



Ea Energianalyse



Veje til 50% VE i Danmark i 2030

**VINDENS ROLLE OG DET LANGSIGTEDE PERSPEKTIV
MOD 100% VE I 2050**

09.05.2017

Udarbejdet af Ea Energianalyse for Vindmølleindustrien:

Ea Energianalyse
Frederiksholms Kanal 4, 3. th.
1220 København K
Danmark
T: +45 88 70 70 83
E-mail: info@eaea.dk
Web: www.eaea.dk

Indhold

1	Baggrund og hovedresultater	4
1.1	Hovedresultater og konklusioner	5
1.2	Baggrund.....	11
1.3	Muligheder og udfordringer	12
2	Forudsætninger og analysesetup.....	16
2.1	Sektorernes bidrag	19
2.2	Elektrificering.....	21
2.3	Forudsætninger for el- og fjernvarmesektoren.....	23
3	Resultater	27
3.1	Det europæiske elsystem	27
3.2	Vedvarende energi i Danmark.....	29
3.3	Samfundsøkonomiske konsekvenser	34

1 Baggrund og hovedresultater

Den danske regering har besluttet at mindst 50% af det danske energiforbrug skal være dækket af vedvarende energi i 2030. I denne rapport optegnes og analyseres fire forskellige veje til at nå denne målsætning. I analysen er der dels set på et såkaldt 'hængekøje-scenarie', hvor de nødvendige tiltag til opfyldelse af mindst 50% målsætningen udsættes længst muligt. Overfor dette står tre scenarier med forskellige variationer af stabil udbygning med vedvarende energi (VE).

De fire scenarier er:

1. **Hængekøje VE 2030:** Nødvendige tiltag til opfyldelse af 50% målsætningen udsættes længst muligt.
2. **Stabil VE 2030:** Der sigtes mod en stabil (lineær) VE-udbygning mod 50% i 2030
3. **Stabil vind 2030:** Svarer til Stabil VE 2030, men i dette scenarie er kravet udover en som minimum stabil total VE-udbygning mod 50 %, en stabil (lineær) vindudbygning mod stort set samme installerede landvindskapacitet i 2030 som i stabil VE 2030-scenariet
4. **Stabil VE 2050:** I dette scenarie forudsættes en stabil VE-udbygning hele vejen mod 2050. Det betyder bl.a., at VE-procenten vil overstige 50% i 2030, hvor den vil ligge på 60%.

Formålet er en analyse af hvordan VE-målsætningen opfyldes mest omkostningseffektivt, og hvilke fordele og ulemper forskellige veje kan have. Her spiller el- og fjernvarmesektoren en central rolle, og endvidere har udviklingen af teknologiomkostninger til el- og fjernvarmeproduktion afgørende indflydelse. En anden vigtig parameter er udviklingen af elsystemet i Europa, herunder elprisernes afhængighed af prisen på CO₂-kvoter. Analysen inddrager den nyeste udvikling indenfor omkostninger for især vindkraft og solceller og fokuserer på udviklingen i el- og fjernvarmesektoren. Hastigheden for omstillingen til VE, og herunder hastigheden for udbygning med vindkraft er centrale elementer i sammensætning af scenarier.

I el- og fjernvarmesektoren optimeres VE-udbygningen ved anvendelse af Balmorel-modellen. Udenfor el- og fjernvarmesektoren, tager den forudsatte VE-udbygning udgangspunkt i navngivne referencer som præsenteret i afsnit 2.1. Forudsætningerne herfor er ens i de tre 2030-scenarier, mens 2050-

scenariet adskiller sig, idet omstillingen i individuel opvarmning, transport og industri går hurtigere end i 2030 scenarierne.

En udfordring ved forståelsen af "optimal VE-udbygning" er tilskud og afgifter, der forvrider incitamentsstrukturene og dermed projektøkonomien på tværs af teknologier. I et langsigtet perspektiv, bør en optimeringsanalyse være samfundsøkonomisk, dvs. uden forvridende tilskud og afgifter og med et afkastkrav svarende til den samfundsøkonomiske rente. Men ønsket om at analysen afspejler de reelle økonomiske vilkår for aktørerne betyder, at det er valgt at optimere 2030-scenarierne med gældende afgifter og tilskud. Der er endvidere anvendt en "frozen-policy" tilgang, hvor eksisterende VE-tilskud ophører i takt med at ordningernes EU-godkendelser udløber.

I det omfang elmarkedsprisen ikke er tilstrækkelig høj til at trække nye VE-investeringer, f.eks. på grund af lave CO₂-priser, optimerer modellen den nødvendige VE-udbygning for at nå minimums-målet i 2030.

2050-scenariet for el- og fjernvarmesektoren er optimeret helt uden forvridende tilskud og afgifter, og afspejler derfor en samfundsøkonomisk optimal udbygningssti, såfremt jævn udbygning ønskes. Der er i alle scenarier¹ valgt at tage udgangspunkt i en relativ lav kvotepris der langsomt stiger mod ca. 115 kr/ton i 2030, da der endnu ikke er sikre tegn på at det vil lykkes EU at få nedbragt det betydelige kvoteoverskud. Analyserne viser dog den resulterende CO₂-fortrængningsomkostning i de forskellige scenarier.

1.1 Hovedresultater og konklusioner

Analyserne i denne rapport viser, at målsætningen om at minimum 50% af Danmarks energiforbrug i 2030 bliver dækket af VE kan opnås ved at øge VE-andelen i el- og fjernvarmesektoren fra 52% i 2015 til 87% i 2030 og en forholdsvis moderat udvikling af VE i de øvrige sektorer. Under en fortsættelse af det eksisterende tilskuds- og afgiftssystem, herunder bortfald af tilskud til biomasse, vind og sol, samt fastholdelse af afgiftsstrukturen til varmeproduktion, vil vind og sol bidrage mindre til opfyldelsen af målsætningen, end det ville være samfundsøkonomisk fornuftigt. De gennemførte scenarieberegninger viser også, at en stabil udbygning af VE-andelen frem mod 2030 frem for en udsættelse af VE-indsatsen til sidst i perioden kun har meget begrænsede samfundsøkonomiske meromkostninger. Dette er bl.a. begrundet i reduktionen i omkostningerne til

¹ I 2050-scenariet forudsættes dog en højere kvotepris, stigende til ca. 300 kr/ton i 2030 og ca. 750 kr/ton i 2050.

vind og sol, der er observeret i 2016. Højere CO₂- og/eller elpriser end antaget i analysen kan helt fjerne meromkostningen ved en tidligere indsats.

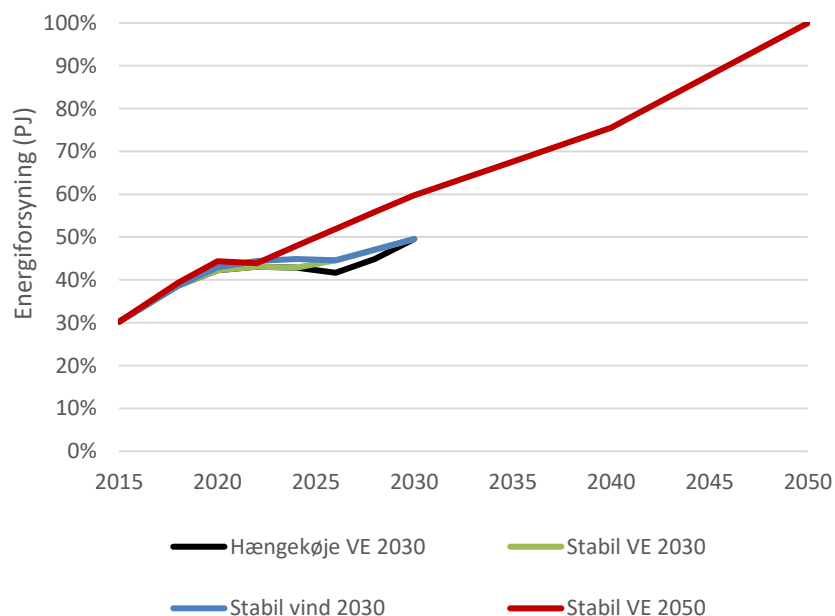
Det langsigtede perspektiv

Sammensætning af energisystemet

Sammensætningen af energiforbruget i 2050 peger på, at vindkraft ud fra et samfundsøkonomisk perspektiv vil spille en markant rolle på lang sigt. Vindkraft står i Stabil VE 2050 scenariet for 35% af energiforbruget i 2050 (**Figur 2**). Det er bl.a. antaget at biomasse bliver en knap ressource, afspejlet ved høje biomassepriser (ca. 90 kr./GJ). Fast og flydende biomasse spiller fortsat en vigtig rolle, men andelen svarer nogenlunde til andelen i 2015, og biomasse anvendes primært i industrien og til transport, som står for hhv. 42% og 49% af biomasseanvendelsen i 2050. I el- og fjernvarmesektoren reduceres biomasseandelen fra 25% af forsyningen i 2015 til 2% i 2050. Samtidig kan VE-gas dog have betydning i el- og fjernvarmesektoren, hvis det bliver konkurrencedygtig med naturgas inkl. CO₂-omkostningen. Dette er forudsat i 2050-scenariet, og VE-gas forsyner ca. 7% af forbruget i el- og fjernvarmesektoren.

Energisystemet mod 2030

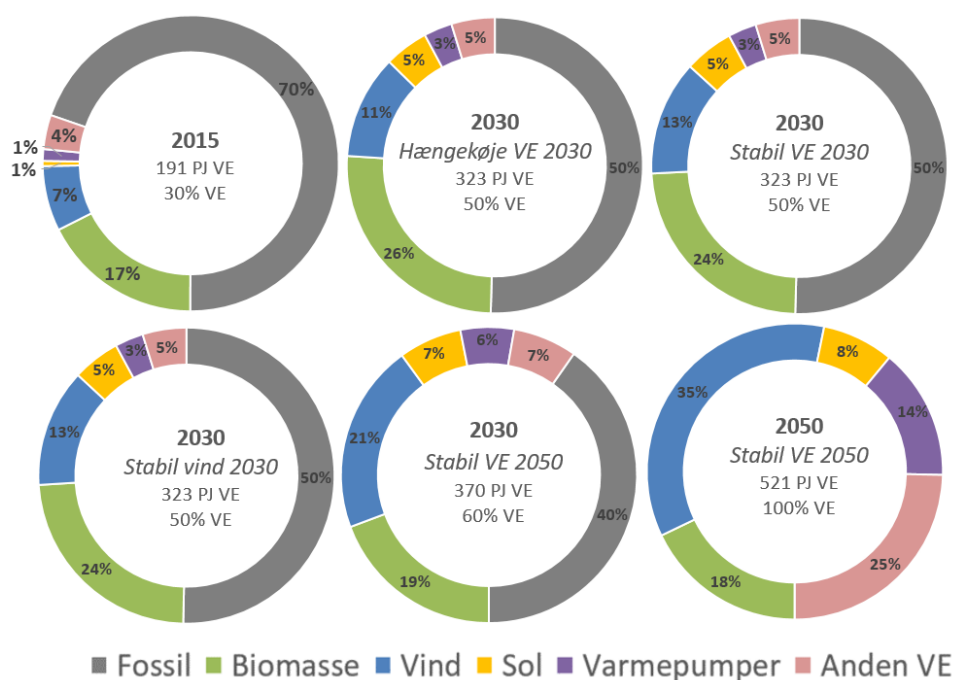
På kort sigt (inden 2024) bringer eksisterende og besluttede tiltag for biomasseudbygningen og havvindudbygning VE-andelen over en lineær sti for den totale VE andel fra ca. 30% i 2015 til 50% i 2030 (**Figur 1**).



Figur 1: Udvikling af VE-andel i scenarierne.. Den her viste andel er resultatet af beregningerne, og kan derfor ligge over de forudsatte minimumsniveauer. At VE-andelen for Stabil VE 2050 ikke er fuldt lineær mellem 2030 og 2040, skyldes at der her er valgt en lineær udvikling i el- og fjernvarmesektoren. Sammen med de valgte forudsætninger i de øvrige

sektorer resulterer dette i en overordnet VE-andel, der ligger lidt under en lineær sti mellem 2030 og 2050.

Efter 2024 må der ud fra en frozen policy tilgang forventes en opbremsning af udbygningen med VE. Det nuværende tilskuds- og afgiftssystem vil føre til, at målsætningen om 50% VE i det samlede energisystem i høj grad opfyldes af biomasse, der står for mellem 24-26%-point af målsætningen i 2030. Det sker især ved øget anvendelse af biomasse til fjernvarme og kraftvarme. Vind, sol og varmepumper tilsammen leverer mindre end dette. Vind og sol bidrager altså i dette scenarie i mindre grad end det ville være samfundsøkonomisk fornuftigt, eftersom bl.a. elafgifterne forvrider økonomien. Observationen understøttes af resultaterne i 2050-scenariet, hvor vind, sol og varmepumper spiller en større rolle.



