningsgrad mellem 30 - 42%. Dieselmotorer findes i størrelser helt på til 50 MW og har en elvirkningsgrad mellem 40-45%. Motoranlæg er typiske spidslastanlæg, idet de er hurtige at starte og har gode reguleringssegenskaber [17].

### 3.4.5 Varmekedler

Varmekedler bruges kun til at producere varme. Det er i princippet en stor kedel som varmer vand, der så bruges til fjernvarme. Processen kan ses på figur 3.8. Virkningsgraden er meget høj for varmekedler, mellem 90% og 100%, afhængig af størrelse og primærenergi. Værker findes fra 0.5 MW. til 50 MW. Der er store opstartsomkostninger forbundet med varmekedler.

### 3.4.6 Vandkraft

En stor del af den el, som bruges i Danmark, er produceret på svenske eller norske vandkraftanlæg. Da det er vand, som er primærenergi, er produktion

Figur 3.8: *Procesdiagram over varmekedel.*

på vandkraftanlæg meget billig. Selve princippet i produktionen på vandkraftanlæg er, at vand løber igennem en turbine, som driver en generator. Der er to typer produktionsanlæg inden for vandkraft. En type kaldes gennemstrømning. Gennemstrømning har en ureguleret energiproduktion. Den anden type er vandkraft med reservoir. Vandkraft med reservoir har en reguleret energiproduktion.

Princippet i gennemstrømning er at sænke en turbine ned i noget strømmende vand. Denne turbine driver en generator, som producerer strøm. Mængden af produceret strøm, afhænger af, hvor kraftig vandgennemstrømningen er. Den anden type, reservoir, er ikke så forskellig fra gennemstrømning, men vandet, som strømmer gennem turbinen kommer fra et reservoir i forbindelse med en dæmning eller lignende. Dæmningen fungerer som lager, hvilket gør denne type mere fleksibel. Når et vandkraftanlæg er bygget, er der i princippet ingen udgifter forbundet med produktionen.

### 3.4.7 Vindkraft

Denne type bruges kun til at producere el. Vindens kræfter udnyttes til at drive en turbine, som så driver en generator, som producerer strøm. Vindkraft har en ureguleret energiproduktion. Vindmøller har en kapacitet mellem 1 - 3 MW., og når møllerne er bygget, er der i princippet ingen omkostninger forbundet med produktionen.

### 3.4.8 Solenergi

Solenergi bruges kun i meget begrænset omfang i kraftvarmesektoren i dag. Solenergi kan bruges til at producere både el og varme. Solens stråler omdannes til el ved brug af solceller eller strålerne anvendes til at opvarme vand. Mængden af strøm, der produceres på solenergianlæg på et år, afhænger af antallet af solskinstimer. Virkningsgraden på solceller er ca. 20%, og der er i princippet ingen omkostninger forbundet med produktionen.

### 3.4.9 Atomkraft

Atomkraft er en vigtig energikilde i kraftvarmesektoren, og en stor del af den el, som forbruges i Danmark kommer vha. import fra atomkraft. Energien fra et atomkraftværk kommer fra spaltning af beriget uran  $U_{235}$ . Denne energi opvarmer vand til damp med højt tryk og en høj temperatur. Denne damp ledes

gennem et af de allerede beskrevne damp turbineanlæg, hvorved der produceres el. Nogle atomkraftanlæg kan både producere el og varme, andre kun el. En fordel ved atomkraft er, at det stort set ikke forurener i forhold til de værker, der bruger fossile typer primærenergi, samt at det er billigt at producere på. En ulempe er, at opstart og stopning af processen er langsom, og hvis noget går galt, så går det rigtigt galt ( Tjernobyl, 1986 ). Derfor er atomkraft også forbundet med mange kontroverser. Et andet problem er, at selvom forureningsmængden i vægt er markant mindre end mange af de øvrige teknologier, så er atomkraftproduktion forbundet med farlige radioaktive affaldsprodukter, som det i dag faktisk stadig er uklart, hvor skal opbevares. I dag bliver affaldsprodukterne oftest opbevaret på værkerne.

### 3.5 Gruppering af teknologier

Teknologierne kan som i ovenstående afsnit grupperes efter deres tekniske egenskaber. I tabel 3.3 er en opsummering af disse egenskaber. Set fra et planlægnings-

Teknologi	Virkningsgrad el	Virkningsgrad total	$C_b$	$C_V$
Damp turbineanlæg	20-40%	85-90%	0.3	0.9
Gasturbineanlæg	20-42%	90%	0.3	1
Combined Cycle	44-50%	86-88%	1	1.3
Motoranlæg	30-45%	85-92%	0.5	1
Varmekedel	-	90-100%		
Vandkraft	_*	_*		
Vindkraft	_*	_*		
Solenergi	20%*	20%*		
Atomkraft	35-42%	80-90%	0.5	0.15

Tabel 3.3: Teknologiernes egenskaber. \*) Da primærenergierne er forureningsfri og gratis er virkningsgraderne ikke så vigtige

og økonomisk synspunkt, inddeles de efter deres økonomiske parametre, som er afgørende for hvilke lastperioder, de anvendes i. Man har normalt følgende grupper:

- *Grundlast*
- *mellemlast*
- *Spidslast*

Atomkraft og vandkraft med reservoir er forbundet med høje investeringsomkostninger, men lave produktionsomkostninger. De bygges normalt kun i anlæg med stor kapacitet. Disse egenskaber kendetegner typisk grundlastanlæg. Teknologier såsom vindkraft og solkraft med lave investerings- og produktionsomkostninger, men som er afhængig af vejret, anvendes også som grundlastanlæg. Disse teknologiers produktion bestemmes af vejret og ikke af behovet for el, derfor egner de sig ikke til spidslastanlæg. Mellemlastanlæg som f.eks. mindre combined cycle anlæg, er forbundet med lavere investeringsomkostninger, men højere produktionsomkostninger end grundlastanlæg. Mellemlastanlæg bygges



normalt med lavere kapacitet end et grundlastanlæg. Gasmotorer og gasturbiner har de laveste investeringsomkostninger men højeste produktionsomkostninger, hvilket kendetegner spidslastanlæg. Spidslast kendetegnes derudover også ved at de er hurtig at starte op. Disse økonomiske parametre er opsummeret i tabel 3.4.

Teknologi	Inv. omk.	Prod. omk.	Opst. omk.	Grp.
Damp turbineanlæg	middel - høj	lav - middel	høj	grund - mellem
Gasturbineanlæg	lav	høj	middel	spids
Combined Cycle	middel - høj	lav - middel	høj	grund - mellem
Motoranlæg	lav	høj	lav	spids
Varmekedel	lav	middel	høj	mellem - spids
Vandkraft	middel - høj	lav	lav	grund
Vindkraft	lav - middel	lav	lav	grund
Solenergi	lav - middel	lav	lav	grund
Atomkraft	høj	lav	høj	grund

Tabel 3.4: Opsummering af teknologiernes overordnede økonomiske parametre.

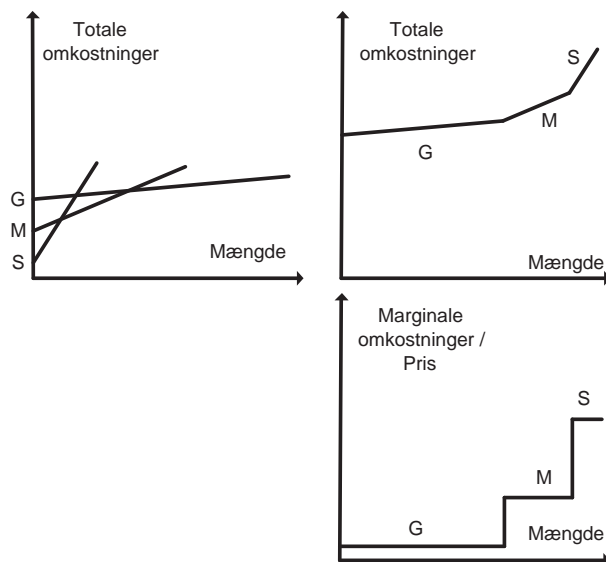
### 3.6 Omkostninger og priser i kraftvarmesektoren

Inddelingen af teknologierne i grund-, mellem- og spidslast skyldes sammenspillet mellem de lastperioder, som teknologierne anvendes i, og deres økonomiske parametre. Det er primært teknologiens marginale produktionsomkostninger, som bestemmer, hvilken gruppe teknologien tilhører. De teknologier, som har de laveste marginale produktionsomkostninger, tilhører grundlast. Teknologier med højere marginale produktionsomkostninger end dem i grundlast tilhører mellemlastgruppen. De teknologier med de højeste marginale produktionsomkostninger tilhører spidslastgruppen.

Jvf. afsnit 2 vil producenterne altid opfylde behovet for el og varme så billigt som muligt. De teknologier, som tilhører grundlastgruppen, er de billigste at producere på, så de vil altid producere først. Når der ikke er mere kapacitet til rådighed fra grundlastteknologierne, vil der blive suppleret op med kapacitet fra mellemlast. Når der så heller ikke er mere kapacitet til rådighed fra mellemlast suppleres op fra spidslast.

Hvis det forestilles, at der kun haves tre teknologier fra hhv. grundlast-, mellemlast- og spidslastgrupperne, kan et simpelt eksempel konstrueres. Teknologiernes marginale produktionsomkostninger er på hhv.  $MC_G$ ,  $MC_M$  og  $MC_S$ , hvorom der gælder at  $MC_G < MC_M < MC_S$ . Tilsvarende betegnes deres investeringsom-

kostninger  $F_G$ ,  $F_M$  og  $F_S$ , som opfylder  $F_G > F_M > F_S$ . Se figur 3.9. Heraf kan



Figur 3.9: Eksempel på konstruktion af total omkostning og udbudskurve ud fra teknologiers individuelle omkostningskurver.

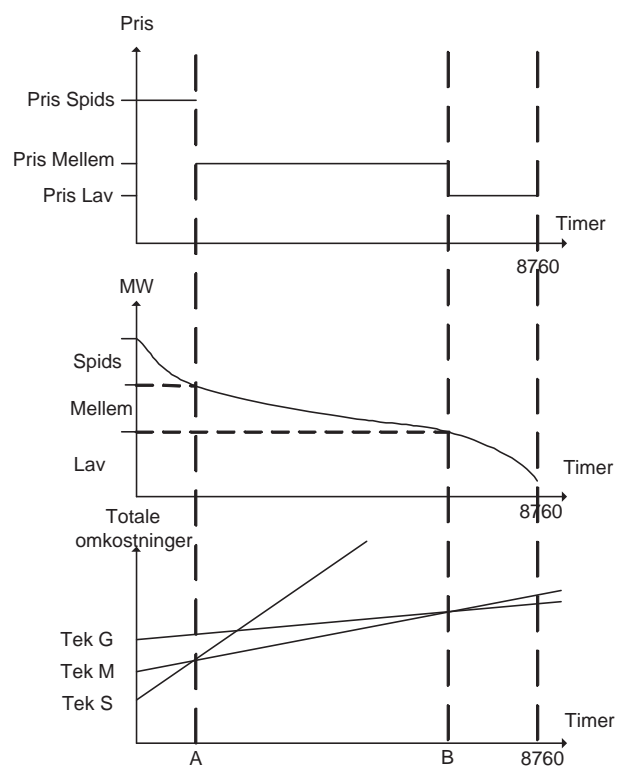
den totale omkostningskurve ved forskellige belastninger konstrueres, og ud fra den kan udbudskurven konstrueres.

Udbudskurven fremkommer på baggrund af de marginale produktionsomkostninger. På et marked med fri konkurrence vil prisen altid være lig de marginale produktionsomkostninger. Hvis efterspørgslen er lav, er det kun grundlastteknologien, som producerer, og bestemmer derfor prisen. Er efterspørgslen middel, er det mellemlastteknologien, som bestemmer prisen. Ved høj efterspørgsel er det spidslastteknologien, som bestemmer prisen.

Hvis omsætningen over et år skal vurderes eller hvis gennemsnitsprisen skal findes, må det undersøges, hvilken andel af tiden, ligevægten mellem udbud og efterspørgsel ligger et bestemt sted på udbudskurven. Hertil er varighedskurven utrolig anvendelig. På figur 3.10 er dette illustreret. Ved at sammenholde varighedskurven med omkostningskurverne, kan prisudviklingen over året estimeres, således en gennemsnitspris kan findes ved et vægtet gennemsnit. Eller den totale indtægt kan estimeres ved at gange arealet under varighedskurven med de tilsvarende priser i perioderne. Dette eksempel er ekstremt simpelt, og derfor selvfølgelig ikke realistisk, men det illustrerer fint den tankegang, som skal anvendes ved optimal produktionsplanlægning, som anvendes i resten af projektet.

### 3.7 Opsummering

I dette kapitel blev teknologier og lastperioder introduceret. Der blev oprettet en forbindelse mellem teknologier og lastperioder, og de økonomiske perspektiver i



Figur 3.10: Eksempel på brug af varighedskurven.

denne kobling blev beskrevet. Indholdet i dette kapitel vil blive benyttet senere i rapporten, når en matematisk model for kraftvarmesektoren bliver konstrueret.

44KAPITEL 3. ENERGITRANSFORMATION, EFTERSPØRGSEL OG PRISER

## Kapitel 4

# Partiel ligevægtsmodel for kraftvarme

I dette kapitel formuleres 2 matematiske LP-modeller, som modellerer udbud og efterspørgsel i kraftvarmesektoren. Modellerne er partielle ligevægtsmodeller, hvor det er tilladt at foretage investeringer i nye produktionsanlæg. Først konstrueres en simpel LP-model, hvor det antages at el- og varmeproduktionen er uafhængig af hinanden. Det bevises at i denne model vil  $NPV$ -værdien altid være positiv. Derefter udvides modellen med en mere realistisk sammenhæng mellem el- og varmeproduktionen, og det bevises hvilke forudsætninger, der skal være opfyldt, for at  $NPV$ -værdien er positiv. Som en del af beviset vil det fremgå, hvordan skyggepriserne på de begrænsninger, som sikrer ligevægt mellem udbud og efterspørgsel, kan fortolkes som hhv. kortsigtede og langsigtede marginale omkostninger (priser).

### 4.1 En simpel model

Med udgangspunkt i de foregående kapitler formuleres en model, som modellerer udbud og efterspørgsel i kraftvarmesektoren. Jvf. kapitel 2 vil udbydere og forbrugere agere rationelt, hvilket vil sige at udbyderne maximerer deres profit og forbrugerne maximerer deres nytte. En matematisk model skal maximere den fælles nytte, defineret som summen af forbrugernytte og udbyderprofit. Forbrugernes efterspørgsel på el og varme skal opfyldes, men er bundet af en budgetbetingelse. Udbydernes kapacitetsbegrænsninger skal ligeledes overholdes. Det er vigtigt, at bemærke at i det følgende antages, at faste udgifter på eksisterende kapacitet bliver dækket ved den fundne pris. Faste udgifter på eksisterende kapacitet betegnes allerede afholdte udgifter, og det antages at de enten er 0, eller bliver dækket. I modellen anvendes følgende betegnelser:

- $e$  : El
- $h$  : Varme
- $o$  : Slack vare
- $\bar{e}$  : Kapacitet, el

- $\bar{h}$  : Kapacitet, varme
- $\pi^e$  : Pris el
- $\pi^h$  : Pris varme
- $D^e$  : Efterspørgsel, el
- $D^h$  : Efterspørgsel, varme

Forbrugernes budget betegnes  $B$  og er konstant. Forbrugernes udgift og dermed udbydernes indtægt betegnes:  $I(e, h) = \pi^e e + \pi^h h$ . Udbydernes udgifter betegnes:  $C(e, h)$ . Profitten bliver derved:  $\pi^e e + \pi^h h - C(e, h)$ . Forbrugernes nytte betegnes:  $N(e, h, o) = N^e(e) + N^h(h) + o$  [3].

$$\max \left[ N^e(e) + N^h(h) + o + \pi^e e + \pi^h h - C(e, h) \right] \quad (4.1)$$

*u.b.*

$$\pi^e e + \pi^h h + o = B \quad (4.2)$$

$$e = D^e \quad (4.3)$$

$$h = D^h \quad (4.4)$$

$$e \leq \bar{e} \quad (4.5)$$

$$h \leq \bar{h} \quad (4.6)$$

Da  $B$  er konstant, kan problemet omskrives til [3]:

$$\max \left[ N^e(e) + N^h(h) - C(e, h) \right] \quad (4.7)$$

*u.b.*

$$e = D^e \quad (4.8)$$

$$h = D^h \quad (4.9)$$

$$e \leq \bar{e} \quad (4.10)$$

$$h \leq \bar{h} \quad (4.11)$$

Modellen udvides med flere flere år  $y$ , hvor  $m$  angiver det sidste år i modelleringen. Desuden indføres mulighed for investeringer i form af kapacitetsforøgelser, hvor  $U_y(\bar{e}_{gy_0}, \bar{h}_{gy_0})$  er udgifterne i år  $y$  forbundet med en kapacitets forøgelse på  $(\bar{e}_{gy_0}^n, \bar{h}_{gy_0}^n)$  i år  $y_0$ . Jvf. afsnit 2.3 skal nytte, indtægter og udgifter tilbagediskonteres med en diskonteringsrente  $r$ , når der laves en nutidsvurdering af udviklingen i fremtiden. Som angivet i kapitel 3 findes i kraftvarmesektoren mange forskellige teknologier. Modellen udvides derfor også med flere teknologier  $g$ :

$$\max \left[ \sum_{y=0}^m \left[ \frac{N^e(D_y^e) + N^h(D_y^h)}{(1+r)^y} \right] - \sum_g \left( \frac{C(e_{gy}, h_{gy})}{(1+r)^y} + \sum_{t=y}^m \frac{U_t(\bar{e}_{gy}^n, \bar{h}_{gy}^n)}{(1+r)^t} \right) \right] \quad (4.12)$$

*u.b.*

$$\forall y \quad \sum_g e_{gy} = D_y^e \quad (4.13)$$

$$\forall y \quad \sum_g h_{gy} = D_y^h \quad (4.14)$$

$$\forall y, g \quad e_{gy} \leq \bar{e}_g + \sum_{t=0}^y \bar{e}_{gt}^n \quad (4.15)$$

$$\forall y, g \quad h_{gy} \leq \bar{h}_g + \sum_{t=0}^y \bar{h}_{gt}^n \quad (4.16)$$

$$\forall g, y \quad e_{gy}, h_{gy}, \bar{e}_{gy}^n, \bar{h}_{gy}^n \geq 0 \quad (4.17)$$

Det antages, at der haves fuldkommen konkurrence, så priserne  $\pi_y^e$  og  $\pi_y^h$  jvf. afsnit 2.1 er givet ved de marginale omkostninger på sidst producerede enhed, som vil kunne findes, som lagrange multiplier til hhv. (4.13) og (4.14). I dette problem er efterspørgslen uelastisk, hvilket betyder, at  $N^e(D_y^e)$  og  $N^h(D_y^h)$  er konstante, og ikke vil påvirke løsningen. Jvf. afsnit 2 bør en partiel ligevægtsmodel kunne modellere elastisk efterspørgsel. Elastisk efterspørgsel kan repræsenteres på følgende vis [3]:

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{y=0}^m \left[ \frac{N^e(\Delta_y^{e+}, \Delta_y^{e-}) + N^h(\Delta_y^{h+}, \Delta_y^{h-})}{(1+r)^y} \right. \\ & \left. - \sum_g \left( \frac{C(e_{gy}, h_{gy})}{(1+r)^y} + \sum_{t=y}^m \frac{U_t(\bar{e}_{gy}^n, \bar{h}_{gy}^n)}{(1+r)^t} \right) \right] \\ \text{u.b.} \end{aligned} \quad (4.18)$$

$$\forall y \quad \sum_g e_{gy} = D_y^e + \Delta_y^{e+} - \Delta_y^{e-} \quad (4.19)$$

$$\forall y \quad \sum_g h_{gy} = D_y^h + \Delta_y^{h+} - \Delta_y^{h-} \quad (4.20)$$

$$\forall y, g \quad e_{gy} \leq \bar{e}_g + \sum_{t=0}^y \bar{e}_{gt}^n \quad (4.21)$$

$$\forall y, g \quad h_{gy} \leq \bar{h}_g + \sum_{t=0}^y \bar{h}_{gt}^n \quad (4.22)$$

$$\forall y \quad \Delta_y^{e+} \leq \bar{\Delta}_y^{e+} \quad (4.23)$$

$$\forall y \quad \Delta_y^{e-} \leq \bar{\Delta}_y^{e-} \quad (4.24)$$

$$\forall y \quad \Delta_y^{h+} \leq \bar{\Delta}_y^{h+} \quad (4.25)$$

$$\forall y \quad \Delta_y^{h-} \leq \bar{\Delta}_y^{h-} \quad (4.26)$$

$$\forall g, y \quad e_{gy}, h_{gy}, \bar{e}_{gy}^n, \bar{h}_{gy}^n, \Delta_y^{e+}, \Delta_y^{e-}, \Delta_y^{h+}, \Delta_y^{h-} \geq 0$$

Hvor  $\Delta$  er en ændring af efterspørgslen. Nyttens ved ændringen indgår i objekt-funktionen.

Denne model er en simpel partiel ligevægtsmodel, som modellerer en simpel kraftvarmesektor. Opstilles KKT-betingelserne [11] ses følgende at gælde for  $e_{gy}$  og  $\bar{e}_{gy}^n$  i optimum:

$$\forall g, y \quad e_{gy} \left( -\frac{\frac{\partial C}{\partial e_{gy}}(e_{gy}, h_{gy})}{(1+r)^y} - \pi_y^e - \theta_{gy}^e \right) = 0 \quad (4.27)$$

$$\forall g, y \quad \bar{e}_{gy}^n \left( -\sum_{t=y}^m \frac{\frac{\partial U_t}{\partial \bar{e}_{gy}^n}(\bar{e}_{gy}^n, \bar{h}_{gy}^n)}{(1+r)^t} + \sum_{t=y}^m \theta_{gt}^e \right) = 0 \quad (4.28)$$

$$\forall g, y \quad \theta_{gy}^e (e_{gy} - \sum_{t=0}^y \bar{e}_{gt}^n - \bar{e}_g) = 0 \quad (4.29)$$

Hvor  $\pi_y^e$  og  $\theta_{gy}^e$  er lagrange multiplier til hhv. (4.19) og (4.21), hvilket giver at  $\pi_y^e$  er fri og  $\theta_{gy}^e \geq 0$ .

De allerede afholdte omkostninger (sunk costs) indgår i objektfunktionen som konstanter, og vil derfor ikke påvirke løsningen, og kan derfor ses bort fra. Formuleres problemet som et LP problem vil  $\frac{C(e_{gy}, h_{gy})}{(1+r)^y} = \frac{C(e_{gy}) + C(h_{gy})}{(1+r)^y}$  og  $\frac{C(e_{gy})}{(1+r)^y} = \frac{\frac{\partial C}{\partial e_{gy}}(e_{gy})}{(1+r)^y} e_{gy}$  og tilsvarende  $\frac{U_t(\bar{e}_{gy}^n, \bar{h}_{gy}^n)}{(1+r)^t} = \frac{U_t(\bar{e}_{gy}^n) + U_t(\bar{h}_{gy}^n)}{(1+r)^t}$  og  $\frac{U_t(\bar{e}_{gy}^n)}{(1+r)^t} = \frac{\frac{\partial U_t}{\partial \bar{e}_{gy}^n}(\bar{e}_{gy}^n)}{(1+r)^t} \bar{e}_{gy}^n$  (4.27) og (4.28) kan således omskrives til:

$$\forall g, y \quad -\frac{C(e_{gy})}{(1+r)^y} - \pi_y^e e_{gy} - \theta_{gy}^e e_{gy} = 0 \quad (4.30)$$

$$\forall g, y \quad -\sum_{t=y}^m \frac{U_t(\bar{e}_{gy}^n)}{(1+r)^t} + \left( \sum_{t=y}^m \theta_{gt}^e \right) \bar{e}_{gy}^n = 0 \quad (4.31)$$

Ved at lægge (4.30) til (4.31) fås:

$$\begin{aligned} \forall g, y \quad -\pi_y^e e_{gy} - \frac{C(e_{gy})}{(1+r)^y} - \sum_{t=y}^m \frac{U_t(\bar{e}_{gy}^n)}{(1+r)^t} = \\ \theta_{gy}^e e_{gy} - \left( \sum_{t=y}^m \theta_{gt}^e \right) \bar{e}_{gy}^n \end{aligned} \quad (4.32)$$

Dette gælder for alle teknologier  $g$  og år  $y$ . Det må således også gælde for summen over årene:

$$\begin{aligned} \forall g \quad \sum_{y=0}^m -\pi_y^e e_{gy} - \sum_{y=0}^m \left[ \frac{C(e_{gy})}{(1+r)^y} + \sum_{t=y}^m \frac{U_t(\bar{e}_{gy}^n)}{(1+r)^t} \right] = \\ \sum_{y=0}^m \theta_{gy}^e e_{gy} - \sum_{y=0}^m \bar{e}_{gy}^n \left( \sum_{t=y}^m \theta_{gt}^e \right) \end{aligned} \quad (4.33)$$



Af (4.29) ses at gælde  $e_{gy} = \bar{e}_g + \sum_{t=0}^y \bar{e}_{gt}^n \Rightarrow \theta_{gy}^e \geq 0$  og  $e_{gy} < \bar{e}_g + \sum_{t=0}^y \bar{e}_{gt}^n \Rightarrow \theta_{gy}^e = 0$ . Dette betyder:

$$\sum_{y=0}^m \theta_{gy}^e e_{gy} = \sum_{y=0}^m \theta_{gy}^e (\bar{e}_g + \sum_{t=0}^y \bar{e}_{gt}^n) \quad (4.34)$$

Ved indsættelse af (4.34) i (4.33) fås :

$$\begin{aligned} \forall g \quad \sum_{y=0}^m -\pi_y^e e_{gy} - \sum_{y=0}^m \left[ \frac{C(e_{gy})}{(1+r)^y} + \sum_{t=y}^m \frac{U_t(\bar{e}_{gy}^n)}{(1+r)^t} \right] = \\ \sum_{y=0}^m \theta_{gy}^e (\bar{e}_g + \sum_{t=0}^y \bar{e}_{gt}^n) - \sum_{y=0}^m \bar{e}_{gy}^n \left( \sum_{t=y}^m \theta_{gt}^e \right) \end{aligned} \quad (4.35)$$

Hvilket omskrives til :

$$\begin{aligned} \forall g \quad \sum_{y=0}^m -\pi_y^e e_{gy} - \sum_{y=0}^m \left[ \frac{C(e_{gy})}{(1+r)^y} + \sum_{t=y}^m \frac{U_t(\bar{e}_{gy}^n)}{(1+r)^t} \right] = \\ \sum_{y=0}^m \theta_{gy}^e \left( \sum_{t=0}^y \bar{e}_{gt}^n \right) - \sum_{y=0}^m \bar{e}_{gy}^n \left( \sum_{t=y}^m \theta_{gt}^e \right) + \sum_{y=0}^m \theta_{gy}^e \bar{e}_g \end{aligned} \quad (4.36)$$

Idet

$$\begin{aligned} \sum_{y=0}^m \theta_{gy}^e \left( \sum_{t=0}^y \bar{e}_{gt}^n \right) = \\ \theta_{g0}^e (\bar{e}_{g0}^n) + \theta_{g1}^e (\bar{e}_{g0}^n + \bar{e}_{g1}^n) + \dots + \theta_{gm}^e (\bar{e}_{g0}^n + \bar{e}_{g1}^n + \dots + \bar{e}_{gm}^n) = \\ \bar{e}_{g0}^n (\theta_{g0}^e + \theta_{g1}^e + \dots + \theta_{gm}^e) + \bar{e}_{g1}^n (\theta_{g1}^e + \theta_{g2}^e + \dots + \theta_{gm}^e) + \dots + \bar{e}_{gm}^n (\theta_{gm}^e) = \\ \sum_{y=0}^m \bar{e}_{gy}^n \left( \sum_{t=y}^m \theta_{gt}^e \right) \end{aligned} \quad (4.37)$$

giver (4.36)

$$\forall g \quad \sum_{y=0}^m -\pi_y^e e_{gy} - \sum_{y=0}^m \left[ \frac{C(e_{gy})}{(1+r)^y} + \sum_{t=y}^m \frac{U_t(\bar{e}_{gy}^n)}{(1+r)^t} \right] = \sum_{y=0}^m \theta_{gy}^e \bar{e}_g \quad (4.38)$$

idet  $\theta_{gy}^e \geq 0$  og  $\bar{e}_g \geq 0$  er  $\sum_{y=0}^m \theta_{gy}^e \bar{e}_g \geq 0$ , der gælder altså:

$$\forall g \quad \sum_{y=0}^m -\pi_y^e e_{gy} - \sum_{y=0}^m \left[ \frac{C(e_{gy})}{(1+r)^y} + \sum_{t=y}^m \frac{U_t(\bar{e}_{gy}^n)}{(1+r)^t} \right] \geq 0 \quad (4.39)$$

Heraf ses, at idet udgifterne er modelleret negative må priserne  $\pi_y^e$  også være negative, så negative udgifter giver negative priser. Hvis der ses bort fra dette matematiske fænomen, således den "rigtige" pris  $-\pi_y^e$  skrives  $\pi_y^e$  og det huskes, at idet objektfunktionen tilbagediskonteres, er de priser som modellen giver også tilbagediskonterede, og burde egentligt skrives:  $\frac{\pi_y^e}{(1+r)^y}$  indses, at (4.39) hvis modelhorisonten  $m$  vælges tilstrækkelige høj, således alle udgifter på investeringen medtages, faktisk netop er  $NPV$ -værdien for hver teknologi:

$$\forall g \quad \sum_{y=0}^m \frac{\pi_y^e e_{gy}}{(1+r)^y} - \sum_{y=0}^m \left[ \frac{C(e_{gy})}{(1+r)^y} + \sum_{t=y}^m \frac{U_t(\bar{e}_{gy}^n)}{(1+r)^t} \right] \geq 0 \quad (4.40)$$

Fuldstændigt analogt kan vises, at  $NPV$ -værdierne for varme teknologierne er:

$$\forall g \quad \sum_{y=0}^m \frac{\pi_y^h h_{gy}}{(1+r)^y} - \sum_{y=0}^m \left[ \frac{C(h_{gy})}{(1+r)^y} + \sum_{t=y}^m \frac{U_t(\bar{h}_{gy}^n)}{(1+r)^t} \right] \geq 0 \quad (4.41)$$

og at de til enhver optimal løsning er positive, således en LP model formuleret på ovenstående vis vil altid foretage investeringer, hvor  $NPV$ -værdierne er positive.

Problemet med denne model er, at den ikke er realistisk, idet der i virkeligheden findes en betydelige mængde øvrige begrænsninger på produktionen. F. eks. er produktionen af el og varme på teknologierne ikke uafhængig af hinanden (jvf. afsnit 3.4).

## 4.2 Udvidet kraftvarme model

Udvides problemet (4.18) - (4.26) med en række begrænsninger, som beskriver sammenhængen mellem el / varme produktionen kan problemet formuleres således.

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{y=0}^m \left[ \frac{N^e(\Delta_y^{e+} - \Delta_y^{e-}) + N^h(\Delta_y^{h+} - \Delta_y^{h-})}{(1+r)^y} \right. \\ & \left. - \sum_g \left( \frac{C(e_{gy}, h_{gy})}{(1+r)^y} + \sum_{t=y}^{y+m} \frac{U_t(\bar{e}_{gy}^n, \bar{h}_{gy}^n)}{(1+r)^t} \right) \right] \\ \text{u.b.} \quad & \end{aligned} \quad (4.42)$$

$$\forall y \quad \sum_g e_{gy} = D_y^e + \Delta_y^{e+} - \Delta_y^{e-} \quad (4.43)$$

$$\forall y \quad \sum_g h_{gy} = D_y^h + \Delta_y^{h+} - \Delta_y^{h-} \quad (4.44)$$

$$\forall y, g \quad e_{gy} \leq \bar{e}_g + \sum_{t=0}^y \bar{e}_{gt}^n \quad (4.45)$$

$$\forall y, g \quad h_{gy} \leq \bar{h}_g + \sum_{t=0}^y \bar{h}_{gt}^n \quad (4.46)$$

$$\forall y \quad \Delta_y^{e+} \leq \bar{\Delta}_y^{e+} \quad (4.47)$$

$$\forall y \quad \Delta_y^{e-} \leq \bar{\Delta}_y^{e-} \quad (4.48)$$

$$\forall y \quad \Delta_y^{h+} \leq \bar{\Delta}_y^{h+} \quad (4.49)$$

$$\forall y \quad \Delta_y^{h-} \leq \bar{\Delta}_y^{h-} \quad (4.50)$$

$$\mathbf{A}^{i \times (4gy+4y)} \begin{bmatrix} \underline{e} \\ \underline{h} \\ \bar{e}^n \\ \bar{h}^n \\ \underline{\Delta} \end{bmatrix} \leq \underline{b} \quad (4.51)$$

$$\forall g, y \quad e_{gy}, h_{gy}, \bar{e}_{gy}^n, \bar{h}_{gy}^n, \Delta_y^{e+}, \Delta_y^{e-}, \Delta_y^{h+}, \Delta_y^{h-} \geq 0$$

hvor (4.51) repræsenterer disse begrænsninger. Antages det at  $\underline{\Delta}$  ikke indgår i de øvrige produktionsbegrænsninger således koefficienterne i  $\mathbf{A}$  er 0, hvilket betyder at  $\mathbf{A}^{i \times (4gy+4y)} \equiv \mathbf{A}^{i \times (4gy)}$ , kan (4.51) skrives på følgende vis:

$$\forall i \quad \sum_{g,y} [A_{i(gy)}^e e_{gy} + \bar{A}_{i(gy)}^e \bar{e}_{gy}^n + A_{i(gy)}^h h_{gy} + \bar{A}_{i(gy)}^h \bar{h}_{gy}^n] \leq b_i \quad (4.52)$$

Opstilles KKT-betingelser til den udvidede model, bliver (4.27) og (4.28) til

$$\forall g, y \quad e_{gy} \left( -\frac{\partial C}{\partial e_{gy}}(e_{gy}) - \pi_y^e - \theta_{gy}^e - \sum_i \lambda_i A_{i(gy)}^e \right) = 0 \quad (4.53)$$

$$\forall g, y \quad \bar{e}_{gy}^n \left( -\sum_{t=y}^m \frac{\partial U_t}{\partial \bar{e}_{gy}^n}(\bar{e}_{gy}^n) + \sum_{t=y}^m \theta_{gt}^e - \sum_i \lambda_i \bar{A}_{i(gy)}^e \right) = 0 \quad (4.54)$$

(4.29) forbliver uændret. Ved at udføre den samme udledning som tidligere bliver (4.38) til

$$\begin{aligned} \forall g \quad \sum_{y=0}^m \frac{\pi_y^e e_{gy}}{(1+r)^y} - \sum_{y=0}^m \left[ \frac{C(e_{gy})}{(1+r)^y} + \sum_{t=y}^m \frac{U_t(\bar{e}_{gy}^n)}{(1+r)^t} \right] = \\ \sum_{y=0}^m \theta_{gy}^e \bar{e}_g + \sum_i \lambda_i \left[ \sum_{y=0}^m (A_{i(gy)}^e e_{gy} + \bar{A}_{i(gy)}^e \bar{e}_{gy}^n) \right] \end{aligned} \quad (4.55)$$

Analogt fås for varme:

$$\begin{aligned} \forall g \quad \sum_{y=0}^m \frac{\pi_y^h h_{gy}}{(1+r)^y} - \sum_{y=0}^m \left[ \frac{C(h_{gy})}{(1+r)^y} + \sum_{t=y}^m \frac{U_t(\bar{h}_{gy}^n)}{(1+r)^t} \right] = \\ \sum_{y=0}^m \theta_{gy}^h \bar{h}_g + \sum_i \lambda_i \left[ \sum_{y=0}^m (A_{i(gy)}^h h_{gy} + \bar{A}_{i(gy)}^h \bar{h}_{gy}^n) \right] \end{aligned} \quad (4.56)$$

Ved at summere (4.55) og (4.56) fås:

$$\begin{aligned} \forall g \quad \sum_{y=0}^m \left[ \frac{\pi_y^e e_{gy}}{(1+r)^y} + \frac{\pi_y^h h_{gy}}{(1+r)^y} \right] - \\ \sum_{y=0}^m \left[ \frac{C(e_{gy}) + C(h_{gy})}{(1+r)^y} + \sum_{t=y}^m \frac{U_t(\bar{e}_{gy}^n) + U_t(\bar{h}_{gy}^n)}{(1+r)^t} \right] = \\ \sum_{y=0}^m \theta_{gy}^e \bar{e}_g + \sum_{y=0}^m \theta_{gy}^h \bar{h}_g + \\ \sum_i \lambda_i \left[ \sum_{y=0}^m (A_{i(gy)}^e e_{gy} + \bar{A}_{i(gy)}^e \bar{e}_{gy}^n + A_{i(gy)}^h h_{gy} + \bar{A}_{i(gy)}^h \bar{h}_{gy}^n) \right] \end{aligned} \quad (4.57)$$

Der gælder yderligere et sæt KKT-betingelser:

$$\begin{aligned} \forall i \quad \lambda_i \left[ \sum_{g,y} [A_{i(gy)}^e e_{gy} + \bar{A}_{i(gy)}^e \bar{e}_{gy}^n + \\ A_{i(gy)}^h h_{gy} + \bar{A}_{i(gy)}^h \bar{h}_{gy}^n] - b_i \right] = 0 \end{aligned} \quad (4.58)$$

hvilket kan omskrives til:

$$\forall i \quad \sum_g \lambda_i \left[ \sum_y [A_{i(gy)}^e e_{gy} + \bar{A}_{i(gy)}^e \bar{e}_{gy}^n + A_{i(gy)}^h h_{gy} + \bar{A}_{i(gy)}^h \bar{h}_{gy}^n] \right] = \lambda_i b_i \quad (4.59)$$

Hvis  $I_g$  betegner de begrænsninger, som involverer teknologi  $g$ , og  $G_g$  betegner de teknologier incl.  $g$  som indgår i  $I_g$ , kan fra (4.59) udledes følgende:

$$\forall g \quad \sum_{i \in I_g} \sum_{g \in G_g} \lambda_i \left[ \sum_y [A_{i(gy)}^e e_{gy} + \bar{A}_{i(gy)}^e \bar{e}_{gy}^n + A_{i(gy)}^h h_{gy} + \bar{A}_{i(gy)}^h \bar{h}_{gy}^n] \right] = \sum_{i \in I_g} \lambda_i b_i \quad (4.60)$$

og der kan fra (4.57) udledes følgende:

$$\begin{aligned} \forall g \quad & \sum_{g \in G_g} \left[ \sum_{y=0}^m \left[ \frac{\pi_y^e e_{gy}}{(1+r)^y} + \frac{\pi_y^h h_{gy}}{(1+r)^y} \right] - \right. \\ & \left. \sum_{y=0}^m \left[ \frac{C(e_{gy}) + C(h_{gy})}{(1+r)^y} + \sum_{t=y}^m \frac{U_t(\bar{e}_{gy}^n) + U_t(\bar{h}_{gy}^n)}{(1+r)^t} \right] \right] = \\ & \sum_{g \in G_g} \left[ \sum_{y=0}^m \theta_{gy}^e \bar{e}_g + \sum_{y=0}^m \theta_{gy}^h \bar{h}_g \right] + \\ & \sum_{g \in G_g} \sum_{i \in I_g} \lambda_i \left[ \sum_{y=0}^m (A_{i(gy)}^e e_{gy} + \bar{A}_{i(gy)}^e \bar{e}_{gy}^n + A_{i(gy)}^h h_{gy} + \bar{A}_{i(gy)}^h \bar{h}_{gy}^n) \right] \end{aligned} \quad (4.61)$$

Ved indsættelse af (4.60) i (4.61) fås følgende:

$$\begin{aligned} \forall g \quad & \sum_{g \in G_g} \left[ \sum_{y=0}^m \left[ \frac{\pi_y^e e_{gy}}{(1+r)^y} + \frac{\pi_y^h h_{gy}}{(1+r)^y} \right] - \right. \\ & \left. \sum_{y=0}^m \left[ \frac{C(e_{gy}) + C(h_{gy})}{(1+r)^y} + \sum_{t=y}^m \frac{U_t(\bar{e}_{gy}^n) + U_t(\bar{h}_{gy}^n)}{(1+r)^t} \right] \right] = \\ & \sum_{g \in G_g} \left[ \sum_{y=0}^m \theta_{gy}^e \bar{e}_g + \sum_{y=0}^m \theta_{gy}^h \bar{h}_g \right] + \sum_{i \in I_g} \lambda_i b_i \end{aligned} \quad (4.62)$$

Af (4.62) ses, at hvis kraftvarmemodellen udvides med  $\leq$ -betingelser med positiv højreside  $b_i \geq 0$ , således  $\lambda_i b_i \geq 0$ , eller betingelser, hvor højresiden  $b_i = 0$  er der garanti for, at  $NPV$ -værdien for eventuelle investeringer er positiv. Er teknologier uafhængige af hinanden, således  $G_g = \{g\}$  er  $NPV$ -værdien for enhver investering positiv sålænge modelhorisonten  $m$  vælges tilstrækkelige stor.

