



## Metodetil beregning af MAC-kurver for industri- og serviceerhverv

I dette notat skitseres kort metode til beregning af MAC-kurver for industri og serviceerhverv.

### Industri

Overordnet set er MAC-kurverne opbygget ved at beregne omkostningerne til at udskifte varmekilden til levering af proces- og rumvarme for industrien fra at være fossilt baseret med en VE-løsning. Beregningerne er lavet i en industri-energimodel, hvor CO<sub>2</sub>-omkostning i kr./ton er estimeret ved at sammenholde teknologi- og brændselsomkostninger for VE-løsningen med det fossile alternativ.

### Datagrundlag og energiforbrug

Industriens  
energiforbrug i dag

Energiforbruget til industrierhverv baserer sig på en detaljeret opgørelse af industriens energiforbrug, som Viegand og Maagoe udarbejdede for Energistyrelsen i 2015<sup>1</sup>. Den er siden blevet opdateret med nyere energidata, men hvor fordelingen er fastholdt. Her er industriens energiforbrug underopdelt i branchekoder, som er underopdelt på brændsler og på processer herunder temperaturintervaller. Et eksempel på en branchekodes energiforbrug er vist nedenfor:

---

<sup>1</sup> Kortlægning af energiforbrug i virksomheder, Viegand og Maagoe 2015

TJ	El	Naturgas	Olie	VE	Kul	Total
Lav-T1	-	78	2	0	-	81
Lav-T2	20	412	18	3	-	452
Lav-T3	-	144	4	1	-	149
Middel-T1	-	69	2	0	-	71
Middel-T2	-	166	11	1	-	178
Middel-T3	-	98	2	0	-	100
Middel-T4	-	479	43	2	-	524
Middel-T5	-	101	5	1	-	107
Høj-T	-	511	69	1	-	581
Andet elforbrug	1.948	-	-	-	-	1.948
Transport	-	-	122	-	-	122
Total	1.968	2.058	278	9	-	4.314

Tabel 1. Eksempel på energiforbrug for branche 100010 Slagterier. Lav-T1-T3 angiver lavtemperaturprocesser, mens middel-T1-T5 angiver middeltemperaturprocesser og høj-T angiver højtemperaturprocesser

Ea har i forbindelse med et projektet 'Klimaplan KPI'<sup>2</sup> for Dansk Industri i september 2019 udarbejdet en model for varmeomkostninger og CO<sub>2</sub>-udledning for den samlede industri, som baserer sig på ovenstående datasæt. Modellen tog som input et aggregeret datasæt, hvor temperaturintervaller for processerne blev inddelt i 3 niveauer:

- Lav-temperatur processer (LT)
- Middel-temperatur processer (MT)
- Høj-temperatur processer (HT)

DTU vurderer, at det frem mod 2050 er muligt at elektrificere langt størstedelen af LT og MT processer vha. varmepumper, mens en delmængde af højtemperaturprocesser kan elektrificeres vha. elkedler. Beregningerne tager udgangspunkt i denne vurdering.

Flere procestrin og  
brancher

Til analysen for DØRS er modellen blev udvidet, så det er muligt at regne på brancheniveau (og ikke kun industrien total), og derudover er der indlagt flere temperaturniveauer (9 i alt).

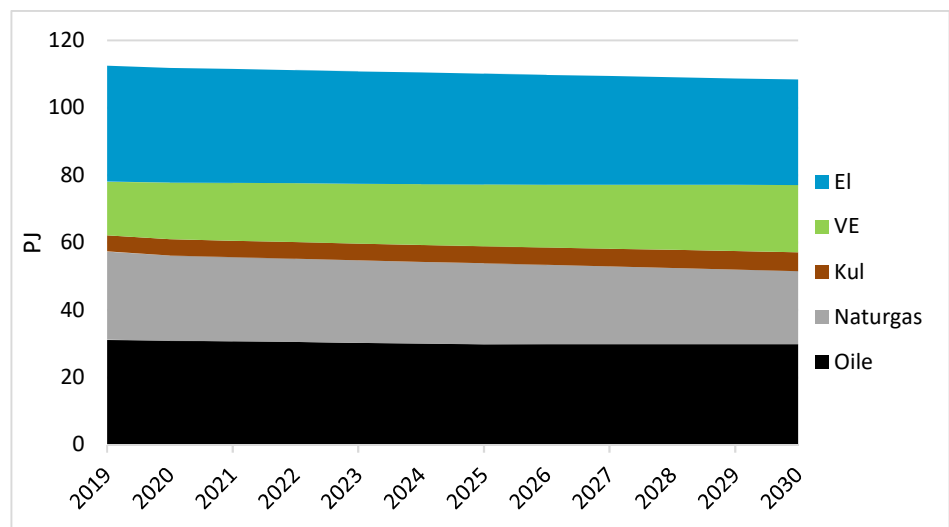
Da den detaljerede opgørelse af energiforbruget ikke stemmer fuldstændig overens med energiforbruget i energistatistikken og Energistyrelsens basisfremskrivning justeres energiforbruget med en faktor, således at når der summeres over alle brancher og alle brændsler, så stemmer det med

