



Modeldokumentation – Ramses energisystemmodel

Kontor/afdeling
SYS

Dato
26-04-2022

J nr.
/JNON

Indhold

Indledning	2
Modellen	3
Antagelser	4
Modelligninger	5
Modelkarakteristika.....	6
Efterspørgsel og tidsserier.....	6
Værkstyper	6
Brændselsforbrug og marginalomkostninger	7
Lagerstyring.....	8
Havari og udetider	8
Vedvarende energikilder (VE).....	8
Prisdannelse.....	8
Bilag – Modellens bibetingelser	9

Energistyrelsen

Carsten Niebuhrs Gade 43
1577 København V

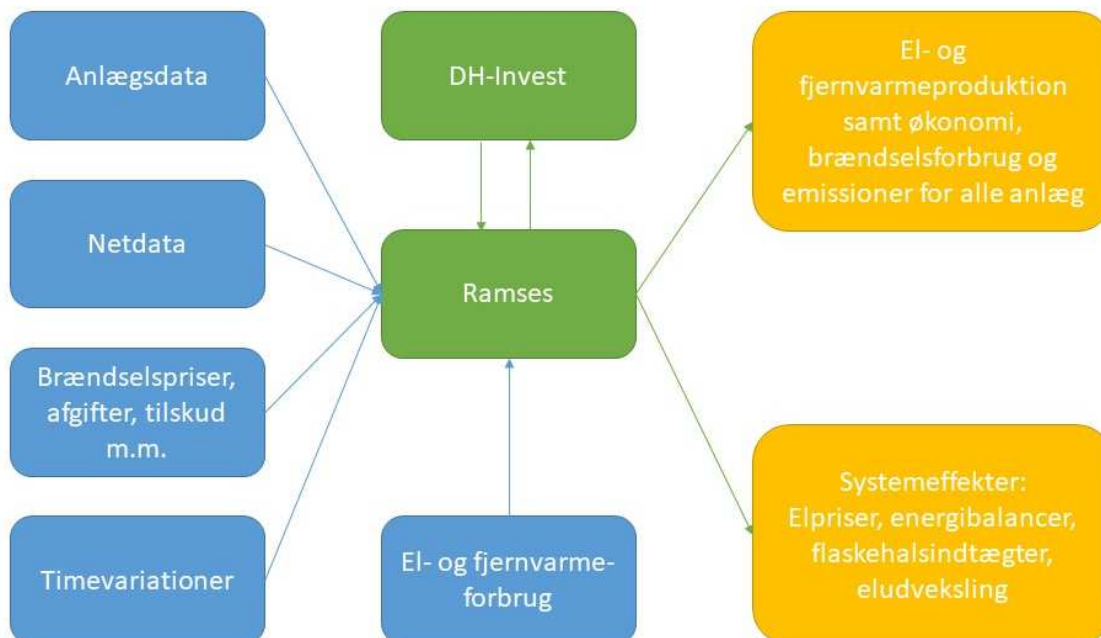
T: +45 3392 6700
E: ens@ens.dk

www.ens.dk

Indledning

Ramses er udviklet med det formål at simulere produktionssiden af det danske el- og fjernvarmesystem og dets aktører i el- og fjernvarmesektoren. Modellen har været og bliver til stadighed benyttet til effektivurderinger af ændringer i det danske og nordeuropæiske energisystem. Effektivurderinger foretaget med Ramses benyttes fx til at belyse konsekvenser ved opførsler og lukninger af energiproducerende anlæg, brændselsforbruget i det danske el- og fjernvarmesystem samt tegne et overblik over økonomien i nye eltransmissionsforbindelser til udlandet.

Ramses er en lineær simuleringsmodel, som for et vilkårligt el- og fjernvarmesystem beregner den optimale sammensætning el- og fjernvarmeproduktion, således at de samlede omkostninger til produktion minimeres. Et samlet energisystem kendetegnes i modellen ved et vilkårligt antal el- og fjernvarmeområder. De enkelte områder defineres bl.a. ved et vilkårligt antal anlæg¹, efterspørgselsprofiler på el og fjernvarme, eventuelle koblinger mellem områderne, økonomiske forhold fx produktionsomkostninger samt anlægsspecifikke udetider og egenskaber. Ramses beregner el- og fjernvarmeproduktion anlæg for anlæg i tidsskridt ned til én time og med et fremsyn på op til 1 år. Endvidere beregnes brændselsforbrug og økonomi for de enkelte anlæg, elpriser (spotpris), eludveksling, kapacitetsbalancer m.m. Figur 1 illustrerer modelinput og resultater.



