



NTNU – Trondheim
Norwegian University of
Science and Technology

En analyse av kraftproduksjonen i OECD-landene i perioden 1980-2014

I hvilken grad har kraftproduksjon ved bruk av
ikke-fossile kilder erstattet kraftproduksjon ved bruk
av fossile kilder?

Magnus Quist Christensen og Eirik Theie Ødegaard

Juni 2017

Masteroppgave i samfunnsøkonomi

Institutt for samfunnsøkonomi

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

Veileder: Professor Anders Skonhoft

Bi-veileder: Førsteamanuensis Jan Morten Dyrstad

Forord

Denne masteroppgaven markerer slutten på vårt 5-årige masterstudium i samfunnsøkonomi ved Institutt for samfunnsøkonomi på NTNU. Vi vil gjerne rette en stor takk til vår veileder, professor Anders Skonhøft, for svært verdifull veiledning og interessante diskusjoner. Vi vil også takke professor Jan Morten Dyrstad for god veiledning på oppgavens metodedel. Professor Richard York ved Universitetet i Oregon, og professor Brantley Liddle ved *National University of Singapore* har bidratt med utfyllende svar per e-post når vi har hatt spørsmål angående deres artikler. Dette setter vi stor pris på. En siste takk går til Tor Fabian Aaserud, som har hjulpet oss med språkvask.

Denne oppgaven er i sin helhet et felles arbeid utført av Magnus Quist Christensen og Eirik Theie Ødegaard.

Trondheim, 01.06.2017

Magnus Quist Christensen og Eirik Theie Ødegaard

Sammendrag

I 2014 stod OECD for 45 % av verdens samlede kraftproduksjon, og store deler av produksjonen kom fra bruken av fossile kraftkilder (59%). Økt miljøfokus har de siste tiårene ført til en fremvekst i bruken av mindre forurensende ikke-fossile kraftkilder i kraftproduksjonen. Ved å bruke paneldata for 27 OECD-land i perioden 1980-2014 ønsker vi å undersøke om, og i hvilket omfang, ny ikke-fossil kraftproduksjon har erstattet eksisterende fossil kraftproduksjon, kontrollert for etterspørselsvekst. Denne sammenhengen defineres som erstatningsgraden.

For å undersøke denne problemstillingen benyttes en kvantitativ tilnærming, der sammenhengen mellom fossil og ikke-fossil kraftproduksjon estimeres ved bruk av minste kvadraters metode. Grunnlaget for den kvantitative tilnærmingen er data innhentet fra World Databank og OECD sine databaser, og en modell konstruert ut fra faglitteraturen.

Vi finner en erstatningsgrad for ikke-fossil kraftproduksjon per innbygger på -0.3484 . Det betyr at hver enhet ikke-fossil kraft generert i perioden 1980-2014, har erstattet 0.3484 enheter fossil kraftproduksjon. Derfor, for å erstatte 1 kWh fossil kraftproduksjon kreves det at 2.87 kWh ikke-fossil kraft genereres. Erstatningsgraden vi finner er større enn den som tidligere er funnet i faglitteraturen. Ut fra dette konkluderer vi med at erstatningsgraden for vårt utvalg bestående av OECD-land, i perioden 1980-2014 var større enn for verden som helhet i perioden 1960-2009. Samtidig konkluderer vi med at erstatningsgraden på -0.3484 er for liten til at man i fremtiden, ene og alene, kan basere seg på å øke ikke-fossil kraftproduksjon for å redusere den fossile. For å nå mål om mindre bruk av fossile kraftkilder, kreves altså andre tilnærminger enn økt ikke-fossil kraftproduksjon.

Innhold

Forord	i
Sammendrag	ii
1 Introduksjon	1
1.1 Tidligere litteratur	2
2 Energi og kraft	6
2.1 Energi og energiforbruk	6
2.2 Kraft som energi	7
2.2.1 Kraft i energibruken	8
2.2.2 Forbruk og produksjon	9
2.3 Kraft og miljøproblemet	10
3 Kraftproduksjonen i OECD35	12
3.1 Kraftmarkedene	12
3.2 Kraftproduksjon	13
3.2.1 Fossil kraftproduksjon i OECD35	15
3.2.2 Ikke-fossil kraftproduksjon i OECD35	17
3.3 Oppsummering	20
4 Teori fra miljøøkonomi	21
4.1 IPAT-identiteten	21
4.1.1 Determinering	22
4.2 EKC-hypotesen	24
5 Variabler og databeskrivelse	26
5.1 Data	26
5.2 Variabler	27
5.2.1 Avhengig variabel	27
5.2.2 Forklaringsvariabel	27

5.2.3	Kontrollvariabler	28
5.3	Deskriptiv statistikk	29
6	Empirisk spesifikasjon og tilrettelegging	32
6.1	Grunnmodell	32
6.1.1	Tre modeller – én for hver av de ikke-fossile kraftkildene	35
6.2	MKM og paneldata	35
6.3	Endogenitetsproblem og valg av estimeringsmetode	37
6.3.1	Målefeil	38
6.3.2	Simultanitet	38
6.3.3	Utelatt-variabel-problem og <i>landfaste effekter</i>	39
6.4	Problemer tilknyttet effisiens	40
6.4.1	Heteroskedastisitet	41
6.4.2	Autokorrelasjon	41
6.4.3	Robust inferens	42
7	Empirisk analyse og resultater	44
7.1	Analyse og resultater del 1	44
7.1.1	Tidligere litteratur	46
7.2	Robusthetsanalyse	48
7.2.1	Kontrollvariabler	50
7.3	Analyse og resultater del 2	52
7.3.1	Erstatningsgraden for de tre komponentene i <i>IF</i>	52
7.3.2	Erstatningsgraden i to perioder – før og etter 1997	54
7.4	Oppsummering	58
8	Konklusjon	59
	Bibliografi	i
A	Appendiks A: Definisjoner	v
B	Appendiks B: Grafer	viii

I	Grafer OECD27	viii
II	Proxy for real-BNP i Polen og Ungarn	x
C	Appendiks C: Effisiens og testing	xi
I	Hausman-test	xi
II	Effisiens	xi
D	Appendiks D: Regresjoner og tabeller tilknyttet kapittel 7	xiv
I	Norge og Island	xiv
II	Regresjoner fra robusthetsanalyse	xvi
III	Kyoto-avtalen	xviii

Figurer

2.1	Andelen kraftforbruk av det totale energiforbruket i OECD35 fra 1980 til 2014. Datakilde: The World Bank (2017)	8
3.1	Kraftproduksjon for OECD35 i perioden 1980-2014. Sektordiagrammene viser andelen til de ulike kraftkildene av den total produksjon i 1980 og 2014. Datakilde: Datakilde: The World Bank (2017) og OECD (2017)	14
3.2	Utviklingen i andelen fossil kraftproduksjon i OECD35. Datakilde: The World Bank (2017)	16
3.3	Utviklingen i andelen atomkraft, vannkraft og fornybar kraft i OECD35 fra 1980 til 2014. Datakilde: The World Bank (2017)	17
5.1	Scatterplot av observasjonene for F og IF for OECD29. Datakilde: The World Bank (2017) og OECD (2017)	30
5.2	Scatterplot av observasjonene for F og IF for OECD27. Datakilde: The World Bank (2017) og OECD (2017)	30
5.3	Utviklingen i uvektet gjennomsnitt for variablene F og IF for OECD27 i perioden 1980-2014.	31
B.1	Kraftproduksjon for OECD27 i perioden 1980-2014. Sektordiagrammene viser andelen til de ulike kraftkildene av den total produksjon i 1980 og 2014. Datakilde: The World Bank (2017) og OECD (2017)	viii
B.2	Fossilandelen for OECD27 og OECD35 i perioden 1980-2014.	ix
B.3	Ikke-fossile kraftandeler for OECD35 (øverst) OECD27 (nederst) i perioden 1980-2014. Datakilde: The World Bank (2017)	ix
B.4	Real BNP-vekst i Polen fra 1980 til 2014. Datakilde: The World Bank (2017) og IMF (2017)	x
B.5	Real BNP-vekst i Ungarn fra 1980 til 2014. Datakilde: The World Bank (2017) og IMF (2017)	x

Tabeller

5.1	Deskriptiv statistikk for sentrale variable	29
7.1	Hovedanalyse	45
7.2	Modellutvidelse	53
A.1	Grupperinger av land	vi
A.2	Multipler av Watt	vii
C.1	Hovedanalyse med fokus på effisiens	xii
C.2	Tester for autokorrelasjon og heteroskedastisitet	xii
D.1	Hovedanalyse med Norge og Island	xiv
D.2	Robusthetsanalyse: Viktigheten av <i>BNP</i> i grunnmodellen	xvi
D.3	Inkludering av alternative kontrollvariabler	xvii
D.4	Tilleggseffekt av Kyoto-avtalen	xviii

1 | Introduksjon

Graden av menneskelig innvirkning på miljøet bestemmes av ressursbruken og avfallet fra økonomisk aktivitet. Ofte brukes CO_2 -utslipp for å måle denne innvirkningen, og den største menneskeskapte enkeltårsaken til CO_2 -utslipp er bruken av energi i form av elektrisk kraft og varme-generering (IPCC, 2014). I de senere år er det blitt rettet en rekke tiltak, både gjennom politikk og teknologi, mot klimautfordringene den menneskelige aktiviteten har medført.¹ Kyoto-avtalen fra 1997 og Paris-avtalen fra 2015 har begge som mål å få land til å redusere sine klimagassutslipp. En rekke land har bundet seg til avtalene, og for å nå målene har mange innført en karbonnøytral politikk rettet mot blant annet kraftmarkedene og produksjonsmetodene for kraft.² Bruken og utviklingen av produksjonsmetoder som slipper ut svært lite klimagasser er derfor i sterk vekst, og variasjonen i utslipp fra de forskjellige produksjonsmetodene er stor (IPCC, 2011, s.18-20, 190). Som et resultat av variasjonene i utslipp, er det hensiktsmessig å kategorisere produksjonen av elektrisk kraft etter bruken av fossile eller ikke-fossile kraftkilder. Heretter omtales elektrisk kraft som *kraft*.

En konvensjonell tankegang som ofte går igjen, deriblant hos FNs klimapanel, er at kraftproduksjon ved bruk av ikke-fossile kraftkilder erstatter kraftproduksjon ved bruk av fossile kraftkilder med et en-til-en-forhold (York, 2012). I denne oppgaven ønsker vi å undersøke om, og i hvilket omfang, denne erstatningsgraden eksisterer i et utvalg utviklede og avanserte land. Vi bruker derfor data for 27 OECD-land i perioden 1980 til 2014. For å undersøke erstatningsgraden tar vi utgangspunkt i en additiv identitet, som formaliseres til en empirisk spesifisering med utgangspunkt i grunnmodellen til York (2012). Vi utnytter deretter oppbyggingen til den sentrale forklaringsvariabelen, og formulerer tre modellspesifikasjoner for å undersøke erstatningsgraden til henholdsvis atomkraft, vannkraft og fornybar kraftproduksjon.³ Modellene estimeres ved bruk av *minste kvadraters metode*, heretter forkortet til MKM.

¹ (IEA, 2017) har utviklet fire forskjellige databaser med oversikt over energi-relaterte tiltak som har vært, eller er, aktive i perioden mellom 1971 og 2015.

² Som definert av SINTEF (2015), er karbonnøytral: *Prosesser, virksomheter eller økonomisk aktivitet som i sum ikke fører til økt CO_2 -innhold i atmosfæren.*

³ I denne oppgaven utelates alltid vannkraft fra benevnelsen *fornybar*.

I dette kapitlet har vi gitt en kort introduksjon til erstatningsgraden. Det vil også gis en kort gjennomgang av den tidligere litteraturen som har tatt for seg lignende problemstillinger. I kapittel 2 og 3 legges grunnlaget for hvorfor den ikke-fossile kraftproduksjonen kan tenkes å erstatte den fossile. Det gis i kapittel 2 en beskrivelse av kraft som energi, forskjellene mellom kraftproduksjon og kraftkonsum, og hvordan kraft henger sammen med miljøproblemet. I kapittel 3 presenteres utviklingen i OECDs kraftproduksjon fra 1980 til 2014. Kapittel 4 tar for seg to sentrale teorier i miljø- og ressursøkonomi, IPAT-identiteten og EKC-sammenhengen. Sistnevnte gir grunnlag for at erstatningsgraden vi finner for et utvalg OECD-land kan skille seg fra den som tidligere er estimert for verden som helhet. I kapittel 5 og 6 legges grunnlaget for den empiriske analysen. De sentrale variablene blir presentert i kapittel 5, hvor det også blir lagt ned deskriptiv statistikk og en grundig databeskrivelse. I kapittel 6 presenteres grunnmodellen, som er en teoretisk additiv identitet formalisert til en empirisk modellspesifikasjon. Med bakgrunn i datamaterialet og grunnmodellen, gis det også en begrunnelse for valg av estimeringsmetode, samt en diskusjon av potensielle problemer tilknyttet vår kvantitative tilnærming. Estimeringsresultatene av de spesifiserte modellene presenteres og diskuteres i kapittel 7. Til slutt blir det gitt en oppsummering og konklusjon i kapittel 8.

Vi ønsker å informere leseren om at datamaterialet som benyttes i kapittel 2 og 3 er hentet for OECD som helhet, heretter OECD35, og er aggregert hos *World Databank*. De tilhørende grafene i disse kapitlene er produsert ved bearbeiding av dette materialet. Som følge av mangler i nasjonal data for enkelte av landene, består datamaterialet som benyttes i den empiriske analysen av 27 OECD-land, heretter OECD27.⁴⁻⁵ Datamaterialet som brukes i den empiriske analysen er bearbeidet materiale fra *World Databank*, *IMF* og *OECD* sine databaser.

1.1 Tidligere litteratur

Oppgaven er inspirert av det tidligere arbeidet utført av York (2012), men skiller seg fra dette ved at det fokuseres på en gruppe utviklede og avanserte land. Grunnen til at vi ser på OECD27, er

⁴Se *Appendiks A* for oversikt over hvilke land som inngår i OECD35 og OECD27

⁵I *Appendiks B* presenteres tilsvarende grafer for OECD27. Dette gjør vi for å illustrere at forskjellene mellom OECD27 og OECD35 er marginal.

at dette er en veldefinert gruppe spredd over hele verden, der de sosioøkonomiske forskjellene er mindre sammenlignet med resten av verden. Den resterende litteraturen som tar for seg erstatningsgraden er begrenset, og det som har blitt gjort har hovedsakelig dreid seg om verden som helhet, og ikke sosioøkonomiske grupperinger. Det gis her en oversikt over den tidligere litteraturen som er relevant for vår oppgave og problemstilling.

York (2012) var den første til å estimere erstatningsgraden, og gjorde dette ved å formulere en enkel modell med fossil kraftproduksjon som avhengig variabel, og ikke-fossil kraftproduksjon som forklaringsvariabel. Erstatningsgraden ble da gitt ved koeffisienten foran ikke-fossil kraftproduksjon. Motivasjonen bak analysen var å utfordre den konvensjonelle tankegangen om at ny ikke-fossil kraftproduksjon erstatter fossil kraftproduksjon med et en-til-en-forhold. Dette impliserer en koeffisient foran ikke-fossil kraftproduksjon lik -1. For å undersøke denne sammenhengen benytter han data fra *World Databank* for et panel bestående av 132 land fra 1960 til 2009. Det spesifiseres seks modeller, to for energiproduksjon og fire for kraftproduksjon, der det er de sistnevnte som er relevante med tanke på vår problemstilling. I modellene inkluderes kontrollvariabler for kraftteterspørsel eller energiteterspørsel, samt landfaste- og årsfaste-effekter.⁶ Modellene estimeres ved bruk av Prais–Winsten-regresjon med korrigeringsfaktor for førsteordens seriekorrelasjon. I de to første modellene estimerer York signifikante erstatningsgrader på -0.089 og -0.079. Dette innebærer at for å erstatte én enhet kraft produsert med fossile kilder, må kraftproduksjonen fra ikke-fossile kilder øke med henholdsvis 11.2 og 12.6 kWh. Forskjellen på koeffisientene kommer av at det i modell 2 inkluderes flere kontrollvariabler.⁷ Modell 5 og 6 spesifiseres ved å skille mellom de forskjellige produksjonsmetodene som inngår i ikke-fossil kraftproduksjon.⁸ Erstatningsgradene for atomkraft blir estimert signifikante og tar verdien -0.221 og -0.163. Det samme gjelder for vannkraft, der erstatningsgradene estimeres til -0.099 og -0.086. Estimerte erstatningsgrader for fornybare kraftkilder (sett bort ifra vannkraft) tar positive verdier, og er ikke signifikante.

