

Dokumentationsnotat for modelanalyse af EU ETS

Notatet præsenterer en nyudviklet, dynamisk model for EU's CO₂-kvotesystem (EU ETS). Modellen benyttes til at analysere konsekvenserne af den nye aftale fra november 2017 om næste fase af EU ETS. Modelberegninger viser, at aftalen øger kvoteprisen og reducerer den akkumulerede udledning af drivhusgasser (CO₂e) indenfor kvotesystemet på både kort og lang sigt. Derudover ændrer aftalen de grundlæggende principper i kvotesystemet, hvilket kan påvirke effekterne af nationale klimapolitiske tiltag i kvotesektoren. Modelberegninger indikerer, at tiltag, som reducerer kvoteefterspørgslen, reducerer den samlede CO₂e-udledning i EU ETS på lang sigt. Modelberegninger indikerer også, at aftalen reducerer effekten af nationale kvoteannulleringer på den langsigtede CO₂e-udledning i EU ETS. De kvalitative resultater er robuste overfor en række ændringer i modelantagelserne.

1 Sammenfatning

Dette notat præsenterer en nyudviklet, dynamisk model for EU's CO₂-kvotesystem (EU ETS). Modellen benyttes til at vurdere effekten af den nye aftale fra november 2017 om 4. fase (2021-30) af EU ETS på den akkumulerede udledning af drivhusgasser omregnet til CO₂-ækvivalenter (CO₂e), kvoteoverskuddet og kvoteprisen. Derudover analyseres effekterne af nationale klimapolitiske tiltag i kvotesektoren før og efter den nye aftale.

I den præsenterede model optimerer en repræsentativ virksomhed i EU ETS nutidsværdien af alle fremtidige profitter frem til 2125. Virksomheden bruger fossilt brændsel i sin produktion, som medfører CO₂e-udledning, og kvotesystemet begrænser derfor virksomhedens produktion. Dermed bliver virksomhedens problem at planlægge sine CO₂e-udledninger og dermed udviklingen i sin kvoteopsparing over tid for at optimere nutidsværdien af alle fremtidige profitter. Virksomheden tager mængden af tilgængelige kvoter for givet i sin planlægning, idet hver enkelt virksomhed i EU ETS essentielt set ingen indflydelse har på mængden af tilgængelige kvoter. Modellen kalibreres således, at den matcher den historiske udledning før indførelsen af EU ETS samt kvoteprisen i 2017 og den forventede CO₂e-udledning i EU's kvotesektor i 2017.

Analyserne fokuserer på konsekvenserne af den nye aftale fra november 2017 om 4. fase af EU ETS. Aftalen ændrer de grundlæggende principper i kvotesystemet, idet loftet over den samlede CO₂e-udledning i EU's kvotesektor ikke længere er forudbestemt fra politisk side. Derimod afhænger loftet over de samlede udledninger af udviklingsforløbene for den årlige mængde af auktionerede kvoter samt beholdningen af kvoter i markedsstabilitetsreserven (MSR). Mere præcist annulleres den mængde kvoter i MSR, som overstiger mængden af auktionerede kvoter forrige år. Idet optaget af kvoter i MSR afhænger af kvoteoverskuddet, kan nationale klimapolitiske tiltag, som ændrer kvoteoverskuddet, påvirke, hvor mange kvoter der annulleres i MSR.

Analysen har to hovedresultater. For det første viser analysen, at den nye aftale fra november 2017 reducerer den akkumulerede CO₂e-udledning på både kort og lang sigt. Konkret indikerer modelberegninger, at aftalen reducerer den akkumulerede CO₂e-udledning over perioden 2017-50 med 3-4 pct., mens reduktionen er på 4-16 pct. over perioden 2017-2100.¹ Ifølge modelberegninger reducerer aftalen mængden af kvoter på markedet over stort set hele den betragtede periode. Dermed øges kvoteprisen.

For det andet viser analysen, at den nye aftale fra november 2017 sandsynligvis ændrer effekterne af nationale klimapolitiske tiltag de kommende år. Tiltag, som reducerer kvoteefterspørgslen, vil ifølge modelberegninger reducere den akkumulerede CO₂e-udledning på både kort og lang sigt, jf. tabel 1. Før den nye aftale kunne sådanne tiltag påvirke den akkumulerede CO₂e-udledning på kort og mellemlang sigt, mens de ingen effekt ville have på lang sigt.² Eksempler på tiltag, som reducerer kvoteefterspørgslen, inkluderer støtte til vedvarende energi (VE), en national afgift på CO₂e i kvotesektoren og støtte til energibesparelser.

Derimod viser modelberegninger, at aftalen svækker effekten af nationale kvoteannulleringer, jf. tabel 1. Før den nye aftale ville den langsigtede effekt af kvoteannulleringer være en-til-en. Efter den nye aftale er den langsigtede effekt af kvoteannulleringer ifølge modelberegninger mindre end en-til-en. Dog kan en foreløbig aftale imellem Ministerrådet og Europa-Parlamentet bevirke, at kvoteannulleringer foretaget i forbindelse med fleksibilitetsmekanismen for ikke-kvotesektoren får en forstærket effekt. Modelberegninger indikerer, at aftalen bevirker, at denne type

¹ EU-Kommissionen, Europa-Parlamentet og Ministerrådet har alle i deres forhandlingsudspil til 4. fase af EU ETS foreslået en forhøjelse af den hastighed, hvormed de årlige kvoteudstedelser i EU ETS reduceres. Dette forslag tages derfor for givet i analysen og medregnes ikke, når effekten af den nye aftale vurderes. Det vil sige, at reduktionen på 4-16 pct. i 2100 alene skyldes, at kvoter permanent fjernes fra MSR.

² Hvis den teknologiske udvikling reducerer kvoteefterspørgslen tilstrækkeligt hurtigt, kan man også få en effekt på lang sigt, jf. Klimarådet (2017). Dette kræver dog en hurtig teknologisk udvikling over en meget lang periode. Modelberegninger præsenteret i dette notat, som er kalibreret ud fra historiske data, indikerer, at tiltag, som reducerer kvoteefterspørgslen, ingen effekt har på de akkumulerede CO₂e-udledninger i fravær af det nye loft over kvoter i MSR.

kvoteannulleringer får en mere end en-til-en effekt på den samlede CO₂e-udledning på lang sigt.

Tabel 1. Reduktion i akkumuleret CO₂e-udledning fra 2017 efter den nye aftale fra november 2017 af et klimapolitisk tiltag, som umiddelbart reducerer den akkumulerede CO₂e-udledning med 8 mio. ton ligeligt fordelt over en periode

	2030	2050	2100
	----- mio. ton CO ₂ e -----		
Effekt over perioden 2021-30			
Tiltag som reducerer kvoteefterspørgslen	7,6	6,8	6,4
Nationale kvoteannulleringer	0,4	1,2	1,6
Fleksibilitetsmekanisme	3,1	9,1	12,2
Effekt over perioden 2021-45			
Tiltag som reducerer kvoteefterspørgslen	2,4	4,4	3,1
Nationale kvoteannulleringer	1,4	4,0	5,4

Kilde: Egne beregninger.

De ændrede effekter af nationale tiltag i kvotesektoren skyldes, at disse tiltag påvirker kvoteoverskuddet og dermed optaget i MSR. Efter den nye aftale kan kvoter i MSR blive annulleret. Resultaterne fra tabel 1 er derfor en konsekvens af, at nationale tiltag indirekte kan påvirke mængden af kvoter, som annulleres i MSR.

De kvalitative resultater fra tabel 1 er robuste overfor en række ændringer i de grundlæggende modelantagelser. Derimod kan de beregnede effekters størrelse være følsomme overfor ændringer i forudsætningerne. Det er for eksempel afgørende, hvor længe tiltagene forventes af virke over, jf. tabel 1.

Det er ikke muligt ud fra den foretagne analyse at afgøre, hvilken type nationalt tiltag, der mest omkostningseffektivt reducerer CO₂e-udledningen på EU-plan. En sådan analyse kræver en kvantificering af tiltagenes lækageeffekter udenfor kvotesystemet via udenrigshandlen. Sådanne effekter ligger udenfor den udviklede modelramme. Derudover er det nødvendigt at kende de samfundsøkonomiske omkostninger ved de forskellige typer af tiltag. I en sådan opgørelse af omkostninger bør andre hensyn end blot de direkte omkostninger medregnes. Eksempelvis kan der være indirekte omkostninger forbundet med en VE-udbygning i forhold til kvoteannulleringer: en VE-udbygning kræver plads, den kan reducere herlighedsværdien af naturen og kan give anledning til yderligere udsving i elprisen. Endelig er det afgørende, hvilken tidsperiode tiltagene antages at virke over, jf. tabel 1.

2 Indledning³

På nuværende tidspunkt dækker EU ETS ca. 45 pct. af EU's drivhusgasudledning, jf. EU-Kommissionen (2017c). Systemet dækker primært stationære installationer indenfor en række energiintensive industrier, bl.a. el, varme, stål, aluminium og cement.⁴ Der udstedes årligt et antal nye kvoter, og dette antal reduceres årligt. En andel af kvoterne bortauktioneres, mens de resterende tildeles gratis til virksomheder dækket af EU ETS. Der opkræves en kvote for hvert ton CO₂e-udledning. Idet antallet af kvoter er begrænset, lægger systemet et loft over den samlede CO₂e-udledning i EU's kvotesektor.

Det har siden 2008 været muligt at opspare kvoter til senere brug. Denne mulighed er i høj grad blevet udnyttet, og der har siden 2009 været et betydeligt overskud af kvoter i EU ETS, jf. Sandbag (2016). For at imødegå dette store og potentielt voksende kvoteoverskud har EU de seneste år gennemført flere reformer af EU ETS.

I 2015 besluttede EU at indføre MSR, som bliver operationel fra 2019, jf. EU (2015). MSR optager kvoter, når kvoteoverskuddet er stort, og frigør kvoter, når kvoteoverskuddet er lille. Mekanismen kan ifølge EU styrke robustheden af EU ETS overfor kortsigtede ændringer i kvoteefterspørgslen. Dette bekræftes af visse model-simulationer i den økonomiske litteratur, som imidlertid også finder, at en mere omkostningseffektiv prisstabilisering kan opnås via et loft over og en bund under kvoteprisen, jf. Fell (2016). Andre studier finder dog, at MSR kan øge kvoteprisudsvingene i EU ETS, jf. Richstein mfl. (2015) og Perino og Willner (2016).

EU har også forsøgt at reducere kvoteoverskuddet ved at udskyde auktioneringen af i alt 900 mio. kvoter. Oprindeligt skulle disse kvoter bortauktioneres i årene 2014-16, men EU besluttede at udskyde auktioneringen af disse kvoter til årene 2019-20. Denne plan er imidlertid blevet ændret, og de 900 mio. kvoter overføres i stedet til MSR, jf. EU (2015).

I november 2017 indgik Europa-Parlamentet og Ministerrådet en såkaldt trilog-aftale om 4. fase af EU ETS, der dækker perioden 2021-30. Aftalen indeholder to ændringer af reglerne for MSR. For det første øges optagelsen af kvoter i MSR indtil 2023, når kvoteoverskuddet er stort. Derudover lægges der et loft over kvotebeholdningen i MSR. Loftet er givet ved mængden af auktionerede kvoter forrige år. Kvoter i MSR over dette loft annulleres. Hvis f.eks. beholdningen af kvoter i MSR er på 4 mia. kvoter, og der blev auktioneret 0,6 mia. kvoter året før, bliver 3,4 mia. kvoter i MSR annulleret.

³ Dette afsnit er primært baseret på Gronwald og Hintermann (2015) og EU-Kommissionen (2017a).

⁴ Siden 2012 har EU ETS dækket luftfartstrafik imellem lufthavne indenfor det Europæiske Økonomiske Samarbejdsområde. Luftfartsindustrien udgør imidlertid kun ca. 3 pct. af de samlede årlige drivhusgasudledninger i EU ETS, jf. Det Europæiske Miljøagentur (2017a). Dette notat fokuserer derfor på den stationære del af EU ETS.

Det loft over kvotebeholdningen i MSR, som den nye aftale indfører, ændrer kvotesystemets grundlæggende principper. Loftet over beholdningen i MSR bevirker, at loftet over de samlede CO₂e-udledninger i kvotesystemets levetid ikke fastsættes direkte af politikerne gennem de årlige udstedelser af nye kvoter. Efter aftalen afhænger loftet over de samlede CO₂e-udledninger af udviklingsforløbene for mængden af auktionerede kvoter og kvotebeholdningen i MSR. Og sidstnævnte afhænger i høj grad af udviklingsforløbet for kvoteoverskuddet, som ikke styres direkte af politikerne.

Den nye aftale reducerer også det samlede antal udstedte kvoter. Før aftalen blev det årlige antal nyudstedte kvoter reduceret med ca. 38 mio. kvoter hvert år, svarende til 1,74 pct. af det gennemsnitlige årlige antal nyudstedte kvoter for perioden 2008-12. Denne lineære reduktionsfaktor øges til 2,2 pct. eller ca. 48 mio. kvoter p.a. fra 2021 som følge af den nye aftale. Forhøjelsen af den lineære reduktionsfaktor reducerer den samlede kvotemængde over kvotesystemets levetid med ca. 9 mia. kvoter. Denne kvotemængde kunne have dækket de forventede CO₂e-udledninger i 2017 mere end fem gange.

I dette notat præsenteres en model for EU ETS, og modellen bruges til at analysere konsekvenserne af den nye aftale om 4. fase af EU ETS. Analysen koncentrerer sig om to aspekter. For det første analyseres den samlede effekt af reformen på den akkumulerede CO₂e-udledning, kvoteoverskuddet og kvoteprisen. Derudover analyseres konsekvenserne af reformen for nationale klimapolitiske tiltag i kvotesektoren. Mere specifik analyseres effekterne af tiltag, som reducerer kvoteefterspørgslen, og nationale kvoteannulleringer.

Den præsenterede model består basalt set af to elementer: en repræsentativ virksomhed i kvotesektoren og et sæt administrative regler for kvotesystemet. Den repræsentative virksomhed optimerer nutidsværdien af alle fremtidige profitter frem til 2125. Virksomheden bruger fossilt brændsel i sin produktion, som medfører CO₂e-udledning, og kvotesystemet begrænser derfor virksomhedens produktion. Dermed bliver virksomhedens problem at planlægge sine CO₂e-udledninger og dermed udviklingen i sin kvoteopsparing over tid for at optimere nutidsværdien af alle fremtidige profitter. Over de kommende årtier antages det, at VE-teknologier udvikles hurtigere end teknologier baseret på fossilt brændsel. Den teknologiske udvikling vil derfor reducere efterspørgslen efter virksomhedens produktion over tid. Virksomheden tager mængden af tilgængelige kvoter for givet i sin planlægning, idet hver enkelt virksomhed i EU ETS essentielt set ingen indflydelse har på mængden af tilgængelige kvoter. Det vil sige, at den repræsentative virksomhed ikke medregner sin egen effekt på kvoteoverskuddet og dermed optaget af kvoter i MSR, når den planlægger sine CO₂e-udledninger og kvoteopsparing. Modellen kalibreres således, at den matcher den historiske udvikling i udledningerne før indførelsen af EU ETS samt kvoteprisen i 2017 og den forventede udledning i EU's kvotesektor i 2017.