Jvf. afsnit 2 vil prisen i markedsligevægt mellem udbud og efterspørgsel være lig de langsigtede marginale omkostninger. I en model som ovenstående vil skyggeprisen på efterspørgselbegrænsningen være et udtryk for de marginale omkostninger. I de fleste perioder vil den være lig de kortsigtede marginale

produktionsomkostninger, men kan i perioder, hvor kapacitetsbegrænsningen er bindende også udtrykke investeringsomkostninger og derved blive de langsigtede marginale omkostninger. Da det antages, at de allerede afholdte udgifter på eksisterende kapacitet er dækket og  $NPV$ -værdien er positiv, vil investeringsudgifterne blive dækket. Det betyder, at prisen i de perioder, hvor den er på de kortsigtede marginale omkostninger, også er på de langsigtede marginale omkostninger, således langsigtede og kortsigtede marginale omkostninger i disse perioder er ens.

I det følgende vil prisen i perioder, hvor kapacitetsbegrænsningen er bindende, betegnes den langsigtede marginale omkostning. Og prisen vil i perioder, hvor kapacitetsbegrænsningen ikke er bindende, betegnes den kortsigtede marginale omkostning. Senere i rapporten indføres modeller, hvor  $NPV$ -værdien ikke nødvendigvis er positiv. Derfor er det praktisk at skelne mellem de to marginale omkostninger, selvom det, når  $NPV$ -værdien er positiv, er to sider af samme sag.

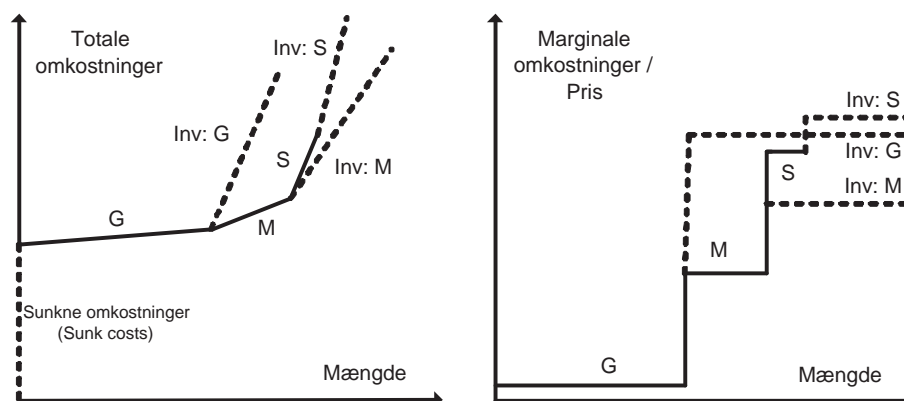
Hvis der haves flere perioder på et år, kan årsprisen jvf. afsnit 3.6 findes som et vægtet gennemsnit af priserne for hver enkelt periode. Anvendes skyggepriserne for efterspørgselsbegrænsningerne som udtryk for priserne på el og varme, giver årsprisen et ganske godt billede af en realistisk pris.

### 4.2.1 Marginale omkostninger og investeringer

Som tidligere nævnt kan skyggeprisen til ligevægtsbegrænsningerne opfattes som marginale omkostninger og dermed priser. I ovenstående model, er det muligt at investere i kapacitetsforøgelser. Et interessant spørgsmål er: Hvordan påvirker eventuelle investeringer så prisen i en sådan LP-model? Og hvad betyder det for fortolkningen af priserne? For at besvare de spørgsmål må det klarlægges, hvilke grunde til investeringer, der kan forekomme. Der kan forekomme 3 grunde til investeringer. Dette er illustreret på figur 4.1, som tager udgangspunkt i det simple eksempel fra afsnit 3.6.

Den første grund er, hvis det er billigere at investere og producere på en teknologi, end det er at producere på en anden eksisterende teknologi. Det ses på figur 4.1 ved, at teknologi  $M$ 's langsigtede marginale omkostning er mindre  $S$ 's kortsigtede. Modellen vil i dette tilfælde vælge at investere i denne billigere teknologi. De langsigtede marginale omkostninger, og dermed priserne vil være enhedsomkostninger + investeringsomkostninger, som vil være mindre end de kortsigtede marginale omkostninger på den dyrere teknologi. Hvis der haves flere forskellige efterspørgsler for et år, svarende til forskellige lastperioder, vil modellen investere i en kapacitetforøgelse, svarende til den største mængde, som efterspørges. Kapacitetsbegrænsningen i de øvrige lastperioder vil således ikke være bindende, og prisen vil kun bestå af de kortsigtede marginale omkostninger. Sammenlignet med en kørsel uden investeringer vil dette kunne ses som et fald i priserne.

Den anden grund til investeringer er analogt til den førnævnte. Men det kan forekomme, at en begrænsning på investeringskapaciteten betyder, at det ikke er muligt at investere tilstrækkeligt i den billige teknologi til at opfylde efter-



Figur 4.1: Eksempel på udbudskurven fra eksemplet i afsnit 3.6 når det tillades at investere i produktionskapacitet. Kortsigtede omkostninger er sammenhængende linier. Langsigtede omkostninger er stiplede. F. eks. ses at den langsigtede omkostning for  $M$  er mindre end den kortsigtede for  $S$ . En optimal løsning er derfor at investere i  $M$  fremfor at producere på  $S$ .  $M$ 's langsigtede marginale omkostning vil være prissættende i spidslast.  $M$ 's kortsigtede i de øvrige perioder. Hvis det ikke er muligt at opfylde hele efterspørgslen ved investering i  $M$ , vil  $S$  også producere.  $S$ 's kortsigtede omkostning vil da være prissættende. Hvis  $S$ 's kapacitet opbruges vil modellen investere i  $G$ , da  $G$ 's langsigtede marginale omkostninger er mindre end  $S$ .

spørgslen. Det kan være mangel på primærenergi, udledning af  $CO_2$  eller lign. På figur 4.1 ses, at hvis det ikke er muligt at opfylde hele efterspørgslen ved investering i  $M$ , så vil  $S$  stadig producere.  $S$ 's kortsigtede omkostning vil da stadig være prissættende. I dette tilfælde vil modellen stadig være tvunget til at producere på den dyre teknologi, og dermed vil denne teknologis kortsigtede marginale omkostning blive prissættende. Investeringen vil derfor ikke kunne ses på prisen.  $NPV$ -værdien vil i dette tilfælde stadig være positiv, idet prisen er højere end de langsigtede marginale omkostninger på den nye teknologi.

Den sidste grund til investering er investering pga. mangel på kapacitet. På figur 4.1 ses, at hvis  $S$ 's kapacitet opbruges og det ikke er muligt at opfylde hele efterspørgslen ved investering i  $M$ , så vil modellen investere i  $G$ , idet  $G$ 's langsigtede marginale omkostning er mindre end  $S$  langsigtede. Modellen vil investere i den billigste teknologi (incl. investeringsomkostning) indtil det ikke længere er muligt, derefter den næstbilligste osv. indtil efterspørgslen kan opfyldes. Denne type investeringer vil afspejles i prisen, som en prisstigning således  $NPV$ -værdien er positiv. Prisen vil være de langsigtede marginale omkostninger på den sidst producerede enhed.

### 4.3 Opsummering

I dette kapitel blev en simpel matematisk model, som modellerer udbud og efterspørgsel i kraftvarmesektoren, opstillet. Det blev bevist, at  $NPV$ -værdien for

investeringer foretaget at modellen altid er positiv. Den simple model blev udvidet med begrænsninger, som sikrer en mere realistisk sammenhæng mellem el- og varmeproduktionen. Det blev bevist, hvilke krav som skal være opfyldt for at *NPV*-værdien er positiv. Det blev bevist at hvis der blev indført  $\leq$ -betingelser med positiv højreside  $b_i \geq 0$ , eller betingelser, hvor højresiden  $b_i = 0$  er der garanti for, at *NPV*-værdien for investeringer i ny produktionskapacitet er positiv.

Efterfølgende blev det diskuteret, hvordan skyggepriserne for ligevægtsbegrænsningerne kan fortolkes som hhv. kortsigtede -og langsigtede marginale omkostninger. Dette vil blive anvendt ved udvidelsen af Balmorel.





## Kapitel 5

# Balmorel

Balmorel [1] er udviklet i perioden 1999 til 2000, og er siden blevet revideret i oktober 2002 og juli 2004. Balmorel står for ”**B**altic **M**odel of **R**egional **E**lectricity **L**iberalisation”. Formålet med Balmorel projektet er at udvikle en model, som kan simulere en liberaliseret kraftvarmesektor i et større geografisk område. Deltagerne i projektet er fra landene i den Baltiske Region<sup>1</sup>, så datasættet, som anvendes i modellen stammer fra dette område. Udviklingen af modellen er sket i et internationalt samarbejde ledet fra Danmark, og er bl.a. finansieret af Energistyrelsens Energiforskningsprogram.

Balmorel er en partiel ligevægtsmodel, hvilket vil sige, at efterspørgslen og priserne i modellen fastsættes udfra en ligevægt mellem udbud og efterspørgsel. At ligevægten er partiel skyldes, at ligevægtsprisen på varerne i modellen (el og varme) antages at være uafhængig af andre vare. Ligevægtsmodelleringen er baseret på en antagelse om, at de økonomiske forudsætninger for et frit marked med fuldkommen konkurrence eksisterer, som det er beskrevet i kapitel 2. Modellen kombinerer ”bottom up” elementer, som klassisk teknisk / økonomisk modellering med ”top down” elementer som økonometriske analyser. Balmorel er i kategori med andre partielle ligevægts energimodeller såsom PRIMES [25], EFOM [26] (Energy Flow Optimization Model) og TIMES [26] (The Integrated MARKAL-EFOM System). PRIMES er f. eks. blevet anvendt ved udformningen af Kyotoaftalen [25].

Balmorel anvendes primært som værktøj ved scenarieanalyser af kraftvarmesektoren. Det kan f.eks. være, hvordan en politisk beslutning om at undgå brugen af atomkraft vil påvirke prisen på el og varme. Det kunne også være at undersøge, hvilke konsekvenser en  $CO_2$ -afgift i Danmark har på investeringer i ny produktionskapacitet. Eller om det kan betale sig at lægge en transmissionsledning mellem Norge og Sjælland. Mulighederne er mange, og virksomheder som Elkraft System [27] [28] og COWI [28] har anvendt Balmorel som analyseværktøj i div. projekter.

Balmorel er i dens nuværende form en LP model (Lineær Programmering), hvilket betyder modellen udmærker sig fra de øvrige modeller ved at være hurtig

---

<sup>1</sup>Danmark, Norge, Sverige, Finland, (dele af) Rusland, Estland, Letland, Litauen, Polen og (dele af) Tyskland

at løse på en computer. Modellen er implementeret i GAMS (General Algebraic Modelling Language), og den er som open source frit tilgængelig på internettet (<http://www.balmorel.com>). For at kunne bruge modellen kræves det, at man har den nødvendige software til rådighed. Dvs. GAMS med tilhørende løser (solver). At modellen er implementeret i et modelleringssprog har både fordele og ulemper. De største fordele er, at der hurtigt opnås et godt overblik over modellens struktur, og at det er nemt at implementere ændringer i modellen, hvilket gør videre udvikling nemt. Dette kan dog også være en ulempe, for det er svært at vedligeholde en model i et modelleringssprog, når der sker en konstant autonom udviklingen. Desuden kan det være ret kompliceret at indarbejde modellen i andre systemer. Endelig bør det nævnes, at sproget GAMS ikke er frit tilgængeligt, og det betyder, at Balmorel kan miste nogle potentielle brugere ved at det er dyrt at anskaffe GAMS.

Balmorel består af flere dele. En inputstruktur, en outputstruktur, selve LP-modellen og en simuleringstruktur. Input består af et datasæt, samt en angivelse af de delmængder af datasættet, som det ønskes at simulere over. Datasættet udgøres af en række textfiler indeholdende GAMS datatyper, såsom sets, scalar, parametre og tabeller (se evt. "GAMS Users guide" [13]). Outputtet består af textfiler, som er skrevet i et format, der er nemt læseligt, og nemt kan læses af f.eks. Excel. Input og output er organiseret efter modellens dimensioner.

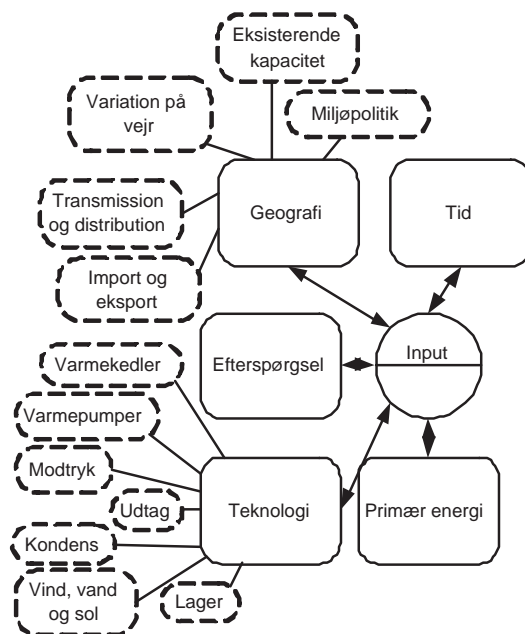
Balmorel kan i teorien anvendes på ethvert kraftvarme marked i verden, men det datasæt som følger med Balmorel, dækker på nuværende tidspunkt kun Østersøområdet (Figur 5.1).



Figur 5.1: Balmorel datasættet dækker landene omkring Østersøen: Danmark, Norge, Sverige, Finland, (dele af) Rusland, Estland, Letland, Litauen, Polen og (dele af) Tyskland.

## 5.1 Input

Input organiseres efter modellens dimensioner: Tid, geografi, primærenergier (de energikilder, der anvendes af teknologierne), teknologier og efterspørgsel. En fin, detaljeret beskrivelse af indholdet i GAMS datatyperne findes i [2]. Inputelementerne ses på figur 5.2.



Figur 5.2: Inputelementer til Balmorel.

### 5.1.1 Tid

Tiden inddeles i tre niveauer - år, sæsoner og tidsperioder. Hvert år er inddelt i sæsoner, og hver sæson er inddelt i tidsperioder. Det er muligt at vægte sæsonerne i et år forskelligt, således de kan tillægges forskellige fortolkninger. En måde at inddele året i, er f.eks. at have 12 sæsoner og vægte sæsonerne med antallet af dage i hver måned på et år, således hver sæson svarer til hver måned.

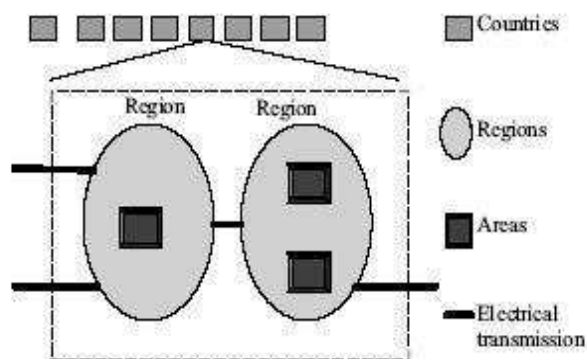
Tidsperioderne i hver sæson kan også vægtes, f.eks. kan vælges 3 perioder, med vægtene 9, 9, 6 svarende til den fordeling af timer på et døgn med hhv. lav-, høj- og spidslast som Treledstariffen benytter i vinterhalvåret (se tabel 3.2). Tidsperioder fortolkes ofte, som den andel af sæsonen med en bestemt efterspørgsel. Tiden i Balmorel kan altså opfattes på samme måde, som tiden bliver det i varighedskurver beskrevet i afsnit 3.3. Desuden er det muligt at angive, tidsperioder som hverdage og andre som weekenddage (fridage).

### 5.1.2 Geografi

Geografi opdeles på tre niveauer - Lande, regioner og områder. Sammenhængen er følgende: en region er inddelt i områder, og et land er inddelt i regioner. Der er ingen begrænsninger på antallet af områder en region kan indeholde, eller på antallet af regioner et land kan indeholde. Det geografiske er eksogent givet i modellen, hvilket gør det muligt at modellere det geografiske meget detaljeret.

#### Transmission og distribution

Foruden oplysninger om hvilke områder, regioner og lande, som er relaterede, findes også information om, hvordan de er forbundet i et eltransmissionsnet. Som figur 5.3 viser, sker eltransmission på regionsniveau. Elnettet er simpelt repræsenteret ved en linier strømningmodel.



Figur 5.3: Geografiindelingen og transmission i Balmorel [2].

Udveksles el mellem to regioner, er dette forbundet med en omkostning samt et tab ved overførslen. Tabet samt omkostningerne gives eksogent. Transmission indenfor en region betragtes som distribution, og er ubegrænset, men forbundet med et distributionstab.

Varme kan ikke transmitteres mellem regionerne og kan ikke distribueres mellem områderne. Distribution af varme sker indenfor hvert område, og er forbundet med et tab. Tabet i de forskellige områder er eksogent givet. Der findes altså et krav om at alle områder, som har en varmeefterspørgsel også indeholder teknologier, som kan opfylde denne efterspørgsel.

#### Import og eksport af el

Der findes to typer af import/eksport af el i modellen. Den første er mellem regioner jvf. overstående, og den anden er til lande udenfor modellen. Den im-

port/eksport, der foregår med lande udenfor modellen, er givet eksogent og er forbundet med en transmissionsomkostning. Import og eksport af el mellem regioner i modellen bestemmes endogent.

### Miljøpolitik

Der skal for hvert region og primærenergi angives mængden af primærenergien det er tilladt at anvende. Herudover angives en skat på en forbruget af primærenergi og en afgift på udledning af  $CO_2$ ,  $SO_2$  og  $NO_x$  i atmosfæren. Desuden angives en grænse for mængden af de tre gasser, der må udledes i atmosfæren.

### Variation på vejr

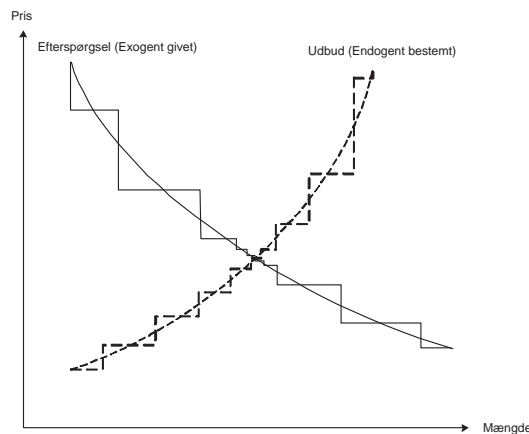
Visse teknologier, såsom vindkraft, vandkraft og solkraft er afhængig af vejret. Derfor angives en årstidsafhængig variation af disse teknologiers primærenergi (hhv. vind, vand og sol).

### Eksisterende kapacitet

Der skal på områdeniveau angives, hvilke kapaciteter, som findes. Det gøres ved for hver teknologi at angive en kapacitet. Hvis en teknologi ikke findes i et område er kapaciteten 0.

### 5.1.3 Efterspørgsel

Balmorel er en partiel ligevægtsmodel, hvilket vil sige, at energipriserne bestemmes som en ligevægt mellem udbud og efterspørgsel. Udbudskurverne for el og varme modelleres endogent i modellen, men den repræsentation af efterspørgselskurverne på el og varme, som anvendes i beregningerne, angives eksogent. Det gøres ved at angive de forskellige skridt på kurven (se figur 5.4). I



Figur 5.4: I Balmorel findes ligevægten mellem den modellerede udbudskurve og en repræsentation for efterspørgselskurven.

dokumentationen til Balmorel findes en redegørelse, for hvordan skridtene på efterspørgselskurven kan tilpasses ved at kalibrere modellen på historisk data [4].

### 5.1.4 Primærenergi

De forskellige typer primærenergier, som benyttes af teknologierne skal angives. De forskellige typer adskiller sig fra hinanden på egenskaber som pris og udledning af  $CO_2$ ,  $SO_2$  og  $NO_x$ . Disse karakteristika skal angives for hver primærenergi. Primærenergier er f. eks. olie, naturgas, affald, vind, vand, el, uran osv. På land-, region- og områdeniveau angives yderligere et primærenergi-potentiale, som angiver de mængder af primærenergi, som haves til rådighed i hhv. land, region og område. F. eks. er uran potentialet i Danmark og Norge 0, fordi disse lande ikke accepterer atomkraft.

### 5.1.5 Teknologier

Som input til Balmorel skal angives en liste over alle teknologier, som er til rådighed. For beskrivelser af teknologiers fysiske virkemåde henvises til afsnit 3.4. Teknologier angives med de egenskaber som karakteriserer teknologien:

- Type
- Hvilken type primærenergi der benyttes.
- $C_b$  og  $C_v$ -værdier (for de typer hvor det er relevant)
- Udnyttelsesgrad.
- Forureningsgrad
- Drift og vedligeholdelsesomkostninger.
- Investeringsomkostninger.
- Produktionsomkostninger.
- Om det er tilladt at investere i teknologien.
- Fra hvilket år teknologien er tilgængelig.
- Om teknologien er en kombinationsteknologi.

Kombinationsteknologier, skyldes at i virkeligheden findes teknologier, som har betydeligt flere egenskaber. Det kan f.eks. være teknologier, som kan anvende forskellige typer primærenergi. I Balmorel modelleres sådanne teknologier som en primært teknologi, med en eller flere, kombinationsteknologier tilknyttet. Hvilke teknologier som er knyttet sammen skal angives.

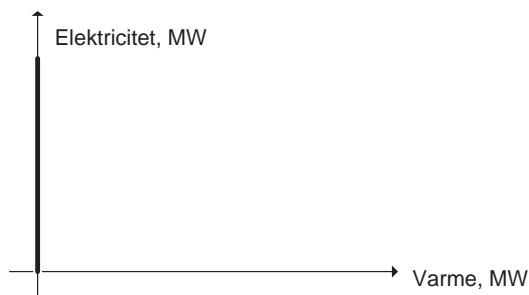
Typen af teknologi er meget vigtig, idet den bestemmer, hvordan teknologien håndteres i modellen. Dvs. hvilke produktionsmønstre er tilladte osv. Typerne er følgende:

- Kondens
- Modtryk
- Udtag
- Varmekedler

- Varmepumper
- Varmelager
- Ellager
- Vandkraft med reservoir
- Vandkraft med gennemstrømning
- Vindkraft
- Solkraft

### Kondens

Kondensanlæg er i Balmorel defineret som de teknologier, der har produktionsmønstre som angivet på figur 5.5. Dvs. at i Balmorel defineres et kondensanlæg

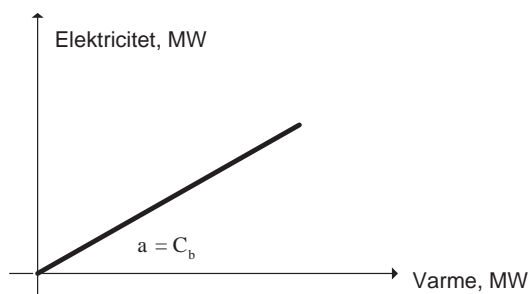


Figur 5.5: Graf over mulige produktionsmønstre for kondensanlæg.

som et anlæg, der kun producerer el. Det kunne være et combined cycle anlæg, hvilket kan være lidt forvirrende, idet et combined cycle anlæg i virkeligheden er en anden teknologi.

### Modtryk

Modtryksanlæg er i Balmorel defineret som de teknologier, der har produktionsmønstre som angivet på figur 5.6. Dvs. teknologier som producerer el og varme

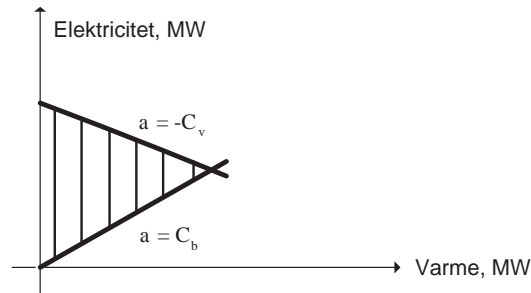


Figur 5.6: Graf over mulige produktionsmønstre for modtryksanlæg.

i et konstant forhold. Som det kan ses på grafen er det  $C_b$  koefficienten, der bestemmer forholdet. Dette kunne i modellen også være et combined cycleanlæg.

### Udtag

Udtagsanlæg er i Balmorel defineret som de teknologier, der har produktionsmønstre som angivet på figur 5.7. De teknologityper, som tilhører denne kategori



Figur 5.7: Graf over mulige produktionsmønstre for udtagsanlæg.

er karakteriseret ved, at der ikke er et fast forhold mellem el og varme produktionen. Som det ses på grafen bestemmes den mulige produktion af de to værdier,  $C_b$  og  $C_v$ .

### Varmekedler

Varmekedler er i Balmorel defineret som de teknologier, der har produktionsmønstre som angivet på figur 5.8. Dvs. det er anlæg, som kun producerer varme



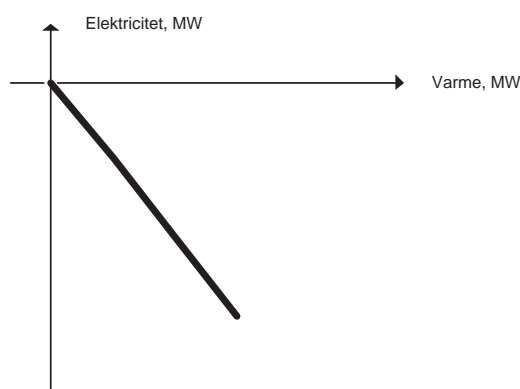
Figur 5.8: Graf over mulige produktionsmønstre for varmekedler.

og hvor det ikke er el, der bruges som primærenergi.

### Varmepumper

Varmepumper er i Balmorel defineret som de teknologier, der danner varme udfra el, og således har produktionsmønstre som på figur 5.9. Bemærk at dette inkluderer varmekedler som har el som primærenergi.

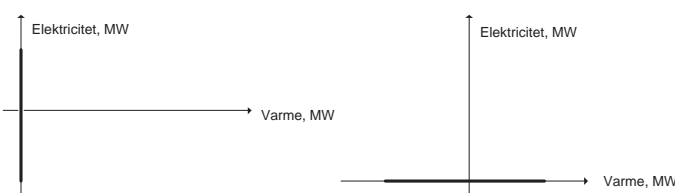




Figur 5.9: Graf over mulige produktionsmønstre for varmepumper.

### Varmelager og ellager

Teknologityperne varmelager og ellager er som navnet antyder lagerteknologier, der bruger / producerer afhængig af om hhv. varme og el fyldes på eller tages fra lageret. Det er korttidslagre, dvs. det er muligt gemme el og varme mellem tidsperioder i en sæson, ikke mellem sæsoner og år. Produktionsmønstre for hhv. el- og varmelager kan ses på figur 5.10



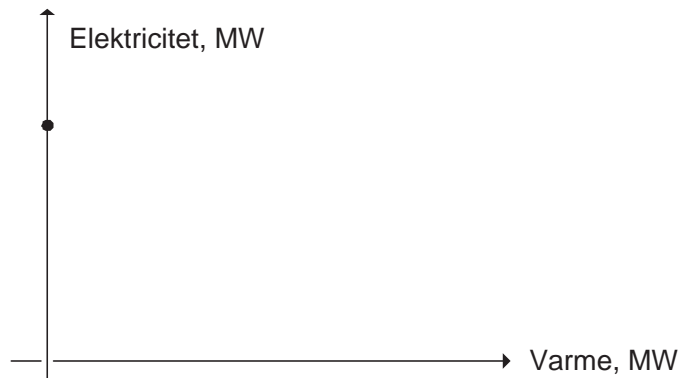
Figur 5.10: Grafer over mulige produktionsmønstre for el- og varmelagre. Ellageret er grafen til venstre.

### Vindkraft, solenergi og ureguleret vandkraft.

Disse teknologiers produktion angives eksplicit idet disse teknologier i Balmorel er defineret således at deres produktion følger de vejrvariationsprofiler, som er angivet i geografidelen af input. Produktionsmønstret for disse teknologier kan ses på figur 5.11. Bemærk at ureguleret vandkraft er gennemstrømning, beskrevet i afsnit 3.4.6.

### Reguleret vandkraft

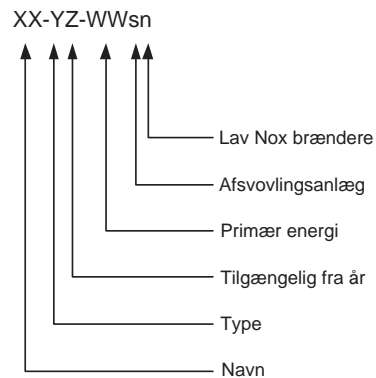
Reguleret vandkraft har mulighed for at opmagasinere vand og bruge det til elproduktion efter behov. Produktionsmønstret er altså det samme som for kondens, som kan ses på figur 5.5. Da reguleret vandkraft er vandkraft med reservoir, beskrevet i afsnit 3.4.6, modelleres teknologien ikke som kondens.



Figur 5.11: Grafen viser, hvordan vindkraft, vandkraft og solenergi producerer. Prikken angiver den på forhånd fastlagte produktionen.

### Navnekonvention

Når teknologier defineres er det en god ide, at følge den navnekonvention, som det nuværende datasæt lægger op til [27]. I det nuværende datasæt indeholder navnene oplysninger omkring teknologienes egenskaber. Navnekonvention kan ses på figur 5.12.



Figur 5.12: Navnekonvention for teknologier i det nuværende datasæt.[27]

”XX” angiver navnet på teknologien, som refererer til dens fysiske konstruktion:

- *ST*: Damp turbine
- *CC*: Combined Cycle
- *HY*: Vandkraft
- *WI*: Vindkraft
- *GT*: Gasturbine
- *HO*: Varmekedel

- *EH*: Elektrisk varmekedel
- *NU*: Atomkraft

”Y” angiver typen på teknologien, som referer til modelleringen i balmorel:

- *C*: Kondens
- *B*: Modtryk
- *E*: Udtag
- *B*: Varmekedler
- *P*: Varmepumper
- *S*: Vandkraft med reservoir (reguleret)
- *R*: Vandkraft med gennemstrømning (ureguleret)
- *L*: Vindkraft land
- *S*: Vindkraft vand (havmøller)
- *H*: Solkraft

Som det kan se er der ikke et unikt bogstav knyttet til en teknologi. Derfor er det en kombination af navn og type som unikt bestemmer en teknologi.

”Z” angiver årstallet en teknologi er til rådighed fra.

- *9*: 1990
- *0*: 2000
- *1*: 2010
- *2*: 2020
- osv.

”WW” angiver primærenergi:

- *NU*: Uran
- *NG*: Naturgas
- *CO*: Kul
- *FO*: Diesel olie
- *LO*: Let olie
- *OR*: Orimulsion
- *PE*: Tørv
- *MW*: Affald
- *ST*: Halm

- *WO*: Træ
- *WW*: Flis
- *W*: Vind
- *HY*: Vand
- *E*: El

”s” angives, hvis teknologien er udstyret med et afsvovningsanlæg, og ”n” angives, hvis teknologien er udstyret med lav- $\text{NO}_x$ -brændere eller de- $\text{NO}_x$ -anlæg. For vindmøller kan de sidste 2 pladser angive forskellige typer vindmøller [27].

GAMS sproget stiller ingen krav til at denne konvention overholdes, men gør tingene lidt nemmere at overskue. F. eks. er teknologien ”ST-B9-MW” en modtryksdampturbine som er til rådighed fra 1990, og som bruger affald som primærenergi.

### 5.1.6 Investeringer

Det er muligt at lade modellen investere i ny produktions- og transmissionskapacitet. Det antages at en investering finansieres af et fastrente annuitetslån, hvor løbetid og rente gives eksogent. En investering bliver foretaget, hvis de samlede omkostninger for hele produktionssystemet bliver mindre når der investeres, end hvis der ikke investeres. Eller der investeres, hvis det er nødvendigt for opfyldte efterspørgslen. De elementer der indgår i beslutningsprocessen er:

- Investeringsomkostninger.
- Drift og vedligeholdelsesomkostninger.
- Produktionsomkostninger.
- Udgifter til primærenergi incl. skatter og afgifter.
- Miljøskatter og afgifter

I udregningerne for den samlede omkostning for en investering bliver investeringsomkostningerne multipliceret med lånets annuitet. I modellen er renten sat til 5% og levetiden 20 år, hvilket giver en årlig annuitet på 8% af lånets størrelse. Det er i modellen ikke muligt at investere i alle typer teknologier i alle områder. Hvilke teknologier, som må investeres i angives eksogent. Men det er selvsagt et krav, at teknologiens primærenergi er til rådighed i et område, og miljøbegrænsninger ikke er overtrådt, hvis modellen skal investere en teknologi. Nogle teknologier er først til rådighed fra et bestemt årstal mm.

## 5.2 Modellen

Balmorel er en LP-model, hvilket vil sige, at den består af en lineær objektfunktion og et sæt lineære begrænsninger. Følgende er en matematisk formulering af modellen Balmorel. I formuleringen anvendes følgende notation:

- $s$ , Sæsoner
- $t$ , Tid
- $c$ , Lande
- $r$ , Regioner
- $a$ , Områder
- $g$ , Teknologi
- $e_{gcrast}$ , Elproduktion
- $h_{gcrast}$ , Varmeproduktion
- $\bar{E}_{gcra}$ , Exogent givet elkapacitet
- $\bar{H}_{gcra}$ , Exogent givet varmekapacitet
- $\bar{e}_{gcra}^n$ , Elkapacitetsforøgelse
- $\bar{h}_{gcra}^n$ , Varmekapacitetsforøgelse
- $\Delta_{crstu}^{e+}$ , Forøgelse i elefterspørgsel
- $\Delta_{crstd}^{e-}$ , Reduktion i elefterspørgsel
- $\Delta_{crastu}^{h+}$ , Forøgelse i varmeefterspørgsel
- $\Delta_{crastd}^{h-}$ , Reduktion i varmeefterspørgsel
- $\bar{X}_{(cr)(cr)_2}$ , Exogent givet ellexport (og import) kapacitet
- $x_{(cr)(cr)_2st}$ , Ellexport (og import)
- $\bar{x}_{(cr)(cr)_2}^n$ , Ellexport (og import) kapacitet

Balmorel kan med ovenstående notation formuleres som:

$$\begin{aligned}
\max \quad & \sum_{c,r,s,t} N^e(\Delta_{crst1}^{e+}, \dots, \Delta_{crstu}^{e+}, \Delta_{crst1}^{e-}, \dots, \Delta_{crstd}^{e-}) + \\
& \sum_{c,r,a,s,t} N^h(\Delta_{crast1}^{h+}, \dots, \Delta_{crastu}^{h+}, \Delta_{crast1}^{h-}, \dots, \Delta_{crastd}^{h-}) \\
& - \left[ \sum_{c,r,a,s,t} \sum_g C(e_{gcrast}, h_{gcrast}) + \sum_{c,r,a} \sum_g U(\bar{e}_{gcra}^n, \bar{h}_{gcra}^n) \right. \\
& \left. + \sum_{c,r,s,t} \sum_{c_2,r_2} T(x_{(cr)(cr)_2st}) + \sum_{c,r} \sum_{c_2,r_2} \bar{T}(\bar{x}_{(cr)(cr)_2}^n) \right] \quad (5.1)
\end{aligned}$$

*u.b.*

$$\begin{aligned}
\forall c, r, s, t \quad & \sum_{g,a} e_{gcrast} + \sum_{c_2,r_2} x_{(cr)_2(cr)st} = \sum_{c_2,r_2} x_{(cr)(cr)_2st} + D_{crst}^e + \\
& \sum_u \Delta_{crstu}^{e+} - \sum_d \Delta_{crstd}^{e-} \quad (5.2) \\
\forall c, r, a, s, t \quad & \sum_g h_{gcrast} = D_{crast}^h +
\end{aligned}$$

$$\sum_u \Delta_{crastu}^{h+} - \sum_d \Delta_{crastd}^{h-} \quad (5.3)$$

$$\forall g, c, r, a, s, t \quad e_{gcrast} \leq \bar{E}_{gcra} + \bar{e}_{gcra}^n \quad (5.4)$$

$$\forall g, c, r, a, s, t \quad h_{gcrast} \leq \bar{H}_{gcra} + \bar{h}_{gcra}^n \quad (5.5)$$

$$\forall g, c, r, c_2, r_2, s, t \quad x_{(cr)(cr)_2st} \leq \bar{X}_{(cr)(cr)_2} + \bar{x}_{(cr)(cr)_2}^n \quad (5.6)$$

$$\forall c, r, a, s, t, u \quad \Delta_{crastu}^{e+} \leq \bar{\Delta}_{crastu}^{e+} \quad (5.7)$$

$$\forall c, r, a, s, t, d \quad \Delta_{crastd}^{e-} \leq \bar{\Delta}_{crastd}^{e-} \quad (5.8)$$

$$\forall c, r, a, s, t, u \quad \Delta_{crastu}^{h+} \leq \bar{\Delta}_{crastu}^{h+} \quad (5.9)$$

$$\forall c, r, a, s, t, d \quad \Delta_{crastd}^{h-} \leq \bar{\Delta}_{crastd}^{h-} \quad (5.10)$$

$$\begin{aligned} \forall i \quad & \sum_{g,c,r,a,s,t} [A_{i(gcrast)}^e e_{gcrast} + A_{i(gcrast)}^h h_{gcrast}] \\ & + \sum_{g,c,r,a} [\bar{A}_{i(gcra)}^e \bar{e}_{gcra}^n + \bar{A}_{i(gcra)}^h \bar{h}_{gcra}^n] \\ & + \sum_{c,r,c_2,r_2,s,t} [A_{i((cr)(cr)_2st)}^x x_{(cr)(cr)_2st}] \\ & + \sum_{c,r,c_2,r_2} [\bar{A}_{i((cr)(cr)_2)}^x \bar{x}_{(cr)(cr)_2}^n] \leq b_i \quad (5.11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \forall g, c, r, c_2, r_2, a, s, t, u, d \quad & e_{gcrast}, h_{gcrast}, \bar{e}_{gcra}^n, \bar{h}_{gcra}^n, \\ & \Delta_{crastu}^{e+}, \Delta_{crastd}^{e-}, \Delta_{crastu}^{h+}, \Delta_{crastd}^{h-}, \\ & x_{(cr)(cr)_2st}, \bar{x}_{(cr)(cr)_2}^n \geq 0 \end{aligned}$$

Hvis det ses bort fra transmissionsforbindelserne, kan den oprindelige model i Balmorel opfattes som et specialtilfælde af den udvidede kraftvarmemodel fra afsnit 4.2, med en modelhorisont på 1 år.

Objektfunktionen er sammensat af ændringen i nytte  $N$  og udgifter  $C$ ,  $U$ ,  $T$  og  $\bar{T}$ , som består af følgende elementer:

- Omkostninger på primærenergi ( $C$ )
- Drift og vedligeholdelsesomkostninger ( $C$ )
- Udgifter ved vandkraft med reservoir ( $C$ )
- Transmissionsudgifter ( $T$ )
- Investeringsudgifter (kapacitet:  $U$ , transmission:  $\bar{T}$ )
- Forureningsafgifter ( $C$ )
- Skatter på primærenergi ( $C$ )
- Forbrugernytte ( $N$ )

Begrænsningerne sikrer at følgende opfyldes:

- Ligevægt mellem produktion og efterspørgsel (5.2) og (5.3).
- Kapacitetsbegrænsninger på alm. teknologier (5.4) og (5.5) og kombinationsteknologier.
- Produktionsbetingelser på de forskellige teknologityper (5.11).
- Produktion på vind, sol og vand følger årsvariationen (5.11).
- Lagerbegrænsninger (5.11).
- Transmissionsbegrænsninger (5.11).
- Emissionsbegrænsninger (5.11).

En fuldstændig matematisk model ses på Bilag A. Interessant er det at bemærke at modellen kun beskriver 1 år. For evt. investeringer, som foretages, gælder egenskaberne bevist for den udvidede kraftvarmemodel altså kun for dette ene år. Der er altså kun garanti for, at investeringer foretaget af den oprindelige model er fornuftige indenfor dette år, og ikke nødvendigvis over flere år. Dette er et de punkter, hvor den oprindelige Balmorel er blevet kritiseret.

### 5.3 Simuleringsstruktur

Til trods for, at selve modellen kun beskriver et år, er det i Balmorel muligt at simulere flere år. Det gøres vha. en simuleringsstruktur, der løser modellen et år ad gangen, overfører information om kapacitetsforøgelse og transmissionsforøgelse til året efter, og løser modellen igen. Helt konkret bliver  $\bar{E}_{gcr a}$  i år  $y + 1$  sat lig  $\bar{E}_{gcr a} + \bar{e}_{gcr a}^n$  for år  $y$ .  $\bar{H}_{gcr a}$  for år  $y + 1$  bliver sat lig  $\bar{H}_{gcr a} + \bar{h}_{gcr a}^n$  for år  $y$ , og  $\bar{X}_{(cr)(cr)_2}$  for år  $y + 1$  bliver sat lig  $\bar{X}_{(cr)(cr)_2} + \bar{x}_{(cr)(cr)_2}^n + \bar{x}_{(cr)_2(cr)}^n$  for år  $y$ .

Figur 5.13 viser et flowdiagram over simuleringsstrukturen i Balmorel. Den endelige løsning findes ved at løse en række LP-problemer, hvor hvert problem beskriver kraftvarmesektoren i et år. Når flere år løses overføres en del af løsningen i det ene år, som input i det næste osv.