⁶I York (2012) er modellene for kraftproduksjon spesifisert på følgende måte (alle variable er *per innbygger*):

$$\text{Fossilkraftproduksjon} = \beta_0 + \beta_1 \text{Ikkefossilkraftproduksjon} + \beta_2 \text{BNP} + \beta_3 \text{BNP}^2 + \beta_4 \text{BNP}^3 + \beta_5 \text{kontrollvariabler}$$

⁷I modell 2 inkluderes fire ekstra kontrollvariabler. Én for andel av befolkningen i alderen 15 til 62 år, én for verdiskaping fra industri, samt én lineær og én kvadrert variabel for andel av befolkningen som bor i urbane strøk.

⁸I modell 5 inkluderes de samme kontrollvariablene som i modell 1 og i modell 6 inkluderes de samme kontrollvariablene som i modell 2.

Et kommende bidrag til litteraturen er arbeidet til Liddle og Sadorsky (2017), der erstatnings-effekten av å øke andelen ikke-fossilt kraftkonsum på CO_2 -utslipp estimeres.⁹⁻¹⁰ De benytter ubalansert paneldata fra IEA for perioden 1971-2011, bestående av 117 land. Motivasjonen er York (2012), men modelltilnærmingen er noe annerledes. Det benyttes en logaritmisk modell med lagget avhengig variabel som forklaringsvariabel, slik at koeffisientene tolkes som elastisiteter og det er mulig å skille mellom kortsiktige og langsiktige effekter. I tillegg benyttes mer avanserte og moderne estimeringsmetoder for å ta hensyn til blant annet kointegrasjon, korrelasjon i tverrsnittsdimensjonen og hetetogenitet i konstant- og helningsledd.¹¹ De finner en langsiktig erstatningselastisitet på -0.38, som indikerer at 1% økning i ikke-fossilt kraftkonsum per innbygger, reduserer CO_2 -utslipp fra elektrisitetsproduksjon med 0.38%. Denne erstatningselastisiteten vises også å være større for land som ikke er medlem av OECD enn den er for medlemsland.

Høsten 2014 presenterte Liddle og Sadorsky en tidlig utgave av artikkelen ved IAEE Asian Conference i Beijing, Kina. Her, i Liddle og Sadorsky (2014), estimerte de erstatningsgraden mellom fossil og ikke-fossil kraftproduksjon ved å bruke samme metode som i Liddle og Sadorsky (2017). I denne analysen benyttet de et ubalansert panel bestående av 63 land i perioden 1971-2010, og fant kortsiktig og langsiktig erstatningselastisiteter på henholdsvis -0.24 og -0.50. De estimerte effektene er betydelig større enn erstatningsgraden fra York (2012), men det er viktig å merke seg at York ikke bruker en logistisk transformert modell. At de gikk bort fra å se på erstatningselastisiteten mellom fossil og ikke-fossil kraftproduksjon i den ferdige utgaven av artikkelen, begrunnes med at reduksjon i CO_2 -utslipp er hovedmotivasjonen for å redusere bruken av fossile kilder. Uavhengig av dette, er resultatene fra begge analysene interessante i forhold til vår problemstilling.

Hu og Cheng (2017) har nylig utført et omfattende arbeid tilknyttet erstatningsgraden, og analysen kan deles inn i to deler. I den første delen benytter de data fra *China Energy Statistical Yearbooks* og *China Statistical Yearbooks* for 30 provinser i Kina fra 1995 til 2014. Her er foku-

⁹Litteraturen som omhandler effekten av økt ikke-fossil kraftproduksjon på CO_2 -utslipp er bredere enn litteraturen som tar for seg erstatningsgraden mellom ikke-fossil og fossil kraftproduksjon.

¹⁰Artikkelen er ennå ikke publisert, men den har blitt akseptert av *Applied Energy* og vi har fått tilgang til resultatene.

¹¹Liddle og Sadorsky (2017) bruker to estimeringsmetoder kalt *Common correlated effects mean group* og *Augmented Mean Group*

set på erstatningsgraden mellom ikke-fossil og fossil kraftproduksjon, og erstatningseffekten på fossil kraftproduksjon av å importere kraft fra andre provinser.¹² Det formuleres tre modellspekifikasjoner basert på modellene i York (2012), som estimeres med Prais–Winsten korrigering for førsteordens seriekorrelasjon og *Panel-Corrected Standard Errors* (PCSE). De estimerte resultatene for erstatningsgraden og erstatningseffekten tar henholdsvis verdier i intervallet [-0.241 , -0.221] og [-0.313 , -0.235]. Den andre delen av analysen er en replika av York, hvor de benytter tilsvarende data fra *World Databank* for 133 land over tidsperiodene 1960-2009 og 1995-2013. I den første perioden estimerer de en signifikant erstatningsgrad som tar verdien -0.136, og i den andre perioden estimerer de en signifikant erstatningsgrad som tar verdien -0.114.

Den tidligere litteraturen som tar for seg erstatningsgraden konkluderte med at den konvensjonelle tankegangen ikke holder for verden som helhet. Ikke-fossil kraftproduksjon har med andre ord erstattet fossil kraftproduksjon med mindre enn et en-til-en forhold. Samtidig er det gjennomgående at en erstatningsgrad faktisk eksisterer, da alle koeffisienter som representerer erstatningsgraden er negative. Vi forventer derfor å estimere en erstatningsgrad for OECD som ligger i intervallet [-1, 0].

Som nevnt er litteraturen som tar for seg erstatningsgraden liten, og tidligere analyser har undersøkt erstatningsgraden for verden som helhet. Fordi vi ser på en spesifikk gruppe land som står for hele 45% av verdens kraftproduksjon, anser vi denne oppgaven som et viktig bidrag og en utvidelse av faglitteraturen.

¹²Erstatningseffekten er uavhengig av kraftkilden benyttet for å produsere den importerte kraften.

2 | Energi og kraft

Formålet med oppgaven er å undersøke erstatningsgraden mellom fossil og ikke-fossil kraftproduksjon i et utvalg OECD-land. For å gjøre dette på en oversiktlig måte ønsker vi å legge et solid teori- og faktagrunnlag, slik at leseren lettere kan forstå hva denne oppgaven omhandler. I dette kapittelet forklares først utviklingen i verdens energibruk, deretter settes et definisjonsmessig skille mellom energi og kraft. Videre belyses forskjellene mellom produksjon og forbruk av kraft, før vi utdyper hvorfor vi har valgt å begrense oss til produksjon. Kapittelet avsluttes med en diskusjon av sammenhengen mellom kraftproduksjon og miljøproblemet.

2.1 Energi og energiforbruk

Gjennom historien har energitilgang vært en fundamental faktor for menneskelig utvikling, og i senere tid økonomisk vekst. Sammenhengen mellom økonomisk vekst og energitilgang blir i Perman et al. (2011a, s.34) illustrert ved å se på menneskets utvikling i lys av den historiske energibruken, der energibruken deles opp i tre hovedfaser.

Den første fasen kalles jakt- og samler-fasen, og varte fra menneskets opprinnelse og frem til for omtrent 12000 år siden. I denne tidlige perioden var den gjennomsnittlige energibruken per innbygger 2 *Human Energy Equivalent* (HEE).¹ Den andre fasen kalles jordbruksfasen og karakteriseres ved at mennesket begynte å prosessere mat ved å i større grad utnytte miljøet rundt seg. Teknologien i energibruken utviklet seg, og det gjennomsnittlige mennesket brukte energi tilsvarende 3-4 HEE gjennom denne fasen. Den menneskelige populasjonen økte samtidig med en faktor på mer enn 200, og med dette økte menneskets totale energibruk med en faktor på rundt 400. Den industrielle fasen startet sent på 1700-tallet, og kjennetegnes ved systematisk og ukritisk bruk av fossile energikilder. I første omgang var det hovedsakelig bruk av kull i industri, deretter i transport som stod for økningen i total energibruk. På 1900-tallet ble oljebruken, samt

¹HEE er mengden energi som kreves av et individ for å fungere. Dette varierer med individ, og 1 HEE tilsvarer 10 megajoules. Dette er et avrundet mål på hvor mye energi et voksent menneske som lever relativt aktivt i gjennomsnittlige klimaforhold krever per dag (Perman et al., 2011a, s.34)

bruken av kull for å generere kraft, viktigere. I de etterhvert svært industrialiserte økonomiene var det lite som lignet på den tidlige jakt- og samler-fasen. Ved starten av 1900-tallet brukte det gjennomsnittlige mennesket rundt 15 HEE, og tett opp mot tusenårsskiftet hadde den gjennomsnittlige bruken vokst til 20 HEE (Perman et al., 2011a, s.34.35).²

Om situasjonen på slutten av 1900-tallet sammenlignes med den på slutten av 1700-tallet, hadde den menneskelige befolkningen økt med en faktor på rundt 6, og det samme hadde energibruken per innbygger. Dermed har global energibruk de siste 200 årene økt med en faktor på 36.³

2.2 Kraft som energi

Den moderne energibruken omfatter så godt som alle daglige prosesser, og det er normalt å skille mellom primær- og sekundærenergi. Primærenergi er energi som ligger i naturressursene, mens sekundærenergi, eksempelvis kraft, er energibærere omgjort fra primærenergi (SNL, 2017). Denne oppgaven undersøker i hvilken grad ikke-fossil kraftproduksjon har erstattet fossil kraftproduksjon, og er derfor begrenset til å se på energi i form av kraft.

Kraft er et naturlig fenomen som mennesket har lært å utnytte, og blir til ved å konvertere energi. Konverteringsprosessen fra energi til kraft utføres hovedsakelig i et kraftverk, ved å utnytte en energikilde. I denne sammenhengen brukes begrepet *effekt*, som er kapasitet brukt eller produsert over en gitt tidsperiode. Dersom den maksimale kapasiteten i et kraftverk er 1000 megawatt, og det er tilstrekkelig tilgang til en energikilde slik at generatoren produserer maksimalt i en time, vil effekten produsert være 1000 megawattime (MWh).⁴ I mange kraftverk styres produksjonen av fysisk tilføring av energikilder, noe som gjør at kraftverket i prinsipp kan produsere for full effekt til enhver tid. For andre typer kraftverk begrenses produksjonen av varierende tilgang på energikilder. Et slikt kraftverk kan dermed ikke produsere kraft tilsvarende sin maksimale

²Dette globale gjennomsnittet kommer fra et bredt spekter av individuelle land, der ytterpunktene er USA og Bangladesh med henholdsvis 93 og 4 HEE per innbygger.

³Utviklingen i den totale menneskelige energibruken (36) = utviklingen i den menneskelige befolkning (6) × utviklingen i energibruken per innbygger (6)

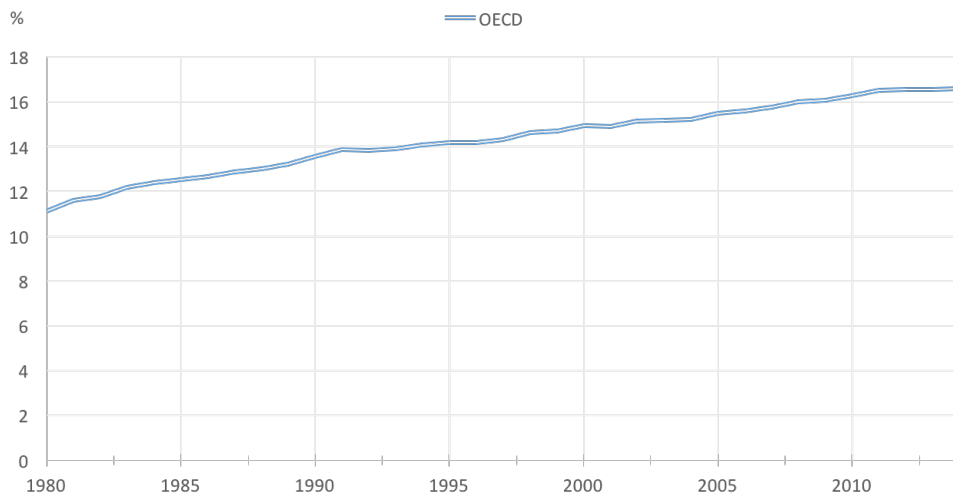
⁴Se *appendiks A* tabell A.2 for forholdet mellom watt, kilowatt, megawatt, gigawatt og terrawatt.

effekt, og vil derfor ha en lavere utnyttelsesgrad.⁵

2.2.1 Kraft i energibruken

Vi skal nå se på total energibruk som *bruken av primærenergi før transformasjonen til sekundærenergi*. Total energibruk er derfor mengden primærenergi som brukes. Ved å sammenligne total energibruk med mengden kraft produsert eller konsumert, vil man kunne beregne andelen kraftproduksjon/kraftkonsum av den totale energibruken.

Kraftkonsumet i OECD som andel av den totale energibruken økte fra 11% i 1980 til 16,5% i 2014. I figur 2.1 illustreres utviklingen for hele perioden grafisk, og det er tydelig at kraftkonsumet utgjorde en relativt stor andel. Som vi i neste delkapittel skal forklare, finnes det et krafttap fra kraftverk til forbruker. Krafttaper, i tillegg til et energitap i konverteringsprosessen fra primærenergi til kraft, vil begge inngå som andeler av total energibruk. Dette gjør at kraftkonsumet i kWh er mindre enn antall kWh energi som har blitt brukt til å skape kraften som konsumeres. Andelen som vises i figur 2.1 er derfor noe lavere enn dersom disse tapene hadde blitt tatt hensyn til. Uavhengig av dette, utgjør kraft en stor del av total energibruk, og kraftkonsumet forklarer derfor mye av utviklingen i den totale energibruken.



Figur 2.1: Andelen kraftforbruk av det totale energiforbruket i OECD35 fra 1980 til 2014. Datakilde: The World Bank (2017)

⁵Utnyttelsesgraden er gjennomsnittlig andel produsert av den maksimale produksjonskapasiteten over en periode. Typisk ett år.

Ettersom andelen økte jevnt i løpet av hele perioden, tyder dette på at kraft som energikilde har blitt viktigere i OECD-landene. Det er imidlertid verdt å merke seg at andelen ikke er lik innad i OECD, noe som henger sammen med at kraft anvendes ulikt i de forskjellige landene.

For å illustrere dette kan vi ta utgangspunkt i Norge, som tradisjonelt har hatt rikelig med tilgang på kostnadseffektiv vannkraft. Dette har bidratt til utbyggingen av et veletablert distribusjonsnett for kraft, og en kraftintensiv industri.⁶ I kombinasjon med et kaldt klima, gjør dette at kraft i større grad brukes til oppvarming av boliger og øvrige bygninger enn i de fleste andre land (SSB, 2016). I 2014 var Norges kraftkonsum per innbygger derfor det nest høyeste i verden, med 23 000 kWh. Dette tilsvarer et kraftforbruk som andel av energiforbruket i underkant av 40%. Til sammenligning hadde USA, som i 2014 var verdens største energibruker per innbygger, en kraftandel av den totale energibruken på 16,7%.⁷

2.2.2 Forbruk og produksjon

Dagens lagringsmuligheter for kraft er begrenset, og av den grunn regnes kraft som en ferskvare som må konsumeres samtidig som den produseres.⁸ For å sikre forbrukerne stabil krafttilgang, er det derfor viktig at den tilgjengelige produksjonskapasiteten og kapasiteten i strømmettet er stor nok til å takle etterspørselsendringer i form av døgn- og sesongvariasjoner.

I overføringen av kraft fra produsent til forbruker forsvinner noe av kraften i kraftledningen. Dette krafttapet skyldes motstanden i ledningen, og tilsvarer mellom 5-10% av all kraften som produseres (Flåten og Skonhøft, 2014, s. 307). For OECD var kraftproduksjonen fra 1980 til 2014 mellom 6 og 8 % høyere enn kraftforbruket. Denne differansen skyldes hovedsakelig krafttapet i overføringsprosessen, kraftverkenes eget forbruk av kraft, og import og eksport av kraft fra/til land utenfor OECD (The World Bank, 2017).

Det er ikke bare i volum det er forskjeller mellom forbruk og produksjon. Som tidligere nevnt skiller det ofte mellom primær- og sekundærenergi. Primærenergien som konverteres til kraft er

⁶Den kraftintensive industrien utgjorde rundt 40% av sluttforbruket av kraft i 2014.

⁷Energibruken per innbygger var i 2014 80 820 kWh, mens kraftkonsumet per innbygger var 13480 kWh.