Figur 2: Resulterende sammensætning af energiforsyningen i 2015, de forskellige scenarier for 2030 og 2050. Anden VE dækker over VE-andelen i affald, VE-gasser og overskudsvarme.

Omkostninger ved forskellige veje mod 2030-målet

Samfundsøkonomiske konsekvenser

De samfundsøkonomiske konsekvenser for Danmark er alene vurderet for el- og fjernvarmesektoren for perioden fra 2018 til 2030. I 2050-scenariet foretages også ændringer i andre sektorer, hvis effekt der ikke er taget hensyn til her (se også uddybende forklaring i afsnit 3.3). **Tablet 1** viser omkostninger for *Stabil*-scenarierne sammenlignet med Hængekøje VE 2030. *Stabil VE 2050*-scenariet viser en samfundsøkonomisk besparelse på ca. 1,75 mia. kr. for Danmark. Dette skyldes, at VE-andelen øges uden indflydelse fra

forvridende afgifter og tilskud, og vind og sol er samfundsøkonomisk billigere for at opfylde en VE-målsætning i forhold til biomasse. På trods af den samfundsøkonomiske besparelse i Stabil VE 2050 for Danmark, kan det ikke konkluderes, at en højere VE-målsætning i 2030 eller en hurtigere indfasning af VE generelt, medfører en samfundsøkonomisk besparelse.

Modelberegningerne viser derimod, at der i alle scenarier er et tilskudsbehov for VE i 2030, og dermed en (begrænset) meromkostning forbundet ved at nå op på 50% VE. Dermed er der ud fra de valgte forudsætninger om bl.a. CO₂-prisen stadig en samfundsøkonomisk meromkostning ved at indføre VE-krav. I 2050 er dette tilskudsbehov meget tæt på nul.²

Stabil VE 2030 og Stabil Vind 2030 har en meromkostning på under 1 mia. kr. i forhold til Hængekøje VE 2030, svarende til under 6 øre/kWh. Stabil vind 2030 viser, at en stabil udbygning med landvind reducerer omkostningen regnet pr. kWh VE fra 6 øre/kWh til 3,5 øre/kWh.

Det skal noteres, at såfremt der foretages afgiftsændringer efter investeringer i biomasseanlæg er foretaget, kan disse investeringer få lavere benyttelsestid end modellen viser. Dette indgår ikke i analysen, men vil potentielt kunne påvirke økonomien negativt især i Hængekøje VE 2030 scenariet.

Udbygningen med vindkraft i scenarierne Stabil VE 2030 og Stabil Vind 2030 er større end i Hængekøje 2030 både hvad angår niveau i 2030 og hvad angår udbygningshastigheden. Dette kunne være med til at reducere omkostningen ved VE-udbygningen sammenlignet med Hængekøje 2030. At der alligevel er en meromkostning ved disse scenarier skyldes, at biomasseproduktion ikke samtidig reduceres. En stor del af den øgede andel biomasse skyldes dog omstilling af kraftværker på baggrund af allerede tagne eller nært forestående beslutninger. Det er derfor usikkert, hvor stor en andel af den potentielle gevinst ved et ikke forvridende afgifts- og tilskudssystem, der reelt kan høstes frem til 2030.

² Modelberegningerne viser indikative omkostninger for VE-kravene i 2030 på omkring 65-90 DKK/MWh for den sidste enhed vedvarende energi. I 2050 falder disse til næsten 0 DKK/MWh.

	Danmark		
	Stabil VE 2030	Stabil vind 2030	Stabil VE 2050 ³
Ekstra VE (PJ) akkumuleret frem mod 2030	66	119	230
Nutidsværdi ekstraomkostninger (mia. DKK)	0,75	0,86	-1,74
Tilbagediskonterede ekstraomkostninger (DKK/MWh)	60	35	-41

Tabel 1: Ekstraomkostninger ved yderligere VE-produktion sammenlignet med hængekøje-scenariet. Den tilbagediskonterede ekstraomkostning er beregnet som (Nutidsværdi ekstraomkostninger)/(Tilbagediskonteret ekstra VE)

CO₂-fortrængningsomkostningerne på mellem 76 og 274 kr./ton set ud fra et internationalt perspektiv viser, at VE-udbygningen kan være samfundsøkonomisk rentabel ved forholdsvis moderate CO₂-priser (**Tabel 2**). Sagt på en anden måde – CO₂-priser på 274 kr./ton i stabil VE 2030 og 76 kr./ton i stabil vind 2030 (tilbagediskonteret til 2018), vil medføre, at scenarierne er samfundsøkonomisk tæt på ligeværdige med Hængekøje VE 2030.⁴

	Stabil VE 2030	Stabil vind 2030	Stabil VE 2050 ⁵
Reduceret CO ₂ over perioden (Mton)	4,68	17,84	1.019
Tilbagediskonterede fortrængningsomkostninger (DKK/ton)	274	76	120

Tabel 2: CO₂-fortrængningsomkostninger. Fortrængningsomkostninger er vist som sum af den forudsatte CO₂-pris og ekstraomkostningerne pr fortrængt CO₂. Den tilbagediskonterede fortrængningsomkostning er beregnet som (Nutidsværdi ekstraomkostninger)/(Tilbagediskonteret CO₂-besparelse). Den tilbagediskonterede CO₂-pris forudsat i beregningerne er 71 kr./ton i 2030-scenarierne og 132 kr./ton i 2050-scenariet.

Stabil udbygning af VE, herunder vind, kan have andre planlægningsmæssige og industripolitiske fordele der ikke er selvstændigt værdisat i analysen. Det må dog antages, at en fortsat og stabil vindudbygning vil have en gunstig indflydelse på Danmarks placering som international rollemodel og eksportnation af VE teknologier. Endvidere må det antages, at jævn VE-udbygning medvirker til at fastholde viden og kompetencer i VE-branchen, hvilket alt andet lige vil billiggøre planlægnings- og udbygningsopgaven.

³ I Stabil VE 2050 er der indregnet ændringer i andre sektorer og et højere elforbrug som følge af elektrificering. Omkostningsberegningen tager ikke højde for de besparelser eller meromkostninger dette medfører i andre sektorer. Se i øvrigt afsnit 3.3.

⁴ Hvis modeloptimeringen var foretaget ud fra en europæisk CO₂-pris som driver (frem for VE-målsætning i Danmark), er det sandsynligt, at investeringerne i VE var anderledes fordelt mht. både teknologier og geografi. Derfor kan et 50% VE scenarie i Danmark også have en samfundsøkonomisk meromkostning Danmark ved højere CO₂-priser.

⁵ I Stabil VE 2050 er der indregnet et højere elforbrug som følge af elektrificering. Omkostningsberegningen tager ikke højde for de besparelser eller meromkostninger, elektrificeringen medfører i andre sektorer.

Udbygning med
vindkraft

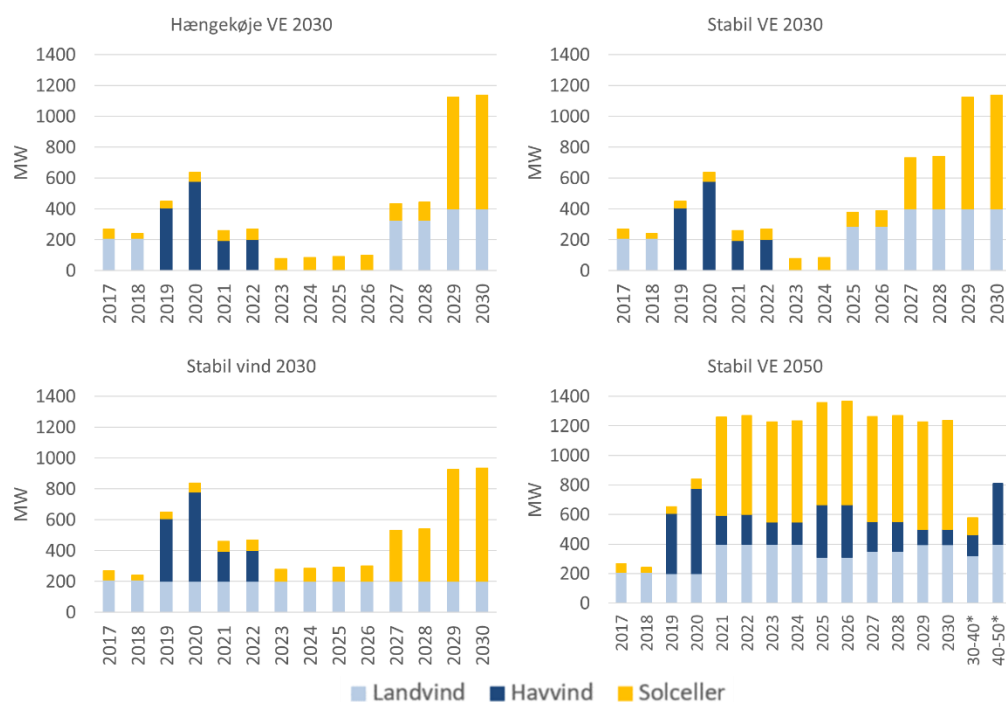
Bidrag fra vind og sol til opfyldelsen af 50% VE

Med de i energiaftalen af 2012 besluttede havvindmølleparker øges vindenergiens andel af det samlede energiforbrug fra ca. 7% i 2016 til ca. 11% i 2022. Herefter stagnerer vindens bidrag i Hængekøje VE 2030 scenariet, mens den øges til ca. 13% i 2030 i Stabil VE 2030 og Stabil vind 2030 og ca. 21% i Stabil VE 2050. Det lavere bidrag fra vind i Hængekøje VE 2030 i 2030 hænger især sammen med en antaget maksimal årlig bruttoudbygning på 400 MW landvind og 600 MW storskala solceller, som sætter en grænse for bidrag fra disse teknologier, hvis VE-indsatsen først øges sent i perioden, selvom de rent økonomisk ville være fordelagtige. Den sene indsats i Hængekøje VE 2030 betyder også, at der ikke sker nogen forøgelse af vindkapaciteten fra 2020 til 2030 (se **Tabel 5** side 33).

I alle scenarier udbygges dog betydeligt med vind og sol i perioden 2018-2030 (**Figur 3**). Der etableres således i gennemsnit ca. 230 - 300 MW/år vindkraft i Danmark i 2030-scenarierne. Heraf udgøres de ca. 100 MW af den i 2012-energiaftalen besluttede havvindudbygning fra 2018 til 2021, mens ca. 180 MW/år er erstatning af eksisterende hav- og landvindskapacitet, der forventes nedtaget frem mod 2030. Hængekøje VE 2030 og Stabil VE 2030 viser et stop for udbygning med landvind i en periode på henholdsvis 8 og 6 år og samlet set en nogenlunde fastholdt landvindkapacitet fra 2018 til 2030. I Stabil vind 2030 er jævn vindudbygning en forudsætning. Stabil VE 2050 udnytter det fulde landvindspotentiale og anvender i tillæg havvind udover de aftalte havmølleparker fra energiaftalen 2012. Den gennemsnitlige årlige vindudbygning i Stabil VE 2050 kommer dermed op på 540 MW/år i perioden frem til 2030 og 640 MW/år herefter.

Udbygning med solceller

Storskala solceller bidrager især sidst i perioden i 2030-scenarierne. Herudover er der antaget en vis udbygning med solceller i mindre skala, der er drevet af incitamenter i form besparelser af elafgifter og tariffer. Denne udbygning svarer til en nettoudbygning på ca. 80 MW pr. år. I stabil VE 2050 udnyttes den maksimal antagne årlige udbygning med 600 MW pr. år. Samfundsøkonomien i udbygningen af solceller afhænger (ligesom for vindkraft) også af samtidigheden med produktion fra solceller i udlandet. Dertil kommer, at der for solceller er en højere udnyttelse i Central- og Sydeuropa, hvilket medvirker til at udbygningen stagnerer i Danmark på længere sigt.



Figur 3: Vind- og soludbygning (brutto) pr. år i Danmark i de forskellige scenarier. Nye kapacitet er vist i det første fulde driftsår. Den viste offshore-kapacitetsudbygning til og med 2022 er en følge af energiaftalen fra 2012. Udbygning på under 400 MW landvind i 2025-2028 i Stabil VE 2050 skyldes antagne begrænsninger om maksimalt 6,5 GW landvind i 2030 (lineær indfasning) og 8,5 GW i 2050.