### 5.4 Output

Outputtet består af resultaterne fra løsningerne til modellen, hvilket inkluderer emner som

- Priser.
- Kapacitetsforøgelse
- Produktionsplanen.
- Forbrug af primærenergi.
- Emission

- Information om transmissionsnettet.
- Fejl og advarsler.

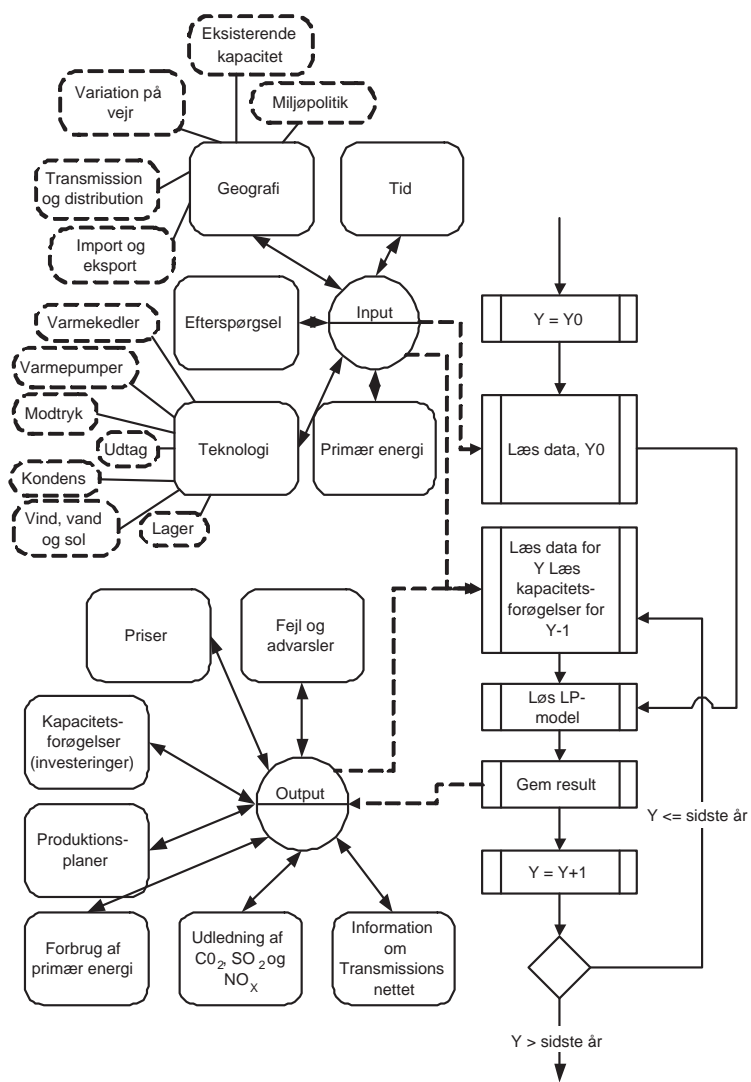
Hvor det er muligt specificeres emnerne på årsbasis og på sæson og tidsperiode. Derudover findes informationer om selve løsningsprocessen og information om eventuelle fejl eller inkonsistenser i input.

Priserne er skyggepriserne til ligevægtsbetingelserne (5.2) og (5.3), og deres fortolkning er den samme som angivet i afsnit 4.2. Nemlig at priserne er de kortsigtede marginale omkostninger, undtagen i de spidslastperioder, hvor kapacitetsbegrænsningerne bliver bindende. I de perioder bliver investeringsomkostningen lagt til prisen, og derved bliver prisen de langsigtede marginale omkostninger. De langsigtede marginale omkostninger dækker dog kun investeringsudgifterne i det ene år hvor investeringen foretages. *NPV*-værdien for en længere årrække kan derfor ikke garanteres at være positiv. Priserne gives på sæson og tidsperiode. Årsprisen findes som det vægtede gennemsnit.

## 5.5 Opsummering

De vigtigste elementer i Balmorel er beskrevet, og den matematiske struktur er vist. Som det fremgår er Balmorel en lineær model med repræsentation af produktion, transmission / distribution og forbrug af el og varme. Modellen sigter mod at beskrive et stort geografisk område og en lang tidshorisont, hvorfor bl.a. internationale forhold og endogene investeringsmuligheder er repræsenteret. Investeringsbeslutninger i et givet år foretages på baggrund af dette år, modellen har derfor på dette område en relativ simpel virkemåde.





Figur 5.13: Flowdiagram over Balmorel.



## Kapitel 6

# Udvidelse af Balmorel

I Balmorel kan medtages investeringer. Balmorel foretager på samme måde, som den udvidede kraftvarmemodel i afsnit 4.2, investeringer af 3 årsager. De 2 første er, hvis omkostningerne ved en investering, inklusiv produktions- og investeringsomkostninger, er mindre end produktionsomkostningerne på en eksisterende teknologi det år som simuleres. Den tredje er, hvis efterspørgslen er så stor, at modellen er tvunget til at investere for at kunne opfylde den.

Beslutningen om at investere foretages på baggrund af det ene år, som simuleres. Det er imidlertid ikke realistisk at beslutte investeringer med så kort tidshorisont når investeringens levetid er lang (ofte 20 år eller mere), og da der kun betragtes 1 år, er der ingen garanti for at investeringer foretaget af modellen, er fornuftige set over en længere årrække.

Et eksempel er et scenarie, hvor der i et år haves stor overkapacitet på el og i det næste år mangel på elkapacitet. Det ville kunne ske, hvis f.eks. et atomkraftværk lukker. I et sådan scenarie kan den nuværende model finde en løsning, som i det ene år investerer i varmepumper og i det næste må investere i overkapacitet på el, for at kunne udnytte varmepumperne. I det ene år investeres i varmepumper, som er billige, fordi de udnytter den billige el, som fremkommer pga. den ekstra elkapacitet. Da elkapaciteten forsvinder året efter, vil elpriserne stige. Derfor er det sandsynligvis en dårlig investering, fordi varmepumperne i de næste år ikke kan udnyttes. I dette tilfælde vil det sandsynligvis være bedre, enten at investere i modtryks- eller udtagsanlæg, som både producerer el og varme, eller investere i varmekedler, som kan opfylde varmeefterspørgslen.

Dette problem kan løses ved at øge den tidshorisont, som anvendes ved løsningen af hvert år, således det bliver synligt for modellen at kapaciteten forsvinder, og der på den baggrund kan tages mere fornuftige beslutninger. Tidshorisonten angiver det antal år, som anvendes ved løsningen af hvert år. Når tidshorisonten øges giver det anledning til yderligere ændringer, som kan forbedre modellens håndtering af investeringer. Jvf. kapitel 2 indføres en diskonteringsrente, en levetid på kapacitetsforøgelser og en skrotværdi når levetiden er udløbet.

Et andet problem i den oprindelige Balmorel er, at mange teknologier i virkeligheden bygges i bestemte kapacitetsstørrelser. Det er derfor ikke nødvendigvis

realistisk, når kapacitetsforøgelsen i Balmorel kan antage alle værdier. Derfor indføres muligheden for diskrete investeringer i bestemte kapacitetsstørrelser. Fordelen ved modelleringen i den oprindelige Balmorel, er især at den er simple og at regnetiden er kortere. Denne mulighed fjernes derfor ikke, idet modellen stadig kan løses relaxeret som en LP model.

Dette projekt består i at forbedre Balmorel på disse områder. For at gøre dette kræves ændringer i input, modellen, simuleringsstrukturen samt løsningsalgoritmen. De følgende afsnit beskriver de ændringer, som er implementeret i Balmorel for at opnå forbedringerne, samt hvordan de er modelleret. En samlet liste over ændringerne er:

- Levetid på investeringer, samt skrotværdi på teknologier.
- Diskonteringsrente og lånerente.
- Længere tidshorisont, samt ekstra begrænsninger, som sikrer at modellen med en længere tidshorisont er korrekt.
- Økonomisk levetid på transmissionsforbindelser.
- Mere fleksibel simuleringsstruktur.
- Mulighed for diskrete investeringer.
- Anvendelse af heltalsløsningsalgoritme.

## 6.1 Udvidelse af Input

### 6.1.1 Teknologier

For at kunne modellere levetid på investeringer, skrotværdi, diskrete investeringer osv. skal information om levetiden, skrotværdi og den kapacitetsforøgelse, som er mulig ved diskrete investeringer, angives for hver primær teknologi. Hvis det koster penge at skrotte en teknologi, er skrotværdien negativ. På bilag C ses værdier, som er indført på hver enkelt teknologi i det eksisterende datasæt. Desuden indføres en default levetid, som anvendes, hvis levetiden angives som *na* (not available).

### 6.1.2 Transmissionsforbindelser

Transmissionsforbindelsers levetid er meget lang. Den overstiger ofte 50 år, hvilket er længere end Balmorel normalt simulerer frem i tiden. Derfor indføres ikke en levetid, som for teknologier. Til gengæld indføres en økonomisk levetid på transmissionsforbindelser, som angiver løbetiden på lån til transmissionsforbindelser.

### 6.1.3 Geografi

I den oprindelige model bliver investeringer finansieret på baggrund af 5 % annuitetslån med en løbetid på 20 år. Ydelsen angives som en andel af finansieringsudgiften. En mere realistisk måde at angive input er ved at angive en lånerente ( $r_i$ )

og anvende teknologiernes levetid som løbetid på lånet. Hvis levetiden angives som *na* (not available), anvendes en default levetid. På transmissionsforbindelser anvendes den økonomiske levetid for transmissionsforbindelser. I stedet for at angive en annuitet, angives nu en lånerente  $r_c^i$  for hvert land, og annuiteten beregnes automatisk vha. annuitetsformlen:

$$\text{”annuitet”} = \frac{r_c^i}{1 - (1 + r_c^i)^{-l_g}} \quad (6.1)$$

Hvor  $l_g$  angiver levetiden for teknologi  $g$ .

Desuden indføres en diskonteringsrente ( $r_c$ ) for hvert land, som anvendes til tilbage diskontering ved økonomiske beregninger over flere år.

## 6.2 Udvidelse af Modellen

I modellen er foretaget flere udvidelser, for at opnå den ønskede modellering. Tidshorisonten er øget, således det er muligt at modellere flere år på en gang. Modellen er derfor udvidet med flere begrænsninger, som binder årene sammen. Omkostninger i objektfunktionen tilbagediskonteres, og der indføres heltalsvariable, som gør det muligt at foretage diskrete investeringer. Desuden indføres levetid på investeringer, så de forsvinder igen når levetiden udløber, samt udbetaling af en skrotværdi, når levetiden udløber.

### 6.2.1 Liste over betegnelser

En længere tidshorisont opnås ved at udvide modellen med et ekstra årsindex på variablene og begrænsninger som gælder for disse år. Desuden indføres et sæt begrænsninger, som sikrer at eventuelle kapacitetsforøgelser, som tidligere blev overført af simuleringsstrukturen mellem hver løsning, nu bliver modelleret. Det nye indeks angives  $y$ . Bemærk at der beholdes en simuleringsstruktur, der gør det muligt at finde en løsning til flere år end modellen opbygges på. Modelårene betegnes  $Y^{mod}$ . Simuleringsårene betegnes  $Y^{sim}$ . I den følgende model gælder, at hvis der refereres til variable, som er udenfor modelårene opfattes de som konstanter, der udtrykker beslutninger taget af modellen ved en tidligere løsning. Den samlede liste over betegnelser bliver:

- $s$ , Sæsoner
- $t$ , Tid
- $y$ , År
- $Y^{sim}$ , Mængde af år, som der simuleres over.
- $Y^{mod}$ , Mængde af år, som modellen opbygges på ( $Y^{mod} \subseteq Y^{sim}$ ).
- $c$ , Lande
- $r$ , Regioner
- $a$ , Områder

- $g$ , Teknologi
- $r_c^i$ , Lånerente i land  $c$ .
- $r_c$ , Diskonteringsrente i land  $c$ .
- $\bar{E}_{gcray}$ , Exogent givet elkapacitet
- $\bar{H}_{gcray}$ , Exogent givet varmekapacitet
- $U_g^{e,inv}$ , Investeringsudgift pr. elkapacitetsforøgelse.
- $U_g^{h,inv}$ , Investeringsudgift pr. varmekapacitetsforøgelse.
- $U_g^{e,scrp}$ , Skrotværdi pr. elkapacitetenhed, som skrottes.
- $U_g^{h,scrp}$ , Skrotværdi pr. varmekapacitetenhed, som skrottes.
- $e_{gcrasty}$ , elproduktion
- $h_{gcrasty}$ , varmeproduktion
- $\bar{e}_{gcray}^n$ , Elkapacitetsforøgelse
- $\bar{h}_{gcray}^n$ , Varmekapacitetsforøgelse
- $\bar{e}_{gcray}$ , Elkapacitetsforøgelsen korrigeret for skrottet kapacitet pga. levetid indtil (men ikke med)  $y$ .
- $\bar{h}_{gcray}$ , Varmekapacitetsforøgelse korrigeret for skrottet kapacitet pga. levetid indtil (men ikke med)  $y$ .
- $\bar{e}_{gcray}^{tot}$ , Den totale elkapacitetsforøgelse (uden skrottet kapacitet pga. levetid) indtil (men ikke med)  $y$ .
- $\bar{h}_{gcray}^{tot}$ , Den totale varmekapacitetsforøgelse (uden skrottet kapacitet pga. levetid) indtil (men ikke med)  $y$ .
- $\Delta_{crsty}^{e+}$ , Forøgelse i elefterspørgsel
- $\Delta_{crsty}^{e-}$ , Reduktion i elefterspørgsel
- $\Delta_{crasty}^{h+}$ , Forøgelse i varmeefterspørgsel
- $\Delta_{crasty}^{h-}$ , Reduktion i varmeefterspørgsel
- $\bar{X}_{(cr)(cr)_2}$ , Exogent givet elexport (og import) kapacitet
- $\bar{x}_{(cr)(cr)_2}^n$ , Elexport (og import) kapacitet
- $x_{(cr)(cr)_2sty}$ , Elexport
- $l_g$ , Teknisk (økonomisk) levetid for teknologi  $g$ .

Alle begrænsninger gentages for alle  $y$  og objektfunktionen udvides, således den summerer over  $y$ .

### 6.2.2 Investeringer

I den oprindelige objektfunktion (5.1) var det tilstrækkeligt at medtage udgifterne ved en investering for et år, men når tidshorizonten udvides, skal udgifter ved en investering medtages for alle årene i modellen. Det antages, at alle investeringer finansieres ved et fastrente annuitetslån med en løbetid på teknologiens tekniske levetid. Teknologiernes tekniske levetid og økonomiske levetid er derfor ens. Afdragene på lånene falder 1. januar hvert år i levetiden.

Foretages en investering i et år, er den til rådighed fra 1. januar i det år, og den forsvinder ved udgangen af det sidste år i levetiden. Hvis der investeres i år 2000 og levetiden er 10 år, forsvinder kapaciteten ved udgangen af år 2009. Teknologiens skrotværdi udbetales (eller betales, hvis skrotværdien er negativ) i starten af året umiddelbart efter levetiden udløber. Altså 1. januar år 2010.

#### Investeringer i teknologier

For at få alle udgifter ved en investering med, udvides modellen med 2 variable:

- $\bar{e}_{gcray}$ , Elkapacitetsforøgelsen korrigeret for skrottet kapacitet pga. levetid indtil (men ikke med)  $y$ .
- $\bar{h}_{gcray}$ , Varmekapacitetsforøgelse korrigeret for skrottet kapacitet pga. levetid indtil (men ikke med)  $y$ .

Investeringsudgiften er givet som en konstant teknologiafhængig investeringsudgift pr. kapacitetsenhed (hhv.  $U_g^{e,inv}$  og  $U_g^{h,inv}$ ). Investeringsudgifterne er derfor ligefrem proportional med kapacitetsforøgelserne. Da teknologiernes økonomiske levetid svarer til deres tekniske levetid, beregnes den årlige investeringsudgift:

$$\frac{r_c^i (U_g^{e,inv} [\bar{e}_{gcray} + \bar{e}_{gcray}^n] + U_g^{h,inv} [\bar{h}_{gcray} + \bar{h}_{gcray}^n])}{1 - (1 + r_c^i)^{-l_g}} \quad (6.2)$$

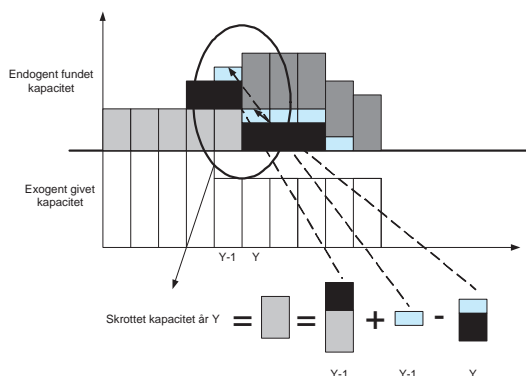
Når investeringens levetid udløber, skal der herfra trækkes en evt. skrotværdi (hhv.  $U_g^{e,scrp}$  og  $U_g^{h,scrp}$ ), der er en konstant givet som skrotværdi pr. kapacitetsenhed.  $\bar{e}_{gcray}$  er korrigeret for evt. skrottet kapacitet. Derfor kan den årlige mængde skrottet kapacitet, findes som differencen mellem kapaciteten i det forgående år og kapaciteten i det nuværende år:  $\bar{e}_{gcray(y-1)} + \bar{e}_{gcray(y-1)}^n - \bar{e}_{gcray}$  (tilsvarende for varme). Dette er illustreret på figur 6.1.

Den årlige skrotindtægt (eller udgift hvis skrotværdien er negativ) bliver således:

$$\begin{aligned} & U_g^{e,scrp} [\bar{e}_{gcray(y-1)} + \bar{e}_{gcray(y-1)}^n - \bar{e}_{gcray}] + \\ & U_g^{h,scrp} [\bar{h}_{gcray(y-1)} + \bar{h}_{gcray(y-1)}^n - \bar{h}_{gcray}] \end{aligned} \quad (6.3)$$

i alt fås således:

$$\sum_{y \in Y^{mod}} U(\bar{e}_{gcray}^n, \bar{h}_{gcray}^n) =$$



Figur 6.1: Den årlige mængde skrottet kapacitet findes som differensen mellem totale endogen kapacitet korrigeret for skrottet kapacitet i det forgående år og endogen kapacitet korrigeret for skrottet kapacitet i det nuværende år overført fra forgående år. En eventuel ny investering foretaget i det nuværende år indgår ikke beregningerne. Der ses bort fra skrotning af exogen kapacitet, da det ikke påvirker løsningen at indføre skrotværdi på dette.

$$\begin{aligned}
 \sum_{y \in Y^{mod}} & \left[ \frac{r_c^i (U_g^{e,inv} [\bar{e}_{gcray} + \bar{e}_{gcray}^n] + U_g^{h,inv} [\bar{h}_{gcray} + \bar{h}_{gcray}^n])}{1 - (1 + r_c^i)^{-l_g}} \right] \\
 & - \sum_{y \in Y^{mod}} \left[ U_g^{e,scrp} [\bar{e}_{gcray(y-1)} + \bar{e}_{gcray(y-1)}^n - \bar{e}_{gcray}] \right. \\
 & \quad \left. + U_g^{h,scrp} [\bar{h}_{gcray(y-1)} + \bar{h}_{gcray(y-1)}^n - \bar{h}_{gcray}] \right] \quad (6.4)
 \end{aligned}$$

Der ses bort fra skrotning af exogen kapacitet, da det ikke påvirker løsningen at indføre skrotværdi på dette. Bemærk at variable med index  $(y-1) \notin Y^{mod}$  men  $(y-1) \in Y^{sim}$  opfattes som konstanter og ikke variable. Hvis det ønskes at skrotværdien ved en investering, skal påvirke løsningen, skal hele investeringens levetid være indeholdt i  $Y^{mod}$ , ellers indgår skrotværdien som en konstant, der ikke påvirker løsningen.

For at ovenstående virker, skal levetid på investeringer modelleres, således at kapaciteten forsvinder, når levetiden udløber. For at gøre dette udvides modellen yderligere med 2 variable:

- $\bar{e}_{gcray}^{tot}$ , Den totale elkapacitetsforøgelse (ikke korrigeret for skrottet kapacitet pga. levetid) indtil (men ikke med)  $y$ .
- $\bar{h}_{gcray}^{tot}$ , Den totale varmekapacitetsforøgelse (ikke korrigeret for skrottet kapacitet pga. levetid) indtil (men ikke med)  $y$ .

og følgende begrænsninger indføres:

$$\forall g, c, r, a, s, t, y \in Y^{mod} \quad \bar{e}_{gcray(y+1)} = \bar{e}_{gcray}^{tot} - \sum_{y_2=0}^{y-l_g} (\bar{e}_{gcray}^n) + \bar{e}_{gcray}^n \quad (6.5)$$



$$\forall g, c, r, a, s, t, y \in Y^{mod} \quad \bar{h}_{gcra(y+1)} = \bar{h}_{gcray}^{tot} - \sum_{y_2=0}^{y-l_g} (\bar{h}_{gcray}^n) + \bar{h}_{gcray}^n \quad (6.6)$$

Bemærk at problemet ikke indeholder frie variable, idet variable med index  $y \notin Y^{mod}$  opfattes som konstanter. Udtrykket  $\sum_{y_2=0}^{y-l_g} (\bar{e}_{gcray}^n)$  kunne også skrives  $\sum_{y_2 \in Y^{mod}} (\bar{e}_{gcray}^n) + \sum_{y_2 \in Y^{sim} \setminus Y^{mod}} (\bar{e}_{gcray}^n)$ , hvor det første led er investeringer endogent besluttet udenfor modelårene, og derfor opfattes som konstanter (tilsvarende for varme).

$$\forall g, c, r, a, s, t, y \in Y^{mod} \quad \bar{e}_{gcra(y+1)}^{tot} = \bar{e}_{gcray}^{tot} + \bar{e}_{gcray}^n \quad (6.7)$$

$$\forall g, c, r, a, s, t, y \in Y^{mod} \quad \bar{h}_{gcra(y+1)}^{tot} = \bar{h}_{gcray}^{tot} + \bar{h}_{gcray}^n \quad (6.8)$$

Da de totale kapacitetsvariable er afhængig af eventuelle investeringer foretaget uden for modelårene, indføres følgende startbegrænsninger. Det første år i  $Y^{mod}$  betegnes  $y_0^{mod}$ . Det første år i  $Y^{sim}$  betegnes 0.

$$\forall g, c, r, a, s, t \quad \bar{e}_{gcra0} = 0, \text{ hvis } y_0^{mod} = 0 \quad (6.9)$$

$$\begin{aligned} \forall g, c, r, a, s, t \quad \bar{e}_{gcra(y_0^{mod})} &= \bar{e}_{gcra(y_0^{mod}-1)}^{tot} - \sum_{y_2=0}^{y_0^{mod}-1-l_g} (\bar{e}_{gcra(y_0^{mod}-1)}^n) \\ &+ \bar{e}_{gcra(y_0^{mod}-1)}^n, \text{ hvis } y_0^{mod} > 0 \end{aligned} \quad (6.10)$$

$$\forall g, c, r, a, s, t \quad \bar{h}_{gcra0} = 0, \text{ hvis } y_0^{mod} = 0 \quad (6.11)$$

$$\begin{aligned} \forall g, c, r, a, s, t \quad \bar{h}_{gcra(y_0^{mod})} &= \bar{h}_{gcra(y_0^{mod}-1)}^{tot} - \sum_{y_2=0}^{y_0^{mod}-1-l_g} (\bar{h}_{gcra(y_0^{mod}-1)}^n) \\ &+ \bar{h}_{gcra(y_0^{mod}-1)}^n, \text{ hvis } y_0^{mod} > 0 \end{aligned} \quad (6.12)$$

$$\forall g, c, r, a, s, t \quad \bar{e}_{gcra0}^{tot} = 0, \text{ hvis } y_0^{mod} = 0 \quad (6.13)$$

$$\forall g, c, r, a, s, t \quad \bar{e}_{gcray_0^{mod}}^{tot} = \bar{e}_{gcra(y_0^{mod}-1)}^{tot} + \bar{e}_{gcra(y_0^{mod}-1)}^n, \text{ hvis } y_0^{mod} > 0 \quad (6.14)$$

$$\forall g, c, r, a, s, t \quad \bar{h}_{gcra0}^{tot} = 0, \text{ hvis } y_0^{mod} = 0 \quad (6.15)$$

$$\forall g, c, r, a, s, t \quad \bar{h}_{gcray_0^{mod}}^{tot} = \bar{h}_{gcra(y_0^{mod}-1)}^{tot} + \bar{h}_{gcra(y_0^{mod}-1)}^n, \text{ hvis } y_0^{mod} > 0 \quad (6.16)$$

Herved sikres, at  $\bar{e}_{gcray}$  og  $\bar{h}_{gcray}$  indeholder den mængde "gammel" investeret kapacitet, som findes når et år begynder. Foretages en investering i et år, er denne kapacitet til rådighed ved begyndelsen af året. Den totale kapacitet i et år findes ved summen af disse plus evt. eksogent givet kapacitet. Kapacitetsbegrænsningerne (5.4) og (5.5) ændres til:

$$\forall g, c, r, a, s, t, y \in Y^{mod} \quad e_{gcrasty} \leq \bar{E}_{gcra} + \bar{e}_{gcray} + \bar{e}_{gcra}^n \quad (6.17)$$

$$\forall g, c, r, a, s, t, y \in Y^{mod} \quad h_{gcrasty} \leq \bar{H}_{gcra} + \bar{h}_{gcray} + \bar{h}_{gcra}^n \quad (6.18)$$

### Investeringer i transmissionsnettet

I den oprindelige model er det muligt at investere i transmissionsforbindelser. For at beholde denne egenskab indføres variable, som indeholder de opsummerede transmissionsinvesteringer.

- $\bar{x}_{(cr)(cr)_2y}^{tot}$ .

Transmissionsinvesteringer har i virkeligheden lang levetid, derfor indføres ingen levetid på dem. Når de er foretaget forbliver de resten af simuleringsperioden. Der indføres dog en økonomisk levetid  $q$ , som anvendes ved udregning af årlige investeringsomkostninger. Hvis forbindelsen er mellem 2 regioner i hver deres land, finansieres halvdelen af investeringsomkostningen i det ene land, og den anden halvdel i det andet land. Modelleringen er analog til kapacitetsinvesteringer:

$$\begin{aligned} \sum_{y \in Y^{mod}} \sum_{c,r} \sum_{c_2,r_2} \bar{T}(\bar{x}_{(cr)(cr)_2y}^n) &= \\ \sum_{y \in Y^{mod}} \sum_{c,r} \sum_{c_2,r_2} \frac{1}{2} \left[ \frac{r_c^i}{1 - (1 + r_c^i)^{-q}} \right. & \\ \left. + \frac{r_{c_2}^i}{1 - (1 + r_{c_2}^i)^{-q}} \right] T^{inv} [\bar{x}_{(cr)(cr)_2y}^{tot} + \bar{x}_{(cr)(cr)_2y}^n + \bar{x}_{(cr)_2(cr)_y}^n] & \end{aligned} \quad (6.19)$$

Desuden indføres følgende begrænsninger:

$$\forall c, r, c_2, r_2, y \in Y^{mod} \quad \bar{x}_{(cr)(cr)_2(y+1)}^{tot} = \bar{x}_{(cr)(cr)_2y}^{tot} + \bar{x}_{(cr)(cr)_2y}^n + \bar{x}_{(cr)_2(cr)_y}^n \quad (6.20)$$

Således transmissionskapaciteterne opsummeres i  $\bar{x}_{(cr)(cr)_2y}^{tot}$  og transmissionskapacitetsbegrænsningerne (5.6) ændres til

$$\forall g, c, r, c_2, r_2, s, t, y \in Y^{mod} \quad \bar{x}_{(cr)(cr)_2sty} \leq \bar{X}_{(cr)(cr)_2y} + \bar{x}_{(cr)(cr)_2y}^{tot} + \bar{x}_{(cr)(cr)_2y}^n + \bar{x}_{(cr)_2(cr)_y}^n \quad (6.21)$$

Da de totale kapacitetsvariable er afhængig af eventuelle investeringer foretaget udenfor modelårene indføres følgende startbegrænsninger. Det første år i  $Y^{mod}$  beteges  $y_0^{mod}$ .

$$\forall c, r, c_2, r_2 \quad \bar{x}_{(cr)(cr)_20}^{tot} = 0, \text{ hvis } y_0^{mod} = 0 \quad (6.22)$$

$$\begin{aligned} \forall c, r, c_2, r_2 \quad \bar{x}_{(cr)(cr)_2(y_0^{mod})}^{tot} &= \bar{x}_{(cr)(cr)_2(y_0^{mod}-1)}^{tot} + \bar{x}_{(cr)(cr)_2(y_0^{mod}-1)}^n \\ &+ \bar{x}_{(cr)_2(cr)(y_0^{mod}-1)}^n, \text{ hvis } y_0^{mod} > 0 \end{aligned} \quad (6.23)$$

### 6.2.3 Tilbagediskontering

Ved økonomiske investeringsberegninger over flere år, skal udgifter, indtægter og nytte jvf. afsnit 2.3 tilbagediskonteres. Derfor indføres en exogent givet diskonteringsrente  $r_c$ . Bemærk at diskonteringsrenten kan være forskellig fra lånerenten. Alt i alt ændres objektfunktionen (5.1) således til:

$$\begin{aligned}
\max \quad & \sum_{y \in Y^{mod}} \left[ \sum_{c,r,s,t} \frac{1}{(1+r_c)^y} N^e(\Delta_{crst1y}^{e+}, \dots, \Delta_{crstuy}^{e+}, \Delta_{crst1y}^{e-}, \dots, \Delta_{crstdy}^{e-}) + \right. \\
& \sum_{c,r,a,s,t} \frac{1}{(1+r_c)^y} N^h(\Delta_{crasty1}^{h+}, \dots, \Delta_{crastyu}^{h+}, \Delta_{crasty1}^{h-}, \dots, \Delta_{crastyd}^{h-}) \\
& - \left[ \sum_{c,r,a,s,t} \frac{1}{(1+r_c)^y} \sum_g C(e_{gcrasty}, h_{gcrasty}) \right. \\
& \quad \left. + \sum_{c,r,a} \frac{1}{(1+r_c)^y} \sum_g U(\bar{e}_{gcray}^n, \bar{h}_{gcray}^n) \right. \\
& + \sum_{c,r,s,t} \sum_{c_2,r_2} \frac{1}{2} \left( \frac{1}{(1+r_c)^y} + \frac{1}{(1+r_{c_2})^y} \right) T(x_{(cr)(cr)_2sty}) \\
& \left. \left. + \sum_{c,r} \sum_{c_2,r_2} \frac{1}{2} \left( \frac{1}{(1+r_c)^y} + \frac{1}{(1+r_{c_2})^y} \right) \bar{T}(\bar{x}_{(cr)(cr)_2y}^n) \right] \quad (6.24)
\end{aligned}$$

Som er summen af nytten  $N$ , produktionsudgifter  $C$ , investeringsudgifter  $U$ , transmissionsudgifter  $T$  og transmissionsinvesteringsudgifter  $\bar{T}$  tilbagediskonteret hvert år.

### 6.2.4 Diskrete investeringer

Den sidste ændring af Balmorel er muligheden for at specificere, at investeringer skal være diskrete. F. eks. 200 MW, 400 MW, 600 MW, ... for teknologierne og transmissionsforbindelserne. Exogent angives for hver teknologi og transmissionsforbindelser, de kapacitetsenheder, som kan investeres i:  $\bar{E}_{gcray}^{unit}$ ,  $\bar{H}_{gcray}^{unit}$  og  $\bar{X}_{(cr)(cr)_2y}^{unit}$ . Diskrete investeringer modelleres ved at indføre følgende positive heltalsvariable:

- $u_{gcray}^e$
- $u_{gcray}^h$
- $u_{(cr)(cr)_2y}^x$

og betingelser, som sikrer at alle kapacitetsforøgelser sker som multiplum af kapacitetsenhederne:

$$\forall g, c, r, a, y \in Y^{mod} \quad \bar{e}_{gcray}^n = u_{gcray}^e \bar{E}_{gcray}^{unit} \quad (6.25)$$

$$\forall g, c, r, a, y \in Y^{mod} \quad \bar{h}_{gcray}^n = u_{gcray}^h \bar{H}_{gcray}^{unit} \quad (6.26)$$

$$\forall c, r, c_2, r_2, y \in Y^{mod} \quad \bar{x}_{(cr)(cr)_2y}^n = u_{(cr)(cr)_2y}^x \bar{X}_{(cr)(cr)_2y}^{unit} \quad (6.27)$$

$$(6.28)$$

Normalt ville der anvendes en binær beslutningsvariabel til denne form for modellering. Når vi har valgt at anvende heltalsvariable skyldes det, at i Balmorel har man "de store briller på". Beslutningen er derfor ikke, om der skal bygges et værk, eller ej, men nærmere, hvor mange værker skal bygges? Derfor skal det i modellen være muligt, at bygge flere værker end et, hvilket betyder at det er nødvendigt at anvende heltalsvariable i stedet for binære variable. Ændringen er implementeret således, at hvis der angives en mindste kapacitet på 0, foretages der ikke diskrete (relaxerede) investeringer.

### 6.2.5 Den udvidede model opsummeret

Den udvidede model bliver således alt i alt:

$$\begin{aligned}
\max \quad & \sum_{y \in Y^{mod}} \left[ \sum_{c,r,s,t} \frac{1}{(1+r_c)^y} N^e(\Delta_{crsty1}^{e+}, \dots, \Delta_{crsty_u}^{e+}, \Delta_{crsty1}^{e-}, \dots, \Delta_{crsty_d}^{e-}) \right. \\
& + \sum_{c,r,a,s,t} \frac{1}{(1+r_c)^y} N^h(\Delta_{crasty1}^{h+}, \dots, \Delta_{crasty_u}^{h+}, \Delta_{crasty1}^{h-}, \dots, \Delta_{crasty_d}^{h-}) \\
& - \left[ \sum_{c,r,a,s,t} \frac{1}{(1+r_c)^y} \sum_g C(e_{gcrasty}, h_{gcrasty}) \right. \\
& + \sum_{c,r,a} \frac{1}{(1+r_c)^y} \sum_g \left( \frac{r_c^i (U_g^{e,inv} [\bar{e}_{gcray} + \bar{e}_{gcray}^n] + U_g^{h,inv} [\bar{h}_{gcray} + \bar{h}_{gcray}^n])}{1 - (1+r_c^i)^{-l_g}} \right. \\
& \quad - U_g^{e,scrp} [\bar{e}_{gcray(y-1)} + \bar{e}_{gcray(y-1)}^n - \bar{e}_{gcray}] \\
& \quad \left. - U_g^{h,scrp} [\bar{h}_{gcray(y-1)} + \bar{h}_{gcray(y-1)}^n - \bar{h}_{gcray}] \right) \\
& + \sum_{c,r,s,t} \sum_{c_2,r_2} \frac{1}{2} \left( \frac{1}{(1+r_c)^y} + \frac{1}{(1+r_{c_2})^y} \right) T(x_{(cr)(cr)_2sty}) \\
& + \sum_{c,r} \sum_{c_2,r_2} \frac{1}{2} \left( \frac{1}{(1+r_c)^y} + \frac{1}{(1+r_{c_2})^y} \right) \frac{1}{2} \left[ \frac{r_c^i}{1 - (1+r_c^i)^{-q}} \right. \\
& \quad \left. + \frac{r_{c_2}^i}{1 - (1+r_{c_2}^i)^{-q}} \right] T^{inv} [\bar{x}_{(cr)(cr)_2y}^{tot} + \bar{x}_{(cr)(cr)_2y}^n + \bar{x}_{(cr)_2(cr)_y}^n] \left. \right] \quad (6.29)
\end{aligned}$$

*u.b.*

$$\forall c, r, s, t, y \in Y^{mod} \quad \sum_{g,a} e_{gcrasty} + \sum_{c_2,r_2} x_{(cr)_2(cr)_2sty} = \sum_{c_2,r_2} x_{(cr)(cr)_2sty} + D_{crasty}^e + \sum_u \Delta_{crasty_u}^{e+} - \sum_d \Delta_{crasty_d}^{e-} \quad (6.30)$$

$$\forall c, r, a, s, t, y \in Y^{mod} \quad \sum_g h_{gcrasty} = D_{crasty}^h + \sum_u \Delta_{crasty_u}^{h+} - \sum_d \Delta_{crasty_d}^{h-} \quad (6.31)$$

$$\forall g, c, r, a, s, t, y \in Y^{mod} \quad e_{gcrasty} \leq \bar{E}_{gcray} + \bar{e}_{gcray} + \bar{e}_{gcray}^n \quad (6.32)$$

$$\forall g, c, r, a, s, t, y \in Y^{mod} \quad h_{gcrasty} \leq \bar{H}_{gcray} + \bar{h}_{gcray} + \bar{h}_{gcray}^n \quad (6.33)$$

$$\forall g, c, r, c_2, r_2, s, t, y \in Y^{mod} \quad x_{(cr)(cr)_2sty} \leq \bar{X}_{(cr)(cr)_2} + \bar{x}_{(cr)(cr)_2y}^{tot} + \bar{x}_{(cr)(cr)_2y}^n + \bar{x}_{(cr)_2(cr)_y}^n \quad (6.34)$$

$$\forall c, r, a, s, t, y \in Y^{mod}, u \quad \Delta_{crasty_u}^{e+} \leq \bar{\Delta}_{crastu}^{e+} \quad (6.35)$$

$$\forall c, r, a, s, t, y \in Y^{mod}, d \quad \Delta_{crasty_d}^{e-} \leq \bar{\Delta}_{crastd}^{e-} \quad (6.36)$$

$$\forall c, r, a, s, t, y \in Y^{mod}, u \quad \Delta_{crasty_u}^{h+} \leq \bar{\Delta}_{crastu}^{h+} \quad (6.37)$$

$$\forall c, r, a, s, t, y \in Y^{mod}, d \quad \Delta_{crasty_d}^{h-} \leq \bar{\Delta}_{crastd}^{h-} \quad (6.38)$$

$$\begin{aligned}
\forall i, y \in Y^{mod} \quad & \sum_{g,c,r,a,s,t} [A_{i(gcrast)}^e e_{gcrasty} + A_{i(gcrast)}^h h_{gcrasty}] \\
& + \sum_{g,c,r,a} [\bar{A}_{i(gcra)}^e (\bar{e}_{gcray} + \bar{e}_{gcray}^n) + \bar{A}_{i(gcra)}^h (\bar{h}_{gcray} + \bar{h}_{gcray}^n)] \\
& + \sum_{c,r,c_2,r_2,s,t} [A_{i((cr)(cr)_2st)}^x x_{(cr)(cr)_2sty}] \\
& + \sum_{c,r,c_2,r_2} [\bar{A}_{i((cr)(cr)_2)}^x (\bar{x}_{(cr)(cr)_2y}^{tot} + \bar{x}_{(cr)(cr)_2y}^n)] \leq b_i \quad (6.39)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\forall g, c, r, a, s, t, y \in Y^{mod} \quad \bar{e}_{gcra(y+1)} &= \bar{e}_{gcray}^{tot} - \sum_{y_2=1}^{y-l_g} (\bar{e}_{gcray}^n) \\
& + \bar{e}_{gcray}^n \quad (6.40)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\forall g, c, r, a, s, t, y \in Y^{mod} \quad \bar{h}_{gcra(y+1)} &= \bar{h}_{gcray}^{tot} - \sum_{y_2=1}^{y-l_g} (\bar{h}_{gcray}^n) \\
& + \bar{h}_{gcray}^n \quad (6.41)
\end{aligned}$$

$$\forall g, c, r, a, s, t, y \in Y^{mod} \quad \bar{e}_{gcra(y+1)}^{tot} = \bar{e}_{gcray}^{tot} + \bar{e}_{gcray}^n \quad (6.42)$$

$$\forall g, c, r, a, s, t, y \in Y^{mod} \quad \bar{h}_{gcra(y+1)}^{tot} = \bar{h}_{gcray}^{tot} + \bar{h}_{gcray}^n \quad (6.43)$$

$$\begin{aligned}
\forall c, r, c_2, r_2, y \in Y^{mod} \quad \bar{x}_{(cr)(cr)_2(y+1)}^{tot} &= \bar{x}_{(cr)(cr)_2y}^{tot} + \bar{x}_{(cr)(cr)_2y}^n \\
& + \bar{x}_{(cr)_2(cr)y}^n \quad (6.44)
\end{aligned}$$

$$(6.45)$$

$$\forall g, c, r, a, s, t \quad \bar{e}_{gcra(0)} = 0, \text{ hvis } y_0^{mod} = 0 \quad (6.46)$$

$$\begin{aligned}
\forall g, c, r, a, s, t \quad \bar{e}_{gcra(y_0^{mod})} &= \bar{e}_{gcra(y_0^{mod}-1)}^{tot} - \sum_{y_2=0}^{y_0^{mod}-1-l_g} (\bar{e}_{gcra(y_0^{mod}-1)}^n) \\
& + \bar{e}_{gcra(y_0^{mod}-1)}^n, \text{ hvis } y_0^{mod} > 0 \quad (6.47)
\end{aligned}$$

$$\forall g, c, r, a, s, t \quad \bar{h}_{gcra(0)} = 0, \text{ hvis } y_0^{mod} = 0 \quad (6.48)$$

$$\begin{aligned}
\forall g, c, r, a, s, t \quad \bar{h}_{gcra(y_0^{mod})} &= \bar{h}_{gcra(y_0^{mod}-1)}^{tot} - \sum_{y_2=0}^{y_0^{mod}-1-l_g} (\bar{h}_{gcra(y_0^{mod}-1)}^n) \\
& + \bar{h}_{gcra(y_0^{mod}-1)}^n, \text{ hvis } y_0^{mod} > 0 \quad (6.49)
\end{aligned}$$

$$\forall g, c, r, a, s, t \quad \bar{e}_{gcra0}^{tot} = 0, \text{ hvis } y_0^{mod} = 0 \quad (6.50)$$

$$\begin{aligned}
\forall g, c, r, a, s, t \quad \bar{e}_{gcray_0^{mod}}^{tot} &= \bar{e}_{gcra(y_0^{mod}-1)}^{tot} \\
& + \bar{e}_{gcra(y_0^{mod}-1)}^n, \text{ hvis } y_0^{mod} > 0 \quad (6.51)
\end{aligned}$$

$$\forall g, c, r, a, s, t \quad \bar{h}_{gcra0}^{tot} = 0, \text{ hvis } y_0^{mod} = 0 \quad (6.52)$$

$$\begin{aligned}
\forall g, c, r, a, s, t \quad \bar{h}_{gcray_0^{mod}}^{tot} &= \bar{h}_{gcra(y_0^{mod}-1)}^{tot} \\
& + \bar{h}_{gcra(y_0^{mod}-1)}^n, \text{ hvis } y_0^{mod} > 0 \quad (6.53)
\end{aligned}$$

$$\forall c, r, c_2, r_2 \quad \bar{x}_{(cr)(cr)_20}^{tot} = 0, \text{ hvis } y_0^{mod} = 0 \quad (6.54)$$

$$\forall c, r, c_2, r_2 \quad \bar{x}_{(cr)(cr)_2(y_0^{mod})}^{tot} = \bar{x}_{(cr)(cr)_2(y_0^{mod}-1)}^{tot} + \bar{x}_{(cr)(cr)_2(y_0^{mod}-1)}^n + \bar{x}_{(cr)_2(cr)(y_0^{mod}-1)}^n, \text{ hvis } y_0^{mod} > 0 \quad (6.55)$$

$$\forall g, c, r, a, y \in Y^{mod} \quad \bar{e}_{gcray}^n = u_{gcray}^e \bar{E}_{gcray}^{unit} \quad (6.56)$$

$$\forall g, c, r, a, y \in Y^{mod} \quad \bar{h}_{gcray}^n = u_{gcray}^h \bar{H}_{gcray}^{unit} \quad (6.57)$$

$$\forall c, r, c_2, r_2, y \in Y^{mod} \quad \bar{x}_{(cr)(cr)_2y}^n = u_{(cr)(cr)_2y}^x \bar{X}_{(cr)(cr)_2y}^{unit} \quad (6.58)$$

$$\forall g, c, r, c_2, r_2, a, s, t, y \in Y^{mod}, u, d \quad e_{gcrasty}, h_{gcrasty}, \bar{e}_{gcray}^{tot}, \bar{e}_{gcray}, \bar{e}_{gcray}^n, \bar{h}_{gcray}^{tot}, \bar{h}_{gcray}, \bar{h}_{gcray}^n, \Delta_{crsty}^{e+}, \Delta_{crsty}^{e-}, \Delta_{crasty}^{h+}, \Delta_{crasty}^{h-}, x_{(cr)(cr)_2sty}, \bar{x}_{(cr)(cr)_2y}^n, \bar{x}_{(cr)(cr)_2y}^{tot} \geq 0$$

$$\forall g, c, r, a, y \in Y^{mod}, \quad u_{gcray}^e, u_{gcray}^h, u_{(cr)(cr)_2y}^x \geq 0 \text{ Heltallig}$$

Den udvidede model adskiller sig fra den oprindelige (angivet i afsnit 5.2) ved at der i objektfunktionen (6.29) er indført diskonteringsrente, annuitetsberegning på baggrund af lånerente og teknisk levetid samt alle udgifter i alle år forbundet ved en investering medtages.

