



Fakta om Atomkraft: Input til en faktabaseret diskussion af fordele og ulemper ved atomkraft som en del af den grønne omstilling i Danmark

Thellufsen, Jakob Zinck ; Lund, Henrik; Mathiesen, Brian Vad; Madsen, Poul Thøis; Østergaard, Poul Alberg; Nielsen, Steffen; Sorknæs, Peter; Wenzel, Henrik; Münster, Marie; Rosendal, Mathias Berg

Total number of authors:
16

Publication date:
2022

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):

Thellufsen, J. Z., Lund, H., Mathiesen, B. V., Madsen, P. T., Østergaard, P. A., Nielsen, S., Sorknæs, P., Wenzel, H., Münster, M., Rosendal, M. B., Madsen, H., Østergaard, J., Morthorst, P. E., Sørensen, P. B., Andresen, G. B., & Victoria, M. (2022). *Fakta om Atomkraft: Input til en faktabaseret diskussion af fordele og ulemper ved atomkraft som en del af den grønne omstilling i Danmark*.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Fakta om Atomkraft

Input til en faktabaseret diskussion af fordele og ulemper ved atomkraft som en del af den grønne omstilling i Danmark

Thellufsen, Jakob Zinck; Lund, Henrik; Mathiesen, Brian Vad; Madsen, Poul Thøis; Østergaard, Poul Alberg; Nielsen, Steffen; Sorknæs, Peter; Wenzel, Henrik; Münster, Marie; Rosendal, Mathias Berg; Madsen, Henrik; Østergaard, Jacob; Morthorst, Poul Erik; Sørensen, Peter Birch; Andresen, Gorm Bruun; Victoria, Marta

Publication date:
2022

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Thellufsen, J. Z., Lund, H., Mathiesen, B. V., Madsen, P. T., Østergaard, P. A., Nielsen, S., Sorknæs, P., Wenzel, H., Münster, M., Rosendal, M. B., Madsen, H., Østergaard, J., Morthorst, P. E., Sørensen, P. B., Andresen, G. B., & Victoria, M. (2022). *Fakta om Atomkraft: Input til en faktabaseret diskussion af fordele og ulemper ved atomkraft som en del af den grønne omstilling i Danmark*.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

FAKTA OM ATOMKRAFT I DANMARK

INPUT TIL EN FAKTABASERET DISKUSSION
AF FORDELE OG ULEMPER VED ATOMKRAFT
SOM EN DEL AF DEN GRØNNE OMSTILLING I DANMARK

FORFATTERE:

Aalborg Universitet

Jakob Zinck Thellufsen, Henrik Lund, Brian Vad Mathiesen, Poul Thøis Madsen, Poul Alberg Østergaard, Steffen Nielsen og Peter Sorknæs,

Syddansk Universitet

Henrik Wenzel

DTU

Marie Münster, Mathias Berg Rosendal, Henrik Madsen, Jacob Østergaard og Poul Erik Morthorst

Københavns Universitet

Peter Birch Sørensen

Aarhus Universitet

Gorm Bruun Andresen og Marta Victoria

FORORD

I Danmark har vi en god og lang tradition for en åben demokratisk debat om vores fremtidige energiforsyning.

Gennem årene har vi udviklet et godt fælles grundlag for, at en sådan debat er baseret på fakta om, hvad de enkelte teknologier kan i dag, samt en konsensus om fremtidige forventninger. Teknologikataloget, som løbende opdateres af Energistyrelsen og Energinet i en dialog med relevant faglig ekspertise, udgør en fælles ramme for denne forståelse.

I den senere tid har der været en debat om, hvorvidt atomkraft kan og bør være en del af den grønne omstilling af Danmarks energiforsyning eller ej. Debatten har indeholdt mange modsatrettede udsagn om blandt andet økonomien i atomkraft og dens evne til at være en del af det samlede fremtidige elsystem.

Det er forståeligt, at en sådan debat opstår i lyset af de nuværende klima- og energiforsyningsudfordringer, men det er en fordel for debatten, at den bliver så faktabaseret som muligt. Målet med vores notat er at bidrage til dette.

Vi har fundet frem, hvad vi kunne af relevante fakta om nyligt etablerede atomkraftværker i Europa samt forventninger til atomkraft i fremtiden baseret på data fra det Internationale Energiagentur. Disse fakta omhandler anlægskostninger, levetider, driftsomkostninger og byggetider.

På baggrund af en sådan viden samt tilsvarende data om eksisterende vedvarende energianlæg i Danmark i kombination med Teknologikatalogets forventninger til fremtiden har vi foretaget en direkte sammenligning af omkostningerne ved at producere el fra henholdsvis vind, sol og atomkraft.

Det er imidlertid svært direkte at sammenligne sol, vind og atomkraft. Atomkraft er kendetegnet ved kontinuert produktion i modsætning til den fluktuerende produktion fra vind og sol. Der er en umiddelbar relativ fordel ved kontinuert elproduktion. Men atomkraften har også nogle ulemper, hvad angår radioaktivt affald og sikkerhed.

Den fluktuerende produktion fra vind og sol afføder et behov for kapacitet til at balancere systemet, når der ikke er forsyning fra vind og sol. Det kan fx være transmissionsnetkapacitet til at balancere over geografiske afstande, kapacitet i form af gasturbiner, der kan køre på grøn gas fra nettet i sådanne perioder og det kan være behov for kapacitet i form af elektrolyse til brintproduktion, så brinten produceres, når der er mest el i systemet. For at kvantificere den økonomiske betydning af dette behov for ekstra kapacitet har vi foretaget energisystemanalyser og regnet på et fremtidigt dansk energisystem henholdsvis med og uden atomkraft. På den måde kan vi vurdere, hvordan atomkraft vil kunne påvirke det samlede energisystem og dets omkostninger.

Vi ser gerne en åben debat om de data, som vi fremlægger her. Derfor kalder vi også dette skrift for 'første version', og er der noget, som skal korrigeres eller suppleres, så gør vi gerne det i en eventuelt revideret version.

Under alle omstændigheder håber vi, at notatet bidrager til at gøre debatten mere faktabaseret og transparent. Det er der brug for.

Forord	side	3
Indhold	side	4
Hovedpointer	side	5
1 Omkostninger og byggetider for atomkraft i Danmark	side	6
1.1 Elproduktionsomkostninger.....	side	7
1.2 Byggetider.....	side	9
1.3 Støttebehov til investeringer i atomkraft og vedvarende energi.....	side	10
1.4 Atomkraft som spids- og reservelast.....	side	11
1.5 Små modulære reaktorer.....	side	12
2 Energisystemanalyser	side	13
3 Tilbageværende spørgsmål	side	15
4 Metode og datagrundlag	side	16
4.1 Beregning af årlig omkostning per energiproduktion.....	side	16
4.2 Energisystemanalyser.....	side	16
4.3 Datagrundlag.....	side	18
4.3.1 Brændselspriser og driftstimer.....	side	18
4.3.2 Datablade på eksisterende projekter.....	side	18
4.3.3 Datablade baseret på teknologikataloger og databaser.....	side	20
5 Kilder	side	21
Appendiks A: IDA's klimasvar	side	23
Appendiks B: Atomkraft erstatter 1.475 MW havvindmøller	side	24
Appendiks C: Atomkraft erstatter 2.043 MW landvindmøller	side	25

HOVEDPUNKTER

- Historisk har omkostningerne til elektricitet fra vind og sol været markant faldende, mens omkostningerne til ny atomkraft har været stigende.
- I dag er elektricitet fra ny atomkraft opført i Vesteuropa ca. dobbelt så dyr som elektricitet fra danske vindmølleparker og solcelleanlæg, selv når man forudsætter en levetid for atomkraftværket på 60 år.
- Baseret på det Internationale Energi Agenturs, IEAs forventninger til atomkraft i Vesteuropa og teknologikatalogets forventninger til sol og vind i Danmark forventes den relative prisforskel at blive endnu større i fremtiden.
- Der findes atomkraft i verden, som er lige så billigt eller næsten lige så billigt som vind og sol i Danmark. Det er tilfældet ved levetidsforlængelser af eksisterende værker eller værker bygget i f.eks. Kina. Det er ikke en mulighed, som vi har i Danmark.
- I dag er byggetiden på et atomkraftværk i Vesteuropa ca. 15 år målt fra byggestart til ibrugtagning. Hertil kommer en planlægningstid på i størrelsesordenen 5-8 år. Det kan sammenlignes med en byggetid for vind og sol på 2-3 år plus en planlægningstid på i størrelsesordenen 1-6 år.
- Behovet for statslig støtte er væsentligt højere for atomkraft end for vind og sol. I dag kræver vind og sol i Danmark hverken tilskud eller prisgaranti fra staten. Ved det seneste udbud af Thor Havvindmøllepark på 1.000 MW fik staten 2,8 mia. kroner ind grundet stor konkurrence. Til sammenligning kræver opførelsen af atomkraft i England en garanti på omkring 80 øre/kWh i 35 år.
- Atomkraft egner sig ikke til reservelast for vedvarende energi i perioder, hvor der ikke er vind eller sol. Prisen på el fra et atomkraftværk bygget til reservelast vil være lige så dyr som fra et gasfyret kraftværk med de nuværende ekstremt høje gaspriser, og langt højere end den forventede omkostning til et gasfyret spidslastkraftværk baseret på grøn gas i fremtiden. For atomkraftværket vil denne pris gælde i alle 60 år af værkets levetid.
- Små modulære reaktorer (SMR), som er under udvikling af blandt andet det danske firma Seaborg Technologies er på nuværende tidspunkt ikke kommercielt tilgængelige. Internationale studier indikerer at de ikke bliver markant billigere end den nuværende atomkraftteknologi. På den baggrund er der ikke noget der tyder på, at SMR-værkerne vil kunne ændre i det billede, vi har beskrevet ovenfor.

Atomkraftværker kan i modsætning til vind og sol producere uafhængigt af vejrforhold. Derved kan eventuelle ubalancer mellem forbrug og produktion af elektricitet mindskes, og atomkraft kan potentielt spare kapacitet på andre typer af spids- og reservelastværker (energikilder, der står klar, når vind og sol svigter eller ikke leverer nok, og der så er brug for erstatning. Med energisystemanalyser har vi beregnet værdien af disse forhold ved at sammenligne et fremtidigt dansk CO₂-neutralt energisystem baseret på vind og sol henholdsvis med og uden et atomkraftværk på 1.000 MW. Sammenligningen er opstillet, så de to alternativer ud over denne forskel er ens.