<sup>2</sup> Klimaplan KPI - Muligheder og omkostninger ved drivhusgasreduktionstiltag frem mod 2030, Ea Energianalyse, september 2019

basisfremskrivningen. Dermed er der en vis usikkerhed forbundet med at kigge på brancheniveau.

## Fremskrivning af energibehov

Industriens samlede energibehov følger basisfremskrivningens udvikling. Dvs. behovet for procesvarme (og rumvarme) følger basisfremskrivningens tendenser for produktionserhverv. Alt afhængig af hvilke opvarmningsløsninger, der indføres, kan energiforbruget til industri udvikles forskelligt, fordi de forskellige opvarmningsløsninger har forskellig virkningsgrad. Varmepumpers virkningsgrad (COP) er generelt højere end virkningsgraden for et gasfyr eller oliefyr, så det endelige energiforbrug vil falde, når der konverteres fra olie og gas til varmepumper. Nedenfor er vist basisfremskrivningens energiforbrug for industrien fordelt på brændsler.



Figur 1. Fremskrivning af energiforbrug til produktionserhverv ifølge basisfremskrivningen 2019. Kilde: Energistyrelsen

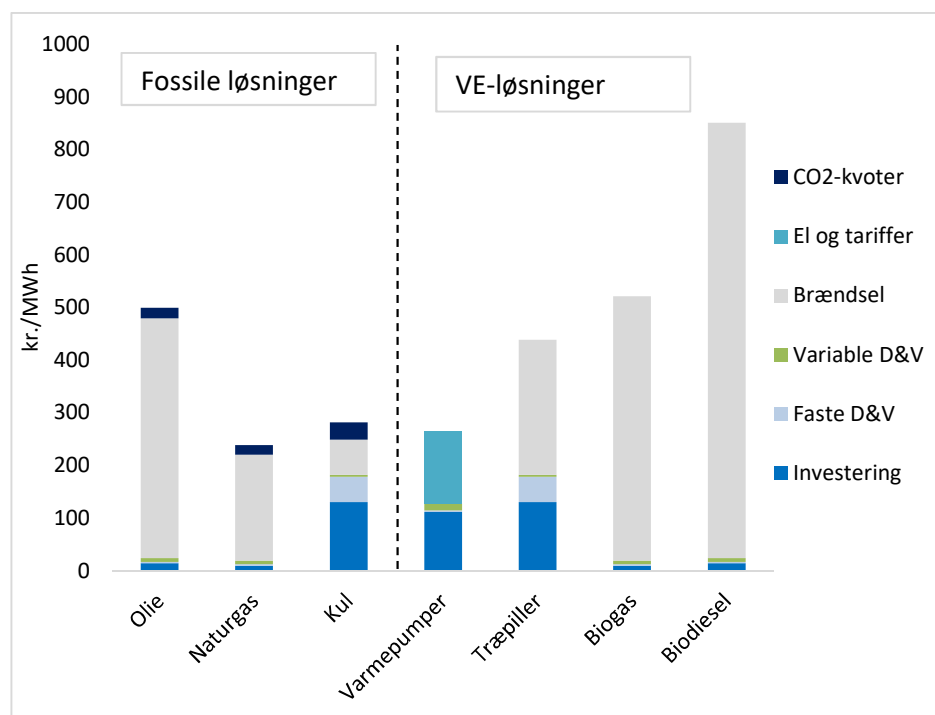
## Beregningsmetode

Til at udarbejde MAC-kurver for de enkelte industri-brancher anvendes som tidligere beskrevet en industrimodel, som estimerer de samlede energiforbrug, totalomkostninger (til energiforsyning) og emissioner for hver procestype.