Begrænsningerne (6.30) - (6.39) i den udvidede model svarer til (5.2) - (5.11) i den oprindelige model, med den eneste ændring, at der er indført et  $y$ -index, og at de skal være opfyldt for hvert år.

Resten af begrænsningerne (6.40) - (6.58) og startbegrænsningerne (6.46) - (6.55) er de begrænsninger, som er beskrevet i dette afsnit. Desuden adskiller den udvidede model sig fra den oprindelige, ved at alle oprindelige variable har fået indført et  $y$ -index, og der er indført nye variable som beskrevet tidligere.

## 6.2.6 NPV-værdi og fortolkning af priser

Den udvidede model kan løses på 2 måder. Den kan løses relaxeret (LP), hvor diskrete investeringer ikke er aktiveret, eller den kan løses som en heltalsmodel (MIP).

### Relaxeret løsning

Løses modellen relaxeret, fungerer modellen analogt til den udvidede kraftvarmemodel fra kapitel 4.2, og teorien udviklet omkring investeringer og NPV-værdier er således også gældende, for det antal år man vælger at løse modellen.

Skyggepriserne for efterspørgselsbegrænsningerne (6.30) og (6.31) kan stadig fortolkes som priser. Priserne er, som i den oprindelige model, de kortsigtede marginale omkostninger, undtagen i spidslastperioder, hvor kapacitetsbegrænsningerne kan være bindende, således investeringsomkostningen kan være lagt til,

så priserne stiger til de langsigtede marginale omkostninger. I disse perioder vil prisen blive højere end i den oprindelige model, fordi alle udgifterne for en investering indenfor tidshorisonten medtages, hvilket garanterer at  $NPV$ -værdien indenfor tidshorisonten er positiv. Det vil sige, at for enhver investering, foretaget indenfor tidshorisonten, og hvis levetid løber ud inden tidshorisonten, er  $NPV$ -værdien positiv.

### Heltallig løsning

Løses modellen heltallig skal man være lidt forsigtig med fortolkningen af skyggepriserne. Ofte vil et heltalligt problem blive løst vha. en form for Branch and Bound algoritme (se evt. [29]), som finder den heltallige løsning ved at løse en sekvens af relaxerede problemer. En Branch and Bound algoritme indfører begrænsninger, som tvinger kapacitetsvariablene til at være heltallige. Da disse begrænsninger kun påvirker kapacitetsvariablene og dermed kun påvirker produktionsvariablene vha. kapacitetsbegrænsningerne kan skyggepriserne til efterspørgselsbegrænsningerne stadig fortolkes som priser. Men det er ikke nødvendigvis de samme priser, som det relaxerede problem finder.

Hvis diskrete investeringer medfører, at der investeres mindre end den relaxerede, vil det betyde, at prisen bliver højere, fordi der for at opfylde efterspørgslen må produceres og evt. investeres i en dyrere teknologi.

Hvis diskrete investeringer medfører, at der investeres mere end den relaxerede, vil det betyde, at prisen bliver lavere, idet kapacitetsbegrænsningen ikke bliver bindende og investeringsomkostningerne således ikke afspejles i priserne. Priserne vil stadig være de kortsigtede eller langsigtede marginale omkostninger.

Hvis der investeres samme mængde i begge modeller, vil skyggepriserne være de samme idet en Branch and Bound algoritme kun indfører begrænsninger som ændrer løsningen.

Priserne vil aldrig falde under de kortsigtede marginale omkostninger på sidst producerede enhed, og vil derfor stadig kunne fortolkes som priser. Men da der indføres begrænsninger, som påvirker investeringerne, er der jvf. afsnit 4.2 ingen garanti for at  $NPV$ -værdien er positiv.

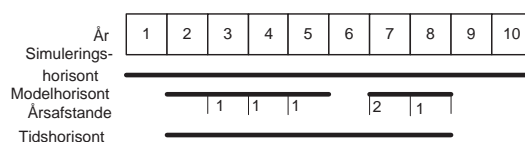
## 6.3 Udvidelse af Simuleringsstruktur

Fordi modellen udvides så kraftigt, som det er tilfældet, kan beregningstiden og hukommelsesforbruget blive et ganske betydeligt problem. Desuden er det anvendeligt, at den udvidede Balmorel kan løses som den oprindelige (se figur 6.3). Simuleringsstrukturen udvides således, at der stadig kan findes en løsning for et år ad gangen. I det følgende anvendes følgende begreber:

- *Simuleringshorisont*. Angiver den totale periode, som der findes en løsning til, hvilket er de år, som repræsenteres i  $Y^{sim}$ .

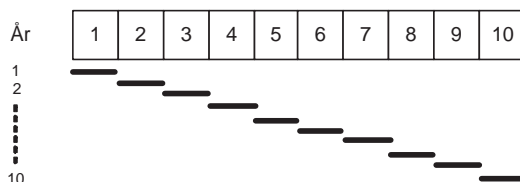
- *Modelhorisont.* Angiver det antal år, som modellen opbygges på, hvilket er det antal år, som findes i  $Y^{mod}$ .
- *Årsafstand.* Angiver afstanden mellem starten af hver år i modelhorisonten, hvis modelhorisonten overstiger 1 år.
- *Tidshorisont.* Angiver den periode, som modelhorisonten med diverse årsafstande repræsenterer. Hvis mindst en årsafstand er større end 1, siges tidshorisonten af være ikke sammenhængende.
- *Fuld horisont.* Angiver at modellen løses med simuleringshorisont = modelhorisont, og årsafstand på 1 mellem alle årene i modelhorisonten, således tidshorisonten = simuleringshorisont = modelhorisont ( $Y^{sim} = Y^{mod}$ ).

På figur 6.2 ses en illustration med forskellige horisonter.



Figur 6.2: Illustration af forskellige horisonter.

Det angives exogent, hvilken modelhorisont og årsafstand, som skal anvendes ved løsningen af det ene år. F. eks. kan simuleres med en simuleringshorisont

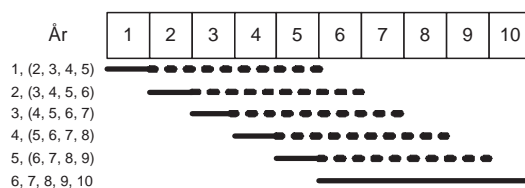


Figur 6.3: Simuleringshorisont på 10 år med 1 årig modelhorisont, hvilket svarer til den oprindelige model.

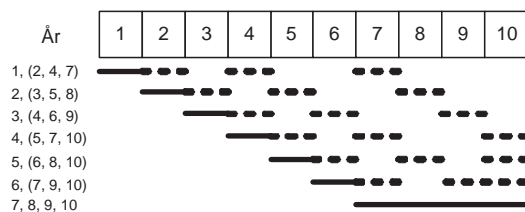
på 10 år, hvor der anvendes en modelhorisont på 5 år og en årsafstand på 1 år mellem alle årene i modelhorisonten. Simuleringen vil i det tilfælde først løse modellen for år 1, 2, 3, 4, 5 og gemme resultatet for år 1. Derefter løses modellen for 2, 3, 4, 5, 6 og resultatet for år 2 gemmes osv. indtil modellen løses for 6, 7, 8, 9, 10. Her gemmes resultatet for de sidste år. Dette er illustreret på figur 6.4. Derved findes en samlet løsning for alle 10 år.

En anden mulighed, er at anvende en modelhorisont på 4 år, men med en årsafstand på f.eks. 1, 2, 3 år, således modellens tidshorisont når løsningen til det første år findes er 7 år. Simuleringen vil i det tilfælde løse modellen for år 1,2,4,7 og gemme resultatet for år 1, derefter løses modellen for år 2,3,5,8 og resultatet for år 2 gemmes osv. indtil modellen løses for år 7, 8, 9, 10 hvor resultatet gemmes for de sidste år. Dette illustreres på figur 6.5.



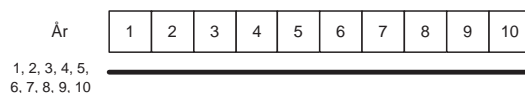


Figur 6.4: Simuleringshorisont 10 år med 5 årig modelhorisont og årsafstand 1, 1, 1.



Figur 6.5: Simuleringshorisont på 10 år med 4 årig modelhorisont og årsafstand på hhv. 1, 2, 3 år.

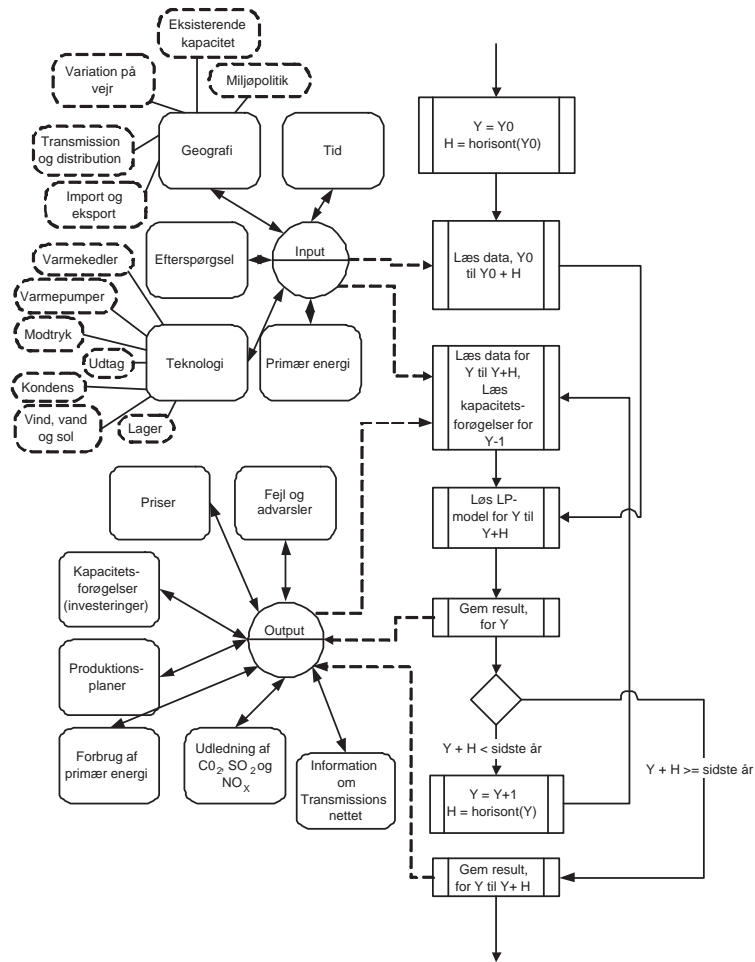
Med denne nye langt mere fleksible simuleringsstruktur, er det muligt, at simulere som den oprindelige model (figur 6.3), at simulere med fuld horisont som det vises på figur 6.6, eller det er muligt at variere både længden af tidshorisonten og modelhorisonten (figur 6.4 og 6.5).



Figur 6.6: Simuleringshorisont på 10 år med fuld horisont.

På figur 6.7 ses et flowdiagram over den nye simuleringsstruktur. Udvidelserne i modellen har betydet, at en meget stor del af GAMS koden er tilpasset den nye model. Uden disse ville bl.a. modellens resultater være nær umulige at fortolke. På bilag D findes en oversigt over samtlige udvidelser, som er foretaget i Balmorel. Listen er medtaget som bilag idet, den henvender sig til Balmoreludviklere, der kender til den tekniske dokumentation [2] af den oprindelige Balmorel. Denne del af udviklingsarbejdet er ikke dokumenteret i denne rapport, da denne rapport omhandler modelleringsaspekterne af udvidelserne. Det skal dog ikke undervurderes, at en betydelig del af projektførelsen er gået med at få disse mere tekniske detaljer til at fungere. F.eks. voldte sammenspillet mellem levetid og ikke-sammenhængende modelhorisont en del tekniske vanskeligheder. Til outputtet er tilføjet en ny udskriftrutine, som udskriver de totale kapaciteter pr. område og teknologi for simuleringshorisonten.

Hvis den udvidede Balmorel skal være en repræsentation af den oprindelige model, gøres det ved at sætte modelhorisonten til 1 år, og derved simulere 1 år ad gangen. Derefter sættes diskonteringsfaktoren  $\frac{1}{(1+r)^y} = 1$  for alle  $y$ , og annui-



Figur 6.7: Flowdiagram over den nye simuleringsstruktur i den udvidede Balmorel.

tetsfaktorene sættes lig  $\frac{r_c^i}{1-(1+r_c^i)^{-lq}} = \frac{r_c^i}{1-(1+r_c^i)^{-q}} = \frac{0.05}{1-(1+0.05)^{-20}} = 0.117$ . Til sidst skal teknologiernes tekniske levetid sættes til at være større end simuleringshorisonten.

På grund af GAMS-kode tekniske ændringer, som er indført for at opnå den længere horisont og mere fleksible simuleringsstruktur, sker opbygning af den nye model anderledes end den oprindelige model. De er således ikke ens, men repræsenterer det samme problem.

## 6.4 Opsummering

Balmorel er udvidet således de begreber omkring investeringer, som blev gennemgået i kapitel 2 nu er indført. Det drejer sig om, levetid på investeringer,

som er indført således investeringer forsvinder igen når deres tekniske levetid udløber. Når levetiden udløber er indført en skrotværdi. For at kunne nutidsvurdere investeringerne er indført en diskonteringsrente og der er indført en lånerente, som anvendes til at beregne den årlige annuitet, som skal betales når der investeres. Der er indført en længere modelhorisont og tidshorisont, samt ekstra begrænsninger, som sikrer at modellen med en længere tidshorisont er korrekt. Der er indført økonomisk levetid på transmissionsforbindelser. Den mere fleksible simuleringsstruktur betyder, at en undersøgelse af investeringer kan belyses med mange former for horisonter. Endelig er indført mulighed for anvendelse af en heltalsløsningsalgoritme, som sikrer diskrete investeringer, der er mere i overensstemmelse med virkeligheden.

Modellen er udvidet, så når den løses med fuld horisont, er analog til den udvidede kraftvarmemodel fra afsnit 4.2. Derfor er teorien om *NPV*-værdier og priser udviklet for denne model også gældende for den udvidede Balmorel med fuld horisont. Endelig er argumenteret for, at hvis modellen løses heltallig kan er fortolkningen af priser stadig gyldig. Alt i alt en lang række ændringer, som forbedrer håndteringen af investeringer i Balmorel.



# Kapitel 7

## Resultater

I dette kapitel analyseres den udvidede Balmorel. Data brugt i analysen vil blive præsenteret, og det vil blive analyseret, hvilken effekt udvidelserne har på løsningen til modellen, samt hvordan de påvirker løsningstiden. Det vil blive verificeret, at den udvidede Balmorel giver samme resultater som den oprindelige model, når den sættes til at køre som den oprindelige (afsnit 6.3).

### 7.1 Data

Med den oprindelige Balmorel følger et omfattende datasæt. I alle de følgende analyser anvendes dette datasæt. Tidsopløsningen i datasættet er 12 sæsoner svarende til 12 måneder på et år og 12 tidsperioder, hvor periode 1 til 8 svarer til 8 forskellige belastningsperioder på hverdage og 9 til 12 svarer til 4 forskellige belastningsperioder på weekenddage.

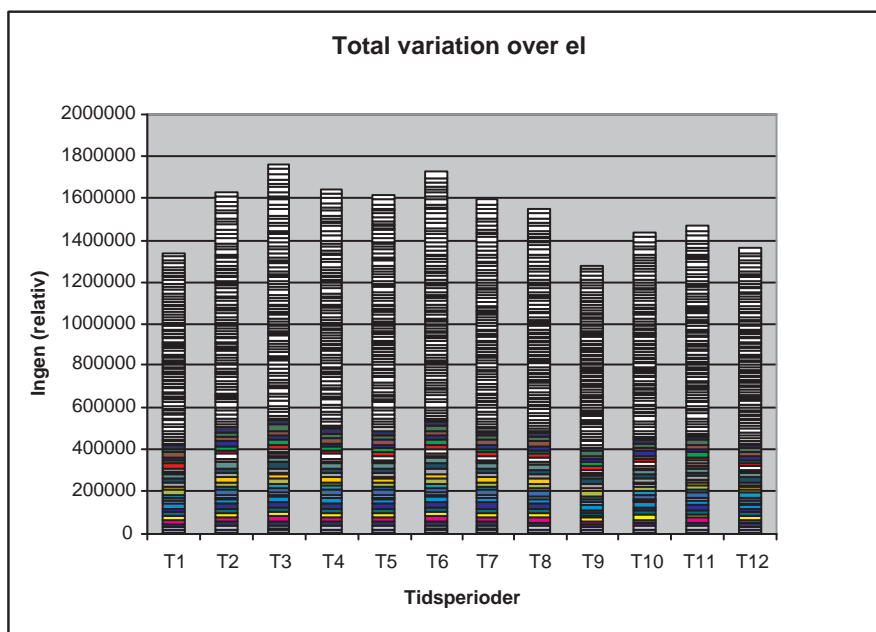
For at analysere investeringerne over flere år og stadig have problemer af en størrelse, som kan løses indenfor rimelig tid, har vi skaleret tidsopløsningen ned til 4 sæsoner, svarende til årstiderne og 3 tidsperioder svarende til hhv. lav-, mellem- og spidslastperioder. Der ses bort fra forskel på hverdag og weekenddage. Nedskaleringen giver god mening i forbindelse med investeringsovervejelser, da det for denne problemstilling er vigtigere med en lang tidshorisont end detaljeret tidsopløsning.

Nedskalering af tidsopløsningen gøres ved at slå sæsoner og tidsperioder sammen. Sæson 1 repræsenterer januar, sæson 2 februar osv. Derfor lader vi sæson 1 repræsentere vinter svarende til december, januar og februar. Sæson 2 lader vi repræsentere forår osv. I tabel 7.1 ses sammenslutningen af sæsoner.

Sammenslutning af tidsperioder et lidt mere indviklet. Tidsperioderne repræsenterer andelen af tid med forskellige belastninger (efterspørgsler). For at få en ide om variation på efterspørgslen er den totale variation på efterspørgslen på el pr. tidsperiode plottet på figur 7.1. På baggrund er den information slås tidsperiode 1, 9 og 12 sammen som lavlastperioden, 2, 4, 5, 7, 8, 10 og 11 slås sammen til mellemlast og 3 og 6 slås sammen til spidslast. Informationerne er samlet i tabel 7.2. Derefter beregnes de nye variationer for hver ny sæson og tidsperiode

Oprindelig sæsoner	Oprindelige vægte	Ny sæson	Ny vægt
S12, S1, S2	31, 31, 28	S1	90
S3, S4, S5	31, 30, 31	S2	92
S6, S7, S8	30, 31, 31	S3	92
S9, S10, S11	30, 31, 30	S4	92

Tabel 7.1: Tabel over sammenslutningen af sæsoner.



Figur 7.1: Graf over det totale variation for hver tidsperiode på elefterspørgslen.

som det vægtede gennemsnit af de gamle variationer for de gamle sæsoner og tider. De nye variationer beregnes efter følgende formel, hvor  $S^o(s^n)$  og  $T^o(t^n)$  angiver mængder defineret i tabel 7.1 og 7.2 (f. eks. er  $T^o(T1) = \{T1, T9, T12\}$ ) og  $W_s^o$  og  $W_t^o$  angiver de oprindelige vægte for hhv.  $s$  og  $t$ :

$$VAR^n(s^n, t^n) = \sum_{s \in S^o(s^n)} \sum_{t \in T^o(t^n)} \frac{W_s^o}{\sum_s W_s^o} \frac{W_t^o}{\sum_t W_t^o} VAR^o(s, t) \quad (7.1)$$

Det øvrige Balmorel input er enten uafhængig af tid, eller det er angivet på årsbasis. Yderlige information kan findes ved at kigge i input filerne.

## 7.2 Verifikation af den udvidede Balmorel

Fra afsnit 6.3 vides, at den udvidede Balmorel kan løses som den oprindelige Balmorel. Den udvidede model er anderledes end den oprindelige model, da opbygning af de to modeller ikke er ens. Men problemerne er ækvivalente, og derfor burde løsningen til de to modeller være ens. For at eftervise dette, og

Oprindelig tidsperioder	Oprindelige vægte	Ny tidsperiode	Ny vægt
T1, T9, T12	45, 14, 6	T1	65
T2, T4, T5, T7, T8, T10, T11	10, 17.5, 15, 12.5, 15, 18, 10	T2	98
T3, T6	2.5, 2.5	T3	5

Tabel 7.2: Tabel over sammenslutningen af tider.

dermed verificere den udvidede model, er lavet kørsler fra år 2005 til 2010 med alle lande og en tidsopløsning på 3 tidsperioder og 4 sæsoner. Disse kørsler er lavet med begge modeller, og løsningerne er efterfølgende analyseret.

### 7.2.1 Modellernes størrelse

På tabel 7.3 ses forskellen på modellens størrelse i den oprindelige model og den udvidede model. Det ses, at den oprindelige model er mindst. Det skyldes delvist de ekstra betingelser indført i den udvidede model, men også at den oprindelige model i hvert år opsplitter produktionen på hhv. ny og gammel kapacitet (se evt. bilag A). Denne egenskab er beholdt i den udvidede model, men for at beholde denne egenskab, når modelhorisonten øges, er det nødvendigt at ændre opbygningen af begrænsningerne i GAMS. Dette har en negativ effekt i tilfældet med en modelhorisont på 1 år, idet der i dette tilfælde bliver konstrueret unødvendige begrænsninger. Heldigvis er de fleste solvere udstyret med en presolve, som fjerner sådanne begrænsninger inden problemet løses.

Vi er her stødt på det ofte sete problem, at kodning tit bliver en afvejning mellem gennemskuelighed af kode og effektiv kode. Balmorel baserer sig på en opensource filosofi. Derfor er gennemskuelighed af koden vigtig.

I f.eks. 2010 ses, at den oprindelige model efter presolve reduceres til 27926 rækker, 28255 søjler og 96919 koefficienter forskellig fra 0, og den udvidede model reduceres til 27910 rækker, 28224 søjler og 96856 koefficienter forskellig fra 0. Der er således lille forskel på problemernes størrelse efter presolve. Presolve bruger hhv. 0.41 sek og 0.81 sek på at reducere problemerne, hvilket er negligerbar i forhold til den totale løsnings tid. Derfor mener vi, at det er unødvendigt at kode hele modellen om, med de risiko for fejl, som det indebærer, for at vinde 0.4 sek. i presolve tid.

### 7.2.2 Modellernes løsning

I den første kørsel af den udvidede model fjernes de ekstra omkostninger på  $\bar{x}_{(cr)(cr)2y}^{tot}$ ,  $\bar{e}_{gcray}$ ,  $\bar{h}_{gcray}$  i den udvidede objektfunktion, som er indført for investeringer besluttet i det forgående år. Disse påvirker ikke løsningen, når modelhorisonten er 1, men har betydning for objektfunktionsværdien. Ved at fjerne dem burde objektfunktionsværdierne for den oprindelige og den udvidede model være ens. Resultatet ses i tabel 7.4.

Det ses, at objektfunktionsværdierne bortset fra de 3 første år, ikke er helt ens, men ligger dog meget tæt. Der er en tendens til at der opstår en afvi-

Year	Rows		Columns		Non-zeroes	
	Old	New	Old	New	Old	New
2005	24634	38064	27764	52591	107550	183347
2006	24694	38040	27928	52549	107922	183225
2007	24790	38040	28252	52549	108666	183225
2008	24790	38040	28252	52549	108666	183225
2009	24790	38040	28252	52549	108666	183225
2010	39238	59748	40568	77172	162994	277744

Tabel 7.3: Tabel over forskellen problemstørrelse i oprindelige og den udvidede model i Balmorel.

gelse med årene, men det er ikke en voksende afvigelse. Denne tendens på objektfunksionsværdierne afvigelse, skal findes i små afvigelser i løsningerne. Simuleringsstrukturen overfører information mellem årene, hvilket betyder, at

Oprindelig objektværdi	Ny objektværdi	Forskel
20904.98	20904.98	0
21171.76	21171.76	0
21012.34	21012.34	0
21285.67	21285.42	-0.25
21559.08	21559.04	-0.04
21908.73	21908.90	0.17

Tabel 7.4: Tabel over forskellen i objektfunktion i oprindelige og udvidede Balmorel løst med dual simplex.

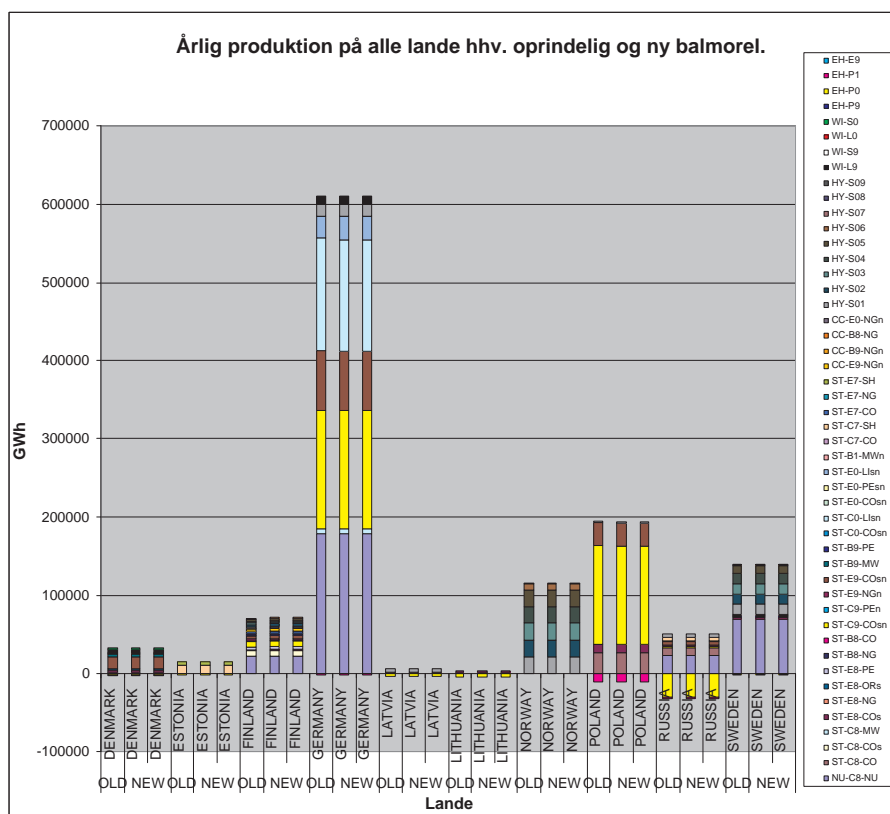
en lille afvigelse i et år overføres til det næste, som påvirker løsningen i dette år, som igen kan indeholde små afvigelser, som overføres til næste osv. Derfor opstår afvigelsen med årene. Man kunne have forventet at afvigelsen pga. af dette ville vokse med årene. Det har dog ikke været muligt at påvise dette.

I den anden kørsel indføres omkostninger på  $\bar{x}_{(cr)(cr)2y}^{tot}$ ,  $\bar{e}_{gracy}$ ,  $\bar{h}_{gracy}$  igen i objektfunktionen. På figur 7.2 ses det årlige produktion pr. land og teknologi fundet af den oprindelige model og de 2 kørsler af den udvidede. Som det ses er der ikke nævneværdig forskel på de to løsninger, faktisk skal man lede ret grundigt i output filerne for at finde de små forskelle. Sammenlignes det øvrige output, ses et lignende resultat. Størstedelen af værdierne er ens for de 3 kørsler. For nogle værdier findes en lille variation, og nogle få værdier har en større afvigelse.

Den mest sandsynlige forklaring på forskellen mellem løsningerne er afrundingsfejl, som opstår i den eksterne solver, som GAMS anvender. Den eksterne solver, som benyttes er Cplex version 7.5, som benytter en dual simplex baseret algoritme.

De større variationer kan desuden skyldes muligheden for flere optimale løsninger, og når problemets natur overvejes, er det absolut en mulighed, at der findes flere løsninger. Hvis der f.eks. findes 2 ens elproducerende teknologier i 2 forskel-





Figur 7.2: Årlige produktion pr. land og teknologi fundet af den oprindelige Balmorel og de 2 kørsler af den udvidede Balmorel.

lige områder indenfor samme region, og der findes rigeligt med primærenergi, er det ligegyldigt hvilken af teknologierne, der produceres på. Kigges i den vigtigste GAMS output fil (.lst filen), ses da også at der findes en del ikke-basis variable, som har reducerede omkostninger meget tæt på nul eller *EPS*. *EPS* er GAMS betegnelsen for værdier meget tæt på 0, hvilket indikerer, at der findes flere optimale løsninger og mange løsninger, som ligger meget tæt på at være optimale.

Desuden findes en betydelig mængde skyggepriser med værdien *EPS*. Dette indikerer, at der findes en mængde begrænsninger, hvis slackvariable er i basis med værdien 0. Løsningerne er altså også degenererede.

Plausible forklaringer på de relativt få afvigelser på løsningerne er flere optimale løsninger og afrundingsfejl. Et faktum, som yderligere underbygger dette, er at hvis modellerne løses med f.eks. en primal simplex baseret algoritme i stedet for dual simplex findes tilsvarende løsninger, men med afvigelse på objektfunksionsværdien. Resultatet på en sådan kørsel ses på tabel 7.5. Igen ses samme tendens, at afvigelserne opstår med årene, og det ses at objektfunksionsværdierne afviger fra de tilsvarende dual simplex værdier. Valget af algoritme har altså også

Oprindelig objektværdi	Ny objektværdi	Forskel
20904.98	20904.98	0
21170.71	21170.70	0
21011.34	21011.34	0
21284.68	21284.43	-0.25
21556.95	21554.91	-0.04
21906.82	21906.99	0.17

Tabel 7.5: Tabel over forskellen i objektfunktion i oprindelige og den udvidede Balmorel løst med primal simplex.

indflydelse på resultatet.

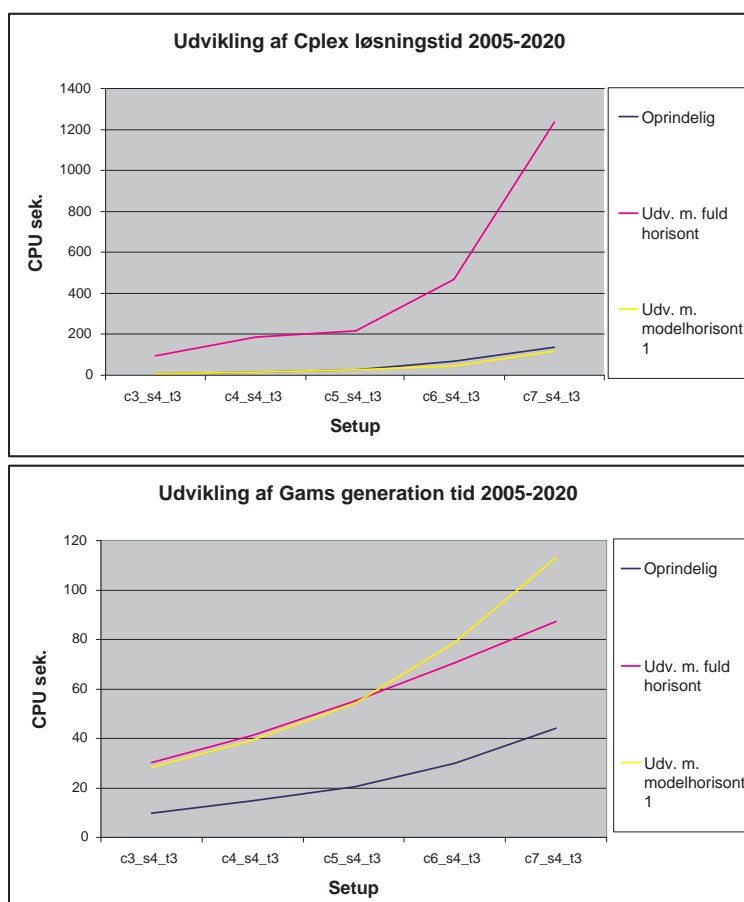
### 7.3 Løsningstidsanalyse

For at undersøge løsningstiden for den udvidede Balmorel udføres 3 kørsler for perioden 2005 - 2020. En kørsel med den oprindelige Balmorel, en kørsel med den udvidede Balmorel med modelhorisont 1 (løser 16 problemer med modelhorisont 1), så den virker som den oprindelige, og en kørsel med den udvidede Balmorel med fuld horisont (løser 1 problemer med modelhorisont 16). Alle kørsler med den udvidede Balmorel udføres relaxerede (ikke diskrete) investeringer. Kørslerne udføres for forskellige størrelse problemer med hhv. 3, 4, 5, 6 og 7 lande. Resultatet ses på figur 7.3. Derefter udføres 7 kørsler for perioden 2005 - 2030 med 3 lande, med forskellige modelhorisonter på hhv. 1, 2, 4, 6, 11, 16 og 26 år. Resultatet ses figur 7.4.

På figur 7.3 ses, at Cplex løsningstiden for den oprindelige Balmorel og den udvidede Balmorel med en modelhorisont på 1 stortset er ens. Faktisk er Cplex løsningstiden for den udvidede Balmorel lidt hurtigere end den oprindelige. Desuden ses at når modellen løses med fuld horisont, tager den betydeligt længere tid (ca. en faktor 9) end med en modelhorisont på 1 år.

Dette er lidt overraskende, da en god tommelfingerregel siger, at hvis computeren har tilstrækkelig hukommelse, burde det tage ca. den samme tid at løse en række små problemer, som det tager at løse problemerne på en gang i et stort problem. Forklaringen er, at en simplex-baseret algoritme i praksis ofte performer med lineær løsningstid. Når det ikke sker i vores tilfælde skyldes det, at det store problem ikke svarer til at løse en række små problemer. Det indeholder ekstra begrænsninger, som sikrer at årene blive bundet sammen og som betyder, at der findes en bedre løsning. Et problem med fuld horisont er mere komplekst end et problem med modelhorisont 1.

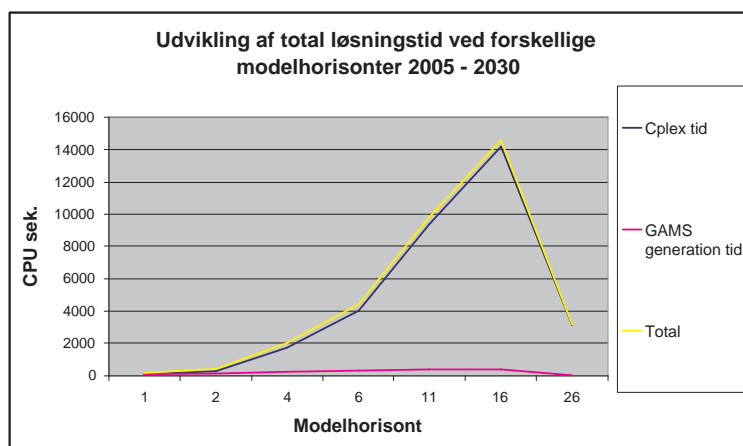
Yderligere ses, at den udvidede models opbygningstid (GAMS generation tid) er større end opbygningstiden for den oprindelige model. Dette skyldes at den udvidede model er større og mere kompliceret, også i tilfældet med 1 årig modelhorisont, derfor tager det længere tid at opbygge modellen. Den totale løsningsstid er dog domineret af Cplex løsningstiden. Dette ses også på figur 7.4. På figur 7.4 ses yderligere den interessante egenskab, at hvis modelhorisonten



Figur 7.3: Grafer over hhv. Cplex løsnings tid og Gams generation tid for den oprindelige Balmorel, den udvidede Balmorel med modelhorisont 1 og den udvidede model med fuld horisont.

overstiger 5 år, tager det længere tid end at finde en løsning, end hvis modellen løses med fuld modelhorisont (i dette tilfælde 26 år).

Forklaring på dette er simuleringsstrukturen. Hver gang løsningen til et år findes, løses et problem med modelhorisontens størrelse, undtagen de sidste år, hvor der kun løses ét problem. Der løses således i alt:  $\text{simuleringshorisont} - \text{modelhorisont} + 1$  problemer. Det er hurtigere at løse ét stort problem end  $26 - 5 + 1 = 22$  mindre problemer. Det er nu stadig anvendeligt med den fleksible simuleringsstruktur, da hukommelsesforbruget er mindre ved at løse 22 mindre problemer end et stort. I dette tilfælde brugte computeren ca. 700 Mb til at løse modellen med fuld horisont, mens den kun brugte ca. 130 Mb til at løse modellen med en modelhorisont på 5 år. Dette passer fint med at modellen med fuld horisont ca. er 5 gange større.



Figur 7.4: Udviklingen af den totale løsnings tid ved forskellige modelhorisonter.