Analysen viser følgende resultater:

- Fordelen ved mindre ubalancer i systemet pga. et atomkraftværk på 1.000 MW i det danske energisystem kan udtrykkes som en økonomisk fordel på 150-180 mio. kr. pr. år. Denne fordel opstår ved sparede investeringer i elektrolysekapacitet, svarende til, hvad alternativet baseret kun på vedvarende energi kræver for at eliminere de ubalancer der opstår, når den vedvarende energi ikke producerer.
- Fordelen ved mindre spids- og reservelast kan tilsvarende opgøres til potentielt at spare ca. 200 mio. kr. pr. år.
- Samlet set vil investeringen i et atomkraftværk på 1.000 MW imidlertid øge de årlige omkostninger til den danske energiforsyning med 1,5 - 2 mia. kr. alt efter, oalt efter om det erstatter en del af de danske havvindmølleparker eller en del af de danske landvindmølleparker.
- Selv når atomkraftens fordele indregnes, så vil en grøn omstilling med atomkraft altså være markant dyrere end en grøn omstilling uden atomkraft.
- Hertil kommer atomkraftens ulemper i form af dels sikkerhedsrisikoen ved at placere et værk i Danmark, og dels udfordringen med at finde et sted at deponere det radioaktive affald.

1 OMKOSTNINGER OG BYGGETIDER FOR ATOMKRAFT I DANMARK

I Danmark har vi opstillet mange vindmøller og etableret mange solcelleanlæg. Derfor ved vi, hvad de koster, og hvor lang tid det tager at opføre sådanne anlæg. Vi har også kunnet konstatere, at omkostningerne til vind og sol har været markant faldende gennem de seneste mange år.

Det forholder sig omvendt med atomkraft, som vi dog ikke har erfaring med i Danmark. Derfor ved vi heller ikke med sikkerhed, hvad det koster, og hvor lang byggetiden er i Danmark. Det bedste, vi kan gøre, er at se på de anlæg, der bliver bygget eller netop er færdigbygget i vores nabolande. Her kan vi blandt andet konstatere, at såvel omkostninger som byggetider er stigende for atomkraft [1].

I den forbindelse er det vigtigt at være opmærksom på, at blandt de muligheder for investering i atomkraft, som har været nævnt i debatten hidtil, er nogle af dem relevante i en dansk sammenhæng, mens andre ikke er.

Blandt de muligheder, som vi *ikke har* i Danmark, er f.eks. levetidsforlængelse af eksisterende værker. Det samme gælder køb af nye teknologier, som ikke er færdigudviklede og ikke er til salg endnu. Hertil kommer, at vi næppe ønsker at vælge atomkraftteknologier, der baserer sig på uran fra Rusland. Vi kan heller ikke sammenligne med et atomkraftværk, som er opført i Kina eller i Indien, fordi de er baseret på andre krav til byggeri og sikkerhedskrav end de, der gælder i Vesteuropa [2].

Den mulighed, som Danmark *har*, er at bygge den samme type atomkraftværker, der nu opføres i vores vesteuropæiske nabolande. Her kan vi se, hvad de koster og hvor lang tid, det har taget at bygge dem. Vi har identificeret tre sådanne værker, som vi kan sammenligne os med: Olkiluoto 3 i Finland, Flamanville 3 i Frankrig og Hinkley Point C i Storbritannien.

De tre værker sammenligner vi med allerede etablerede solcelle- og vindmølleparker i Danmark. Det drejer sig om Kriegers Flak og Horns Rev 3, som begge er havvindmølleparker, Vindpark Thorup-Sletten, som består af 20 landvindmøller, samt Heartland solcellepark ved Holstebro.

For at perspektivere til de muligheder, vi ikke har i Danmark, har vi for forståelsens skyld også inkluderet levetidsforlængelser af eksisterende atomkraftværker (LTO) og opførelsen af Taishan 1 og 2 i Kina. Metode og datagrundlag kan ses i afsnit 4.

Ud over de allerede etablerede projekter sammenligner vi også med prisfremskrivninger for bygning og drift af forskellige typer af elproduktion frem mod 2050. Her anvender vi det Internationale Energiagentur som kilde på atomkraft, hvor vi på vindmøller og solceller anvender Energistyrelsens Teknologikataloger baseret på danske anlæg. Tallene til analysen er dokumenteret i afsnit 4.

1.1 Elproduktionsomkostninger

I dette afsnit sammenligner vi den direkte omkostning til elproduktion på forskellige realiserede (eller næsten færdigbyggede) projekter.

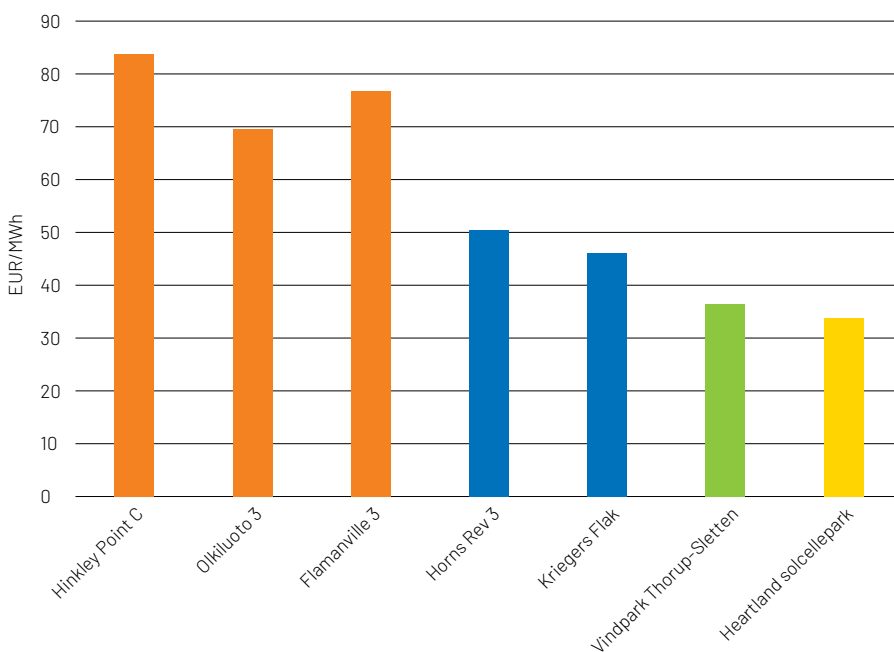
Af **Figur 1** kan det ses de nuværende omkostninger for at bygge og drive de tre atomkraftværker Hinkley Point C, Olkiluoto 3 og Flamanville 3 udtrykt pr. MWh produceret over anlæggets levetid. Omkostningen kan udregnes til mellem 70 og 80 EUR/MWh. De to havvindmølleparker, Horns Rev 3 og Kriegers Flak har i modsætning hertil en omkostning på 45-50 EUR/MWh svarende til ca. 60% af omkostningerne til et atomkraftværk. Kigger vi på landmølleparker- og solcelleparker i Figur 1, kan det ses, at elproduktionen herfra koster i omegnen af 35 EUR/MWh. Omkostningen til el leveret fra atomkraft er således mere end dobbelt så dyr som omkostningen til el fra landvindmølleparker eller solcelleparker.

Figur 1 viser også de muligheder, som vi ikke har i Danmark. Her kan vi se, at havvindmølleparker i Danmark stadig er ca. samme pris som atomkraft i Kina, ligesom landvindmølleparker eller solcelleparker er omkring samme pris som levetidsforlængelse – hvis det kræver en investering i værket. Baseret på de data, er der derfor intet, som tyder på at atomkraftinvesteringer i Danmark giver bedre økonomi end investeringer i vedvarende energi. Tværtimod viser sammenligningen, at atomkraft ca. er dobbelt så dyr som elektricitet fra vind og sol.

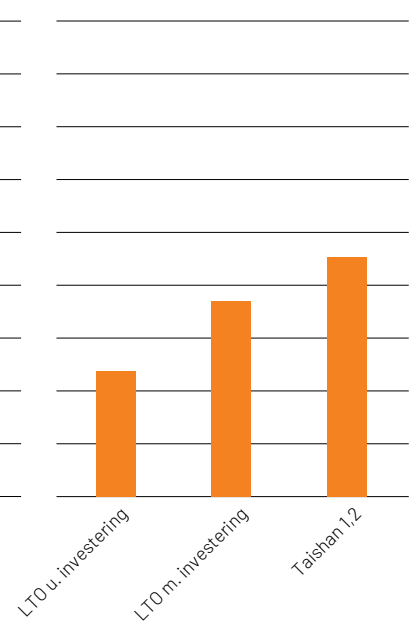
FIGUR 1

Realiserede projekter. Sammenligning af omkostningen ved at producere en MWh elektricitet for forskellige værker, også kendt som levelized cost of electricity (LCOE). **Orange er** atomkraftværker, **blå** er havvindmølleparker, **grøn** er landvindmølleparker og **gul** er solcelleparker. Teknologierne er opdelt i to kategorier, alt efter om det er muligheder vi har i Danmark på nuværende tidspunkt eller muligheder vi ikke har i Danmark. LTO er levetidsforlængelser af eksisterende atomkraftværker. Grundlaget for tallene findes i afsnit 4.