Overordnet set er modellen bygget op på samme måde som andre modeller for EU ETS. Fell (2016) og Perino og Willner (2017) antager, at en repræsentativ virksomhed minimerer sine reduktionsomkostninger, hvorimod den repræsentative virksomhed i nærværende analyse optimere sine indtjeninger. De to modelleringsstrategier er grundlæggende ens. De kræver begge antagelser om den fremtidige efterspørgsel efter virksomhedens produktion samt produktionstabet forbundet med CO₂e-reduktioner.

Modellen ligner på flere områder Klimarådets model (Klimarådet 2017; Silbye and Sørensen 2017), som består af tre elementer: en lineær efterspørgselsfunktion for kvoter, spekulative investorer og et sæt administrative regler for kvotesystemet. En væsentlig forskel er, at den her præsenterede model tager udgangspunkt i et dynamisk optimeringsproblem for en repræsentativ virksomhed i kvotesektoren. Det har den fordel, at det herved fremgår direkte, hvordan optimalitetsbetingelserne fremkommer. Desuden formuleres modellen mere generelt, og det kan vises, at Klimarådets model kan opfattes som et specialtilfælde af den generelle model (se afsnit 6).

En væsentlig forskel på Klimarådets og nærværende analyse er den prædikterede kvotepris. Som udgangspunkt antages virksomhedernes afkastkrav at være 5 pct. p.a. i nærværende analyse, hvorimod Klimarådet benytter et afkastkrav på 10 pct. p.a. Dette medfører, at kvoteprisen vokser langsommere i nærværende analyse, når der er et kvoteoverskud. Kvoteprisudviklingen i nærværende analyses hovedspecifikation ligner i høj grad udviklingsforløbet benyttet i Energistyrelsens basisfremskrivning. Kvoteprisen er f.eks. 81 kr. i 2030 i baselinescenariet (før den nye aftale) for nærværende analyse, mens Energistyrelsens middelskøn er 77 kr., jf. Energistyrelsen (2017).⁵

Den kalibrerede teknologiske vækstrate i nærværende model er desuden mindre i forhold til den teknologiske vækstrate antaget i Klimarådets model. Endvidere antager Klimarådet, at kvoteefterspørgslen kan beskrives ved en lineær efterspørgselsfunktion. I modsætning hertil leder den objektfunktion for den repræsentative virksomhed, som er antaget i nærværende analyse, frem til en ikke-lineær kvoteefterspørgselsfunktion. Det bemærkes, at fortolkningen af den teknologiske udvikling afhænger af efterspørgselsfunktionen, hvilket vanskeliggør en direkte sammenligning af de to modellers teknologiske vækstrater.

Nærværende modelanalyse har to hovedresultater. For det første viser analysen, at den nye aftale fra november 2017 reducerer den akkumulerede CO₂e-udledning på både kort og lang sigt. Konkret vurderes det på baggrund af modelanalysen, at aftalen reducerer den akkumulerede CO₂e-udledning over perioden 2017-50 med 3-4 pct., mens reduktionen er på 4-16 pct. over perioden 2017-2100.⁶ Modelanalysen viser, at

⁵ Energistyrelsens middelskøn i 2016-priser fremskrives til 2017-priser via BNP deflatoren.

⁶ EU-Kommissionen, Europa-Parlamentet og Ministerrådet har alle i deres forhandlingsudspil til 4. fase af EU ETS foreslået en forhøjelse af den hastighed, hvormed de årlige kvoteudstedelser i EU ETS reduceres, jf. Europa-Parlamentet (2018). Dette forslag tages derfor for givet i analysen og medregnes ikke, når effekten af den nye aftale

aftalen reducerer mængden af kvoter på markedet over stort set hele den betragtede periode. Dermed øges kvoteprisen.

For det andet viser analysen, at den nye aftale fra november 2017 sandsynligvis ændrer effekterne af nationale klimapolitiske tiltag de kommende år. Dette skyldes, at nationale tiltag i kvotesektoren kan påvirke virksomhedernes kvoteopsparing og dermed kvoteoverskuddet. Idet kvoteoverskuddet påvirker optaget af kvoter i MSR, kan nationale tiltag også påvirke, hvor mange kvoter der annulleret i MSR.

To typer nationale tiltag betragtes: tiltag, som reducerer kvoteefterspørgslen, og nationale kvoteannulleringer. Førstnævnte tiltag inkluderer støtte til VE, en national afgift på CO₂e i kvotesektoren og støtte til energibesparelser.

Før den nye aftale vil tiltag, som reducerer kvoteefterspørgslen, ingen effekt have på den samlede CO₂e-udledning på lang sigt.⁷ Dette skyldes, at udledningen på lang sigt er bestemt af det samlede antal udstedte kvoter. Efter den nye aftale kan denne type tiltag imidlertid påvirke, hvor mange kvoter der annulleres i MSR. Modelberegninger indikerer, at denne type tiltag over de kommende år reducerer den akkumulerede CO₂e-udledning på både kort og lang sigt efter den nye aftale.

Derimod kan aftalen reducerer effekten af nationale kvoteannulleringer. Før den nye aftale reducerer nationale kvoteannulleringer den samlede CO₂e-udledning i EU ETS en-til-en på lang sigt, idet annulleringerne sænker loftet over de samlede CO₂e-udledninger. Modelberegninger indikerer, at nationale kvoteannulleringer de kommende år har en mindre end en-til-en effekt efter den nye aftale. Dette skyldes, at nationale kvoteannulleringer reducerer kvoteoverskuddet og dermed kvoteoptaget og annulleringerne i MSR. Dermed svækker den nye aftale effekten af nationale kvoteannulleringer.

Endelig kan en foreløbig aftale imellem Ministerrådet og Europa-Parlamentet styrke effekten af nationale kvoteannulleringer, som foretages i forbindelse med fleksibilitetsmekanismen for ikke-kvotesektoren. Aftalen bevirker, at kvoter, der annulleres i forbindelse med fleksibilitetsmekanismen, fortsat tæller med i det opgjorte kvoteoverskud. Dermed reducerer annulleringerne ikke optaget i MSR. Modelberegninger viser, at denne type kvoteannulleringer har en mere end en-til-en effekt på den samlede CO₂e-udledning på lang sigt. Dette skyldes, at virksomhederne øger deres

vurderes. Derudover antages det, at den lineære reduktionsfaktor holdes konstant fra 2021. Reduktionen på 4-16 pct. i 2100 skyldes alene, at kvoter permanent fjernes fra MSR.

⁷ Hvis den teknologiske udvikling reducerer kvoteefterspørgslen tilstrækkeligt hurtigt, kan man også få en effekt på lang sigt, jf. Klimarådet (2017). Dette kræver dog en hurtig teknologisk udvikling over en meget lang periode. Modelberegninger præsenteret i dette notat, som er kalibreret ud fra historiske data, indikerer, at tiltag, som reducerer kvoteefterspørgslen, ingen effekt har på den langsigtede akkumulerede CO₂e-udledning i EU ETS i fravær af det nye loft over kvoter i MSR.

kvoteopsparing på kort sigt som reaktion på, at færre kvoter er tilgængelige senere i forløbet på grund af annulleringerne.

Nærværende analysen kan imidlertid ikke afgøre, hvilken type nationalt tiltag, der mest omkostningseffektivt reducerer CO₂e-udledningen på EU-plan. En sådan analyse kræver en modellering af tiltagenes lækageeffekter udenfor kvotesystemet via udenrigshandlen. Derudover bør andre hensyn end blot de direkte omkostninger medregnes. En VE-udbygning har f.eks. andre ulemper i forhold til kvoteannulleringer: den kræver plads, den kan reducere herlighedsværdien af naturen og giver anledning til yderligere udsving i elprisen. Endelig er det afgørende, hvilken tidsperiode tiltagene antages at virke over. For eksempel vil nationale kvoteannulleringer være mere effektive, hvis de foretages, når kvoteoverskuddet er lille nok til, at MSR ikke længere optager kvoter.

Trods forskelle i modelleringsstrategier og -antagelser leder nærværende analyse på flere områder frem til lignende kvalitative konklusioner som Klimarådet (2017). Begge analyser finder, at MSR sandsynligvis optager store mængder kvoter frem til starten af 2030'erne. Derudover viser begge analyser, at store mængder kvoter sandsynligvis annulleres i MSR som følge af den nye aftale fra november 2017.⁸ Endelig lægger de modelberegnedede effekter af national klimapolitiske tiltag relativt tæt, som vist i afsnit 6.

De beregnede effekter på den samlede CO₂e-udledning i EU ETS af den nye aftale er overordnet set konsistente med andre resultater fra litteraturen. Sandbag (2017) finder, at ca. 3 mia. kvoter annulleres i 2023 som følge af den nye aftale, og at kvoteannulleringerne fortsætter derefter. Perino og Willner (2017) finder også, at der annulleres store mængder kvoter i 2023 som følge af den nye aftale. Men deres beregninger indikerer, at der annulleres væsentlig færre kvoter i MSR på lang sigt sammenlignet med nærværende analyse. Dette skyldes primært forskellige antagelser om den teknologiske udvikling. I nærværende analyse antages det, at VE-teknologier over de kommende årtier udvikles relativt hurtigere end teknologier baseret på fossilt brændsel. Perino og Willner antager derimod implicit, at det relative teknologiske niveau imellem de to teknologityper er konstant. Dermed reduceres kvoteefterspørgslen alene på grund af kvoteprisen i deres model. Dette medfører en relativt langsom reduktion i CO₂e-udledningerne og dermed en hurtigere reduktion i kvoteoverskuddet. Dermed stopper optaget i MSR tidligere, og der annulleres færre kvoter i MSR.

Dette dokumentationsnotat fortsætter på følgende måde. Afsnit 3 beskriver modellen, og afsnit 4 beskriver, hvordan modellen kalibreres. Modelanalysen foretages i afsnit 5. I afsnit 5.1 og 5.2 vises simulationsresultater for perioden 2017-2100 under forskellige reformscenarier: de nuværende regler (baseline) og efter den nye aftale fra november 2017. I afsnit 5.3 analyseres effekterne på den akkumulerede CO₂e-udledning af

⁸ Den nye aftale fra november 2017 svarer til Ministerrådets reformforslag i Klimarådet (2017).

nationale klimapolitiske tiltag i kvotesektoren før og efter den nye aftale. Afsnit 6 sammenligner den her præsenterede model med Klimarådets model, og notatet afsluttes med en følsomhedsanalyse i afsnit 7.

3 Model

Modellen er designet til at prædiktere udviklingen i CO₂e-udledningen, kvoteoverskuddet og kvoteprisen i EU ETS. Specielt lægges der vægt på, at virksomheder i kvotesektoren er fremadskuende. De løser et dynamisk optimeringsproblem for at beregne deres optimale adfærd over hele perioden 2017-2125.⁹ Modellen er begrænset til stationære installationer, som dækker ca. 97 pct. af CO₂e-udledningerne i kvotesektoren, jf. Det Europæiske Miljøagentur (2017a).¹⁰

To scenarier betragtes i det følgende. Det første er et baselinescenarie, hvor regelændringerne for MSR fra den nye aftale ikke medtages. I det andet scenarie indføres regelændringerne for MSR fra den nye aftale. Begge scenarier medtager forhøjelsen af den lineære reduktionsfaktor for nye kvoteudstedelser. Dermed kan konsekvenserne af de nye regler for MSR beregnes som en afvigelse fra baseline.

3.1 Overblik

Modellen er formuleret i diskret tid med tidsindekset: $t = 1, 2, \dots, T$, hvor den første tidsperiode ($t = 1$) svarer til år 2017. Modellen består basalt set af to elementer: en repræsentativ virksomhed i kvotesektoren og et sæt administrative regler for kvotesystemet.

Den repræsentative virksomhed repræsenterer, som navnet antyder, alle kvoteefterspørgende virksomheder. Men virksomheden repræsenterer f.eks. ikke virksomheder, som producerer el via VE. Virksomheden maksimerer nutidsværdien af sin profitstrøm over perioden. Drivhusgasudledning er et uundgåeligt biprodukt af virksomhedens produktion. Virksomheden får tildelt kvoter efter det prædefinerede administrative system, og virksomheden må opgive en kvote for hver enhed emission. Dermed lægger kvotesystemet et loft over virksomhedens akkumulerede udledning på lang sigt. Virksomhedens dynamiske optimeringsproblem består derfor i at dele emissionen ud på den mest profitoptimerende måde, givet de begrænsninger, som kvotesystemets implicerer.

De administrative regler for kvotesystemet bestemmer, hvordan kvoter allokeres til den repræsentative virksomhed, samt hvornår kvoter optages i og trækkes ud af MSR. I baselinescenariet gælder de nuværende regler samt den af EU-Kommissionen,

⁹ Det dynamiske optimeringsproblem løses for perioden 2017-2125. Alle kvoter er opbrugt i 2125 i alle simulationer, hvormed virksomhedernes adfærd ikke ville påvirkes af en længere tidshorisont end den benyttede. Simulationsresultaterne afrapporteres fra 2017 til 2100, idet den sidste kvote typisk er brugt indenfor denne periode.

¹⁰ Der antages, at nettoefterspørgslen efter kvoter fra luftfartsindustrien er nul. I 2016 var nettoefterspørgslen fra luftfartsindustrien på 23 mio. kvoter, jf. Det Europæiske Miljøagentur (2017a). Til sammenligning udgjorde disse 26 mio. kvoter blot 1,5 pct. af det samlede kvoteudbud i 2016.

Europa-Parlamentet og Ministerrådet foreslåede forhøjelse af den lineære reduktionsfaktor for kvoteudstedelsen startende i 2021.

Derudover forekommer en eksogen teknologisk udvikling, som reducerer efterspørgslen efter goder produceret i kvotesektoren. For eksempel vil teknologiske fremskridt indenfor VE reducere efterspørgslen efter el produceret af kulkraftværker. Der vil dog også være teknologiske fremskridt, der reducerer omkostninger forbundet med den repræsentative virksomheds produktion. Det antages imidlertid, at der er relativt hurtigere teknologisk udvikling indenfor grønne teknologier end inden for teknologier, der udleder drivhusgasser, og at den første effekt derfor dominerer. Denne antagelse beskrives i flere detaljer i afsnit 3.4. Den repræsentative virksomhed, som repræsenterer alle kvoteefterspørgende virksomheder, vil derfor samlet set opleve, at den teknologiske udvikling påvirker dens profit negativt. Når der i det følgende refereres til den teknologiske udvikling, refereres der således primært til de hurtigere teknologiske fremskridt udenfor de modellerede virksomheder.

Det skal bemærkes, at den repræsentative virksomhed tager kvoteallokeringerne for givet, trods sin egen effekt på kvoteallokeringerne via kvoteoverskuddet og MSR. Ræsonnementet er som følger. Individuelle virksomheder i EU ETS har en meget lille effekt på det samlede kvoteoverskud. Disse virksomheder medtager derfor ikke deres egen effekt på kvoteoverskuddet og dermed kvoteallokeringerne via MSR, når de planlægger deres emissionssti. Idet alle individuelle virksomheder opfatter kvoteallokeringerne som eksogent givet, gør den repræsentative virksomhed det også.