## Udvalgte VE-cases

I modellen regnes der på, hvad det vil koste at elektrificere dele af industriens energiforbrug samt på erstatning af naturgasforbrug med grøn gas. Der kan generelt regnes på flere VE-løsninger, men der er valgt kun at analysere elektrificering og grøn gas, da de vurderes at være de billigste og mulige at implementere inden 2030. Nedenfor er vist et eksempel på, hvad forskellige

opvarmningsteknologier koster omregnet pr. MWh. Eksemplet er vist for lavtemperaturprocesser, hvor elektrificeringen antages at ske med varmepumper. Middel- og højtemperaturprocesser vil have højere omkostninger til elektrificering. Som det fremgår af figuren, vurderes elektrificering at være den billigste måde at konvertere fossilt energiforbrug til VE-forbrug.



Figur 2. Beregningseksempel for omkostninger til ny varmeforsyning af lav-temperaturprocesser i 2030 (kr./MWh) fordelt på forskellige brændsler

Aldersfordeling af eksisterende anlæg

Energiforbruget i dag (fra basisfremskrivningen 2020) bruges til at estimere den samlede installerede kapacitet i industrien af eksisterende gas-, olie- og kulforbrændingsanlæg. Dernæst er der lavet en aldersfordeling på den eksisterende kapacitet. Her antages det, at den eksisterende bestand er bygget ligeligt fordelt over en periode på teknologiens gennemsnitlige levetid. Fx en naturgaskedel har en levetid på 25 år og derfor antages det at 1/25 af bestanden er bygget i hvert år i periode 1990-2014.

Udskiftning af udtjente anlæg

For hvert år derefter vurderer modellen, hvor stor andel af den tilgængelige kapacitet har nået dets levetiden og derved nedlægges. Nedlæggelse af gammel kapacitet er baseret på en normalfordeling centreret omkring den specifikke teknologis gennemsnitlig levetid og med en spredning på to år.

Derefter justerer modellen den totale kapacitet i det pågældende år, så det passer med det analyserede tiltag. Her har modellen to muligheder (se eksempler):

1. Hvis den totale kapacitet er for lav, investeres i ny kapacitet.
2. Hvis den totale kapacitet er for høj, nedlægges den ældste kapacitet, selvom det ikke er udtjent. Annuiteter for investeringsomkostninger for disse fortsættes.

Efter bestanden for et givet år er bestemt, beregner modellen følgende:

- Investeringsannuiteter. Investeringen afbetales over teknologiens levetid med en rente på 4%.
- Drift & vedligehold omkostninger. Disse afhænger af kapacitetens alder.
- Varme leveret til processer.
- Brændselsforbrug: Denne afhænger af kapacitetens alder, da effektiviteten afhænger af alderen.
- Brændselsudgifter: Denne afhænger af alderen grundet effektiviteten.
- Afgifter

Til arbejdet for DØRS er der regnet uden afgifter.

*Eksempel 1: Beregningsåret er 2020 og eksisterende bestand med aldre 1990-2019 udgør 250 MW. Vha. normalfordelingen beregnes at 10 MW er udtjent og derved reduceres den eksisterende bestand til 240 MW. I 2020 ønskes en bestand på 260 MW og derfor bygges 20 MW ny kapacitet i 2020.*

*Eksempel 2: Beregningsåret er 2020 og eksisterende bestand med aldre 1990-2019 udgør 250 MW. Vha. normalfordelingen beregnes at 10 MW er udtjent og derved reduceres den eksisterende bestand til 240 MW. I 2020 ønskes en bestand på 230 MW og derfor nedlægges 10 MW af den ældste kapacitet. Der bygges ikke ny kapacitet i 2020.*

*Boks 1. Eksempler på hvordan modellen beregner ny kapacitet og investeringsomkostninger*

Reference

I modellen er der med udgangspunkt i basisfremskrivningen 2019 lavet en referenceberegning af industriens totale omkostninger til proces- og rumvarme. Referencen bruges til sammenligning og beregning af meromkostninger ved konvertering til VE-løsninger.