Muligheder Danmark har



Muligheder Danmark ikke har

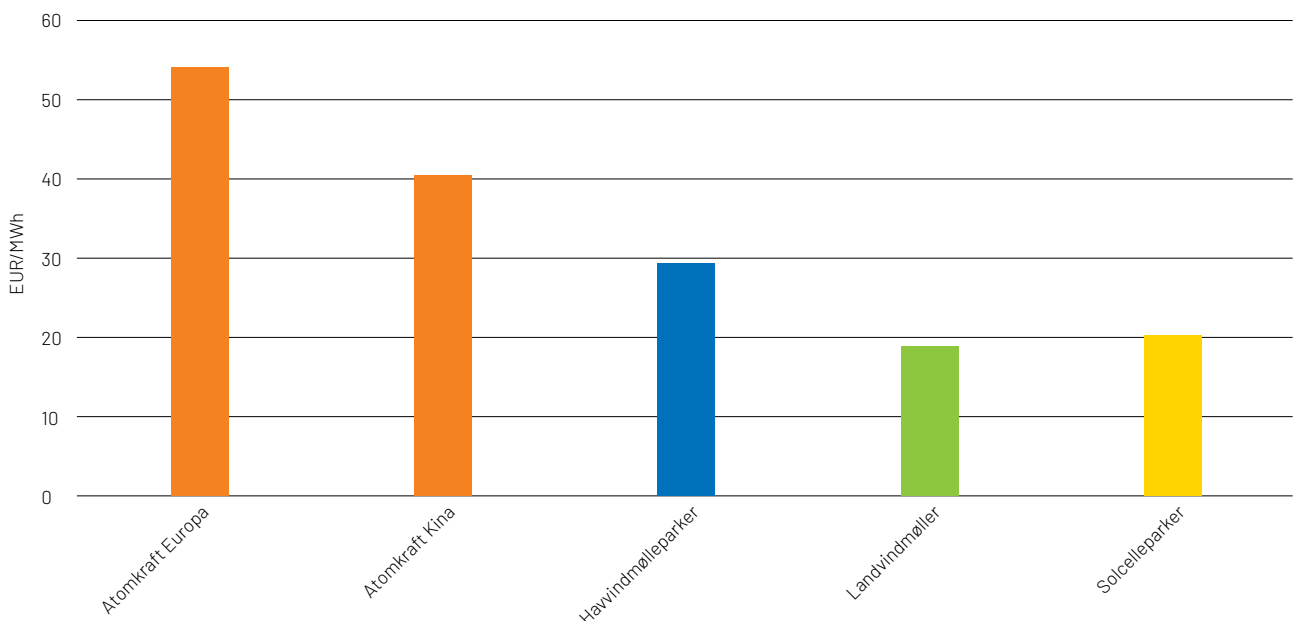


Figur 2 viser de samme omkostninger som Figur 1, men i stedet for at være baseret på økonomiske tal på værker der netop er færdiggjort eller er under konstruktion, ses der i stedet for på forventninger til fremtidige anlæg. Atomkraftfremskrivninger er baseret på IEA tal, hvor der både fremgår fremskrivning på omkostninger ved et Europæisk atomkraftværk og ved et Kinesisk atomkraftværk. De forskellige vedvarende energiteknologier er baseret på Energistyrelsens Teknologikatalog for at sikre, at vi tager udgangspunkt i en konkret dansk kontekst. Det sidste er vigtigt, når der er tale om vedvarende energi, der er afhængig af geografisk placering. Figur 2 viser, at generelt er der en forventning til at teknologierne bliver billigere. For atomkraft i Europa forventer IEA at omkostningen falder til ca. 55 EUR/MWh, og havvindmøller falder til ca. 30 EUR/MWh og landvindmøller og solceller til ca. 20 EUR/MWh. Sammenligningen viser, at havvindmølleparker forventes at koste ca. det halve af atomkraft, mens landvind og solceller forventes at have en omkostning på helt ned til 1/3 af atomkraft. Relativt forventes den nuværende store prisforskel således at blive endnu større i fremtiden.

FIGUR 2

Forventninger til fremtidige projekter. Forventede omkostninger ved at producere en MWh elektricitet for forskellige værker. **Orange** er atomkraftværker, **blå** er havvindmøller, **grøn** er landvindmøller og **gul** er solceller. Atomkraft er baseret på teknologiformation fra det Internationale Energi Agentur (IEA), vedvarende energi er baseret på Energistyrelsens Teknologikatalog.

2050 fremskrivninger



1.2 Byggetider

De danske klimamålsætninger er at reducere CO₂ emissionerne i Danmark med 70% i 2030 og at været helt klimaneutral i 2050. Det kræver, at konkrete projekter kan færdiggøres relativt hurtigt. Derfor betyder anlægstiderne meget.

Figur 3 viser byggetider på de forskellige konkrete projekter beskrevet tidligere. Hinkley Point C er ikke færdiggjort endnu, og i skrivende stund forventes det færdiggjort i 2028, men kan potentielt blive yderligere forsinket. For Olkiluoto 3 har det taget 17 år at færdiggøre, med start i 2005 og færdiggørelse i 2022. Flamanville 3 blev igangsat i 2007 og forventes klar i 2023 i modsætning til den oprindelige plan om 2013 [3,4]. I alle tilfælde er projekterne blevet forsinket. F.eks. var Olkiluoto 3 i Finland oprindeligt sat til at blive færdiggjort i 2009, og derfor totalt set blevet 13 år forsinket. [5] For vedvarende energiprojekterne ligger byggetiden i alle tilfælde omkring 2-3 år. Det er vigtigt at sige, at disse byggetider er uden planlægningsfaser.

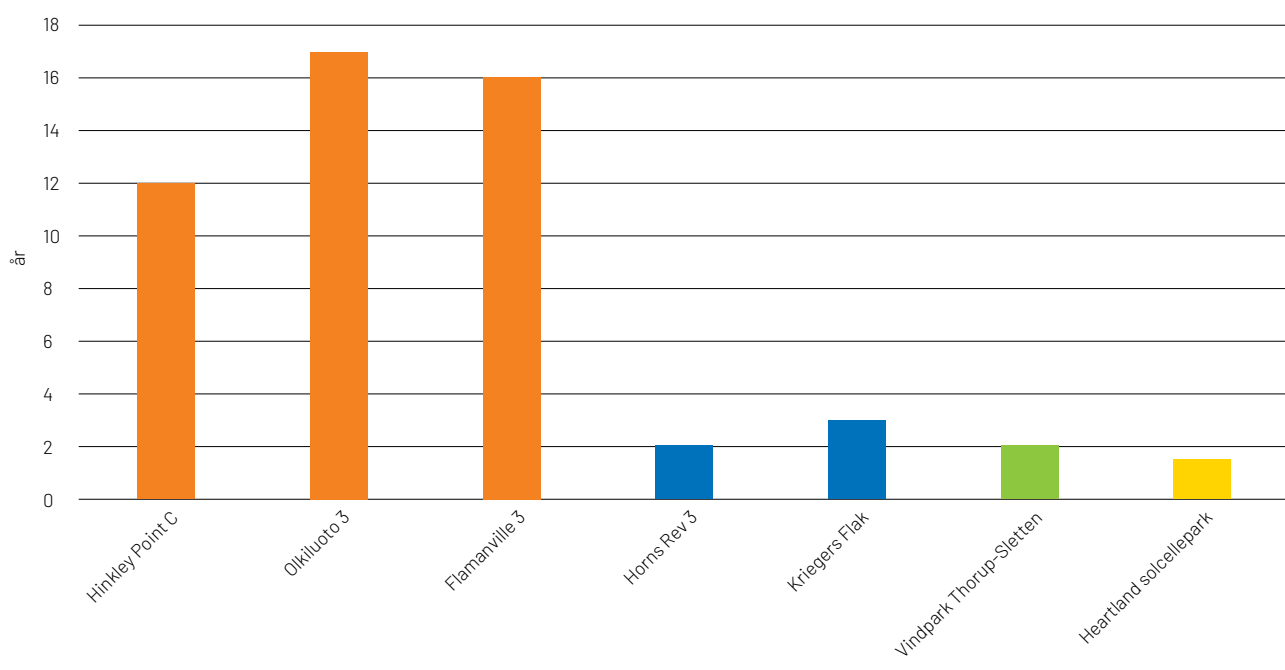
Planlægningstiden er af stor betydning, men den kan variere og være svær at opgøre eller forudsige. Konkret kan der siges følgende: Olkiluoto 3 blev der ansøgt om i 2000 [6], og regeringen godkendte at påbegynde byggeriet i 2005, altså en planlægningstid på 5 år. Hinkley Point C blev offentliggjort i 2010 af den britiske regering [7], og byggeriet startede i 2016 [8]. Herudover brugte den engelske regering også fra 2008 til 2010 på at identificere Hinkley Point C som en egnet lokation [9], altså en samlet planlægningstid på op til 8 år. For Horns Rev 3 vandt Vattenfall udbuddet i 2015 og påbegyndte anlægsfasen i 2017 og parken blev indviet i 2019 [10]. Kriegers Flak blev vundet i 2017, påbegyndt konstruktion i 2018 og færdiggjort i 2021 [11]. Både Kriegers Flak og Horns Rev 3 var en del af en politisk aftale i 2012. Her kan vi altså se planlægningsperioder fra 3-6 år. For landvindmølleparken blev projektet godkendt i 2018 og stod klar i 2021, inden dette har en planlægningsproces også pågået. Heartland solcelleparken ligner kun at have tage et år fra idé til konstruktionsfase.

Baseret på ovenstående kan planlægningstiderne sammenfattes til 5-8 år for atomkraft og 1-6 år for vind og sol. Som det fremgår, kan disse tider variere og muligvis også fremover nedsættes ved ændrede politiske rammevilkår.

FIGUR 3

Byggetider for forskellige teknologier. Tallene er uden planlægnings- og beslutningsfase. **Orange** er atomkraftværker, **blå** er havvindmølleparker, **grøn** er landvindmølleparker og **gul** er solcelleparker. Hinkley Point C forventes færdiggjort i 2028 på nuværende tidspunkt og Flamanville 3 forventes færdiggjort i 2023. Byggetider er beregnet baseret herpå.

Byggetid



1.3 Støttebehov til investeringer i atomkraft og vedvarende energi

I relation til gennemførelsen af den grønne omstilling er det også af betydning at se på i hvor stort omfang de enkelte teknologier kræver støtte og garantier fra staten.

For Hinkley Point C atomkraftværket og Horns Rev 3 og Kriegers Flak har man brugt CfD princippet (Contract for Differences). Det betyder, at værket er garanteret denne pris, skulle de ikke kunne opnå den på spotprismarkedet. Af **Figur 4** kan de tre projekters skæringspris ses, baseret på den specifikke CfD. Her er det vigtigt at sige, at Hinkley Point C har en garanteret mindstepris på elsalget på ca. 81 øre/kWh [12] i 35 år fra produktionsstart, hvor Horns Rev 3 har 77 øre/kWh og Kriegers Flak har 37,2 øre/kWh [13]. For begge havvindmølleparker er det desuden kun i ca. 12 år denne mindstepris er garanteret. Herefter bortfalder støtten. Der ydes derfor potentielt markant mere statsstøtte til Hinkley Point C, end til begge havvindmølleparkerne.

Efterfølgende er støttebehovet til vind fra staten helt bortfaldet. Det gælder den planlagte nye havvindmøllepark Thor, der skal ligge i Nordsøen ud for Nissum Fjord. Havmølleparken bliver på minimum 800 MW og maksimalt 1000 MW og skal sende strøm ud på nettet senest i 2027.