⁸Den etablerte teknologien for kraftlagring består hovedsakelig av å bruke overskuddskraft til å pumpe vann opp i vannmagasin, denne metoden kalles *Pumped-storage hydroelectricity* (PSH) (IEA, 2014).

enten fossil eller ikke-fossil. Kraften som konsumeres, er derimot verken fossil eller ikke-fossil. Å skille mellom fossil og ikke-fossil kraftproduksjon vil derfor være enklere enn å skille mellom konsum av kraft som er produsert fra fossile eller ikke-fossile kilder. Videre i oppgaven fokuseres det derfor på kraftproduksjon, og ikke kraftkonsum. Uttrykket *fossil kraftproduksjon* brukes om kraftproduksjon ved bruk av fossile kraftkilder, og *ikke-fossil kraftproduksjon* brukes om kraftproduksjon ved bruk av ikke-fossile kraftkilder.

Fossile kraftkilder er stoffer av biologisk opprinnelse som har blitt bevart i jord- eller bergartslag, og som over tid har gjennomgått omdanningsprosesser (SNL, 2017). Kull, naturgass og olje er de fossile kildene som brukes i kraftproduksjon. Under ikke-fossile kilder inngår atomkraft og alle de fornybare kraftkildene. Fornybare kraftkilder har sin opprinnelse i naturens eget kretsløp, og innenfor et menneskelig tidsperspektiv vil det være umulig å bruke opp disse ressursene. Vann, vind, solenergi, biomasse og varme (geotermisk energi), er de fornybare kildene som benyttes i kraftproduksjon.⁹

2.3 Kraft og miljøproblemet

De siste tiårene har menneskelig økonomisk aktivitet bidratt til store globale klimaendringer. Bruntlandkommisjonen (1987) konkluderte i sin sluttrapport *Vår felles framtid* med at utviklingen ikke var forsvarlig og introduserte med det begrepet *bærekraftig utvikling*. Fra da har klima-problemet og jakten på en løsning vært en stor del av den globale politikken. Mange organisasjoner bidrar til å overvåke utviklingen, og en av de viktigste bidragsyterne er FNs klimapanel som har utgitt fem rapporter om de globale klimaendringene. IPCC (2014) rapporterer at menneskelig aktivitet med over 95% sikkerhet er årsaken til klodens gjennomsnittlige temperaturøkning fra 1950-tallet og frem til i dag. I den samme rapporten vises det at den største enkeltkilden til utslipp av klimagasser¹⁰ er kraft- og varmeproduksjon, som i 2014 stod for 25% av de menneskeskapte utslippene.¹¹ Sammensetningen av ulike kilder i kraftproduksjonen kalles kraftmiks, og

⁹I definisjonen til *World Databank* inngår følgende som fornybar kraftproduksjon hvor vi ser bort i fra vannkraft; Geothermal, sol photovoltaic, sol thermal, bølge, vind, industriavfall, avfall (søppel) og diverse andre former for biobrensler.

¹⁰Med klimagasser mener vi hovedsakelig karbondioksid, (CO_2), metan (CH_4) og lystgass (N_2O) og flourgass

¹¹Andre store kilder er: land- og skogbruk (24 %), industri (21%) og transport (14%)

det er store forskjeller i hvor forurensende de ulike kraftkildene er. I IPCC (2011, s. 190) blir det gitt en oversikt over forskningsartikler som veier utslippene fra ikke-fossile og fossile kraftkilder opp mot hverandre. De samlede resultatene viser at klimagassutslippene fra fossil kraftproduksjon er langt høyere enn fra ikke-fossil.¹²

Siden 1980 har verdens kraftproduksjon nesten tredoblet seg, og i henhold til EIAs¹³ årlige prediksjoner vil verdens kraftproduksjon øke med ytterligere 50% fra nivået i 2014 frem til 2040.¹⁴ Miljøeffektene av at verdens kraftproduksjon har økt, og kommer til å øke i fremtiden, har tvunget frem politiske endringer som gjør at man i større grad fremmer bruken av ikke-fossile kraftkilder. Både Kyoto-avtalen og Paris-avtalen har begge som mål å redusere lands utslipp av klimagasser. Teknologisk har man sett en sterk utvikling i de ikke-fossile produksjonsmetodene. Å øke bruken av ikke-fossil kraftproduksjon er en svært viktig faktor for å redusere innvirkningen på miljøet, men det fører ikke direkte til utslippsreduksjoner. For at det skal skje, må ny ikke-fossil kraft erstatte den eksisterende fossile kraftproduksjonen. En stor erstatningsgrad er derfor nødvendig for å redusere kraftsektorens innvirkning på miljøet.

¹²Der klimagassutslippene fra kraftproduksjon er målt i gram CO_2 -ekvivalenter per kWh over hele livsløpet til kraftkilden.

¹³EIA står for Energy Information Administration, og er en uavhengig organisasjon fra USA som driver med energi-relatert statistikk og analyse.

¹⁴Basert på data fra The World Bank (2017) var verdens totale kraftproduksjon i 1980 på 8200 TWh. I 2014 hadde produksjonen økt til 23865 TWh.

3 | Kraftproduksjonen i OECD35

I OECD35 har produksjonssammensetningen som inngår i den totale kraftproduksjonen gjennomgått store endringer. Det er disse endringene som gir grunnlaget for at den ikke-fossile kraftproduksjonen kan ha erstattet den fossile. I dette kapitlet forklares derfor utviklingen i kraftproduksjonen i perioden fra 1980 til 2014 for OECD35. For å forklare utviklingen på en hensiktsmessig måte, presenterer vi først en generell oversikt over de største omveltningene som har preget kraftmarkedene i løpet av perioden. Deretter forklares utviklingen i total kraftproduksjon i OECD35. Til slutt fokuserer vi på utviklingen i fossil og ikke-fossil kraftproduksjon separat.

3.1 Kraftmarkedene

Utviklingen i kraftmarkedene kan oppsummeres i tre politiske omveltninger som henger tett sammen: liberalisering, klimautfordringer og sikker krafttilgang.¹

Fra midten av 1980-tallet og frem til tidlig på 2000-tallet gjennomgikk de fleste av kraftmarkedene i OECD35 en gradvis liberalisering- og integreringsprosess Al -Sunaidy og Green (2006). Før dette var kraftmarkedene tungt regulerte, og krafttilbudet var styrt av få store aktører, ofte statlige. Liberaliseringen innebar at kraftmarkedene åpnet opp for flere aktører, med mål om effektivisering gjennom økt konkurranse og lavere kraftpriser (European Commission, 2012a; U.S.Department of Energy, 1978).

For mange land har *sikker krafttilgang* vært synonymt med å ha tilgang til et selvforsynt kraftmarked, slik at produksjonen er mindre sensitiv ovenfor tilbud- og etterspørselssjokk. Oljekrisen i 1973 bidro til at for eksempel Frankrike og Sverige gikk bort fra oljefyring som sin største energikilde, og over til stortilt atomkraft-produksjon, nettopp for å skjerme seg fra mulige fremtidige oljekriser. I nyere tid har ønsket om sikker krafttilgang blidrett til internasjonal integrering av kraftmarkedene, slik som NordPool og det Europeiske kraftmarkedet (European Parliament,

¹Jamasab og Pollitt (2005); Schubert et al.(2016) ser spesifikt på EU, mens Al -Sunaidy og Green (2006) ser på hele OECD.

2017). I dag er 75% av Europas kraftmarkeder koblet sammen, og kraften brukes derfor der behovet er størst (Statnett, 2014).

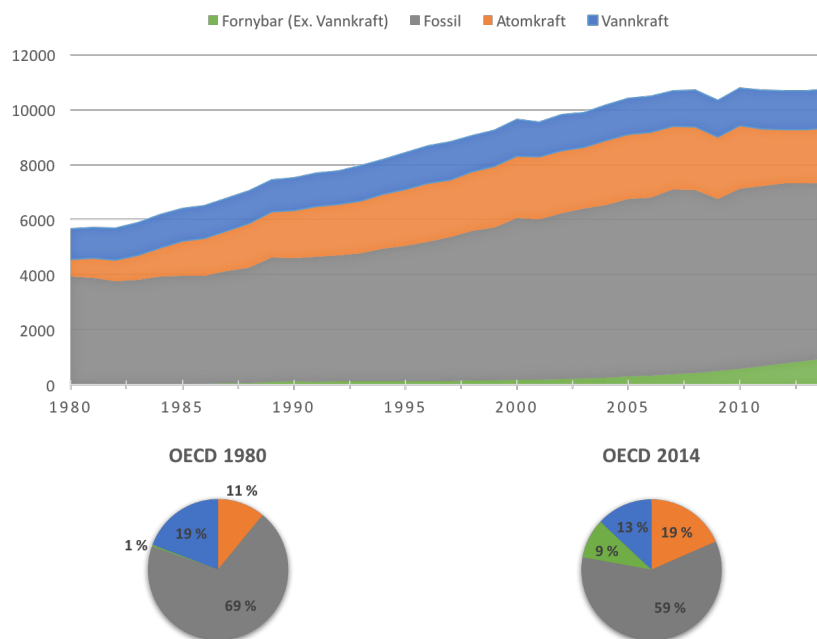
Som tidligere nevnt står verdens kraftproduksjon for nesten 25% av de menneskeskapte klimagassutslippene. Denne sammenhengen har medført en rekke tiltak for å redusere fossil kraftproduksjon og for å fremme ikke-fossil kraftproduksjon (UNEP, 2017; OECD, 2011). Det skiller hovedsakelig mellom kvantumsbaserte og prisbaserte tiltak/virkemidler. Et eksempel på et kvantumbasert virkemiddel er elsertifikatorordningen, som har vært aktiv i Sverige siden 2003, og som Norge ble en del av i 2012. Ordningen har som formål å stimulere til økte investeringer i fornybar kraftproduksjon (Regjeringen, 2014). Et eksempel på et prisbasert virkemiddel er *feed-in-tariffs*. Disse fungerer ved at produsenter av fornybar kraft blir tilbudt langtidskontrakter som inkluderer en prisgaranti for all fornybar kraft som produseres. Ordningen har vært brukt i mange vest-europeiske land, og har vist seg å være svært effektiv blant annet i Tyskland (Renn og Marshall, 2016). Et annet eksempel er *cap and trade*-systemet, som er et kvantumbasert virkemiddel der et marked for kjøp og salg av såkalte utslippskvoter skapes. Systemet fungerer ved at det settes et tak for hvor mye utslipp som tillates over en tidsperiode. Deretter fordeles forurensningskvoter mellom de ulike aktørene. Fordelingen skjer hovedsakelig ved arv eller auksjoner. I dag finnes det flere store *cap and trade*-systemer, og det største er det europeiske kvotesystemet (EU ETS). Systemet har som formål å redusere og kontrollere utslipp av drivhusgasser. EU ETS dekker omlag 11000 kraftstasjoner og fabrikker i de 28 medlemslandene, i tillegg til Island, Liechtenstein og Norge. Totalt blir 45% av totale utslipp i Europa regulert under EU ETS, noe som medfører høyere kostnader i den europeiske kraftproduksjonen ved bruk av fossile kilder. (EU, 2016).

3.2 Kraftproduksjon

I figur 3.1 fremstilles utviklingen i OECD35s kraftproduksjon, og det skiller mellom produksjon ved bruk av ulike kilder. Sektordiagrammene illustrerer produksjon ved bruk av de ulike kraftkildene som andel av den totale kraftproduksjonen i 1980 og 2014, respektivt. Andelene for de ulike

typene kraftproduksjon omtales videre i kapitlet som *type kraftkilde*, etterfulgt av andelen.²

I 1980 var den samlede kraftproduksjonen i OECD35 på 5660 TWh, og i 2014 hadde den økt til 10744 TWh.^{3 4} Veksten fra 1980-2014 tilsvarer en årlig gjennomsnittlig vekst på 1,85%. Grovt sett kan utviklingen i OECD35s kraftproduksjon deles inn i tre faser: før finanskrisen, under finanskrisen og etter finanskrisen. Perioden før finanskrisen var preget av stabil vekst, med unntak av noen uregelmessigheter mellom 1989-1990 og på starten av 2000-tallet. Mot slutten av 2008 ser vi et markant fall i produksjonen, noe som skyldes redusert etterspørsel under finanskrisen. I perioden etter finanskrisen tok produksjonen seg opp til sitt tidligere nivå, og lå relativt stabilt på dette nivået frem til 2014.



Figur 3.1: Kraftproduksjon for OECD35 i perioden 1980-2014. Sektordiagrammene viser andelen til de ulike kraftkildene av den total produksjon i 1980 og 2014. Datakilde: Datakilde: The World Bank (2017) og OECD (2017)

Av sektordiagrammene i figur 3.1 ser vi at andelen ikke-fossil kraftproduksjon av total kraftproduksjon økte fra 31% i 1980 til 41% i 2014. Fossilandelen falt i samme periode fra 69% til 59%. Denne utviklingen indikerer en grad av erstatning, og er grunnlaget for at det eksisterer en er-

²Eksempelvis fossilandelen, fornybarandelen, atomkraftandelen osv.

³Det utgjorde henholdsvis 69 % og 45 % av total kraftproduksjon i verden.

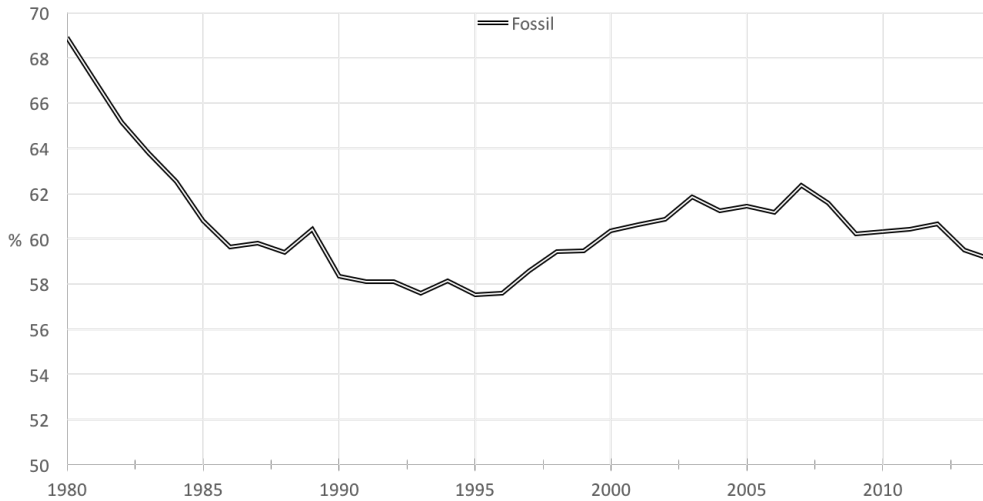
⁴Basert på data fra The World Bank (2017) var verdens totale kraftproduksjon i 1980 på 8200 TWh. I 2014 hadde produksjonen økt til 23865 TWh.

statningsgrad. Det er derfor hensiktsmessig at vi ser på utviklingen i fossil og ikke-fossil kraftproduksjon separat.

For å forstå utviklingen i de forskjellige produksjonsmetodene bedre, kommenterer vi også de tilknyttede kostnadene. Produksjonskostnadene er hentet fra IRENA (2014); WEC (2013), som benytter kostnadsmodellen *Levelised Cost Of Energy*, heretter forkortet til LCOE. LCOE til et kraftprosjekt gjenspeiler flere faktorer, deriblant kvaliteten på ressursene, materialkostnader, effektivitet, drift- og vedlikeholdskostnader, levetid og kapitalkostnader (IRENA, 2014). Eller enkelt og greit kraftprisen per MWh et prosjekt må ta for å dekke sine kostnader (WEC, 2013).

3.2.1 Fossil kraftproduksjon i OECD35

Bruken av fossile kraftkilder har spilt en viktig historisk rolle for den økonomiske utviklingen i de fleste OECD-landene. Dette skyldes i stor grad at fossil kraftproduksjon medfører et stabilt i krafttilbud, som følge av at produksjonsmetoden er enkel å ta i bruk og innsatsfaktorene er lett tilgjengelige. Den store andelen fossil kraftproduksjon, som i 2014 utgjorde hele 59% av OECD35s kraftproduksjon, er et resultat av nettopp dette. Produksjonskostnadene tilknyttet fossil kraftproduksjon er spesielt avhengig av prisen på innsatsfaktorene. Som følge av varierende tilgjengelighet medfører dette regionale prisforskjeller. Samtidig har karbonprising i nyere tid medført usikkerhet, og sammen med direkteeffekten av pris- og kvantumsbaserte virkemidler for å redusere CO_2 -utslipp, har dette ført til i økt LCOE (WEC, 2013).