Figur 1, De blå kasser er kildedata brugt i modellen, de grønne er modeller og de gule kasser illustrerer resultatdata.

¹ Ordene "værk" og "anlæg" anvendes om alle produktionsenheder i både el- og fjernvarmesektoren.



Ramses er i dag en del af Energistyrelsens samlede modelsetup og kan benyttes sammen med investeringsmodulet DH-Invest² og Energistyrelsens forbrugsmodel IntERACT³. På denne måde sammenkobles både produktions- og forbrugssiden af det Danske energisystemet.

Ramses blev oprindelig udviklet af Sigurd Lauge Pedersen i 1988 i regnearkssproget S2020. Siden er den oversat flere gange. Først til QuattroPro for DOS, siden QuattroPro for Windows, derefter Delphi Pascal, så Excel/VBA i en version, der hedder Ramses9, senest en R-version kaldet RamsesR. Modellen er nu videreudviklet og går under navnet *RamsesG*. Med denne version skal lyde en særlig tak til Richard Weinhold, der med hans PhD-projekt har udviklet den energisystemmodel, som nu er en integreret del af Ramses. Richard Weinhold har endvidere løftet en stor del af udviklingsarbejdet som integrationen har krævet. Modellen er nu skrevet i Python og GAMS. Ligeledes en stor tak til Sigurd Lauge Pedersen, hvis idéer og struktur fra tidligere versioner er videreført i denne version.

I det følgende afsnit gennemgås forløbet af modelberegningen, modellens vigtigste karakteristika og elementer som er afgørende for modelresultater, også antagelser forbundet til energisystem modelleringen gennemgås.

Modellen

Ramses er en *dispatch model*⁴, hvis formål er at simulere vilkårlige el- og fjernvarmesystemer. Det sker ved omkostningsminimering af de samlede omkostninger til produktion i et samlet energisystem under en række bibetingelser. De udgør tilsammen modellens løsningsrum, dvs. modellens mulighed for at planlægge produktion. Modellen minimerer målfunktionen indenfor en brugerbestemt tidshorizont⁵, bestående af ét eller flere tidsskridt. I det simpleste tilfælde, hvor tidshorizonten sættes til ét tidsskridt (typisk én time), fungerer modellen således at de enkelte anlæg sættes til at producere ét værk ad gangen på baggrund af det enkelte værks kortsigtede marginalomkostning (pris per produceret energienhed) – det billigste først. Det fortsætter indtil efterspørgslen (inkl. evt. behov for eksport eller import) i den enkelte driftstime tilfredsstilles. I tilfælde, hvor tidshorizonten er mere end én time (fx en uge), foregår simuleringen på tværs af alle tidsskridt inden for tidshorizonten. Det betyder, at omkostningerne til produktion minimeres over flere timer på en gang, som dermed åbner for udnyttelse af energilagere, som planlægger produktion inden for tidshorizonten.

² DH-Invest, investeringsmodel i fjernvarmesektoren, modeldokumentation: https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Analyser/dh-invest_modelbeskrivelse.pdf

³ IntERACT er Energistyrelsens forbrugsmodel, modeldokumentation: <https://ens.dk/en/our-services/projections-and-models/models/documentation-interact>

⁴ En model, der simulerer den mest effektive produktionsplan for anlæg i et el- og fjernvarmesystem.

⁵ Tidshorizonten kan sættes fra én time og op til antallet af timer i en fuld optimeringsperiode, hvilket typisk er ét år.



Systemberegningen i Ramses foretages i PoMaTo⁶ (Power Market Tool) som er en energisystemmodel udviklet til og af Energistyrelsen i samarbejde med Richard Weinhold. Versionen af PoMaTo, der benyttes med RamsesG, er specielt tilpasset Energistyrelsens behov. Principperne fra tidligere versioner af Ramses er integreret, hvilket bl.a. betyder, at både el- og fjernvarmesektoren simuleres.

Modellens målfunktion og bibetingelser udgør tilsammen modellens løsningsrum og er beskrevet i det følgende, kort kan de opsummeres ved følgende punkter:

- Energibalancen skal være opfyldt, dvs. produktion og forbrug skal være i ligevægt.
- Transmissionsbegrænsninger mellem elområder skal overholdes.
- Anlægsspecifikke produktionsbegrænsninger skal overholdes.
- Lagringsbetingelser fx sæsonbegrænsninger for hydro-reservoirs skal overholdes.