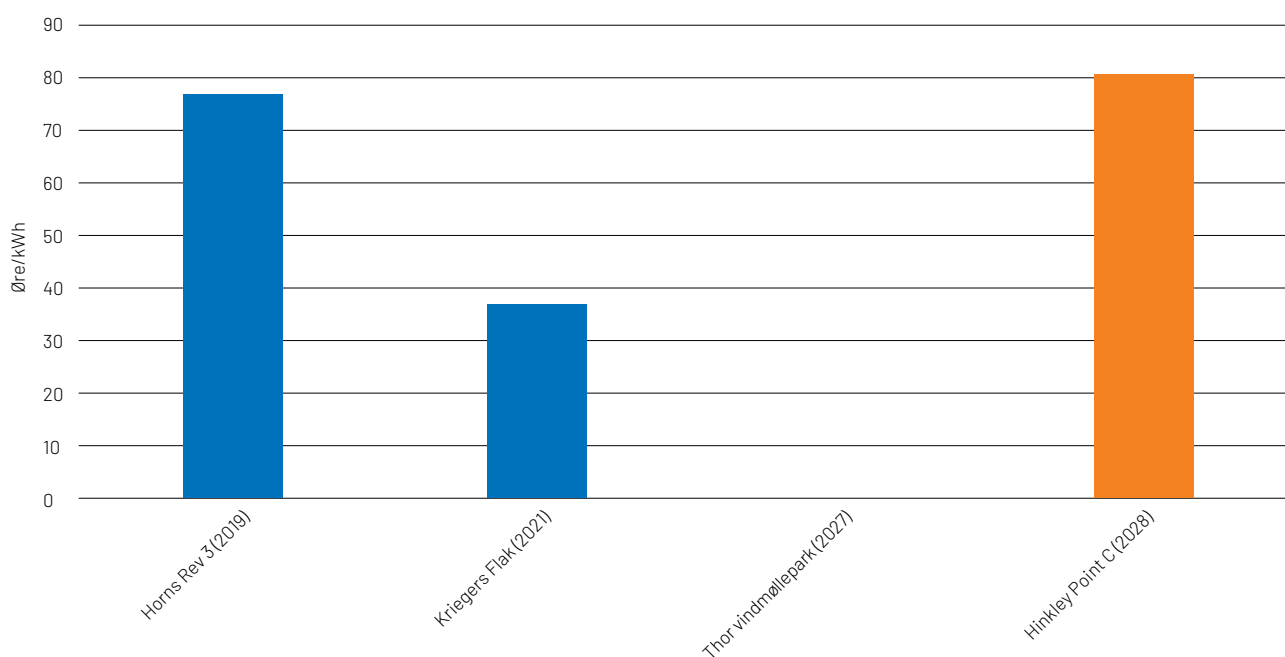
“Den danske støttemodel til statsligt udbudte havvindmølleparker går begge veje, hvor staten enten yder støtte til eller modtager betaling til statskassen alt afhængig af prisen på el. Med det aktuelle bud, står Thor Wind Farm I/S til at betale 2,8 mia. til staten og Thor bliver dermed den første havmøllepark i verden, som bliver opført med betaling til staten.” [14]

I **Figur 4** har vi forsøgt at lave en illustration af disse forhold. Figuren viser den nødvendige støtte målt i øre/kWh. Tallene kan ikke helt sammenlignes direkte fordi støtten til atomkraft gælder i mange flere år end støtten til vindkraft. Tilsvarende er levetiden på atomkraft også længere. Hertil kommer, at der kan være forskelle i finansieringen af nettilslutning mv. Figuren illustrerer dog meget godt, hvordan behovet for statsstøtte til vindkraft har været faldende og nu helt er bortfaldet, mens atomkraften forsat har et betydeligt støttebehov fra staten.

FIGUR 4

CfD pris for de fire projekter. For Hinkley Point C gælder prisen i 35 år, og er inflationssikret. For Horns Rev 3 og Kriegers flak gælder prisen i ca. 12 år, hvorefter der overgås til markedspriser. Thor havvindmøllepark har en CfD pris på 0,01 øre/kWh og giver et provenue for staten på 2,8 mia. kroner.

CfD



1.4 Atomkraft som spids- og reservelast

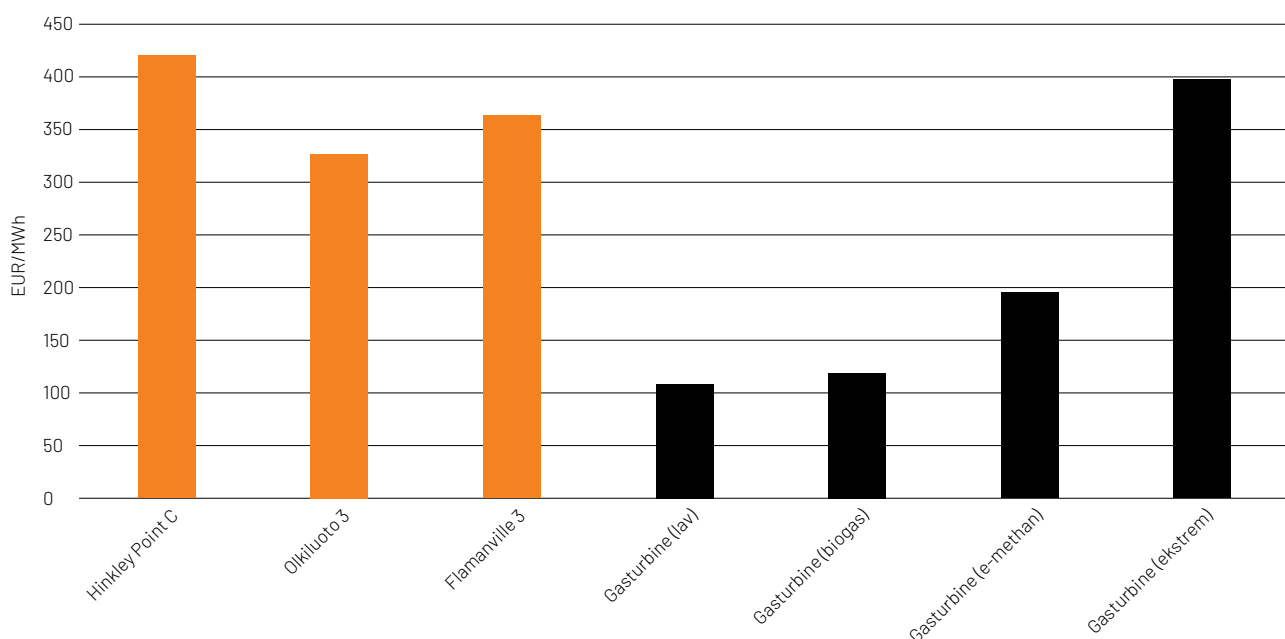
Uanset om en fremtidig elforsyning baseres på atomkraft eller vind og sol eller kombinationer heraf, vil der være et behov for spids- og reservelastværker. En af diskussionerne går på, om atomkraft kan drives som spids- og reservelast f.eks. i de timer hvor vind- og solenergi ikke producerer. Det er vurderet i det følgende.

Figur 5 illustrerer omkostningerne ved henholdsvis et atomkraftværk og en gasturbine under antagelsen at de kun har 1000 driftstimer på et år ved maks. kapacitet (fuldlasttimer). Dette svarer ca. til fuldlasttimerne på alle termiske værker i IDAs Klimasvar 2045, og er derfor repræsentative for sådanne værker i et fremtidigt CO₂-neutralt energisystem. Af Figur 5 kan det ses, at for alle tre atomkraftværker er prisen for kun at drive værket 1000 timer ca. 350-400 EUR/MWh, fordi investeringsomkostningerne skal tilbagebetales på forholdsvist få drifttimer. Dette svarer ca. til at drive en gasturbine, som har langt lavere investeringsomkostninger, til elproduktion hvor gassen indkøbes til 150 EUR/MWh, hvilket ca. svarer til de historisk høje gasprisen vi har på nuværende tidspunkt [15]. Atomkraft er pga. sine meget høje investeringsomkostninger dårligt egnet til denne opgave. Her er en gasturbine med biogas som brændsel en langt mere økonomisk effektiv løsning og ligeledes rent teknisk meget bedre, fordi en gasturbine er velegnet og hurtigt at 'rampe' op og ned i takt med at vindkraften stiger og falder. Et atomkraftværk er med sin damp turbine ikke velegnet til tilsvarende hurtig 'ramping'.

FIGUR 5

Den årlige omkostning for at producere en MWh elektricitet, hvis værket kun drives 1000 timer årligt. Figuren illustrerer omkostningerne ved at drive værkerne som reservelastværker i et system hvor de fungerer som supplement til f.eks. vind og sol. **Orange** er forskellige konkrete atomkraftprojekter i Vesteuropa, **sort** er energistyrelsens tal for investering i en naturgas-turbine kombineret med forskellige gaspriser. "Ekstrem"-prisen til højre repræsenterer de nuværende meget høje gaspriser.

Omkostninger ved 1.000 timers drift



1.5 Små modulære reaktorer

“Små modulære reaktorer” (SMR) defineres af det internationale atomenergiagentur som “en nyere generation af atomkraftværker, med kapaciteter op til 300 MW, hvis komponenter og systemer kan fabrikeres og dernæst transporteres som moduler til konstruktionsitet”.

Et nyligt paper [16] har gennemgået den videnskabelige litteratur for økonomien bag SMR og kommer frem til omkostninger til at producere energi (LCOE) på 50-110 €/MWh, altså på samme niveau som det præsenterede interval af LCOE'er for konventionel atomkraft i Europa i dag og frem mod 2050. Disse tal er dog meget usikre, da SMR stadig er en umoden teknologi. Artiklen konkluderer, at de primære forskningsgab ift. SMR-økonomien er usikkerhed om driftsomkostninger og dekommissionering.

De danske startup virksomheder, Seaborg technologies¹ og Copenhagen Atomics² håber på at de med deres version af et SMR kan mindske nogle af de udfordringer, som et konventionelt atomkraftværk har ift. nedsmeltningrisiko, affaldshåndtering, lange konstruktionstider og store investeringsomkostninger. Udviklingen af denne teknologi har som mål at lave serieproduktion, men først skal der laves et kommercielt prototypeanlæg. Oprindeligt var prototypeanlægget planlagt til 2024, men det er netop udsat til 2028 [17]. Seaborgs anlæg er således langt fra kommercielt tilgængeligt på det danske marked. Hertil kommer at Seaborg giver udtryk for at selv med deres teknologi giver det ikke mening at fokusere på Danmark, når vi har store mængder sol og vindenergi tilgængelige [18].

På den baggrund er der intet der tyder på, at SMR-værkerne vil kunne ændre noget særligt i det billede, vi har beskrevet ovenfor.

¹ <https://www.seaborg.com/the-reactor>

² <https://www.copenhagenatomics.com/>

2 ENERGISYSTEMANALYSER

Atomkraft og vedvarende energi har relativt forskellige produktionsprofiler. Vedvarende energi er afhængige af, hvornår vinden blæser og solen skinner, hvor atomkraft typisk af anlægsøkonomiske årsager vil producere mere eller mindre konstant (som beskrevet i Kapitel 1). Den varierende produktion fra vindmøller og solceller gør, at der er behov for fleksibilitet i form af lagring, udveksling af el og alternative produktionsmetoder for at balancere mellem timer med megen produktion og timer, hvor vind og sol stort set ikke producerer. I modsætning hertil kører atomkraft stort set konstant, hvilket gør, at der ikke er samme krav til reservelast som i et vedvarende energisystem. Udfordringen er dog, at det økonomisk ikke giver mening at kører spidslastdrift på atomkraftværker, så også her vil der være et krav om et energisystem, der kan støtte op i disse timer. Atomkraft og vindkraft har derfor det tilfældes, at de gerne skal køre som de først prioriterede enheder i vores elproduktion og derefter suppleres af mere fleksible enheder.

For at kunne vurdere forskellene mellem disse systemer, og give et samlet bud på de tekniske og økonomiske konsekvenser, er der her foretaget energisystemberegninger baseret på IDA's Klimasvar 2045. Yderligere information om beregningerne findes i Kapitel 4. I IDA's Klimasvar 2045 er der installeret 5 GW landvind, 14 GW havvind og 10 GW solceller.