3.2 Den repræsentative virksomhed

Den repræsentative virksomheds profit afhænger dels af dens produktionsniveau og dels af det teknologiske niveau. Lad virksomhedens profit i periode t være givet ved funktionen $f(e_t, A_t)$, hvor e_t er virksomhedens CO₂e-udledning, og A_t er det relative teknologiske niveau imellem VE-teknologier og teknologier baseret på fossilt brændsel. Konkret vil et fald i A_t reflektere en stigning i det teknologiske niveau for VE-teknologier relativt til teknologier baseret på fossilt brændsel.¹¹

Det er ikke udledningen af drivhusgasser, som i sig selv øger virksomhedens produktion, men derimod brugen af fossilt brændsel. En enhed fossilt brændsel er normaliseret således, at en enhed fossilt brændsel brugt i produktionen svarer til en enhed emission. Dermed bliver udledningen af drivhusgasser indirekte en produktionsfaktor.¹² Givet det teknologiske niveau, er virksomhedens optimale drivhusgasudledning til en kvotepris på nul givet ved \bar{e}_t . Denne udledning er et endeligt tal, idet emissionen kommer fra fossilt brændsel, som har en positiv pris, og idet

¹¹ Variablen A_t fanger reelt flere faktorer, som påvirker efterspørgslen efter varer produceret af den repræsentative virksomhed. Dette inkluderer en positiv effekt på efterspørgslen fra den økonomiske vækst samt en negativ effekt fra den relativt hurtigere udvikling inden for VE-teknologier.

¹² Substitution imellem brændselstyper er indirekte medtaget via det relative teknologiske niveau samt profitfunktionens konkavitet.

produktionsaktiviteten i sig selv også indebærer andre omkostninger, der ligger udenfor modellen. Det antages derfor, at $f(e_t, A_t)$ er voksende i e_t for $e_t < \bar{e}_t$ og aftagende i e_t for $e_t > \bar{e}_t$.

Virksomheden får tildelt y_t kvoter af EU i periode t , og virksomhedens beholdning af kvoter i starten af periode t er lig B_t . Idet der kun er en virksomhed i modellen, er B_t også lig det samlede kvoteoverskud ultimo periode $t-1$ og primo periode t . Virksomheden har en positiv beholdning af kvoter i starten af periode 1. Beholdningen i periode 2 er lig beholdningen i periode 1 plus tildelte kvoter i periode 1 fratrukket emissionen i periode 1. Samme princip gælder for de efterfølgende perioder, hvormed kvotebeholdningen er givet ved: $B_{t+1} = B_t + y_t - e_t$.

Den repræsentative virksomhed optimerer nutidsværdien af profitstrømmen givet kvotesystemets restriktioner. Virksomhedens dynamiske optimeringsproblem er givet ved:

$$\max_{e_t \geq 0} \sum_{t=1}^T \left(\frac{1}{1+r} \right)^{t-1} f(e_t, A_t) \quad \text{st.} \quad B_{t+1} = B_t + y_t - e_t, \quad B_t \geq 0,$$

givet $B_1 > 0$, $\{y_t\}_{t=1}^T$ og $\{A_t\}_{t=1}^T$,

hvor $r > 0$ er virksomhedens afkastkrav.

Der er ingen eksplicit kvotepris i modellen. Kvoteprisen er derimod implicit givet via skyggeprisen for kvoter. Hvis kvoteprisen er større end skyggeprisen, vil den repræsentative virksomhed ønske at sælge kvoter, og hvis kvoteprisen er mindre end skyggeprisen, vil virksomheden efterspørge kvoter. Dermed er skyggeprisen den kvotepris, som sikrer markedsligevægt på et marked for kvoter.

I modellen kan kvoteprisen dermed beregnes via førsteordensbetingelserne for det dynamiske optimeringsproblem:

$$p_t^k = f'_e(e_t, A_t) \quad \text{og} \quad p_{t+1}^k = (1+r)p_t^k,$$

hvor p_t^k er skyggeprisen på emissioner og dermed kvoteprisen, og $f'_e(e_t, A_t)$ er den førsteafledte af $f(e_t, A_t)$ mht. e_t . Bemærk at disse førsteordensbetingelser kun er gældende for indre løsninger.

Førsteordensbetingelserne viser to ting om kvoteprisen. For det første er kvoteprisen bestemt af marginalprofitten mht. emissioner. Basalt set viser denne første betingelse, at den marginale omkostning ved at benytte en kvote skal være lig den marginale gevinst. Denne betingelse gælder også i fravær af et kvoteoverskud. For det andet vokser kvoteprisen med en rate lig afkastkravet, når der er et kvoteoverskud. For at gemme kvoter skal virksomheden have et afkast svarende til sit afkastkrav, r . Hvis kvoteprisen vokser hurtigere, vil virksomheden ønske at gemme flest mulig kvoter, og

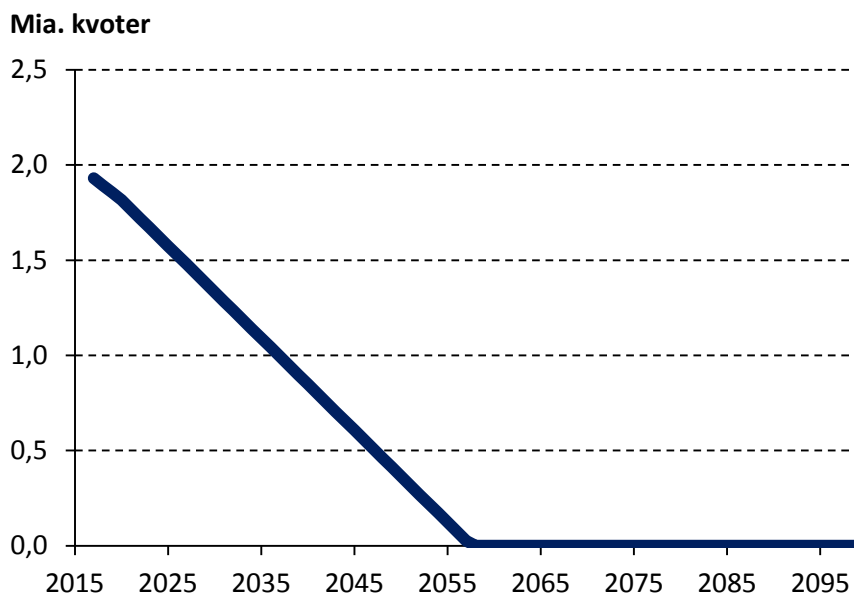
hvis kvoteprisen vokser langsommere, vil virksomheden ikke gemme kvoter. Her er det værd at bemærke, at kvoteprisen ikke vokser med afkastkravet i fravær af et kvoteoverskud. I stedet bestemmes kvoteprisen af den marginale profit ved udledninger, hvor udledningerne er lig alle tilgængelige kvoter i perioden.

3.3 Nyudstedte kvoter og MSR

EU udsteder hver periode et antal nye kvoter. I baselinescenariet er de nye kvoteudstedelser givet ud fra de nuværende EU-regler samt den af EU-Kommissionen, Europa-Parlamentet og Ministerrådet foreslåede forhøjelse af den lineære reduktionsfaktor for kvoteudstedelsen startende i 2021.

I 2013 blev der udstedt lige over 2 mia. kvoter, og fra 2013 til 2020 er dette antal blevet reduceret med ca. 38,3 mio. kvoter p.a. Dette svarer til en årlig reduktion på 1,74 pct. af det gennemsnitlige årlige antal nyudstedte kvoter for perioden 2008-12. Denne lineære reduktionsfaktor antages at blive hævet til 2,2 pct. fra 2021, hvilket svarer til ca. 48,4 mio. kvoter p.a. Stien for nyudstedte kvoter er vist i figur 1.

Figur 1. Nyudstedte kvoter i EU ETS, 2017-2100



Anm.: Kvoteudstedelserne er beregnet ud fra en forhøjet lineær reduktionsfaktor fra 2021, som foreslået af EU-Kommissionen, Europa-Parlamentet og Ministerrådet.

Kilde: EU-Kommissionen (2017a) samt egne beregninger.

Regler for optag i og udtag fra MSR er illustreret i figur 2. X-aksen viser forrige års kvoteoverskud, og y-aksen viser dette års kvoteoptag i MSR. Nyudstedte kvoter allokeres til MSR, hvis kvoteoverskuddet det foregående år er større end 833 mio. kvoter. Specifikt optages, hvad der svarer til 12 pct. af forrige års kvoteoverskud. Hvis forrige års kvoteoverskud er på imellem 400 og 833 mio. kvoter, forbliver beholdningen i MSR uændret. Er der derimod et kvoteoverskud det forrige år på under 400 mio. kvoter, lukkes der 100 mio. kvoter ud af MSR.

To differensligninger kan beskrive dette administrative kvotesystem. Før disse to ligninger præsenteres, er det brugbart at definere fire dummyvariable, som angiver, hvorvidt en given regel træder i kraft. Lad indikatorvariablen $I(\cdot)$ være lig en, hvis udsagnet i parenteser er sandt, og nul, hvis udsagnet er falsk. Definer de fire dummyvariable:

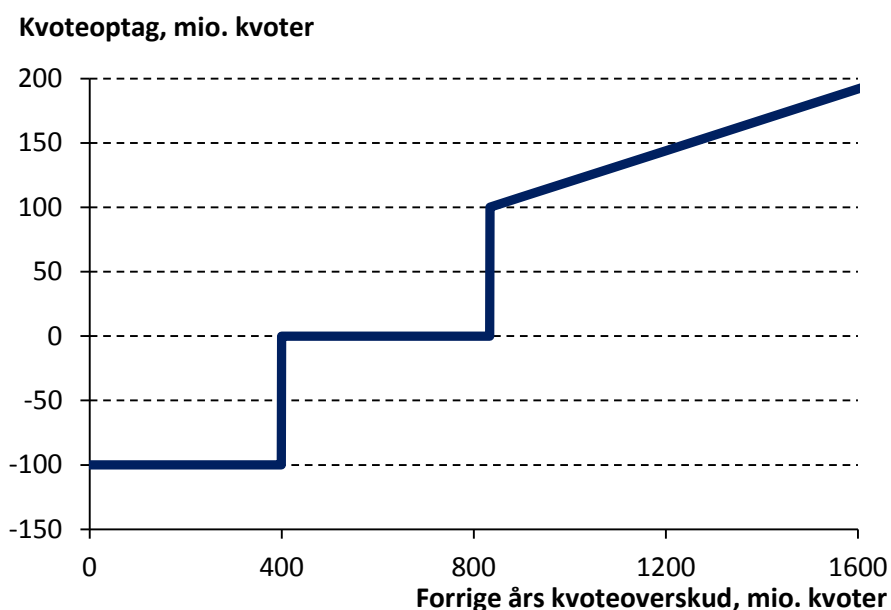
$$\begin{aligned} D_t^{U1} &= I(B_t > 0,833 \wedge y_t^s \geq 0,12 \cdot B_t), \\ D_t^{U2} &= I(B_t > 0,833 \wedge y_t^s < 0,12 \cdot B_t), \\ D_t^{L1} &= I(B_t < 0,400 \wedge M_t \geq 0,1), \text{ og} \\ D_t^{L2} &= I(B_t < 0,400 \wedge M_t < 0,1), \end{aligned}$$

hvor y_t^s er nye kvoteudstedelser i periode t , og M_t er kvotebeholdningen i MSR primo periode t . Det bemærkes, at forrige års kvoteoverskud er lig B_t , som både er kvoteoverskuddet ultimo periode $t - 1$ og primo periode t .

Den første ligning beskriver udviklingen i tilgængelige kvoter på markedet, y_t .

$$y_{t+1} = y_{t+1}^s + 0,1 \cdot D_t^{L1} + M_t \cdot D_t^{L2} - 0,12 \cdot B_t \cdot D_t^{U1} - y_{t+1}^s \cdot D_t^{U2}.$$

Figur 2. Regler for kvoteoptag i MSR før den nye aftale



Kilde: EU (2015).

Den anden differensligning beskriver mængden af kvoter i MSR:

$$M_{t+1} = M_t - 0,1 \cdot D_t^{L1} - M_t \cdot D_t^{L2} + 0,12 \cdot B_t \cdot D_t^{U1} + y_{t+1}^s \cdot D_t^{U2}.$$

Modellen kan ikke fuldstændig fange timingen for kvoteoptaget i MSR, idet modellens tidsindeks er årligt. Reglerne for MSR omfatter derimod specifikke datoer indenfor hvert år. Det vurderes, at dette forhold kun har en meget lille effekt på resultaterne præsenteret nedenfor.

3.4 Teknologisk udvikling

Den teknologiske udvikling har to modsatrettede effekter på den repræsentative virksomheds profit. På den ene side reduceres efterspørgslen efter de goder, som den repræsentative virksomhed producerer. For eksempel vil billigere el fra vindmøller og solceller reducere efterspørgslen efter el produceret af den repræsentative virksomhed. På den anden side vil den teknologiske udvikling gøre den repræsentative virksomhed mere effektive således, at virksomheden kan opnå en højere profit pr. enhed drivhusgasudledning. Samlet set antages det, at den første effekt dominerer, hvormed en stigning i det teknologiske niveau alt andet lige reducerer profitten for den repræsentative virksomhed. Dette skyldes en "catching-up" effekt. Denne catching-up effekt reflekterer, at VE-teknologier som udgangspunkt er relativt mindre avancerede i forhold til teknologier baseret på fossilt brændsel. Det er derfor som udgangspunkt lettere at øge effektiviteten af disse teknologier.

Det teknologiske niveau, A_t , er bestemt ud fra differensligningerne:

$$A_{t+1} = A_t(1 - g_t), \quad A_1 > 0,$$
$$g_{t+1} = \frac{g_t}{1 + \kappa}, \quad g_1 > 0, \quad \kappa \geq 0.$$

Bemærk at A_t måler det *relative* teknologiske niveau imellem VE-teknologier og teknologier baseret på fossilt brændsel, således at et lavere A_t reflekterer et relativt højere teknologiske niveau for VE-teknologier. Differensligningerne viser således, at VE-teknologier udvikles relativt hurtigere end teknologier baseret på fossilt brændsel.

Parameteret κ reflekterer, hvor hurtigt catching-up effekten udhules. Når $\kappa = 0$ reduceres A_t årligt med en rate på g_1 . Dermed reduceres catching-up effektens styrke ikke over tid. Hvis κ derimod er større end nul, reduceres A_t med $100 \cdot \kappa$ pct. p.a. Intuitionen er, at de mest oplagte ideer og løsninger bliver udnyttet først, hvormed det over tid bliver relativt sværere for VE-teknologierne at hale ind på de fossilt baserede teknologier.