Inden for disse bibetingelser beregner Ramses den optimale fordeling af el- og fjernvarmeproduktion. I det følgende beskrives de antagelser, der ligger til grund for denne beregning, og den matematiske model præsenteres.

Antagelser

Modellen har en række grundlæggende antagelser omkring energimarkedet. Herunder er de enkelte antagelser beskrevet:

1. Der antages perfekt konkurrence i el- og fjernvarmesektoren.
2. El og fjernvarme kan i modellen strømme frit inden for de enkelte områder. Mellem elområder er der tilladt udveksling under opfyldelse af kapacitetsbegrænsninger på handelsforbindelser (NTC⁷).
3. Den tilladte kapacitet på handelsforbindelser (NTC), antages at være konstant i modellen, der kan påtrykkes spotane udfald på handelsforbindelser ud fra en tidsserie.
4. Der er ingen stop- og opstartsomkostninger på anlæg (unit commitment).
5. Der regnes ikke med begrænsninger fra teknisk minimum i effekt, dvs. værker kan regulere produktionen kontinuert mellem nul og installeret effekt.
6. Der regnes ikke med tidsbegrænsninger i reguleringshastighed, dvs. et værk kan øjeblikkeligt regulere produktionen mellem nul og installeret effekt.
7. Der antages perfekt fremsyn inden for tidshorisonten.

Antagelsen om *perfekt konkurrence*, er specielt væsentlig og kommer til udtryk i målfunktionen. Den betyder sammen med antagelsen om *ubegrænset transmission*

⁶ Power Market Tool (POMATO) for the analysis of zonal electricity markets: <https://doi.org/10.1016/j.softx.2021.100870>

⁷ Net transfer capacity



indenfor elområder at modellen medregner netop de mekanismer, der driver i day-ahead-markedet⁸.

I Ramses medregnes ikke *stop- og opstartsomkostninger, teknisk minimum i effekt* eller *begrænsninger i reguleringshastighed* forbundet til produktion på enkelte anlæg. Ses et energisystem som helhed over mange timer og dage, forventes antagelserne ikke at have væsentlig betydning for det endelige resultatet. For enkelte timer kan antagelserne dog give urealistiske resultater i driften af specielt store anlæg, som kan have store omkostninger ved eller være begrænsede i at ændre produktionsmønster.

Endelig har modellen *perfekt fremsyn* i tidshorisonten, hvorfor alle omkostninger inden for horisonten er kendt, det betyder fx, at energilagre oplades i den "billigste" del og aflades i "dyreste" del af tidshorisonten.

Modelligninger

Modellen har en række variable, blandt de væsentligste findes elproduktion " G ", varmeproduktion " H " samt flowet $EX_{z,zz}$ af elektricitet fra et elområde z til et forbundet elområde zz . Modellen søger at minimere målfunktion givet ved:

$$\text{Min} \left(\sum_{\forall \{p,t\} \in (P,T)} mc_p^g G_{p,t} + mc_p^h H_{p,t} \right)$$

Hvor P er sættet af alle energiproducerende anlæg, T sættet af tidskridt i tidshorisonten, mc er en anlægsspecifik marginalomkostning for hhv. el- og fjernvarmeproduktion.

Simuleringen foretages under forudsætning af at energibalancen er i ligevægt i hvert el- og fjernvarmeområde. Dvs. i hvert elområde skal summen af forbrug og eksport være lig med summen af produktion og elimport fratrukket forbrug fra fleksible elforbrugere. Dette skal være opfyldt i alle timer og alle elområder og kan opskrives ved:

$$\text{demand}_{z,t} + EX_{z,zz,t} = \sum_{\forall \{p\} \in (P_z)} G_{p,t} + EX_{zz,z,t} - D_{p,t} \quad \forall (t \in T, z \in Z, zz \in Z)$$

Der findes en tilsvarende energibalance for fjernvarme. Se Bilag – Modellens bibetingelser, for den fulde matematiske formulering af modellen, samt forklaringer på de enkelte bibetingelser som udspænder modellens løsningsrum. I tilfælde af, at modellen i en given time ikke kan opfylde energibalancen, balanceres systemet

⁸ Det finansielle marked hvor elektricitet handles.



med en meget omkostningsfuld slack-variabel, den giver modellen en mulighed for at løse de resterende timer i året.