Med udgangspunkt i et CO₂-neutralt Danmark i 2045, som beskrevet i IDA's Klimasvar 2045, sammenlignes et fremtidigt klimaneutralt energisystem hhv. med og uden atomkraft. Konkret er der regnet på et værk på 1.000 MW. I et system med et sådant atomkraftværk er der ikke behov for samme mængde vedvarende energi. Derfor præsenteres to scenarier: Et hvor der bygges færre havvindmøller og et, hvor der bygges færre landvindmøller. Det betyder henholdsvis 1.475 MW færre havvindmøller eller 2.043 MW færre landvindmøller. Produktionen af CO₂-neutral strøm er dermed ens på tværs af alle scenarier. Det er desuden stadig vedvarende energi, som leverer den største mængde energi i systemerne. Da atomkraftværket har et andet krav til fleksibilitet, medfører investeringen i atomkraftværket, at der kan spares i fleksibiliteten andre steder i systemet. I analyserne sker det konkret i elektrolysekapaciteten ifm. Power-to-X.

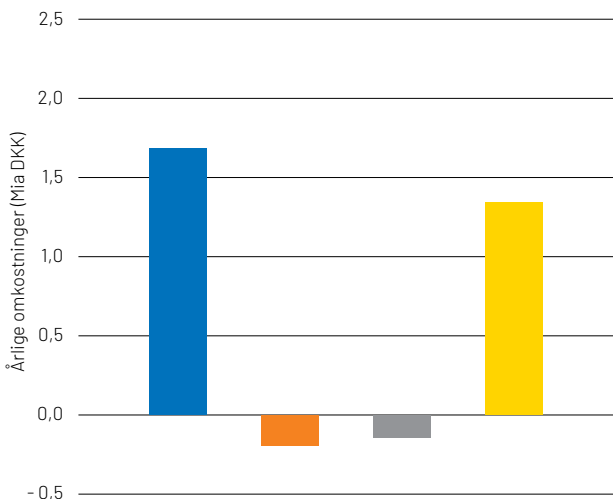
Af **Figur 6** kan det ses, at investeringen i atomkraft giver en samlet øget omkostning i energiforsyningen. Den blå søjle viser at selv med besparelser i investering i vindmøller er den samlede årlige omkostning i elforsyningen mellem 1,7 og 2,2 mia. DKK højere pga. den høje investeringsomkostning i atomkraftværket. Den øgede omkostning består primært af de øgede anlægsomkostninger til atomkraft sammenlignet med vind. Der er dog også tale om øgede driftsomkostninger til uran m.v.

I figuren har vi udskilt de besparelser i systemet, som følger af reducerede omkostninger til fleksibilitet. Disse består primært af sparet anlægsomkostninger på elektrolyseanlæg, og kan opgøres til omkring 0,15 til 0,20 mia. DKK årligt. Også besparelser i spids- og reservelasten er vist for sig med en omkostning tilsvarende en reduktion på 500 MW kapacitet, men ifølge vores analyser kan der reelt kun reduceres omkring 100 MW. Det skyldes at atomkraftværket stadig er afhængig af spidslastproduktion fra f.eks. gasturbiner. Atomkraftens systemmæssige fordele er således af langt mindre betydning end atomkraftens øgede anlægsomkostninger.

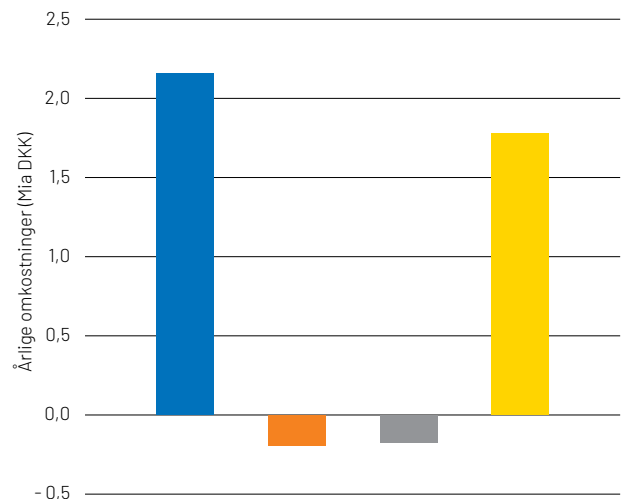
FIGUR 6

Resultater fra energisystemanalysen ved installering af 1000 MW atomkraft i Danmark udtrykt som ændringer og økonomiske gevinster. Blå søjle viser ændringen i energiforsyning inkluderet investering og drift af atomkraft samt besparelser på investeringer i vedvarende energi. Den orange søjle viser en potentiel besparelse på 500 MW spidslastværk (analysen viser at det tal måske er tættere på 100 MW). Den grå søjle viser besparelsen i fleksibilitet baseret på reduceret behov for elektrolyse. Den gule søjle viser summen af omkostninger og potentielle besparelser (den blå søjle fratrukket den grå og orange søjle).

Atomkraft erstatter havvindmøller



Atomkraft erstatter landvindmøller



■ Ændring i energiforsyning
 ■ Potentiel besparelse i spidslast
 ■ Besparelse i fleksibilitet
 ■ Sum

3 TILBAGEVÆRENDE SPØRGSMÅL

I dette notat har vi primært fokuseret på tekniskøkonomiske forhold ved at indpasse atomkraft i det Danske energisystem og på, hvad konsekvensen vil være ved dette sammenlignet med et fortsat fokus på vedvarende energi alene. Her kan vi primært se, at atomkraften har en højere produktionsomkostning af el sammenlignet med vedvarende energi, og de potentielle fordele i energisystemet ved atomkraft ikke er tilstrækkelige til at opveje de ekstra omkostninger ved atomkraften. Udover disse konklusioner er der dog også en række ubesvarede spørgsmål, som vi ikke forholder os til i dette notat, men som er essentielle at svare på, hvis atomkraft skal placeres i Danmark.

Det drejer sig om:

- 1 Hvor i Danmark bør sådanne atomkraftanlæg placeres? Dette kræver en større planlægningsfase, hvor det kan blive svært at identificere et konkret placeringsforslag.
- 2 Uanset hvor vi placerer et atomkraftværk i Danmark vil det indebære en sikkerhedsrisiko for hele landet. Risikoen for et stort uheld er lille, men konsekvenserne kan være enorme. Den japanske regering har tidligere estimeret, at den samlede pris for oprydningen efter uheldet på Fukushima Daiichi atomkraftværket i form af oprensning i regionen, deponering af affald og erstatning til berørte vil løbe op i 21,5 billioner yen, svarende til omkring 1.000 milliarder kroner. Den japanske tænketank Japan Center for Economic Research har leveret et skøn på helt op til 5.000 milliarder kroner. [19]
- 3 Hvordan håndteres radioaktivt affald, og hvor skal det deponeres? I og med der vil blive produceret radioaktivt affald fra reaktoren, skal der træffes beslutninger om, hvordan det skal håndteres, og hvor det skal deponeres.
- 4 Dekommissionering af værkerne efter endt levetid er en vigtig proces at tage hensyn til, og det kan blive en betydelig omkostning. Det er uklart om dette er inkluderet i tallene bag vores analyser, f.eks. IEA World Energy Model data, og vil derfor kræve en større analyse for at medregne korrekt.

Disse nøglespørgsmål er derfor også nødt til at blive diskuteret, for at kunne vurdere om atomkraft bør indgå i det danske energisystem.

4 METODE OG DATAGRUNDLAG

Analysen består af to primære tekniskøkonomiske beregninger. Den første sammenligner de enkelte anlæg ift. deres omkostning ved at producere 1 MWh el. Denne sammenligning viser dog ikke de systemmæssige konsekvenser af den enkelte teknologi. Derfor foretager vi i næste skridt beregninger på hele det danske energisystem. Disse energisystemberegninger, hvor atomkraft og vedvarende energi implementeres, laves med udgangspunkt i et fremtidigt, CO₂-neutralt dansk energisystem. Dermed er det muligt at beregne og vurdere, hvordan atomkrafts drift mønster som grundlast i den danske elforsyning påvirker energisystemet kontra havvindmølleparkers vejrafhængige produktion. Energisystemberegningerne tager derfor højde for behovet for fleksibilitet andre steder i systemet, som f.eks. lagring, kraftværkskapacitet, power-to-X, varmepumper og udlandsforbindelser. Derved kan vi fx tage højde for, hvad man kan gøre, når vindproduktionen overstiger det øjeblikkelige behov.

Metoden til udregning af den årlige omkostning til at producere en 1 MWh el (LCOE) beskrives i Afsnit 4.1, hvor energisystemberegningerne er beskrevet i Afsnit 4.2. Datagrundlag er dokumenteret i Kapitel 4.3

4.1 Beregning af årlig omkostning per energiproduktion

Den årlige omkostning for at producere en 1 MWh elektricitet er foretaget ved at identificere følgende tre omkostningsparametre:

- 1 Årlige brændselsomkostninger, hvis relevant. Disse afhænger af virkningsgraden på værket samt brændselsprisen.
- 2 Årlige drifts- og vedligeholdelsomkostninger, hvilket omfatter både faste og variable omkostninger.
- 3 Investeringsomkostninger, omregnet til årlige omkostninger baseret på en annuitetsydelse. Renten er sat til 4%, og løbetiden er lig med den tekniske levetid på anlægget.

Dermed udregnes omkostningen ved det givne anlæg. Den årlige produktion af el beregnes ud fra antallet af drifts-timer ved fuld kapacitetsudnyttelse (fuldlasttimer) og kapaciteten på anlægget. Den årlige omkostning divideres med den årlige produktion for at få omkostningen per produceret MWh el. Det gør det muligt at sammenligne de forskellige anlæg på tværs af type og størrelse. De tekniske forudsætninger, og hvor vi har data fra, fremgår af tabeller i Afsnit 4.3