3.5 Løsning af modellen

Når profitfunktionen er specificeret kan modellen løses numerisk via værdifunktion iteration (se Adda og Cooper 2003). Den eneste komplikation er, at den repræsentative virksomhed anser kvoteallokeringen for eksogent givet, mens virksomhedens adfærd påvirker kvoteallokeringen via kvoteoverskuddet og MSR.

Dette løses ved brug af en algoritme inspireret af Adda og Cooper (2003, s. 242-244). Algoritmen kan opdeles i fire trin.

1. Løs virksomhedens problem givet et gæt for kvoteallokeringen. Gættet noteres $\{\bar{y}_t\}_{t=1}^T$, som initialt sættes lig stien for nyudstedte kvoter.
2. Policyfunktionen for $\{e_t\}_{t=1}^T$ fra trin 1 benyttes til at simulere modellen, hvilket giver en sti for kvoteallokeringerne, som noteres $\{\hat{y}_t\}_{t=1}^T$.
3. Processen stoppes, hvis gættet for kvoteallokeringen essentielt er lig den simulerede allokering. Mere specifikt stoppes processen, hvis summen af kvadrerede afvigelser imellem $\{\bar{y}_t\}_{t=1}^T$ og $\{\hat{y}_t\}_{t=1}^T$ er tilstrækkelig lille. Det vil sige, at processen stopper hvis:

$$tol > \sum_{t=1}^T (\bar{y}_t - \hat{y}_t)^2,$$

hvor tol reflekterer, hvor stor afvigelsen må være, imellem den kvoteallokering virksomheden benytter i sin planlægning, og den faktiske kvoteallokering prædikeret af modellen.

4. Hvis processen ikke er stoppet i trin 3 sættes $\{\bar{y}_t\}_{t=1}^T$ lig $\{\hat{y}_t\}_{t=1}^T$, og processen gentages fra trin 1.

Forsøg med en række forskellige profitfunktioner og parameterverdier peger på, at algoritmen sikrer, at summen af kvadrerede afvigelser konvergerer hurtigt imod nul.

3.6 Specificering af profitfunktion

Når modellen skal løses numerisk, er man nødt til at specificere en konkret funktionel form for profitfunktionen. I kvotesektoren vil der være virksomheder, som relativt billigt kan reducere deres drivhusgasudledninger, mens det vil være meget omkostningsfuldt for andre virksomheder. Den inverse efterspørgselsfunktion for kvoter bør derfor være relativt mere elastisk for en lav kvotepris og relativt mindre elastisk for en høj kvotepris. Dette opnås ved at lade marginalprofiten være højere ved lave emissionsniveauer og relativt lavere ved høje emissionsniveauer.

Den konkrete profitfunktion, som benyttes i hovedspecifikationen, og som opfylder de ovennævnte egenskaber, er givet ved:

$$f(e_t, A_t) = A_t[\gamma(e_t + \varphi)^\alpha - \delta e_t - \omega] - p^f e_t, \quad 0 < \alpha < 1, \quad \gamma, \varphi, \delta, \omega, p^f > 0$$

hvor $\gamma A_t (e_t + \varphi)^\alpha$ er værdien af produktionen, $\delta A_t e_t$ er de variable omkostninger forbundet med produktionen fratrukket ressource inputtet, $A_t \omega$ er de faste omkostninger, p^f er en konstant pris på fossilt brændsel, og $p^f e_t$ er omkostningerne til fossilt brændsel. Det antages at $\omega = \gamma \varphi^\alpha$. Dermed bliver profitten nul, når virksomheden ikke udleder drivhusgasser. Antagelsen $\varphi > 0$ sikrer, at marginalproduktiviteten af det fossile input ikke er uendeligt, når det fossile input går

imod nul. Dermed efterspørger virksomheden ikke nødvendigvis kvoter over hele den relevante periode.

I fravær af kvotesystemet er udledningen givet ved:¹³

$$\bar{e}_t = \left(\frac{\alpha \gamma A_t}{A_t \delta + p^f} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} - \varphi. \quad (1)$$

Det bemærkes, at \bar{e}_t falder, når A_t falder, hvilket er intuitivt, idet et faldende A_t repræsenterer en forbedring af de konkurrerende grønne teknologier. Modellen giver således en klar prædiction for emissionsstien før kvotesystemets indførelse i 2005, hvor ændringer i de årlige emissioner tilskrives ændringer i den relative teknologiske udvikling. Denne prædiction benyttes, når modellen skal kalibreres.

Den inverse efterspørgselsfunktion er et direkte resultat af førsteordensbetingelsen mht. e_t , som er vist i afsnit 3.2:

$$p_t^k = A_t [\alpha \gamma (e_t + \varphi)^{\alpha-1} - \delta] - p^f. \quad (2)$$

4 Kalibrering

For at opnå plausible prognoser for udviklingen på kvotemarkedet kalibreres modellen således, at den kan matche historiske tendenser i kvotesektoren samt den nuværende markedssituation. Først fastsættes en række parametre, og derefter kalibreres de resterende parametre.

Virksomhedernes afkastkrav, r , sættes til 5 pct.¹⁴ Det teknologiske niveau normaliseres til 1 i 1990, og κ sættes lig 0,01. Beholdningen i MSR sættes til 1,550 mia. kvoter fra 2018, og kvoteoverskuddet primo 2017, B_1 , sættes til 1,693 mia. kvoter.^{15,16} Prisen på fossilt brændsel, p^f , sættes til 300 kr. pr. ton CO₂e.¹⁷ Endelig sættes φ til 1.¹⁸

¹³ Uden kvotesystemet er virksomhedens problem essentielt set statisk: virksomheden vil optimere sin profit hver periode mht. emissionen. Ligning (1) udledes ved at optimere $f(e_t, A_t)$ mht. e_t . Idet $f(e_t, A_t)$ er strengt konkav i e_t er løsningen unik.

¹⁴ Fell (2016) benytter et afkastkrav på 3 pct. p.a. Derimod benytter Silbye og Sørensen (2017) et afkastkrav på 10 pct. p.a. Valget af afkastkrav diskuteres i afsnit 6.4.

¹⁵ EU-Kommissionen (2015) vurderer, at der er imellem 550 og 700 mio. ikke-allokerede kvoter i 2020. Disse kvoter vil overgå til MSR efter de gældende regler. Derudover overføres 900 mio. kvoter til MSR i 2019 pga. back-loading. Det forventes derfor, at MSR indeholder 1,45-1,60 mia. kvoter i 2020. Herudfra antages det, at MSR initialt indeholder 1,550 mia. kvoter.

¹⁶ Kvoteoverskuddet ultimo 2016 og dermed primo 2017 var på 1,693 mia. kvoter, jf. EU-Kommissionen (2017).

¹⁷ Tallet er baseret på de fremskrevne kulpriser fra Energistyrelsen (2017). Prisen på fossilt brændsel skal således opfattes som en minimumspris i kr. pr. CO₂e-udledning, idet prisen på gas er højere målt i denne enhed.

¹⁸ Lavere værdier af φ giver højere værdier af α . Dette skyldes, at kalibreringsproceduren sikrer, at profitfunktionen har en vis konkavitet. Typisk øges konkaviteten af profitfunktionen med både α og φ . Kalibreringsproceduren har derfor en

Kalibreringsproceduren er delt op i to trin. I det første trin bestemmes parametrene α , δ og γ . Modellen skal kunne matche kvotesektorens udvikling før EU ETS indføres. I andet trin bestemmes \bar{g} , som er den teknologiske vækstrate fra 1990 til 1991. Ud fra denne vækstrate kan de resterende vækstrater samt A_t beregnes frem til 2125. Opdelingen i de to trin reflekterer, at man i trin 1 kan benytte analytiske udledninger til at bestemme målene, hvor man i trin 2 må løse hele det dynamiske system for at beregne emissionen og dermed kvoteprisen i 2017.

Tre mål benyttes i denne sammenhæng:

1. Emissionen i kvotesektoren i 2004, dvs. før indførelsen af EU ETS. Emissionen i 2004 var på ca. 2,3 mia. ton CO₂e.
2. Emissionen i kvotesektoren i 1990, som var på ca. 2,7 mia. ton CO₂e.
3. Kvoteprisen og den forventede CO₂e-udledning i EU ETS i 2017 skal ligge på den inverse efterspørgselsfunktion i 2017. Udledningen i 2017 forventes at være på ca. 1,7 mia. ton CO₂e, mens den gennemsnitlige kvotepris i 2017 sættes til 43 kr.¹⁹

Det første og andet mål beregnes via ligning (1), mens det tredje mål beregnes via ligning (2). Bemærk at det første og andet mål sikrer, at modellen matcher emissionsreduktionen i EU's kvotesektor før indførelsen af EU ETS. Fra 1990 til 2004 faldt CO₂e-udledningen i EU's kvotesektor med 12 pct. svarende til 0,9 pct. p.a.

De tre målværdier kan beregnes givet \bar{g} , α , δ og γ uden at løse den dynamiske model. Givet \bar{g} beregnes parametrene α , δ og γ ved at minimere summen af de tre kvadrerede afvigelser imellem faktiske og prædikerede målværdier. Idet tre parametre bestemmes via tre ligninger er løsningen til minimeringsproblemet unik.

Det andet trin består i at vælge en værdi for den teknologiske vækstrate \bar{g} , som sikrer, at modellen faktisk matcher kvoteprisen og den forventede udledning i 2017. Idet denne allokering ligger på den inverse efterspørgselsfunktion (givet tredje mål i første trin), kan man nøjes med at minimere den kvadrerede afvigelse imellem den faktiske og prædikerede kvotepris i 2017. I denne minimeringsprocedure simuleres hele modellen, og trin 1 i kalibreringsproceduren gennemføres for hver iteration.

Modellen kan med ubetydelige afvigelser matche kalibreringsmålene. Derudover matcher modellen stort set fuldstændigt den nuværende markedssituation. Mere specifikt ligger den nuværende kvotepris mindre end 0,01 pct. over målniveauet, mens den nuværende emission ligger mindre end 0,01 pct. under målniveauet.

tendens til at øge værdien af α , når φ reduceres, hvormed efterspørgselsfunktionen i store træk forbliver uændret. Modelberegningerne er derfor ikke følsomme overfor værdien af φ , så længe at α ikke tvinges meget tæt på 0 eller 1.

¹⁹ Alle udledningsniveauer for EU ETS er baseret på Det Europæiske Miljøagentur (2017b). Den gennemsnitlige kvotepris er beregnet ud fra EEX (2018).

Tabel 2 viser de parameterværdier, som kalibreringsproceduren leder frem til.

Tabel 2. Kalibrerede og antagne parameterværdier

α	0,186	$\omega^{b)}$	5264
γ	5264	\bar{g}	0,006
φ	1,000 ^{a)}	$\kappa^{a)}$	0,010
δ	39	$r^{a)}$	0,050

a) Eksogent fastsat.

b) Beregnes ud fra α , φ og γ , som angivet i afsnit 3.6.

Anm.: Tallene i tabellen er afrundede. Tal over 1 afrundes uden decimaler, imens tal under eller lig 1 afrundes med tre decimaler.

5 Modelanalyse

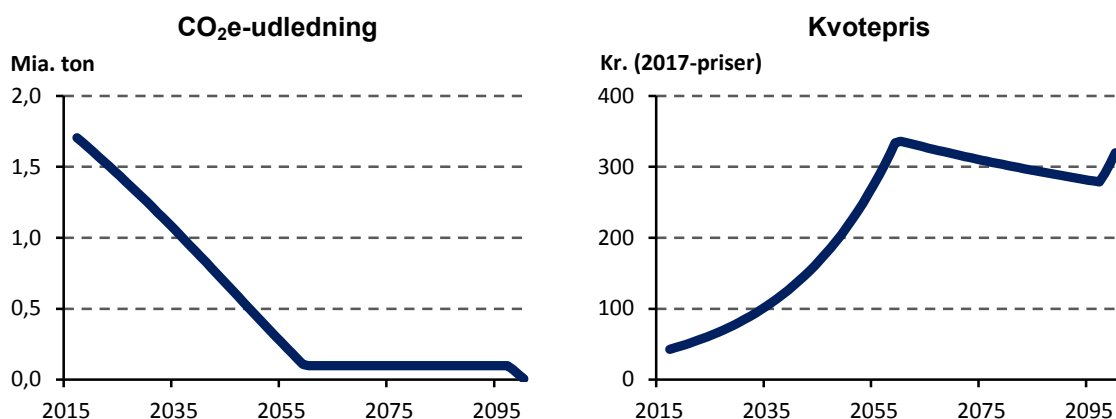
I dette afsnit præsenteres de modelberegnedede udviklingsforløb for CO₂e-udledningen, kvoteprisen, kvoteoverskuddet og beholdningen af kvoter i MSR. De beregnede modelforløb skal opfattes som illustrative, idet flere faktorer i modellen er behæftet med betydelig usikkerhed. Endvidere er beregningerne foretaget under antagelse om såkaldt frozen policy. Det vil sige, at EU ETS ikke reformeres yderligere efter 2017. I begge scenarier antages det, at den lineære reduktionsfaktor for kvoteudstedelser forhøjes som foreslået af EU-Kommissionen, Europa-Parlamentet og Ministerrådet for 4. fase af EU ETS, jf. Europa-Parlamentet (2018). Desuden antages det, at denne lineære reduktionsfaktor for kvoteudstedelser fortsætter efter 2030. Dermed udstedes den sidste kvote i 2057. Forskellen imellem baselinescenariet og scenariet for den nye aftale viser således konsekvenserne af de ændrede regler for MSR.

5.1 Baselinescenariet

Figur 3 viser udviklingen i CO₂e-udledningen og kvoteprisen fra 2017 til 2100. Udledningen falder gradvist over tid indtil 2060. Dette fald er drevet af to effekter. For det første reducerer den teknologiske udvikling efterspørgslen efter goder produceret af den repræsentative virksomhed. For det andet vil virksomheder i kvotesektoren prioritere at bruge flere kvoter i starten af perioden, hvor nutidsværdien af gevinsterne er højest. Et højere afkastkrav vil derfor i sig selv øge reduktionen i emissionsniveauet over tid, når kvoteloftet er bindende. Effekten er derimod fraværende, når kvoteloftet ikke er bindende, jf. ligning (1).

Der er også en modsatrettet effekt. Når emissionsniveauet falder, stiger marginalprofitten - alt andet lige - på fossilt brændsel, hvilket bremser faldet i emissionsniveauet. Denne effekt er imidlertid ikke stærk nok til at opveje de to førnævnte effekter.