1.2 Baggrund

Siden oliekriserne tilbage i 1970'erne har den danske energisektor undergået meget betydelige forandringer. En el- og fjernvarmesektor der i 1960erne var næsten 100% olieforsynet blev især af økonomiske hensyn omlagt til primært kul. Fra midten af 1980'erne tog det danske naturgasprojekt fart. Den decentrale kraftvarme blev voldsomt udbygget, og en stor del af de danske husstande skiftede oliefyret ud med naturgas. I 1990'erne accelererede udbygningen med landvindmøller, og efter årtusindskiftet fik også vindmøller på havet for alvor betydning.

I 2008 nedsatte den danske regering en klimakommision der skulle udrede hvordan Danmark kan blive uafhængig af fossile brændstoffer.

Klimakommisionens rapport fra 2010 konkluderede at det er teknisk og økonomisk muligt at blive uafhængig af fossile brændsler omkring 2050.

Rapporten pegede på at vindkraft vil spille en helt afgørende rolle, samt at det er nødvendigt med en stigende elektrificering af samfundet, herunder transportsektoren, såfremt forbruget af biomasse skal holdes på et

bæredygtigt niveau. Scenarieanalyser udarbejdet af bl.a. Energistyrelsen, Energinet.dk, Dansk Energi m.v. har underbygget disse budskaber.⁶

Målsætningen om uafhængighed af fossile brændsler i 2050 har bred opbakning i det danske folketing og i befolkningen. Skiftende regeringer har efterfølgende bekræftet det langsigtede mål og opsat delmål på vej derhen. Virkemidlerne er primært økonomiske incitamenter i form af tilskud og afgifter i kombination med rammer og retningslinjer for den fysiske planlægning.

Danmark indgår i et forpligtende samarbejde i EU, og en stor del af de danske virksomheder indgår i EU's CO₂-kvotesystem, ETS. EU-kommissionen fremlagde i sommeren 2016 et udspil for EU's klimapolitik mod 2030. Ud fra dette forventes Danmark at få en målsætning om 39% reduktion i ikke-kvote sektoren i 2030 i forhold til 2005.

I 2015 udgjorde vedvarende energi 30% af Danmarks energiforbrug, målt efter EU's metode. Den nuværende VLAK-regering har fremlagt et mål om at mindst 50 pct. af Danmarks energibehov skal være dækket af vedvarende energi i 2030⁷ som et skridt på vejen mod 2050 målet om Danmark som lavemissions samfund, der er uafhængig af fossile brændsler. I denne rapport optegnes og analyseres fire forskellige veje til at nå målet. I analysen er der dels set på et såkaldt 'hængekøje-scenarie', hvor de nødvendige tiltag til opfyldelse af mindst 50% målsætningen udsættes længst muligt. Overfor dette står tre scenarier med forskellige variationer af stabil udbygning med VE.

1.3 Muligheder og udfordringer

Den danske elsektor har næsten siden sin barndom været tæt forbundet med elsystemerne i vores nabolande og har især nydt godt af samarbejdet med de vandkraftdominerede systemer i Sverige og Norge. Efter liberaliseringen af elmarkedet ved årtusindskiftet, er handel med elektricitet og samarbejde omkring forsyningssikkerhed mellem landene voldsomt accelereret. Det har givet vindkraftejere store fordele, idet værdien af vindkraft dermed kan øges i perioder hvor det blæser meget. De fleste analyser af den grønne omstilling

⁶ Se bl.a. *Energiscenarier frem mod 2020, 2035 og 2050*, Energistyrelsen 2014; *Elektrificeringspotentialer og bidrag til klimamål*, Dansk Energi 2017; *Energikoncept 2030*, Energinet.dk 2015

⁷ Regeringen har ikke beskrevet, hvordan 50% VE skal måles. Der er i dette projekt taget udgangspunkt i EU-metoden til at definere andelen af vedvarende energi. Dvs. den producerende mængde vedvarende energi ses i forhold til det udvidede endelige slutforbrug, og der korrigeres ikke for eksport/import af strøm. Valg af metode har betydning for VE-andel og forskelle er beskrevet i kapitel 2 og i baggrundsrapporten til denne analyse.

peger på, at et effektivt internationalt elmarked er en afgørende forudsætning for at opfylde 2050 målet omkostningseffektivt.

Efter prisstigninger i elmarkedet op igennem 00erne, skete der et skift efter finanskrisen i 2008-2009. Nu (forår 2017) ligger de danske elspotpriser i niveauet 20-25 øre/kWh, hvilket er væsentligt lavere end forventet før finanskrisen. Strøm fra vindmøller sælges i gennemsnit til endnu lavere priser, da vindkraft efterhånden udgør en betydelig del af elmarkedet både i Danmark og i nabolandene.

De lave elpriser skyldes en kombination af flere forhold. Det vigtigste element er, at prisen på el fra de kulfyrede kraftværker i Europa er lav. Det skyldes lave priser på kul i kombination med at CO₂-kvotemarkedet slet ikke sender det prissignal, som var tiltænkt. Hertil kommer, at der i dag er en betydelig overkapacitet⁸ af især kulfyrede kraftværker. Overkapaciteten skyldes dels at elforbruget er faldet gennem nogle år, og dels at der er kommet ny VE kapacitet på markedet uden at udfasningen af den kulfyrede kapacitet er sket i samme tempo.

Lave CO₂- og elpriser er en udfordring for den grønne omstilling, idet det fortsat i en årrække vil være nødvendigt at give tilskud til vind, sol og andre VE teknologier. Fortsat lave elpriser betyder dog også, at der ikke kan etableres kraftværker på fossile brændsler på kommercielle vilkår, samt at der er et økonomisk incitament til at udfasningen af eksisterende fossile kraftværker fortsætter.

Det fortsatte prisfald på en række vedvarende energiteknologier har taget voldsom fart efter finanskrisen. Dette er mest dramatisk for solceller, men også havvind og landvind har vist betydelige prisfald. På trods af forventningerne om fortsatte prisfald tyder meget på, at der fortsat skal gives tilskud til VE, hvis den grønne omstilling skal fortsætte. Imens CO₂-prisen er et fælles prissignal i hele EU, er beslutninger om tilskud til VE fortsat nationale anliggender. Efter færdiggørelsen af analyserne til denne rapport er resultatet af tyske udbud for havvind med opførelse i 2024 offentliggjort. Både DONG og EnBW sikrede sig ret til opførelsen af havmølleparker ved at tilbyde opførelsen uden tilskud. Dette omfatter dog ikke omkostninger til etablering af ilandføringskabler. Derudover vurderes det, at der sandsynligvis er behov for yderligere forbedringer i økonomien for havvind i forhold til de her valgte

⁸ Med overkapacitet menes kraftværkskapacitet som burde lukkes ud fra kommercielle kriterier på basis af de nuværende elspotpriser.

antagelser for at havvind er rentabel uden tilskud. Dette gælder f.eks. reduktion af teknologiomkostninger eller stigende engrospriser på el.

I en række lande baseres en væsentlig del af den grønne omstilling på omlægning af eksisterende kulfyrede kraftværker til biomasse. I et internationalt perspektiv er det ikke ressourcemæssigt muligt at biomassebaseret elproduktion i betydeligt omfang kan afløse kul- og gasfyret elproduktion samtidig med at biomasse også skal spille en rolle i transportsektoren og i industrien. Det er derfor afgørende, at brændselsbaseret elproduktion over en årrække afløses af fx vind og sol.

Analyserne i bl.a. denne rapport peger på, at forbruget af biomasse vil stige i de kommende år. Det skyldes dels manglende erfaringer med varmepumper og geotermianlæg, men udviklingen er også i høj grad styret af den gældende afgiftsstruktur. Analyserne peger også på, at denne udvikling ikke er den billigste vej til at nå VE-målene, når der sammenlignes med en kombination af vind, sol og varmepumper.

Analyserne i denne rapport peger altså på, at der er muligheder for at forbedre energisystemets økonomi og samtidig på længere sigt at reducere afhængigheden af biomasse. Hertil indgår tre afgørende elementer: 1) Udbygning med vind og sol i elproduktionen, 2) Elektrificering af varmesektoren vha. eldrevne varmepumper, og 3) Elektrificering af transportsektoren vha. eldrevne køretøjer.⁹

Der er dog også betydelige udfordringer for en sådan udvikling. Disse udfordringer knytter sig både til elektrificeringen af varme- og transportsektoren og til udbygning med vind og sol.

For vindudbygningen, gælder det spørgsmålet om realiserbart potentiale. Udbygningstakten for landvind har hidtil været bestemt af hvor mange projekter kommunerne har kunnet finde plads til, hvilket siden 2012 har ledt til en relativt stabil udbygning med i gennemsnit godt 200 MW årligt (brutto). Primo 2017 er den samlede landvindkapacitet på ca. 3.950 MW. Selvom potentialet er betydeligt større¹⁰, kræver det opnåelse af lokal accept, hvilket

⁹ Andre analyser, der behandler de omtalte emner: Energikommissionens anbefalinger til fremtidens energipolitik, Energikommissionen 2017; Elektrificeringspotentialer og bidrag til klimamål, Dansk Energi 2017; Energikocept 2030, Energinet.dk 2015; Grøn Roadmap 2030 – Scenarier og virkemidler til omstilling af transportsektorens energiforbrug, Ea Energianalyse 2015;

¹⁰ Analyse af potentialet for landvind i Danmark i 2030, Energinet.dk 2015
<https://www.energinet.dk/SiteCollectionDocuments/Danske%20dokumenter/Klimaogmiljo/Potentialet%20for%20landvind%20i%20Danmark%20i%202030.pdf>

ofte kan være en udfordring der begrænser landvindudbygningen. Derfor er det sandsynligvis i højere grad nødvendigt at supplere med de fortsat noget dyrere havvindmøller, hvor den samlede kapacitet med den allerede planlagte udbygning vil nå ca. 2.650 MW i 2021. Såfremt der er væsentligt mindre lokale udfordringer for solcelleanlæg end der de senere år er set for landvind, kan solcelleanlæg spille en betydelig rolle, og ifølge analyserne til lavere omkostninger end havvind.

Udfordringer ved elektrificering af varme- og transportsektoren knytter sig især til indfasning af elbiler og en tilpasning af incitamentsstrukturen i form af afgifter. For elbiler er spørgsmålet, om omkostningsreduktionen og teknologiudvikling kan sikre en indfasning i passende tempo uden en markant afgiftsreform. For varmesektoren hæmmes indfasningen af varmepumper af forvridende incitamentsstrukturer (elafgifter) og manglende storskala demonstration af varmepumper.

2 Forudsætninger og analysesetup

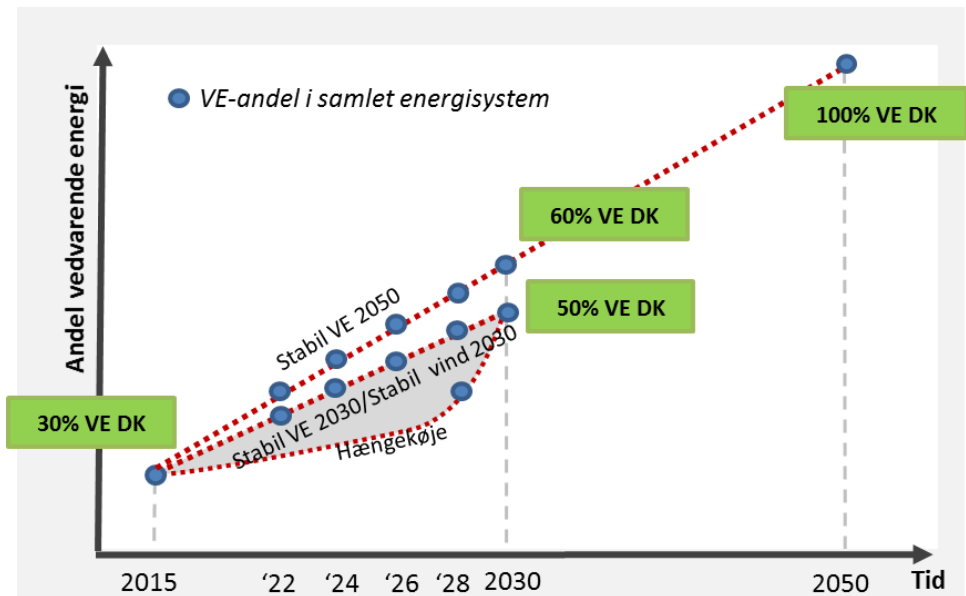
Analysens fokus er udviklingen i produktionen af VE i Danmark frem mod minimum 50% VE i 2030 med en perspektivering mod 100% VE i 2050. Til dette formål er der udarbejdet fire scenarier, hvoraf tre beskriver forskellige veje mod opfyldelsen af regeringens målsætning om minimum 50% VE i Danmark i 2030, mens perspektivscenariet viser en stabil¹¹ udbygning af VE frem mod 100% VE i 2050, hvilket vil kræve 60% VE i 2030 (**Figur 4**).