Tiltag

Et tiltag er en modelberegning af en ændret udvikling i energiforbruget sammenlignet med referencen. Det omfatter bl.a. konsekvenser af omkostninger, energiforbrug og emissioner. Først omregnes

brændselsforbruget til et varmebehov<sup>3</sup>. Dernæst indlægges et tiltag, som ændrer på, hvilke teknologier, der skal dække det samlede varmebehov. Et eksempel på et tiltag kan være: '70% reduktion i naturgasforbruget for LT1-processer i 2030 ved elektrificering'. Her erstattes 70% af varmebehovet som i referencen dækkes af naturgas med varmepumper i 2030 for LT1-processer. Naturgasforbruget nedskrives lineært fra 2020.

Lineær sti er en  
forsimpling

Den lineære sti mod 2030 er en forsimpning, som kan betyde at der løbende indregnes højere omkostninger end nødvendigt, fordi der løbende lukkes kapacitet, der ikke er udtjent. Der er her ikke lavet en optimering af vejen hen til et givent mål i 2030, som betyder, at akkumulerede meromkostninger for perioden 2020-2030 kan være overvurderet. Da der imidlertid er fokus på konsekvenserne alene i 2030, er 'vejen derhen' mindre vigtig.

Elektrificering kan være  
mere end udskiftning af  
varmekilden

Generelt antages i tiltagene, at processerne ikke ændres i forbindelse med elektrificering, men blot at varmekilden udskiftes. I virkeligheden vurderes det at nogle industrier ville ændre deres processer i forbindelse med en elektrificering. Alternative former for elektrificering er meget specifikke til de individuelle industrier og processer og ville kræve en analyse af individuelle industrier og potentielt specifikke producenter. Dog må det antages, at en industri kun ændrer deres processer, hvis det er økonomisk fordelagtigt. Derfor ville eventuelle ændrede processer reducere de totale omkostninger ved elektrificering i industrien. Beregningerne fremlagt i denne rapport er derfor potentielt en undervurderet repræsentation af omkostninger ved elektrificering af industrien.

Modellen indeholder fem forskellige brændselsgrupperinger, men disse repræsenterer i princippet en større antal forskellige brændsler og teknologier. For at simplificere beregningerne antages det, at en enkelt teknologi er tilknyttet hvert brændselsforbrug.

### MAC-kurver

Til DØRS er der udarbejdet MAC-kurver for 42 brancher. For hver branche er der lavet simuleringer af følgende tiltag:

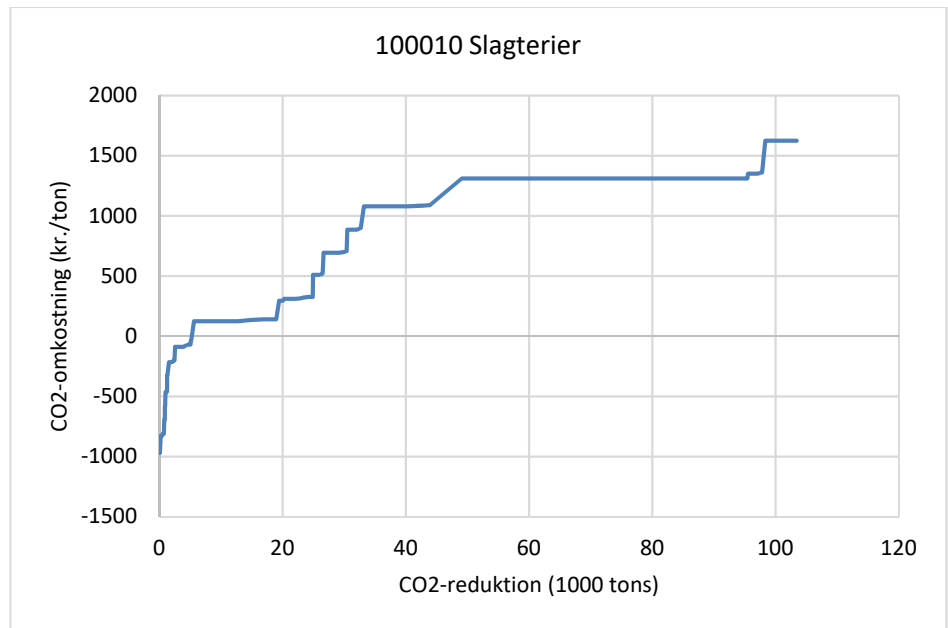
- Elektrificering af naturgasforbrug
  - For LT1-, LT2-, LT3-processer