Figur 3.2: Utviklingen i andelen fossil kraftproduksjon i OECD35. Datakilde: The World Bank (2017)

Figur 3.2 viser fossilandelen i OECD35 for hele tidsperioden. Store deler av andelsfallet på 10% fant sted i perioden mellom 1980-1985, noe som hovedsakelig forklares av den kraftige veksten i atomkraftproduksjonen frem mot Tsjernobyl-ulykken i 1986. Samtidig som andelen falt kraftig, var produksjonen forholdsvis konstant. Dette indikerer at fossil kraftproduksjon i denne perioden ikke ble erstattet av ikke-fossil kraftproduksjon, men at etterspørselsveksten ble besvart med økt produksjon av ikke-fossil kraft.

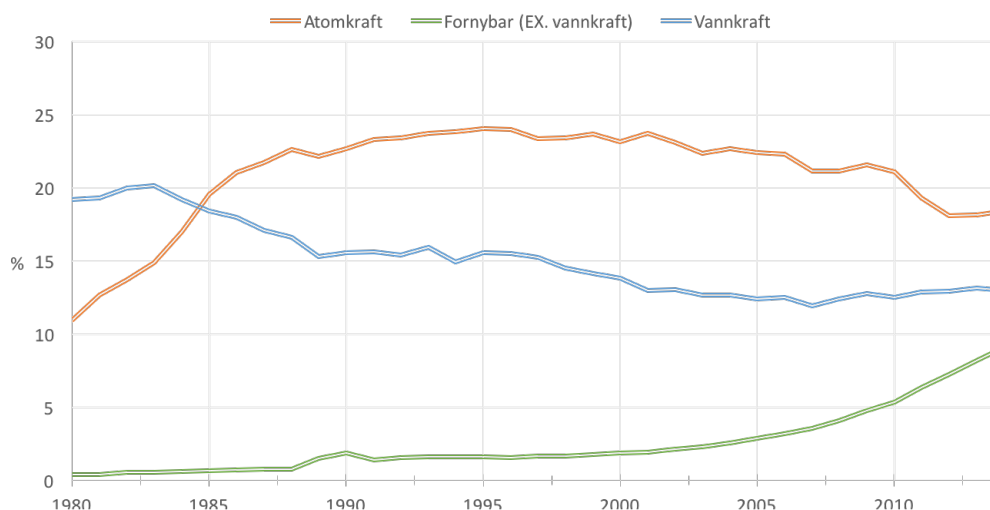
Fossil kraftproduksjon som andel av total kraftproduksjon nådde sitt bunnpunkt i 1993. Frem mot 2004 økte fossil kraftproduksjon som andel og i volum, til tross for liberaliseringsprosesser, klimaavtaler og økt miljøbevissthet. Denne veksten er derfor et godt eksempel på OECD-landenes avhengighet av fossil kraftproduksjon, og kan forklares med en såkalt *carbon-lock-in*. Fenomenet fremkommer når økonomisk aktivitet i et land er svært avhengig av økonomisk gunstig teknologi som slipper ut mye CO_2 (Perman et al., 2011b, s.163-164). Ved å se på perioden som helhet økte fossil kraftproduksjon fra 3923 TWh i 1980 til 6375 TWh i 2014, samtidig falt fossilandelen med 10%-poeng. Veksten i den fossile kraftproduksjonen har med andre ord vært tregere enn produksjonen ved bruk av andre kraftkilder. Isolert sett taler det for at OECD-landene ikke opplevde en fullstendig *carbon-lock-in*.

Fra 2007 og frem til 2014 falt fossilandelen to ganger. Finanskrisen bidro til et fall på rundt 3%-poeng over en toårsperiode, og fra 2010 økte andelen svakt, men jevnt, før den fra 2012 falt med

ytterligere 2%-poeng. Til sammenligning økte fornybarandelen fra 2012-2014 med mer enn 2%.

3.2.2 Ikke-fossil kraftproduksjon i OECD35

Ikke-fossil kraftproduksjon består av tre komponenter som har hatt en veldig forskjellig utvikling. Det er derfor hensiktsmessig å beskrive utviklingen for disse separat.



Figur 3.3: Utviklingen i andelen atomkraft, vannkraft og fornybar kraft i OECD35 fra 1980 til 2014. Datakilde: The World Bank (2017)

I figur 3.3 illustreres utviklingen i kraftproduksjonen for de tre ikke-fossile kraftkildene som andeler av total kraftproduksjon. Det kommer klart frem at atomkraft og vannkraft har vært sentrale i OECD35 siden 1980, mens fornybarandelen nærmest var neglisjerbar frem til 2005.

Fornybare kraftkilder og vannkraft

En fellesnevner for fornybare kraftkilder er at kraftkilden til en viss grad er ukontrollerbar. Det impliserer at kraftverk som benytter fornybare kraftkilder i gjennomsnitt har en lavere utnyttelsesgrad enn kraftverk som benytter fossile kraftkilder. Solkraft kan for eksempel utelukkende produseres på dagtid, og produksjonen avhenger av hvor mange soltimer det er i løpet av et døgn.

Den fornybare kraftproduksjonen i OECD35 var i 1980 på 22 TWh. I 2014 hadde produksjonen økt til 980 TWh. Mesteparten av denne veksten har funnet sted i årene etter 2000. Dette henger sammen med sterk teknologiutvikling, økt klimafokus og liberaliseringsprosessene kraftmarkedene gjennomgikk. Etter at kraftmarkedene ble liberalisert, innførte mange av OECD-landene i andre runde en karbon-nøytral politikk. Det har bidratt til økonomisk gunstig produksjon gjennom subsidiering av fornybar kraft. Teknologien som benyttes i fornybar kraftproduksjon har vært, og er fortsatt under utvikling. Fra 1980 har det blitt forsket mye på hvordan produksjonsmetodene for kraft bedre kan utnytte de fornybare ressursene. Av de fornybare kraftkildene er det vind- og solkraft det har blitt forsket på og investert mest i. Dette har gitt resultater gjennom mer effektiv produksjon og høyere utnyttelsesgrad (UNEP, 2017). Dette, kombinert med fallende kapitalkostnader i produksjonen, har ført til reduserte LCOE. Fornybar kraft har derfor blitt mer konkurransedyktig (IRENA, 2014).

I motsetning til andre fornybare kraftkilder, kan vann til en viss grad kontrolleres for å optimalisere produksjonen. Det skilles mellom regulerbar og uregulerbar vannkraftproduksjon. Regulerbar produksjon innebærer at vannkraftverket er knyttet til et vannmagasin, hvor den potensielle energien i vannet kan lagres. Fordelen med dette er at produksjonen kan reguleres etter forbrukernes etterspørsel (Flåten og Skonhøft, 2014). Uregulerbar produksjon foregår i elveleier og bestemmes av mengden vann som renner igjennom. LCOE til et vannkraftprosjekt avhenger i stor grad av lokasjon og de lokale forholdene, som må veie opp for de høye installasjonskostnadene (WEC, 2013).

Vannkraftproduksjonen i OECD35 har sine likhetstrekk med utviklingen i kraftproduksjonen fra fossile kilder. I perioden mellom 1980-2014 falt andelen vannkraft i den totale kraftproduksjonen fra 19% til 13%, mens produksjonen økte fra 1092,5 TWh til 1416,14 TWh. Den relativt trege veksten skyldes at det meste av den tilgjengelige vannkraftkapasiteten i OECD-land allerede er utbygd. Produksjonsøkningen kommer derfor hovedsakelig fra oppgradering av eksisterende kapasitet (IEA, 2012).

Atomkraft

Atomkraftproduksjon er en mye omtalt og kontroversiell produksjonsmetode. Atomkraftandelen økte med 8%-poeng i løpet av perioden, fra 11% i 1980 til 19% i 2014. Det tilsvarer en økning fra 620 TWh i 1980 til 1985 TWh i 2014. Figur 3.3 illustrerer denne utviklingen, og det er klart og tydelig at andelsøkningen hovedsakelig kom i perioden før Tsjernobyl-ulykken, i 1986. I perioden etter ulykken har det fortsatt vært perioder med vekst, men disse har vært varierende og preget av den negative oppmerksomheten.

Problemene tilknyttet atomkraft har hovedsakelig dreid seg om risiko, avfall og konstruksjonstid. Three Mill Island i 1979, Tsjernobyl i 1986 og Fukushima i 2011 er tre hendelser som har bidratt til økt oppmerksomhet om skadene atomkraft kan medføre. Disse ulykkene, kombinert med håndteringen av radioaktivt avfall, har bidratt til store offentlige og politiske debatter tilknyttet sikkerhet. Anti-atomkraft-bevegelser har bidratt til mye negativ oppmerksomhet. En konsekvens av dette er at land som Tyskland og Frankrike har iverksatt utfasing av sin atomkraftproduksjon. Utsettelse og sprengte budsjetter på enkelte anlegg har gjort atomkraft til en usikker investering, som har gjort det krevende å oppdrive offentlig og privat finansiering for utbygging av ny kapasitet. Vekstsituasjonen mellom 1986-2008 skyldes hovedsakelig disse tre hendelsene. (IEA, 2010, 2015).

Etter finanskrisen stagnerte krafttettersspørselen, og nye finansielle reguleringer har gjort finansiering av kapitalintensive prosjekter vanskelig, spesielt i liberaliserte kraftmarkeder (IEA, 2015). Med liberaliseringen innførte mange myndigheter en karbon-nøytral politikk, der fossil kraftproduksjon ble beskattet, mens kraftproduksjon fra fornybare energikilder ble subsidiert. Som forklart av European Commission (2012b), tillates det at slik subsidiering kan gi ugunstige konkurransefordeler dersom det bidrar til å nå klimamål. Dette har bidratt til usikkerhet i de langsiktige kraftprisene. Som et resultat av dette kombinert med lang tilbakebetalingstid, reflekteres dette i høye kapitalkostnader og en konsekvens er økte LCOE for atomkraftprosjekter WEC (2013); IEA (2015). Fallet i atomkraftandelen i årene etter 2008 er sterkt preget av finanskrisen, men Fukushima-ulykken bidro også til å hindre veksten i atomkraftproduksjonen.

3.3 Oppsummering

Vi har i dette kapitlet gitt et overordnet bilde av utviklingen i kraftproduksjonen for OECD35 i perioden 1980-2014. I korte trekk kan utviklingen oppsummeres ved at den totale kraftproduksjonen har økt, og at sammensettingen har blitt mer diversifisert. Dersom man ser på utviklingen i kraftproduksjonen fra fossil og ikke-fossil har begge økt, men i ulikt tempo. Veksten i ikke-fossil kraftproduksjon har vært sterkere, og medført et stort fall i fossilandelen. Dette fallet indikerer en mulig erstatningsgrad mellom ikke-fossil og fossil kraftproduksjon. Graden av erstatning er det imidlertid vanskelig å si noe konkret om ut fra andelsendringene. Fordi både fossil- og ikke-fossil kraftproduksjon har økt gjennomgående, ser det ut til at det er lite grunnlag for noen erstatningsgrad. Det er imidlertid slik at store deler av den gjennomgående veksten i fossil kraftproduksjon har funnet sted for å besvare stadig etterspørselsvekst. Når vi senere undersøker erstatningsgraden for OECD35 er det derfor viktig å kontrollere for nettopp dette.

Fordi utviklingen i de tre typene ikke-fossil kraftproduksjon har vært svært forskjellig, gir dette grunnlag for at erstatningsgraden kan være ulik for disse. Selv om alle har vokst i perioden, har andelen vannkraft i den totale kraftproduksjonen falt, mens både fornybar kraftproduksjon og atomkraft andelene har økt.

4 | Teori fra miljøøkonomi

I dette kapittelet skal vi se på to svært sentrale teorier innenfor miljø- og ressursøkonomi: IPAT-identiteten og *the Environmental Kuznets Curve (EKC)*. Tidlig i kapittelet vil IPAT-identiteten presenteres i korte trekk, før den drøftes ut fra elementer i endogen og eksogen vekstteori. Vi fokuserer på IPAT-identiteten fordi det gir en teoretisk kobling mellom økonomisk aktivitet og innvirkningen på miljøet. Mot slutten av kapittelet beveger vi oss over til å forklare EKC-hypotesen, og det vil bli gitt en kort oversikt over relevant forskning på området. Til slutt drøftes sammenhengen mellom EKC og erstatningsgraden.

4.1 IPAT-identiteten

IPAT oppstod i debatten mellom Ehrlich, Holdren og Commoner på starten av 1970-tallet, og er en mye brukt identitet for å analysere effektene av menneskelig aktivitet på miljøet.¹ IPAT dekomponerer effekten av menneskets økonomiske aktivitet på miljøet i tre eller flere multiplikative komponenter. Den grunnleggende og enkle logikken bygger på at effekten av menneskelig aktivitet på miljøet, avhenger av det individuelle konsumet og produksjonsteknologien. Dette kan formaliseres til følgende identitet:

$$I \equiv P \times A \times T \quad (4.1)$$

Her gir I effekten på miljøet målt i masse eller volum (eksempelvis CO_2 -utslipp), og P er befolkningsstørrelsen. A representerer gjennomsnittlig konsum per innbygger målt i en valuta. Det er ikke uvanlig at BNP per innbygger brukes som proxy for denne.² T er teknologi målt i mengden ressurser brukt, eller avfall generert per enhet produksjon, og representerer hvor ressursintensiv produksjonen som ligger i A er. Dersom man ser på miljøpåvirkningen som

¹IPAT ble utviklet i Ehrlich og Holdren (1970), mens Commoner var den første til å bruke den i dataanalyse.

²Konsum per innbygger tilsvarer produksjon per innbygger, ekskludert handelsbalansen. Fordi BNP per innbygger er lik produksjon per innbygger brukes derfor denne proxyen.

CO_2 -utslipp, og bruker BNP per innbygger som proxy for konsum, blir T et mål på ressursbruk eller CO_2 -utslipp per enhet BNP. Dette kan illustreres ved å omskrive likning 4.1, slik at $PA = Befolkning \times \frac{BNP}{Befolkning} = BNP$. Teknologi kan da, per definisjon, skrives som $T = \frac{I}{PA}$, eller $T = \frac{CO_2}{BNP}$. Slik at T representerer *impact* per enhet økonomisk aktivitet eller utslippsintensiteten. Likning 4.1 kan da skrives som:

$$CO_2 \equiv Befolkning \times \frac{BNP}{Befolkning} \times \frac{CO_2}{BNP} \quad (4.2)$$

En hensiktsmessig omformulering er å se på I , P , A og T som vekstrater. Identiteten blir da additiv, og tolkningen av effekten på I av endringer i P , A og T blir lettere. Ved å totaldifferensiere likning 4.1, for deretter å dividere hele uttrykket på PAT , og samtidig utnytter at $I = PAT$, får vi følgende uttrykk:

$$\frac{\dot{I}}{I} \equiv \frac{\dot{P}}{P} + \frac{\dot{A}}{A} + \frac{\dot{T}}{T} \quad (4.3)$$

Gitt måten P , A og T er definert og målt, er det slik at I alltid er lik PAT . Identiteten kan brukes til å analysere hvordan politikk rettet mot I påvirkes ved å modellere endringen i PAT . Eksempelvis krever det at teknologisk fremgang dominerer for å redusere utslippene i et land med både befolkningsvekst og vekst i BNP per innbygger.

4.1.1 Determinering

For å fastslå hvordan en endring i en av variablene påvirker I , er det nødvendig å argumentere for effektene dem imellom. En rimelig antagelse er at det i nyere tid ikke er noen Malthus-effekter i OECD-landene. Dette impliserer at befolkningsstørrelsen ikke påvirkes av de andre variablene, og P er dermed antatt eksogen. Ved bruk av elementer fra eksogen og endogen vekstteori kan sammenhengen mellom utslippsintensiteten, T , og BNP per innbygger, A , diskuteres.