I denne rapport optegnes og analyseres fire forskellige veje til at nå denne målsætning. I analysen er der dels set på et såkaldt 'hængekøje-scenarie', hvor de nødvendige tiltag til opfyldelse af mindst 50% målsætningen udsættes længst muligt. Overfor dette står tre scenarier med forskellige variationer af stabil udbygning med vedvarende energi (VE).

De fire scenarier er:

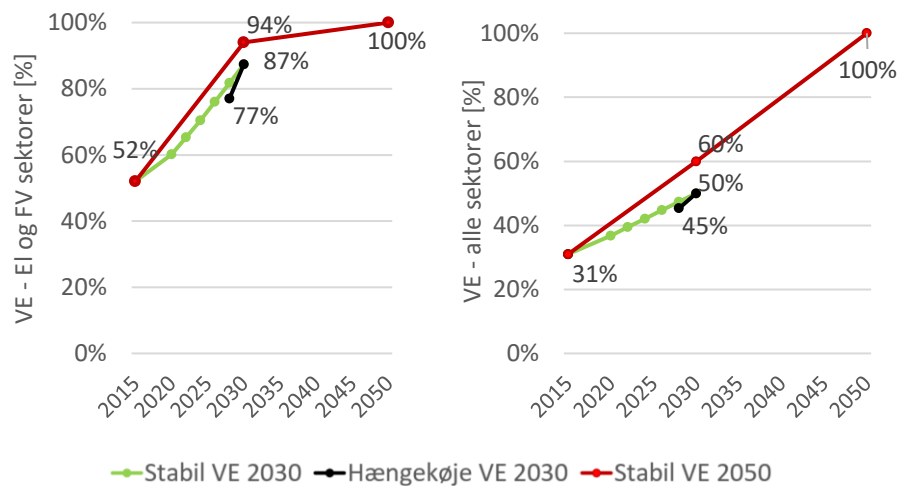
- **Hængekøje VE 2030:** Nødvendige tiltag til opfyldelse af 50% målsætningen udsættes længst muligt, Senest i 2027 øges indsatsen indenfor el- og fjernvarmesektoren for at nå minimum 50% VE i 2030.
- **Stabil VE 2030:** Der sikres en indsats indenfor el- og fjernvarmesektoren, der som minimum følger en stabil (lineær) VE-udbygning mod 50% i 2030.
- **Stabil vind 2030:** Svarer til Stabil VE 2030, men i dette scenarie er kravet udover en som minimum stabil total VE-udbygning mod 50 %, en stabil (lineær) vindudbygning mod stort set samme installerede landvindskapacitet i 2030 som i stabil VE 2030-scenariet.
- **Stabil VE 2050:** Minimum stabil udbygning af VE fra 2015 til 2050. Indsatsen øges i alle sektorer. Optimering af el- og fjernvarmesektoren efter 2020 sker ud fra et samfundsøkonomisk perspektiv, dvs. uden forvriddende afgifter og tilskud.

¹¹ *Stabil* refererer her til forøgelse af den samlede VE-andel fra 2015 til 2050, der som minimum følger en lineær sti.



Figur 4: Stileret illustration af udvikling i VE-andel i det samlede energisystem i Danmark i de forskellige scenarier. Udviklingen af VE skal forstås som minimumskrav. Hvis eksisterende og besluttede tiltag, eller de generelle markedsforhold tilsiger det, kan VE-andelen være højere.

Ved udformningen af scenarierne antages en konkret udvikling af VE indenfor transport, industri og individuel opvarmning (se afsnit 2.1). Ud fra denne beregnes det nødvendige bidrag fra el- og fjernvarmesektoren for at nå den samlede målsætning, og sammensætningen af el- og fjernvarmesektoren for at opfylde denne målsætning billigst muligt beregnes med el- og fjernvarmemodellen Balmorel. I 2030-scenarierne tages udgangspunkt i nuværende tilskud og afgifter, mens der forudsættes samfundsøkonomisk optimering i 2050-scenariet. For 'Hængekøje VE 2030'-scenariet introduceres der først krav til VE fra 2027, som beregnes ud fra det maksimale antagne bidrag, som havvind, landvind og solceller kan bidrage med i løbet af de resterende år til målsætningen om 50% VE i 2030. Det er dog op til modelberegningen hvordan bidrag i de sidste to år endeligt struktureres, og biomasse og varmepumper kan også bidrage.



Figur 5: Forudsat udvikling af VE-andele i scenarierne. Andelen i el- og fjernvarmesektoren fremgår af venstre figur den samlede VE-andele i i alle sektorer af højre figur.

VE-målsætningen

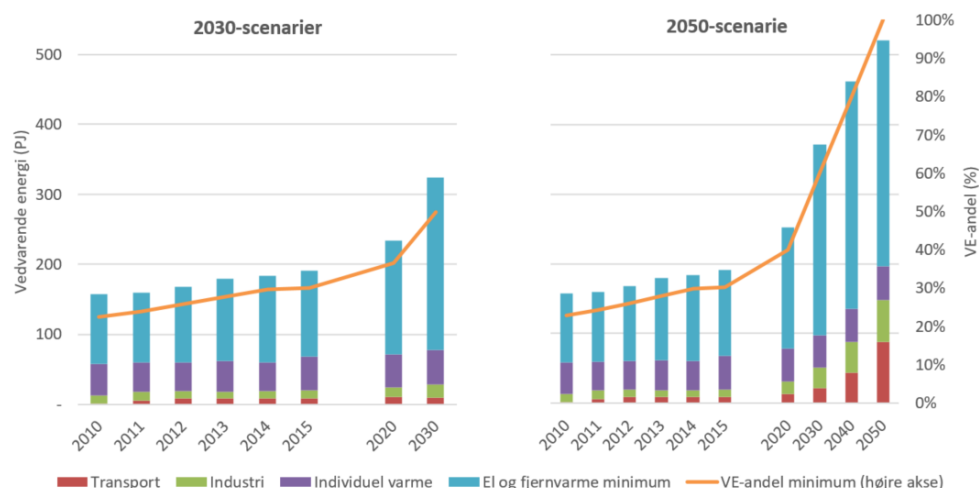
Regeringen har ikke klart meldt ud, hvordan målsætningen om 50% VE skal måles. I denne analyse er der taget udgangspunkt i EU-metoden, hvor andelen beskrives som VE-produktionen i forhold til det udvidede endelige energiforbrug. Dette valg er hovedsageligt begrundet med, at det er den metode, der anses for den mest sandsynlige for anvendelse ved udformning af regeringens målsætning, og fordi der ikke er forskel på, hvordan vind/sol og biomasseanvendelsen i el- og fjernvarmesektoren bidrager til målsætningen.

En anden metode er opgørelse af VE i forhold til bruttoenergiforbruget. En nærmere beskrivelse fremgår af baggrundsnotatet til den rapport, men hovedforskellene er:

- EU-metoden regnes som *produktion* af VE i forhold til udvidet endeligt energiforbrug. Bruttoenergimetoden regnes som *forbrug* af VE i forhold til bruttoenergiforbruget. Eksempelvis vil et biomassekraftvarmeværk ifølge bruttoenergimetoden bidrage med dets forbrug af biomasse, mens det i EU-metoden vil bidrage med produktionen af el og varme.
- Ikke energirelateret energiforbrug og energiforbrug ved transformering af energi (især energiforbrug ved olie og gasproduktion i Nordsøen) er ikke inkluderet i EU-metoden. Bruttometoden omfatter derimod alle sektorer inkl. Nordsøen.
- Bruttoenergimetoden korrigerer for import/eksport ifølge en metode defineret af Energistyrelsen. I EU-metoden korrigeres ikke for eksport/import, dvs. import af el tæller ikke som VE, og eksport af VE-strøm bliver ikke fratrukket.

2.1 Sektorernes bidrag

El- og fjernvarmesektoren forventes at levere det største bidrag til den samlede VE-andel, da omstilling kan foretages omkostningseffektivt, særligt i perioden til 2030, hvor omstilling af transport og industri kan være en større udfordring (**Figur 6**). Det er dog ikke i dette projekt søgt at optimere de forskellige sektorers bidrag. I stedet anvendes en frozen-policy tilgang for 2030-scenarierne indenfor transport, industri og individuel opvarmning, som i store træk baseres på Energistyrelsens basisfremskrivning (BF15)¹². I Stabil VE 2050-scenariet antages indsatsen at blive øget i alle sektorer. Her er bl.a. Energistyrelsens vindscenarie (ENS vind) en central reference.¹³ Antagelserne er opsummeret i **Tabel 3**.



Figur 6: Forudsat bidrag til VE-udvikling fra de forskellige sektorer. Den orange streg angiver den forudsatte minimumsandel af VE i Danmark i scenarierne.

¹² Danmark Energi- og Klimafremskrivning 2015, Energistyrelsen 2015

¹³ Energiscenarier frem mod 2020, 2035 og 2050, Energistyrelsen 2014

Sektor	2030-scenarier	2050-scenarie
Individuel varme	Baseret på BF2015 -Konvertering til fjernvarme (op til 15% af individuel forsyning) -Naturgas og olie reduceres ca. 43% i 2030 ift. 2015 -Varmepumper forsyner ca. 22% i 2030	-Følger forløbet i 2030-scenarier til 2025. Herefter fremskrivning baseret på ENS vind -Naturgas og olie reduceres ca. 50% i 2030 ift. 2015 -Varmepumper forsyner ca. 33% i 2030
Transport	Baseret på BF2015 -Begrænset indfasning af biobrændstoffer til 2020, herefter konstant andel -Meget begrænset indfasning af elbiler (ca. 10.000 i 2025, 15.000 i 2030)	-Fremskrivning baseret på analyser af VE til tung transport ¹⁴ -Biobrændstoffer bidrager med ca. 10% af det samlede forbrug i 2030 - Ca. 360.000 elbiler i 2030
Industri	-Ingen yderligere udvikling af VE-anvendelse efter 2015. Størstedelen af VE i BF2015 skyldtes VE til proces støtteordningen, som er blevet afviklet.	-Udvikling af VE følger oprindelig fremskrivning fra BF2015 til 2025. Herefter tilpasning til ENS vind i 2050.
El og fjernvarme	Min. 87% VE i 2030	Min. 94% VE i 2030 100% VE i 2050
Samlet VE-andel	Min. 50% i 2030	Min. 60% i 2030 100% i 2030

Tabel 3: Antagelser om udvikling af VE i de forskellige sektorer.

Ud fra antagelserne i de øvrige sektorer beregnes det nødvendige bidrag i el- og fjernvarmesektoren for at opnå den forudsatte sti for udviklingen af den samlede VE-andel (**Figur 6**).

I stabil VE 2050 scenariet øges indsatsen i alle sektorer, hvilket fører til udviklingen vist i **Figur 6**. På trods af det øgede bidrag i de øvrige sektorer, øges kravet til el- og fjernvarmesektoren i 2030 i både PJ og som andel, da den samlede VE-andel er højere og der forudsættes større elektrificering.

¹⁴ Biogas og andre VE brændstoffer til tung transport, Ea Energianalyse og SDU 2016

2.2 Elektrificering

2030-scenarierne forudsætter kun begrænset elektrificering¹⁵, idet der antages en frozen-policy tilgang. I alt introduceres et elforbrug på ca. 1,9 TWh i 2030 grundet elektrificering (**Tabel 4**). I 2050 scenariet øges elektrificeringen som instrument for at reducere den samlede CO₂-emission. Dette resulterer i et elforbrug grundet elektrificering på ca. 4,7 TWh i 2030 og godt 21 TWh i 2050. Elektrificeringen stammer fra såvel anvendelsen af varmepumper til individuel varmforsyning, elbiler i transportsektoren, øget elektrificering i industrien samt anvendelse af brint til produktion af biobrændstoffer på lang sigt. Der er ikke foretaget en optimering af niveauet af elektrificering og timingen, og niveauerne er derfor fastlagt ud fra andre referencer, samt det langsigtede mål om 100% VE, hvor sammensætningen af energisektoren er inspireret af Energistyrelsens vindscenarie. Væsentlige faktorer, der kan påvirke den fremtidige elektrificering er bl.a. afgifter og tariffer for elforbrug, priser på elbiler (som i høj grad afhænger af teknologiudvikling indenfor batterier). De valgte antagelser sammenholdes med andre relevante referencer, herunder Energistyrelsens basisfremskrivning (BF15), Energinets Analyseforudsætninger¹⁶, og Dansk Energis analyse af *Elektrificeringspotentialer og bidrag til klimamål*¹⁷.