---

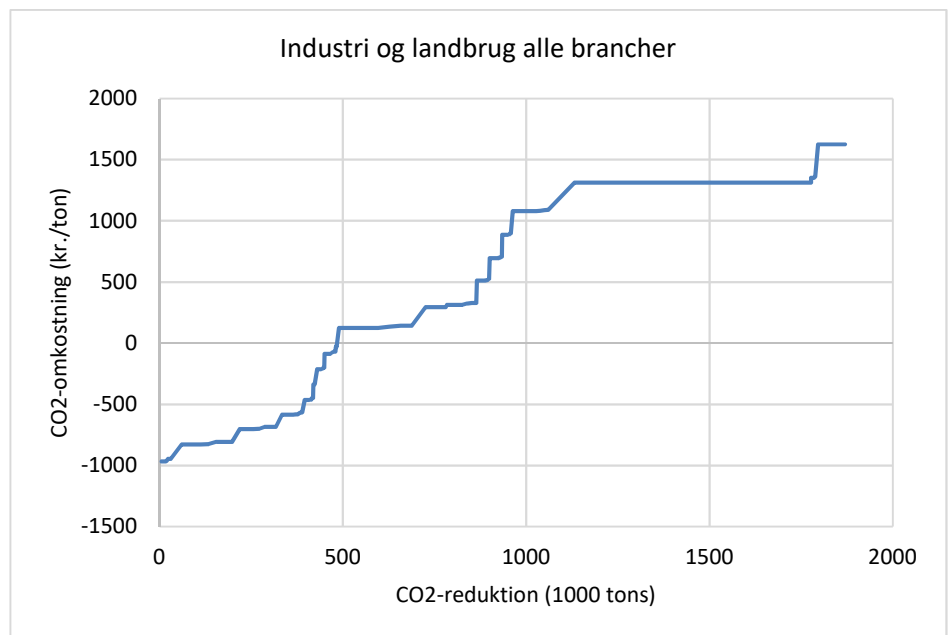
<sup>3</sup> Hvis der eksempelvis forbruges 1 GJ olie og en oliekedel i gennemsnit har en virkningsgrad på 95%, så er det samlede varmebehov 0,95

- Reduktion af naturgasforbrug i 2030: 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 40%, 50%, 60% og 70%
  - For MT1-, MT2-, MT3-, MT4- og MT5-processer
    - Reduktion af naturgasforbrug i 2030: 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45% og 50%
  - For HT-processer
    - Reduktion af naturgasforbrug i 2030: 5%, 10%, 15%, 20%, 25%
- Elektrificering af olieforbrug
  - For LT1-, LT2-, LT3-processer
    - Reduktion af naturgasforbrug i 2030: 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 40%, 50%, 60% og 70%
  - For MT1-, MT2-, MT3-, MT4- og MT5-processer
    - Reduktion af naturgasforbrug i 2030: 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45% og 50%
  - For HT-processer
    - Reduktion af naturgasforbrug i 2030: 5%, 10%, 15%, 20%, 25%
- Iblanding af biogas i 2030
  - 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% og 100%

For hver branche er der således lavet 180 simuleringer. De mange simuleringer er lavet for at opnå flere trin på MAC-kurven, fordi der ses på marginale ændringer inden for hver branche. MAC-kurven er opbygget ved at betragte den marginale påvirkning ved at øge konverteringsgraden fra et niveau til det næste fx fra 5% til 10%. MAC-kurven opsummerer ændringerne i de totale omkostninger i forhold til ændringen i udledningen af CO<sub>2</sub>-ækvivalenter. Nedenfor er vist et eksempel på en MAC-kurve.



Figur 3. MAC-kurve for branchen 100010 Slagterier, hvor CO2-omkostning i kr./ton afspejler meromkostningen i 2030 sammenlignet med referencens 2030-beregning



Figur 4. MAC-kurve alle brancher under industri og landbrug (kun energiforbrug til landbrug er inkluderet)

MAC-kurven er ikke fuldstændig

MAC-kurven inkluderer kun en optimistisk realistisk omstilling af industrisektoren frem mod 2030, men når ikke en 100% reduktion af CO<sub>2</sub>-udledningen. For det resterende fossile energiforbrug vurderes det, at det dels er for kort en tidsperiode til at en yderligere elektrificering realistisk kan implementeres og dels skal der anvendes dyrere teknologier for at nå i mål.