Modelkarakteristika

I det følgende beskrives en række af modellens parametre, samt en kort beskrivelse af prisdannelsen i elmarkedet.

Efterspørgsel og tidsserier

I modellen defineres et energisystem, ud fra en række parametre, heriblandt en række tidsserier. Tidsserier indeholder information om de tidslige dimensioner i energisystemet. De bruges til at styre eksogent el- og fjernvarmeforbrug, tidsvarierende anlægsparametre, fx produktion fra vind og sol, samt vandreservoirs påfyldning (hydro-inflow).

Værkstyper

Anlæg i Ramses defineres ved en række anlægsparametre, hvoraf de væsentligste er fælles. Blandt fælles anlægsparametre er: El- og eventuelt fjernvarmeområde, tilslutnings- og afkoblingstidspunkt, kapacitet, anlægstype, teknologi, brændselsmix og anlægsspecifikke omkostninger. De enkelte parametre har betydning for de enkelte værkers muligheder og begrænsninger i modellen. Specielt teknologi og anlægstype er væsentlig for, hvordan værker håndteres. Blandt modellens anlægstyper findes:

- Elproducerede værker (fx gasturbiner og kondensanlæg)
- Varmeproducerende værker (fx naturgas- og biomassefyrede kedler)
- Værker med kombinerede el- og fjernvarmeproduktion (kraftvarmeanlæg)
- Tidsseriestyrede værker (fx vind og sol)
- El- og varmelagre
- Vandreservoirs
- El til varme (fx varmepumper)
- Fleksibel efterspørgsel

Driften af de *simpleste el- og varmeproducerende anlæg* i modellen bestemmes alene fra omkostningerne ved produktion og anlæggenes maximale effekt. Anlæg af denne type kan have anlægsspecifikke tidsserier, som fx kontrollerer en varierende maximal effekt som afspejler en sæsonvarierende maximal effekt.

Ellagre defineres ved en maximal lagerstand og effektivitet på hhv. op- og afladning (produktion). Varmelagre har dog et tidsafhængigt tab (varmetab), som en andel af den lagrede energi, der tabes per time, i stedet for et opladningstab.



Vandreservoirs modelleres som ellagre med en eksogent givet påfyldning. Påfyldningen er givet ved en tidsprofil. Udover påfyldningen er vandreservoirs endvidere defineret ved en række betingelser, der skal også skal opfyldes⁹.

El til varme anlæg omfatter "varmepumper" og "elkedler". Disse er elforbrugende og bidrager til modellens fleksible forbrug. Deres driftsomkostning bestemmes som et øget elforbrug og en marginalomkostning på varmeproduktion.

Ud over de el- og varmeproducerende anlæg håndteres to typer *fleksible efterspørgsler*; anlæg der styres ud fra en eksogent bestemt elpris, som f.eks. PtX¹⁰, og anlæg der kan reducere den samlede efterspørgsel ved en eksogent bestemt pris, hvilket bruges til at simulere reduktion i efterspørgsel på højpristidspunkter (flexible-demand).

Brændselsforbrug og marginalomkostninger

I modellen er de enkelte værkers marginalomkostning af stor betydning for energisystemresultatet. Marginalomkostningen afhænger af en række faktorer - i Ramses medregnes følgende:

- Brændselsforbrug og produktionseffektivitet
- Brændselspriser
- Kvote- og udledningspriser (CO₂, SO₂ og NO_x)
- Energiafgift på brændsler til varmeproduktion
- Etilskud og -afgifter
- Variable driftsomkostninger

Disse faktorer påvirker alle den anlægsspecifikke marginalomkostning og er alle afhængige af enten energioutput eller brændselsforbrug.

For de helt simple el- eller fjernvarmeproducerende anlæg bestemmes brændselsforbrug ud fra værkets effektivitet ved:

$$Q_g = \frac{G}{\eta_{eff}} \quad , \quad Q_h = \frac{H}{\eta_{eff}}$$

hvor G er elproduktion, H er fjernvarmeproduktion, η_{eff} er værks effektivitet og Q total brændselsforbrug. For kraftvarmeverker er beregningen mere kompleks, da brændselsforbruget ikke er forholdsmæssigt konstant med produktionen af el- og fjernvarme, ligesom den afgiftsmæssige fordeling er anderledes, beregning foretages håndholdt uden for modellen ud fra anlægsspecifik viden.