I eksogen vekstteori regnes økonomisk vekst å være bestemt av eksterne faktorer, slik som teknologisk fremgang. Solow (1956) utviklet en økonomisk modell for langsiktig økonomisk vekst, der veksten forklares ved å se på akkumulering av kapital, befolkningsvekst og produktivitetsvekst. Her blir produktivitetsveksten sett på som teknologisk fremgang, og antas eksogen. I lys

av dette kan IPAT-identiteten uttrykkes ved at BNP per innbygger skrives som en funksjon av utslippintensiteten, $A = A(T)$. IPAT-identiteten kan dermed omformuleres til:

$$I \equiv P \times A(T) \times T \quad (4.4)$$

Der $\frac{\partial I}{\partial A} > 0$ og $\frac{\partial I}{\partial T} = P \times A(T) + P \times T \times \frac{\partial A}{\partial T} \geq 0$, slik at økt inntekt per innbygger gir større miljøpåvirkning, mens økt teknologisk fremgang har en usikker effekt på grunn av effekten gjennom A . På endringsform kan identiteten nå formuleres som:

$$\frac{\dot{I}}{I} \equiv \frac{\dot{P}}{P} + \frac{A'(T)\dot{T}}{A(T)T} + \frac{\dot{T}}{T} \quad (4.5)$$

Endogen vekstteori bygger på at økonomisk vekst skyldes interne faktorer som bestemmes endogent. I lys av dette kan A og T sees på som funksjoner av hverandre. Dermed er de endogene til en viss grad, som impliserer gjensidig avhengighet. Det er ikke slik at A står for all endring i T og motsatt, men deler av endringen i A forklares av T og vice versa. IPAT-identiteten kan i dette tilfellet formuleres som:

$$I \equiv P \times A(T) \times T(A) \quad (4.6)$$

Effekten av økt inntekt per innbygger er nå usikker. For å illustrere dette forenkler vi likning 4.6 ved å behandle A som en eksogen variabel. Teknologisk fremgang er dermed den eneste endogene variabelen, og økt inntekt per innbygger impliserer teknologisk fremgang. Dette reduserer innvirkningen på miljøet; $\frac{\partial T}{\partial A} < 0$. Følgelig blir formuleringen og effekten av økt inntekt per innbygger:

$$I \equiv P \times A \times T(A) \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial I}{\partial A} = \underbrace{P \times T(A)}_{\text{Direkte}} + \underbrace{P \times A \times \frac{\partial T}{\partial A}}_{\text{Indirekte}} \quad (4.8)$$

Effekten på miljøet splittes her opp i en direkte og en indirekte effekt. Den direkte effekten av økt inntekt per innbygger kan tolkes som at aktiviteten i økonomien øker, og dermed øker miljøpåvirkningen. Den indirekte effekten kan tolkes som at økt inntekt per innbygger fører til økt teknologisk fremgang, som reduserer utslippsintensiteten og effekten på miljøet. Dersom den indirekte effekten dominerer, vil økt inntekt per innbygger gi lavere miljøpåvirkning, slik at $\frac{\partial I}{\partial A} < 0$. Likning 4.7 kan alternativt formuleres på endringsform, og fanger også opp den direkte og den indirekte effekten.

$$\frac{\dot{I}}{I} \equiv \frac{\dot{P}}{P} + \underbrace{\frac{\dot{A}}{A}}_{\text{Direkte}} + \underbrace{\frac{T'(A)\dot{A}}{T(A)A}}_{\text{Indirekte}} \quad (4.9)$$

4.2 EKC-hypotesen

Kuznets (1955) viste sammenhengen mellom inntekt per innbygger og økonomiske ulikheter. Senere ble økonomiske ulikheter erstattet av innvirkningen på miljøet, og EKC-hypotesen ble formet. EKC er et hypotetisk forhold mellom økonomisk vekst og miljøpåvirkning. Hovedbudskapet er at økonomisk vekst i tidlige stadier bidrar til økt forurensning, men i avtakende grad. Trenden reverseres når inntekt per innbygger når et høyt nok nivå, gitt ved \hat{A} . For $A < \hat{A}$ vil den direkte effekten dominere, mens for $A > \hat{A}$ vil den indirekte effekten dominere.³ Sammenhengen mellom inntekt vises da som en invers u-formet kurve i $[A, I]$ -diagrammet. Årsaken til at innvirkningen på miljøet avtar med inntekt per innbygger, og etterhvert reverseres, kommer av hypotesen om at etterspørselen etter miljøkvalitet øker med inntekt. Høyere inntekt medfører flere reguleringer og bedre teknologi, sistnevnte vises ved den indirekte effekten i ligning 4.8.

EKC har vært et essensielt empirisk fenomen, men som Perman og Stern (2003) argumenterer for, er det blitt brukt lite robust økonometri når EKC-sammenhengen tidligere har blitt analysert. I Perman og Stern (2003) konkluderes det med at EKC-sammenhengen ikke eksisterer for verden som helhet, og at kurven er svært ulik fra land til land. Dinda (2004) gir en oversikt over litteraturen på feltet, og konkluderer med at det ikke er konsensus om hvilket nivå den økono-

³Effektene vi snakker om er de fra ligning 4.8 og 4.9.

miske aktiviteten må ta for at innvirkningen på miljøet skal avta. Her, som i litteraturoversikten gitt i Perman et al. (2011b, s.40), kommer det frem at EKC-sammenhengen i større grad holder for lokal miljøpåvirkning i form av blant annet utslipp av svoveldioksid (SO_2). Det er derimot ikke bevis for at den holder globalt, slik som for utslipp av karbondioksid (CO_2).

Coondoo og Dinda (2002) bruker paneldata for 88 land i perioden 1960-1990, og finner kausalitet mellom CO_2 -utslipp og økonomisk vekst for tre ulike grupperinger. Denne kausaliteten er imidlertid ulik i de tre grupperingene. For vest-europeiske og nord-amerikanske land går kausaliteten fra CO_2 -utslipp til økonomisk vekst, slik at en økning i utslipp av CO_2 påvirker inntekt per innbygger. For utviklingsland og mellomrike land går kausaliteten motsatt vei. Uavhengig av hvilken vei kausaliteten går, finner Coondoo og Dinda (2002) at sammenhengen mellom CO_2 -utslipp og økonomisk vekst er positiv, og at en fullstendig EKC-sammenheng derfor ikke eksisterer. York et al. (2003) bruker paneldata fra FN og estimerer et positivt, men avtakende forhold, mellom økonomisk vekst og CO_2 -utslipp, slik at jo rikere et land blir, desto mer vil de slippe ut, men i avtakende grad. Han og Lee (2013) analyserer effekten av CO_2 -utslipp på BNP ved å bruke en dynamisk modell med paneldata fra 19 OECD-land. De konkluderer med at effekten på økonomisk vekst av økte CO_2 -utslipp har avtatt fra 1981 til 2009. Gjennom dette argumenterer de for at det eksisterer teknologisk fremgang som skaper økonomisk vekst med mindre CO_2 -utslipp. Dette underbygger EKC-hypotesen indirekte.

Ut fra den tidligere litteraturen er det ingen klar konsensus rundt EKC-sammenhengen. Det er imidlertid enkelte bevis for at den holder lokalt, og at den holder delvis for OECD og et utvalg FN-land. Fordi det eksisterer et positivt, men avtagende forhold mellom CO_2 -utslipp og BNP per innbygger, er det nærliggende å tro at et slikt forhold også eksisterer mellom fossil kraftproduksjon og BNP per innbygger.⁴ Dersom dette er tilfelle, vil det være grunnlag for en større erstatningsgrad i land med høye inntektsnivåer per innbygger. Fordi vi ser på et utvalg OECD-land, forventer vi derfor å se en større erstatningsgrad enn for verden som helhet.

⁴Dette fordi, som vi har nevnt tidligere, kraftproduksjon står for litt under 25% av de menneskede CO_2 -utslippene.

5 | Variabler og databeskrivelse

I dette kapittelet presenteres datamaterialet og de sentrale variablene slik de benyttes i den empiriske analysen. Vi vil også klargjøre ekstremverdier i datasettet, og argumentere for hvorfor eliminering av disse kan være aktuelt. Først presenteres deskriptiv statistikk for de sentrale variablene der 29 OECD-land, heretter OECD29, er inkludert. Deretter presenteres deskriptiv statistikk for OECD27, der Norge og Island er ekskludert. Det er OECD27 som utgjør utvalget i analysen.¹

5.1 Data

Datasettet vårt består av årlige observasjoner for 27 OECD-land fra 1980 til 2014. Hoveddelen av datamaterialet er hentet fra *World Databank* og *OECD* sine databaser, og omfatter alle de 27 landene i hver enkelt periode.²

Fra *World Databank* har vi hentet tall for andel kraftproduksjon ved bruk av de ulike kraftkildene.³ Andelene ble deretter addert opp til kraftproduksjonen ved bruk av fossile og ikke-fossile kraftkilder. Som følge av mangel på kvantumdata fra *World Databank*, hentet vi data for den totale kraftproduksjonen for hvert enkelt land fra *OECD* sin database. Kvantumstallene for kraftproduksjon fra fossile og ikke-fossile kilder er derfor et produkt av dataene fra de to databasene. Data for BNP per innbygger er hentet fra *World Databank*. Her fikk vi tilgang til data for alle land i alle perioder, med unntak av manglende data for Polen og Ungarn før 1990. For å ta hensyn til denne mangelen tok vi utgangspunkt i årlig real-BNP-vekst for begge landene i hver periode, hentet fra *IMF*. Ut fra dette regnet vi oss til en proxy⁴ for real BNP i de manglende årene.⁵

¹Se Appendiks A tabell A.1 for en detaljert liste over landene vi inkluderer i analysen.

²Se The World Bank (2017), OECD (2017) og IMF (2017)

³For noen land i enkelte år summerer ikke alle andelene seg opp til 100%. Dette gjelder hovedsakelig for Danmark (1995-2002), Finland (1980-2014), Irland (1980-2014) og Japan (1990-2000, 2012-2014). The World Bank (2017) begrunner dette med såkalt ikke-klassifisert kraft. Dette er kraft produsert fra ubestemte kilder i et gitt år, som har blitt fanget opp i total kraftproduksjon samme år.

⁴En proxy er en variabel som i seg selv ikke er direkte relevant, men som brukes som erstatning for en ikke-målbar variabel.

⁵Real GDP-veksten for dataen fra IMF stemmer overens med dataen fra World Databank. Se figur B.4 og B.5 i *Appendiks C* for en grafisk fremstilling.

Dataen vi har aggregert kan man finne hos flere databaser. Grunnen til at vi har valgt å bruke *World Databank*, er at data herfra er omgjort av IEA for å møte internasjonale standarder. Samtidig brukes data fra World Databank-data i York (2012).

5.2 Variabler

Innhentet data er for aggregerte nasjonale nivåer. Dette innebærer at land med høyere nivåer tillegges større vekt enn land med lavere nivåer. For å skalere ned på en hensiktsmessig måte og samtidig kontrollere for populasjonsvekst, divideres alle variablene på landenes egen populasjon i inneværende år. Alle variablene er gitt på nivåform.

5.2.1 Avhengig variabel

Den avhengige variabelen gjennom hele oppgaven er fossil kraftproduksjon per innbygger, F_{it} , målt i kWh.⁶ Variabelen er konstruert for hvert år ved å multiplisere de enkelte landenes kraftproduksjon med landets fossilandel. Som tidligere forklart, er kraftkildene som inngår i den fossile kraftproduksjonen kull, olje og gass. Formelt er F_{it} for hvert enkelt land i et gitt år konstruert på følgende måte:

$$F = \frac{[Kull^{\%} + Gass^{\%} + Olje^{\%}] \times Kraftproduksjon^{kWh}}{Befolkning} \quad (5.1)$$

5.2.2 Forklaringsvariabel

Den sentrale forklaringsvariabelen er ikke-fossil kraftproduksjon per innbygger, IF_{it} , målt i kWh. Denne er konstruert på samme måte som F_{it} , og formelt kan IF_{it} for hvert enkelt land i et gitt år derfor uttrykkes som:⁷

⁶Hvor fotskrift $i = 1, 2, \dots, 27$ representerer hvert enkelt land, mens fotskrift $t = 1, 2, \dots, 35$ representerer år.

⁷Div.fornybar står for *diverse fornybar*. $Div.fornybar^{\%}$ er fornybarandelen av total kraftproduksjon.

$$IF = \frac{[Vann^{\%} + Div.Fornybar^{\%} + Atomkraft^{\%}] \times Kraftproduksjon^{kWh}}{Befolkning} \quad (5.2)$$

Når vi i kapittel 6 formulerer den empiriske grunnmodellen, er det en koeffisient foran IF som vil representere erstatningsgraden.

I analyse del 2 skal vi utnytte at dataen for den ikke-fossile kraftproduksjonen, IF , er satt sammen av tre komponenter. Variablene som brukes her er konstruert på samme måte som F og IF , og er henholdsvis; fornybar kraftproduksjon, FB_{it} , hvor vi ser bort fra vannkraft, vannkraftproduksjon, V_{it} , og atomkraftproduksjon, A_{it} . Formelt kan variabelen for hvert enkelt land i et gitt år uttrykkes som:

$$FB = \frac{[Div.Fornybar^{\%}] \times Kraftproduksjon^{kWh}}{Befolkning} \quad (5.3)$$

$$V = \frac{Vann^{\%} \times Kraftproduksjon^{kWh}}{Befolkning} \quad (5.4)$$

$$A = \frac{Atomkraft^{\%} \times Kraftproduksjon^{kWh}}{Befolkning} \quad (5.5)$$

5.2.3 Kontrollvariabler

I kapittel 3 så vi at fossil kraftproduksjon økte i løpet av perioden 1980-2014. For å kunne estimere erstatningsgraden må vi derfor kontrollere for etterspørselsvekst, noe vi gjør ved å inkludere kontrollvariabler. Dersom viktige kontrollvariabler utelates kan det også medføre et utelattvariabel-problem. Dette diskuteres nærmere i kapittel 6.

Real BNP, målt i dollar justert til 2010-nivået, inkluderes i alle modellspesifikasjonene. Grunnen til at real BNP velges fremfor andre BNP-mål, er at det kontrollerer for inflasjon.⁸ I tillegg brukes

⁸ Eksempler på andre BNP-mål tilgjengelig hos *World Databank* er nominell BNP, og PPP justert BNP. Som følge av mangler mangler i dataen for PPP justert BNP, valgte vi å ikke benytte dette målet.

real BNP per innbygger i York (2012). For å skalere ned denne variabelen dividerer vi på 1000, slik at BNP_{it} er gitt som real BNP per innbygger målt i 1000\$.

5.3 Deskriptiv statistikk

Tabell 5.1: Deskriptiv statistikk for sentrale variable

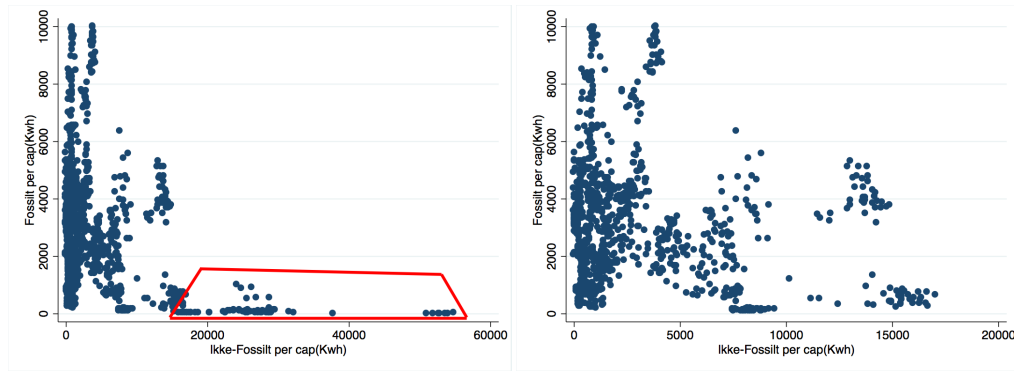
Variabler OECD29	Gj.snitt	Std.avvik	Min.	Maks.	Observasjoner
F (kWh per innbygger)	2990	2279	6	10012	1015
IF (kWh per innbygger)	4936	7537	7.5	54883	1015
BNP (1000\$ per innbygger)	34	19.5	4	110	1015
Variabler OECD27					
F (kWh per innbygger)	3204	2217	86	10012	945
IF (kWh per innbygger)	3318	3953	7.5	17044	945
FB (kWh per innbygger)	288	460	0	3067	945
V (kWh per innbygger)	1664	2652	0	11634	945
A (kWh per innbygger)	1366	1922	0	8670	945
BNP (1000\$ per innbygger)	32	18	4	110	945

I tabell 5.1 presenteres deskriptiv statistikk for de sentrale variablene for henholdsvis OECD29 og OECD27. Ved å sammenligne verdiene i tabellene er det tydelig at Norge og Island, som er utelatt fra OECD29, har urimelig stor innvirkning på variablene.

Når vi kun ser på variablene for kraftproduksjon, F og IF , får vi veldig store utslag ved å utelukke Island og Norge. Dette fordi Norge og Island er de to største produsentene av ikke-fossil kraft per innbygger gjennom hele perioden. Uvektet gjennomsnitt for IF trekkes derfor opp fra 3318 kWh til 4936 kWh. Island og Norge har også hatt nært en ikke-eksisterende fossil kraftproduksjon, og uvektet gjennomsnitt for IF trekkes derfor ned fra 3204 til 2990 kWh per innbygger.

I figur 5.1 og 5.2 presenteres *scatterplot* for OECD29 og OECD27. Observasjonene for Norge og Island er markert i figur 5.1. Det er tydelig at observasjonene fra disse er ekstremverdier, og som forklart i Woolridge (2013, s. 319-324) kan slike gi store utslag i MKM-estimer. Vi utelater derfor Norge og Island fra analysen.⁹

⁹Se *Appendiks D* hvor utvalgte deler av analysen gjenskapes med Norge og Island.