Figur 3. Baseline CO₂e-udledning og kvotepris

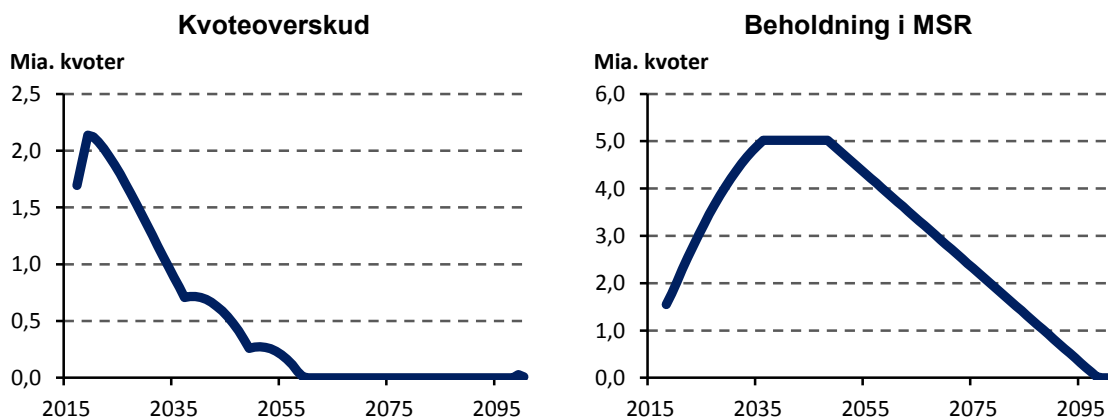


Så længe der er et kvoteoverskud, er vækstraten i kvoteprisen lig afkastkravet, jf. ligning (2). Kvoteprisen falder kun langsomt fra 2060, hvor kvoteoverskuddet er opbrugt. Dette skyldes, at kvoteprisen er lig marginalprofitten for udledninger, som reduceres årligt på grund af den teknologiske udvikling. Men den teknologiske udvikling går relativt langsomt i anden halvdel af det 21. århundrede, da catching-up effekten for VE-teknologier reduceres årligt.

Efter 2060 udledes der 100 mio. ton CO₂e p.a. Dette skyldes, at der ikke udstedes flere kvoter fra 2058, at kvoteoverskuddet er væk fra 2060, og at der lukkes præcis 100 mio. kvoter ud af MSR hvert år. I 2099 er MSR udtømt, og udledningerne falder til nul.

Udviklingen i kvoteoverskuddet afspejler den repræsentative virksomheds ønske om at udjævne CO₂e-udledningerne over tid. Kvoteoverskuddet stiger i 2018 og 2019. Herefter reduceres kvoteoverskuddet langsomt som følge af kvoteoptaget i MSR. Kvoteoverskuddet forbliver over 833 mio. kvoter indtil 2036, hvor beholdningen i MSR er på 5 mia. kvoter. Reservens størrelse forbliver konstant i 13 år, men i (primo) 2048 er kvoteoverskuddet under 400 mio. kvoter. Der lukkes derfor 100 mio. kvoter ud af MSR p.a. fra 2049. Dette fortsætter til 2099, hvor MSR er udtømt, jf. figur 4.

Figur 4. Baseline kvoteoverskud og beholdning i MSR

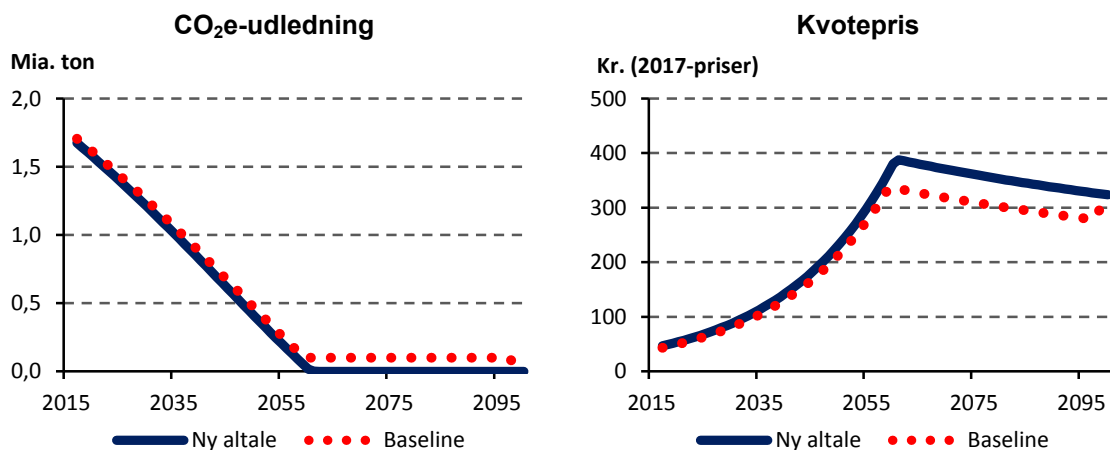


5.2 Den nye aftale

Den nye aftale fra november 2017 om 4. fase af EU ETS ændrer reglerne for MSR på to måder. For det første øges optagelsesprocenten i MSR fra 12 til 24 pct. indtil 2023. Derudover lægges der et loft over kvotebeholdningen i MSR. Mere specifikt annulleres de kvoter i MSR, som overstiger mængden af auktionerede kvoter året før. I det følgende antages det som udgangspunkt, at loftet over kvoter i MSR svarer til 57 pct. af de nyudstedte kvoter, som svarer til den andel af de nyudstedte kvoter, EU-Kommissionen foreslår auktioneres bort i 4. fase af EU ETS, jf. Europa-Parlamentet (2018).²⁰ Derudover påvirker optaget i og udtaget fra MSR mængden af auktionerede kvoter, jf. EU (2015). Konkret vil kvoter, som optages i MSR, komme fra den mængde kvoter, som EU-medlemsstaterne kan auktionere bort. På samme måde lægges de kvoter, som lukkes ud af MSR, til mængden af kvoter, som kan auktioneres bort af medlemsstaterne. Denne effekt medregnes, men den har kun en lille betydning for de beregnede forløb.

Figur 5 viser den simulerede udvikling i CO₂e-udledningen og kvoteprisen fra 2017 til 2100 efter den nye aftale implementeres samt i baselinescenariet. Den nye aftale medfører at udledningen falder med 1,9 pct. og at kvoteprisen stiger med 8,6 pct. i 2017. Dette skyldes, at kvoteannulleringerne øger kvoteknapheden på både kort og lang sigt. Kvoteprisstien ligger permanent højere efter den nye aftale sammenlignet med baseline. Derimod ligger udledningerne permanent lavere. Specielt ligger udledningsniveauerne lavere efter 2060, hvor der ikke udledes CO₂e. Dette skyldes, at MSR ikke indeholder kvoter efter 2060, da de nye regler for MSR medfører kvoteannulleringer. Udledningsstien er derimod tæt på baseline inden 2060. Den akkumulerede CO₂e-udledning frem til 2060 er derfor kun 5,6 pct. (eller under 2 mia. ton) lavere efter den nye aftale sammenlignet med baseline.

Figur 5. CO₂e-udledning og kvotepris efter den nye aftale sammenlignet med baseline

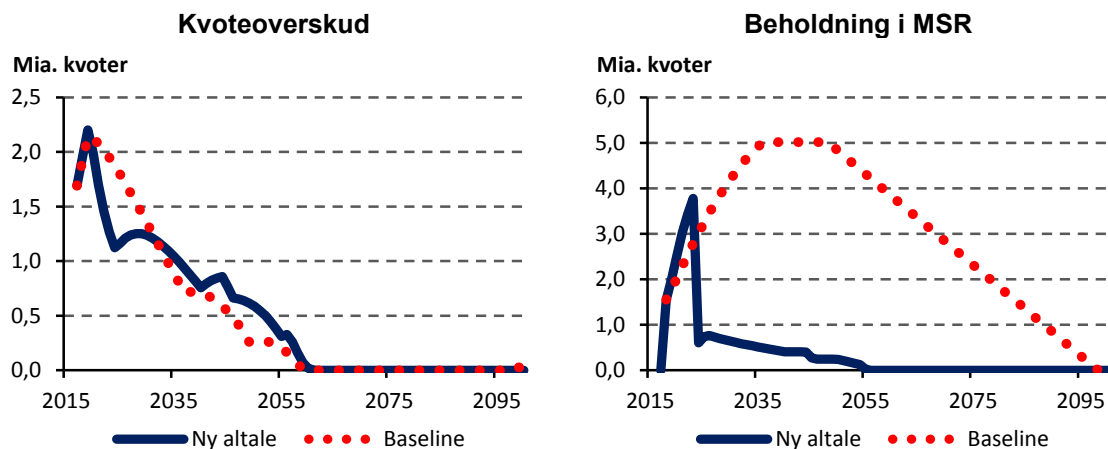


²⁰Derudover korrigeres der for den påvirkning optag i eller udtag fra MSR har på loftet over kvoter i MSR. Denne korrektion er motiveret af, at de kvoter som optages i eller udtages fra MSR hhv. trækkes fra eller lægges til den mængde af kvoter medlemsstaterne kan auktionere væk et givent år, jf. EU (2015).

Figur 6 viser kvoteoverskuddet og kvotebeholdningen i MSR fra 2017 til 2100 efter den nye aftale implementeres samt i baselinescenariet. Den nye aftale bevirker, at kvoteoverskuddet reduceres hurtigt fra 2019 til 2023 i forhold til baseline. Dette skyldes den midlertidigt høje optagelsesprocent til MSR. For at imødegå den kvoteknaphed den nye aftale medfører, sparer den repræsentative virksomhed ekstra mange kvoter op i 2018 og 2019. Virksomheden forsøger at udglatte sin emissionssti på grund af profitfunktionens konkavitet, hvilket resulterer i den bølgede udvikling i kvoteoverskuddet. Kvoteoverskuddet afspejler derfor den nødvendige opsparring for at sikre en glat emissionssti. Bølgerne er primært et resultat af de prædefinerede tærskelniveauer for optag i MSR, ændringen i optagelsesprocenten i 2023 samt udviklingen i antallet af nyudstedte kvoter.

I 2023 indtræder reglen om kvoteannulleringer. Kun ca. 1 mia. kvoter forventes auktioneret i 2023, hvormed ca. 2,7 mia. kvoter i MSR annulleres ultimo 2023. Herefter fortsætter kvoteannulleringerne i MSR, idet loftet over MSR reduceres over tid, idet mængden af nyudstedte kvoter, og dermed mængden af auktionerede kvoter, reduceres årligt. Kvoteoverskuddet forbliver over 400 mio. kvoter indtil (primo) 2054. I 2055 og 2056 lukkes der ca. 125 mio. kvoter ud af MSR, hvorefter reserven er helt udtømt. Disse 125 mio. kvoter er de eneste kvoter, som lukkes ud af reserven.

Figur 6. Kvoteoverskud og beholdning i MSR efter den nye aftale sammenlignet med baseline



Den nye aftale har en relativt større effekt på den akkumulerede CO₂e-udledning på lang sigt i forhold til det korte og mellemlange sigt. Den akkumulerede CO₂e-udledning fra 2017 til 2100 reduceres med 14 pct., mens reduktionen indtil 2050 er på ca. 4 pct., jf. tabel 3.

Tabel 3. Effekten på den akkumulerede CO₂e-udledning af den nye aftale

	2030	2050	2100
----- procent -----			
	-2,6	-4,3	-13,8

Anm.: Effekterne er beregnet i forhold til baselinescenariet.
Kilde: Egne beregninger.

Som vist i baselinescenariet bliver kvoter optaget i MSR selv i fravær af kvoteannulleringer ikke tilgængelige for markedet før efter 2050. Dermed øger kvoteannulleringerne i MSR primært kvoteknapheden langt ude i fremtiden, hvor kvoterne har en relativt lav nutidsværdig. Den repræsentative virksomhed ændrer derfor kun i begrænset omfang sine emissioner i starten af perioden som reaktion på aftalen. Dette forklarer den relativt mindre effekt på den akkumulerede CO₂e-udledning på kort og mellemlang sigt af den nye aftale.

5.3 Danske tiltag i kvotesektoren

Dette afsnit analyserer effekten af danske klimapolitiske tiltag i kvotesektoren. Specifikt analyseres to typer tiltag: tiltag, som reducerer kvoteefterspørgslen, og nationale kvoteannulleringer. Det førstnævnte tiltag omtales herfra som efterspørgseltiltaget. Eksempler på dette efterspørgseltiltag inkluderer støtte til VE, en national CO₂e-afgift i kvotesektoren samt støtte til energibesparelser. Kvoteannulleringerne reducerer mængden af nyudstedte kvoter allokeret til den repræsentative virksomhed, mens efterspørgseltiltaget reducerer efterspørgslen efter goder produceret i kvotesektoren midlertidigt, hvilket svarer til en midlertidig reduktion i γ .

Som udgangspunkt betragtes et tiltag, som umiddelbart reducerer CO₂e-udledningen med 8 mio. ton ligeligt fordelt over perioden 2021-30. De 8 mio. ton svarer til den mængde kvoteannulleringer Danmark kan benytte som fleksibilitetsmekanisme i ikke-kvotesektoren. Under kvoteannulleringspolitikken annulleres der 0,8 mio. kvoter p.a. over perioden 2021-30. Efterspørgseltiltaget modelleres som en ensartet reduktion i γ over perioden 2021-30. Den nødvendige reduktion i γ beregnes via ligning (2) og kvotepriserne for 2021-30 fra baselinescenariet. Dermed reducerer tiltaget CO₂e-udledningen med 0,8 mio. ton p.a. over perioden 2021-30 i fravær af ændringer i kvoteprisen. Tiltagets egentlige effekt er lidt mindre, da kvoteprisen reduceres som følge af tiltaget.²¹

Tabel 4 viser effekten på den akkumulerede CO₂e-udledning fra 2017 af de førnævnte politiske tiltag. Efterspørgseltiltaget reducerer den akkumulerede CO₂e-udledning fra 2017 til 2030 med 7,3 mio. ton. Reduktionen reduceres til under 6 mio. ton fra 2050. Efterspørgseltiltaget har derimod ingen effekt på lang sigt, hvor den akkumulerede CO₂e-udledning er givet af det samlede kvoteudbud. Intuitivt påvirkes den akkumulerede CO₂e-udledning på følgende måde. Efterspørgseltiltaget reducerer efterspørgslen efter kvoter, hvilket øger kvoteoverskuddet og dermed optaget i MSR. Idet den sidste kvote først forlader MSR i 2099, udskydes en andel af de 8 mio. ton CO₂e-udledning til efter 2099. Den repræsentative virksomhed bruger den sidste kvote i 2100, hvormed tiltaget ingen effekt har på den akkumulerede CO₂e-udledning herefter.

²¹ Det må forventes, at tiltag, som reducerer kvoteefterspørgslen, også medfører lækage af indenlandsk produktion og CO₂e-udledning til det øvrige EU via udenrigshandlen. De 8 mio. ton er derfor nettoeffekten, når denne lækageeffekt er fraregnet. Klimarådet betragter lignende reformer, og resultaterne er derfor umiddelbart sammenlignelige.

Som vist i tabel 4 reducerer kvoteannulleringerne den akkumulerede CO₂e-udledning fra 2017 til 2030 med under 1 mio. ton. Den akkumulerede CO₂e-udledning reduceres med under 3 mio. ton frem til 2090'erne. Den langsigtede effekt er derimod en-til-en, da kvoteannulleringerne reducerer det samlede udbud af kvoter på lang sigt, dvs. at den akkumulerede CO₂e-udledning reduceres med 8 mio. ton i 2100. I modsætning til efterspørgselstiltaget har kvoteannulleringerne en lille effekt de første mange år. Annulleringerne medfører en større kvoteknaphed, hvilket øger kvoteoverskuddet på kort sigt men reducerer kvoteoverskuddet i 2020'erne. Men da emissioner i starten af perioden er relativt mere værdifulde for virksomheden, påvirkes udledningerne kun svagt på kort og mellemlang sigt. Samlet reducerer annulleringerne optaget i MSR, hvormed den fulde effekt af tiltaget først kommer til udtryk kort før 2100, hvor MSR tømmes.