⁹ I Ramses modelleres vandreservoirs ud fra en helårlig lagerbeholdningsprofil, som beregnes i en form-odel til den endelig simulering.

¹⁰ For PtX bliver den eksogene elpris beregnet ud fra en brintpris og anlægsspecifikke parametre



Lagerstyring

Energilagring modelleres i Ramses som resten af energisystemet, ved at minimere de totale omkostninger til produktion inden for den givne tidshorisont. Inden for tidshorisonten vil lagre derfor aflades i de tidsskridt med højeste omkostninger, og hvis muligt oplades i tidsskridt med laveste omkostninger. Da denne tilgang er kortsigtet, kan den ikke benyttes for vandreservoirs, som med en sæsonvarierende påfyldning må planlægge produktionen på lang sigt. I Ramses benyttes derfor en formodel for vandreservoirs. Formodelen planlægger en målværdi for, hvad lagerbeholdninger skal være. Målværdien benyttes som pejlemærke i den endelige simulering. Vandreservoir er tilladt at afvige fra denne målværdi på kort sigt, men pålægges en omkostning for afvigelsen. I det sidste tidsskridt i et modelår skal lagerbeholdningen være lig lagerbeholdningen i første tidsskridt.

Havari og udetider

I Ramses kan udetid på værker og handelskapaciteter (NTC) bestemmes eksogent. I den nuværende version af Ramses modelleres alt udetid som en fast reduktion af maksimal effekt på anlæg og kapacitet på udlandskabler, der kan dog påtrykkes en tidsserier til at simulere spontane udfald på handelsforbindelser.

Vedvarende energikilder (VE)

Vedvarende energikilder (VE) som vindmøller og solceller har produktionsbestemende tidsserier. Disse er et eksogent input i modellen. Modellen kan i timer med overproduktion slukke VE-kilder, men dette har en omkostning, hvorfor modellen altid vil søge mod at undgå dette. Når modellen slukker for VE gøres det på baggrund af den samme pris på alle anlæg, hvorfor modellen ikke giver et realistisk bud på specifikke anlæg, der nedreguleres.

Prisdannelse

Elprisen i de enkelte elområder sættes af marginalomkostningen på det dyrest producerende værk, som leverer el til elprisområdet. Elprissætningen i Ramses er en tilnærmelse af prisdannelsen i day-ahead-markedet, hvorfor elprisen i Ramses skal opfattes som et estimat på spotprisen. I fjernvarmeområder kan antagelsen om at prissætning fra dyrest producerende værk ikke benyttes. I fjernvarmeområder i Danmark bestemmes varmeprisen ud fra varmekontrakter i de enkelte fjernvarmeområder og er derfor ikke bundet til de enkelte værkers marginalomkostninger ved produktion, som det er tilfældet i day-ahead-markedet.

Bilag – Modellens bibetingelser

I det følgende er modellens bibetingelser skrevet op. Der tages højde for at modellen jævnligt tilpasses forskellige formål, hvorfor følgende skal opfattes som et øjebliksbillede af den grundlæggende model.

Ramses har følgende variable:

$G_{p,t}$: elproduktion

$H_{p,t}$: varmeproduktion

$H_{p,t}^b$: varmeproduktion fra bypass

$D_{p,t}^g$: endogen efterspørgsel på el

$D_{p,t}^h$: endogen efterspørgsel på varme

$CURT_{p,t}$: regulering af vedvarende energi (curtailment)

$EX_{z,zz}$: flow over grænser

$L_{t,p}$: lagerstand

Variable noteres i det følgende med stort og parametre med småt. Eksogent givne parametre forklares undervejs.

Målfunktion

$$\text{Min} \left(\sum_{\forall \{p,t\} \in (P,T)} mc_p^g G_{p,t} + mc_p^d D_{p,t}^g + mc_p^h H_{p,t} + mc_p^b H_{p,t}^b + cp CURT_{p,t} \right)$$

Beregning af de enkelte marginalomkostninger mc , er anlægsspecifik. cp er en beregningsteknisk parameter og benyttes til at modvirke regulering af vedvarende energi.