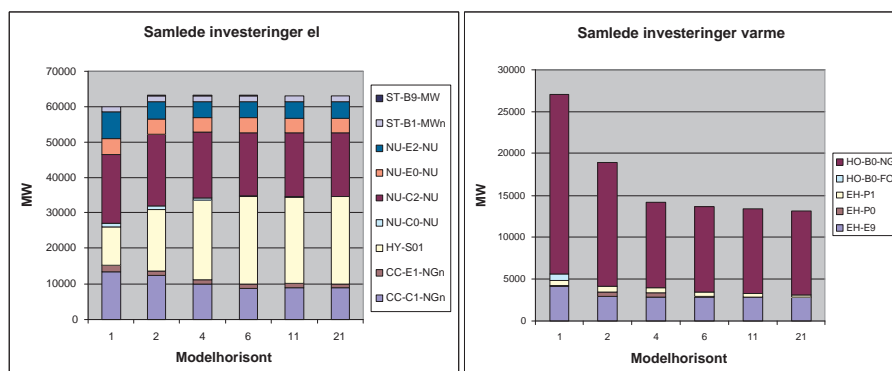
## 7.4 Længere modelhorisont

I dette afsnit undersøges, hvilken indflydelse modelhorisontens længde har på løsningen. Det er i den forbindelse interessant at se, hvordan investeringer i ny kapacitet fordeler sig, når længden på modelhorisonten øges, og de øvrige parametre i modellen holdes fast. Modelhorisontens længde udtrykker den del af fremtiden, som modellen kender, når løsningen for hvert år findes. En modelhorisont på 1 år betyder, at modellen kun kender det ene år, som løsningen findes for. Den fungerer altså ligesom den oprindelige model. Fuld horisont betyder, at modellen kender alle år i simuleringen, og modellen løses for alle år i simuleringshorisonten på én gang.

Vi har i denne undersøgelse løst modellen for Danmark, Norge og Sverige for årene 2005 til 2025, med følgende længder på modelhorisonten: 1 år, 2 år, 4 år, 6 år, 11 år, 21 år (fuld horisont). Årsafstanden har i alle tilfælde været sat til 1, således modelhorisonten er sammenhængende. Vi har løst modellen med uelastisk efterspørgsel for at dette ikke skal forvirre billedet. Modellen løses relaxeret som en LP model, dvs. ingen diskrete investeringer.

Der er ingen tvivl om, at fuld horisont finder den bedste løsning til problemet. Dvs. den løsningen som billigst dækker efterspørgslen. Det må forventes at jo længere modelhorisont, desto tættere kommer løsningen på den bedste løsning, som er løsningen med fuld horisont. Det ses også på figur 7.5, som viser den samlede mængde investeringerne i ny kapacitet for alle år for hver simulering med forskellig modelhorisonter.

Yderligere ses, at der investeres mindre med lang horisont end med kort. Forklaringen er, at det er billigere for modellen at investere med kort modelhorisont, da omkostningerne, som er forbundet ved en investering, kun tages med for modelhorisontens længde. Der findes kun én løsning for ét år ad gangen. Da investeringsoplysningerne i princippet overføres til næste år, som eksogen givet kapacitet, indgår investeringsudgifterne ved investeringer foretaget tidligere



Figur 7.5: Samlede investeringer (MW) i hhv. el og varme .

som konstanter (allerede afholdte udgifter / sunk costs) i objektfunktionen. De påvirker således ikke løsningen af problemet i dette år. Med fuld modelhorisont bliver alle investeringsudgifter medregnet, hvilket betyder at det bliver mere realistisk men også dyrere i forhold til kørsler med lav modelhorisont. Derfor investeres mere ved lav horisont.

Modelhorisontens længde har også indflydelse på hvilke teknologier, der bliver investeret i. På figur 7.5 ses, at der med en modelhorisont på 1 år investeres i varmeteknologierne HO-B0-NG, HO-B0-FO, EH-E9 og EH-P1. Med fuld modelhorisont investeres der kun i HO-B0-NG, EH-E9 og EH-P1. Dette skyldes, at det med den korte modelhorisont kan betale sig at investere i HO-B0-FO i mindst én tidsperiode. At den kapacitet, der investeres i kun bliver benyttet i denne ene periode spiller ingen rolle.

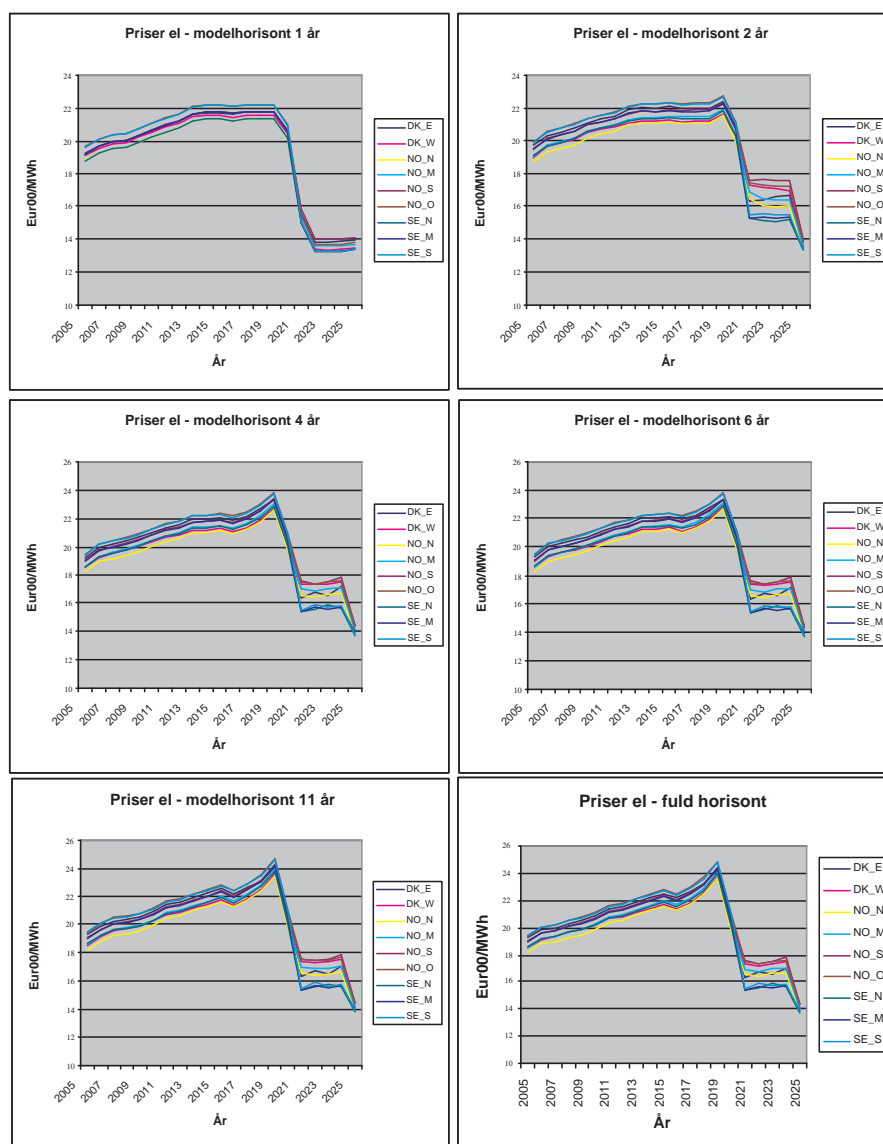
På el-siden ses, at uanset modelhorisontens længde investeres store mængder i atomkraftteknologierne NU-E0-NU, NU-E2-NU og NU-C2-NU. Der er en tendens til, at NU-E2-NU bliver mindre interessant ved længere horisont. Det er tydeligt, at ved en længere horisont bliver grundlast, vandkraftteknologien HY-S01 langt mere interessant. Til gengæld falder mængden investeret i mellemlast og spidslastteknologierne ST-B9-MW, ST-B1-MWn, CC-E1-NGn og CC-C1-NGn, som er hhv. kondensanlæg med affald, som primærenergi og combined cycle anlæg med naturgas, som primærenergi.

Der er en tydelig tendens, til at ved en længere horisont, bliver grundlastteknologier interessante. Det stemmer fint overens med at grundlast har mindre kortsigtede marginale omkostninger, men større langsigtede marginale omkostninger end mellemlast- og spidslastteknologier. Da priserne i modellen det meste af tiden ligger på de kortsigtede marginale omkostninger vil grundlastteknologierne blive mere interessante ved en lang modelhorisont.

#### 7.4.1 Horisontens indflydelse på prisudviklingen for el

En anden ting, som er interessant at undersøge når modelhorisontens længde øges, er prisudviklingen. Når der investeres i ny produktionskapacitet for hhv.

el og varme vil det have indflydelse på priserne. Hvis investeringen er nødvendig for at opfylde efterspørgslen ses en prisstigning. Hvis investeringen foretages, fordi den er bedre end eksisterende kapacitet, vil det ikke kunne ses. Det er enten de kortsigtede eller langsigtede marginale omkostninger, som bestemmer prisen, jvf. kapitel 2 og 4.2.



Figur 7.6: *Prisudviklingen for el.*

På figur 7.6 ses prisudvikling for el ved alle kørslerne. Det ses, at modelhorisontens længde har en indflydelse på prisudviklingen for el. Prisen er næsten ens frem til år 2020. Dette skyldes at der for alle kørsler investeres i de samme teknologier i de samme perioder. At der ikke investeres de samme mængder be-

tyder ikke noget for de marginale omkostninger.

I 2021 adskiller prisudviklingen i hver kørsel sig fra hinanden. Prisspidserne, som ses i perioder med investeringer, som foretages for at opfylde efterspørgslen bliver meget kraftigere. Forklaringen er, at når modelhorisonten øges, stiger de langsigtede marginale omkostninger, fordi der medtages udgifter for hele modelhorisonten. De investeringer, der foretages indtil år 2020 er af den type, som udkonkurrerer eksisterende kapacitet, derfor ses prisspidserne ikke så kraftigt.

Fra 2021 op til 2025 investeres fordi efterspørgslen skal dækkes, hvilket burde resultere i en prisstigning. Det sker også i år 2021, hvor den største mængde kapacitet investeres, men herefter falder prisen kraftigt. Forklaringen er en kombination af 2 ting.

Den ene forklaring er, at der i 2021 kommer nogle nye mere effektive og dermed billigere teknologier, som modellen selvfølgelig vælger at investere i, og at modellen investerer betydelige mængder kapacitet i vandkraft, hvis kortsigtede marginale omkostning er meget lave.

Den anden forklaring er, at eftersom modellen ikke medtager marginale omkostninger udenfor modelhorisonten bliver langsigtede marginale omkostninger også billige desto nærmere det sidste år i modelhorisonten investeringen foretages. Dette betyder lavere langsigtede marginale omkostninger og dermed lavere priser.

## 7.5 Ikke sammenhængende modelhorisont

Fra afsnit 7.4 vides at modelhorisontens længde har en indflydelse på løsningen til modellen. Længere modelhorisont betød, at løsningen kom til at ligne løsningen med fuld horisont. Fra afsnit 7.3 vides, at modelhorisontens længde har en negativ effekt på løsningstiden og hukommelsesforbruget. Dette er en af årsagerne til, at vi har implementeret muligheden for at variere årsafstanden i modelhorisonten.

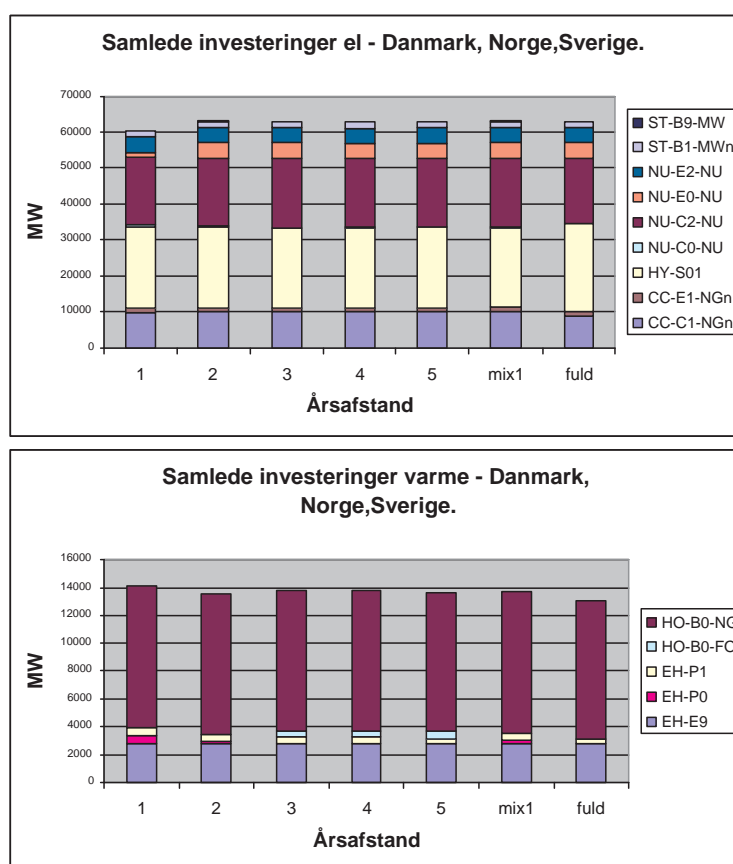
Hvordan årsafstanden i modelhorisonten virker er beskrevet i afsnit 6.3. Ideen er at modellen kan se længere ud i fremtiden i forhold til at køre med sammenhængende modelhorisont. Dette skulle gerne betyde at de investeringer modellen foretager er mere fornuftige. Løsningstiden er den samme som med sammenhængende modelhorisont, men løsningen skulle gerne være bedre.

For at undersøge om dette er korrekt har vi løst modellen, hvor modelhorisonten er sat til 4 år. I afsnit 7.3 så vi, at løsning med en modelhorisont på 5 år eller derover var langsommere end at løse modellen med fuld horisont. Undersøgelsen udføres derfor kun for en modelhorisont på 4 år med følgende årsafstande:

- 1, 1, 1
- 2, 2, 2

- 3, 3, 3
- 4, 4, 4
- 5, 5, 5
- 1, 2 ,3 (mix1)

Modellen er løst for Danmark, Norge og Sverige for 2005 til 2025. Modellen er også løst med fuld modelhorisont for at kunne sammenligne løsningerne med den bedste løsning til problemet.



Figur 7.7: Samlede investeringer med horisont på 4 år, ved forskellig årsafstande, for Danmark, Norge og Sverige.

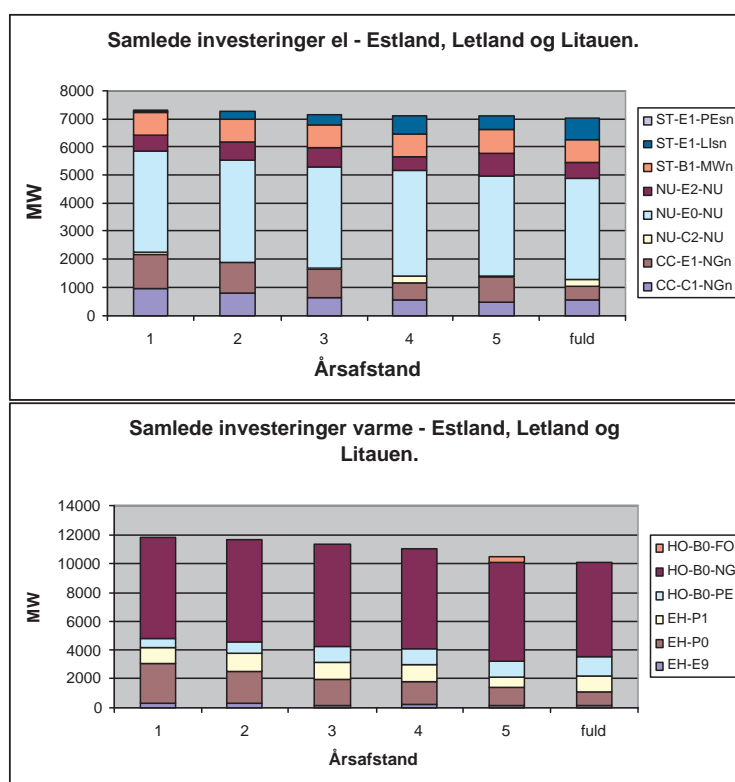
På figur 7.7 ses de samlede investeringer for de løsninger modellen har fundet. Det ses, at der er en lille forskel på de fundne løsninger. På elkapaciteterne findes en svag tendens til at løsningen kommer til at ligne den bedste løsning ved højere årsafstand. På varmekapaciteterne ser tingene dog mindre klare ud. Derfor kan ikke med sikkerhed konkluderes noget på baggrund af kørslerne.



For at checke om det samme sker når modellen løses for andre lande er lavet tilsvarende kørsler for Estland, Letland og Litauen. Kørslerne er lavet med følgende årsafstande:

- 1, 1, 1
- 2, 2, 2
- 3, 3, 3
- 4, 4, 4
- 5, 5, 5

Som tidligere er modellen også løst med fuld horisont for at kunne sammenligne løsningerne med den bedste løsning.



Figur 7.8: Samlede investeringer med horisont på 4 år, ved forskellig årsafstande, for Estland, Letland og Litauen.

Figur 7.8 viser de samlede investeringer for Estland, Letland og Litauen. Der er en klar tendens til at en længere årsafstand giver en løsning, som ligner den bedste løsning. I dette tilfælde kan det altså godt betale sig at øge årsafstanden. Konklusion må være, at det i nogle tilfælde kan være en fordel at køre med variabel årsafstand, mens det i andre tilfælde ikke har en positiv effekt. Vi har dog ikke set en negativ effekt.

## 7.6 Diskrete investeringer

En af de ændringer, som er indført i Balmorel er muligheden for at kræve diskrete investeringer i skridt bestemt af den mindste mulige kapacitetsenhed for hver teknologi. Ændringen er implementeret således, at hvis der angives en mindste kapacitet på 0, foretages der relaxerede (ikke diskrete) investeringer.

Løses modellen som et heltalsproblem (MIP) eksploderer RAM forbruget og løsnings tiden. Det er derfor, selv med en modelhorisont på 1 år, faktisk ikke muligt at løse problemet for Danmark, Norge, Sverige fra 2005 til 2025 på en alm. PC med 1 Gb RAM.

For alligevel at illustrere effekten af diskrete investeringerne er udført en relaxeret kørsel og en heltalskørsel kun med Danmark for perioden 2005 til 2025 med en modelhorisont på 1 år. Resultaterne ses i tabel 7.6, figur 7.9 og 7.10.

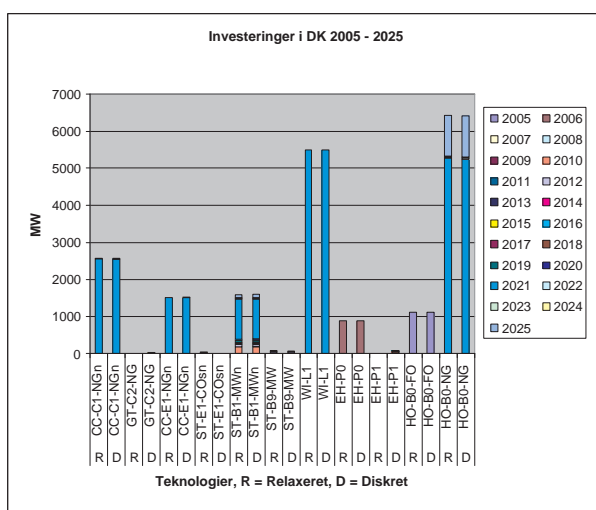
Teknologi	Mindste kapacitetsenhed	Relaxerede investering	Diskret investering
CC-C1-NGn	20 MW	2577 MW	2580 MW
GT-C2-NG	0 MW	0 MW	23 MW
CC-E1-NGn	20 MW	1511 MW	1520 MW
ST-E1-COsn	200 MW	39 MW	0 MW
ST-B1-MWn	5 MW	1584 MW	1590 MW
ST-B9-MW	5 MW	79 MW	70 MW
WI-L1	0 MW	5500 MW	5500 MW
Total El	-	11290 MW	11283 MW
EH-P0	0 MW	888 MW	889 MW
HO-B0-FO	0 MW	1122 MW	1122 MW
HO-B0-NG	0 MW	6427 MW	6406 MW
Total Varme	-	8437 MW	8417 MW

Tabel 7.6: Tabel over forskellen mellem diskrete og relaxerede investeringer i DK 2005 - 2025, tidshorisonten er 1 år.

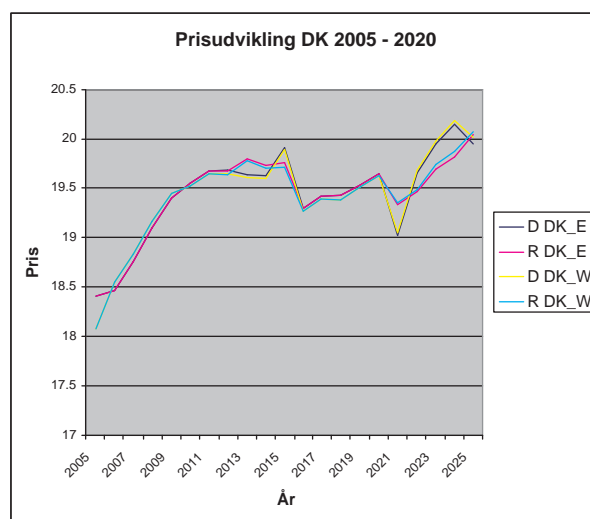
Det ses at den relaxerede og den diskrete model investerer i de samme teknologier. I enkelte tilfælde er den diskrete tvunget til at investere mere kapacitet i en teknologi end det er nødvendigt for at opfylde efterspørgslen, eller investere mindre og dermed være tvunget til at investere i andre teknologier også, men da kapacitetsenhederne for de fleste teknologier er små, betyder det ikke ret meget for løsningen.

Et andet resultat er, at pga. den større køretid og store hukommelsesforbrug er kørsler med diskrete investeringer tvunget til at foregå med en lav tidshorisont. Det betyder, at modellen risikerer, at tage dårlige investeringsbeslutninger.

Investeringsforløbet mellem relaxeret og diskret er selvfølgelig lidt anderledes. Men forskellene består primært i at den relaxerede model tillader at investere f.eks. 23 MW i et år og 2 MW året efter i en teknologi. Hvis den mindste kapacitetsenhed for denne teknologi er 5 MW, vil den diskrete model i denne situation oftest vælge at investere 25 MW i det første år og intet året efter. Dette er på



Figur 7.9: Graf over informationerne i tabel 7.6.



Figur 7.10: Prisforløbet ved diskrete og relaxerede investeringer i DK 2005 - 2025, modelhorisonten er 1 år.

ingen måder overraskende, da de mindste investeringskapaciteter for de fleste teknologier er meget små i forhold til de mængder, som investeres i.

Konklusionen må derfor blive, at når Balmorel anvendes med ”de store briller på”, som den gøres i dette projekt, vindes intet ved at anvende diskrete investeringer. Det skal dog nævnes, at Balmorel kan anvendes med datasæt, hvor skalaen er betydelig mindre. F.eks. hvor områder i en region repræsenterer virksomheder / kraftværker. Ved en sådan kørsel kunne det være interessant at anvende diskrete investeringer. Desværre har det ikke været muligt at fremskaffe

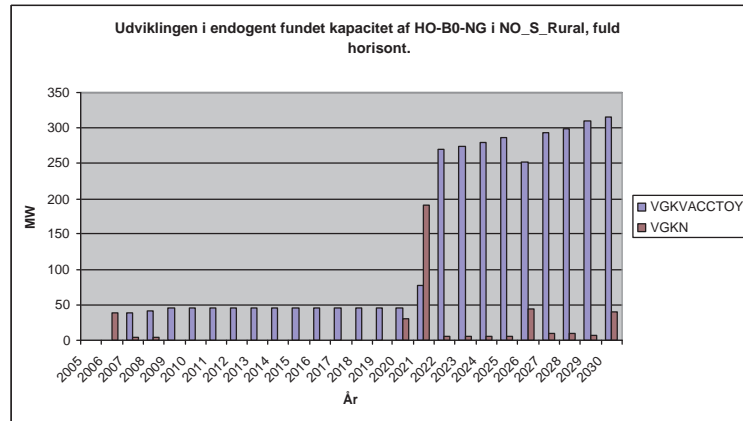
eller konstruere et realistisk datasæt, som kunne eftervise eller afvise om denne hypotese holder i praksis.

I den forbindelse er det dog interessant at bemærke, at skyggepriserne, der ses på figur 7.10, som forventet jvf. afsnit 6.2.6 stadig kan fortolkes som elpriser omend der ingen garanti er for at *NPV*-værdien er positiv, og som forventet ses større udsving på priserne end de relaxerede priser.

## 7.7 Levetid på investeringer og skrotværdi

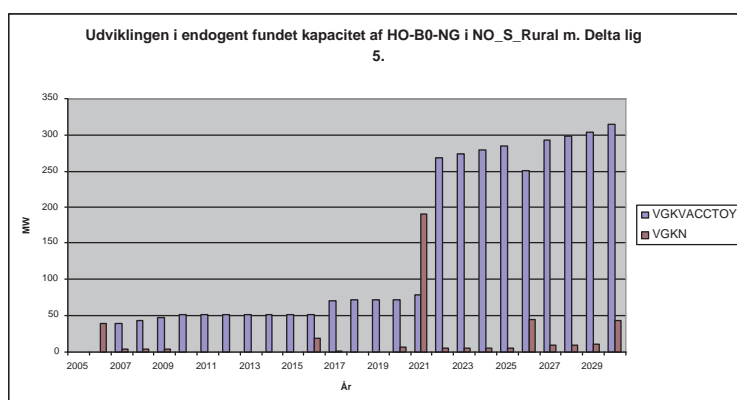
En yderligere udvidelse af Balmorel er, at endogent investeret kapacitet forsvinder, når levetiden for den pågældende teknologi er gået. Dette gælder uanset hvilken horisont som vælges. I dette afsnit eftervises at dette rent faktisk sker. Når kapaciteten forsvinder udbetales er skrotværdi. For de fleste teknologier i datasættet er skrotværdien dog negligerbar, og for de teknologier, hvor den ikke er negligerbar (atomkraft) er levetiden over 35 år, og overstiger dermed datasættets årrække. Derfor forventes det ikke at påvirke løsningen.

Da alle teknologier i data har en levetid på 20 år eller mere, vil levetiden på investeringer kun påvirke løsninger, hvor modellen løses for en periode længere end 20 år. Derfor er modellen løst for Danmark, Norge og Sverige for år 2005 til 2030 med to forskellige typer modelhorisonter. Den ene er fuld horisont, og den anden er en modelhorisont på 5 år, med en årsafstand på 5. Vi har herefter valgt at se på udviklingen af HO-B0-NG i NO\_S\_Rural.



Figur 7.11: Endogen fundet kapacitet af HO-B0-NG i NO\_S\_Rural samt den totale mængde HO-B0-NG i NO\_S\_Rural fundet endogent med fuld modelhorisont.

På figur 7.11 og figur 7.12 ses hhv. investeringer og total mængde endogent fundet kapacitet for de to løsninger. Som det kan ses, så forsvinder den mængde kapacitet, der blev investeret i år 2006 i starten af 2026.



Figur 7.12: Endogen fundet kapacitet af HO-B0-NG i NO\_S\_Rural samt den totale mængde HO-B0-NG i NO\_S\_Rural fundet endogen med en horisont på 5 med årsafstand 5.

## 7.8 Tilbagediskontering

I dette afsnit undersøges, hvilken indflydelse diskonteringsrenten har for investeringerne når modellen løses. Diskonteringsrenten, beskrevet i afsnit 2.3.2, er et udtryk for, hvordan en investor vægter fremtidige indtægter og udgifter.

Hvis Balmorel anvendes til samfundsøkonomiske analyser anvendes en samfundsøkonomisk diskonteringsrente. Den samfundsøkonomiske diskonteringsrente kan være forskellig fra lånerenten anvendt til finansiering. I Danmark anbefaler Finansministeriet at anvende en diskonteringsrente på 6 % [23].

Hvis Balmorel anvendes af en virksomhed til analyse af f. eks. investeringsovervejelser, vil lånerenten anvendes som diskonteringsrente, hvis virksomheden finansierer hele investeringen ved lån, som det antages i dette projekt.

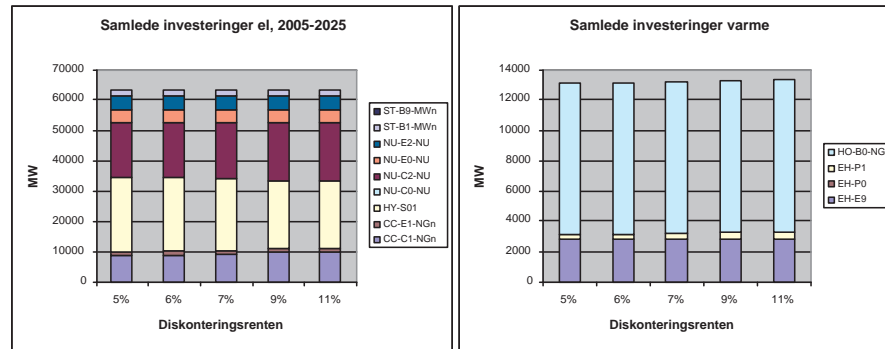
Den udvidede Balmorel løses med fuld horisont for Danmark, Norge og Sverige med diskonteringsrenterne 5%, 6%, 7%, 9% og 11%, med fast lånerente på 5 %.

Derefter findes løsninger med den udvidede Balmorel med fuld horisont for Danmark, Norge og Sverige, hvor både diskonteringsrenten og lånerenten er ens, men varieres på 5 %, 8% og 11%.

Alle kørsler udføres med uelastisk efterspørgsel for at holde alt andet i modellen konstant.

### 7.8.1 Samfundsøkonomisk analyse - Fast lånerente

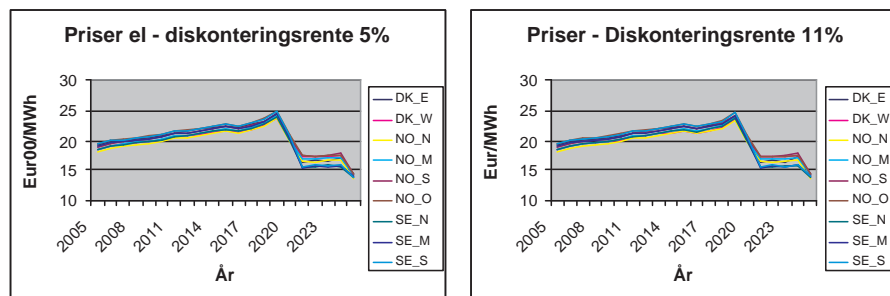
På figur 7.14 er de samlede investeringer for de 5 løsninger med fast lånerente plottet. Som det kan ses på graferne, er det de samme teknologier, der investeres i uanset diskonteringsrentens størrelse, og næsten de samme mængder. Der er



Figur 7.13: Samlede investeringer år 2005 - 2025 ved forskellige diskonteringsrenter.

en svag tendens til, at ved højere diskonteringsrente bliver vandkraftteknologien HY-S01 mindre interessant, og i stedet investeres i combined cycle teknologien CC-C1-NGn. På varmekapaciteterne findes en svag til tendens til, at der investeres mere i varmekedlen HO-B0-NG og mindre i elkedlen EH-E9. Hvilket stemmer fint overens med at CC-C1-NGn er en kondenssteknologi, som ikke producerer varme, og da den billige el fra vandkraft bliver mindre, må modellen investere lidt mere i varmekedler for at opfylde varmeefterspørgslen. At ændre diskonteringsrenten påvirker således løsningen, omend det et meget lidt.

En forklaring på at løsningen ændres så lidt, som det er tilfældet, er at teknologiernes økonomiske og tekniske levetid er ens. Det betyder, at både indtægter og udgifter tilbagediskonteres hvert år. At ændre faktoren de tilbagediskonteres med hvert år påvirker kun løsningen meget lidt.



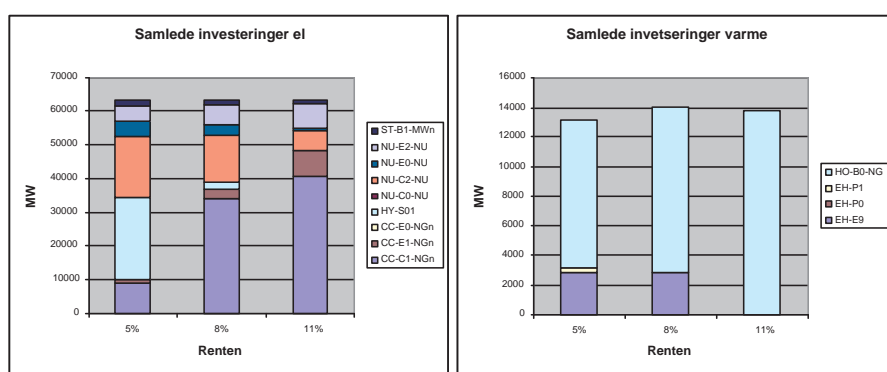
Figur 7.14: Prisudvikling 2005 - 2025 med en diskonteringsrente på hhv. 5% og 11%

Der investeres i de samme teknologier, i de samme perioder, omend lidt forskellige mængder. Derfor vil ændring af diskonteringsrenten ikke påvirke den fremskrevne prisudviklingen. De tilbagediskonterede priser, som kommer direkte ud af modellen er forskellige, men fremskrives de, er der ingen betydelig forskel. Dette fremgår af figur 7.14 som viser de fremskrevne prisudviklinger for en dis-

konteringsrente på hhv. 5% og 11%.

### 7.8.2 Virksomhedsanalyse - Ens diskonterings- og lånerente

I ovenstående blev alle investeringer finansieret vha. 5% annuitetslån. I afsnit 2.3.2 blev der argumenteret for, at hvis investeringsanalyser foretages af en virksomhed, bør diskonteringsrenten for en investering være den samme som lånerenten, der anvendes til finansieringen af investeringen. Derfor er udført 3 kørsler, hvor diskonteringsrenten og lånerenten er ens, men hhv. 5%, 8% og 11%.



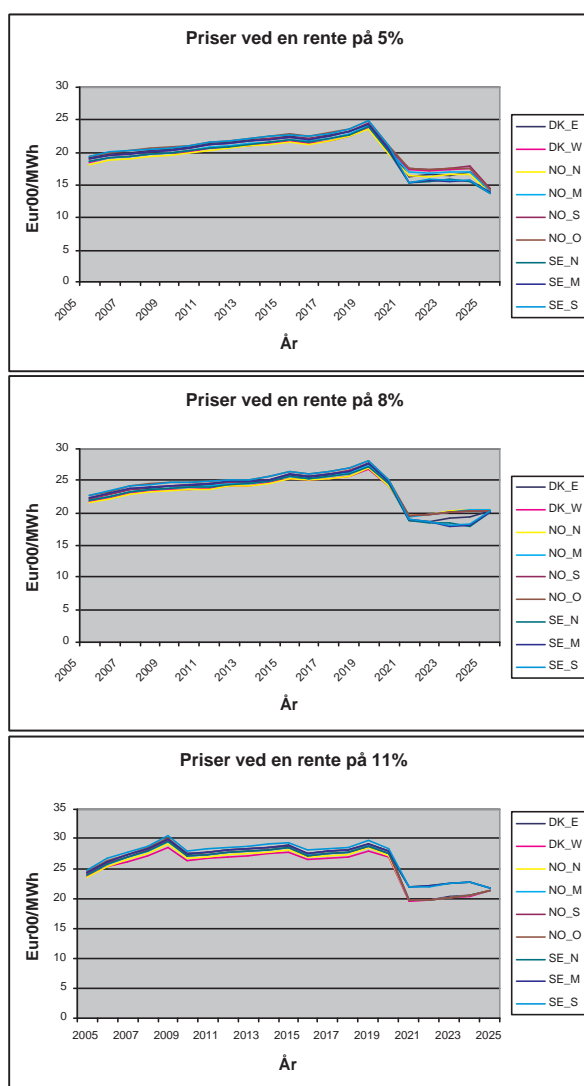
Figur 7.15: Investeringer 2005 - 2020 med en diskonteringsrente og lånerente på hhv. 5%, 8% og 11%

På figur 7.15 ses de totale mængder investeret i løsningerne fra de 3 kørsler. Det ses at ved forskellig diskonterings- og lånerente investeres i de samme teknologier, men der er stor forskel på mængderne. De teknologier med høje investeringsomkostninger, som vandkraft (HY-SO1) og atomkraft (NU-C2-NU), bliver mindre attraktive desto højere renten bliver. Ved en rente på 11% investeres slet ikke i vandkraft.

En høj rente betyder, at det bliver endnu dyrere at investere i de dyre teknologier, hvilket er tydeligt ses på figur 7.15.

På varmesiden ses det samme. Når renten kommer op på 11% investeres kun i varmekedler (HO-B0-NG).

Det er de teknologier med høje investeringsomkostninger, der har de laveste kortsigtede marginale omkostninger, og det er disse der investeres betydeligt mindre i. Der er så stor forskel i mængderne, som investeres i, at det må forventes, at det påvirker fordelingen af produktion, således den sidst producerede enhed sker på en dyrere teknologi. Desuden bliver det dyrere at investere, idet det bliver dyrere at låne penge. Dette betyder, at de langsigtede omkostninger bliver større ved en højere rente.



Figur 7.16: Prisudviklingen 2005 - 2025 hvor diskonteringsrente og lånerente er sat til hhv. 5%, 8% og 11%

Alt i alt må det forventes at priserne stiger, når renten stiger. Dette ses også tydeligt på figur 7.16, der viser de fremskrevne prisudviklinger. Det ses, at pris-kurverne bliver parallelforskudt op ved en højere rente. Desuden ses, at ved en rente på 11 %, hvor der slet ikke investeres i vandkraft opstår nogle prisspidser omkring år 2009, 2015 som ikke var så udprægede ved en lavere rente.

Dette skyldes, at ved den lave rente er investeringer foretaget indtil 2020 investeringer, som kan betale sig, samtidig med at de sikrer, at efterspørgslen kan opfyldes. Når det bliver dyrere at investere bliver disse investeringer ikke længere til investeringer, der kan betale sig, men bliver til tvungne investeringer for



at kunne opfylde efterspørgslen, hvilket giver prisspidser.

## 7.9 Opsummering

I kapitlet er verificeret at løsninger fundet med den oprindelige model og den udvidede model, når den løses som den oprindelige, afviger lidt fra hinanden. Afgivelserne er ganske små, og kan derfor tilskrives numeriske afrundingsfejl i løseren. Løsningerne er dog så tætte, at vi med stor sikkerhed, kan garantere at vores udvidelser ikke har ændret / ødelagt modellen. Dette er vigtigt at fremhæve, da der efterhånden er en del mennesker, som har kigget på den oprindelige model og accepteret, at den virker fornuftigt. Vores udvidelser har altså forbedret fleksibiliteten og dermed forøget anvendelsesmulighederne af Balmorel.

I kapitlet er de udvidelser af Balmorel, som er indført, blevet undersøgt. Udvidelsen længere modelhorisont (såvel sammenhængende som ikke sammenhængende) har en positiv effekt på løsninger. En større modelhorisont giver en længere løsningsetid, men det er ikke overraskende og kan ikke forhindres. Ved den længere modelhorisont, blev det også klart at priserne er sammensat af de kortsigtede- og langsigtede marginale omkostninger. Når modelhorisonten øges bliver de langsigtede marginale omkostninger større, fordi udgifterne for alle årene i modellen medtages. De kortsigtede er de samme uafhængigt af modelhorisonten.

Man skal dog passe lidt på med at løse den udvidede Balmorel med en høj modelhorisont. Ofte vil det være hurtigere at løse problemet med fuld horisont. Det er nu anvendeligt med den fleksible horisont alligevel. Det kan spare en del hukommelse, hvilket kan være en fordel, hvis den udvidede Balmorel skal løses på en mindre computer. Desuden kan man ved at bruge en ikke sammenhængende modelhorisont, i nogle tilfælde finde en løsning tættere på løsningen med fuld horisont, hvilket ligeledes kan være en fordel, hvis Balmorel anvendes på mindre computere. Hvis der haves tilstrækkeligt med computerkraft vil det dog oftest være en fordel, at køre med fuld horisont. Endelig er det anvendeligt, at den udvidede Balmorel kan løses som den oprindelige og finde den samme løsning.

Indførelsen af diskrete investeringer havde ikke nogen nævneværdig effekt på investeringerne med det eksisterende datasæt. Det havde en effekt på priserne og de havde en meget negativ effekt på løsningstiden og hukommelsesforbruget. Med det eksisterende datasæt er det ingen fordel at anvende diskrete investeringer. Men hvis Balmorel anvendes i en mindre skala, hvor områder repræsenterer virksomheder, og hvor udvalget af investeringer er begrænset (så antallet af heltalsvariable begrænses). Det kunne være hvis en virksomhed har udvalgt et bestemt antal investeringsmuligheder, og ønsker Balmorel anvendt i vurderingen af disse investeringer. I dette tilfælde er det absolut relevant at anvende diskrete investeringer, for at få modellen til at give så realistiske investeringer som muligt.

Det blev konstateret, at levetidsbegrænsningerne virker, så investeret kapacitet forsvinder, når levetiden udløber. Når det sker (ud)betales en skrotværdi og modellen er tvunget til at håndtere den ny situation, hvor kapaciteten er

forsvundet ved at investere i ny kapacitet eller lægge produktionen over på anden eksisterende kapacitet. I det eksisterende datasæt er det imidlertid kun atomkraft, hvis skrotværdi ikke er negligerbar i forhold til de øvrige indtægter og udgifter ved teknologierne, og da atomkrafts levetid er 35 år eller der over, og da datasættet kun går op til 2030, påvirker skrotværdien ikke løsningerne, men modelleringen virker.