4.2 Energisystemanalyser

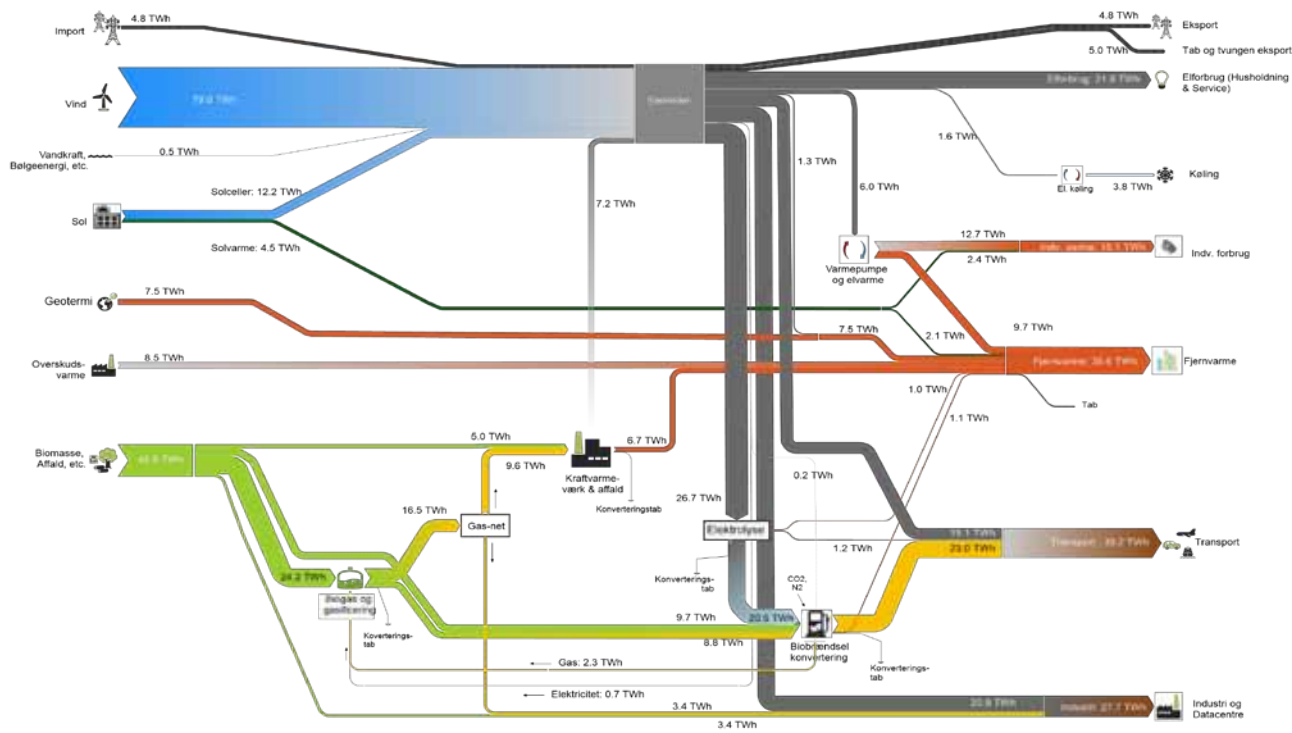
Energisystemanalyserne er blevet foretaget i værktøjet EnergyPLAN [20], som er et værktøj til at simulere og analysere energisystemer. EnergyPLAN foretager timesimulering af et helt år af hele energisystemet og inkluderer derfor elektricitet, opvarmning, transport og industri. Analyserne er i stand til at tage fjernvarme, power-to-X og andre vigtige fleksibilitetsmuligheder med. Sådanne analyser er nødvendige for at kunne kvantificere atomkraftens systemmæssige fordele.

For at analysere konsekvenserne ved atomkraft i det danske energisystem anvendes en model for et CO₂-neutralt Danmark udviklet i IDA's Klimasvar 2045 [21]. Denne model indeholder i dens oprindelige form ikke atomkraft, og er fuldt balanceret time for time for at vedvarende energi leverer energiforsyningen i Danmark. Figur 7 viser Sankey Diagram over energibalancerne i IDA's Klimasvar.

Som alternativ er der opstillet et tilsvarende system blot med atomkraft på følgende måde:

FIGUR 7

Sankey Diagram over IDA's klimasvar 2045 scenarieret.



- IDA's Klimasvar er udregnet med en rente på 3%. Denne fastholdes.
- IDA's Klimasvar tager højde for, at teknologi investeres løbende over tid. Der bruges derfor gennemsnits omkostninger fra 2020 til 2050 for de fleste teknologier. Dette princip overføres også til atomkraft. Der bruges derfor et gennemsnit mellem de tre eksisterende værker og IEA's prisdokumentation til 2050. Det giver en specifik kapacitetsinvestering på 6,18 MEUR/MW.
- Levetid på 60 år for atomkraft fastholdes, ligesom årlige driftstimer er 6570 timer, drift og vedligehold på 14,26 EUR/MWh el og brændsel til 9,33 EUR/MWh el. Dette er i overensstemmelse med det Internationale Energiagenturs forudsætninger for atomkraft i Europa. For at estimere brændselsforbruget anvendes en virkningsgrad på 33% men dette har ikke betydning for den økonomiske beregning.
- Et 1000 MW værk producerer årligt 6,57 TWh el. Der fjernes vindkraft, henholdsvis landvindmøller og havvindmøller tilsvarende samme produktion.
- Elektrolysekapacitet justeres indtil forbrug af biomasse og nedregulering af vindmøller er ens med det oprindelige IDA 2045 scenarieret.

Baseret på denne metode, er det muligt at udregne tre energisystemer med samme CO₂ balancer, samme biomasseforbrug, samme krav til nedregulering af vedvarende energi og med anvendelse af udveksling af el i samme grad. Appendiks A-C viser EnergyPLAN udskrifter for de tre scenarier. Økonomien for investeringen i atomkraft er regnet ved siden af, og lagt oven i de årlige omkostninger vist i scenarierne. Det er følgende omkostninger.

Årlige omkostninger til atomkraft

Investering	223 M EUR
Brændsel (Uran)	61 M EUR
Drift og vedligehold	94 M EUR

4.3 Datagrundlag

Datagrundlaget for analyserne er baseret på forudsætninger for Europæisk atomkraft og dansk vedvarende energi. For atomkraft, er der taget udgangspunkt i data fra det Internationale Energi Agentur (IEA), og speci- fikt deres forventninger og analyser til atomkraft i Europa. Heraf kommer både den forventede driftstid, samt brændsels- og vedligeholdspriser. Det er også herfra, at den forventede investeringspris til atomkraft i 2050 findes. For vedvarende energi anvendes Energistyrelsens teknologikatalog, for at give det bedste danske billede af situationen for vedvarende energiproduktion i Danmark.

4.3.1 Brændselspriser og driftstimer

Brændselspriser	EUR/MWh	Note	Kilde
Uran	9,33	For at producere en MWh el, kurs 1 på USD to EUR antaget	[22]
Naturgas (lav)	28,08	Anvendt i IDAs Klimasvar	[21]
Biogas	33,12		[23]
E-metan	65,16		[23]
Naturgas (høj)	150,00	Baseret på TTF prisen pr. 10 oktober 2022	[15]

Driftstimer	2020	2050	Kilde
Atomkraft	6.570	6.570	[24]
Landvindmøller	3.400	3.800	[25]
Havvindmøller	4.400	4.900	[25]
Solceller	1075	1212	[25]

4.3.2 Datablade på eksisterende projekter

Hinkley Point C		Enhed	Note	Kilde
Størrelse	3,2	GW		[26]
Investering	28,73	Mia. EUR	25,2 Mia. GBP, 1 GBP = 1,14 EUR	[27]
Drift og vedligehold	14,26	EUR/MWh	Antaget at 1 USD = 1 EUR	[22]
Teknisk levetid	60	år		[26]
Specifik kapacitetsomkostning	8,98	MEUR/MW		
Byggetid	12	år		[8]

Olkiluoto 3		Enhed	Note	Kilde
Størrelse	1,6	GW		[5]
Investering	11	Mia. EUR		[5]
Drift og vedligehold	14,26	EUR/MWh	Antaget at 1 USD = 1 EUR	[22]
Teknisk levetid	60	år		[28]
Specifik kapacitetsomkostning	6,88	MEUR/MW		
Byggetid	17	år		[3]

Flamanville 3		Enhed	Note	Kilde
Størrelse	1,6	GW		[3]
Investeringsomkostning	12,7	Mia. EUR		[4]
Drift og vedligehold	14,26	EUR/MWh	Antaget at 1 USD = 1 EUR	[22]
Teknisk levetid	60	år		[29]
Specifik kapacitetsomkostning	7,94	MEUR/MW		
Byggetid	16	år		[3]

Taishan 1, 2		Enhed	Note	Kilde
Størrelse	3,32	GW		[3]
Investeringsomkostning	10,70	Mia. EUR		
Drift og vedligehold	14,26	EUR/MWh	Antaget at 1 USD = 1 EUR	[22]
Teknisk levetid	60	år		[3]
Specifik kapacitetsomkostning	3,22	MEUR/MW	Antaget at 1 USD = 1 EUR	[3]
Byggetid	9	år		[3]

Kriegers Flak		Enhed	Note	Kilde
Størrelse	0,605	GW		[30]
Investeringsomkostning	1,30	Mia. EUR		[30]
Fast drift og vedligehold	50,00	kEUR/MW		[25]
Variabel drift og vedligehold	5	EUR/MWh		[25]
Teknisk levetid	27	år		[25]
Specifik kapacitetsomkostning	2,15	MEUR/MW		
Byggetid	3	år		[11]

Horns Rev 3		Enhed	Note	Kilde
Størrelse	0,407	GW		
Investeringsomkostning	1,00	Mia. EUR		[10]
Fast drift og vedligehold	50,00	kEUR/MW		[25]
Variabel drift og vedligehold	5	EUR/MWh		[25]
Teknisk levetid	27	år		[25]
Specifik kapacitetsomkostning	2,46	MEUR/MW		
Byggetid	3 år		[10]	

Vindpark Thorup-Sletten		Enhed	Note	Kilde
Størrelse	0,077	GW		[31]
Investeringsomkostning	0,13	Mia. EUR	1 mia. DKK	[32]
Fast drift og vedligehold	14,00	kEUR/MW		[25]
Variabel drift og vedligehold	1,5	EUR/MWh		[25]
Teknisk levetid	27	0		[25]
Specifik kapacitetsomkostning	1,72	MEUR/MW		
Byggetid	2	år	Ikke officielt igangsat pga. planjura	[31]

Heartland solcellepark		Enhed	Note	Kilde
Størrelse	0,207	GW		[33]
Investeringsomkostning	0,08	Mia. EUR	600 mio. DKK	[33]
Fast drift og vedligehold	15,70	kEUR/MW		[25]
Variabel drift og vedligehold	0	EUR/MWh		[25]
Teknisk levetid	35	0		[25]
Specifik investeringsomkostning	0,39	MEUR/MW		
Byggetid	1,5	år		[34]

4.3.3 Datablade baseret på teknologikataloger og databaser

Atomkraft 2050 Europe		Enhed	Note	Kilde
Specifik omkostning	4,50	MEUR/MW	Antaget at 1 USD = 1 EUR	[24]
Drift og vedligehold	14,26	EUR/MWh	Antaget at 1 USD = 1 EUR	[22]
Teknisk levetid	60	år		

Atomkraft 2050 China		Enhed	Note	Kilde
Specifik omkostning	2,50	MEUR/MW	Antaget at 1 USD = 1 EUR	[24]
Drift og vedligehold	14,26	EUR/MWh	Antaget at 1 USD = 1 EUR	[22]
Teknisk levetid	60	år		[22]

Levetidsforlængelse af atomkraft		Enhed	Note	Kilde
Specifik omkostning	0,70	MEUR/MW	Antaget at 1 USD = 1 EUR	[22]
Drift og vedligehold	14,26	EUR/MWh	Antaget at 1 USD = 1 EUR	[22]
Teknisk levetid	10	år		[22]

Havvindmøller 2050		Enhed	Note	Kilde
Specifik omkostning	1,64	MEUR/MW		[25]
Fast drift og vedligehold	33,00	kEUR/MW		[25]
Variabel drift og vedligehold	3,25	EUR/MWh		[25]
Teknisk levetid	30	år		[25]