Energibalance

$$\begin{aligned} demand_{z,t} + EX_{z,zz,t} &= \sum_{\forall \{p\} \in (P_z)} G_{p,t} + EX_{zz,z,t} - D_{p,t}^g \quad \forall (t, z, zz) \\ demand_{z,t}^h &= \sum_{\forall \{p\} \in (P_z)} H_{p,t} + H_{p,t}^b - D_{p,t}^h \quad \forall (t, z, zz) \end{aligned}$$

$H_{p,t}^b$ er en beregningsteknisk variabel og beskriver varmeproduktion fra bypass-delen af kraftvarmeanlæg. Se bibetingelser for disse længe nede.

El-handel

$$EX_{z,zz,t} \leq ntc_{z,zz,t} \quad \forall (z, zz, t)$$

Anlægsspecifikke betingelser

Generelt for alle værkstyper gælder:

$$\begin{aligned} G_{p,t} &\leq g_{max,p,t} & \forall p, t \\ H_{p,t} &\leq h_{max,p,t} & \forall p, t \end{aligned}$$

For værker uden tidsserier er $g_{max,p,t}$ og $h_{max,p,t}$ konstant i tid. For anlæg med energiforbrug gælder endvidere følgende:

$$\begin{aligned} D_{t,p}^g &\leq d_{max,p}^g & \forall t, p \\ D_{t,p}^h &\leq d_{max,p}^h & \forall t, p \end{aligned}$$

Vedvarende energi (anlæg med produktionstidsserier)

$$\begin{aligned} G_{p,t} &= g_{prod,p,t} - CURT_{t,p} & \forall (p \in VE, t) \\ H_{p,t} &= h_{prod,p,t} - CURT_{t,p} & \forall (p \in VE, t) \end{aligned}$$

Her er $g_{prod,p,t}$ og $h_{prod,p,t}$ eksogent givne tidsserier for produktion fra VE. Disse betingelser binder produktion $G_{p,t}$ og $H_{p,t}$ fra vedvarende energikilder til tidsserier.

Energilagre

$$l_{min,t,p} \leq L_{t,p} \leq l_{max,t,p} \quad \forall t, p \in (ES, HS)$$

$L_{t,p}$ er lagerstanden i energilagret. ES og HS er hhv. sættet af værker af typen el- og varmlager. De store vandreservoirs har typisk en minimums- og maksimumslagerstand, der varierer over tid. For resterende lagre fx batterier og varmelagre regnes typisk med $l_{min,t,p} = 0$.

$$\begin{aligned} L_{t,p} &= L_{t-1,p} - G_{t,p} + \eta_p^g D_{t,p}^g + inflows_{t,p} & \forall t, p \in ES \\ L_{t,p} &= \eta_p^h L_{t-1,p} - H_{t,p} + D_{t,p}^h & \forall t, p \in HS \end{aligned}$$

η_p^g er her opladningseffektiviteten, $inflows_{t,p}$ er tilstrømning af energi til lagre og η_p^h er varmelagerets evne til at holde på varme.

El til varme

$$D_{t,p}^g = H_{t,p} \eta_{eff,p} \quad \forall t, p \in P2H$$

El- og varmeproducerende (Kraftvarme)

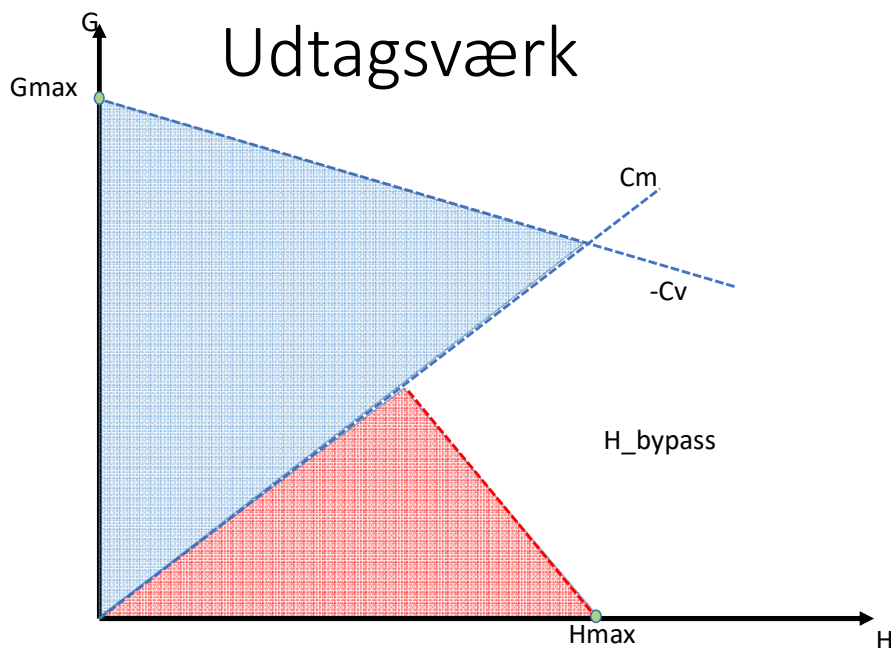
Kraftvarmeverker opdeles i hhv. udtagsværker og modtryksværker med og uden bypass mulighed. Anlæggene er tilsammen underlagt de følgende begrænsninger:

- $G_{p,t} \leq g_{max,p} - c_{v_p} H_{p,t}$



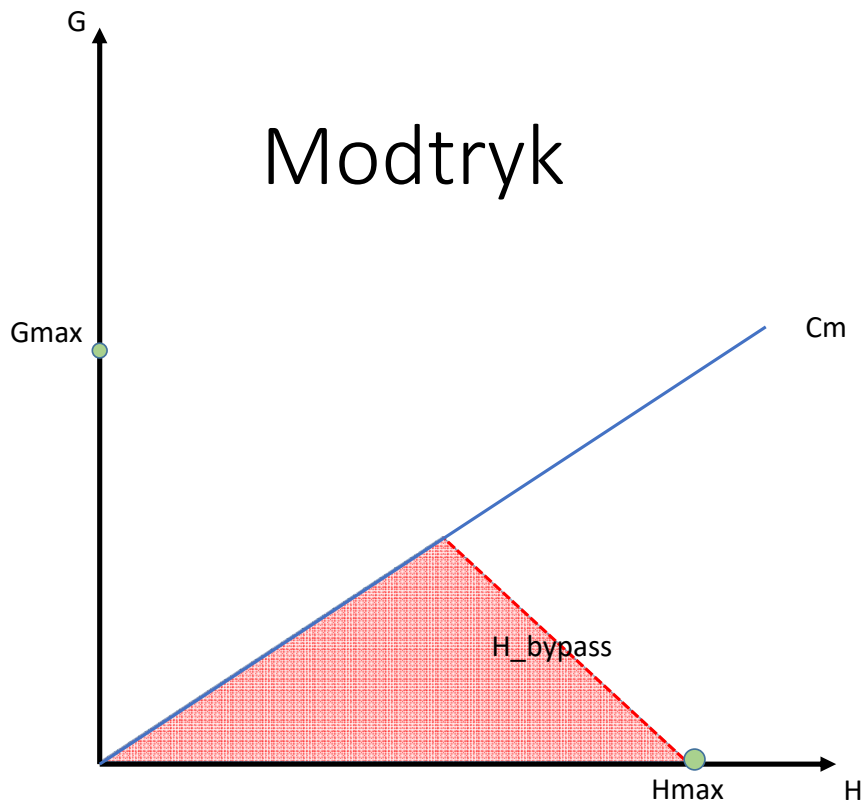
2. $G_{p,t} \geq c_{m,p} H_{p,t}$
3. $G_{p,t} \leq c_{m,p} H_{p,t}$
4. $H_{p,t}^b \leq h_{max,p} - H_{p,t}$

Udtagsværker uden bypass mulighed begrænses af (1) og (2). Hvis et udtagsværk har bypass mulighed tildeles værket variabelen $H_{p,t}^b$, hvilken definerer varmeproduktion fra bypass og skal overholde (4). Den mulige fordeling af el- og fjernvarmeproduktion på udtagsværker er vist i figuren herunder:



Det blå område gælder for udtagsværker uden bypass. Udtagsværker med bypass, kan benytte fordelingen udspændt af det blå og det røde område.

Modtryksværker uden bypass begrænses af (2) og (3) hvorfor der er et fast forhold mellem varme- og elproduktion. Forholdet bestemmes af værkets c_m -værdi. For modtryksanlæg med bypass, gælder som for udtagsværker med bypass at en ekstra variabel tilføjes, og denne skal overholde (4). Den mulige fordeling mellem el og fjernvarmeproduktion i modellen for modtryksanlæg er vist herunder:



Modtryksanlæg uden bypass er bundet til den blå linje, og med bypass er værkerne tilladt at fordele produktionen i det røde område.