Ved samfundøkonomiske analyser blev det klarlagt, at diskonteringsrenten har en lille effekt på løsning. Jo mindre fremtiden vægtes (højere diskonteringsrente) desto mere interessante blev teknologier med lavere investeringsudgifter.

Ved en virksomhedsanalyse af investeringer har valget af diskonteringsrente (og lånerente) en stor effekt. Tendensen er den samme som ved samfundsøkonomiske analyser, men den er meget tydeligere: Jo mindre fremtiden vægtes (højere diskonteringsrente) desto mere interessante blev teknologier med lavere investeringsudgifter, hvilket også skyldes at lånerenten påvirker investeringsudgifterne.

## Kapitel 8

# Case study: Investeringer i Litauen

Baggrunden for dette projekt udspringer delvist fra et projekt, hvor forholdene i bl.a. Litauen blev analyseret vha. Balmorel [30]. Balmorel blev i dette projekt kritiseret for dens manglende horisont på investeringerne. Dette afsnit er et lille case study af Litauen, som gerne skulle illustrere, at vores udvidelser til Balmorel har forbedret modellen på dette punkt.

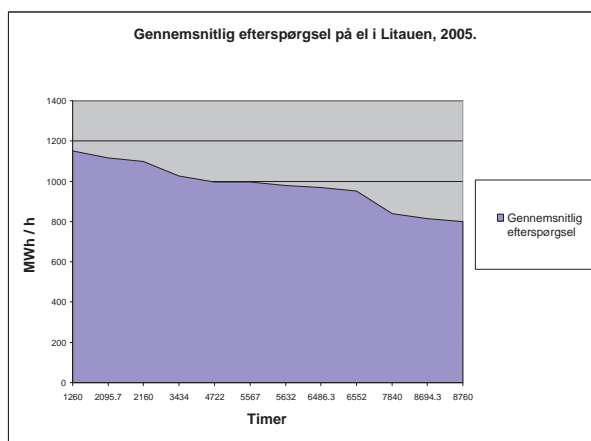
Energisektoren i Litauen er interessant at analysere i forbindelse med investeringer, fordi landet står over for en række store omvæltninger. Ignalina-værket, som idag står for 70 % af elproduktionen i Litauen skal lukkes i 2010 [15]. Energisektoren er således i den situation, at en stor del af produktionsapparatet skal udskiftes inden for den nærmeste årrække. Dette kombineret med at landet er blevet medlem af EU, og det derfor er besluttet, at energisektoren pr. 1. januar 2010 skal være fuldt liberaliseret [15], betyder naturligvis en lang række spørgsmål omkring fremtidige investeringer opstår. Da Balmorel er baseret på filosofien om fri konkurrence er det oplagt at anvende Balmorel som værktøj i analyser af hvilke investeringer, der kunne være fornuftige at iværksætte.

### 8.1 Efterspørgsel

I de følgende analyser anvendes det datasæt, som ligger i Balmorel, med den eneste ændring, at tidsopløsningen skales ned til 4 sæsoner, svarende til de 4 årstider, og 3 tidsperioder, svarende til lav-, mellem- og spidslast. Simuleringshorisonten er år 2005 - 2030. Litauen inddeles i 1 region (LT\_R) og 2 områder (LT\_R\_Urban og LT\_R\_Rural). Simuleringerne udføres med 3 lande, Estland, Letland og Litauen, men kun resultater og data for Litauen vil blive analyseret.

Det antages at efterspørgslen på el stiger jævnt fra 8671 GWh i år 2005 til 15156 GWh i år 2030. Efterspørgslen på varme forventes i området LT\_R\_Rural at stige fra 7531 GWh. i år 2005 til 11512 GWh i år 2030, mens den i LT\_R\_Urban forventes at falde fra 11176 GWh til 10758 GWh. Desuden har Litauen en stor eksport til lande udenfor den baltiske region. Det drejer sig om 2000 GWh pr år. Alle disse stammer fra det eksisterende datasættet. Efterspørgslen varierer over

sæson- og tidsperioderne. På figur 8.1 ses en varighedskurve over efterspørgslen på el i år 2005. Tilsvarende efterspørgsel findes for varme og el de øvrige år. Da



Figur 8.1: Varighedskurve over efterspørgslen på el i Litauen år 2005.

energisektoren i Litauen ikke er liberaliseret endnu, kan det ikke forventes, at markedskræfterne for alvor er slået igennem på efterspørgslen. Det er således fornuftigt at antage, at efterspørgslen er uelastisk.

## 8.2 Eksisterende kapacitet

I Litauen findes indtil 2011 de teknologier, som er listet i tabel 8.1 (NU-C8-NU forsvinder i 2010). Efter år 2011 forsvinder alt kapacitet. Den maksimale efterspørgsel i spidsbelelasningsperioden er på 1151 MWh/h, og udgør ca. 33 % af den totale kapacitet ( $\frac{1151+228MWh/h}{4190MW} = 0.33$ ). Denne procentsats er en overslagsberegning. Den burde selvfølgelig korrigeres for transmissionstab, og evt. udfald (i Balmorel kræves altid en vis overkapacitet for at gardere sig mod udfald). De 228 MWh / h skyldes eksporten til lande udenfor Baltikum. Den korrekte procentsats er nok nærmere 50 %, men faktum er, at der findes en betydelige overkapacitet i årene frem til 2010.

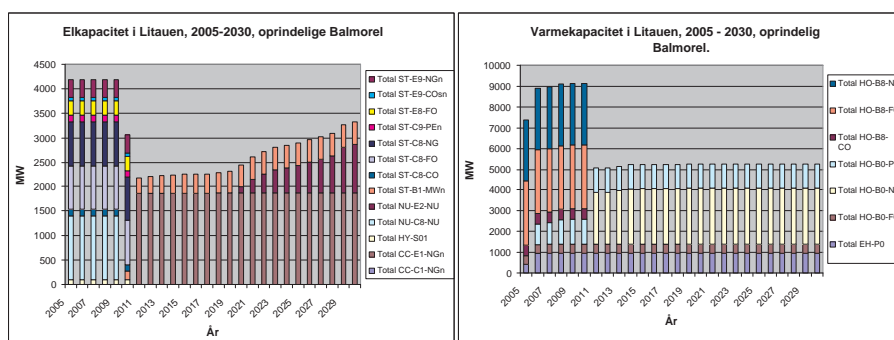
## 8.3 Simulering med den oprindelige Balmorel

Først foretages en simulering med den oprindelige Balmorel. På Figur 8.2 ses de kapaciteter incl. endogene investeringer, som findes i simuleringshorisonten. Da den oprindelige Balmorel kun har 1 års modelhorisont, ser den ikke at kapaciteten forsvinder i år 2011. Den udnytter derfor den overskydende kapacitet på el til at producere varme. Over perioden 2006 - 2010 investeres ca. 1000 MW. i varmepumpen EH-P0, som omdanner el til varme. Denne teknologi er fordelagtig fordi elprisen er lav så længe der er overkapacitet.

Desuden ses, at modellen i år 2011 vælger at investere lidt over 2000 MW i teknologierne ST-B1-MWn og CC-E1-NG, som er hhv. modtryks- og combined cycle med udtagsanlæg, der både producerer el og varme. Desuden investeres

Navn	Balmorel type	Kapacitet
HY-S01	Vandreservoir	100 MW
NU-C8-NU	Kondens	1300 MW
ST-C8-CO	Kondens	133 MW
ST-C8-FO	Kondens	900 MW
ST-C8-NG	Kondens	900 MW
ST-C9-PE <sub>n</sub>	Kondens	133 MW
ST-E8-FO	Udtag	290 MW
ST-E9-CO <sub>sn</sub>	Udtag	72 MW
ST-E9-NG <sub>n</sub>	Udtag	362 MW
HO-B8-CO	Varmekedel	500 MW
HO-B8-FO	Varmekedel	3100 MW
HO-B8-NG	Varmekedel	2450 MW

Tabel 8.1: Tabel over eksisterende kapacitet i Litauen.



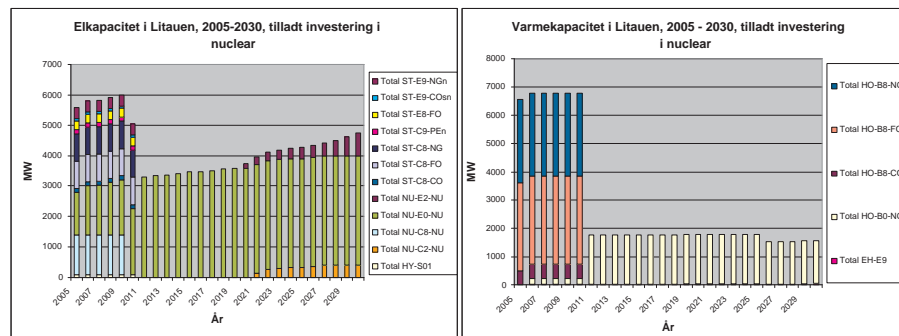
Figur 8.2: Kapaciteter incl. investeringer foretaget med den oprindelige Balmorel.

i varmekedlen HO-B0-NG. Efterspørgslen på el i spidsbelastningsperioderne i år 2012 er ca. 1400 MWh/h. Den overskydende kapacitet anvendes til eksport. Litauen eksporterer i 2012 2000 GWh. Desuden skal der bruges ekstra el til varmeproduktionen på EH-P0. De efterfølgende år suppleres efter behov løbende op med de 2 teknologier indtil 2021, hvor atomkraft teknologien NU-C2-NU bliver til rådighed. Herefter investeres løbende i denne teknologi. NU-C2-NU er en kondenssteknologi, som kun producerer el.

Foruden EH-P0, investeres der på varmesiden ca. 2500 MW i perioden 2005 - 2010 og i 2011 yderligere 2500 MW i varmekedler af forskellige typer. Efter 2011 investeres der kun meget lidt.

## 8.4 Simulering med den udvidede Balmorel

Den næste simulering er udført med den udvidede Balmorel med fuld horisont og en diskonteringsrente på 6 %. På figur 8.3 ses resultatet. Der ses et markant



Figur 8.3: Kapaciteter incl. investeringer foretaget med den udvidede Balmorel.

anderledes investeringsforløb.

En af ændringerne i den udvidede Balmorel er, at udgifterne ved investeringer sker løbende i hele teknologiernes levetid, således den årlige annuitet beregnes på baggrund af teknologiernes levetid. Det betyder, at atomkraftværker, der har en lang levetid, er blevet mere økonomisk attraktive, selvom de dyre at investere i. Faktisk er atomkraftteknologien NU-E0-NU blevet så attraktiv, at modellen vælger at investere omkring 1600 MW i denne teknologi allerede i 2005 og 2006 og lægger en stor del af elproduktionen over på denne teknologi. Faktisk er det kun omkring 6 % af den samlede produktion, som ikke sker på atomkraftteknologierne NU-C8-NU og NU-E0-NU.

Fordi produktionen af el er så billig på atomkraft sker der nu en ganske stor eksport fra Litauen til Estland og Letland. Undtagen i år 2010, hvor Ignalina-værket lukker [15]. I dette år er der næsten ingen eksport. Dette er interessant idet modellen nu pga. den lange tidshorisont ser en fordel i at vente med at investere i ny kapacitet, men i stedet sænker elproduktionen og undlader at eksportere.

Året efter, hvor resten af kapaciteten forsvinder investeres igen i yderligere ca. 1700 MW i NU-E0-NU, således den samlede kapacitet når 3300 MW. Herefter suppleres løbende op indtil 2021, hvor der investeres i atomkraftteknologierne NU-E2-NU og NU-C2-NU. Den samlede kapacitet når således op på næsten 5000 MW i år 2030. Den samlede kapacitet ligger altså ca. 1000 MW højere end den oprindelige Balmorel. Denne overskydende kapacitet anvendes til eksport til hhv. Estland og Letland.

NU-E0-NU er en udtagsteknologi, som producerer el og varme. Dette er tydeligt at se på varmeinvesteringerne, hvor der investeres omkring 3000 MW mindre end i den oprindelige Balmorel. De investeringer som bliver foretaget, er i den samme varmekedel HO-B0-NG. Desuden ses, at investeringen på 200 MW i år 2006 forsvinder igen i år 2026, hvilket skyldes at denne teknologi har en levetid på 20 år. Det er tydeligt at se, at den kun investerer meget lidt i den elektriske varmekedel EH-E9 (ca. 20 MW). Modellen ser altså nu, at det ikke er rentabelt at investere i teknologier, som omsætter el til varme.

## 8.5 Sammenligning af den oprindelig og den udvidede Balmorel

Det mest interessante, som skal bemærkes ved kørslen med den oprindelige Balmorel er investeringerne i varmepumpe teknologien EH-P0. På kort sigt kan investeringerne virke fornuftige pga. de lave elpriser som skyldes overkapaciteten af el. På lang sigt er de problematiske. Elkapaciteten forsvinder i år 2010 og 2011. Derfor er det en dårlig beslutning at investere i denne teknologi, som kun kan anvendes når der er overkapacitet på el i forhold til efterspørgslen. Dette er et af de punkter, som Balmorel er blevet kritiseret for.

Den udvidede Balmorel investerer kun meget lidt i elektriske varmekedler. På grund af den lange tidshorisont ved modellen at overkapaciteten på el forsvinder i år 2010 og 2011, og der investeres i stedet i atomkraftteknologier, som kan producere både el og varme. Den udvidede model har derfor ikke samme problem som den oprindelige model. Når den stadig investerer lidt i den elektriske varmekedel EH-E9, kan det forklares ved at det er en fordel at have en lille kapacitet til rådighed, som kan dække spidsbelastningsperioderne for varme efterspørgslen.

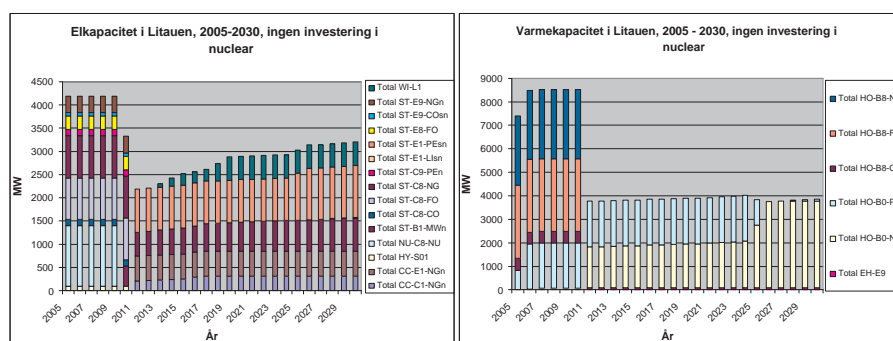
Et spørgsmål, man dog må stille sig selv, er om det er realistisk udelukkende at producere på atomkraft. Atomkraft er billig at producere på, men er ikke egnet som spidsbelastningsværk da teknologien er langsom til at regulere, og forøvrigt, selvom det ikke er modelleret i Balmorel, er forbundet med store opstart- og nedlukningsomkostninger.

Disse problemer kan dog afhjælpes. Estland og Letland har kapaciteter på både dampturbiner og combined cycle anlæg, der kan fungere som spidslastværker, og da Litauen eksporterer store mængder el til Estland og Letland, bør Litauen kunne opretholde en stabil elproduktion, men variere deres eksport afhængig af om belastningen i en periode er spids- mellem- eller lavlast. For at dette kan lade sig gøre, vil det kræve et tæt samarbejde mellem forsynings- og transmissionselskaberne i de 3 lande.

Et andet problem ved atomkraft er, at det kan være svært at finde investeringsvillig kapital, og at det kan være forbundet med en del kontroverser at bygge atomkraftanlæg.

## 8.6 Simulering med udvidede Balmorel uden mulighed for investering i atomkraft

I det afsnit er udført en simulering, hvor det ikke tillades at investere i atomkraft. Resultatet ses på figur 8.4. Når det ikke tillades at investere i atomkraft, må de lidt dyrere teknologier anvendes. Derfor anvendes udelukkende den eksisterende kapacitet frem til år 2010. Den overskydende kapacitet anvendes til eksport. I



Figur 8.4: Kapaciteter incl. investeringer foretaget med den udvidede Balmorel uden mulighed for investering i atomkraft.

år 2011 investeres 2300 MW i teknologierne ST-E1-PEsn, ST-B1-MWn, CC-C1-NGn, CC-E1-NGn som er hhv. udtags, modtryk, combined cycle med kondens og combined cycle med udtag. De suppleres løbende op indtil 2030. Derudover investeres i 2013 i WL-L1, som er vindenergi. I 2020 rammes loftet på 500 MW vindpotentiale, som det i balmoreldatasættet er vurderet at være til stede i Litauen.

Litauens elimport fra Estland og Letland er stigende i perioden 2011 - 2024 fra omkring 100 GWh til 1300 GWh. Herefter falder den igen.

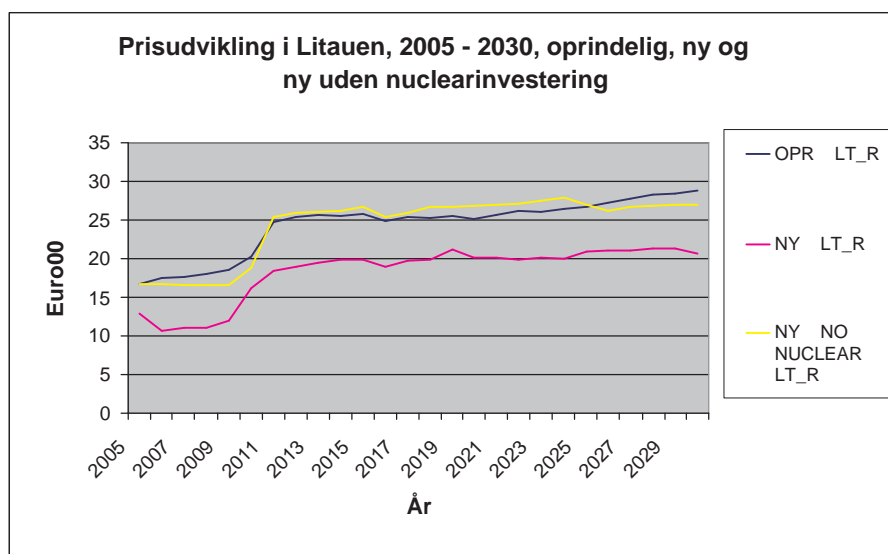
Den samlede elkapacitet er sammenlignelig med den samlede elkapacitet, som den oprindelige Balmorel fandt, omend fordelingen på teknologier er lidt anderledes. Dette ses også for varmeinvesteringerne, som bortset fra at de dårlige investeringer i EH-P1 ikke foretages, minder om de investeringer den oprindelige model fandt. Der ses dog en ting, som ikke ville forekomme med den oprindelige, nemlig at de investeringer, som foretages i år 2005 og 2006 forsvinder i år 2025 og 2026, hvilket betyder at modellen i disse år må investere igen. Det ses således, at i årene 2025 til 2026 bliver HO-BO-PE erstattet af HO-BO-NG.

## 8.7 Elpriser

Det er selvfølgelig også interessant at se på elpriserne i den oprindelige Balmorel og den udvidede Balmorel ved de 3 scenarier. På figur 8.5 ses prisudviklingen på el i Litauen for de 3 simuleringer. Det er vigtigt at huske at den udvidede Balmorel i begge simuleringer er udført med fuld horisont, hvilket betyder at de langsigtede marginale omkostninger sikrer, at *NPV*-værdien for de investeringer som foretages, er positiv indenfor simuleringshorisonten. Graferne viser altså den prisudvikling, som skal til for investeringerne giver overskud. Dette gælder ikke for den oprindelige Balmorel. Her er der intet som sikrer at *NPV*-værdierne for investeringerne er positive. Man kunne således forvente, at priserne var lavere for den oprindelige Balmorel end priserne for den udvidede Balmorel. Dette er imidlertid ikke tilfældet. Der er 2 forklaringer.

Den ene er, at den annuitet, der betales, når der investeres, er højere i den





Figur 8.5: Prisudviklingen fra den oprindelige Balmorel samt de 2 kørsler med den udvidede Balmorel.

oprindelige Balmorel end i den udvidede Balmorel. I den oprindelige Balmorel udregnes annuiteten på baggrund af et 20 årigt lån, i den udvidede Balmorel bliver annuiteten udregnet på baggrund af teknologiernes levetid, 25 år eller mere.

Den anden forklaring er, at atomkraftteknologiernes kortsigtede marginale omkostninger er meget lave, og da hele produktionen lægges over på disse teknologier, vil de kortsigtede marginale omkostninger fra den udvidede Balmorel være lavere end de kortsigtede marginale omkostninger fra den oprindelige Balmorel.

Det er dog interessant at bemærke, at priskurven fra den udvidede Balmorel, når det ikke tillades at investere i atomkraft, er direkte sammenlignelig med priskurven for den oprindelige Balmorel med investeringer i atomkraft.

Tillades investeringer i atomkraft, giver det mulighed for at finde en bedre løsning, hvilket giver lavere (marginale) omkostninger og dermed lavere priser. Derfor ligger priskurven for den udvidede Balmorel med atomkraft lavere end uden. Fælles for alle 3 kurver er springet i årene 2010 - 2011. Dette spring skyldes, at kapaciteten forsvinder, så alle modeller må investere kraftigt.

## 8.8 Opsummering

Hensigten med denne case er, at illustrere at ændringerne fra oprindelig til den udvidede Balmorel har en effekt, og at denne effekt er positiv. Det vigtigste resultat er, at den udvidede Balmorel ikke foretager de dårlige investeringer i teknologier, som omdanner el til varme. Det er til gengæld mere diskutabelt, om det er realistisk at omlægge hele produktionen til atomkraft. Men som argu-

menteret for tidligere, hvis eksporten kan reguleres således produktionen holdes stabil, er det måske ikke urealistisk. Investeringerne uden atomkraft virker dog ganske rimelige.

En interessant bemærkning er, at det i Litauen for øjeblikket diskuteres, om det er profitabelt at bygge et nyt stor atomkraftværk og tjene penge på eksport [15]. Hvis datasættet som følger med Balmorel er realistisk, og det er fornuftigt at anvende teknologiers levetid som annuitetsberegning, hvilket vi mener det er, fordi en teknologi må forventes at tjene penge i hele sin levetid, er konklusionen klar. Ideen om en nyt atomkraftværk i Litauen, som kan anvendes til eksport er interessant at arbejde videre med.

## Kapitel 9

# Konklusion

I projektet er redegjort for den økonomiske teori, som anvendes på et dereguleret marked med fuldkommen konkurrence. Der er redegjort for den vigtigste økonomiske teori, såsom markedsligevægt, kortsigtede og langsigtede marginale omkostninger. Der er redegjort for de vigtigste økonomiske parametre, såsom levetid, skrotværdi, *NPV*-værdi og diskonteringsrente, som skal anvendes ved investeringsovervejelser. Der er redegjort for teknologier, som anvendes til el og varmeproduktion, samt redegjort for, hvorledes deres investerings- og produktionsomkostninger har indflydelse på, hvilke lastperioder de anvendes i.

Ovenstående er samlet i den udvidede kraftvarmemodel fra afsnit 4.2, der er en partial ligevægts LP-model. Det er bevist, hvordan skyggepriserne til ligevægtsbegrænsningerne kan fortolkes som hhv. langsigtede og kortsigtede marginale omkostninger, afhængig af om kapacitetsbegrænsningerne er bindende eller ej. Yderligere blev det bevist, hvilke forudsætninger en sådan LP-model skal opfylde, for at *NPV*-værdierne (indenfor modelhorisonten) for investeringer foretaget af modellen er positive. Løses den udvidede Balmorel med fuld horisont, svarer det til at løse den udvidede kraftvarmemodel. Beviserne omkring kortsigtede og langsigtede marginale omkostninger samt *NPV*-værdier på investeringer, er således gældende for den udvidede Balmorel.

Formålet med eksamensprojektet var at forbedre håndteringen af investeringer i Balmorel. Derfor er ændringer, som sikrer dette indført i Balmorel. Der er indført levetid på investeringer, således investeringer forsvinder igen når deres tekniske levetid udløber. Når levetiden udløber er indført en skrotværdi. For at kunne nutidsvurdere investeringerne er indført en diskonteringsrente, og der er indført en lånerente, som anvendes til at beregne den årlige annuitet. Der er indført en længere modelhorisont og tidshorisont, samt ekstra begrænsninger, som sikrer at modellen med en længere tidshorisont er korrekt. Der er indført økonomisk levetid på transmissionsforbindelser, og endelige er indført mulighed for at anvende diskrete investeringer.

Den udvidede Balmorel er holdt i den oprindelige Balmorel's ånd, om at være meget fleksibel. Simuleringsstrukturen er ændret, således det er muligt, at løse den udvidede Balmorel som den oprindelige Balmorel. Det er muligt at løse med fuld horisont eller løse med en række variationer med forskellige modelhorisonter

og årsafstande. Derved er det muligt at simulere en længere tidshorisont med kort modelhorisont. Det er verificeret, at den udvidede Balmorel med 1-årig modelhorisont finder den samme løsning, som den oprindelige Balmorel. Den fleksible simuleringsstruktur betyder at en undersøgelse af investeringer kan belyses med mange former for horisonter.

Alle ændringer er analyseret med det eksisterende datasæt. Nogle ændringer har med det nuværende datasæt større effekt end andre, men alle ændringer er med til at håndtere investeringerne bedre i den udvidede end den oprindelig Balmorel. Dette blev belyst i det lille case study af investeringer i Litauen (kapitel 8). Den oprindelige Balmorel blev kritiseret for at investere store mængder i teknologier, som konverterer el til varme, selvom overkapaciteten af el, kun eksisterer i en lille årrække. Dette gør den udvidede Balmorel ikke. Dette problem er altså løst.

De ændringer, som har den største effekt, er længere modelhorisont og levetid, således investeringer forsvinder når levetiden forsvinder. Dette kombineret med den fleksible simuleringsstruktur betyder, at det med den udvidede Balmorel er muligt at foretage bedre og mere avancerede analyser af investeringer end det var med den oprindelige Balmorel. Formålet med projektet er opfyldt på fornuftig vis, der inkluderer mulighed for investeringsanalyser ved forskellige modelhorisonter. Der er indført de økonomiske begreber, såsom diskonteringsrente, skrotværdi og garanti for positiv *NPV*-værdier, som er vigtige at betragte ved investeringsanalyser.

Det betyder dog ikke, at der ikke er videre arbejde, som kan udføres. En af de antagelser, som blev lavet i projektet er, at den økonomiske levetid er lig den tekniske. Det har den konsekvens, at både indtægter og udgifter tilbagediskonteres hvert år i hele levetiden. Udføres en samfundsøkonomisk analyse påvirker diskonteringsrenten derfor kun meget lidt valget af investeringer. Diskonteringsrenten ville få større indflydelse på valget af investeringer, hvis der indførtes en decideret økonomisk levetid på hver teknologi. LP-modelleringen ville sikre, at *NPV*-værdien for investeringer i teknologierne skulle være positiv indenfor den økonomiske levetid i stedet for den tekniske levetid. Antagelsen at økonomisk og teknisk levetid er ens, er egentligt ikke ufornuftigt, idet det må antages, at en teknologi generer indtægt i hele sin levetid, men indføres en økonomisk levetid, ville det gøre Balmorel endnu mere fleksibel.

Da projektet startede kendte vi ikke Balmorel i detaljer, men vi vidste, at der har været en del mennesker involveret i projektet, og at der er bred enighed om, at opbygningen af Balmorel er fornuftig. Vi valgte derfor fra starten en strategi, hvor vi bevidst ville foretage så få ændringer som muligt, og vi ville lave en fleksibel implementering, så den udvidede Balmorel kunne køre som den oprindelige. Dette er også opnået, men for at få modelleringen med længere modelhorisont til at fungere i praksis indeholder den udvidede model begrænsninger og variable, der kunne elimineres.

I den oprindelige model opsplittes produktion på hhv. eksisterende kapacitet og investeret kapacitet i hvert år. Dette er en fordel ved 1-årig modelhorisont, da simuleringsstrukturen kan opdatere sets, som indeholder information om (område, teknologi)-par, der eksisterer hvert år. Når modelhorisonten i den udvidede

model øges, kan det selvsagt ikke vides hvilke teknologier, der investeres i. De sets, som med fordel blev anvendt i den oprindelige model, kan ikke længere anvendes med fordel. I stedet for at indeholde information om, hvad der er sket, skal de også indeholde information om, hvad der kan ske. Ellers er modellen ikke korrekt. Setsene øger i stedet antallet af begrænsninger og variable, og det er ikke længere en fordel at splitte produktionen på ny og gammel kapacitet.

For at minimere ændringerne af den oprindelige model valgte vi at beholde opsplitning af produktion på eksisterende og ny kapacitet. Produktionen kan med fordel slås sammen i én variabel, som indeholder produktion på både ny og eksisterende kapacitet. Gøres dette vil antallet af variable og begrænsninger blive reduceret. Ændringen vil betyde, at fortolkning af nogle resultater skal ændres, fordi det ikke længere er muligt, at skelne mellem produktion på eksisterende og ny kapacitet. Desuden skal et betydeligt antal outputrutiner kodes om. Gevinsten ved ændringen vil være den samlede løsnings tid bliver reduceret, fordi problemets størrelse reduceres betydeligt.

Endelig ville det have været interessant, at have foretaget resultatanalyser på et datasæt i mindre skala. F. eks. hvor områderne repræsenterer virksomheder. Vi har en forventning om, at skrotværdi og diskrete investeringer har en større effekt på resultaterne med et sådant datasæt, end det er tilfældet med det nuværende datasæt.

Målet med projektet er nået. Håndteringen af investeringer er forbedret, så modellen foretager bedre investeringer set over en længere årrække. I modellen er indført de vigtigste begreber, som anvendes ved investeringsvurderinger. Udvidelserne er i den oprindelige Balmorel's ånd meget fleksibelt implementeret. Herudover har vi matematisk bevist, hvilke forudsætninger, som skal være opfyldt for at *NPV*-værdien for enhver investering er positiv. Som en del af beviset fremgår, hvordan sammenspillet mellem den optimale løsning og skyggepriser er, og hvordan de kan fortolkes som langsigtede og kortsigtede marginale omkostninger. Dette resultat kan også anvendes ved andre analyser med Balmorel end investeringsanalyser. Alt i alt nogle gode resultater, som vi er meget tilfredse med.



# Litteratur

- [1] Hans F. Ravn m.fl., *Balmorel: A Model For Analysis of the Electricity and CHP Markets in the Baltic Sea Region*, Balmorel Project, March 2001.
- [2] Hans F. Ravn, *The Balmorel Model Structure*, Version 2.11 (July 2004, revised July 2004).
- [3] Hans F. Ravn, *The Balmorel Model: Theoretical Background*, March 2001.
- [4] Poul Erik Grohnheit og Helge V. Larsen, *Balmorel - Data and Calibration*, March 2001.
- [5] <http://www.di.dk/oekonomiogsamfund/emne.asp?page=DOC&objno=282536>
- [6] <http://www.nordpool.com/>
- [7] Økonomi og erhvervsministeriet *Liberalisering af energimarkedene Baggrundsrapport*, september 2002.
- [8] Kurt Pedersen, Erik Strøjer Madsen og Jørgen Ulff-Møller Nielsen *Økonomisk teori - i internationalt perspektiv*, 5. udg. 2000.
- [9] Hamish Fraser *The Importance of an Active Demand Side in the Electricity Industry*, The Electricity Journal, 52-73, November 2001.
- [10] Don E. Waldman, *Microeconomics*, Eddison Wesley, 2004, ISBN 0-321-24838-4.
- [11] Hillier and Lieberman, *Introduction To Operations Research*, McGraw-Hill, Inc 1995.
- [12] Elkraft System, *Decentral kraftvarme i Danmark*, Elkraft System, november 2002.
- [13] A. Brooke, D. Kendrick, A. Meeraus, R. Raman, *GAMS - A USER'S GUIDE*, GAMS Development Corporation, 1998.
- [14] Nuclear Energy Agency, *Decommissioning Nuclear Power Plants - Policies, Strategies and Costs*, OECD, 2003.
- [15] [http://www.iae.it/inpp\\_en.asp?lang=1&subsub=25](http://www.iae.it/inpp_en.asp?lang=1&subsub=25).
- [16] Energistyrelsen, Eltra og Elkraft System, *Technology data for electricity and heat generating plants*, March 2004, ISBN www 87-7844-440-3.

- [17] Elkraft System, Decentral kraftvarme i Danmark Baggrundsrapport - Systemplan 2002, November 2002.
- [18] <http://www.nmcco.com/education/facts/general/capacity.htm>.
- [19] <http://www.ks.dk/publikationer/konkurrence/1998/e-rapport/k02/#afsnit1.1>.
- [20] Hal R. Varian, *Microeconomic Analysis*, Norton 1992, ISBN 0-393-95735-7.
- [21] Hal R. Varian, *Intermediate Microeconomics - A Modern Approach*, Norton 1996, ISBN 0-393-96842-1.
- [22] Michael D. Intriligator, *Mathematical Optimization and Economic Theory*, Prentice-Hall 1971.
- [23] Finansministeriet, *Vejledning i Udarbejdelse af Samfundsøkonomiske Analyser*, Finansministeriet 1999.
- [24] M. Togby m.fl., *FLeksibilitet i Elforbruget*, Elkraft System , ISBN 87-986969-4-7.
- [25] Capros, P. et al. *The PRIMES energy system model - reference manual*, National Technical University of Athens 1998.
- [26] Jussi Mäkelä, Pekka Pirilä, *Models and Systems - Development of Energy System Models for Finland in Co-Operation with IEA ETSAP Programme*, Helsinki University of Technology.
- [27] Elkraft System, *Scenarieregninger - Klimavirkemidler og forsyningsikkerhed* Elkraft System, Juli 2003.
- [28] Elkraft System, COWI, Lietuvos Energija Lithuanian Energy Institute, *Economic analyses in the electricity sector in Lithuania*, Elkraft System m.fl. februar 2002.
- [29] Laurence A. Wolsey, *Integer Programming*, John Wiley & Sons, inc., 1998, ISBN: 0-471-28366-5.
- [30] Danish Energy Authority, *Power Sector Development in a Common Baltic Electricity Market*, 2005.



# Bilag A

## LP formulering af den oprindelige model i Balmorel

Følgende er en matematisk model, som beskriver den oprindelige Balmorel version 2.11. LP formulering af modellen i dens nuværende form benytter sig af lidt GAMS syntaks. GAMS syntaksen tillader følgende ”cirkulære” begrænsning:  $x_{t+1} = x_t$ , hvor  $t = 1 \dots 24$ , hvilket betyder, at  $x_{t+1} = x_t$  for  $t = 1 \dots 23$  og  $x_{24} = x_1$ . Dette tillades også i følgende matematiske model, med ovenstående tolkning.

### A.1 Definition af indeks

Der defineres følgende indeks:

- $c$ : Lande.
- $r$ : Region.
- $a$ : Områder.
- $g$ : Teknologier.
- $i$ : Typer af energi ( $E = \text{el}$ ,  $H = \text{varme}$ ).
- $f$ : Primær energi (fuels).
- $s$ : Sæsoner.
- $t$ : Tidsperioder.
- $u$ : Up steps (skridt, som estimerer stigning på efterspørgselskurven).
- $d$ : Down steps (skridt, som estimerer fald på efterspørgselskurven).
- $j$ : Alders typer (*new*, *old*).

## A.2 Definition af mængder

Der defineres følgende mængder:

- $C$ : Lande, indeholder  $c$  lande
- $R$ : Regioner, indeholder  $r$  regioner
- $A$ : Områder, indeholder  $a$  områder
- $GT$ : Teknologier, indeholder  $g$  teknologier
- $S$ : Sæsoner, indeholder  $s$  sæsoner
- $T$ : Tidsperioder, indeholder  $t$  tidsperioder
- $J$ : Alders typer indeholder  $j$
- $I$ : Typer af energi, indeholder 2 typer, el og varme.
- $F$ : Typer af primærenergi (fuel), indeholder  $f$  typer.

Fra disse mængder defineres følgende del-mængder:

- $A_c \subset A$ : Områder der findes i land  $c$
- $A_r \subset A$ : Områder der findes i region  $r$
- $R_c \subset R$ : Regioner der findes i land  $c$
- $EXIMP_r \subset R$ : Regioner som region  $r$  kan importere el fra og eksportere el til.
- $GT_a \subset GT$ : Teknologier der findes i område  $a$
- $GT^1 \subset GT$ : Primær teknologier
- $GT_g^2 \subset GT$ : Sekundær teknologier hørende til teknologi  $g$
- $GT_a^{CND} \subset GT_a$ : Kondensteknologier i område  $a$
- $GT_a^{BPR} \subset GT_a$ : Modtryksteknologier i område  $a$
- $GT_a^{EXT} \subset GT_a$ : Udtagsteknologier i område  $a$
- $GT_a^{HOB} \subset GT_a$ : Varmekedel teknologier i område  $a$
- $GT_a^{TOH} \subset GT_a$ : Elektrisk Varmekedel- og varmepumpeteknologier i område  $a$
- $GT_a^{HST} \subset GT_a$ : Varmelager teknologier i område  $a$
- $GT_a^{EST} \subset GT_a$ : Ellager teknologier i område  $a$
- $GT_a^{HYS} \subset GT_a$ : Reguleret vandkraftteknologier i område  $a$
- $GT_a^{HYR} \subset GT_a$ : Ureguleret vandkraftteknologier i område  $a$
- $GT_a^{WND} \subset GT_a$ : Vindkraftteknologier i område  $a$

- $GT_a^{SOL} \subset GT_a$ : Solenergiteknologier i område  $a$
- $GT_a^{NUC} \subset GT_a$ : Atomkraftteknologier i område  $a$
- $GT_a^E = GT_a \setminus (GT_a^{HOB} \cup GT_a^{HST})$ : El-producerende teknologier i område  $a$
- $GT_a^H = GT_a^{BPR} \cup GT_a^{EXT} \cup GT_a^{HOB} \cup GT_a^{TOH} \cup GT_a^{HST}$ : Varme-producerende teknologier i område  $a$ .
- $GT_a^f \subset GT_a$ : Teknologier, som anvender primærenergi (fuel)  $f$  i område  $a$
- $FP_o \subset F$ : Typer  $f$ , der kan anvendes (har et potentiale) i land ( $o = c$ ), region ( $o = r$ ) og område ( $o = a$ ).
- $T^{work} \subset T$ : Tidsperioder, som er arbejdstid.
- $T^{wend} \subset T$ : Tidsperioder, som er weekendtid.

### A.3 Definition af variable

I modellen benyttes følgende variable

- $G_{a,g,s,t}^{i,j}$ : Produktionen af type  $i$ , område  $a$ , teknologi  $g$ , Tid  $(s, t)$ , hhv. ny og gammel ( $j = new, old$ )
- $X_{r,r,s,t}^E$ : Eltransmission, fra region  $r$  til  $r$ , tid  $(s, t)$
- $G_{a,g}^{K^{new}}$ : Ny produktionskapacitet område  $a$ , teknologi  $g$
- $X_{r,r}^{K^{E,new}}$ : Ny el-transmissionskapacitet mellem region  $r$  til  $r$ .
- $D_{r,s,t,u}^{E,up}$ : Stigning i efterspørgsel på el region  $r$ , tid  $(s, t)$ , step  $u$ .
- $D_{r,s,t,d}^{E,down}$ : Fald i efterspørgsel på el region  $r$ , tid  $(s, t)$ , step  $u$ .
- $D_{a,s,t,u}^{H,up}$ : Stigning i efterspørgsel på varme region  $r$ , tid  $(s, t)$ , step  $u$
- $D_{a,s,t,d}^{H,down}$ : Fald i efterspørgsel på varme region  $r$ , tid  $(s, t)$ , step  $u$ .
- $W_{a,s}$  Indhold i vandreservoir, område  $a$ , sæson  $s$
- $N_{a,g,s}^{work}, N_{a,g,s}^{wend}$ : Gennemsnits produktion på nuclear teknologi  $g \in GT^{NUC}$ , område  $a$ , sæson  $s$  på hhv. arbejdsperioder ( $work$ ) og friperioder ( $wend$ ).
- $L_{a,s,t}^i$  Energipåfyldning på lager af type  $i$ , område  $a$ , tid  $(s, t)$ .
- $V_{a,s,t}$  Energiindhold på lager af type  $i$ , område  $a$ , tid  $(s, t)$ .