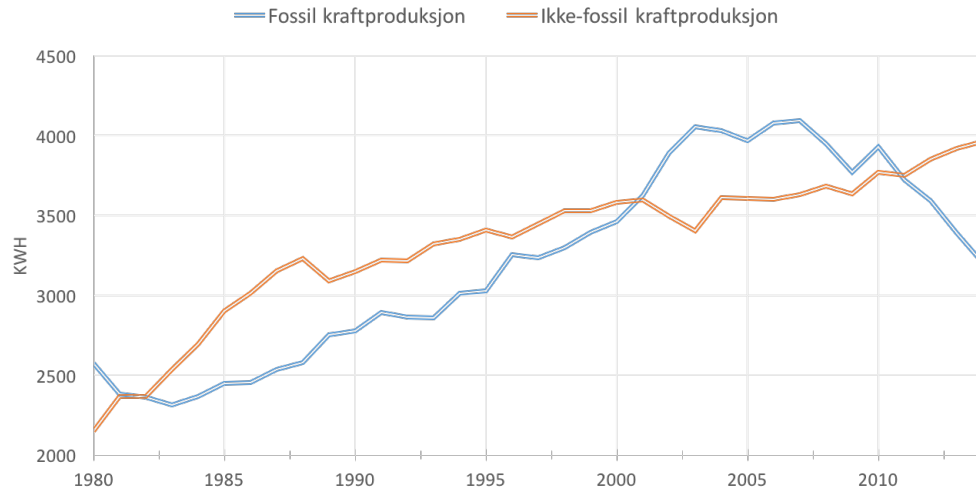


Figur 5.1: Scatterplot av observasjonene for F og IF for OECD27. Datakilde: The World Bank (2017) og OECD (2017)
 Figur 5.2: Scatterplot av observasjonene for F og IF for OECD29. Datakilde: The World Bank (2017) og OECD (2017)

Gjennomsnittlig fossil kraftproduksjon, F , i OECD27 fra 1980 til 2014, var på 3203.8 kWh, med et standardavvik på 2216.9. Den høyeste observasjonen var i USA i 2007, med 10012 kWh per innbygger, mens den laveste var i Sveits i 1985 med 86.2 kWh per innbygger. 71 % av observasjonene ligger innenfor et standardavvik fra gjennomsnittet, mens 93 % av observasjonene ligger to standardavvik innenfor.

Vi ser at den gjennomsnittlige ikke-fossile kraftproduksjonen i OECD27, fra 1980 til 2014 var på 3318 kWh. Denne hadde også et relativt høyt standardavvik på 3953 kWh. 84% av observasjonene ligger innenfor ett standardavvik fra gjennomsnittet, mens 93% ligger innenfor to standardavvik fra gjennomsnittet. Dette gir et solid grunnlag for å gjøre gode analyser, siden det er effekten av endring i ikke-fossil kraft på fossil kraft vi ønsker å finne.

I figur 5.3 presenteres utviklingen i F og IF i OECD27. Forskjellen på utviklingen som vises i 5.3, og utviklingen for kraftproduksjon beskrevet i kapittel 3, er at vi her har dividert på befolkning.



Figur 5.3: Utviklingen i uvektet gjennomsnitt for variablene F og IF for OECD27 i perioden 1980-2014.

En viktig observasjon er at veksten har vært svært ulik for begge variablene: IF har hatt en stabil vekst, mens utviklingen i F har vært preget av både vekst og store fall. For hele perioden har begge økt, noe som er i tråd med utviklingen vi presenterte tidligere. Fallet i F fra 3950 kWh i 2010 til 3450 kWh i 2014 er imidlertid svært interessant, da IF i samme periode steg fra 3750 kWh til 4000 kWh.

6 | Empirisk spesifikasjon og tilrettelegging

I dette kapitlet skal vi legge et teoretisk grunnlag for analysen i kapittel 7. Den empiriske modellspesifikasjonen presenteres, og potensielle problemer tilknyttet paneldata drøftes i lys av modellen og dataen som ble presentert i kapittel 5.

6.1 Grunnmodell

I den empiriske analysen ønsker vi å undersøke om det er en kausal effekt av ikke-fossil på fossil kraftproduksjon i OECD27. For å fastslå om det eksisterer en slik sammenheng er begrepet *ceteris paribus* sentralt. Dette er det latinske uttrykket for *alt annet likt*. Med andre ord hvordan en endring i den relevante forklaringsvariabelen påvirke den avhengige variabelen, dersom alle andre faktorer holdes konstant (Woolridge, 2013, s.12-16). Hvis det eksisterer en slik sammenheng er det bevis for kausalitet. Problemet er at det i praksis er så godt som umulig å holde alle andre faktorer konstant. Vi benytter derfor en kvantitativ tilnærming, der erstatningsgraden blir modellert og estimert basert på empirisk data.

For å se på sammenhengen mellom ikke-fossile og fossile kraftkilder formulerer vi en additivt identitet. Den enkle logikken bak vår formulering, er at total kraftproduksjon per innbygger er lik kraftproduksjon per innbygger fra ikke-fossile og fossile kraftkilder. Slik at den totale kraftproduksjonen av identitet kan formuleres som:

$$T \equiv F + IF \tag{6.1}$$

T -Total kraftproduksjon per innbygger

F -Fossil kraftproduksjon per innbygger

IF -Ikke-fossil kraftproduksjon per innbygger

Her skilles det mellom bidraget fra fossil og ikke-fossil kraftproduksjon til den totale produksjo-

nen. Det er derimot ikke mulig å si noe om ersatningsgraden, den kausale effekten av IF på F . For å finne erstatningsgraden tar vi utgangspunkt i modellformuleringen til York (2012):

$$F_{it} = \beta_0 + \beta_1 IF_{it} + X_{it}\beta_2 + u_{it} \quad (6.2)$$

Logikken bak ligning 6.2 er å estimere effekten av IF på F , samtidig som det kontrolleres for andre faktorer, X , som påvirker etterspørselen etter F .¹ u er restleddet som fanger opp alle uobserverbare effekter som påvirker den avhengige variabelen, men ikke kontrolleres for av variablene i modellen.

Med inspirasjon fra ligning 6.2 kan ligning 6.1 omformuleres. F er da av identitet lik totalproduksjon fratrukket ikke-fossil kraftproduksjon:

$$F \equiv T \left(\frac{BNP}{Populasjon} \right) - IF \quad (6.3)$$

Argumentet for å skrive totalproduksjon som en funksjon av real-BNP per innbygger, BNP , er at økonomisk vekst er en stor etterspørselsdriver for total kraftproduksjon.²

Det kan argumenteres for at IF inngår som en eksogen variabel. For å illustrere dette tar vi utgangspunkt i ligning 6.1. Her kommer det tydelig frem at en økning i etterspørselen etter kraft må skyldes en økning i F og/eller IF . Argumentet vårt for at IF ikke bestemmes helt og holdent av markedet, bygger på utviklingen i kraftproduksjonen som ble gjennomgått i kapittel 3. Her argumenterte vi for at store deler av utviklingen i IF skyldes politiske virkemidler som har gjort fremveksten av en i mange tilfeller ulønnsom produksjonsmetode lønnsom.

York (2012) argumenterer for at økonomisk vekst er den største etterspørselsdriveren etter kraft, og inkluderer derfor BNP per innbygger som kontrollvariabel i alle sine modellspesifikasjoner. Når vi nå omformulerer ligning 6.3 til vår empiriske grunnmodell, erstatter vi total kraftproduksjon som en funksjon av BNP per innbygger med BNP per innbygger. I grunnmodellen antar vi altså at det kun er BNP per innbygger som driver etterspørselen etter fossil kraft. Grunnmodel-

¹ X_{it} er en rekkevektor bestående av $k+1$ faktorer. Diskusjonen av kontrollvariablene gjøres i robusthetsanalysen i kapittel 7.

² BNP per innbygger = BNP .

len er gitt ved:

$$F_{it} = \beta_0 + \beta_1 IF_{it} + \beta_2 BNP_{it} + u_{it} \quad (6.4)$$

I kapittel 4 så vi at forholdet mellom CO_2 -utslipp og BNP per innbygger ikke nødvendigvis er lineært. Ut fra dette argumenterte vi for at et slikt forhold også kan eksistere mellom F og BNP . For å ta hensyn til dette inkluderer vi et kvadrert ledd av BNP i grunnmodellen. Perman et al. (2011a, s. 41-42) argumenterer for at sammenhengen på veldig lang sikt ikke nødvendigvis har den inverse u-formen, men at det kan eksistere flere topp- og bunnpunkter. For å ta hensyn til dette inkluderer vi et kubisk ledd i grunnmodellen. Dette er i tråd med Dinda (2004), som mener at for å undersøke EKC-sammenhengen empirisk er det hensiktsmessig å inkludere tre ledd for BNP: et lineært, et kvadrert og et kubisk. Vi ønsker også å kontrollere for felles variabler som endres over tid, altså ren temporær variasjon.³ Dette gjør vi ved å inkludere en dummyvariabel for hvert år. Den empiriske grunnmodellen, 6.4, kan dermed formuleres som:

$$F_{it} = \beta_0 + \beta_1 IF_{it} + \beta_2 BNP_{it} + \beta_3 BNP_{it}^2 + \beta_4 BNP_{it}^3 + \sum_{s=2}^T \delta_s Ds_t + u_{it} \quad (6.5)$$

Ds_t er dummyvariabelen som tar verdien 1 for $t=s$ og 0 ellers.

β_1 representerer erstatningsgraden. Dersom den konvensjonelle tankegangen holder, vil koeffisienten ta verdien $\beta_1 = -1$. Det innebærer perfekt erstatning mellom ikke-fossil og fossil kraftproduksjon. Dersom $\beta_1 = 0$, innebærer det at økt ikke-fossil kraftproduksjon legges på toppen av den allerede eksisterende produksjon, uten å erstatte fossil kraftproduksjon. $-1 < \beta_1 < 0$ impliserer delvis erstatning. I henhold til den tidligere litteraturen forventer vi å finne en erstatningsgrad i dette intervallet.

Den samlede effekten av BNP på F , $[\beta_2 + 2\beta_3 BNP + 3\beta_4 BNP^2]$, forventes i henhold til EKC-litteraturen diskutert i kapittel 4 å være positiv, men i avtakende grad. Vi forventer altså at én enhets økning i BNP_{it} har en svakere effekt på F_{it} enn det BNP_{js} har på $Fossil_{jt}$ når land i er rikere enn land j , og $t = s$.

³Ren temporær variasjon er variasjon som kun varier over tid, og ikke mellom land. CO_2 -konsentrasjonen i atmosfæren er et godt eksempel på slik variasjon.

6.1.1 Tre modeller – én for hver av de ikke-fossile kraftkildene

For å undersøke erstatningsgraden for hver av de tre komponentene som inngår i den ikke-fossile kraftproduksjonen, formulerer vi tre modeller tilsvarende ligning 6.5. I disse er IF erstattet med henholdsvis fornybar kraftproduksjon, FB , produksjon av vannkraft, V og produksjon av atomkraft, A .

$$F_{it} = \beta_o + \beta_1 \mathbf{FB}_{it} + \beta_2 BNP_{it} + \beta_3 BNP_{it}^2 + \beta_4 BNP_{it}^3 + \sum_{s=2}^T \delta_s Ds_t + u_{it} \quad (6.6)$$

$$F_{it} = \beta_o + \beta_1 \mathbf{V}_{it} + \beta_2 BNP_{it} + \beta_3 BNP_{it}^2 + \beta_4 BNP_{it}^3 + \sum_{s=2}^T \delta_s Ds_t + u_{it} \quad (6.7)$$

$$F_{it} = \beta_o + \beta_1 \mathbf{A}_{it} + \beta_2 BNP_{it} + \beta_3 BNP_{it}^2 + \beta_4 BNP_{it}^3 + \sum_{s=2}^T \delta_s Ds_t + u_{it} \quad (6.8)$$

Motivasjonen bak utvidelsen er utviklingen i kraftandelene, som vi presenterte i kapittel 3.

6.2 MKM og paneldata

Vi ser på 27 OECD-medlemsland over en periode på 35 år, og observerer derfor de samme landene over de samme tidsperiodene. Fordelen med dette er at vi kan benytte MKM og samtidig ha muligheten til å kontrollere for uobservert heterogenitet. For å finne erstatningsgraden i OECD27 estimerer vi ligning 6.5 med MKM, som er en estimeringsmetode der summen av de kvadrerte avvikene mellom variablenes estimerte og observerte verdier minimeres. For at MKM skal gi konsistente og forventningsrette estimat, må enkelte forutsetninger oppfylles.⁴ De samme gjelder for effisiens, men det kreves også ytterligere forutsetninger. Dersom alle forutsetningene tilfredsstilles vil estimatene være BLUE (best linear unbiased estimators). Før vi beskriver forutsetningene for konsistens, forventning og effisiens, skal vi for enkelthetsens skyld ta utgangspunkt i en forenklet versjon av grunnmodellen. De uavhengige variablene kan noteres som en vektor X_{it} bestående av $k + 1$ komponenter, der k er antall uavhengige variabler. Tilhø-

⁴Konsistente estimat innebærer at de empiriske momentene konvergerer mot sine sanne populasjonsverdier når utvalgsstørrelsen øker, $Plim \hat{\beta} = \beta + \frac{cov(X, \epsilon_{it})}{var(X)} = \beta$. En estimator er forventningsrett dersom gjennomsnittet ved gjentatte utvalg er lik sin sanne verdi, $E(\hat{\beta}) = \beta$ Woolridge (2013)

rende koeffisienter inngår da i en kolonnevektor, β , bestående av k koeffisienter. Modellen kan formuleres slik:

$$Fossil t_{it} = X_{it}\beta + u_{it} \quad (6.9)$$

En vanlig antagelse i paneldata, er at restleddet er spesifisert på følgende måte

$$u_{it} = \eta_i + \epsilon_{it}$$

der u_{it} er et dekomponert restledd som inneholder en tverrsnittsspesifikk komponent, (η_i) og en idiosynkratisk komponent, (ϵ_{it}).⁵ Den enhetsspesifikke restleddskomponenten fanger opp alle uobserverbare effekter som varierer i tverrsnittsdimensjonen, mens den idiosynkratiske restleddskomponenten fanger opp alle uobserverbare effekter som varierer i både tverrsnitts- og tidsdimensjonen samtidig.

For at MKM skal gi konsistente og forventningsrette estimat, må følgende forutsetninger holde (Woolridge, 2013, s.79-84):

1. Modellen er lineær i parameterne.
2. Utvalget er tilfeldig trukket fra populasjonen.⁶
3. Ingen perfekt kolinearit. I utvalget er ingen av de uavhengige variablene konstante, og det finnes ikke noe eksakt lineært forhold mellom de uavhengige variablene.
4. Strengt eksogene forklaringsvariabler. Ingen korrelasjon mellom restleddet og de uavhengige variablene: $E(u|X) = 0$, som igjen impliserer at $E(\eta_i|X_{it}) = 0$ og $E(\epsilon_{it}|X_{it}) = 0$.

For at estimatene skal være BLUE må ytterligere tre forutsetninger holde.

$$E(\epsilon_{it}\epsilon_{js}|X_{it}) = \begin{cases} \sigma_\epsilon^2 & i = j \text{ og } t = s \\ 0 & \text{ellers} \end{cases} \quad (6.10)$$

⁵Det vil også være en tidsspesifikk restleddskomponent α_t , som fanger opp alle uobserverbare effekter som varierer i tidsdimensjonen. Denne renskes ut av *årsdummies*.

⁶Vårt utvalg er selektert og ikke tilfeldig trukket fra en populasjon. Isolert sett, vil våre koeffisienter estimeres konsistente og forventningsrette selv om denne forutsetningen ikke holder.

$$E(\eta_i \eta_j | X_{it}) = \begin{cases} \sigma_\eta^2 & i = j \\ 0 & \text{ellers} \end{cases} \quad (6.11)$$

$$E(\epsilon_{it} \eta_i | X_{it}) = 0 \quad (6.12)$$

6.10 sier at den idiosynkratiske restleddskomponenten har konstant varians (σ_ϵ^2) og dermed er homoskedastisk, i tillegg til at det idiosynkratiske restleddet ikke er autokorrelert. På samme måte sier 6.11 at den landspesifikke restleddskomponenten har konstant varians (σ_η^2), og at den ikke er autokorrelert. 6.12 forutsetter uavhengighet mellom de to restleddskomponentene, for alle i , j og t . Brudd på disse vil ikke gi inkonsistente eller forventningskjevne estimater, men estimatene vil ikke lenger være BLUE. 6.10-6.12 påvirker altså kun hvorvidt estimerte koeffisienter er effisiente eller ikke.