¹⁵ Det understreges, at der med elektrificering her refereres til elforbrug, der erstatter anden energianvendelse indenfor Danmark. Således er udvikling af det generelle elforbrug, nyt elforbrug/elforbrug til eksempelvis ny industri eller datacentre ikke inkluderet her.

¹⁶ Energinet.dk's analyseforudsætninger 2016, Energinet.dk 2016

¹⁷ Elektrificeringspotentialer og bidrag til klimamål, Dansk Energi 2017

Enhed: GWh		2020	2030	2050
2030-scenarier	Industri	-	-	
	Individuelle varmepumper	149	361	
	Vejtransport	3	35	
	Femern og elektrificering af fjernbanen	157	798	
	Elforbrug brint	-	-	
	Fjernvarme - Hængekøje VE	11	727	
	Fjernvarme - Stabil VE 2030	11	741	
	Fjernvarme - Stabil vind 2030	12	738	
2050-scenarier	Industri	16	407	1.902
	Individuelle varmepumper	149	985	3.787
	Vejtransport	93	1.093	5.977
	Femern og elektrificering af fjernbanen	157	798	846
	Elforbrug brint	-	238	5.835
	Fjernvarme	15	1.188	2.944
Total	Hængekøje VE 2030	320	1.920	
	Stabil VE 2030	320	1.934	
	Stabil vind 2030	322	1.932	
	Stabil VE 2050	430	4.709	21.291

Tabel 4: Overblik over antagelser for elektrificering. Angivet som GWh brutto (inkl. Nettab).
*Elektrificering indenfor fjernvarmeproduktion er et resultat af beregningerne med Balmorel-modellen

Industri

Elektrificering indenfor industri vedrører anvendelse af varmepumper og elpatroner til procesvarme. Forudsætningerne er baseret på BF15. Mod 2025 forudsættes der næsten ingen yderligere anvendelse af varmepumper og elpatroner. Dette fastholdes i 2030-scenarierne. I stabil VE 2050 øges elektrificeringen efter 2025 således at ca. 20% af forsyningen er baseret på elpatroner og varmepumper i 2050 svarende til Energistyrelsens vindscenarie, mod ca. 6% i 2015. I 2030 bliver andelen knap 10%. Til sammenligning forudsætter Dansk Energi en elektrificering på 23% i 2030 i et højt elektrificeringsscenarie. I lyset af den langsigtede andel på 20% i 2050, virker 23% i 2030 højt, men kan ikke udelukkes under ændrede rammebetingelser.

Individuelle varmepumper

Udviklingen af individuelle varmepumper følger BF15 til 2025, hvor varmepumper forsyner ca. 19 % af forbruget. Dette øges i 2030-scenarierne til 22% i 2030 på basis af en lineær fremskrivning af udviklingen mellem 2020 og 2025. I stabil VE 2050-scenariet øges andelen efter 2025 lineært til at opfylde ca. 92% i 2050. Resten er baseret på solvarme, svarende til Energistyrelsens vindscenarie. Til sammenligning forudsætter Dansk Energi, at ca. 30% af den individuelle opvarmning forsynes med varmepumper i 2030 i et højt elektrificeringsscenarie, hvilket ville kræve en tredobling af salgstallet af varmepumper til 15.000 årligt i hele perioden fra 2016 til 2030 ift. ca. 5.000

nye varmepumper i 2015. Energinets Analyseforudsætninger 2016 ligger ca. 19% højere i 2030 end de her valgte antagelser.

Transport

I 2030-scenarierne følger elforbrug til vejtransport BF15. Forudsætningerne for transportsektoren for 'stabil VE 2050'-scenariet generelt, herunder eldrevet vejtransport, er baseret på projektet Biogas og andre VE-brændstoffer til tung transport¹⁸, som forudsætter, at andelen af elbiler af nybilssalg indenfor personbiler stiger til ca. en tredjedel af al nybilssalg i 2030, fordelt på ca. 50% rene elbiler og 50% plugin-hybridbiler. Elbiler og plugin-hybridbiler står for ca. 12% af personbilsparken i 2030. Det samlede elforbrug til vejtransport er ca. 1,1 TWh i 2030. Til sammenligning forudsætter Dansk Energi et forbrug på ca. 2,8 TWh i det høje elektrificeringsscenarie i et meget ambitiøst forløb, hvor det antages, at antallet af personbiler når ca. 520.000, hvilket ville kræve at halvdelen af alle solgte personbiler er rene elbiler i 2030. Dertil antages en tilsvarende elektrificering af varebiler, busser og lastbiler. Energinet.dk antager i deres Analyseforudsætninger 2016 et elforbrug på 0,7 TWh i 2030. Togdrift har ikke været genstand for nærmere analyse, men det antages, at ca. 85% dækkes af eldrift i 2025, hvilket er tidligere end BF15, som antager 85% eldrift i 2030.

2.3 Forudsætninger for el- og fjernvarmesektoren

Udviklingen i el- og fjernvarmesektoren beregnes med markedsmodellen Balmorel, hvor der implementeres krav om at opfylde VE-målsætningen inden for el- og fjernvarmesektoren (se **Figur 5**). Udviklingen i den danske el- og fjernvarmesektor afhænger primært af to ting:

- a) Udviklingen af det internationale elmarked, som er påvirket af de globale tendenser indenfor brændselspriser og teknologiudvikling, samt EU's rammevilkår for udvikling af VE og udledning af CO₂
- b) Nationale rammebetingelser for støtte til VE og tilskud og afgifter.

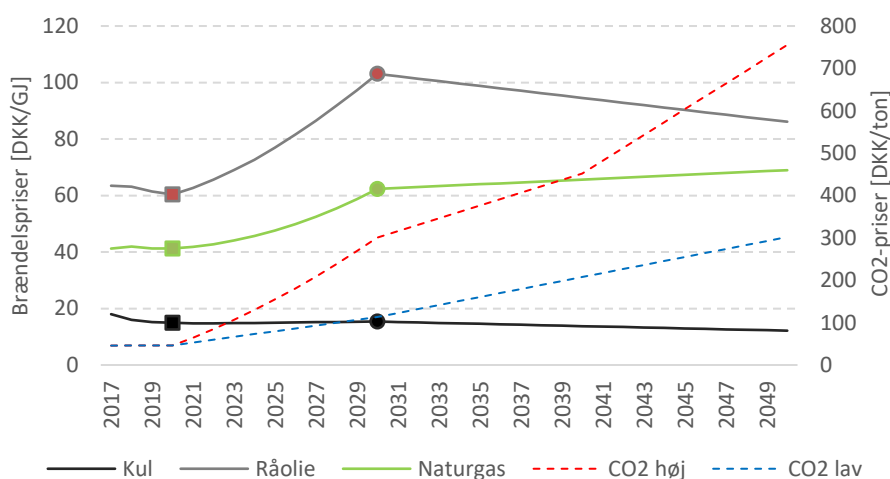
Det internationale elmarked

Der forudsættes grundlæggende en fortsat omstilling af elsystemet til vedvarende energi, både i lyset af Parisaftalen fra december 2015 og den fortsatte billiggørelse af VE-teknologier. Dette reducerer efterspørgslen på fossile brændsler, og dermed priserne. Især på kort sigt vil nationale tilskudsordninger i EU spille en væsentlig rolle i udbygningen af VE, mens CO₂-kvotesystemet, med antagelse om priser stigende fra 46 DKK/ton i 2020 til 113 DKK/ton i 2030, først forventes at spille en afgørende rolle på længere sigt.

¹⁸ *Biogas og andre VE brændstoffer til tung transport*, Ea Energianalyse og SDU 2016

Brændselspriser i samtlige scenarier forudsættes at følge forwardmarkederne frem til 2020, hvorefter der forudsættes en tilpasning til World Energy Outlooks 450 scenarie, hvis prisniveau antages fuldt indfaset i 2030 (Figur 7). Valget af World Energy Outlooks 450 scenarier afspejler både antagelse om fortsat klimaindsats og at det Internationale Energiagentur historisk set ofte har undervurderet teknologiudviklingen indenfor VE.

CO₂-priserne baseres indtil 2020 ligeledes på forwardpriser på omkring 5,5 €/ton. Frem til 2030 antages i 2030-scenarierne en forøgelse til 15€/ton, idet subsidier fortsat forventes at spille en afgørende rolle for udvikling af VE. Til sammenligning vurderer EU's impact assessment¹⁹, at der er behov for 40€/ton i 2030, hvis reduktionsmålene for CO₂ indenfor EU skal nås vha. en CO₂-pris. Såfremt der samtidig indføres effektivisering og energibesparelser reduceres denne pris til 22€/ton, og yderligere til 11€/ton, når der også forudsættes VE-tilskud. Der er i øjeblikket et overskud af CO₂-kvoter på i nærheden af 2 mia. tons, og der vil skulle træffes nye politiske beslutninger i EU for at fjerne overskuddet før 2030. Dette peger i retning af fortsat lave CO₂-priser, og på at de 15 €/ton kan være et optimistisk estimat. I 2050-scenariet antages efter 2020 en stigende CO₂-pris til 100 €/ton I 2050 for i højere grad at afspejle den samfundsøkonomiske værdi af CO₂-udledning.



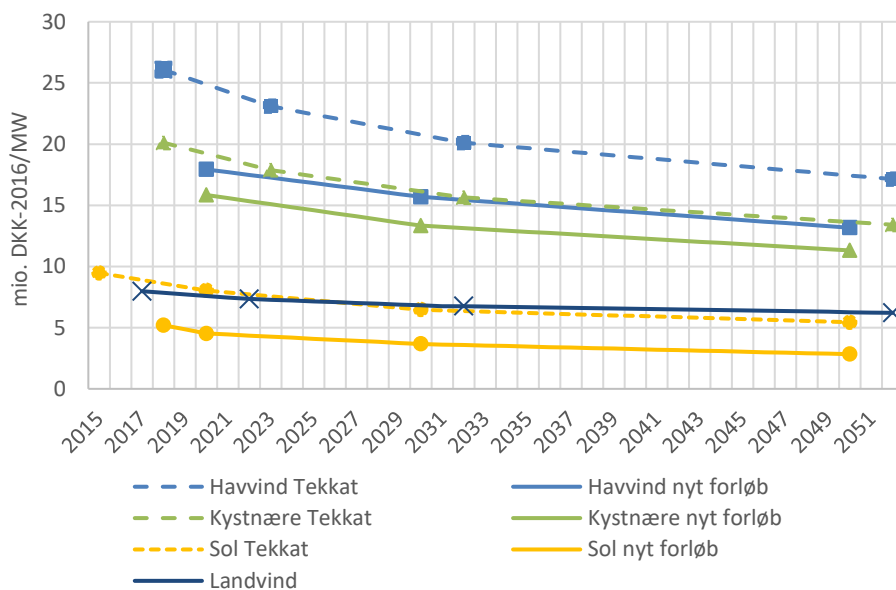
Figur 7: Forudsat udvikling for CO₂- og brændselspriser. CO₂ høj: 2050-scenarie, CO₂ lav: 2030-scenarier.

Teknologiudvikling

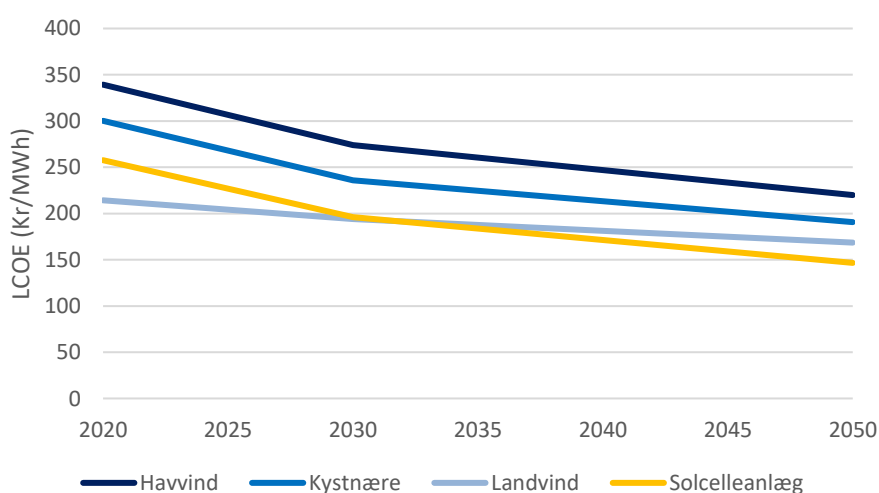
Antagelser for teknologiudviklingen baseres grundlæggende på Energistyrelsens og Energinet.dks teknologikatalog. Både nationale og

¹⁹ COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT - IMPACT ASSESSMENT, SWD(2014) 15 final, European Commission 2014.

internationale auktioner for vind og sol i løbet af 2016 har dog indikeret, at omkostningerne til især offshore vind og solceller er faldet mere end forventet. Ud fra især buddene for Kriegers Flak, Børssele 1&2, Børssele 3&4 for havvind, samt de danske og tyske udbud for sol (hvoraf en del etableres i Danmark), er der derfor estimeret en opdateret udvikling for omkostninger for havvind og solceller (**Figur 8**). Forventningerne til landvind er uændret. De viste reduktioner af investeringsomkostningen fører også til lavere forventning for de samfundsøkonomiske elproduktionsomkostninger



Figur 8: Estimat for udvikling af teknologiomkostninger (investeringsomkostninger) i forhold til Energistyrelsens og Energinet.dks teknologikatalog (tekkat). Omkostninger er vist for det år, hvor teknologien opføres.