## A.4 Definition af konstanter

I modellen benyttes følgende konstanter

- $\hat{D}_{r,s,t}^E$ , Exogent givet el efterspørgsel
- $\hat{D}_{a,s,t}^H$ , Exogent givet varme efterspørgsel
- $\tau$ , Transmissionstab
- $\chi_{r,s,t}$ , Eksport til 3 lande fra region  $r$ , sæson  $s$ , periode  $t$
- $\delta$ , Distributionstab
- $G_{a,g}^{old}$ , Produktionskapacitet
- $X_{r,r}^{old}$ , Transmissionskapacitet
- $GDCB_g$ , Cb-value (CHP-Ext); Hours to unload (storage)
- $GDCV_g$ , Cv-value (CHP-Ext); Hours to load (storage)
- $GDFE_g$ , Fuel efficiency
- $GDCOMBSK_g$ , Max andel af kapaciteten, som produktionen på en primær teknologi må udgøre.
- $GDCOMBSLO_g$ , Min andel af samlet produktion, som produktionen på teknologi  $g$  må udgøre.
- $GDCOMBSUP_g$ , Max andel af samlet produktion, som produktionen på teknologi  $g$  må udgøre.
- $\rho_{a,g,s}^K$ , Reduktion i kapacitet
- $\rho_{a,g}^{eff}$ , Reduktion i efficiency
- $\nu_s$ , Vægt sæson  $s$
- $\nu_t$ , Vægt tid  $t$
- $\omega_a^q$ , Full load hours for hhv. hydro run-of-river, vind og solkraft. Svarende til  $q = HYR, WND, SOL$  plant.
- $v_{a,s,t}^q$ , Variationen elproduktionen for hydro run-of-river, vind og solkraft. Svarende til  $q = HYR, WND, SOL$
- $\iota_{a,s}$ , Inflow til område  $a$  i sæson  $s$ .
- $\eta_{a,s}$ , Hydro price profile område  $a$ , sæson  $s$ .
- $\theta_{f,o}$ , Fuel potential for fuel  $f$  i land ( $o = c$ ), region ( $o = r$ ) og område ( $o = a$ ).
- $CO2_c^{limit}$ , Begrænsning på udledning af  $CO_2$
- $SO2_c^{limit}$ , Begrænsning på udledning af  $SO_2$

- $NOX_c^{limit}$ , Begrænsning på udledning af  $NO_x$ -gasser.
- $CO2_g^{im}$ , Udledning af  $CO_2$  teknologi  $g$
- $SO2_g^{im}$ , Udledning af  $SO_2$  teknologi  $g$
- $NOX_g^{im}$ , Udledning af  $NO_x$ -gasser teknologi  $g$
- $CO2_c^{tax}$ , Afgift på  $CO_2$  land  $c$
- $SO2_c^{tax}$ , Afgift på af  $SO_2$  land  $c$
- $NOX_c^{tax}$ , Afgift på af  $NO_x$ -gasser land  $c$
- $\phi_{f,a}$ , Pris fuel  $f$ , område  $a$ .
- $\phi_{f,c}^{tax}$ , Afgift fuel  $f$ , land  $c$ .
- $\zeta_g^V$ , Variable drifts- og vedligeholdelsesomkostninger.
- $\zeta_g^F$ , Faste drifts- og vedligeholdelsesomkostninger.
- $\xi_{r,r}$ , Transmissionaomkostninger fra region  $r$  til  $r$ .
- $G\pi_{a,g}$ , Investeringsomkostninger i ny kapacitet område  $a$ , teknologi  $g$
- $X\pi_{r,r}$ , Investeringsomkostninger i ny transmissionskapacitet region ( $r, r$ )
- $\gamma_c$ , Annuitet, % vis ydelse af hele lånet pr år i land  $c$ .
- $\alpha_d^E$ , Elasticitetskoefficienter i nyttenytttefunktionen ved fald i elefterspørgsel.
- $\beta_u^E$ , Elasticitetskoefficienter i nyttenytttefunktionen ved stigning i elefterspørgsel.
- $\alpha_d^H$ , Elasticitetskoefficienter i nyttenytttefunktionen ved fald i varmeefterspørgsel.
- $\beta_u^H$ , Elasticitetskoefficienter i nyttenytttefunktionen ved stigning i varmeefterspørgsel.

## A.5 Objektfunktionen

Objektfunktionen er opbygget at følgende led:

### A - Udgifter til primærenergi.

$$\sum_{j \in J} \sum_{a \in A} \sum_{f \in F} \sum_{g \in GT_a^f} \phi_{f,a} \cdot 3.6 \cdot \sum_{s \in S, t \in T} 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot \frac{G_{a,g,s,t}^{E,j}}{GDFE_g \cdot \rho_{a,g}^{eff}} +$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{a \in A} \sum_{f \in F} \sum_{g \in GT_a^f} \phi_{f,a} \cdot 3.6 \cdot \sum_{s \in S, t \in T} 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot \frac{GDCV_g \cdot G_{a,g,s,t}^{H,j}}{GDFE_g \cdot \rho_{a,g}^{eff}} +$$

**B - Drift og vedligeholdelses udgifter**

$$\begin{aligned} & \sum_{j \in J} \sum_{a \in A} \sum_{g \in GT_a^E} \zeta_g^V \cdot \sum_{s \in S, t \in T} 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot G_{a,g,s,t}^{E,j} + \\ & \sum_{j \in J} \sum_{a \in A} \sum_{g \in GT_a^{EXT}} \zeta_g^V \cdot \sum_{s \in S, t \in T} 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot GDCV_g \cdot G_{a,g,s,t}^{H,j} + \\ & 1000 \cdot \left[ \sum_{i \in I} \sum_{a \in A} \sum_{g \in GT_a} \zeta_g^F \cdot \sum_{s \in S, t \in T} 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot (G_{a,g}^{old} + G_{a,g}^{new}) \right] + \end{aligned}$$

**C - Hydro with storage seasonal price profile**

$$\sum_{j \in J} \sum_{a \in A} \sum_{g \in GT_a^{HYs}} \sum_{s \in S, t \in T} 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot \eta_{a,s} \cdot G_{a,g,s,t}^{E,j} +$$

**D - Transmissions omkostninger**

$$\sum_{r \in R} \sum_{r_2 \in EXIMP_r} \sum_{s \in S, t \in T} 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot X_{r,r_2,s,t}^E \cdot \xi_{r,r_2} +$$

**E - Investeringsomkostninger, ny kapacitet**

$$1000000 \cdot \left[ \sum_{c \in C} \sum_{a \in A_c} \sum_{g \in GT_a} G_{a,g}^{new} \cdot G_{\pi_{a,g}} \cdot \gamma_c \right] +$$

**E - Investeringsomkostninger, ny transmissions kapacitet**

$$\sum_{r \in R} \sum_{r_2 \in EXIMP_r} X_{r,r_2}^{E,new} \cdot X_{\pi_{r,r_2}} \cdot \frac{\gamma_{c_r} + \gamma_{c_{r_2}}}{2} + ,$$

hvor  $c_r$  er land med region  $r$  og hvor  $c_{r_2}$  er land med region  $r_2$ .

**E - Emissions skat**

$$\begin{aligned} & \sum_{j \in J} \sum_{c \in C} \sum_{a \in A} \sum_{g \in GT_a^E} \sum_{s \in S, t \in T} 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot \\ & CO2_g^{im} \cdot 0.001 \cdot 3.6 \cdot \frac{G_{a,g,s,t}^{E,j}}{GDFE_g \cdot \rho_{a,g}^{eff}} \cdot CO2_c^{tax} + \\ & \sum_{j \in J} \sum_{c \in C} \sum_{a \in A} \sum_{g \in GT_a^H} \sum_{s \in S, t \in T} 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& GDCV_g \cdot CO2_g^{im} \cdot 0.001 \cdot 3.6 \cdot \frac{G_{a,g,s,t}^{H,j}}{GDFE_g \cdot \rho_{a,g}^{eff}} \cdot CO2_c^{tax} + \\
& \sum_{j \in J} \sum_{c \in C} \sum_{a \in A} \sum_{g \in GT_a^E} \sum_{s \in S, t \in T} 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot \\
& SO2_g^{im} \cdot 0.001 \cdot 3.6 \cdot \frac{G_{a,g,s,t}^{E,j}}{GDFE_g \cdot \rho_{a,g}^{eff}} \cdot SO2_c^{tax} + \\
& \sum_{j \in J} \sum_{c \in C} \sum_{a \in A} \sum_{g \in GT_a^H} \sum_{s \in S, t \in T} 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot \\
& GDCV_g \cdot SO2_g^{im} \cdot 0.001 \cdot 3.6 \cdot \frac{G_{a,g,s,t}^{H,j}}{GDFE_g \cdot \rho_{a,g}^{eff}} \cdot SO2_c^{tax} + \\
& \sum_{j \in J} \sum_{c \in C} \sum_{a \in A} \sum_{g \in GT_a^E} \sum_{s \in S, t \in T} 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot \\
& NOX_g^{im} \cdot 0.001 \cdot 3.6 \cdot \frac{G_{a,g,s,t}^{E,j}}{GDFE_g \cdot \rho_{a,g}^{eff}} \cdot NOX_c^{tax} + \\
& \sum_{j \in J} \sum_{c \in C} \sum_{a \in A} \sum_{g \in GT_a^H} \sum_{s \in S, t \in T} 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot \\
& GDCV_g \cdot NOX_g^{im} \cdot 0.001 \cdot 3.6 \cdot \frac{G_{a,g,s,t}^{H,j}}{GDFE_g \cdot \rho_{a,g}^{eff}} \cdot NOX_c^{tax} +
\end{aligned}$$

**F - Skat på primærenergi**

$$\begin{aligned}
& \sum_{j \in J} \sum_{c \in C} \sum_{a \in A_c} \sum_{f \in F} \sum_{g \in GT_a^f \cap GT_a^E} \sum_{s \in S, t \in T} 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot \\
& \phi_{f,c}^{tax} \cdot 3.6 \cdot \frac{G_{a,g,s,t}^{E,j}}{GDFE_g \cdot \rho_{a,g}^{eff}} + \\
& \sum_{j \in J} \sum_{c \in C} \sum_{a \in A_c} \sum_{f \in F} \sum_{g \in GT_a^f \cap GT_a^H} \sum_{s \in S, t \in T} 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot \\
& \phi_{f,c}^{tax} \cdot 3.6 \cdot GDCV_g \cdot \frac{G_{a,g,s,t}^{H,j}}{GDFE_g \cdot \rho_{a,g}^{eff}} +
\end{aligned}$$

**G - Ændring i forbrugernes nytte relativt til el forbruget**

$$\begin{aligned}
& \sum_{r \in R} \sum_{s \in S, t \in T} 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot \left[ \sum_d D_{r,s,t,d}^{E,down} \cdot \alpha_d^E - \sum_u D_{r,s,t,u}^{E,up} \cdot \beta_u^E \right] + \\
& \sum_{a \in A} \sum_{s \in S, t \in T} 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot \left[ \sum_d D_{a,s,t,d}^{H,down} \cdot \alpha_d^H - \sum_u D_{a,s,t,u}^{H,up} \cdot \beta_u^H \right]
\end{aligned}$$

Den samlede objektfunktion for et år er således summen af alle ovenstående led.

## A.6 Begrænsninger

### A.6.1

Ligevægt for el-producerende teknologier. Dvs. ligevægt mellem elproduktion, eltransmission og elefterspørgselen.

$$\forall r \in R, \forall s \in S, \forall t \in T$$

$$\begin{aligned} & \sum_{a \in A_r} \left[ \sum_{g \in GT_a \setminus GT_a^{TOH}} \sum_{j \in J} G_{a,g,s,t}^{E,j} - \sum_{g \in GT_a^{TOH}} \sum_{j \in J} G_{a,g,s,t} \right] \\ + & \sum_{r_2 \in EXIMP_r} X_{r_2,r,s,t}^E \cdot \tau = \chi_{r,s,t} + \delta \cdot \left[ \hat{D}_{r,s,t}^E + \sum_u D_{r,s,t,u}^{E,up} - \sum_d D_{r,s,t,d}^{E,down} \right] \\ & + \sum_{r_2 \in EXIMP_r} X_{r,r_2,s,t}^E \end{aligned}$$

### A.6.2

Ligevægt for varme-producerende teknologier. Dvs. ligevægt mellem varmeproduktion og varmeefterspørgselen.

$$\forall a \in A, \forall s \in S, \forall t \in T$$

$$\begin{aligned} & \sum_{g \in GT_a^H} \sum_{j \in J} G_{a,g,s,t}^{H,j} - L_{a,s,t}^H \\ = & \delta \cdot \left[ D_{a,s,t}^H + \sum_u D_{a,s,t,u}^{H,up} - \sum_d D_{a,s,t,d}^{H,down} \right] \end{aligned}$$

### A.6.3

Produktionen af elektricitet på modtryksteknologier

$$\forall g \in GT_a^{BPR}, \forall a \in A, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall j \in J$$

$$G_{a,g,s,t}^{E,j} = G_{a,g,s,t}^{H,j} \cdot GDCB_g$$

### A.6.4

Produktionsbegrænsning på elektricitet produceret på udtagsteknologier.

$$\forall g \in GT_a^{EXT}, \forall a \in A, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall j \in J$$

$$G_{a,g,s,t}^{E,j} \geq G_{a,g,s,t}^{H,j} \cdot GDCB_g$$

### A.6.5

Kapacitetsbegrænsninger for udtagsteknologier som ikke er primær teknologier.

$$\forall a \in A, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall g \in GT_a^{EXT} \setminus GT^1$$

$$G_{a,g,s,t}^{E,old} \leq G_{a,g}^{old} \cdot \rho_{a,g,s}^K - G_{a,g,s,t}^{H,old} \cdot GDCV_g$$

$$G_{a,g,s,t}^{E,new} \leq G_{a,g}^{new} \cdot \rho_{a,g,s}^K - G_{a,g,s,t}^{H,new} \cdot GDCV_g$$



**A.6.6**

Produktionsbegrænsninger for udtagsteknologier som er primær teknologier.

$$\forall a \in A, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall g \in GT_a^{EXT} \cap GT^1$$

$$G_{a,g,s,t}^{E,old} + \sum_{g_2 \in GT_g^2} G_{a,g_2,s,t}^{E,old} \leq G_{a,g}^{K,old} \cdot \rho_{a,g,s}^K - \left[ G_{a,g,s,t}^{H,old} + \sum_{g_2 \in GT_g^2} G_{a,g_2,s,t}^{H,old} \cdot GDCV_{g_2} \right]$$

$$G_{a,g,s,t}^{E,new} + \sum_{g_2 \in GT_g^2} G_{a,g_2,s,t}^{E,new} \leq G_{a,g}^{K,new} \cdot \rho_{a,g,s}^K - \left[ G_{a,g,s,t}^{H,new} + \sum_{g_2 \in GT_g^2} G_{a,g_2,s,t}^{H,new} \cdot GDCV_{g_2} \right]$$

**A.6.7**

Produktionen af varme på varmepumper og elkedler.

$$\forall a \in A, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall j \in J, \forall g \in GT_a^{TOH}$$

$$G_{a,g,s,t}^{E,j} = \frac{G_{a,g,s,t}^{H,j}}{GDFE_g}$$

**A.6.8**

Kapacitetsbegrænsning for ny kapacitet på primær teknologier, som ikke er varme producerende eller vand, vind eller solenergi teknologier.

$$\forall a \in A, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall g \in (GT_a \cup GT_a^1) \setminus (GT_a^{HYR} \cup GT_a^{WND} \cup GT_a^{SOL} \cup GT_a^{NUC})$$

$$G_{a,g,s,t}^{E,new} + \sum_{g_2 \in GT_g^2} G_{a,g_2,s,t}^{E,new} \leq G_{a,g}^{K,new} \cdot \rho_{a,g,s}^K$$

**A.6.9**

Kapacitetsbegrænsning for ny kapacitet ikke primær teknologier, som ikke er varme producerende eller vand, vind eller solenergi teknologier.

$$\forall a \in A, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall g \in (GT_a \setminus GT_a^1) \setminus (GT_a^{HYR} \cup GT_a^{WND} \cup GT_a^{SOL}) \cup GT_a^{HOB} \cup GT_a^{HST}$$

$$G_{a,g,s,t}^{E,new} \leq G_{a,g}^{K,new} \cdot \rho_{a,g,s}^K$$

**A.6.10**

Produktionen af elektricitet på ny kapacitet (kapacitets forøgeleser) på vand, vind og solenergi teknologier.

$$\forall a \in A, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall g \in GT_a^q$$

$$G_{a,g,s,t}^{E,new} = \omega_a^q \cdot G K_{a,g}^{new} \cdot \frac{\nu_{a,s,t}^q}{\sum_{s \in S, t \in T} [365 \frac{\nu_s}{\nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\nu_t} \nu_{a,s,t}^q]} , \text{ for } q = HYR, WND, SOL$$

**A.6.11**

Begrænsninger som holder styr på den mængde vand, der er i vandreservoiret for reguleret vandkraftteknologier.

$$\forall a \in \{a \in A \mid GT_a^{HYS} \neq \emptyset\}, \forall s \in S$$

$$W_{a,s,t+1} \leq W_{a,s,t} + \sum_{g \in GT_a^{HYS}} \iota_{a,s} \cdot G K_{a,g}^{old} - 365 \frac{\nu_s}{\nu_s} \cdot \sum_{t \in T} 24 \frac{\nu_t}{\nu_t} \cdot G_{a,g,s,t}^{E,old} + \sum_{g \in GT_a^{HYS}} \iota_{a,s} \cdot G K_{a,g}^{new} - 365 \frac{\nu_s}{\nu_s} \cdot \sum_{t \in T} 24 \frac{\nu_t}{\nu_t} \cdot G_{a,g,s,t}^{E,new}$$

**A.6.12**

Lagerbegrænsninger for varme.

$$\forall a \in \{a \in A \mid GT_a^{HST} \neq \emptyset\}, \forall s \in S, \forall t \in T$$

$$V_{a,s,t+1}^H = 0.99 \cdot V_{a,s,t}^H + 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot \left[ L_{a,s,t}^H - \sum_{g \in GT_a^{HST}, j \in J} G_{a,g,s,t}^{H,j} \right]$$

Lagerbegrænsninger for elektricitet.

$$\forall a \in \{a \in A \mid GT_a^{EST} \neq \emptyset\}, \forall s \in S, \forall t \in T$$

$$V_{a,s,t+1}^E = 0.99 \cdot V_{a,s,t}^E + 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot \left[ L_{a,s,t}^E - \sum_{g \in GT_a^{EST}, j \in J} G_{a,g,s,t}^{E,j} \right]$$

**A.6.13**

Påfyldningen af varme på lager skal være mindre end påfyldningskapaciteten.

$$\forall a \in \{a \in A \mid GT_a^{HST} \neq \emptyset\}, \forall s \in S, \forall t \in T$$

$$L_{a,s,t}^H \leq \sum_{g \in GT_a^{HST}} \frac{G K_{a,g}^{old} + G K_{a,g}^{new}}{GDCB_g}$$

Påfyldningen af elektricitet på lager skal være mindre end påfyldningskapaciteten.

$$\forall a \in \{a \in A \mid GT_a^{EST} \neq \emptyset\}, \forall s \in S, \forall t \in T$$

$$L_{a,s,t}^E \leq \sum_{g \in GT_a^{EST}} \frac{G\kappa_{a,g}^{old} + GK_{a,g}^{new}}{GDCB_g}$$

#### A.6.14

Produktion på lagerteknologier, der tages fra lageret af elektricitet eller varme, skal være mindre end kapaciteten af lageret.

$$\forall a \in \{a \in A \mid GT_a^{HST} \neq \emptyset\}, \forall s \in S, \forall t \in T$$

$$\sum_{g \in GT_a^{HST}} \sum_{j \in J} G_{a,g,s,t}^{H,j} \leq \sum_{g \in GT_a^{HST}} \frac{G\kappa_{a,g}^{old} + GK_{a,g}^{new}}{GDCB_g}$$

$$\forall a \in \{a \in A \mid GT_a^{EST} \neq \emptyset\}, \forall s \in S, \forall t \in T$$

$$\sum_{g \in GT_a^{EST}} \sum_{j \in J} G_{a,g,s,t}^{E,j} \leq \sum_{g \in GT_a^{EST}} \frac{G\kappa_{a,g}^{old} + GK_{a,g}^{new}}{GDCB_g}$$

#### A.6.15

Den mængde varme og elektricitet, der er på lager skal være mindre end kapaciteten.

$$\forall a \in \{a \in A \mid GT_a^{HST} \neq \emptyset\}, \forall s \in S, \forall t \in T$$

$$V_{a,s,t}^H \leq \sum_{g \in GT_a^{HST}} G\kappa_{a,g}^{old} + GK_{a,g}^{new}$$

$$\forall a \in \{a \in A \mid GT_a^{EST} \neq \emptyset\}, \forall s \in S, \forall t \in T$$

$$V_{a,s,t}^E \leq \sum_{g \in GT_a^{EST}} G\kappa_{a,g}^{old} + GK_{a,g}^{new}$$

#### A.6.16

Produktionen af elektricitet og varme, der produceres med fuel  $f$  i land  $c$ , skal være mindre end potentielt.

$$\forall c \in C, \forall f \in FP_c, \forall s \in S, \forall t \in T$$

$$\sum_{a \in A_c} \sum_{g \in GT_a^f} G\kappa_{a,g}^{old} + GK_{a,g}^{new} \leq \theta_{f,c}$$

#### A.6.17

Produktionen af elektricitet og varme, der produceres med fuel  $f$  i region  $r$ , skal være mindre end potentielt.

140BILAG A. LP FORMULERING AF DEN OPRINDELIGE MODEL I BALMOREL

$\forall r \in R, \forall f \in FP_r, \forall s \in S, \forall t \in T$

$$\sum_{a \in A_r} \sum_{g \in GT_a^f} G K_{a,g}^{old} + G K_{a,g}^{new} \leq \theta_{f,r}$$

**A.6.18**

Produktionen af elektricitet og varme, der produceres med fuel  $f$  i område  $a$ , skal være mindre end potentielt.

$\forall f \in FP_a, \forall s \in S, \forall t \in T$

$$\sum_{a \in A} \sum_{g \in GT_a^f} G K_{a,g}^{old} + G K_{a,g}^{new} \leq \theta_{f,a}$$

**A.6.19**

Transmissionsbegrænsningerne.

$\forall r_1 \in R, \forall r_2 \in EXIMP_r, \forall s \in S, \forall t \in T$

$$X_{r_1,r_2,s,t}^E \leq X_{r_1,r_2}^{old} + X_{r_1,r_2}^{E,new} + X_{r_2,r_1}^{E,new}$$

**A.6.20**

Udledningen af  $CO_2$  skal være mindre end grænsen  $CO_2^{limit}$

$\forall c \in C$

$$\sum_{a \in A_c} \sum_{g \in GT_a} \sum_{i \in I, j \in J} \sum_{s,t} 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot CO2_c^{im} \cdot 0.001 \cdot 3.6 \cdot \frac{G_{a,g,s,t}^{i,j}}{GDFE_g \cdot \rho_{a,g,s}^K} \leq CO2_c^{limit}$$

**A.6.21**

Udledningen af  $SO_2$  skal være mindre end grænsen  $SO_2^{limit}$

$\forall c \in C$

$$\sum_{a \in A_c} \sum_{g \in GT_a} \sum_{i \in I, j \in J} \sum_{s,t} 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot SO2_c^{im} \cdot 0.001 \cdot 3.6 \cdot \frac{G_{a,g,s,t}^{i,j}}{GDFE_g \cdot \rho_{a,g,s}^K} \leq SO2_c^{limit}$$

**A.6.22**

Udledningen af  $NOX$  skal være mindre end grænsen  $NOX^{limit}$

$\forall c \in C$

$$\sum_{a \in A_c} \sum_{g \in GT_a} \sum_{i \in I, j \in J} \sum_{s, t} 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot NOX_c^{im} \cdot 0.001 \cdot 3.6 \cdot \frac{G_{a,g,s,t}^{i,j}}{GDFE_g \cdot \rho_{a,g,s}^K} \leq NOX_c^{limit}$$

### A.6.23

Kapacitetsbegrænsning for primær teknologier.

$\forall a \in A, \forall g \in \{g \in GT_a^1 \mid GDCOMBSK_g + \sum_{g_2 \in GT_g^2} GDCOMBSK_{g_2} > 1\}, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall j \in J, \forall i \in I$

$$G_{a,g,s,t}^{i,j} + \sum_{g_2 \in GT_g^2} G_{a,g_2,s,t}^{i,j} \leq (K_{a,g}^{old} + K_{a,g}^{new}) \cdot \rho_{a,g,s}^K$$

### A.6.24

Min. produktion på primær teknologier med  $GDCOMBSLO_g$  større end 0.

$\forall a \in A, \forall g \in \{g \in GT_a^1 \mid GDCOMBSLO_g > 0\}, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall j \in J, \forall i \in I$

$$G_{a,g,s,t}^{i,j} \geq GDCOMBSLO_g \cdot (G_{a,g,s,t}^{i,j} + \sum_{g_2 \in GT_g^2} G_{a,g_2,s,t}^{i,j})$$

### A.6.25

Min. produktion på sekundær teknologier med  $GDCOMBSLO_g$  mindre end 1.

$\forall a \in A, \forall g \in \{g \in \bigcup_{g \in GT_a^1} GT_g^2 \mid GDCOMBSLO_g < 1\}, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall j \in J, \forall i \in I$

$$G_{a,g,s,t}^{i,j} \geq GDCOMBSLO_g \cdot (G_{a,g_1,s,t}^{i,j} + \sum_{g' \in GT_{g_1}^2} G_{a,g',s,t}^{i,j})$$

, hvor  $g_1$  er primær teknologi til  $g$ .

### A.6.26

Max. produktion på primær teknologier,

$\forall a \in A, \forall g \in \{g \in GT_a^1 \mid GDCOMBSUP_g < 1\}, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall j \in J, \forall i \in I$

$$G_{a,g,s,t}^{i,j} \leq GDCOMBSUP_g \cdot (G_{a,g,s,t}^{i,j} + \sum_{g_2 \in GT_g^2} G_{a,g_2,s,t}^{i,j})$$

**A.6.27**

Max. produktion på sekundær teknologier.

$$\forall a \in A, \forall g \in \{g \in \bigcup_{g \in GT_a^1} GT_g^2 \mid GDCOMBSUP_g < 1\}, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall j \in J, \forall i \in I$$

$$G_{a,g,s,t}^{i,j} \leq GDCOMBSUP_g \cdot (G_{a,g_1,s,t}^{i,j} + \sum_{g' \in GT_{g_1}^2} G_{a,g',s,t}^{i,j})$$

, hvor  $g_1$  er primær teknologi til  $g$ .

**A.6.28**

Produktion på eksisterende atomkraftværker.

$$\forall a \in A, \forall g \in GT_a^{NUC}, \forall \tilde{d} \in \{week, wend\}, \forall s \in S, \forall t \in T^{\tilde{d}}$$

$$G_{a,g,s,t}^{E,old} = N_{a,g,s}^{\tilde{d}}$$

## Bilag B

# LP formulering af den udvidede model i Balmorel

Dette afsnit beskriver den matematiske model for den udvidede Balmorel. Modellen tager udgangspunkt i modellen fra appendix A, så variable og mængder som ikke er blevet ændret, er beskrevet der.

### B.1 Nye index

Der indføres et index for årene.

- $y$ : år

### B.2 Nye mængder og delmængder

Følgende mængde defineres

- $Y$ : År, indeholder  $y$  år.

Følgende delmængder ændres, så de nu afhænger af det nye indeks  $y$ .

- $GT_y \subset GT$ : Teknologier der findes i år  $y$
- $EXIMP_{r,y} \subset R$ : Regioner som region  $r$  kan importere fra og eksportere til i år  $y$ .
- $GT_{a,y} \subset GT_y$ : Teknologier der findes i område  $a$ , år  $y$
- $GT_y^1 \subset GT_y$ : Primær teknologier der findes i år  $y$
- $GT_{a,y}^1 \subset GT_y^1$ : Primær teknologier der findes i område  $a$ , år  $y$
- $GT_{g,y}^2 \subset GT_y$ : Sekundær teknologier hørende til teknologi  $g$  i år  $y$
- $GT_{g,a,y}^2 \subset GT_y^2$ : Sekundær teknologier hørende til teknologi  $g$ , område  $a$ , i år  $y$
- $GT_{a,y}^{CND} \subset GT_{a,y}$ : Kondensteknologier område  $a$ , år  $y$

- $GT_{a,y}^{BPR} \subset GT_{a,y}$ : Modtryksteknologier område  $a$ , år  $y$
- $GT_{a,y}^{EXT} \subset GT_{a,y}$ : Udtagsteknologier område  $a$ , år  $y$
- $GT_{a,y}^{HOB} \subset GT_{a,y}$ : Varmekedler område  $a$ , år  $y$
- $GT_{a,y}^{TOH} \subset GT_{a,y}$ : Elkedler eller varmepumper område  $a$ , år  $y$
- $GT_{a,y}^{HST} \subset GT_{a,y}$ : Varmelager
- $GT_{a,y}^{EST} \subset GT_{a,y}$ : Ellager område  $a$ , år  $y$
- $GT_{a,y}^{HYS} \subset GT_{a,y}$ : Vandreservoir reguleret vandkraft område  $a$ , år  $y$
- $GT_{a,y}^{HYR} \subset GT_{a,y}$ : Ureguleret vandkraft teknologier område  $a$ , år  $y$
- $GT_{a,y}^{WND} \subset GT_{a,y}$ : Vindkraftteknologier område  $a$ , år  $y$
- $GT_{a,y}^{SOL} \subset GT_{a,y}$ : Solenergi område  $a$ , år  $y$
- $GT_{a,y}^{NUC} \subset GT_{a,y}$ : Atomkraftteknologier område  $a$ , år  $y$
- $GT_{a,y}^E = GT_{a,y} \setminus (GT_{a,y}^{HOB} \cup GT_{a,y}^{HST})$ : El-producerende teknologier område  $a$ , år  $y$ .
- $GT_{a,y}^H = GT_{a,y}^{BPR} \cup GT_{a,y}^{EXT} \cup GT_{a,y}^{HOB} \cup GT_{a,y}^{TOH} \cup GT_{a,y}^{HST}$ : Varme-producerende teknologier område  $a$ , år  $y$ .
- $GT_{a,y}^f \subset GT_{a,y}$ : Teknologier, som anvender fuel  $f$  i område  $a$ , år  $y$ .
- $FP_{o,y} \subset F$ : Typer  $f$ , der kan anvendes (har et potentiale) i land ( $o = c$ ), region ( $o = r$ ) og område ( $o = a$ ), år  $y$ .

### B.3 Nye konstanter

Der defineres følgende nye konstanter. Mange konstanter stammer fra den oprindelige model, men har fået tilføjet et  $y$ -index. De 4 første er helt nye.

- $Disc_{a,y}$ . Diskonteringsfaktor ( $Disc_{a,y} = \frac{1}{(1+r_c)^y}$ , hvor  $c \in \{c_2 \in C | a \in A_{c_2}\}$ ).
- $LIFE_g$ , Levetid teknologi  $g$
- $SCRPVAl_g$ , Skrotværdi teknologi  $g$
- $MINSTPINV_g$ , Minimums investeringskapacitet
- $MINSTPTRN$ , Minimums investeringskapacitet i ny transmissionsforbindelse.
- $\gamma_{c,g}$ , Annuitet, % vis ydelse af hele lånet pr år i land  $c$ , teknologi  $g$ .
- $^X\gamma_c$ , Annuitet, % vis ydelse af hele lånet pr år i land  $c$ , transmissionsforbindelse.



- $\hat{D}_{r,y,s,t}^E$ , Exogent givet elefterspørgsel
- $\hat{D}_{a,y,s,t}^H$ , Exogent givet varmeefterspørgsel
- $\chi_{r,y,s,t}$ , Eksport til 3 lande fra region  $r$ , år  $y$ , sæson  $s$ , periode  $t$
- $G_{\kappa_{a,g,y}}^{old}$ , Produktionskapacitet område  $a$ , teknologi  $g$ , år  $y$ .
- $X_{\kappa_{r,r}}^{old}$ , Transmissionskapacitet.
- $CO2_{c,y}^{limit}$ , Begrænsning på udledning af  $CO_2$  land  $c,y$ , år  $y$ .
- $SO2_{c,y}^{limit}$ , Begrænsning på udledning af  $SO_2$  land  $c,y$ , år  $y$ .
- $NOX_{c,y}^{limit}$ , Begrænsning på udledning af  $NO_x$ -gasser, land  $c,y$ , år  $y$ .
- $CO2_{g,y}^{im}$ , Udledning af  $CO_2$  teknologi  $g$ , år  $y$ .
- $SO2_{g,y}^{im}$ , Udledning af  $SO_2$  teknologi  $g$ , år  $y$ .
- $NOX_{g,y}^{im}$ , Udledning af  $NO_x$ -gasser teknologi  $g$ , år  $y$ .
- $CO2_{c,y}^{tax}$ , Afgift på  $CO_2$  land  $c$ , år  $y$ .
- $SO2_{c,y}^{tax}$ , Afgift på af  $SO_2$  land  $c$ , år  $y$ .
- $NOX_{c,y}^{tax}$ , Afgift på af  $NO_x$ -gasser land  $c$ , år  $y$ .
- $\phi_{f,a,y}$ , Pris fuel  $f$ , område  $a$ , år  $y$ .
- $\phi_{f,c,y}^{tax}$ , Afgift fuel  $f$ , land  $c$ , år  $y$ .

## B.4 Variable

I den udvidede model benyttes samme variable som før, dog er følgende variable blevet ændret, så de også afhænger af året  $y$ .

- $G_{a,g,y}^{KF^{tot,new}}$  Den totale forøgelse af kapacitet ikke korrigeret for skrotning pga. levetid for teknologi  $g$ , Område  $a$ , op til år  $y$ .
- $G_{a,g,y}^{I^{new}}$ , Heltalsvariabel, der sikrer at investeringer sker som multiplum af mindste kapacitetsforøgelse.
- $X_{r,r,y}^{I^{new}}$ , Heltalsvariabel, der sikrer at investeringer i transmissionsforbindelser sker som multiplum af mindste kapacitetsforøgelse.
- $G_{a,g,y,s,t}^{i,j}$ : Produktionen af type  $i$ , område  $a$ , teknologi  $g$ , år  $y$  tid  $(s,t)$ , hhv. ny og gammel ( $j = new, old$ )
- $X_{r,r,y,s,t}^E$ , Eltransmission, fra region  $r$  til  $r$ , år  $y$  tid  $(s,t)$
- $G_{a,g,y}^{K^{new}}$ : Ny produktionskapacitet område  $a$ , teknologi  $g$  i år  $y$
- $G_{a,g,y}^{KF^{new}}$  Forøgelsen af kapacitet korrigeret for skrotning pga. levetid for teknologi  $g$ , Område  $a$ , op til år  $y$ .

- $XK_{r,r,y}^{E,new}$ : Ny el-transmissionskapacitet mellem region  $r$  til  $r$  år  $y$ .
- $XKF_{r,r,y}^{E,new}$ : Forøgelse i transmissions kapacitet mellem region  $r$  til  $r$  på til år  $y$ .
- $W_{a,s,y}$  Indhold i vandreservoir, område  $a$ , sæson  $s$ , år  $y$
- $N_{a,g,y,s}^{work}, N_{a,g,y,s}^{wend}$ : Gennemsnits produktion på nuclear teknologi  $g \in GT^{NUC}$ , område  $a$ , år  $y$ , sæson  $s$  på hhv. arbejdsperioder (*work*) og friperioder (*wend*).
- $L_{a,y,s,t}^i$  Energipåfyldning på lager af type  $i$ , område  $a$ , år  $y$  tid  $(s, t)$ .
- $V_{a,y,s,t}$  Energiindhold på lager af type  $i$ , område  $a$ , år  $y$ , tid  $(s, t)$ .

## B.5 Objektfunktionen

Objektfunktionen er opbygget af samme led som objektfunktionen for den oprindelige model. Den endelige værdi af objektfunktionen er summen over alle leddene alle år.

### A - Udgifter til primærenergi år $y$

$$\sum_{j \in J} \sum_{a \in A} \sum_{f \in F} \sum_{g \in GT_a^f} Disc_{a,y} \cdot \phi_{f,a} \cdot 3.6 \cdot \sum_{s \in S, t \in T} 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot \frac{G_{a,g,y,s,t}^{E,j}}{GDFE_g \cdot \rho_{a,g}^{eff}} +$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{a \in A} \sum_{f \in F} \sum_{g \in GT_a^f} Disc_{a,y} \cdot \phi_{f,a} \cdot 3.6 \cdot \sum_{s \in S, t \in T} 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot \frac{GDCV_g \cdot G_{a,g,y,s,t}^{H,j}}{GDFE_g \cdot \rho_{a,g}^{eff}}$$

### B - Drift og vedligeholdelsesudgifter år $y$

$$\sum_{j \in J} \sum_{a \in A} \sum_{g \in GT_{a,y}^E} Disc_{a,y} \cdot \zeta_g^V \cdot \sum_{s \in S, t \in T} 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot G_{a,g,y,s,t}^{E,j} +$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{a \in A} \sum_{g \in GT_{a,y}^{EXT}} Disc_{a,y} \cdot \zeta_g^V \cdot \sum_{s \in S, t \in T} 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot GDCV_g \cdot G_{a,g,y,s,t}^{H,j} +$$

$$1000 \cdot \left[ \sum_{i \in I} \sum_{a \in A} \sum_{g \in GT_{a,y}} Disc_{a,y} \cdot \zeta_g^F \cdot \sum_{s \in S, t \in T} 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot (G_{a,g,y}^{old} + G_{a,g,y}^{new}) \right] +$$

### C - Hydro with storage seasonal price profile år $y$

$$\sum_{j \in J} \sum_{a \in A} \sum_{g \in GT_a^{HYS}} \sum_{s \in S, t \in T} Disc_{a,y} \cdot 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot \eta_{a,s} \cdot G_{a,g,y,s,t}^{E,j} +$$

**D - Transmissionsomkostninger år  $y$** 

$$\sum_{r \in R} \sum_{r_2 \in EXIMP_r} \sum_{s \in S, t \in T} Disc_{a,y} \cdot 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot \eta_{a,s} \cdot X_{r,r_2,y,s,t}^E \cdot \xi_{r,r_2} +$$

**E - Investeringsomkostninger for ny produktions kapacitet år  $y$** 

$$1000000 \cdot \left[ \sum_{c \in C} \sum_{a \in A_c} Disc_{a,y} \cdot \sum_{g \in GT_a} (GK_{a,g,y}^{new} + GK_{a,g,y}^{new}) \cdot G\pi_{a,g} \cdot \gamma_{c,g} \right] -$$

$$1000000 \cdot \left[ \sum_{c \in C} \sum_{a \in A_c} Disc_{a,y} \cdot \sum_{g \in GT_a} SCR_{PVAL_g} \cdot (GK_{a,g,y-1}^{new} + GK_{a,g,y-1}^{new} - GK_{a,g,y}^{new}) \right]$$

**F - Investeringsomkostninger for ny transmissions kapacitet år  $y$** 

$$\sum_{r \in R} \sum_{r_2 \in EXIMP_r} (XK_{r,r_2,y}^{E,new} + XK_{r,r_2,y}^{F,new}) \cdot X\pi_{r,r_2} \cdot \frac{X\gamma_{c_r} + X\gamma_{c_{r_2}}}{2} \cdot \frac{Disc_{a_r,y} + Disc_{a_{r_2},y}}{2} + ,$$

hvor  $c_r$  er land med region  $r$  og hvor  $c_{r_2}$  er land med region  $r_2$ .

**G - Emission skatter år  $y$** 

$$\sum_{j \in J} \sum_{c \in C} \sum_{a \in A} \sum_{g \in GT_a^E} \sum_{s \in S, t \in T} Disc_{a,y} \cdot 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot$$

$$CO2_g^{im} \cdot 0.001 \cdot 3.6 \cdot \frac{G_{a,g,y,s,t}^{E,j}}{GDFE_g \cdot \rho_{a,g}^{eff}} \cdot CO2_{c,y}^{tax} +$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{c \in C} \sum_{a \in A} \sum_{g \in GT_a^H} \sum_{s \in S, t \in T} Disc_{a,y} \cdot 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot$$

$$GDCV_g \cdot CO2_g^{im} \cdot 0.001 \cdot 3.6 \cdot \frac{G_{a,g,y,s,t}^{H,j}}{GDFE_g \cdot \rho_{a,g}^{eff}} \cdot CO2_{c,y}^{tax} +$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{c \in C} \sum_{a \in A} \sum_{g \in GT_a^E} \sum_{s \in S, t \in T} Disc_{a,y} \cdot 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot$$

$$SO2_g^{im} \cdot 0.001 \cdot 3.6 \cdot \frac{G_{a,g,y,s,t}^{E,j}}{GDFE_g \cdot \rho_{a,g}^{eff}} \cdot SO2_{c,y}^{tax} +$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{c \in C} \sum_{a \in A} \sum_{g \in GT_a^H} \sum_{s \in S, t \in T} Disc_{a,y} \cdot 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot$$

$$GDCV_g \cdot SO2_g^{im} \cdot 0.001 \cdot 3.6 \cdot \frac{G_{a,g,y,s,t}^{H,j}}{GDFE_g \cdot \rho_{a,g}^{eff}} \cdot SO2_{c,y}^{tax} +$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{c \in C} \sum_{a \in A} \sum_{g \in GT_a^E} \sum_{s \in S, t \in T} Disc_{a,y} \cdot 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot$$

$$\begin{aligned}
 & NOX_g^{im} \cdot 0.001 \cdot 3.6 \cdot \frac{G_{a,g,y,s,t}^{E,j}}{GDFE_g \cdot \rho_{a,g}^{eff}} \cdot NOX_{c,y}^{tax} + \\
 & \sum_{j \in J} \sum_{c \in C} \sum_{a \in A} \sum_{g \in GT_a^H} \sum_{s \in S, t \in T} Disc_{a,y} \cdot 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot \\
 & GDCV_g \cdot NOX_g^{im} \cdot 0.001 \cdot 3.6 \cdot \frac{G_{a,g,y,s,t}^{H,j}}{GDFE_g \cdot \rho_{a,g}^{eff}} \cdot NOX_{c,y}^{tax} +
 \end{aligned}$$

### H - Skatter på primærenergi år $y$

$$\begin{aligned}
 & \sum_{j \in J} \sum_{c \in C} \sum_{a \in A_c} \sum_{f \in F} \sum_{g \in GT_a^f \cap GT_a^E} \sum_{s \in S, t \in T} Disc_{a,y} \cdot 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot \\
 & \phi_{f,c}^{tax} \cdot 3.6 \cdot \frac{G_{a,g,s,t}^{E,j}}{GDFE_g \cdot \rho_{a,g}^{eff}} + \\
 & \sum_{j \in J} \sum_{c \in C} \sum_{a \in A_c} \sum_{f \in F} \sum_{g \in GT_a^f \cap GT_a^H} \sum_{s \in S, t \in T} Disc_{a,y} \cdot 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot \\
 & \phi_{f,c}^{tax} \cdot 3.6 \cdot GDCV_g \cdot \frac{G_{a,g,s,t}^{H,j}}{GDFE_g \cdot \rho_{a,g}^{eff}} +
 \end{aligned}$$

### I -Ændring i forbrugernes nytte relativt til elektricitets forbruget

$$\begin{aligned}
 & \sum_{r \in R} \sum_{s \in S, t \in T} Disc_{a,r,y} \cdot 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot \left[ \sum_d D_{r,s,t,d}^{E,down} \cdot \alpha_d^E - \sum_u D_{r,s,t,u}^{E,up} \cdot \beta_u^E \right] + \\
 & \sum_{a \in A} \sum_{s \in S, t \in T} Disc_{a,y} \cdot 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot \left[ \sum_d D_{a,s,t,d}^{H,down} \cdot \alpha_d^H - \sum_u D_{a,s,t,u}^{H,up} \cdot \beta_u^H \right]
 \end{aligned}$$

## B.6 Modellens begrænsninger

Begrænsningerne i den udvidede model. "()" angiver den tilsvarende begrænsning i den oprindelige model, hvis en sådan findes.