Landvindmøller 2050		Enhed	Note	Kilde
Specifik omkostning	0,96	MEUR/MW		[25]
Fast drift og vedligehold	11,34	kEUR/MW		[25]
Variabel drift og vedligehold	1,22	EUR/MWh		[25]
Teknisk levetid	30	år		[25]

Solceller 2050		Enhed	Note	Kilde
Specifik omkostning	0,29	MEUR/MW		[25]
Fast drift og vedligehold	9,90	kEUR/MW		[25]
Variabel drift og vedligehold	0	EUR/MWh		[25]
Teknisk levetid	40	år		[25]

Gasturbine 2020		Enhed	Note	Kilde
Specifik omkostning	0,45	MEUR/MW		[25]
Fast drift og vedligehold	8,07	kEUR/MW		[25]
Variabel drift og vedligehold	4,50	EUR/MWh		[25]
Virkningsgrad	0,42			[25]
Teknisk levetid	25	år		[25]

Gasturbine 2050		Enhed	Note	Kilde
Specifik omkostning	0,41	MEUR/MW		[25]
Fast drift og vedligehold	7,42	kEUR/MW		[25]
Variabel drift og vedligehold	4,50	EUR/MWh		[25]
Virkningsgrad	0,45			[25]
Teknisk levetid	25	år		[25]

5 KILDER

- [1] Lang PA. Nuclear Power Learning and Deployment Rates; Disruption and Global Benefits Forgone. *Energies* 2017, Vol 10, Page 2169 2017;10:2169. <https://doi.org/10.3390/EN10122169>.
- [2] MIT Energy Initiative. *The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World*. 2018.
- [3] International Energy Agency. *Projected Costs of Generating Electricity*. Paris: 2020.
- [4] World Nuclear News. Fresh delay to Flamanville 3 blamed on pandemic . World Nuclear News 2022. <https://world-nuclear-news.org/Articles/Fresh-delay-to-Flamanville-blamed-on-impact-of-pandemic> (accessed October 17, 2022).
- [5] YLE News. Olkiluoto 3 reactor plugged into national grid, 13 years behind schedule. Yle 2022. <https://yle.fi/news/3-12356596> (accessed October 17, 2022).
- [6] STUK. Licensing of Olkiluoto 3 2009. https://web.archive.org/web/20120226180828/http://www.stuk.fi/ydinturvallisuus/ydinvoimalaitokset/ydinvoimalaitosluvat/viides/en_GB/viides_voimala/ (accessed October 17, 2022).
- [7] BBC News. Nuclear power: Eight sites identified for future plants. BBC News 2010. <https://www.bbc.com/news/uk-politics-11564152> (accessed October 17, 2022).
- [8] Thomas N. EDF pushes UK government to alter Hinkley Point C penalty clauses. *Financial Times* 2022. <https://www.ft.com/content/cb715de2-1c95-4a13-8b48-33717b1dcc44> (accessed October 17, 2022).
- [9] BBC News. New nuclear plants get go-ahead. BBC News 2008. http://news.bbc.co.uk/2/hi/uk_news/politics/7179579.stm (accessed October 17, 2022).
- [10] Mathiesen K. Hvide Sande snupper Horns Rev 3-service fra Esbjerg: Havnedirektør er stadig fortrøstningsfuld. *Jydske Vestkysten* 2019. <https://jv.dk/artikel/hvide-sande-snupper-horns-rev-3-service-fra-esbjerg-havnedirekt%C3%B8r-er-stadig-fortr%C3%B8stningsfuld> (accessed October 17, 2022).
- [11] Nielsen EB. Byggeri af Kriegers Flak havmøllepark er begyndt. *Vattenfall* 2019. <https://group.vattenfall.com/dk/nyheder-og-presse/nyheder/2019/byggeri-af-kriegers-flak-havmøllepark-er-begyndt> (accessed October 17, 2022).
- [12] Department for Business Energy & Industrial Strategy. Hinkley Point C . GovUk 2018. <https://www.gov.uk/government/collections/hinkley-point-c> (accessed October 17, 2022).
- [13] Energikommissionen. *Baggrundsnotat om udbud af havvindmøller på Kriegers Flak* 2016.
- [14] Klima- Energi og Forsyningsministeriet. Thor Wind Farm I/S skal bygge Danmarks største havvindmøllepark til rekord god pris. *Klima-, Energi- Og Forsyningsministeriet* 2021. <https://kefm.dk/aktuelt/nyheder/2021/dec/thor-wind-farm-is-skal-bygge-danmarks-stoerste-havvindmoellepark-til-rekord-god-pris> (accessed October 17, 2022).
- [15] Trading Economics. EU Natural Gas - 2022 Data - 2010-2021 Historical - 2023 Forecast - Price - Quote 2022. <https://tradingeconomics.com/commodity/eu-natural-gas> (accessed October 17, 2022).
- [16] Mignacca B, Locatelli G. Economics and finance of Small Modular Reactors: A systematic review and research agenda. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2020;118:109519. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2019.109519>.
- [17] Mortensen CA. Danske Seaborg jagter trecifret millionbeløb til udvikling af fremtidens atomkraft. *Finans* 2022. <https://finans.dk/erhverv/ECE14355016/danske-seaborg-jagter-trecifret-millionbeloeb-til-udvikling-af-fremtidens-atomkraft/> (accessed October 17, 2022).
- [18] Schönfeldt T. Seaborg: Dan Jørgensen har ret - det giver ingen mening at diskutere A-kraft i Danmark. *Altinget* 2022. <https://www.alinget.dk/energi/artikel/seaborg-dan-joergensen-har-ret-det-giver-ingen-mening-at-diskutere-a-kraft-i-danmark> (accessed October 17, 2022).
- [19] Japan Center for Economic Research. Accident Cleanup Costs Rising to 35-80 Trillion Yen in 40 Years 2019. <https://www.jcer.or.jp/english/accident-cleanup-costs-rising-to-35-80-trillion-yen-in-40-years> (accessed October 17, 2022).

- [20] Lund H, Thellufsen JZ, Østergaard PA, Sorknæs P, Skov IR, Mathiesen BV. EnergyPLAN – Advanced analysis of smart energy systems. Smart Energy 2021;1:100007. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2021.100007>.
- [21] Lund H, Mathiesen BV, Thellufsen JZ, Sorknæs P, Chang M, Kany MS, et al. IDAs Klimasvar 2045 – Sådan bliver vi klimaneutrale. 2021.
- [22] International Energy Agency. Levelised cost of electricity calculator 2020. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/levelised-cost-of-electricity-calculator> (accessed October 17, 2022).
- [23] Korberg AD, Skov IR, Mathiesen BV. The role of biogas and biogas-derived fuels in a 100% renewable energy system in Denmark. Energy 2020;199:117426. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2020.117426>.
- [24] International Energy Agency. World Energy Model: Techno-economic inputs. Report 2021. <https://www.iea.org/reports/world-energy-model/techno-economic-inputs> (accessed October 17, 2022).
- [25] Danish Energy Agency. Technology Data-Energy Plants for Electricity and District heating generation. 2022.
- [26] EDF. About | Hinkley Point C. EDF 2022. <https://www.edfenergy.com/energy/nuclear-new-build-projects/hinkley-point-c/about> (accessed October 17, 2022).
- [27] BBC News. Hinkley Point C delayed by a year as cost goes up by £3bn. BBC News 2022. <https://www.bbc.com/news/uk-england-somerset-61519609> (accessed October 17, 2022).
- [28] TVØ. Nuclear Power Plant Unit Olkiluoto 3. 2010.
- [29] Power Technology. Flamanville 3 Nuclear Power Plant, Normandy, France 2017. <https://www.power-technology.com/projects/flamanville-3-nuclear-power-plant-normandy/> (accessed October 17, 2022).
- [30] NS Energy. Kriegers Flak Offshore Wind Farm - Denmark's biggest wind project. NS Energy 2021. <https://www.nsenergybusiness.com/projects/kriegers-flak-offshore-wind-farm/> (accessed October 17, 2022).
- [31] EuroWind. NYHEDER - vindparkthorup-sletten.dk. EuroWind 2022. <http://vindparkthorup-sletten.dk/DK/NYHEDER.aspx> (accessed October 17, 2022).
- [32] Jungersen R, Røjle H. Engang var støj problemet: Nu tvinger gæs, flagermus og rovfugle også vind-møller i knæ. WwwDrDk 2021. <https://www.dr.dk/nyheder/regionale/nordjylland/engang-var-stoej-problemet-nu-tvinger-gaes-flagermus-og-rovfugle-ogsaa> (accessed October 17, 2022).
- [33] Bertelsen J. Bestseller-ejer åbner rekordstort solcelleanlæg i Vestjylland | avisendanmark.dk. Avisen Danmark 2021. <https://avisendanmark.dk/artikel/bestseller-ejer-%C3%A5bner-rekordstort-solcelleanla%C3%A6g-i-vestjylland> (accessed October 17, 2022).
- [34] Pedersen MBB. Nordeuropas største solcellepark opføres uden statsstøtte - Energy Supply DK. En-ergy Supply 2020. https://www.energy-supply.dk/article/view/735527/nordeuropas_storste_solcellepark_opfores_uden_statsstotte (accessed October 17, 2022).

APPENDIKS A: IDA'S KLIMASVAR

Input IDA2045_Final.txt										The EnergyPLAN model 16.22											
Electricity demand (TWh/year):		Flexible demand		2,72		Capacities		Efficiencies		Regulation Strategy:		Technical regulation no. 2		Fuel Price level:		Capacities		Storage		Efficiencies	
Fixed demand		Fixed imp/exp.		0,00		MW-e		elec.		CEEP regulation		234500000		Elec. Storage		MW-e		GWh		Elec. Ther.	
Electric heating + HP		Transportation		15,09		1461		0,50		Minimum Stabilisation share		0,00		Charge 1:		6000		820		1,00	
Electric cooling		Total		64,12		700		2730		Stabilisation share of CHP		0,00		Charge 2:		0		0		0,80	
District heating (TWh/year)		Gr.1		Gr.2		Gr.3		Sum		Minimum CHP gr 3 load		0 MW		Discharge 1:		6000		1,00		1,00	
District heating demand		0,00		11,88		23,75		35,63		Minimum PP		0 MW		Charge 2:		0		0		0,90	
Solar Thermal		0,00		1,62		0,45		2,07		Heat Pump maximum share		1,00		Discharge 2:		0		0		0,77	
Industrial CHP (CSHP)		0,00		0,00		0,00		0,00		Maximum import/export		0 MW		Electrolysers:		4800		320		0,77	
Demand after solar and CSHP		0,00		10,26		23,30		33,56		DisNord_pool_system_2013_EUR_TXT		1,00		Rockbed Storage:		0		0		1,00	
Wind		5000 MW		16,13 TWh/year		0,00 Grid		0,00		Addition factor		1,30		CAES fuel ratio:		0		0,000		0,000	
Offshore Wind		14075 MW		62,87 TWh/year		0,00 stabili-		0,00		Multiplication factor		0,00		(TWh/year)		Coal		Oil		Ngas	
Photo Voltaic		10000 MW		12,16 TWh/year		0,00 sation		0,00		Dependency factor		0,00		Transport		0,00		0,00		0,00	
River Hydro		0 MW		0,46 TWh/year		0,00 share		0,00		Average Market Price		51		Household		0,00		0,00		0,00	
Hydro Power		0 MW		0 TWh/year		0,00		0,00		Gas Storage		4500		Industry		0,00		0,00		3,40	
Geothermal/Nuclear		0 MW		0 TWh/year		0,00		0,18		Syngas capacity		633		Various		0,00		0,00		3,40	
										Biogas max to grid		1875									