Figur 9: Estimat for samfundsøkonomisk elproduktionsomkostning. Baseret på den tekniske levetid og en samfundsøkonomisk rente på 4%. Beregningerne inkluderer ikke systemintegrationsomkostninger, som er inkluderet i selve modelberegningerne.

Udvikling af VE

Udviklingen af VE i Europa baseres på ENTSO-E's Scenario Outlook and Adequacy forecast²⁰, med undtagelse af Tyskland og UK, hvor der er taget hensyn til mere detaljerede nationale planer. Det faste forløb afspejler antagelsen om at udviklingen fortsat primært baseres på nationale støtteordninger. Såfremt vind eller sol er konkurrencedygtig på markedsvilkår, kan modellen investere udover de fastlagte niveauer.

Nationale rammevilkår

I 2030-scenarierne tages udgangspunkt i en frozen-policy tilgang til det eksisterende tilskuds- og afgiftssystem. Eksisterende tilskudsordninger antages derfor at stoppe, når EU-godkendelsen udløber. Derfor antages støtten til landvind og biomasse udfaset i hhv. februar 2018 og april 2019. Eksisterende og planlagte biomasseværker forudsættes fortsat at modtage tilskud. Dette omfatter især omstilling af store centrale værker (Studstrupværket, Avedøreværket, Amagerværket og Skærbækværket). I 2050-scenariet foretages en samfundsøkonomisk optimering efter 2020, og tilskud og afgifter fjernes derfor.

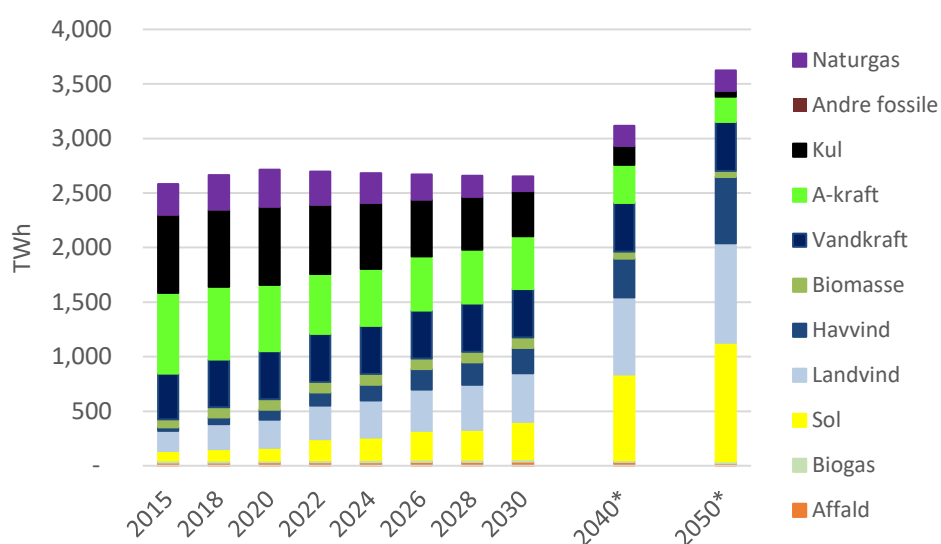
Udbygningen af vedvarende energi kan udover markedsf forhold også være begrænset af planlægningsmæssige aspekter. For at tage hensyn til dette, er der regnet med en maksimal årlig udbygning af landvind på 400 MW. Historisk har denne bruttoopførelse af landvind blevet overskredet én gang i Danmark, hvilket var i 2000, hvor der brutto blev opført ca. 600 MW landvind. Gennemsnittet har siden 2010 været på 200 MW/år. Samtidig antages også et maksimalt potentiale for landvind på 6,5 GW i 2030 og 8,5 GW i 2050. Potentialet indfases lineært med udgangspunkt i den eksisterende kapacitet. For solceller vurderes de planlægningsmæssige barrierer at være mindre, og der antages maksimalt 600 MW (storskala) solcelleanlæg pr. år. For havvind kan der i princippet opføres større mængder pr. år, såfremt dette er planlagt i god tid.

²⁰ Scenario Outlook & Adequacy Forecast, ENTSO-E 2015

3 Resultater

3.1 Det europæiske elsystem²¹

I forløbet mod 2030 forventes en kraftig omstilling af det europæiske elsystem mod mere vedvarende energi, som ca. fordobles fra at dække godt 30% af elforbruget i 2015 til ca. 60% i 2030 (**Figur 10**). Samtidig tredobles andelen af fluktuerende elproduktion fra ca. 12% til 38%. I 2050 udgør denne andel mere end 70%. Fordelingen mellem landvind, havvind og sol på langt sigt er usikker og afhænger af den præcise udvikling af teknologiomkostninger, lagringsmuligheder og samtidighed i produktion på tværs af Europa.



Figur 10: Elproduktion fordelt på brændsler i de modellerede lande i Europa. *For 2040 og 2050 vises resultater fra Stabil VE 2050-scenariet, som forudsætter højere CO₂-priser, og også viser en anden produktionssammensætning i 2030.

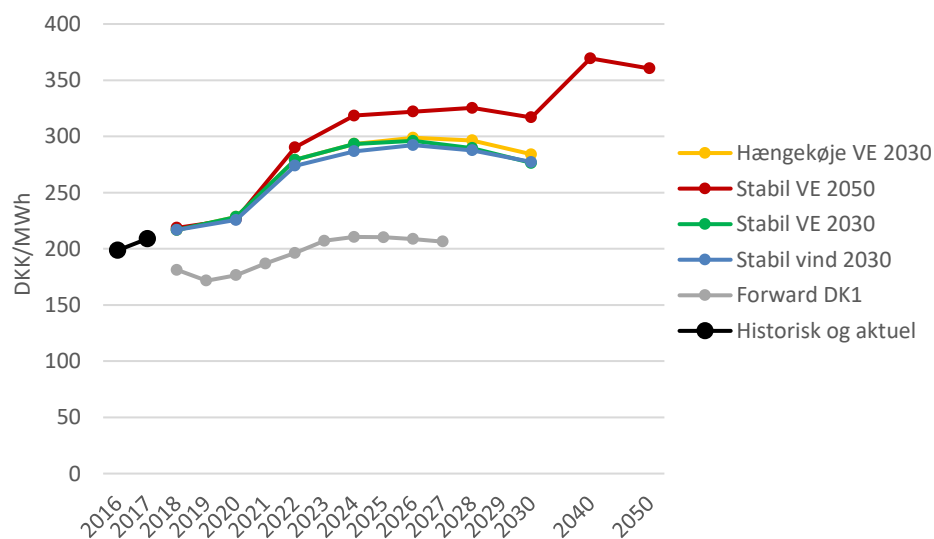
Fremskrivning af elpriser er behæftet med stor usikkerhed, og afhænger af flere usikre faktorer, herunder brændsels- og CO₂-priser, politiske målsætninger for VE og udviklingen af forbruget.

I 2030-scenarierne forventes stagnerende forbrugsudvikling og elpriserne forventes at stige sammenlignet med niveauet i 2016. Det skyldes dels, at markedet bringes i balance og overkapacitet afvikles, samtidig med at brændsels- og CO₂-priser stiger og løfter elprisen. Den forudsatte udvikling af

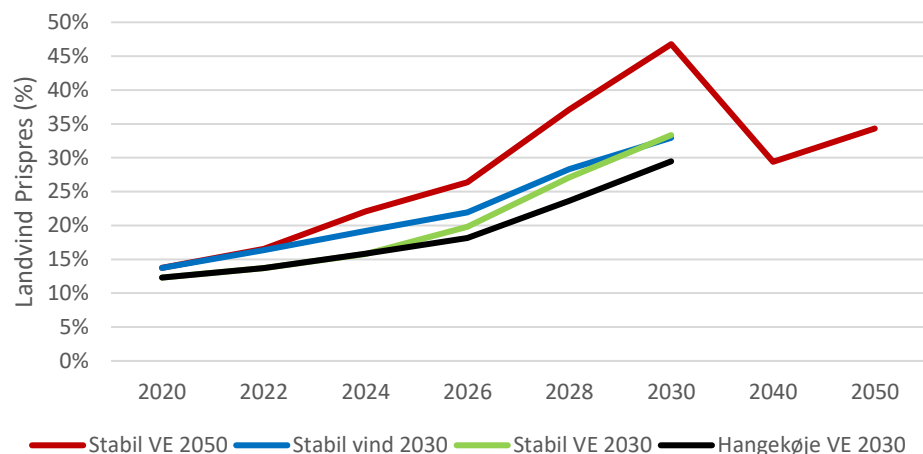
²¹ I modelleringen indgår 18 lande i Europa inklusiv, Norden, Baltikum, Polen, Tjekkiet, Tyskland, Benelux, Storbritannien, Schweiz, Østrig, Italien og Frankrig.

vedvarende energi begrænser dog stigningen, som stagnerer lidt under 300 DKK/MWh.

I 2050-scenariet med højere CO₂-priser og stigende elforbrug på grund af elektrificering ses højere elpriser på både kort og lang sigt. Også her begrænses priserne dog af VE-udbygningen, som lægger en begrænsning på priserne ved omkring 400 DKK/MWh, idet den balancerede elproduktionsomkostning for både havvind, landvind og solceller ligger under 400 DKK/MWh. Så længe produktion fra disse varierende elproduktionskilder kan balanceres uden meget høje integrationsomkostninger, vil der derfor blive investeret i yderligere produktionskapacitet, hvis priserne skulle stige, hvilket igen begrænser elprisstigningen. Elpriserne, som vindkraft afregner til i markedet ligger i 2030 ca. 30% under den gennemsnitlige markedspris (**Figur 12**). I 2050-scenariet ses et høj prispress for landvind og den absolutte afregningspris kan blive mellem 15 og 30 DKK/MWh lavere end i 2030-scenariet. Dette skyldes udover den øgede vindudbygning i Europa generelt også antagelsen om, at modeloptimeringen her ikke kan nå at tilpasse lagermuligheder i form af transmissionsledninger og batterier, samtidig med at VE-målsætningen for el- og fjernvarme er høj i Danmark. I 2040 kan systemet i højere grad tilpasses vha. investering i transmissionskapacitet, og prispresset reduceres kraftigt.



Figur 11: Fremskrivning af engros-elpriser i Vestdanmark. Fremskrivningen er sammenlignet med forwardkontrakter (tilgået 10-03-2017) og den aktuelle pris (For 2016 vises gennemsnitlig spotpris, for 2017 vises vægtet gennemsnit mellem spotpris for januar-marts 2017 og forwards for april-december 2017). Alle priser i faste 2016-DKK. Kilder: Nordpoolspot.com og Nasdaqomx.com

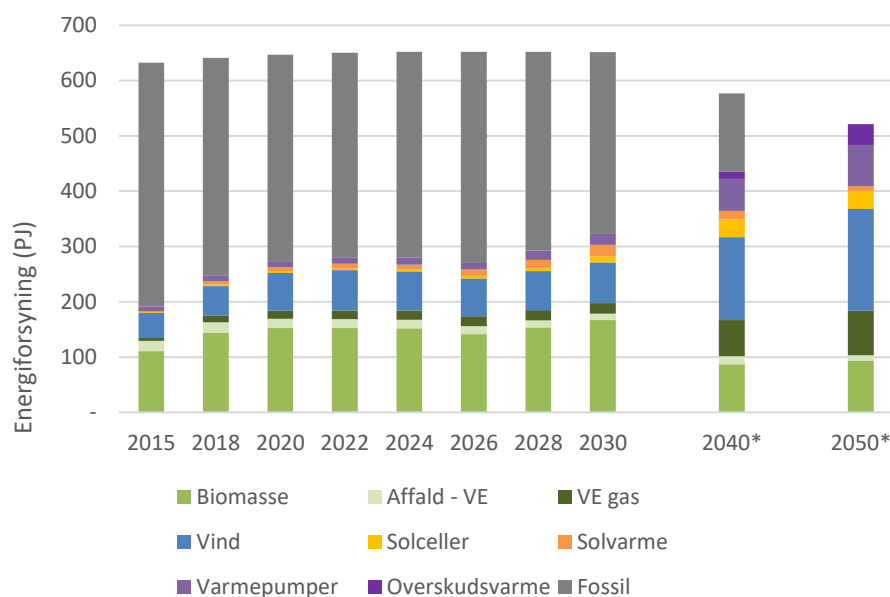


Figur 12: Prispres for landvind i Vestdanmark. De viste prispres er beregnet på baggrund af en modelkørsel med aggregeret tidsopløsning, hvilket isoleret set tendentielt overvurderer prispresset. Samtidig undervurderer optimeringsmodeller dog ofte det reelle prispres i markedet.