Tabel 4. Reduktion i akkumuleret CO₂e-udledning fra 2017 før den nye aftale fra november 2017 af et klimapolitisk tiltag, som umiddelbart reducerer den akkumulerede CO₂e-udledning med 8 mio. ton ligeligt fordelt over perioden 2021-30

	2017	2030	2050	2075	2100
	-----Mio. ton CO ₂ e-----				
Efterspørgselstiltag	0,0	7,3	5,9	5,3	0,0
Nationale kvoteannulleringer	0,0	0,7	2,1	2,8	8,0

Kilde: Egne beregninger.

De generelle mekanismer og kvalitative konklusioner er derfor meget lig dem, som Klimarådet (2017) fremhæver. Efterspørgselstiltaget kan udskyde CO₂e-udledninger mange årtier, men tiltaget ændrer ikke den akkumulerede CO₂e-udledning på lang sigt. Derimod har kvoteannulleringer en lille effekt på kort sigt, mens annulleringerne har en en-til-en effekt på den akkumulerede CO₂e-udledning på lang sigt.

Tabel 5 viser effekten på den akkumulerede CO₂e-udledning af de samme klimapolitiske tiltag som i tabel 4 efter den nye aftale fra november 2017. Generelt findes de samme tidsforskydende implikationer som i baseline. Derudover vil efterspørgselstiltaget resultere i, at flere kvoter optages og annulleres i MSR. Dermed får tiltaget også en effekt på den akkumulerede CO₂e-udledning på lang sigt. Specifikt medfører efterspørgselstiltaget en reduktion på 6,4 mio. ton CO₂e på lang sigt.

Kvoteannulleringer mister derimod langt størstedelen af deres effekt, idet en annullering af kvoter medfører en mindre kvoteopsparing og dermed et mindre optag i MSR. Dette medfører i sidste ende, at færre kvoter i MSR annulleres. Annullering af 8 mio. kvoter resulterer således kun i en reduktion i den akkumulerede CO₂e-udledning på 1,6 mio. ton på lang sigt.

Tabel 5. Reduktion i akkumuleret CO₂e-udledning fra 2017 efter den nye aftale fra november 2017 af et klimapolitisk tiltag, som umiddelbart reducerer den akkumulerede CO₂e-udledning med 8 mio. ton ligeligt fordelt over perioden 2021-30

	2017	2030	2050	2075	2100
	-----Mio. ton CO ₂ e-----				
Efterspørgselstiltag	0,0	7,6	6,8	6,4	6,4
Nationale kvoteannulleringer	0,0	0,4	1,2	1,6	1,6
Fleksibilitetsmekanismen	0,2	3,1	9,1	12,2	12,2

Kilde: Egne beregninger.

Der er imidlertid indgået en foreløbig aftale imellem Ministerrådet og Europa-Parlamentet, som styrker effekten af kvoteannulleringer brugt som fleksibilitetsmekanisme for ikke-kvotesektoren. Konkret indebærer aftalen, at kvoteannulleringer brugt i forbindelse med fleksibilitetsmekanismen for ikke-kvotesektoren fortsat tæller med i det opgjorte kvoteoverskud. Det betyder, at de annullerede kvoter fortsat tæller med i kvoteoverskuddet, hvormed det kvoteoverskud, som MSR styres efter, ikke reduceres direkte af annulleringerne. Derudover reducerer virksomhederne deres CO₂e-udledninger på grund af den større kvoteknaphed. Samlet set øges optaget af kvoter derfor i MSR, hvilket medfører yderligere kvoteannulleringer. I sidste ende medfører tiltaget således, at den samlede CO₂e-udledning i EU ETS reduceres med mere end 8 mio. ton.

Resultaterne fra tabel 5 viser ikke, hvilken type tiltag der mest omkostningseffektivt reducerer CO₂e-udledningen på EU-plan. En sådan vurdering kræver, at man sammenligner tiltagenes effekter og omkostninger. Her foretages en eksempelberegning. Modelberegningerne viser, at det koster ca. 580 mio. kr., at foretage kvoteannulleringspolitikken.²² Hvis efterspørgselstiltaget gennemføres via støtte til landvind, koster det formentlig ca. 460 mio. kr.²³ Dermed synes efterspørgselstiltaget umiddelbart mere omkostningseffektivt, når omkostningerne sammenholdes med de beregnede effekter fra tabel 5.

Nærværende analyse kan dog ikke afgøre, hvilken type nationalt tiltag der mest omkostningseffektivt reducerer CO₂e-udledningen på EU-plan. En sådan analyse kræver modellering af tiltagenes lækageeffekter udenfor kvotesystemet via udenrigshandlen. Konkret skal den umiddelbare effekt af de betragtede efterspørgselstiltag fortolkes som nettoeffekten efter fradrag fra lækageeffekter underfor kvotesystemet. Derudover bør andre hensyn end blot de direkte omkostninger medregnes. En udbygning af VE har f.eks. andre ulemper i forhold til kvoteannulleringer: den kræver plads, den kan reducere herlighedsværdien af naturen

²²Tallet er beregnet ud fra de simulerede kvotepriser, en nettoafgiftsfaktor på 1,325 og en diskonteringsrate på 3 pct.

²³Omkostningerne er baseret på Tværministeriel arbejdsgruppe (2013), som finder, at prisen for at reducere et ton CO₂e ved at opføre landvindmøller er 55 kr. i 2012-priser. Denne pris fremskrives til 2017-priser via BNP deflatoren, hvorefter den samlede omkostning kan beregnes direkte. Tallet er behæftet med stor usikkerhed. Givet de seneste års udvikling indenfor landvind, kan omkostningerne være lavere i dag.

og giver anledning til yderligere udsving i elprisen. Endelig er det afgørende, hvilken tidsperiode tiltagene virker over. Dette tidsaspekt undersøges i det følgende.

Typisk vil tiltag, som reducerer kvoteefterspørgslen, virke over en periode, som er længere end 10 år. For eksempel vil en vindmølle typisk være operationel i mere end et årti. Tabel 6 viser effekterne af de samme typer tiltag, hvis de antages i stedet at virke over den 25-årige periode 2021-45.

Beregningerne viser, at effekten af efterspørgseltiltaget svækkes, mens effekten af kvoteannulleringerne styrkes. Dette skyldes, at tiltagene i højere grad påvirker virksomhedernes adfærd efter MSR stopper sit kvoteoptag. Dermed har tiltagene en mindre effekt på mængden af kvoter, som optages i MSR. Derudover kommer tiltagene i højere grad til at virke længere ude i fremtiden, hvor nutidsværdien af CO₂e-udledningerne er mindre. Den repræsentative virksomhed reagerer derfor mindre kraftigt på tiltagene på kort og mellemlang sigt.

Disse effekter svækker efterspørgseltiltagets langsigtede effekt på den akkumulerede CO₂e-udledning, idet tiltagets langsigtede effekter alene skyldes kvoteannulleringer i MSR. Derimod styrkes effekten af nationale kvoteannulleringer, da disse nationale annulleringer i mindre grad reducerer kvoteannulleringerne i MSR. Derudover slår de kvoteannulleringer, som sker efter MSR stopper sit kvoteoptag, direkte igennem på den langsigtede CO₂e-udledning.

Tabel 6. Reduktion i akkumuleret CO₂e-udledning efter den nye aftale fra november 2017 af et klimapolitisk tiltag, som umiddelbart reducerer den akkumulerede CO₂e-udledning med 8 mio. ton ligeligt fordelt over perioden 2021-45

	2017	2030	2050	2075	2100
	-----Mio. ton CO ₂ e-----				
Efterspørgseltiltag	-0,1	2,4	4,4	3,1	3,1
Nationale kvoteannulleringer	0,1	1,4	4,0	5,4	5,4

Kilde: Egne beregninger.

6 Sammenligning med Klimarådets model

6.1 Klimarådets model som specialtilfælde

Klimarådets model (Klimarådet 2017; Silbye and Sørensen 2017) kan betragtes, som et specialtilfælde af den generelle model præsenteret i afsnit 3. Dette kan ses på følgende måde. Lad profitfunktionen være givet ved:

$$f(e_t, A_t) = -\eta_1 e_t^2 + \eta_2 A_t e_t - \eta_3 e_t.$$

Virksomhedens førsteordensbetingelse mht. e_t kan omskrives til:

$$e_t = a_t - b(p_t^k + p^f),$$

hvor $a_t = \eta_2 A_t / (2\eta_1)$, $b = 1 / (2\eta_1)$ og $p^f = \eta_3$. Denne efterspørgselsfunktion svarer til ligning (1) i Silbye og Sørensen (2017). Den inverse efterspørgselsfunktion er givet ved:

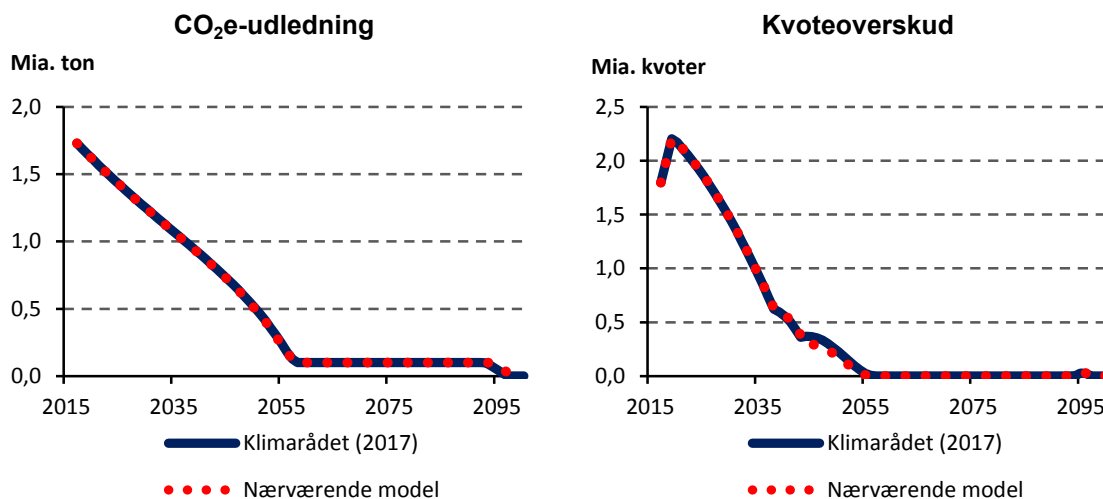
$$p_t^k = (a_t - e_t) \frac{1}{b} - p^f.$$

Som i modellen præsenteret i afsnit 3 vokser kvoteprisen med en rate svarende til afkastkravet, så længe der er et kvoteoverskud. Altså er både optimalitetsbetingelserne og reglerne for kvotesystemet de samme i begge modeller, når man betragter dette specialtilfælde.

6.2 Simulation med Klimarådets antagelser

Hvis man benytter Klimarådets antagelser, fås et forløb som ligner Klimarådets til forveksling. Figur 7 viser CO₂e-udledningerne og kvoteoverskuddet i Klimarådets model (Silbye og Sørensen 2017) samt nærværende model med Klimarådets modelspecificering, dvs. $r = 10\%$, $g_1 = 2,2\%$, $\kappa = 0$, $A_1 = 1$, $a_1 = 1,824$, $b = 0,0003$, $p^f = 275$ og $B_1 = 1,797$, hvor det bemærkes, at CO₂e-udledningerne er målt i mia. ton. De betragtede forløb er stort set identiske, og de mindre forskelle kan formentlig tilskrives de forskellige numeriske løsningsmetoder.

Figur 7. CO₂e-udledning og kvoteoverskud ved brug af nærværende model med klimarådets antagelser og Klimarådets model

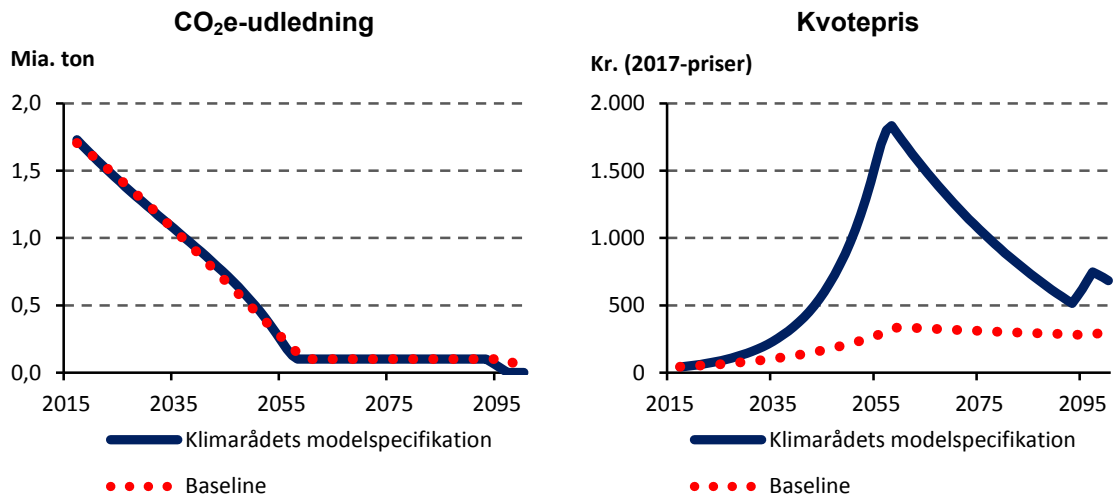


6.3 Simulation med Klimarådets modelspecifikation

I dette afsnit præsenteres simulationsresultater fra nærværende model med Klimarådets modelspecificering, men hvor kvoteoverskuddet i 2017 sættes til 1,69 mia. kvoter baseret på EU-Kommissionen (2017). Disse resultater sammenlignes med baselinescenariet fra nærværende analyse.