For højtemperaturprocesser kan kun en delmængde af elektrificeres, hvorfor der her sandsynligvis skal bruges dyrere teknologier som fx Power-to-X produkter (brint, metanol, ammoniak, syndiesel m.fl.).

Kulforbruget ikke analyseret

En del af kulforbruget til industrien anvendes direkte i processer og er derfor svært at erstatte af fx el. I analysen her er der alene kigget på udskiftninger af varmekilden og ikke på, hvilke muligheder der er for at omlægge procesvejene. Konverteringen af kulforbruget er derfor ikke kortlagt, fordi det kræver nærmere analyse af udvalgte branchers procesøkonomi. Det kan dog nævnes, at CO<sub>2</sub>-udledningen fra kulforbrænding kan fanges og lagres med carbon capture and storage (CCS). Ved en udvidelse af modellen og med økonomi-input om CCS-teknologien, kan MAC-kurven blive udvidet hermed. Det forventes at omkostningerne til CCS vil ligge på et højere niveau end vist i MAC-kurverne.

### Beregningsforudsætninger

Der tages udgangspunkt i Energistyrelsens teknologikatalog for data relateret til disse teknologier. Kataloget indeholder ikke data for oliekedler og derfor antages investeringsomkostningen at være 50% højere end for en gaskedel for at kompensere for omkostninger til olietanken. Det forventes, at en LT varmepumpe er billigere end en MT varmepumpe og det antages at varmepumpen dokumenteret i teknologikataloget er en LT varmepumpe.

	LT-processer	MT-processer	HT-processer
Investering	5,1 mio. kr./MW	6,1 mio. kr./MW	1,2 mio./MW
Faste D&V	15.300 kr./MW	15.300 kr./MW	8.200 kr./MW
Variable D&V	14 kr./MWh	14 kr./MWh	4 kr./MWh
Levetid	25 år	25 år	20 år

Table 2. Beregningsforudsætninger for el-teknologi for LT-, MT- og HT-processer i 2020

	2020	2030
LT1	4,09	4,29
LT2	3,17	3,32
LT3	2,64	2,77
MT1	2,30	2,41
MT2	2,01	2,10
MT3	1,77	1,86
MT4	1,59	1,66
MT5	1,38	1,45
HT	1,00	1,00

Tabel 3. COP-faktorer for varmepumper

Til brændselspriser benytter modellen som udgangspunkt priserne fra World Energy Outlook's Sustainable Development scenarie. For elektricitet, biodiesel og biogas benyttes en intern analyse. Biogaspriserne baserer sig på en beregning af omkostningerne til at producere biogas med udgangspunkt i omkostningerne i teknologikataloget. Elpriserne afspejler, at al ny elforbrug skal dækkes af ny VE-produktion fra vind og sol. Derfor er priserne generelt højere end det gennemsnitlige spotpriseniveau.

		2020	2030
Naturgas	kr./GJ	36,0	48,7
Fuelolie	kr./GJ	54,5	73,7
Kul	kr./GJ	20,5	21,1
El	kr./MWh	451	434
Biogas	kr./GJ	142	133
El-tarif	kr./MWh	160	160
Gastarif	kr./GJ	12,2	9,4

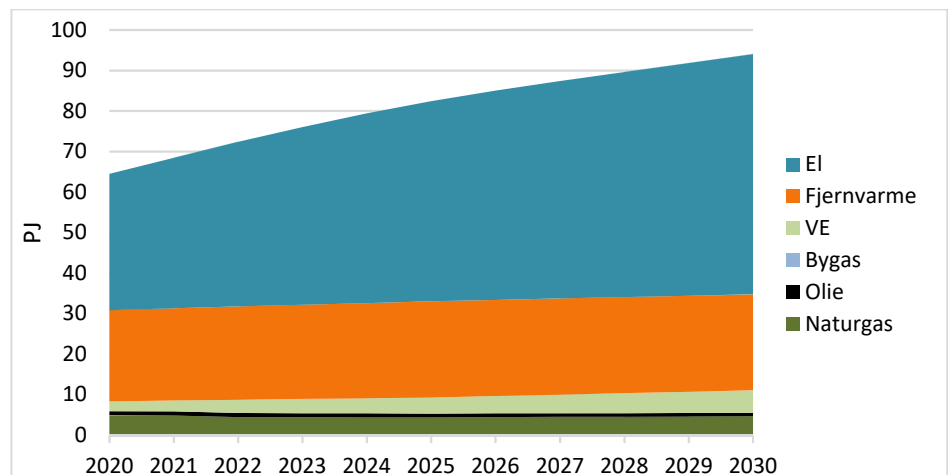
Tabel 4. Anvendte brændselspriser (CIF-priser) og tariffer