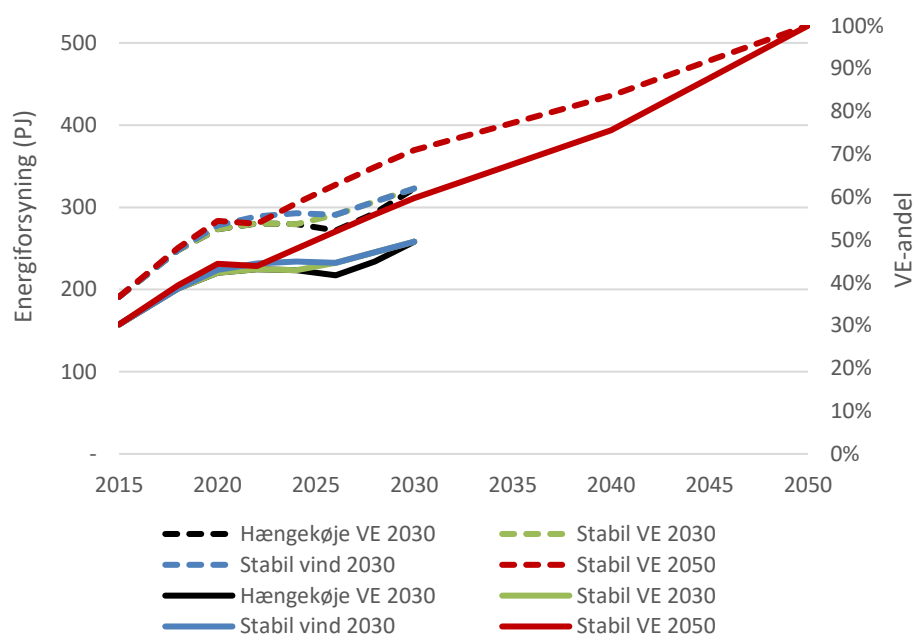
3.2 Vedvarende energi i Danmark

2030-scenarierne viser forskellige veje til at opfylde regeringens målsætning om minimum 50% VE i Danmark i 2030, mens 2050-scenariet når 60% VE i 2030 som led i en stabil VE-udbygning mod 100% i 2050 (**Figur 13**).

De eksisterende politikker om tilskud og afgifter, samt besluttet udbygning af VE indtil 2021 fører i alt til at den lineære udbygningssti mod 50% VE i 2030 overopfyldes indtil 2024. Herefter vil VE-udbygningen underopfylde den lineære sti, med mindre der vedtages nye tiltag. En lineær sti mod 100% VE i 2050 ville kræve nye tiltag fra og med 2022 i el- og fjernvarmesektoren, og dertil nye initiativer i de øvrige sektorer, der i de opstillede scenarier allerede får betydning i 2020. Den resulterende udvikling i den samlede VE-andel fremgår af Figur 14.



Figur 13: Udvikling af anvendelse af VE til forsyning af udvidet endeligt slutforbrug i Danmark. Søjlerne angiver energiforsyningen til 2030 i Hængeskøjle VE 2030-scenariet. *For 2040 og 2050 vises resultater fra Stabil VE 2050 scenariet.

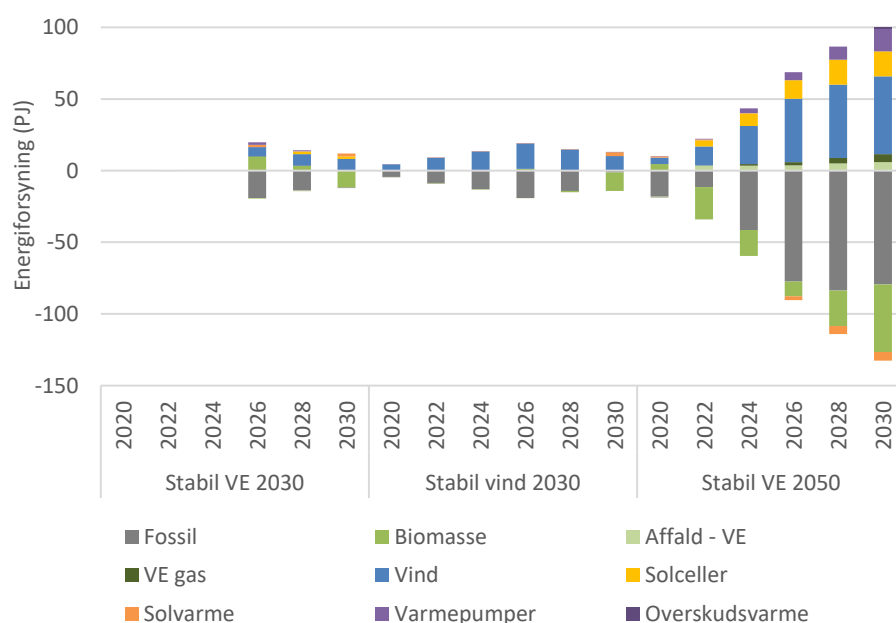


Figur 14: Resulterende udvikling for samlet VE-produktion (stiplede linjer, venstre akse) og VE-andel (fuldt optrukne linjer, højre akse). At VE-andelen for Stabil VE 2050 ikke er fuldt lineær mellem 2030 og 2040, skyldes at der her er valgt en lineær udvikling i el- og fjernvarmesektoren. Sammen med de valgte forudsætninger i de øvrige sektorer resulterer dette i en overordnet VE-andel, der ligger lidt under en lineær sti mellem 2030 og 2050.

Introduktion af en målsætning om en stabil udvikling af VE eller vind frem til 2030 eller stabil udvikling mod 2050 fører til øgede mængder VE i perioden fra

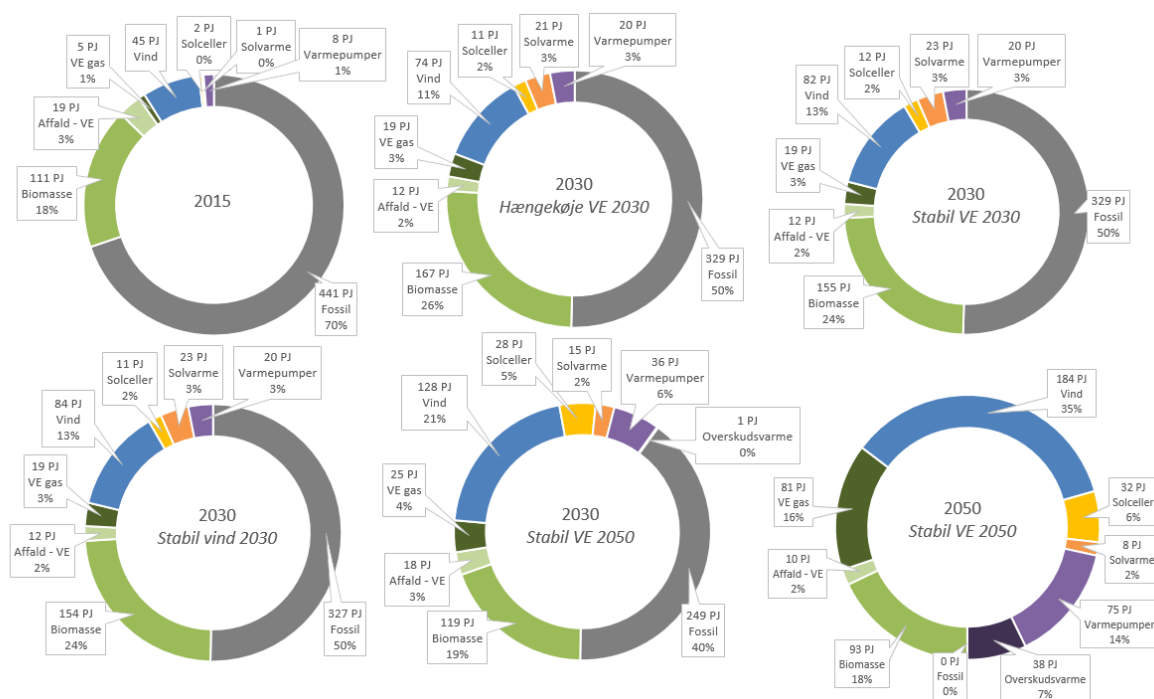
2020 til 2030. Under nuværende afgifts og tilskudsforhold opfyldes den øgede VE-målsætning i den mellemliggende periode billigst ved øget anvendelse af både landvind og biomasse.

Forskellene i forhold til Hængekøje VE 2030-scenariet er illustreret i **Figur 15**. I både Stabil VE 2030 og 'Stabil Vind 2030-scenarierne, er der i 2030 et mindre behov for biomasse for at opfylde målet om minimum 50% VE. En stabil udvikling af VE mod 2050 ville i hele perioden ud fra et samfundsøkonomisk perspektiv føre til større mængder vind (herunder også havvind), solceller og varmepumper, mens anvendelsen af biomasse reduceres på trods af det øgede VE-krav, og på trods af en højere anvendelse af biomasse i andre sektorer end el- og fjernvarmesektoren, hvilket især skyldes at biomasse i Stabil VE 2050-scenariet ikke begunstiges afgiftsmæssigt.



Figur 15: Forskelle i energiforsyning i de forskellige scenarier i forhold til Hængekøje VE 2030.

I 2030 udgør vindkraft i de forskellige scenarier mellem 11% og 21% af det udvidede endelige slutforbrug (**Figur 16**). I 2030 erstatter yderligere vind i Stabil VE og Stabil Vind-scenariet biomasse. I 2050-scenariet leveres den øgede VE andel i 2030 især fra vind, solceller og varmepumper. I mindre grad bidrager biogas og bedre udnyttelse af affald, mens biomassen reduceres med op til 50 PJ mindre, svarende til en reduktion på 28% ift. Hængekøje VE 2030 scenariet. På lang sigt bidrager vind med omkring 35% og er største enkeltbidrag til VE-forsyningen baseret på 100 % VE i 2050.



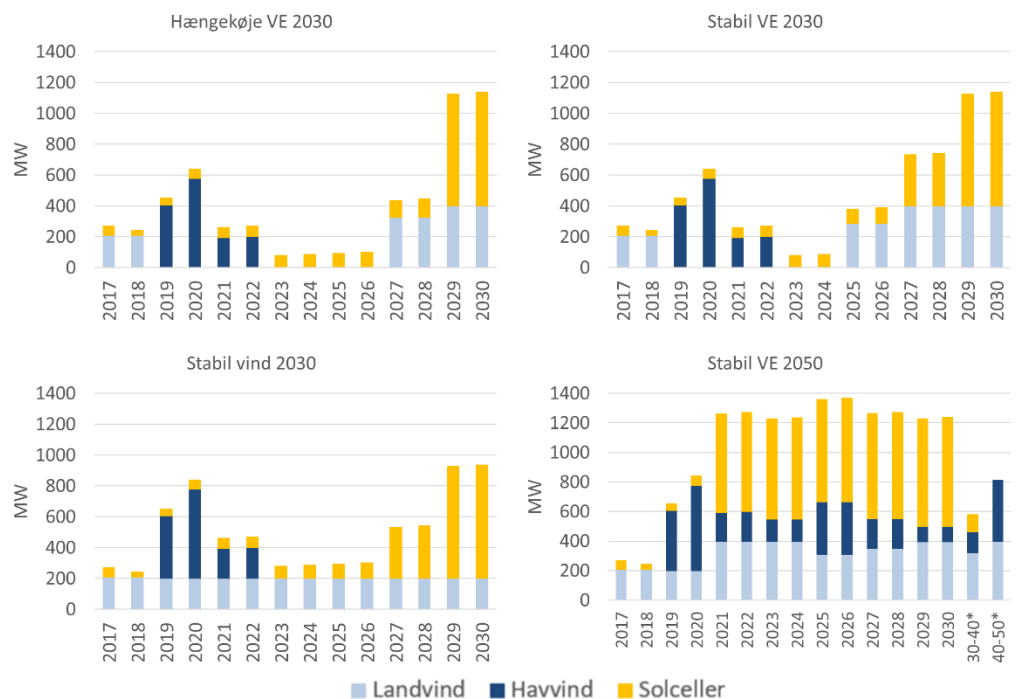
Figur 16: Bidrag til forsyningen af udvidet endeligt slutforbrug i 2015, de forskellige scenarier for 2030 og i 2050.