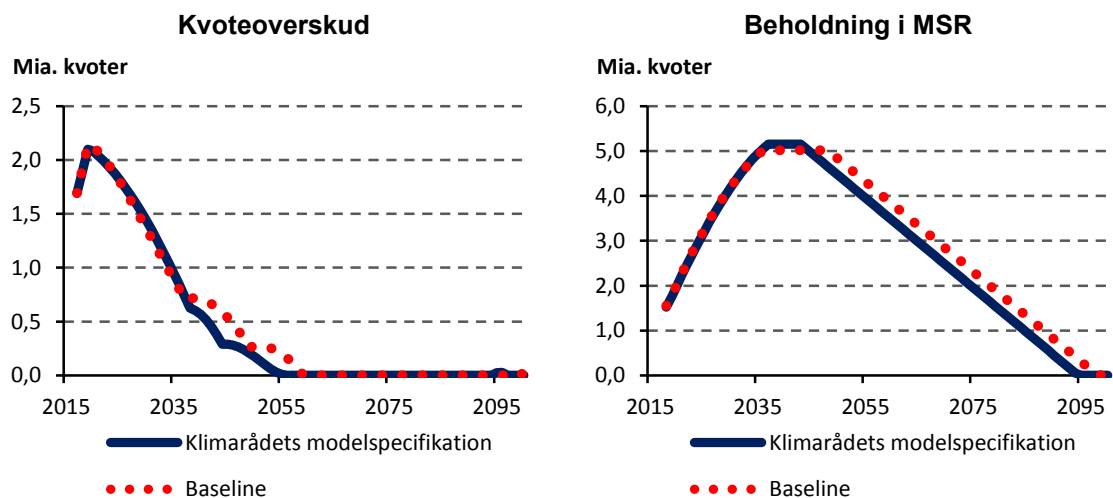
Figur 8 viser CO₂e-udledningen og kvoteprisen fra 2017 til 2100 for baselinescenariet og ved brug af Klimarådets modelspecifikation. De to emissionsstier ligger tæt. Derimod stiger kvoteprisen hurtigere under Klimarådets modelspecifikation, hvilket skyldes det højere afkastkrav. Hvordan de to modeller kan lede frem til stort set ens emissionsstier men forskellige kvoteprisudviklinger diskuteres i afsnit 6.4.

Figur 8. CO₂e-udledning og kvotepris i baselinescenariet og ved brug af Klimarådets modelspecifikation



Udviklingerne i kvoteoverskuddet og kvotebeholdningen i MSR er vist i figur 9 for baselinescenariet samt ved brug af Klimarådets modelspecifikation. I begge tilfælde falder kvoteoverskuddet hurtigt, men kvoteoverskuddet er generelt lidt højere i starten af perioden ved brug af Klimarådets modelspecifikation. Dermed fås en større beholdning i MSR. Men kvoteoverskuddet kommer også hurtigere under 400 mio. kvoter, når Klimarådets modelspecifikation ligger til grund. Derfor tømmes MSR flere år før i dette tilfælde, sammenlignet med baseline.

Figur 9. Kvoteoverskud og beholdning i MSR i baselinescenariet og ved brug af Klimarådets modelspecifikation



6.4 Sammenligning af resultater

Benyttes Klimarådets modelspecifikation fås en større beholdning i MSR, og kvoteoverskuddet kommer hurtigere under 400 mio. kvoter, hvormed udtømningen af MSR starter tidligere. I sidste ende tømmes MSR adskillige år tidligere sammenlignet med baselinescenariet. Men i både baselinescenariet og under Klimarådets antagelser udtømmes MSR ikke de næste mange årtier. Dermed vil klimapolitiske tiltag, som øger kvoteoverskuddet, udskyde udledninger mange årtier.

De to modeller når dermed frem til de samme kvalitative resultater via forskellige modelleringsstrategier og parameterantagelser. Dette afspejler bl.a. nogle mekaniske egenskaber ved kvotesystemet. Markedsstabilitetsreserven virker asymmetrisk på den måde, at kvoteoptaget øges med kvoteoverskuddet. Derimod er kvoteudtaget altid på maksimalt 100 mio. kvoter p.a. Dermed kan MSR hurtigt fyldes men kun langsomt tømmes. Derudover vil MSR initialt have en vis størrelse, og givet det store kvoteoverskud i dag, er det vanskeligt at forestille sig andet, end at en større mængde kvoter optages i reserven de kommende år. Idet reserven kun langsomt lukker kvoterne ud igen (100 mio. kvoter p.a.), vil MSR først være udtømt efter flere årtier, selv når kvoteoverskuddet er under 400 mio. kvoter. Dertil kommer, at virksomhederne vil opspare kvoter, som reaktion på den midlertidige kvoteknaphed, MSR bevirker. Denne reaktion forstærker optaget i MSR, og den forlænger den tid der går, før MSR lukker kvoter ud på markedet.

De to modeller kommer også frem til de samme kvalitative effekter af nationale klimapolitiske tiltag efter den nye aftale fra november 2017, jf. tabel 7.

Tabel 7. Sammenligning af modelspecifikationer: reduktion i akkumuleret CO₂e-udledning efter den nye aftale fra november 2017 af et klimapolitisk tiltag, som umiddelbart reducerer den akkumulerede CO₂e-udledning med 8 mio. ton ligeligt fordelt over perioden 2021-30

	2030	2050	2100
	----- mio. ton CO ₂ e -----		
Nærværende model (hovedspecifikation)			
Efterspørgselstiltag	7,6	6,8	6,4
Nationale kvoteannulleringer	0,4	1,2	1,6
Klimarådet (2017)			
Efterspørgselstiltag	7,9	6,7	5,7
Nationale kvoteannulleringer	0,1	1,3	2,3

Anm.: Ministerrådets reformforslag i Klimarådet (2017) svarer til reglerne efter den nye aftale fra november 2017.

Kilde: Egne beregninger samt Klimarådet (2017).

Kvotepriisen stiger hurtigere, når man benytter Klimarådets parameterantagelser. Dette skyldes primært, at Klimarådet benytter et afkastkrav på 10 pct. p.a., hvorimod der anvendes et afkastkrav på 5 pct. i den nærværende models hovedspecifikation.

Kvotepriisen er således næsten fem gange højere i 2057 under Klimarådets antagelser sammenlignet med baselinescenariet i dette notat.

Klimarådets motivation for at benytte et afkastkrav på 10 pct. p.a. er et studie af Neuhoff mfl. (2012). Studiet er baseret på interviews med virksomheder indenfor kvotesektoren og den finansielle sektor foretaget imellem november 2011 og januar 2012. Baseret på disse interviews finder Neuhoff mfl., at virksomheder, der køber kvoter for at hedge risiko, kræver et afkast på omkring 5 pct. p.a. Derimod kræver spekulative investorer et afkast på 10-15 pct. Der er imidlertid mindst to svagheder ved studiet af Neuhoff mfl. For det første blev interviewene foretaget omkring starten af 2012, hvor der herskede betydelig usikkerhed om fremtiden for EU ETS. Salant (2016) dokumenterer, hvordan flere store medier satte spørgsmålstegn ved eksistensgrundlaget for EU ETS i starten af 2013. Risikoen for en stor og nært forestående reform har formentlig haft en betydelig effekt på de spekulative investorers afkastkrav, omkring det tidspunkt interviewene blev foretaget. Man kan argumentere for, at situationen er en anden i dag, hvor EU med beslutningen fra 2015 om at indføre MSR samt den nye aftale fra november 2017 om 4. fase af EU ETS har sendt et kraftigt signal om, at EU ETS fortsætter med at være instrumental for EU's klimapolitik. For det andet finder Salant (2016), at den hedgingkorridor-teori, som præsenteres af Neuhoff mfl., ikke kan forklare kvoteprisændringer forårsaget af EU-afstemninger og uventede nyheder. Dermed synes det teoretiske grundlag for studiet af Neuhoff mfl. at være relativt svagt. Og selv hvis resultaterne fra studiet er korrekte, er det sandsynligt, at afkastkravet for den marginale investor hurtigt kommer under 10 pct. p.a., idet kvoteoverskuddet forventes at falde hurtigt fra 2019, hvor MSR bliver operationel. Neuhoff mfl. finder, at den øvre grænse for hedgingefterspørgslen var 1,8 mia. kvoter i 2012, hvilket ligger over det nuværende kvoteoverskud på ca. 1,7 mia. kvoter. Altså er hedgingefterspørgslen ikke nødvendigvis afdækket på nuværende tidspunkt. På den baggrund vurderes et lavere afkastkrav mere plausibelt. Analysens kvalitative resultater er imidlertid robuste overfor ændringer i virksomhedernes afkastkrav, jf. afsnit 7.

Selvom kvotepriisen stiger hurtigere under Klimarådets antagelser sammenlignet med hovedspecifikationen i denne analyse, afviger de simulerede emissionsstier relativt lidt. Dette skyldes, at begge modeller er kalibreret til at matche den nuværende kvotepris. Givet den relativt hurtige teknologiske udvikling og det relativt høje afkastkrav leder kalibreringen frem til en relativt mere inelastisk kvoteefterspørgsel i Klimarådets model. Dermed reagerer virksomhederne kun svagt på kvoteprisstigninger, og den hurtigt voksende kvotepris har derfor en svag effekt relativt til den teknologiske udvikling. Intuitionen er som følger. Øges hastigheden for den teknologiske udvikling, som reducerer efterspørgslen efter kvoter, nedsættes værdien af kvoter i fremtiden. Dermed øges kvoteefterspørgslen i dag. På samme måde vil et højere afkastkrav reducere værdien af kvoter i fremtiden, da værdien af de associerede udledninger diskonteres hårdere. Dette vil også øge kvoteefterspørgslen og dermed kvotepriisen i dag. Altså bliver de af Klimarådet benyttede antagelser om en relativt hurtig teknologisk udvikling og et relativt højt afkastkrav, opvejet af en relativt inelastisk kvoteefterspørgsel.

I den her præsenterede model bliver kvoteefterspørgslen relativt mere prisfølsom, da den teknologiske udvikling går langsommere og afkastkravet er lavere. Intuitionen er den samme, som beskrevet ovenfor. For at sætte nogle tal på prisfølsomheden under forskellige antagelser, betragtes en stigning i kvoteprisen fra 43 til 53 kr. i 2017: en stigning på godt 23 pct. Denne stigning reducerer udledningen i 2017 med 0,2 pct. under Klimarådets antagelser, hvorimod udledningen i 2017 reduceres med 7,8 pct. i nærværende analyses hovedspecifikation.

7 Følsomhedsanalyser

I dette afsnit foretages en række følsomhedsanalyser. Disse analyser kan både øge forståelsen af modellen og bruges til at undersøge, hvor robuste de ovenstående resultater er. Følsomhedsanalyserne koncentrerer sig om effekterne af nationale klimapolitiske tiltag efter den nye aftale fra november 2017 om 4. fase af EU ETS.

Generelt betragtes to typer stød til modellen. Den første er et strukturelt stød, hvor en eller flere antagelser ændres, og hvor modellen herefter kalibreres. Dermed kan modellen fortsat matche den historiske trend og den nuværende markedssituation. Det afgørende er her, at virksomhederne kender til ændringen fra starten af forløbet og planlægger herefter. Den observerede kvotepris i 2017 afspejler virksomhedernes forventninger til de fremtidige udviklingsforløb, og de faktiske udviklingsforløb bliver som forventet af virksomhederne. De strukturelle stød fortæller noget om, hvor robust modellens resultater er overfor de grundlæggende modelantagelser.

Den anden type stød kaldes et uventet stød. Disse stød rammer modellen i 2017 og ændrer de grundlæggende vilkår for virksomhederne. Som reaktion på den ændrede situation ændrer virksomhederne øjeblikkeligt adfærd. Dermed kan modellen ikke længere matche den nuværende, observerede markedssituation. Denne type stød fortæller, hvor robust modellens resultater er overfor uventede ændringer for virksomhederne omkring 2017.

7.1 Den teknologiske udvikling

Den teknologiske udvikling spiller en central rolle i modellen. Hastigheden for denne udvikling er beregnet ud fra historiske data samt den nuværende markedssituation. Det er imidlertid muligt at forestille sig, at virksomhedernes forventninger til den teknologiske udvikling pludselig ændres på grund af f.eks. en ny banebrydende opfindelse. Alternativt kan catching-up effekten være både stærkere eller svagere end antaget i kalibreringsproceduren. Hvis denne effekt er stærkere end ventet bliver den initiale teknologiske vækstrate højere for at matche den historiske udvikling. Men på længere sigt er vækstraten betydelig lavere.

Der betragtes to strukturelle stød til κ , hvor κ sættes til hhv. nul og 0,0175 i stedet for 0,01, som er værdien brugt i hovedspecifikationen. Det første tilfælde svarer til, at VE-teknologier frem til 2125 fortsat udvikles hurtigere end fossilt baserede teknologier, og

at denne hurtigere teknologiske udviklingsrate ikke bliver langsommere med tiden. Det indebærer, at A_t konvergerer imod nul. Konkret falder A_t med 39 pct. fra 2017 til 2100. I det andet tilfælde er catching-up effekten hurtigt opbrugt, og A_t falder med blot 16 pct. fra 2017 til 2100.

De to strukturelle stød giver anledning til de samme kvalitative resultater som under antagelserne i hovedspecifikationen. Kvoteoverskuddet er under begge stød på over 1 mia. kvoter indtil midten af 2030'erne. Dermed optages store mængder kvoter i MSR, og de fleste af disse kvoter annulleres i MSR. Efterspørgselstiltag har derfor også stort set de samme effekter i de to tilfælde, som under antagelsen i hovedspecifikationen for κ , jf. tabel 8. Den eneste bemærkelsesværdige forskel er, at kvoteannulleringer bliver mere effektive, hvis den teknologiske udvikling går hurtigere.

Tabel 8. Strukturelle stød til den teknologiske udvikling: reduktion i akkumuleret CO₂e-udledning fra 2017 efter den nye aftale fra november 2017 af et klimapolitisk tiltag, som umiddelbart reducerer den akkumulerede CO₂e-udledning med 8 mio. ton ligeligt fordelt over perioden 2021-30

	2017	2030	2050	2075	2100
	-----Mio. ton CO ₂ e-----				
Hurtig teknologisk udvikling ($\kappa=0$)					
Efterspørgselstiltag	0,0	7,6	7,0	6,6	6,6
Nationale kvoteannulleringer	0,2	3,8	5,4	5,3	5,3
Langsom teknologisk udvikling ($\kappa=1,75\%$)					
Efterspørgselstiltag	0,0	7,4	6,4	5,9	5,9
Nationale kvoteannulleringer	0,0	0,4	1,5	2,0	2,0

Kilde: Egne beregninger.

De to strukturelle stød leder også frem til relativt store effekter på den samlede CO₂e-udledning over kvotesystemets levetid. Scenariet med den hurtige teknologiske udvikling prædikerer en reduktion på 14 pct. i de samlede udledninger frem til 2100. Dermed er den samlede reduktion stort set identisk med hovedspecifikationen. Når den teknologiske udvikling er langsom, bliver den samlede langsigtede reduktion i udledningerne 13 pct.

Herfra betragtes tre uventede stød til den teknologiske udvikling: en teknologisk stagnation fra 2017, et teknologisk gennembrud for VE samt en stor reduktion i kvoteefterspørgslen fra 2040. Agenterne ændrer deres forventninger til den teknologiske udvikling primo 2017, hvorefter de tilpasser deres emissionsplan.

Først betragtes et uventet stød, hvor det teknologiske niveau stagnerer i 2017. Det vil sige, at VE-teknologier ikke udvikles hurtigere end fossile teknologier fra og med 2017. Med andre ord er catching-up effekten for VE pludselig opbrugt i 2017. Dette medfører en reduktion af udledningerne i 2017 og de efterfølgende årtier, da værdien af CO₂e-

udledninger – og dermed kvoter – stiger i fremtiden. Det uventede stød leder således til et større kvoteoverskud og dermed et større optag i MSR. De kvalitative resultater for nationale tiltag er derfor de samme som i hovedspecifikationen, jf. tabel 9.