Dersom forutsetning 1-4 ikke holder vil MKM på modellen gi misledende prediksjoner, og andre estimeringsmetoder eller transformasjoner vil være bedre egnet. Det er spesielt forutsetning 4 som er avgjørende, og det er denne vi videre skal fokusere på når vi argumenterer for valget av estimeringsmetode. Videre i oppgaven antar vi at forutsetning 1 og 3 holder.

6.3 Endogenitetsproblem og valg av estimeringsmetode

Brudd på forutsetning 4 for MKM gir oss et såkalt endogenitetsproblem. Det finnes hovedsakelig tre kilder til at et slikt problem kan oppstå: målefeil i variablene, simultanitet og utelatt-variabelproblem Woolridge (2013, s.842).

Vi skal ikke legge mye vekt på de to førstnevnte, men gir en kort begrunnelse for hvorfor vår modell og våre data ikke påvirkes i stor grad av egenskapene og problemene disse medfører. Utelatt-variabel-problem legges det mer vekt på.

6.3.1 Målefeil

Dersom det er systematiske målefeil i våre datapunkter vil det gi et endogenitetsproblem (Woolridge, 2013, s.307-313). Dataen vi benytter ble beskrevet i kapittel 5, og er hentet fra *World Data-bank* og *OECD* sine databaser. Begge disse kildene samler data fra en rekke statlige organisasjoner, og behandler dataen for å møte internasjonale standarder. Selv om det er liten grunn til å tro at vår data inneholder systematisk målefeil, er det verdt å merke at det alltid vil være en grad av målefeil i innhentet data.

6.3.2 Simultanitet

Dersom en eller flere av forklaringsvariablene bestemmes simultant med den avhengige variabelen, kan dette gi et endogenitetsproblem (Woolridge, 2013, s.534-536). For oss vil dette være tilfelle dersom F bestemmes simultant med enten IF eller BNP , slik at det eksisterer toveis kausalitet mellom disse. Det er nærliggende å anta at fossil kraftproduksjon, kontrollert for etterspørselsvekst, faller med økt ikke-fossil kraftproduksjon. Både fordi reduksjon i fossil kraftproduksjon og økt ikke-fossil kraftproduksjon fremmes gjennom politikken. En *ceteris paribus* økning i IF vil derfor føre til en reduksjon i F , dersom etterspørselsveksten kontrolleres for. Som argumentert for tidligere i kapittelet, inngår IF som en eksogen variabel i vår modell. Vi vil derfor ikke ha en toveis kausalitet mellom F og IF .

At F og BNP bestemmes simultant kan imidlertid være tilfellet. Som vi var inne på i kapittel 4 fant Coondoo og Dinda (2002) toveis kausalitet mellom CO_2 -utslipp og BNP i enkelte land. Fordi det er IF , og ikke BNP som er variabelen av interesse, vil skjevhet i estimatet for BNP ikke være veldig utslagsgivende for vår estimerte erstatningsgrad. Toveis kausaliteten kan absolutt tenkes å påvirke IF , men ikke i stor nok grad til at vi vil betrakte dette videre. For å ta hensyn til et slikt problem er en vanlig fremgangsmåte å instrumentere BNP , der instrumentet må være strengt eksogent og i tillegg korrelert med BNP (Woolridge, 2013, s.490-521). Dette er gjennomførbart, men ikke nødvendig å utføre for en kontrollvariabel. Problemene tilknyttet dette er sannsynligvis neglisjerbare, men vi er oppmerksomme på at håndtering av det potensielle simultanitetsproblemet ville gitt analysen mer kredibilitet.

6.3.3 Utelatt-variabel-problem og *landfaste effekter*

En av de potensielle årsakene som kan gi et brudd på forutsetningen om strengt eksogene forklaringsvariabler, er at variabler som utelates fra modellen korrelerer med én eller flere de uavhengige variablene. Dersom dette er tilfellet, vil $E(\eta_i|X_{it}) \neq 0$ og/eller $E(\epsilon_{it}|X_{it}) \neq 0$, noe som gir skjeve estimater ved bruk av MKM (Woolridge, 2013, s.).

$E(\epsilon_{it}|X_{it}) = 0$ impliserer at ingen uobserverte effekter som varierer både mellom land og over tid korrelerer med inkluderte uavhengige variabler. Vi antar at denne holder, og at vi derfor ikke har utelatt faktorer fra modellen som påvirker F og i tillegg korrelerer med IF eller BNP . Dette undersøkes nærmere i robusthetsanalysen.

Geografiske og geologiske forhold varierer fra land til land, men ikke over tid.⁷ Slike forskjeller mellom landene kan tenkes å påvirke grunnlaget for ulike typer kraftproduksjon. Fordi vi ikke har inkludert denne typen landsspesifikk heterogenitet som variabler i modellen, vil disse fanges opp i η og korrelere med IF og BNP , slik at $E(\eta_i|X_{it}) \neq 0$. Vi får dermed et brudd på forutsetning 4, og bruk av MKM på modellen vil gi forventningsskjeve estimater. Problemet kan løses ved å *within*-transformere modellen før den estimeres med MKM. Å estimere en *within*-transformert modell innebærer at regresjonen utføres med avvik fra individuelle gjennomsnitt, slik all landsspesifikk heterogenitet elimineres.⁸ Within-transformasjonen av 6.9 kan formuleres som,

$$F_{it} - \bar{F}_i = (X_{it} - \bar{X}_i)\beta + (\eta_i - \bar{\eta}_i) + (\epsilon_{it} - \bar{\epsilon}_i) \quad (6.13)$$

der

$$\bar{F}_i = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T F_{it}$$

$$\bar{X}_i = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T X_{it}$$

⁷Slike forhold varierer over lange tidsperioder. Det er en rimelig antagelse at i løpet av perioden 1980-2014 har disse forholdene vært konstante.

⁸Landsspesifikk heterogenitet er i vårt tilfelle uobserverte variable som kun varierer mellom (between) land, og ikke over tid.

$$\bar{\eta}_i = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \eta_i = \eta_i$$

Fordi η_i ikke varierer over tid elimineres denne når within-transformasjonen gjennomføres. Det gjør at forutsetningen om strengt eksogene uavhengige variable, $E(u|X) = 0$, tilfredsstilles.⁹

I vårt tilfelle er det liten tvil om at landspesifikk heterogenitet som fanges opp i η_i korrelerer med forklaringsvariablene.¹⁰ Formelt illustreres dette ved en Hausman-test. Nullhypotesen vi ønsker å teste kan formuleres som $H_0 : E(\eta_i|X) = 0$ og alternativhypotesen $H_1 : E(\eta_i|X) \neq 0$. For å teste hypotesene estimeres 6.5 og 6.13 med to ulike estimeringsmetoder, før de estimerte koeffisientene sammenlignes. Ved bruk av MKM på 6.13 estimeres koeffisientene konsistente, men ineffisiente under begge hypotesene, og ved bruk av GLS/RE¹¹ på 6.5 estimeres koeffisientene forventingsrette og effisiente under H_0 , men inkonsistent under H_1 . En signifikant forskjell mellom estimatene fra de to metodene indikerer at H_0 ikke holder, noe som betyr at de uavhengige variablene er endogene på landnivå. I *Appendiks C* presenteres resultatet av en Hausman-test basert på koeffisientene i tabell 7.1. Vi forkaster H_0 og konkluderer med at det er uobserverte effekter på landnivå som korrelerer med de uavhengige variablene i grunnmodellen. For å eliminere disse effektene bruker vi den within-transformerte versjonen av 6.5, gitt ved 6.13 videre i vår analyse. Dette er ekvivalent med å inkludere landfaste effekter.

6.4 Problemer tilknyttet effisiens

Forutsetning 4, $E(u|X) = 0$, vil ved inkludering av landfaste effekter tilfredsstilles, slik at de estimerte koeffisientene er konsistente og forventningsrette. I dette delekapittelet belyser vi enkelte problemer som kan påvirke forutsetning 6.10-6.12, slik at estimatene ikke blir BLUE. Fordi η_i er eliminert fra modellen, vil det kun være forutsetningen om at ϵ_{it} er homoskedastisk og ikke autokorrelert, 6.11, som er relevant. Vi skal nå diskutere hvorfor det er grunn til å tro at ϵ_{it} inne-

⁹Dette fordi både $E(\epsilon_{it}|X_{it}) = 0$ og $E(\eta_i|X_{it}) = 0$ nå holder.

¹⁰Om et land har kystlinje eller ikke vil ha effekt på ikke-fossil kraftproduksjon gjennom muligheten for hav- og vindkraftproduksjon.

¹¹GLS står for generalized least squares og RE står for random effects

har egenskaper som gjør at denne forutsetningen ikke holder. Vi skal også introdusere tester for autokorrelasjon og heteroskedastisitet som vi presenterer i *Appendiks C*.

6.4.1 Heteroskedastisitet

En generell form for heteroskedastisitet innebærer at restleddsvariansen, σ_{ϵ}^2 , ikke er konstant mellom ulike land eller ulike grupper land. Der ulikhetene mellom landene er gitt ved forskjellige verdier på forklaringsvariablene. Det kan for eksempel tenkes at mengden fossile kraftkilder tilgjengelig i dag, som andel av fossile kraftkilder tilgjengelig for 200 år siden, blir lavere desto rikere et land er. Fordi denne andelen også påvirker fossil kraftproduksjon, vil effektene fanges opp i ϵ_{it} .¹² Restleddsvariansen, σ_{ϵ}^2 , vil da falle med BNP_{it} , noe som tilsier at ϵ_{it} er heteroskedastisk. Ved et brudd på forutsetningen om homoskedastisitet vil estimatene fortsatt kunne være konsistente og forventningsrette (Woolridge, 2013, s.444). De estimerte standardavvikene vil derimot være ukorrekte, noe som gir sitt utslag i signifikans, testing og konfidens.¹³ Med andre ord får man ineffisiente estimater.¹⁴ Vi bruker en modifisert Wald-test for gruppevis heteroskedastisitet, og resultatene fra denne presenteres og diskuteres i *Appendiks C* (Woolridge, 2013, s.812). Vi konkluderer der med at restleddene i grunnmodellen er heteroskedastiske.

6.4.2 Autokorrelasjon

I vår oppgave brukes autokorrelasjon som et samlebegrep for korrelasjon mellom residualer i ulike tidsperioder – seriekorrelasjon, og korrelasjon mellom ulike lands restledd – tverrsnittskorrelasjon (kontemporær korrelasjon).

En konsekvens av at utvalget vårt ikke er tilfeldig trukket fra en populasjon, men selektert, er at residualene sannsynligvis korrelerer både på tvers av land og over tid. Førstnevnte fordi landene påvirkes av felles sjokk og uobserverte komponenter som fanges opp i restleddet. I likhet

¹²Dette er kun et eksempel for å illustrere logikken bak hva som kan forårsake heteroskedastiske restledd i vår modell, og det er ikke nødvendigvis slik at gjenværende beholdning av fossile kraftkilder faller med BNP.

¹³Konsekvensen av heteroskedastisitet er at den vanlige MKM-formelen for varians og standardavvik ikke lenger er gyldig, en konsekvens av dette er at teststatistikker som baserer seg på den estimerte variansen heller ikke er gyldig.

¹⁴Effisiente estimat innebærer at estimatoren er

med heteroskedastisitet, påvirker autokorrelasjon kun koeffisientenes effisiens. Uavhengig av om restleddskomponenten i periode t er korrelert med ϵ_{it-1} , eller om ϵ_{it} er korrelert med ϵ_{jt} , vil estimerte koeffisienter fortsatt være konsistente og forventningsrette.

Som vist av Hoyos og Sarafidis (2006), er testen for korrelasjon i tversnittsdimensjonen fra Breusch og Pagan (1980) passende dersom antall observasjoner i tidsdimensjonen ($T=35$), er større enn antall observasjoner i tversnittsdimensjonen ($N=27$). Vi forventer at testen viser tilstedeværelse av tversnittskorrelasjon på grunn av makroøkonomiske linker mellom landene, som på ulike tidspunkt korrelerer. Dette kan eksempelvis være: felles sjokk, det faktum at alle landene er medlemmer av OECD eller lokale *spillovers* mellom nærliggende land. For å teste for seriekorrelasjon bruker vi en Wooldridge-test for seriekorrelasjon i paneldata. Resultatet fra begge testene gjennomføres og presenteres i *Appendiks C*, hvor vi konkluderer med tilstedeværelsen av sterk autokorrelasjon. Det finnes metoder for å korrigere for, eller eliminere autokorrelasjon, noe vi skal undersøke nærmere i neste underkapittel.

6.4.3 Robust inferens

Konsekvensen av å ignorere autokorrelasjon og heteroskedastisitet er at standardavvikene til de estimerte koeffisientene kan ta høyere eller lavere verdier enn de sanne.¹⁵ Dersom de estimerte standardavvik er lavere enn de sanne, vil estimatene kunne fastslås som signifikante til et gitt signifikansnivå, selv om de ikke er det. Det er derfor viktig at vi fokuserer på å rapportere standardavvik som er så lik de sanne standardavvikene som mulig. Vi vil fortsatt benytte MKM på den within-transformerte modellen, men restleddskorleksjoner pålegges etter behov, for å tillate autokorrelasjon og heteroskedastisitet. Vi introduserer derfor tre restleddskorleksjoner.

En måte å unngå misledende inferens, er å bruke *cluster*-robuste standardavvik, heretter CR. 6.13 estimeres da med MKM, samtidig som residualen $\hat{\epsilon}_{it}\hat{\epsilon}_{is}$ tar plassen til den ukjente restleddsvariansen i uttrykket for estimatets varians.¹⁶ Dermed forblir koeffisientene upåvirket, mens de tilhørende standardavvikene korrigeres og tillater seriekorrelasjon og generelle former for heteroskedastisitet. En viktig forutsetning for å bruke CR-standardavvik er at det ikke finnes

¹⁵Dette er også bedre kjent som *misledende inferens*.

¹⁶I dette eksempelet er residualen er gitt ved $\hat{\epsilon}_{it}\hat{\epsilon}_{is}$ fordi $T = 2$.

korrelasjon mellom restleddene til ulike individer, altså korrelasjon i tverrsnittsdimensjonen, $E(\epsilon_{it}\epsilon_{jt}) = 0$ (Verbeek, 2012, s.390).

Panel-korrigerede standardavvik (PCSE) ble utviklet av Beck og Katz i 1995, og er designet for å håndtere landdata (makrodata), der $\frac{T}{N}$ -raten ofte er stor (Beck og Katz, 1995). Vårt datasett inneholder 35 tidsperioder og kun 27 land, noe som gjør at PCSE tilsynelatende bør fungere godt. Beck og Katz (1995) viste at PCSE fungerer meget bra selv når restleddet er sterkt korrelert i tverrsnittsdimensjonen og svært heteroskedastisk. Samtidig argumenterer de for at all seriekorrelasjon i restleddet må elimineres før PCSE implementeres. Når PCSE benyttes er det derfor vanlig å velge Prais–Winsten-estimering fremfor MKM, da denne metoden håndterer seriekorrelasjonen. Til tross for at ϵ_{it} er seriekorrelert, vil vi ikke legge mye vekt på denne tilnærming.¹⁷

Til nå har vi sett at PCSE krever en annen estimeringsmetode enn MKM for å fungere optimalt, og CR-standardavvik forutsetter at ϵ_{it} ikke er korrelert i tverrsnittsdimensjonen. Vi vil derfor introdusere Driscoll & Kraay-standardavvik (D&K). Denne korrigeringen estimerer konsistente standardavvik dersom ϵ_{it} både er autokorrelert og heteroskedastisk, og rapporterer korrekte standardavvik i en *stor* T -kontekst (Driscoll og Kraay, 1998).¹⁸ Ved bruk av D&K-standardavvik antas det på forhånd at restleddet er heteroskedastisk, seriekorrelert av første eller høyere grad, og korrelert i tverrsnittsdimensjonen. Som nevnt krever CR-standardavvik at $E(\epsilon_{it}\epsilon_{jt}) = 0$. Driscoll og Kraay (1998) viser derimot at D&K-standardavvik fungerer bedre dersom denne forutsetningen ikke holder.

Med bakgrunn i dette delkapittelet ønsker vi å videre benytte D&K-standardavvik i analysen. En mer formell begrunnelse gis i *Appendiks C*, hvor vi presenterer og sammenligner resultatene ved bruk av MKM med de ovennevnte korreksjonene på grunnmodellen.