Vindens bidrag til VE-forsyningen kræver en årlig udbygning, som illustreret i **Figur 17**. I Hængekøje VE 2030 og Stabil VE 2030 stoppes landvindudbygningen i Danmark fra 2019 og henholdsvis 8 og 5 år frem, mens der i Stabil Vind 2030 er antaget en kontinuert udbygning til omtrent samme niveau i 2030. I Stabil VE-2050 udnyttes den maksimalt antagne mulige udbygning med 400 MW landvind pr. år og samlet maksimalt 6,5 GW mod 2030. Derudover investeres i ny havvind udover de i energiaftale af 2012 besluttede havmølleparker.

Ligesom for sammensætningen af det europæiske elsystem, har den præcise udvikling af teknologiomkostninger, lagringsmuligheder og samtidig i elproduktion på tværs af Europa betydning for det optimale bidrag fra de forskellige VE-ressourcer til opfyldelsen af VE-målet.

GW		2016	2020	2030	2050
Potentiale landvind			4,5	6,5	8,5
Hængekøje VE 2030	Landvind	3,8	4,0	3,8	-
	Havvind	1,3	2,3	2,2	-
	I alt	5,1	6,2	6,1	-
Stabil VE 2030	Landvind	3,8	4,0	4,6	-
	Havvind	1,3	2,3	2,2	-
	I alt	5,1	6,2	6,8	-
Stabil vind 2030	Landvind	3,8	4,4	4,8	-
	Havvind	1,3	2,3	2,2	-
	I alt	5,1	6,6	7	-
Stabil VE 2050	Landvind	3,8	4,4	6,5	8
	Havvind	1,3	2,3	3,8	5,7
	I alt	5,1	6,6	10,4	13,7

Tabel 5: Resulterende installeret vindkapacitet i de forskellige scenarier. Uoverensstemmelser mellem sum og enkelte dele skyldes afrunding.



Figur 17: Vind- og soludbygning (brutto) pr. år i Danmark i de forskellige scenarier. Nye kapacitet er vist i det første fulde driftsår. Den viste offshore-kapacitetsudbygning til og med 2022 er en følge af energiaftalen fra 2012. Udbygning på under 400 MW landvind i Stabil VE 2050 skyldes antagne begrænsninger om maksimalt 6,5 GW landvind i 2030 (lineær indfasning) og 8,5 GW i 2050.

I forhold til Energistyrelsens vindscenarie, bemærkes især, at det samlede elforbrug i Danmark er lavere her. Dette skyldes bl.a. mindre anvendelse af el

til brændstofproduktion til transportsektoren. Vindens andel af elproduktion i 2050 er lidt højere her med ca. 88% mod 76% i Energistyrelsens scenarie og sol anvendes her i højre grad. Endvidere bidrager overskudsvarme fra biobrændstofproduktion til en større del af fjernvarmeproduktionen end i Energistyrelsens scenarier. Dette skyldes ændrede teknologiantagelser i de anvendte referencer for udvikling af transportsektoren og antagelsen om at produktionen af biobrændstoffer sker indenfor Danmarks grænser. Begge dele er usikre antagelser. Derudover er der den metodiske forskel, at elsektoren i 2050-scenariet kan overopfylde målsætningen (Herunder eksport af el baseret på VE) og herved acceptere anvendelsen af fossile brændsler til fjernvarmeproduktion.

3.3 Samfundsøkonomiske konsekvenser

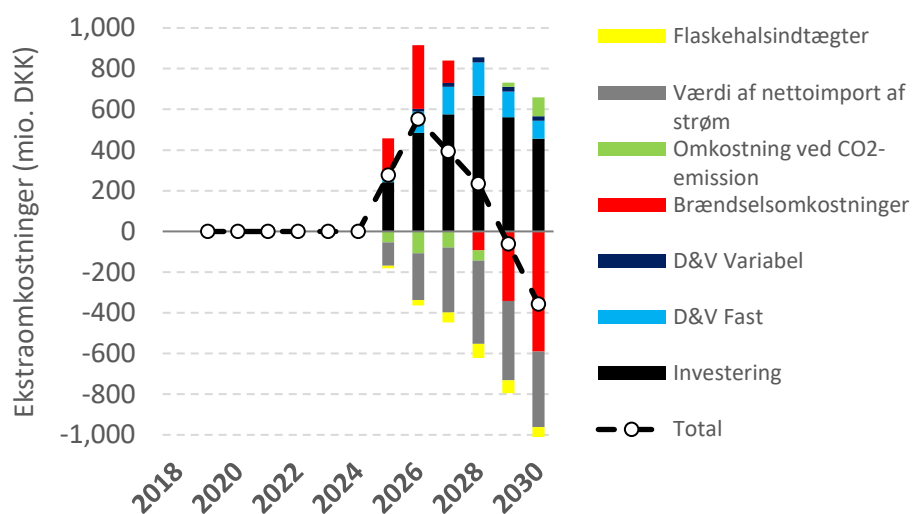
Introduktion af VE i energisystemet kan især på kort sigt være forbundet med samfundsøkonomiske meromkostninger, som dog især er følsomme overfor antagelser om den samfundsøkonomiske værdi af CO₂-udledning. I denne analyse, er der alene taget højde for samfundsøkonomiske konsekvenser i el- og fjernvarmesektoren, mens omkostninger i andre sektorer ikke er analyseret. I 2030-scenarierne er antagelser for de øvrige sektorer dog ens, og påvirker derfor ikke den økonomiske forskel. I 2050-scenariet foretages også ændringer i andre sektorer, hvis effekt der ikke er taget hensyn til her. Dette gælder to emner: Øget elektrificering og større VE-anvendelse i andre sektorer. Større VE-anvendelse påvirker ikke direkte el- og fjernvarmesektorens økonomi, men har betydningen for økonomien i den overordnede VE-målsætning. Hvis større VE-anvendelse i andre sektorer medfører en samfundsøkonomisk meromkostning, vil det påvirke økonomien for Stabil VE 2050 negativt. For elektrificeringen gælder, at hvis den er økonomisk attraktivt set for den pågældende sektor, så vil det for det samlede system i Danmark også være attraktivt, idet omkostningerne i el- og fjernvarmesektoren som vist reduceres.

De samfundsøkonomiske omkostninger i el- og fjernvarmesektoren for Danmark omfatter følgende:

- Kapitalomkostninger for ny produktionskapacitet
- Faste og variable driftsomkostninger
- Brændselsomkostninger
- Omkostning ved CO₂-emission
- Værdi af eksport/import af strøm
- Flaskehalsindtægter

De samfundsøkonomiske konsekvenser er beregnet for hele perioden fra 2017 til 2030 med en samfundsøkonomisk rente på 4%. For investeringer i produktionskapacitet anvendes en økonomisk levetid på 20 år. Der er ikke taget højde for dynamiske effekter som følge af ændrede elpriser og skatteforvriddningseffekter er ikke inkluderet.

Forskellen på de årlige omkostninger til el- og fjernvarmesektoren i 'Stabil VE 2030' i forhold 'Hængekøje VE 2030' fremgår af **Figur 18**. De viste ekstraomkostninger er især relateret til højere kapitalomkostninger til investering i vindkraft og biomasseværker samt brændselsomkostninger. Til gengæld viser scenariet højere indtægter fra eksport af strøm. 'Stabil VE 2030'-scenariet har dog også en højere VE-andel og lavere CO₂-emission, set over hele perioden. De tilbagediskonterede omkostninger pr. ekstra VE-produktion er derfor begrænset til 60 DKK/MWh (se **Tabel 6**). Ved stabil udbygning med landvind, reduceres ekstraomkostningerne pr. VE-produktion til 35 DKK/MWh, mens de totale ekstraomkostninger øges, da den totale mængde VE også er højere.



Figur 18: Forskel i omkostninger i el- og fjernvarmesektoren mellem 'Stabil VE 2030' og 'Hængekøje VE 2030'.

	Danmark			Alle lande i modellen		
	Stabil VE	Stabil vind	Stabil VE	Stabil VE	Stabil vind	Stabil VE
	2030	2030	2050 ²²	2030	2030	2050 ²²²²
Ekstra VE (PJ) akkumuleret	66	119	230	41	81	2.759
Nutidsværdi ekstraomkostninger (mia. DKK)	0,75	0,86	-1,74	0,68	0,07	33,42
Tilbagediskonterede ekstraomkostninger (DKK/MWh)	60	35	-41	84	4	68

Tabel 6: Ekstraomkostninger ved i el- og fjernvarmesektoren ved yderligere VE-produktion. Den tilbagediskonterede ekstraomkostning er beregnet som (Nutidsværdi ekstraomkostninger)/(Tilbagediskonteret ekstra VE)

CO₂-fortrængningsomkostningerne i Stabil VE 2030 og Stabil Vind 2030 ligger omkring 75 til 275 DKK/ton, og er dermed forholdsvis lave (**Tabel 7**).

	Stabil VE	Stabil vind	Stabil VE
	2030	2030	2050 ²²
Reduceret CO ₂ over perioden (Mton)	4,68	17,84	1.019
Tilbagediskonterede fortrængningsomkostninger (DKK/ton)	274	76	120

Tabel 7: CO₂-fortrængningsomkostninger. Fortrængningsomkostninger er vist som sum af den forudsatte CO₂-pris og ekstraomkostningerne pr fortrængt CO₂. Den tilbagediskonterede fortrængningsomkostning er beregnet som (Nutidsværdi ekstraomkostninger)/(Tilbagediskonteret CO₂-besparelse)

Samfundsøkonomien for 2050-scenariet er sværere at sammenligne med 2030-scenariet, da der er forudsat et større elforbrug, og der er også foretaget ændringer i de øvrige sektorer, hvis mulige meromkostninger eller besparelser ikke indgår her. Dette gælder to emner: Elektrificering og større VE-anvendelse i andre sektorer. Større VE-anvendelse påvirker ikke direkte el- og fjernvarmesektorens økonomi, men har betydningen for den overordnede VE-målsætning. Hvis større VE-anvendelse i andre sektorer medfører en samfundsøkonomisk meromkostning, vil det påvirke økonomien for Stabil VE 2050 negativt. For elektrificeringen gælder, at hvis den er økonomisk attraktivt set for den pågældende sektor, så vil det for det samlede system i Danmark også være attraktivt, idet omkostningerne i el-og

²² | Stabil VE 2050 er der forudsat et højere elforbrug som følge af elektrificering. Omkostningsberegningen tager dog ikke højde for de besparelser eller meromkostninger, elektrificeringen medfører i andre sektorer. Desuden er CO₂-emissionen i disse beregninger værdisat til Stabil VE 2030-beregningens forudsætning.

fjernvarmesektoren som vist reduceres. Desuden er CO₂ i alle beregninger værdisat efter prisen i 2030-scenarierne. Ses der bort fra disse begrænsninger for de samfundsøkonomiske beregninger, viser Stabil VE 2050 alligevel en samfundsøkonomisk besparelse på omkring 1,7 mia. DKK for Danmark, svarende til, at der spares 41 DKK/MWh yderligere VE-produktion. Dette skyldes primært, at de forvridende afgifter og tilskud er fjernet, hvilket betyder at vind, sol og varmepumper bidrager med mere VE, mens bidrag fra biomasse reduceres. Desuden viser Stabil VE 2050 på kort sigt indtil 2022 en lavere produktion fra VE, da reduktion af biomasse her overskygger yderligere produktion fra vind og sol.

Set for det samlede system viser stabil VE 2050 en meromkostning på omkring 33 mia. DKK for de modellerede Europæiske lande. Dette svarer til en forøgelse af periodens systemomkostninger på ca. 0,28% og skal også ses i lyset af at elforbruget er øget med ca. 0,02% i perioden. Meromkostningen på systemniveau skyldes også, at systemet først optimeres til en høj CO₂-pris, hvorefter den samfundsøkonomiske sammenligning foretages til den lavere CO₂-pris fra 2030-scenarierne. CO₂-fortrængningsomkostninger er dog fortsat lave på omkring 120 DKK/ton.