Tabel 9. Uventede stød til den teknologiske udvikling: reduktion i akkumuleret CO₂e-udledning fra 2017 efter den nye aftale fra november 2017 af et klimapolitisk tiltag, som umiddelbart reducerer den akkumulerede CO₂e-udledning med 8 mio. ton ligeligt fordelt over perioden 2021-30

	2017	2030	2050	2075	2100
	-----Mio. ton CO ₂ e-----				
Ingen catching-up effekt fra 2017					
Efterspørgseltiltag	0,0	7,9	7,2	6,8	6,8
Nationale kvoteannulleringer	0,0	0,4	1,1	1,5	1,5
Teknologisk gennembrud i 2017					
Efterspørgseltiltag	0,0	7,5	6,6	6,0	6,0
Nationale kvoteannulleringer	0,0	0,5	1,5	2,0	2,0
Reduktion i kvoteefterspørgslen fra 2040					
Efterspørgseltiltag	-0,1	6,4	3,3	1,4	1,4
Nationale kvoteannulleringer	0,1	1,6	4,7	6,6	6,6

Kilde: Egne beregninger.

Det uventede teknologiske gennembrud for VE øger vækstraten g_t med en faktor 1,5 i 2017. Dermed reduceres A_t hurtigere over tid, hvilket sænker kvoteefterspørgslen i fremtiden. Virksomhederne gemmer derfor færre kvoter til senere brug. Det teknologiske gennembrud bevirker, at CO₂e-udledningen øges med 3,7 pct. i 2017. Kvoteoverskuddet er imidlertid på over 1 mia. kvoter frem til starten af 2030'erne, og der optages derfor store mængder kvoter i MSR gennem 2020'erne. De kvalitative effekter af nationale tiltag er derfor uændret, jf. tabel 9.

Endelig betragtes en hændelse, som reducerer kvoteefterspørgslen fra 2040. Denne hændelse kunne være en stor VE-udbygning, som står færdig i 2040 eller et teknologisk gennembrud for VE-teknologier med effekt fra 2040. Konkret reduceres niveauet af A_t fra baselinescenariet med 1/8 fra 2040. Den repræsentative virksomhed reagerer på hændelsen allerede fra 2017. Hændelsen øger virksomhedens incitament til at fremrykke CO₂e-udledninger, da udledningerne bliver mindre værd fra 2040. Dermed reduceres kvoteoverskuddet og optaget i MSR på kort sigt. Kvoteoverskuddet er under 833 mio. kvoter allerede i 2023.²⁴ Dermed stopper kvoteoptaget i MSR mange år tidligere i forhold til de andre scenarier. Idet effekterne af de nationale tiltag, som betragtes her, primært er drevet af deres effekt på optaget i MSR over perioden 2021-30, påvirkes disse effekter betydeligt i dette tilfælde. Hændelsen påvirker de kvantitative resultater væsentligt, mens de kvalitative resultater er upåvirket, jf. tabel 9.

²⁴Denne forudsigtelse ligger tæt på forudsigtelsen fra Perino og Willner (2017).

De tre uventede stød giver anledning til forskellige reduktioner i den akkumulerede CO₂e-udledning på lang sigt. Hvis catching-up effekten er opbrugt fra 2017, reduceres den samlede CO₂e-udledning på lang sigt med ca. 16 pct. I scenariet med det teknologiske gennembrud bliver den samlede reduktion 12 pct. på lang sigt. Den samlede CO₂e-udledning reduceres imidlertid med kun 7 pct. i scenariet med den store reduktion i kvoteefterspørgslen fra 2040.

7.2 Afkastkrav

Virksomhedernes afkastkrav afspejler den forrentning, som virksomhederne kræver af deres investeringer. I hovedscenariet blev det antaget, at virksomhederne krævede et reelt afkast på 5 pct. p.a. for at investere i kvoter. Over de næste årtier passer denne diskontering godt overens med Energistyrelsen (2017), som antager at vækstraten i kvoteprisen stiger gradvist fra 4 pct. p.a. i 2016 til 8 pct. p.a. i 2030. Baselinesceniets kvotepris i 2030 ligger derfor også meget tæt på Energistyrelsens fremskrivning i 2030.

I litteraturen benyttes både højere og lavere afkastkrav end i dette studie. Klimarådet (2017) samt Perino og Willner (2017) benytter et årligt afkastkrav på 10 pct., hvorimod Fell (2016) benytter et årligt afkastkrav på 3 pct. Her betragtes to strukturelle stød til afkastkravet. I det første stød hæves afkastkravet til 7 pct., mens afkastkravet sænkes til 4 pct. i det andet stød. En udfordring er, at parameterrestriktionerne bliver bindende i kalibreringsproceduren. Dermed kommer en eller flere parametre til at ligge på en grænseværdi, hvilket kan have implikationer for resultaterne. Derfor ændres φ også i de foretagne stød.

Et højere afkastkrav vil – alt andet lige – reducere kvoteprisen i 2017. Kalibreringsproceduren reducerer derfor α , hvilket øger profitfunktionens konkavitet. Derved øges virksomhedernes ønske om at udjævne emissioner over tid, hvilket får kvoteprisen i 2017 til at stige. For at α forbliver indenfor parameterrestriktionen reduceres φ , hvilket alt andet lige øger α . Konkret reduceres φ til 0,05, når afkastkravet øges til 7 pct., og φ øges til 2, når afkastkravet reduceres til 4 pct.

Et højere afkastkrav medfører en langsommere kalibreret teknologisk udvikling. Dette skyldes, at modellen kalibreres til at matche kvoteprisen i 2017. Idet et højere afkastkrav øger incitamentet til at udlede i 2017, reduceres kvoteprisen alt andet lige. En langsommere teknologisk udvikling har den modsatte effekt, idet efterspørgslen efter fossilbaseret energi reduceres langsommere. Dermed øges incitamentet til at opspare kvoter i starten af perioden, hvilket reducerer udledningerne og øger marginalproduktet af udledningerne i 2017. Derved stiger kvoteprisen i 2017. Kalibreringsproceduren sikrer, at disse to modsatrettede effekter går lige op, hvormed modellen matcher kvoteprisen i 2017.

De to strukturelle stød påvirker ikke de overordnede konklusioner, jf. tabel 10. Når afkastkravet reduceres til 4 pct. stopper kvoteoptaget i MSR i 2036, hvilket er 4 år

tidligere end i hovedspecifikationen. Reserven optager således fortsat kvoter igennem 2020'erne og starten af 2030'erne, hvormed de overordnede effekter af nationale tiltag forbliver de samme. Når afkastkravet øges til 7 pct. fortsætter kvoteoptaget i MSR efter 2040, og dermed fås de samme overordnede effekter af nationale tiltag i kvotesektoren.

Tabel 10. Strukturelle stød til afkastkravet: reduktion i akkumuleret CO₂e-udledning fra 2017 efter den nye aftale fra november 2017 af et klimapolitisk tiltag, som umiddelbart reducerer den akkumulerede CO₂e-udledning med 8 mio. ton ligeligt fordelt over perioden 2021-30

	2017	2030	2050	2075	2100
	-----Mio. ton CO ₂ e-----				
Lavt afkastkrav (4 pct.)					
Efterspørgselstiltag	0,0	7,3	6,0	5,3	5,3
Nationale kvoteannulleringer	0,0	0,6	1,9	2,7	2,7
Højt afkastkrav (7 pct.)					
Efterspørgselstiltag	0,0	7,7	7,5	7,4	7,4
Nationale kvoteannulleringer	0,0	0,3	0,7	0,7	0,7

Kilde: Egne beregninger.

Når modellen kalibreres med et afkastkrav på 4 pct., bliver reduktionen i den samlede CO₂e-udledning 12 pct. på lang sigt. Derimod bliver reduktionen 26 pct. på lang sigt, når afkastkravet er 7 pct. Dette scenarie forudsiger imidlertid en meget hurtig reduktion i CO₂e-udledningerne, og scenariet vurderes derfor mindre sandsynligt.

De kvalitative resultater er også robuste overfor en uventet stigning i virksomhedernes afkastkrav til f.eks. 6 pct. Et sådant uventet stød reducerer værdien af CO₂e-udledninger i fremtiden, hvormed virksomhederne opsparer færre kvoter til senere brug. Selv en mindre uventet stigning i afkastkravet på et procentpoint øger CO₂e-udledningerne i 2017 med 7 pct. Dermed har et sådant uventet stød en betydelig effekt på de kvantitative resultater. Det uventede stød bevirker, at kvoteroverskuddet reduceres til under 833 mio. kvoter allerede i 2023. Dermed har de efterspørgselstiltag, som analyseres her, kun for alvor en effekt på kvoteoptaget i 2021 og 2022. Dermed bliver kvoteannulleringer relativt mere attraktive, mens efterspørgselsreducerende tiltag bliver mindre attraktive i forhold til hovedspecifikationen (beregninger ikke vist i notatet).

Hvis det uventede stød til afkastkravet går i den anden retning, dvs. at afkastkravet reduceres, fås effekter som kvalitativt og kvantitativt ligner effekterne i hovedspecifikationen. Et sådant stød øger værdien af emissioner i fremtiden, hvormed det bliver mere attraktivt at opspare kvoter. Kvoteoverskuddet bliver derfor større på kort og mellemlang sigt, og der optages flere kvoter i MSR. Dermed fås de samme kvalitative effekter som i hovedspecifikationen.

Det bemærkes, at et uventet stød til afkastkravet er vanskeligt at fortolke. Dette skyldes bl.a., at modellen ikke indeholder nogen form for usikkerhed. For eksempel kan en risiko for færre kvoteudstedelser i fremtiden ikke modelleres som et uventet stød til afkastkravet. En mulig fortolkning kunne være, at der er en konstant risiko hver tidsperiode for, at EU ETS bliver nedlagt af EU uden nogen form for erstatning til kvoteejerne. Det uventede stød skulle dermed være en pludselig forøgelse af denne risiko. I kraft af den nye aftale for EU ETS, kan man nærmere forestille sig det modsatte. EU har med den nye aftale sendt et signal om, at EU ETS forbliver et af hovedelementerne i EU's klimapolitik de næste mange år.

7.3 Konklusion på følsomhedsanalysen

Følsomhedsanalysen viser, at de kvalitative effekter af nationale klimapolitiske tiltag undersøgt i afsnit 5.3 er robuste overfor en række ændringer i modelantagelserne. Derimod er de kvantitative effekter mere følsomme.

Følsomhedsanalysen indikerer, at den nye aftale reducerer den akkumulerede CO₂e-udledning på lang sigt med imellem 7 og 16 pct. i forhold til baseline. Perino og Willner (2017) finder, at aftalen resulterer i 1,7 mia. kvoteannulleringer, hvilket svarer til en reduktion i den akkumulerede CO₂e-udledning på lang sigt på ca. 4 pct. Det vurderes derfor sandsynligt, at aftalen reducerer den akkumulerede CO₂e-udledning på lang sigt med imellem 4 og 16 pct. Ud fra modelberegningerne vurderes aftalen desuden, at reducere den akkumulerede CO₂e-udledning frem til 2050 med imellem 3 og 4 pct. i forhold til baseline.

Endvidere indikerer følsomhedsanalysen, at det betragtede efterspørgselstiltag reducerer den akkumulerede CO₂e-udledning på lang sigt med imellem 1,4 og 6,8 mio. ton, når man holder parameterantagelserne fra hovedspecifikationen konstant. Derimod reducerer de betragtede kvoteannulleringer den akkumulerede CO₂e-udledning på lang sigt med imellem 1,5 og 6,6 mio. ton. Det vurderes sandsynligt, at de langsigtede effekter af de betragtede klimapolitiske tiltag ligger indenfor disse spænd.

8 Litteratur

Adda, J. og R. Cooper (2003): *Dynamic Economics: Quantitative Methods and Applications*. The MIT Press.

Det Europæiske Miljøagentur (2017a): *Trends and projections in the EU ETS in 2017 – The EU Emissions Trading System in numbers*. EEA Report No 18/2017.

Det Europæiske Miljøagentur (2017b): *Trends and projections in Europe 2017 – Traking progress towards Europe's climate and energy targets*. EEA Report No 17/2017.

Energistyrelsen (2017a): *Basisfremskrivning 2017*.

Energistyrelsen (2017b): *Baggrundsrapport til basisfremskrivning 2017*.

EU (2015): Decision (EU) 2015/1814 of the European Parliament and of the Council of 6 October 2015 concerning the establishment and operation of a market stability reserve for the Union greenhouse gas emission trading scheme and amending Directive 2003/87/EC. *Official Journal of the European Union*, 264, s. 1-5.

EU-Kommissionen (2015): *Impact Assessment*. Ledsager dokumentet: *Proposal for a Directive of the European Parliament and the Council amending Directive 2003/87/EC to enhance cost-effective emission reductions and low-carbon investments*.

EU-Kommissionen (2017a): <https://ec.europa.eu/clima/policies/ets>. Hentet d. 11. december 2017.

EU-Kommissionen (2017b): *Publication of the total number of allowances in circulation for the purposes of the Market Stability Reserve under the EU Emission Trading System established by Directive 2003/87/EC*.

EU-Kommissionen (2017c): *Report from the Commission to the European Parliament and the Council on the functioning of the European carbon market*.

Europa-Parlamentet (2018): <http://www.europarl.europa.eu/legislative-train/>. Hentet 2. januar 2018.

EEX (2018): EUA Primary Market Auction Report. <https://www.eex.com/en/>. Hentet d. 3. januar 2018.

Fell, H. (2016): Comparing policies to confront permit over-allocation. *Journal of Environmental Economics and Management*, 80, s. 53-68.

Klimarådet (2017): *Det oppustede CO₂-kvotesystem – Konsekvenser for dansk klimapolitik af kvotesystemet og overskuddet af kvoter*.

Neuhoff, K., A. Schopp, R. Boyd, K. Stelmakh og A. Vasa (2012): Banking of surplus emissions allowances: Does the volume matter? DIW Discussion Papers, No. 1196.

Perino, G. og M. Willner (2016): Procrastinating reform: The impact of the market stability reserve on the EU ETS. *Journal of Environmental Economics and Management*, 80, s. 37-52.

Perino, G. og Willner, M. (2017): EU-ETS Phase IV: allowance prices, design choices and the market stability reserve. *Climate Policy*, 17 (7), s. 936-946.

Richstein, J.C., E.J.L. Chappin og L.J. de Vries (2015): The market (in-)stability reserve for EU carbon emission trading: Why it might fail and how to improve it. *Utilities Policy*, 35, s. 1-18.

Salant, S. (2016): What ails the European Union's emissions trading system? *Journal of Environmental Economics and Management*, 80, s. 6-19.

Sandbag (2016): *Getting in touch with reality – Rebasing the EU ETS Phase 4 cap.*

Silbye, F. and Sørensen, P. (2017): Subsidies to renewable energy and the European emission trading system – is there really a waterbed effect? Arbejdspapir, marts 2017.

Tværministeriel arbejdsgruppe (2013): *Virkemiddelkatalog. Potentialer og omkostninger for klimatiltag.*