APPENDIKS B: ATOMKRAFT ERSTATTER 1.475 MW HAVVINDMØLLER

Input										The EnergyPLAN model 16.22																									
Electricity demand (TWh/year): Fixed demand 41,43 Electric heating + HP 3,25 Electric cooling 1,63					Flexible demand 2,72 Fixed imp/exp. 0,00 Transportation 15,09 Total 64,12					Capacities Group 2: MW-e MJ/s elec. Ther COP CHP 1461 1403 0,50 0,48 Heat Pump 700 2730 Boiler 4644 Group 3: CHP 2650 1700 0,53 0,34 Heat Pump 1600 6240 Boiler 7631 Condensing 3100 0,56					Efficiencies Group 2: 0,50 0,48 Group 3: 0,53 0,34 Heat Pump 1,00 3,90 Boiler 1,00 3,90 Condensing 0,56					Regulation Strategy: Technical regulation no. 2 CEEP regulation 234500000 Minimum Stabilisation share 0,00 Stabilisation share of CHP 0,00 Minimum CHP gr 3 load 0 MW Minimum PP 0 MW Heat Pump maximum share 1,00 Maximum import/export 0 MW					Fuel Price level: Capacities Storage Efficiencies Elec. Storage MW-e GWh Elec. Ther. Charge 1: 6000 820 1,00 Discharge 1: 6000 1,00 Charge 2: 0 0 0,80 Discharge 2: 0 0 0,90 Electrolysers: 4470 320 0,77 0,05 Rockbed Storage: 0 0 1,00 CAES fuel ratio: 0,000										
District heating (TWh/year) District heating demand 0,00 11,88 23,75 35,63 Solar Thermal 0,00 1,62 0,45 2,07 Industrial CHP (CSHP) 0,00 0,00 0,00 0,00 Demand after solar and CSHP 0,00 10,26 23,30 33,56					Wind Offshore Wind 5000 MW 16,13 TWh/year 0,00 Grid Photo Voltaic 10000 MW 12,16 TWh/year 0,00 sation River Hydro 0 MW 0,46 TWh/year 0,00 share Hydro Power 0 MW 0 TWh/year Geothermal/Nuclear 1000 MW 6,59 TWh/year					Heatstorage: gr.2: 56 GWh gr.3: 100 GWh Fixed Boiler: gr.2: 0,5 Per cent gr.3: 0,5 Per cent					DiNord_pool_system_2013_EUR.TXT Addition factor 1,00 EUR/MWh Multiplication factor 1,30 Dependency factor 0,00 EUR/MWh pr. MW Average Market Price 51 EUR/MWh Gas Storage 4500 GWh Syngas capacity 633 MW Biogas max to grid 1875 MW					Rockbed Storage: 0 0 0,77 0,05 CAES fuel ratio: 0,000 (TWh/year) Coal Oil Ngas Biomass Transport 0,00 0,00 0,00 0,00 Household 0,00 0,00 0,00 0,00 Industry 0,00 0,00 3,40 3,40 Various 0,00 0,00 0,00 0,00															
Output																																			
WARNING!!: (1) Critical Excess;																																			
District Heating										Electricity																									
Demand					Production					Consumption					Production					Balance					Exchange										
Distr. heating	Solar	Waste+	CSHP	DHP	CHP	HP	ELT	Boiler	EH	Ba-	Elec.	Flex.&	Transp.	HP	Elec.	trolyser	EH	Hydro	Tur-	RES	Hy-	Geo-	Waste+	CHP	PP	Stab-	Imp	Exp	CEEP	EPP	Payment	Exp			
January	6071	92	2832	0	861	2084	139	28	22	13	5482	2021	1232	2944	22	459	580	9504	0	750	262	1103	251	100	0	291	291	0	0	0	0	0	5		
February	6194	195	2847	0	929	1969	138	42	36	37	5370	1969	1198	2770	36	131	810	8078	0	750	262	1210	365	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
March	5387	221	2699	0	466	1802	156	18	15	11	5202	2041	1031	3139	15	898	223	11386	0	750	262	591	73	100	0	959	959	0	0	0	0	0	13		
April	4466	343	2456	0	446	1047	150	56	7	-39	4833	2053	651	3020	7	401	316	9914	0	750	262	586	94	100	0	956	956	0	0	0	0	0	9		
May	3666	365	2150	0	172	766	151	66	2	-6	4570	2061	460	3033	2	367	387	9034	0	750	262	225	98	100	0	262	262	0	0	0	0	0	5		
June	2070	330	1957	0	23	33	163	16	6	-456	4562	2066	80	3264	6	551	552	9971	0	750	262	24	71	100	0	1160	1160	0	0	0	0	0	8		
July	2070	353	1887	0	21	30	139	21	2	-382	4414	2041	75	2765	2	376	1170	7484	0	750	262	22	215	100	0	230	230	0	0	0	0	0	3		
August	2070	337	1918	0	16	40	156	19	1	-417	4564	2106	94	3120	1	144	696	9243	0	750	262	173	125	100	0	68	68	0	0	0	0	0	2		
September	2778	259	2090	0	149	233	150	25	1	-130	4698	1988	255	2999	1	880	1153	8245	0	750	262	173	288	100	0	50	50	0	0	0	0	0	1		
October	3771	168	2292	0	146	932	171	98	5	-40	4883	2058	611	3447	5	922	288	11261	0	750	262	191	37	100	0	863	863	0	0	0	0	0	0	11	
November	4715	105	2539	0	281	1545	137	90	4	15	5108	2058	910	2746	4	297	297	9899	0	750	262	360	95	100	0	540	540	0	0	0	0	0	0	8	
December	5483	62	2730	0	243	2243	171	30	22	-19	5151	2043	1199	3440	22	93	93	12017	0	750	262	307	5	100	0	1494	1494	0	0	0	0	0	0	20	
Average	4056	236	2365	0	310	1059	152	42	10	-118	4902	2037	649	3059	10	545	545	9880	0	750	262	398	142	100	0	575	575	0	0	0	0	0	0	Average price	
Maximum	10059	1984	3798	0	3103	8970	224	2534	1500	5439	6950	6518	3413	4514	1500	6000	6000	24020	0	750	262	4111	2450	100	0	10528	10528	0	0	0	0	0	0	(EUR/MWh)	
Minimum	1906	0	1583	0	0	0	0	0	0	-7490	3490	-3378	0	22	0	0	0	2	0	750	262	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	56	17
TWh/year	35,63	2,07	20,77	0,00	2,72	9,30	1,33	0,37	0,09	-1,04	43,06	17,89	5,70	26,87	0,09	4,79	4,79	85,03	0,00	6,59	2,30	3,49	1,25	100	0,00	5,05	5,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	86		
FUEL BALANCE (TWh/year):										CO2 emission (Mt):																									
DHP	CHP2	CHP3	Boiler2	Boiler3	PP	Geo/Nu.	Hydro	HTL	CAES	BioCon	Electro-	Wind	PV and CSP	Wind off Wave	Hydro	Solar.Th	Transp.	househ.	Industry	Various	Total	Imp/Exp	Corrected	Net	Total	Net									
Coal	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00									
Oil	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00									
N.Gas	-	3,04	3,72	0,19	0,18	2,38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00								
Biomass	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00								
Renewable	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00								
H2 etc.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00								
Biofuel	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00								
Nuclear/CCS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00								
Total	-	3,04	3,72	0,19	0,18	2,38	27,50	-	14,77	-20,49	0,49	9,75	16,13	12,16	56,74	-	4,47	18,11	-	6,80	155,95	-9,01	146,93	-	-0,73	-2,57									

18-oktober-2022 [14:14]

Output specifications										The EnergyPLAN model 16.22																		
District Heating Production										RES specification																		
Gr.1					Gr.2					Gr.3					RES specification													
District heating	Solar	CSHP	DHP	District heating	Solar	CSHP	CHP	HP	ELT	Boiler	EH	Stor-	Ba-	District heating	Solar	CSHP	CHP	HP	ELT	Boiler	EH	Stor-	Ba-	RES1	RES2	RES3	RES	Total
January	0	0	0	2024	73	647	461	830	0	14	1	53047	0	4047	20	2185	399	1254	139	15	22	73	13	1950	7224	279	52	9504
February	0	0	0	2065	153	650	460	769	0	21	6	54674	5	4129	42	2197	469	1200	138	22	30	87	31	1427	5965	599	87	8078
March	0	0	0	1796	174	613	260	745	0	8	2	55888	-5	3591	47	2086	206	1056	156	10	13	94	16	2295	7404	1621	65	11386
April	0	0	0	1489	269	551	212	420	0	36	1	55980	0	2977	74	1904	234	627	150	20	6	98	-38	1976	5759	2142	37	9914
May	0	0	0	1222	287	474	83	341	0	37	1	55967	-1	2444	78	1676	89	426	151	30	1	100	-6	1518	5205	2276	35	9304
June	0	0	0	690	259	425	23	33	0	6	2	55999	-57	1380	71	1531	0	0	163	10	4	100	-399	1746	5933	2260	32	9971
July	0	0	0	690	270	408	21	30	0	9	1	55999	-48	1380	83	1479	0	0	139	12	1	100	-334	1153	3866	2437	29	7484
August	0	0	0	690	264	415	16	40	0	7	0	55999	-52	1380	73	1502	0	0	156	13	1	100	-365	1578	5551	2073	40	9243
September	0	0	0	926	203	459	114	153	0	12	0	55993	-14	1852	56	1631	35	81	150	13	1	100	-116	1367	5280	1546	52	8245
October	0	0	0	1257	133	510	70	495	0	48	2	55986	-1	2514	35	1782	75	437	171	49	3	100	-39	2184	8236	770	71	11261
November	0	0	0	1572	82	573	150	712	0	54	1	55746	0	3143	22	1967	131	833	137	36	2	98	15	1947	7479	402	72	9899
December	0	0	0	1828	49	621	139	1002	0	14	3	55709	0	3655	13	2109	104	1241	171	16	19	97	-19	2853	8921	186	57	12017
Average	0	0	0	1352	185	528	166	464	0	22	2	55558	-15	2704	51	1836	144	595	152	20	8	96	-104	1836	6407	1385	52	9680
Maximum	0	0	0	3354	1491	892	1403</																					

FAKTA OM ATOMKRAFT I DANMARK

VERSION 1