### B.6.1 (A.6.1)

Ligevægt for el producerende teknologier. Dvs. ligevægt mellem elproduktion, eltransmission og elefterspørgselen.

$$\forall y \in Y, \forall r \in R, \forall s \in S, \forall t \in T$$

$$\begin{aligned}
 & \sum_{a \in A_r} \left[ \sum_{g \in GT_{a,y}} \sum_{GT_{a,y}^{TOH}} \sum_{j \in J} G_{a,g,y,s,t}^{E,j} - \sum_{g \in GT_{a,y}^{TOH}} \sum_{j \in J} G_{a,g,y,s,t}^{E,j} \right] \\
 & + \sum_{r_2 \in EXIMP_r} X_{r_2,r,y,s,t}^E \cdot \tau = \chi_{r,y,s,t} + \delta \cdot \left[ \hat{D}_{r,y,s,t}^E + \sum_u D_{r,s,t,u}^{E,up} - \sum_d D_{r,s,t,d}^{E,down} \right] \\
 & \qquad \qquad \qquad + \sum_{r_2 \in EXIMP_r} X_{r,r_2,y,s,t}^E
 \end{aligned}$$

**B.6.2 (A.6.2)**

Ligevægt for varmeproducerende teknologier. Dvs. ligevægt mellem varmeproduktion og varmeefterspørgselen.

$$\forall y \in Y, \forall a \in A, \forall s \in S, \forall t \in T$$

$$\begin{aligned} & \sum_{g \in GT_{a,y}^H} \sum_{j \in J} G_{a,g,y,s,t}^{H,j} - L_{a,y,s,t}^H \\ &= \delta \cdot \left[ D_{a,y,s,t}^H + \sum_u D_{a,s,t,u}^{H,up} - \sum_d D_{a,s,t,d}^{H,down} \right] \end{aligned}$$

**B.6.3 (A.6.3)**

Produktionen af elektricitet på modtryksteknologier

$$\forall y \in Y, \forall g \in GT_{a,y}^{BPR}, \forall a \in A, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall j \in J$$

$$G_{a,g,y,s,t}^{E,j} = G_{a,g,y,s,t}^{H,j} \cdot GDCB_g$$

**B.6.4 (A.6.4)**

Produktionsbegrænsning på elektricitet produceret på udtagsteknologier.

$$\forall y \in Y, \forall g \in GT_{a,y}^{EXT}, \forall a \in A, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall j \in J$$

$$G_{a,g,y,s,t}^{E,j} \geq G_{a,g,y,s,t}^{H,j} \cdot GDCB_g$$

**B.6.5 (A.6.5)**

Kapacitetsbegrænsninger for udtagsteknologier som ikke er primær teknologier.

$$\forall a \in A, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall g \in GT_{a,y}^{EXT} \setminus GT^1$$

$$G_{a,g,y,s,t}^{E,old} \leq ({}^G\kappa_{a,g,y}^{old} + {}^GKF_{a,g,y}^{new}) \cdot \rho_{a,g,s}^K - G_{a,g,y,s,t}^{H,old} \cdot GDCV_g$$

$$G_{a,g,y,s,t}^{E,new} \leq {}^GK_{a,g,y}^{new} \cdot \rho_{a,g,s}^K - G_{a,g,y,s,t}^{H,new} \cdot GDCV_g$$

**B.6.6 (A.6.6)**

Produktionsbegrænsninger for udtagsteknologier som er primær teknologier.

$$\forall y \in Y, \forall a \in A, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall g \in GT_{a,y}^{EXT} \cap GT_y^1$$

$$\begin{aligned} G_{a,g,t,s,t}^{E,old} + \sum_{g_2 \in GT_{g,y}^2} G_{a,g_2,y,s,t}^{E,old} &\leq ({}^G\kappa_{a,g,y}^{old} + {}^GKF_{a,g,y}^{new}) \cdot \rho_{a,g,s}^K - \\ &\left[ G_{a,g,y,s,t}^{H,old} + \sum_{g_2 \in GT_{g,y}^2} G_{a,g_2,y,s,t}^{H,old} \cdot GDCV_{g_2} \right] \end{aligned}$$

$$G_{a,g,y,s,t}^{E,new} + \sum_{g_2 \in GT_{g,y}^2} G_{a,g_2,y,s,t}^{E,new} \leq G K_{a,g,y}^{new} \cdot \rho_{a,g,s}^K - \left[ G_{a,g,y,s,t}^{H,new} + \sum_{g_2 \in GT_{g,y}^2} G_{a,g_2,y,s,t}^{H,new} \cdot GDCV_{g_2} \right]$$

### B.6.7 (A.6.7)

Produktion af varme på varmepumper og elkedler.

for  $\forall y \in Y, \forall a \in A, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall j \in J, \forall g \in GT_{a,y}^{TOH}$

$$G_{a,g,y,s,t}^{E,j} = \frac{G_{a,g,y,s,t}^{H,j}}{GDFE_g}$$

### B.6.8 (A.6.8)

Kapacitetsbegrænsning for ny kapacitet på primær teknologier, som ikke er varme producerende eller vand-, vind- eller solenergiteknologier.

$\forall y \in Y, \forall a \in A, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall g \in (GT_{a,y} \cup GT_{a,y}^1) \setminus (GT_{a,y}^{HYR} \cup GT_{a,y}^{WND} \cup GT_{a,y}^{SOL} \cup GT_{a,y}^{NUC})$

$$G_{a,g,y,s,t}^{E,new} + \sum_{g_2 \in GT_{g,y}^2} G_{a,g_2,s,t}^{E,new} \leq G K_{a,g,y}^{new} \cdot \rho_{a,g,s}^K$$

### B.6.9 (A.6.9)

Kapacitetsbegrænsning for ny kapacitet ikke primær teknologier, som ikke er varme producerende eller vand-, vind- eller solenergiteknologier.

$\forall y \in Y, \forall a \in A, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall g \in (GT_{a,y} \setminus GT_{a,y}^1) \setminus (GT_{a,y}^{HYR} \cup GT_{a,y}^{WND} \cup GT_{a,y}^{SOL}) \cup GT_{a,y}^{HOB} \cup GT_{a,y}^{HST}$

$$G_{a,g,y,s,t}^{E,new} \leq G K_{a,g,y}^{new} \cdot \rho_{a,g,s}^K$$

### B.6.10 (A.6.10)

Produktionen af elektricitet på ny kapacitet (kapacitets forøgeleser) på vand-, vind- og solenergiteknologier.

$\forall y \in Y, \forall a \in A, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall g \in GT_{a,y}^q$

$$G_{a,g,y,s,t}^{E,new} = \omega_a^q \cdot G K_{a,g,y}^{new} \cdot \frac{v_{a,s,t}^q}{\sum_{s \in S, t \in T} [365 \frac{\nu_s}{\nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\nu_t} v_{a,s,t}^q]}, \text{ for } q = HYR, WND, SOL$$

**B.6.11 (A.6.11)**

Begrænsninger som holder styr på den mængde vand der er i vand reservoiret for reguleret vandkraftteknologier.

$$\forall y \in Y, \forall a \in \{a \in A \mid GT_{a,y}^{HYS} \neq \emptyset\}, \forall s \in S$$

$$\begin{aligned} W_{a,y,s,t+1} \leq & W_{a,y,s,t} + \sum_{g \in GT_{a,y}^{HYS}} \iota_{a,s} \cdot (G \kappa_{a,g,y}^{old} + G KF_{a,g,y}^{new}) - 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot \sum_{t \in T} 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot G_{a,g,y,s,t}^{E,old} \\ & + \sum_{g \in GT_{a,y}^{HYS}} \iota_{a,s} \cdot G K_{a,g,y}^{new} - 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot \sum_{t \in T} 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot G_{a,g,y,s,t}^{E,new} \end{aligned}$$

**B.6.12 (A.6.12)**

Lagerbegrænsninger for varme.

$$\forall y \in Y, \forall a \in \{a \in A \mid GT_{a,y}^{HST} \neq \emptyset\}, \forall s \in S, \forall t \in T$$

$$V_{a,y,s,t+1}^H = 0.99 \cdot V_{a,y,s,t}^H + 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot \left[ L_{a,y,s,t}^H - \sum_{g \in GT_{a,y}^{HST}, j \in J} G_{a,g,y,s,t}^{H,j} \right]$$

Lagerbegrænsninger for elektricitet.

$$\forall y \in Y, \forall a \in \{a \in A \mid GT_{a,y}^{EST} \neq \emptyset\}, \forall s \in S, \forall t \in T$$

$$V_{a,y,s,t+1}^E = 0.99 \cdot V_{a,y,s,t}^E + 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot \left[ L_{a,y,s,t}^E - \sum_{g \in GT_{a,y}^{EST}, j \in J} G_{a,g,y,s,t}^{E,j} \right]$$

**B.6.13 (A.6.13)**

Påfyldning af varme på lager skal være mindre end påfyldningskapaciteten.

$$\forall y \in Y, \forall a \in \{a \in A \mid GT_{a,y}^{HST} \neq \emptyset\}, \forall s \in S, \forall t \in T$$

$$L_{a,y,s,t}^H \leq \sum_{g \in GT_{a,y}^{HST}} \frac{G \kappa_{a,g,y}^{old} + (G K_{a,g,y}^{new} + G KF_{a,g,y}^{new})}{GDCB_g}$$

Påfyldning af elektricitet på lager skal være mindre end påfyldningskapaciteten.

$$\forall y \in Y, \forall a \in \{a \in A \mid GT_{a,y}^{EST} \neq \emptyset\}, \forall s \in S, \forall t \in T$$

$$L_{a,y,s,t}^E \leq \sum_{g \in GT_{a,y}^{EST}} \frac{G \kappa_{a,g,y}^{old} + (G K_{a,g,y}^{new} + G KF_{a,g,y}^{new})}{GDCB_g}$$

**B.6.14 (A.6.14)**

Produktion på lagerteknologier, der tages fra lageret af elektricitet eller varme, skal være mindre end kapaciteten af lageret.

$\forall y \in Y, \forall a \in \{a \in A \mid GT_{a,y}^{HST} \neq \emptyset\}, \forall s \in S, \forall t \in T$

$$\sum_{g \in GT_{a,y}^{HST}} \sum_{j \in J} G_{a,g,y,s,t}^{H,j} \leq \sum_{g \in GT_{a,y}^{HST}} \frac{G \kappa_{a,g,y}^{old} + (G K_{a,g,y}^{new} + G K F_{a,g,y}^{new})}{GDCB_g}$$

$\forall y \in Y, \forall a \in \{a \in A \mid GT_a^{EST} \neq \emptyset\}, \forall s \in S, \forall t \in T$

$$\sum_{g \in GT_a^{EST}} \sum_{j \in J} G_{a,g,s,t}^{E,j} \leq \sum_{g \in GT_a^{EST}} \frac{G \kappa_{a,g,y}^{old} + G K_{a,g}^{new}}{GDCB_g}$$

### B.6.15 (A.6.15)

Den mængde varme og el der er på lager skal være mindre end kapaciteten.

$\forall y \in Y, \forall a \in \{a \in A \mid GT_{a,y}^{HST} \neq \emptyset\}, \forall s \in S, \forall t \in T$

$$V_{a,y,s,t}^H \leq \sum_{g \in GT_{a,y}^{HST}} G \kappa_{a,g,y}^{old} + (G K_{a,g,y}^{new} + G K F_{a,g,y}^{new})$$

$\forall y \in Y, \forall a \in \{a \in A \mid GT_a^{EST} \neq \emptyset\}, \forall s \in S, \forall t \in T$

$$V_{a,y,s,t}^E \leq \sum_{g \in GT_{a,y}^{EST}} G \kappa_{a,g,y}^{old} + (G K_{a,g,y}^{new} + G K F_{a,g,y}^{new})$$

### B.6.16 (A.6.16)

Produktionen af el og varme, der produceres med fuel  $f$  i land  $c$ , skal være mindre end potentialet .

$\forall y \in Y, \forall c \in C, \forall f \in FP_c, \forall s \in S, \forall t \in T$

$$\sum_{a \in A_c} \sum_{g \in GT_{a,y}^f} G \kappa_{a,g,y}^{old} + (G K_{a,g,y}^{new} + G K F_{a,g,y}^{new}) \leq \theta_{f,c}$$

### B.6.17 (A.6.17)

Produktionen af el og varme, der produceres med fuel  $f$  i region  $r$ , skal være mindre end potentialet.

$\forall y \in Y, \forall r \in R, \forall f \in FP_r, \forall s \in S, \forall t \in T$

$$\sum_{a \in A_r} \sum_{g \in GT_{a,y}^f} G \kappa_{a,g,y}^{old} + (G K_{a,g,y}^{new} + G K F_{a,g,y}^{new}) \leq \theta_{f,r}$$

### B.6.18 (A.6.18)

Produktionen af el og varme, der produceres med fuel  $f$  i område  $a$ , skal være mindre end potentialet.



$\forall y \in Y, \forall f \in FP_a, \forall s \in S, \forall t \in T$

$$\sum_{a \in A} \sum_{g \in GT_{a,y}^f} G_{a,g,y}^{old} + (G_{a,g,y}^{new} + G_{KF_{a,g,y}}^{new}) \leq \theta_{f,a}$$

### B.6.19 (A.6.19)

Transmissionsbegrænsningerne.

$\forall r_1 \in R, \forall r_2 \in EXIMP_r$

$$X_{r_1,r_2,1}^{E,new} = X_{r_1,r_2,1}^{old}$$

$\forall y \in Y, \forall r_1 \in R, \forall r_2 \in EXIMP_r, \forall s \in S, \forall t \in T$

$$X_{r_1,r_2,y,s,t}^E \leq X_{r_1,r_2,y}^{E,new} + X_{r_2,r_1,y}^{E,new} + X_{r_1,r_2,y}^{KF_{r_1,r_2,y}^{new}}$$

### B.6.20 (A.6.20)

Udledningen af  $CO_2$  skal være mindre end grænsen  $CO_2^{limit}$

$\forall y \in Y, \forall c \in C$

$$\sum_{a \in A_c} \sum_{g \in GT_{a,y}} \sum_{i \in I, j \in J} \sum_{s,t} 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot CO2_{c,y}^{im} \cdot 0.001 \cdot 3.6 \cdot \frac{G_{a,g,y,s,t}^{i,j}}{GDFE_g \cdot \rho_{a,g,s}^K} \leq CO2_{c,y}^{limit}$$

### B.6.21 (A.6.21)

Udledningen af  $SO_2$  skal være mindre end grænsen  $SO_2^{limit}$

$\forall y \in Y, \forall c \in C$

$$\sum_{a \in A_c} \sum_{g \in GT_{a,y}} \sum_{i \in I, j \in J} \sum_{s,t} 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot SO2_{c,y}^{im} \cdot 0.001 \cdot 3.6 \cdot \frac{G_{a,g,y,s,t}^{i,j}}{GDFE_g \cdot \rho_{a,g,s}^K} \leq SO2_{c,y}^{limit}$$

### B.6.22 (A.6.22)

Udledningen af  $NO_X$  skal være mindre end grænsen  $NO_X^{limit}$

$\forall y \in Y, \forall c \in C$

$$\sum_{a \in A_c} \sum_{g \in GT_{a,y}} \sum_{i \in I, j \in J} \sum_{s,t} 365 \frac{\nu_s}{\sum_s \nu_s} \cdot 24 \frac{\nu_t}{\sum_t \nu_t} \cdot NOX_{c,y}^{im} \cdot 0.001 \cdot 3.6 \cdot \frac{G_{a,g,y,s,t}^{i,j}}{GDFE_g \cdot \rho_{a,g,s}^K} \leq NOX_{c,y}^{limit}$$

**B.6.23 (A.6.23)**

Kapacitets begrænsning for primær teknologier.

$$\forall a \in A, \forall g \in \{g \in GT_{a,y}^1 \mid GDCOMBSK_g + \sum_{g_2 \in GT_{g,y}^2} GDCOMBSK_{g_2} > 1\}, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall i \in I$$

$$G_{a,g,y,s,t}^{i,old} + \sum_{g_2 \in GT_{g,y}^2} G_{a,g,y,s,t}^{i,old} \leq (G_{K_{a,g,y}}^{old} + GK_{F_{a,g,y}}^{new}) \cdot \rho_{a,g,s}^K$$

$$G_{a,g,y,s,t}^{i,new} + \sum_{g_2 \in GT_{g,y}^2} G_{a,g,y,s,t}^{i,new} \leq GK_{a,g,y}^{new} \cdot \rho_{a,g,s}^K$$

**B.6.24 (A.6.24)**

Min. produktion på primær teknologier med  $GDCOMBSLO_g$  større end 0.

$$\forall y \in Y, \forall a \in A, \forall g \in \{g \in GT_{a,y}^1 \mid GDCOMBSLO_g > 0\}, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall j \in J, \forall i \in I$$

$$G_{a,g,y,s,t}^{i,j} \geq GDCOMBSLO_g \cdot (G_{a,g,y,s,t}^{i,j} + \sum_{g_2 \in GT_{g,y}^2} G_{a,g_2,y,s,t}^{i,j})$$

**B.6.25 (A.6.25)**

Min. produktion på sekundær teknologier med  $GDCOMBSLO_g$  mindre end 1.

$$\forall y \in Y, \forall a \in A, \forall g \in \{g \in \bigcup_{g_1 \in GT_{a,y}^1} GT_{g_1,y}^2 \mid GDCOMBSLO_g < 1\}, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall j \in J, \forall i \in I$$

$$G_{a,g,y,s,t}^{i,j} \geq GDCOMBSLO_g \cdot (G_{a,g_1,y,s,t}^{i,j} + \sum_{g' \in GT_{g_1,y}^2} G_{a,g',y,s,t}^{i,j})$$

, hvor  $g_1$  er primær teknologi til  $g$ .

**B.6.26 (A.6.26)**

Max. produktion på primær teknologier,

$$\forall y \in Y, \forall a \in A, \forall g \in \{g \in GT_a^1 \mid GDCOMBSUP_g < 1\}, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall j \in J, \forall i \in I$$

$$G_{a,g,y,s,t}^{i,j} \leq GDCOMBSUP_g \cdot (G_{a,g,y,s,t}^{i,j} + \sum_{g_2 \in GT_{g,y}^2} G_{a,g,y,s,t}^{i,j})$$

**B.6.27 (A.6.27)**

Max. produktion på sekundær teknologier.

$\forall y \in Y, \forall a \in A, \forall g \in \{g \in \bigcup_{g \in GT_{a,y}^1} GT_{g,y}^2 \mid GDCOMBSUP_g < 1\}, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall j \in J, \forall i \in I$

$$G_{a,g,y,s,t}^{i,j} \leq GDCOMBSUP_g \cdot (G_{a,g_1,y,s,t}^{i,j} + \sum_{g' \in GT_{g_1,y}^2} G_{a,g',y,s,t}^{i,j})$$

, hvor  $g_1$  er primær teknologi til  $g$ .

### B.6.28 (A.6.28)

Produktion på eksisterende atomkraftværker.

$\forall y \in Y, \forall a \in A, \forall g \in GT_{a,y}^{NUC}, \forall \tilde{d} \in \{week, wend\}, \forall s \in S, \forall t \in T^{\tilde{d}}$

$$G_{a,g,y,s,t}^{E,old} = N_{a,g,y,s}^{\tilde{d}}$$

## B.7 Nye begrænsninger

Udover ændringerne i ovenstående begrænsninger er indført følgende nye begrænsninger.

### B.7.1

Transmissionskapacitet overføres til næste år.

$\forall y \in Y, \forall r_1 \in R, \forall r_2 \in EXIMP_r$

$$X K_{r_1,r_2,y+1}^{E,new} = X K_{r_1,r_2,y}^{E,new} + X K_{r_2,r_1,y}^{E,new} + X K F_{r_1,r_2,y}^{E,new}$$

### B.7.2

Disse begrænsninger sikrer at en kapacitets forøgelse forsvinder efter  $LIFETIME_g$  år.

$\forall y \in Y, \forall a \in A, \forall g \in GT$

$$G K F_{a,g,1}^{new} = 0$$

$$G K F_{a,g,y+1}^{new} = G K F_{a,g,y}^{tot} - \sum_{y_2=0}^{y-LIFE_g} G K_{a,g,y_2}^{new} + G K_{a,g,y}^{new}$$

$$G K F_{a,g,y+1}^{tot} = G K F_{a,g,y}^{tot} + G K_{a,g,y}^{new}$$

### B.7.3

Kapacitetsbegrænsning for elektricitets producerende teknologier.

$\forall y \in Y, \forall a \in A, \forall g \in GT_{a,y}^E, \forall s \in S, \forall t \in T$

$$G_{a,g,y,s,t}^{E,old} \leq (G \kappa_{a,g,y}^{old} + G K F_{a,g,y}^{new}) \cdot \rho_{a,g,s}^K$$

**B.7.4**

Kapacitetsbegrænsning for varme producerende teknologier.

$$\forall y \in Y, \forall a \in A, \forall g \in GT_{a,y}^H, \forall s \in S, \forall t \in T$$

$$G_{a,g,y,s,t}^{H,old} \leq ({}^G\kappa_{a,g,y}^{old} + {}^GKF_{a,g,y}^{new}) \cdot \rho_{a,g,s}^K$$

**B.7.5**

Kapacitetsbegrænsning for varme producerende primær teknologier.

$$\forall y \in Y, \forall a \in A, \forall g \in GT_{a,y}^1 \cap GT_{a,y}^H, \forall s \in S, \forall t \in T$$

$$G_{a,g,y,s,t}^{H,old} \leq ({}^G\kappa_{a,g,y}^{old} + {}^GKF_{a,g,y}^{new}) \cdot \rho_{a,g,s}^K \cdot GDCOMBSK_g$$

**B.7.6**

Kapacitetsbegrænsning for varme producerende sekundær teknologier.

$$\forall y \in Y, \forall a \in A, \forall g \in GT_{a,y}^1, \forall g_2 \in GT_{g,y}^2, \forall s \in S, \forall t \in T$$

$$G_{a,g_2,y,s,t}^{H,old} \leq ({}^G\kappa_{a,g,y}^{old} + {}^GKF_{a,g,y}^{new}) \cdot \rho_{a,g,s}^K \cdot GDCOMBSK_{g_2}$$

**B.7.7**

Produktion følger årsvariation.

$$\forall y \in Y, \forall a \in A, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall g \in GT_{a,y}^q$$

$$G_{a,g,y,s,t}^{E,old} = \omega_a^q \cdot ({}^G\kappa_{a,g,y}^{old} + {}^GKF_{a,g,y}^{new}) \cdot \frac{v_{a,s,t}^q}{\sum_{s \in S, t \in T} [365 \sum_s \nu_s \cdot 24 \sum_t \nu_t v_{a,s,t}^q]}$$

,for q = HYR, WND, SOL.

**B.7.8**

Sikrer diskrete investeringer i ny kapacitet.

$$\forall y \in Y, \forall a \in A, \forall g \in G$$

$${}^GK_{a,g,y}^{new} = MINSTPINV_g \cdot {}^GI_{a,g,y}^{new}$$

**B.7.9**

Sikrer diskrete investeringer i ny transmissionskapacitet.

$$\forall y \in Y, \forall r_1 \in R, \forall r_2 \in EXIMP_r$$

$${}^XK_{r,r_2,y}^{new} = MINSTPTRN \cdot {}^XI_{r,r_2,y}^{new}$$

## Bilag C

### Data

Ændringerne foretaget i modellen medfører, at der skal tilføjes nogle informationer i det eksisterende datasæt. For teknologierne drejer det sig om *GDLIFETIME*, *GDSCRAPVAL* og *GDSTEPINVK*. De værdier som er tilføjet ses i tabel C.1: Data for *GDLIFETIME* og *GDSTEPINVK* er fundet i hhv. [16], [17] og [18]. Derudover er [17] anvendt i vid udstrækning, da den rapport mere beskriver hvordan virkeligheden ser ud, og ikke bare hvad der teknisk er muligt. Det var ret vanskeligt at finde en god kilde for værdierne til vandkraft, fordi der findes vandkraftanlæg fra 1 MW op til flere 1000 MW. Fornævnte kilder angiver dog, at vandkraftanlæg idag næppe bygges under 100 MW. Vi har derfor besluttet at sætte *GDSTEPINVK* til 100 for alle vandkraftanlæg. At finde fornuftige skrotværdier viste sig også at være vanskeligt. Kun atomkraft var det muligt at finde rimelige værdier for. *GDSCRAPVAL* er således kun fundet for atomkraft, og er fundet i kilden [14].

Teknologi	GDLIFETIME	GDSCRAPVAL	GDSTEPINVK
NU-C8-NU	35	-0.331	500
NU-E8-NU	35	-0.331	500
NU-C0-NU	35	-0.331	500
NU-E0-NU	35	-0.331	500
NU-C2-NU	35	-0.331	500
NU-E2-NU	35	-0.331	500
ST-C8-CO	20	0	200
ST-C8-COs	20	0	200
ST-C8-FO	20	0	200
ST-C8-NG	20	0	200
ST-C8-LI	20	0	200
ST-C8-LIs	20	0	200
ST-C8-MW	20	0	5
ST-C8-WW	20	0	5
ST-E8-COs	20	0	200
ST-E8-FO	20	0	200
ST-E8-NG	20	0	200

fortsætter på næste side

fortsættes fra forige side			
ST-E8-ORs	20	0	200
ST-E8-LI	20	0	200
ST-E8-PE	20	0	5
ST-E8-WO	20	0	5
ST-E8-LIs	20	0	200
ST-B8-NG	20	0	200
ST-B8-CO	20	0	200
ST-B8-FO	20	0	200
ST-C9-COsn	20	0	200
ST-C9-PEn	20	0	5
ST-E9-NGn	20	0	200
ST-E9-COsn	20	0	200
ST-B9-MW	20	0	5
ST-B9-ST	20	0	5
ST-B9-WO	20	0	5
ST-B9-WW	20	0	5
ST-B9-PE	20	0	5
ST-C0-COsn	20	0	200
ST-C0-LIsn	20	0	200
ST-C0-FOsn	20	0	200
ST-E0-COsn	20	0	200
ST-E0-FOsn	20	0	200
ST-E0-WOsn	20	0	5
ST-E0-PEsn	20	0	5
ST-E0-LIsn	20	0	200
ST-E0-ORsn	20	0	200
ST-C1-COsn	20	0	200
ST-E1-COsn	20	0	200
ST-E1-FOsn	20	0	200
ST-E1-PEsn	20	0	5
ST-E1-LIsn	20	0	200
ST-E1-WOsn	20	0	5
ST-B1-NGn	20	0	200
ST-B1-FOn	20	0	200
ST-B1-MWn	20	0	5
ST-B1-STn	20	0	5
ST-B1-PEn	20	0	5
ST-B1-WOn	20	0	5
ST-B1-WWn	20	0	5
ST-C7-CO	20	0	200
ST-C7-COs	20	0	200
ST-C7-FO	20	0	200
ST-C7-FOsn	20	0	200
ST-C7-SH	20	0	5
fortsætter på næste side			

fortsættes fra forige side			
ST-C7-LI	20	0	200
ST-E7-CO	20	0	200
ST-E7-COs	20	0	200
ST-E7-NG	20	0	200
ST-E7-FO	20	0	200
ST-E7-LI	20	0	200
ST-E7-SH	20	0	5
ST-B7-NG	20	0	200
CC-C9-NGn	20	0	20
CC-E9-NGn	20	0	20
CC-B9-NGn	20	0	20
CC-C8-NG	20	0	20
CC-E8-NG	20	0	20
CC-B8-NG	20	0	20
CC-C0-NGn	20	0	20
CC-E0-NGn	20	0	20
CC-B0-NGn	20	0	20
CC-C1-NGn	20	0	20
CC-E1-NGn	20	0	20
CC-B1-NGn	20	0	20
CC-C1-COn	20	0	20
CC-E1-COn	20	0	20
CC-C1-WOn	20	0	20
CC-E1-WOn	20	0	20
GT-C8-LO	20	0	0
GT-C8-NG	20	0	0
GT-C0-LO	20	0	0
GT-C0-NG	20	0	0
GT-C2-LO	20	0	0
GT-C2-NG	20	0	0
HY-S01	50	0	100
HY-S02	50	0	100
HY-S03	50	0	100
HY-S04	50	0	100
HY-S05	50	0	100
HY-S06	50	0	100
HY-S07	50	0	100
HY-S08	50	0	100
HY-S09	50	0	100
HY-S10	50	0	100
HY-R	20	0	0
WI-L9	20	0	0
WI-S9	20	0	0
WI-L0	20	0	0
fortsætter på næste side			

fortsættes fra forige side			
WI-S0	20	0	0
WI-L1	20	0	0
WI-S1	20	0	0
HO-B8-NG	20	0	0
HO-B8-FO	20	0	0
HO-B8-SH	20	0	0
HO-B8-CO	20	0	0
HO-B8-LI	20	0	0
HO-B8-PE	20	0	0
HO-B8-MW	20	0	0
HO-B8-ST	20	0	0
HO-B8-WO	20	0	0
HO-B0-NG	20	0	0
HO-B0-FO	20	0	0
HO-B0-PE	20	0	0
HO-B0-MW	20	0	0
HO-B0-ST	20	0	0
HO-B0-WO	20	0	1
EH-P8	20	0	0
EH-P9	20	0	0
EH-P0	20	0	0
EH-P1	20	0	0
EH-E9	20	0	0

Tabel C.1: Tabel over de informationer vi har tilføjet det nuværende datasæt.



## Bilag D

# Oversigt over udvidelser i GAMS-koden

I dette appendix er de ændringer vi har foretaget i den oprindelige Balmorel angivet. Det er ikke en fuldstændig oversigt, men den beskriver i grove træk det, der skal til for at gå fra den oprindelige Balmorel til den udvidede Balmorel. Dette bilag er ikke en teknisk dokumentation, men blot en oversigt over ændringer. For uddybende information henvises til kommentare i kildekoden og den oprindelige Balmorels tekniske dokumentation [2].

### D.1 Model

I dette afsnit beskrives de ændringer der er foretaget i de filer som findes i "Balmorel\_inv2\Base\model" biblioteket på den vedlagte CD. Filer som ikke nævnes er ikke blevet ændret.

#### D.1.1 balmorel\_inv.gms

Denne fil erstatter "balmorel.gms" for den oprindelige Balmorel. I forhold til "balmorel.gms" er der foretaget følgende ændringer:

- Set  $IY(Y)$ ,  $IY2(Y)$  tilføjet.
- Fjernet parameteren "ANNUITYC(CCC)".
- Inkluderet filen "mjvar2.inc" (manipulation af inputdata).
- Set "IAGK\_Y(AAA,G)" ændret til "IAGK\_Y(AAA,G,Y)".
- Set "IAGKN\_Y(AAA,G)" ændret til "IAGKN\_Y(AAA,G,Y)".
- Sætter "IAGKN\_Y(IA,G,Y)" = "IAGKN(IA,G)"  $\forall Y$
- Parameter "IDE\_T\_Y(RRR,S,T)" ændret til "IDE\_T\_Y(RRR,Y,S,T)".
- Parameter "IDH\_T\_Y(RRR,S,T)" ændret til "IDH\_T\_Y(RRR,Y,S,T)".
- Parameter "IGKFX\_Y(G,AAA)" ændret til "IGKFX\_Y(G,AAA,Y)".

- Parameter "IGKVACCTOY(G,AAA)" ændret til "IGKVACCTOY(G,AAA,Y)".
- Parameter "IXKINI\_Y(IRRRE,IRRRI)" ændret til "IXKINI\_Y(IRRRE,IRRRI,Y)".
- Parameter "ANNUITYC(CCC, GGG)" tilføjet.
- Parameter "ANNUITYC20(CCC)".
- Parameter "ANNUITYC50(CCC)".
- Scalar "ORD\_YALIAS" tilføjet.
- Scalar "YVALUE\_YALIAS" tilføjet.
- Scalar "FirstYear" tilføjet.
- Parameter IDISC(AAA,Y) tilføjet.
- Parameter "IVGKN(AAA,GGG,Y)" tilføjet.
- Parameter "IGKVACCTOT(G,AAA,Y)" tilføjet.
- Parameter "IVXKN(IRRRE,IRRRI,Y)" tilføjet.
- Parameter "SIMWEIGHT(SIMYEARS)" tilføjet.
- Parameter "ORD\_IY(SIMYEARS)" tilføjet.
- Positive variable "VGKVACCTOY(G,AAA,Y)" tilføjet.
- Positive variable "VGKVACCTOT(G,AAA,Y)" tilføjet.
- Positive variable "VXKINI\_Y(IRRRE,IRRRI,Y)" tilføjet.
- Heltals variable "VGKNINT(AAA,G,Y)" tilføjet.
- Heltals variable "VXKNINT(IRRRE,IRRRI,Y)" tilføjet.
- Begrænsninger "QGKVACCTOY(AAA,G,Y,SIMYEARS)" tilføjet.
- Begrænsninger "QGKVACCTOT(AAA,G,Y,SIMYEARS)" tilføjet.
- Begrænsninger "QEGKUP(AAA,G,Y,S,T)" tilføjet.
- Begrænsninger "QHGKUP(AAA,G,Y,S,T)" tilføjet.
- Begrænsninger "QEGKCOMB1UP(AAA,G,Y,S,T)" tilføjet.
- Begrænsninger "QEGKCOMB2UP(AAA,G,G,Y,S,T)" tilføjet.
- Begrænsninger "QHGKCOMB1UP(AAA,G,Y,S,T)" tilføjet.
- Begrænsninger "QHGKCOMB2UP(AAA,G,G,Y,S,T)" tilføjet.
- Begrænsninger "QHYRRDISP(AAA,RRR,G,Y,S,T)" tilføjet.
- Begrænsninger "QWNDDISP(AAA,RRR,G,Y,S,T)" tilføjet.
- Begrænsninger "QSOLDISP(AAA,RRR,G,Y,S,T)" tilføjet.

- Begrænsninger "QXKN(IRRRE,IRRRI,Y,SIMYEARS)" tilføjet.
- Begrænsninger "QVGKNINT(AAA, G, Y, SIMYEARS)" tilføjet.
- Begrænsninger "QVXKNINT(IRRRE,IRRRI,Y, SIMYEARS)" tilføjet.
- Objektfunktionen ændret så der summeres over modelhorisonten.
- Udregning af investeringsomkostninger ændret.
- Udregning af transmissionsomkostninger ændret.
- Udregning af investeringsomkostninger i transmissionsnettet ændret.
- $y$ -index er indført på de variable og begrænsninger, hvor det er påkrævet.

### D.1.2 balbase2\_inv.sim

Denne fil erstatter "balbase2.sim" for den oprindelige Balmorel. I forhold til "balbase2.sim" er der foretaget følgende ændringer:

- Automatisk oprettelse af "cplex.opt" filen tilføjet (cplex option file).
- $y$ -index indført på de variable det er påkrævet.
- Simuleringsstrukturen ændret (omfattende ændring).

### D.1.3 geogr.inc

Der er foretaget følgende ændringer i denne fil:

- Parameter "IRATE(CCC)" tilføjet.
- Parameter "IDRATE(CCC)" tilføjet.

### D.1.4 mjvar2.inc

Dette er en nye fil. Det er den fil som indeholder den kode som skalerer data, så den passer til den tidsopløsning brugt i resultat afsnittet (7).

### D.1.5 sets.inc

Der er foretaget følgende ændringer i denne fil:

- Set "SIMYEARS" tilføjet.
- Set "SIMDELTA(SIMYEARS)" tilføjet.
- Scalar "DFAULLIFET" tilføjet.
- Scalar "TRANSLIFET" tilføjet.
- Scalar "MININVXK" tilføjet.

### D.1.6 TECH2.INC

Denne fil erstatter filen "tech.inc". Der er de samme informationer i den nye fil, men at følgende er tilføjet:

- GDLIFETIME, for hver teknologi (økonomisk levetid).
- GDSTEPINVK, for hver teknologi.
- GDSCRAPVAL, for atomkraft teknologier (skrotværdi).

## D.2 Printinc

I dette afsnit beskrives de ændringer der er foretaget i de filer som findes i "Balmorel\_inv2\Base\printinc" biblioteket på den vedlagte CD. Filer som ikke nævnes er ikke blevet ændret.

### D.2.1 BAL\_1.INC

Der er foretaget følgende ændringer i denne fil:

- "Y" ændret til "YALIAS"

### D.2.2 EG\_CY.INC

Der er foretaget følgende ændringer i denne fil:

- "Y" ændret til "YALIAS"

### D.2.3 EG\_GAT.INC

Der er foretaget følgende ændringer i denne fil:

- "Y" ændret til "YALIAS"
- $y$ -index indført på de variable det er påkrævet.

### D.2.4 EGN\_CY.INC

Der er foretaget følgende ændringer i denne fil:

- "Y" ændret til "YALIAS"

### D.2.5 EGO\_CY.INC

Der er foretaget følgende ændringer i denne fil:

- "Y" ændret til "YALIAS"

### D.2.6 EHF\_CY.INC

Der er foretaget følgende ændringer i denne fil:

- "Y" ændret til "YALIAS"

### D.2.7 EHF\_RY.INC

Der er foretaget følgende ændringer i denne fil:

- "Y" ændret til "YALIAS"

### D.2.8 EP\_RT.INC

Der er foretaget følgende ændringer i denne fil:

- "Y" ændret til "YALIAS"
- *y*-index indført på de variable det er påkrævet.

### D.2.9 EP\_RY.INC

Der er foretaget følgende ændringer i denne fil:

- "Y" ændret til "YALIAS"
- *y*-index indført på de variable det er påkrævet.

### D.2.10 EX\_RY.INC

Der er foretaget følgende ændringer i denne fil:

- "Y" ændret til "YALIAS"

### D.2.11 GKN\_AY.INC

Der er foretaget følgende ændringer i denne fil:

- "Y" ændret til "YALIAS"
- *y*-index indført på de variable det er påkrævet.

### D.2.12 HG\_AY.INC

Der er foretaget følgende ændringer i denne fil:

- "Y" ændret til "YALIAS"

### D.2.13 HG\_CY.INC

Der er foretaget følgende ændringer i denne fil:

- "Y" ændret til "YALIAS"

### D.2.14 PRT3-BB2.INC

Der er foretaget følgende ændringer i denne fil:

- "Y" ændret til "YALIAS"

### D.2.15 XBOTTLE.INC

Der er foretaget følgende ændringer i denne fil:

- "Y" ændret til "YALIAS"

### D.2.16 GK\_MMP\_AY.INC

Ny fil. Udskriver total kapacitet exogent givet og endogent fundet.

## D.3 Logerror

I dette afsnit beskrives de ændringer der er foretaget i de filer som findes i "Balmorel\_inv2\Base\logerror" biblioteket på den vedlagte CD. Filer som ikke nævnes er ikke blevet ændret.

### D.3.1 BALBASE2.MSS

Der er foretaget følgende ændringer i denne fil:

- "BALBASE2" ændret til "BALBASE2\_inv"
- "Y" ændret til "YALIAS"

### D.3.2 ERROR3.INC

Der er foretaget følgende ændringer i denne fil:

- *y*-index indført på de variable det er påkrævet.

### D.3.3 ERROR4.INC

Der er foretaget følgende ændringer i denne fil:

- *y*-index indført på de variable det er påkrævet.

### D.3.4 error5.inc

Ny fil, checker om der er skulle forekomme negative årsafstande i inputdata.

# Bilag E

## Oversigt - filer på CD