## Serviceerhverv

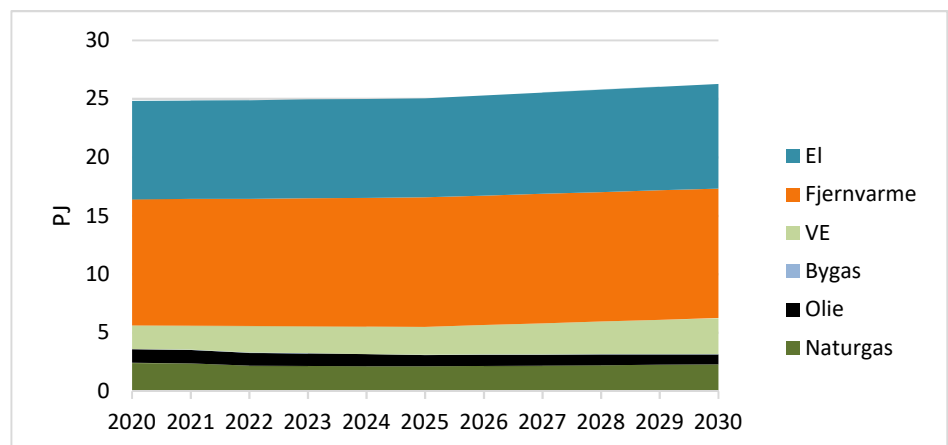
Energiforbruget til serviceerhverv består hovedsageligt af rumvarme. Der er for serviceerhverv opbygget en model tilsvarende den for industri, men lidt mere simpel, da det ikke er nødvendigt at gennemregne omkostningerne for forskellige processer og antallet af brancher er her reduceret til to: Privat service og offentlig service.

## Energiforbrug

Fremskrivningen af energiforbruget til privat og offentlig service baserer sig på Energistyrelsens basisfremskrivning 2019, som er vist i Figur 5 og Figur 6 nedenfor. Når el- og fjernvarmesektoren ikke tages med i betragtning, udgør det fossile energiforbrug kun en mindre del af det samlede energiforbrug (ca. 10% for privat service og ca. 15% for offentlig service) i 2020.



Figur 5. Fremskrivning af energiforbrug til privat service. Kilde: Basisfremskrivning 2019, Energistyrelsen. Bemærk stigningen i elforbruget primært skyldes datacentre



Figur 6. Fremskrivning af energiforbrug til offentlig service. Kilde: Basisfremskrivning 2019, Energistyrelsen

### Beregningsmetode

På samme måde som for industri er der opbygget en referenceberegning, som udregner serviceerhvervenes totale omkostninger, emissioner og energiforbrug baseret på basisfremskrivningen.

Fra referenceberegningen er der regnet på en række simuleringer:

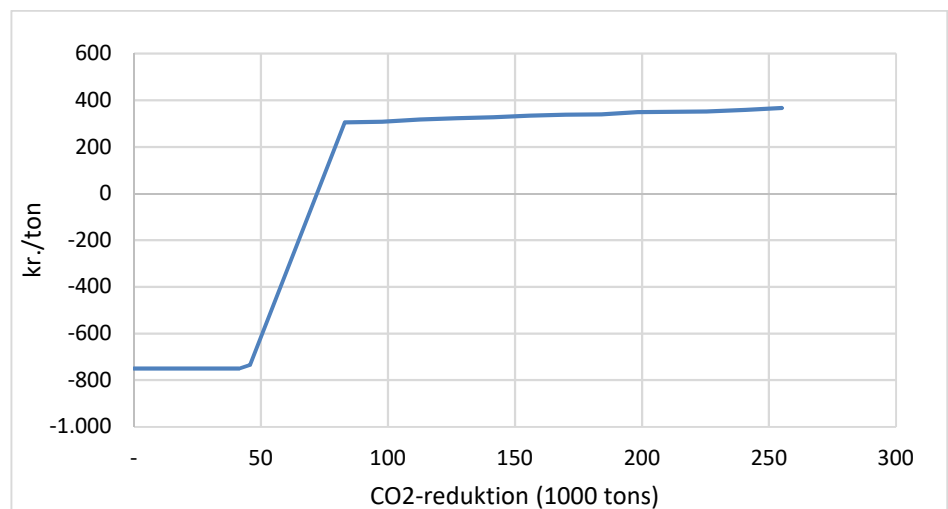
- Naturlig udskiftning af naturgaskedler til opvarmning
  - 2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025, 2026, 2027, 2028, 2029, 2030
- Naturlig udskiftning af oliekedler til opvarmning
  - 2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025, 2026, 2027, 2028, 2029, 2030
- Tvangslukning af naturgaskedler således at der opnås en reduktion på 70% af naturgasforbruget i 2030
- Tvangslukning af naturgaskedler således at der opnås en reduktion på 95% af olieforbruget i 2030

Da der er indlagt en forventning om teknologiudvikling for varmepumper (dvs. et prisfald og stigende COP), vil den naturlige udskiftning af varmepumper i 2030 være billigere end den naturlige udskiftning i 2020.

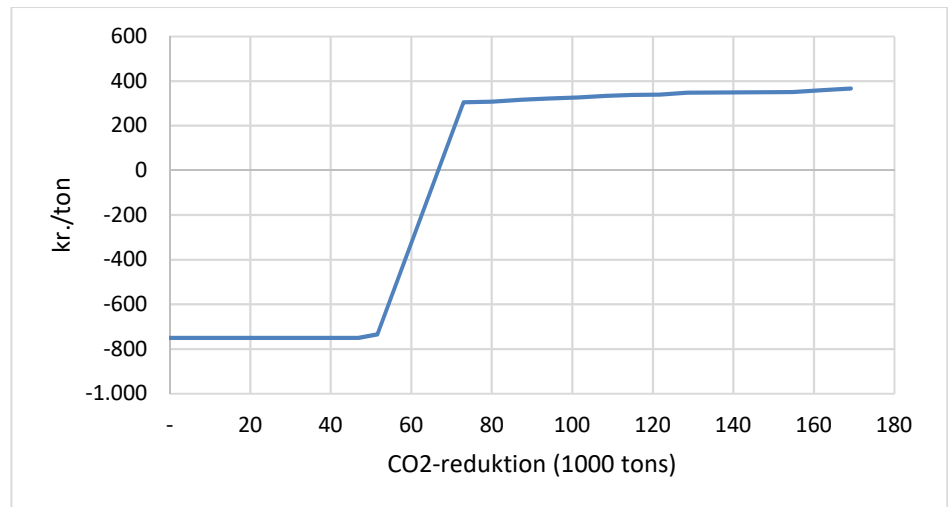
Beregningerne af tvangslukning inkluderer kun kedler lukket før udtjent levetid og bygger således ovenpå beregningen af den naturlige udskiftning. I beregningen fortsættes annuitetsbetalingen for olie- og gaskedler.

### MAC-kurver

Nedenfor vises de resulterende MAC-kurver for serviceerhverv.



Figur 7. MAC-kurve i 2030 for privat service



Figur 8. MAC-kurve i 2030 for offentlig service

### Beregningsforudsætninger

Der tages udgangspunkt i Energistyrelsens teknologikatalog for varmepumper samt for naturgasfyr. Tabel 5 opsummerer de anvendte forudsætninger for varmepumper. Der er anvendt samme brændselsprisforudsætninger som for industrien.

	2020	2030
Investering	5,0 mio. kr./MW	4,5 mio. kr./MW
Faste D&V	7.390 kr./MW	6650 kr./MW
Variable D&V	14 kr./MWh	14 kr./MWh
Kapacitet pr. enhed	400 kW	400 kW
Levetid	20 år	20 år
COP	3,05	3,12

Tabel 5. Beregningsforudsætninger for varmepumper anvendt i beregningerne for serviceerhverv