¹⁷Å foreta en Prais–Winsten-estimering for så å ta konklusjoner ut fra dette, vil vi være forsiktige med. Vi velger å fokusere på MKM, men en Prais–Winsten regresjon vil allikevel gjennomføres i kapittel 7. Dette fordi York (2012) benyttet denne metoden, og resultatet kan gi et bedre utgangspunkt for sammenligning av resultatene.

¹⁸Det vises at denne korreksjonen fungerer best for datasett med mange tidsperioder. Akkurat hvor stor nevnes ikke, men i artikkelen presterer D&K-standardavvikene godt når $T > 20$.

7 | Empirisk analyse og resultater

I dette kapitlet presenterer og diskuterer vi resultater fra estimering av modellspesifikasjonene som ble presentert i kapittel 6. Datasettet som benyttes ble beskrevet i kapittel 5. I den første delen av analysen presenteres hovedresultatene, og senere utfører vi en robusthetsanalyse av grunnmodellen. I den andre delen av analysen utnytter vi oppbyggingen av den sentrale forklaringsvariabelen, og erstatningsgraden blir estimert for ulike tidsperioder. På slutten av hvert delkapittel blir det gitt en oppsummering, og resultatene diskuteres i lys av tidligere kapitler. Alle regresjoner og tester er utført i Stata.

7.1 Analyse og resultater del 1

I kapittel 6 påpekte vi en rekke potensielle problemer tilknyttet metode og effisiens. For å avgjøre hvilken korrigering av standardavvikene som best egner seg for vår data, presenterer vi i *Appendiks C: Effisiens og testing* tabell C.1 syv regresjoner basert på grunnmodellen, med ulike restleddskorrigeringer. I diskusjonen der underbygger vi konklusjonen om at Driscoll og Kraay-standardavvik er best egnet for vår data.

I tabell 7.1 presenteres resultatene fra fire regresjoner basert på grunnmodellen, 6.5. Resultatene i kolonne (1) og (2) er estimert uten korrigering av standardavvikene, og metodene som benyttes er henholdsvis RE og MKM med landfaste effekter. Ved å gjennomføre en Hausman-test basert på koeffisientene og de tilhørende standardavvikene, kom vi frem til at estimering med landfaste effekter er bedre egnet for egenskapene vårt datasett innehar. Estimeringsmetoden som benyttes i kolonne (3) er identisk med den i kolonne (2). Her benyttes Driscoll og Kraay-standardavvik, som tillater autokorrelasjon og generelle former for heteroskedastisitet i ϵ_{it} . Regresjonen i kolonne (4) er identisk med den som ble gjennomført i York (2012), der korreksjoner for første-ordens seriekorrelasjon gjennomføres ved bruk av Prais–Winsten-estimering.

Tabell 7.1: Hovedanalyse

	(1)	(2)	(3)	(4) York
Estimeringsmetode	GLS/RE	MKM/FE	MKM/FE	Prais-Winsten/FE
Type standardavvik	-	-	Driscoll og Kraay	-
Tidsdummier	Ja	Ja	Ja	Ja
Avhengig variabel	F	F	F	F
<i>IF</i>	-0.3443*** (0.0339)	-0.3486*** (0.0365)	-0.3486*** (0.0614)	-0.4058*** (0.0390)
<i>BNP</i>	418.9467*** (21.2100)	436.6506*** (22.1373)	436.6506*** (41.6112)	265.9064*** (56.0211)
<i>BNP</i> ²	-6.8330*** (0.3630)	-7.0215*** (0.3698)	-7.0215*** (0.7481)	-3.2870*** (0.9104)
<i>BNP</i> ³	0.0387*** (0.0021)	0.0395*** (0.0021)	0.0395*** (0.0041)	0.0148*** (0.0047)
Konstantledd	-2,551.7131*** (465.1263)	-2,836.8375*** (345.3997)	-2,836.8375*** (531.9576)	-1,016.4163*** (165.8800)
Antall observasjoner	945	945	945	918
Within- <i>R</i> ²	0.63	0.63	0.63	0.24
Antall land	27	27	27	27

Standardavvik i parentes

*** betyr at estimatene er signifikante ved 1% signifikansnivå ($p < 0.01$)** betyr at estimatene er signifikante ved 5% signifikansnivå ($p < 0.05$)* betyr at estimatene er signifikante ved 10% signifikansnivå ($p < 0.10$)

Selv om det er erstatningsgraden som er av interesse, er det verdt å merke seg at de estimerte koeffisientene for de tre BNP-variablene er signifikante ved 1%-nivået i alle regresjonene. Effekten er som forventet positiv, men avtakende. Dette gir isolert sett en konkav sammenheng mellom *BNP* og *F*, som er i tråd med hypotesen om EKC. Det kubiske leddet har imidlertid et positivt fortegn, og den totale effekten gir derfor en N-formet sammenheng mellom *BNP* og *F*.¹

De estimerte erstatningsgradene er alle signifikante ved 1%-nivået. I de fire regresjonene ligger estimatet i intervallet -0.3443 til -0.4058 , med høyest verdi i kolonne (1) og lavest i kolonne (4). Vi har tidligere argumentert for at regresjon ved bruk av MKM med landfaste effekter og D&K-standardavvik, er best egnet for vår data. En slik regresjon er gjennomført i kolonne (4),

¹Dette er i tråd med scenario (b) i Perman et al. (2011a, s. 41-42).

og erstatningsgraden estimeres her til -0.3486 . I resten av oppgaven omtaler vi dette som hovedresultatet. Det betyr at hver kWh ikke-fossil kraft generert i perioden 1980-2014, har erstattet 0.3484 kWh fossil kraft. Med andre ord må ikke-fossil kraftproduksjon per innbygger øke med 2.87 kWh for å redusere fossil kraftproduksjon per innbygger med én kWh.² En implikasjon av dette er at den konvensjonelle tankegangen ikke holder for OECD27 i perioden 1980-2014.

Det er nærliggende å tro at den konvensjonelle tankegangen ikke holder som følge av de etablerte kraftsystemene i OECD27 og landenes avhengighet av fossile kraftkilder. I kapittel 3 så vi at ikke-fossil kraftproduksjon økte, mens fossilandelen falt. Det indikerer at den fossile kraftproduksjonen har blitt mindre viktig, men det er ikke nødvendigvis slik at dette har medført erstatning. Ut fra resultatene for *BNP* er det klart og tydelig at den fossile kraftproduksjonen vil øke ytterligere dersom den økonomiske veksten fortsetter.³ Dersom ikke-fossil kraftproduksjon skal erstatte den fossile fullstendig, kreves derfor en massiv ekspansjon av den ikke-fossile produksjonen. Dette vil på sin side skape egne problemer for miljøet.⁴ Vårt resultat indikerer at økt ikke-fossil kraftproduksjon alene ikke bidrar nok til å redusere den fossile, og at andre tiltak for å redusere fossil kraftproduksjon må implementeres for at denne typen kraftproduksjon skal begrenses ytterligere.

7.1.1 Tidligere litteratur

Den estimerte erstatningsgraden fra hovedanalysen på -0.3484 , impliserer at for å erstatte 1 kWh fossil kraftproduksjon kreves det at 2.87 kWh ikke-fossil kraft genereres. Fordi York (2012) estimerer et tilsvarende forhold på 11.24 kWh, indikerer det at OECD27 har hatt en større erstatningsgrad enn verden som helhet. Vi må imidlertid være forsiktig med å dra konklusjoner fra denne sammenlikningen, ettersom Yorks resultater kan skille seg fra våre som følge av ulik tilnærming. For det første benytter han en annen estimeringsmetode, og for det andre ser han på

²Det inverse forholdet er utregnet på følgende måte: $2.87 = \frac{1}{0.3486}$

³Ved å benytte de estimerte koeffisienten for *BNP*, *BNP*² og *BNP*³, på henholdsvis 436.65 , -7.02 og 0.0395 , kan vi tolke en ceteris paribus økning i *BNP* på F : $[\beta_2 + 2\beta_3BNP + 3\beta_4BNP^2]$. Effekten av *BNP* på F er positiv, men i avtakende grad, frem til *BNP* tar verdien 60 . For verdier over 60 endrer effekten til å være positiv og tiltakende.

⁴Fossil kraftproduksjon skaper problemer for miljøet hovedsaklig i form av at klimagasser slippes ut i atmosfæren. Ikke-fossil kraftproduksjon påvirker miljøet og omgivelsene hovedsaklig på andre måter. Vannkraft påvirker økosystemer i elver. Atomkraft innebærer risiko med tanke på radioaktivt avfall. Vind- og solkraft krever store landområder.

en annen tidsperiode.

For å ta hensyn til det første problemet rapporterer vi i kolonne (4) i tabell 7.1 en regresjon ved bruk av nøyaktig samme estimeringsmetode som York (2012). Selv om metoden som brukes, Prais–Winsten, etter vår mening ikke er den korrekte,⁵ er resultatet svært interessant. Vi finner en erstatningsgrad på -0.406, mens Yorks tilsvarende estimat for hele verden gir en erstatningsgrad på -0.089. Dette indikerer at minst én av følgende påstander må holde:

Den første påstanden baseres på vårt datasett. Datasettet vårt består av OECD-land, som er en økonomisk velutviklet og relativt homogen gruppe land. Dette gir grunnlag for at erstatningsgraden vi estimerer er sterkere. *Den andre påstanden* bygger på Norge og Island sitt bidrag til analysen. Fordi York (2012) inkluderer disse, kan estimatene her være presset kraftig ned som følge av ekstremverdiene i F og IF .⁶ *Den tredje påstanden* bygger på at andre land enn Norge og Island som inkluderes i York sitt utvalg, men ikke i vårt, presser den estimerte erstatningsgraden ned. For å få klarhet i dette kontaktet vi York via e-post. I et utdrag fra e-posten informerte han oss om følgende:

I didn't exclude any countries, except those with missing data. I just checked the dataset and Iceland and Norway are included in the models. I re-ran the models excluding these cases, and the coef did change to about 0.30 in both electricity models.

E-post-kommunikasjon med professor Richard York, lørdag 24.04.2017, Dragvoll, Trondheim.

Ut fra Yorks svar, kommer det klart og tydelig frem at Norge og Island har stor innvirkning på resultatene i York (2012). I *Appendiks D* tabell D.1 presenterer vi resultatene fra hovedanalysen ved å inkludere Norge og Island i vårt datasett. Vi finner her en signifikant erstatningsgrad på -0.0392, noe som også belyser den overdøvende innvirkningen Norge og Island har på erstatningsgraden.⁷ Svaret til York begrunner også delvis de to første påstandene: Det underbygger at den estimerte erstatningsgraden vi kommer frem til for et utvalg OECD-land er større enn for

⁵Vi ser ikke nødvendigheten av å bruke en GLS-tilnærming kun for å korrigere for første-ordens seriekorrelasjon i restleddet.

⁶Se figur 5.2, side 30.

⁷Se *Appendiks D* for en mer utfyllende diskusjon om påvirkningen fra Norge og Island på estimert erstatningsgrad.

verden som helhet. Dette fordi York ved å utføre sin regresjon med Norge og Island inkludert, finner en lavere erstatningsgrad enn det vi gjør i både regresjon (3) og (4). Det er imidlertid viktig å merke seg at York (2012) benytter et datasett som strekker seg fra 1960-2009. Differansen mellom vårt og Yorks resultat kan derfor forklares av en lavere erstatningsgrad i perioden 1960-1979, eller en høyere erstatningsgrad i perioden 2010-2014. Vi kan derfor si at erstatningsgraden har vært større i OECD27 i perioden 1980-2014, enn for verden som helhet i perioden 1960-2009.

Diskusjonen over tilsier at erstatningsgraden på -0.3484 for OECD27, er høyere enn for verden som helhet. Det er derfor interessant å gjøre en tilsvarende sammenlikning med resultatene til Hu og Cheng (2017), som undersøker 30 kinesiske regioner over perioden 1995-2014. De finner en erstatningsgrad på -0.221 ved å bruke Prais-Winsten estimering. Ved å sammenlikne deres resultat med vårt hovedresultat, indikerer det at OECD27 har en høyere erstatningsgrad enn de 30 kinesiske regionene. Vi må igjen være forsiktig med å dra konklusjoner fra denne sammenlikningen, ettersom det også her benyttes en annen estimeringsmetode og ulik tidsperiode. I tabell 7.1 regresjon (4) benytter vi samme estimeringsmetode som i Hu og Cheng (2017), og vi finner her en erstatningsgrad på -0.4058 . Dette impliserer at OECD27 hadde en sterkere erstatningsgrad for perioden 1980-2014, enn det de 30 kinesiske regionene hadde for perioden 1995-2014. Vi kan derfor si at erstatningsgraden har vært større i OECD27 i perioden 1980-2014, enn for verden som helhet i perioden 1960-2009.

Årsaken til at erstatningsgraden i OECD27 er sterkere enn for både verden som helhet og for de 30 kinesiske regionene, kan vi ikke si noe om fra regresjonsresultatene. I lys av EKC-sammenhengen fra kapittel 4, kan noe av årsaken imidlertid ligge i beviset for lokale sammenhenger, og beviset for et avtagende forhold mellom BNP per innbygger og CO_2 -utslipp i 19 OECD-land (Han og Lee, 2013). Den sterke sammenhengen mellom fossil kraftproduksjon og CO_2 -utslipp indikerer derfor at erstatningsgraden vokser med BNP-per innbygger.

7.2 Robusthetsanalyse

For å undersøke hvorvidt estimatet for erstatningsgraden er robust, vil vi i dette delkapittelet gjennomføre en rekke regresjoner hvor vi både reduserer og utvider grunnmodellen. Først redu-

seres modellen ved å fjerne andre- og tredjegradsleddet til *BNP*. Til slutt undersøker og diskuterer vi hvordan erstatningsgraden påvirkes ved å utvide grunnmodellen med flere kontrollvariabler.

I tabell D.2 og D.3 i *Appendiks D* rapporteres til sammen 10 regresjoner. I kolonne (1) til (3) er det estimert reduserte utgaver av grunnmodellen ved bruk av MKM med landfaste effekter og D&K-korrigerende av standardavvikene. Her er det fjernet ett og ett ledd av *BNP*-variabelen i hver regresjon. Vi har valgt å ikke inkludere de tidsfaste effektene for å isolere effekten av *BNP*-variablene på *IF*, og vi unngår dermed at noe av effekten fanges opp i dummyene. Regresjon (4) er identisk med regresjonen fra *Analyse og resultater del 1* som ga oss hovedresultatet – erstatningsgraden på -0.3484 , sett bort i fra utelatelsen av de tidsfaste effektene. Denne presenteres på nytt for at effekten av å utelate *BNP*-leddene skal komme tydeligere frem. I regresjon (5) til (9) inkluderes alternative kontrollvariabler for å undersøke grunnmodellens–og da spesielt erstatningsgradens–robusthet. Regresjon (10) er en utvidelse av grunnmodellen der alle kontrollvariablene er inkludert.

I kolonne (1) presenteres den estimerte effekten av *IF* på *F*, uten at det kontrolleres for andre faktorer. Erstatningsgraden er i dette tilfellet 0.2125 og er signifikant på 5%-nivået. Modellen predikerer med andre ord at én kWh økning i ikke-fossil kraftproduksjon, i løpet av perioden har medført 0.2125 kWh økning i fossil kraftproduksjon. Vi finner altså en positiv sammenheng, og mye tyder på at det utelates sentrale effekter som fanges opp i restleddet. Det medfører positiv skjevhet i estimatet for erstatningsgraden.⁸

Fra kolonne (2)-(4) i tabell D.2 ser vi effekten av å inkludere *BNP* og henholdsvis et kvadrert og et kubisk ledd. Vi gjør dette for å ta hensyn til og for å illustrere det ikke-lineære forholdet mellom *F* og *BNP*. I tidligere kapitler argumenterte vi for at *BNP* fanger opp etterspørselen etter fossil kraft. I modell (1) fanges effekten opp i restleddet, og er trolig skyld i den positive skjevheten i estimatet for erstatningsgraden. Fordi *F* og *IF* begge øker jevnt i store deler av perioden, vil *BNP* fange opp disse trendene, slik at den estimerte koeffisienten foran *IF* gir erstatningsgraden – kontrollert for etterspørsel. Resultatene av å inkludere *BNP* gir store utslag i forklaringskraften til modellene, og aller viktigst i estimatet for erstatningsgraden, som i alle tilfellene er signifikant

⁸Det er verdt å merke seg at forklaringskraften i modellen er veldig lav (0.025).

ved 1%-nivået.

Under regresjonene rapporteres F-verdier slik at vi har muligheten til å teste om den respektive modellen er en gyldig forenkling av modellspesifikasjonen i (4). F-verdiene tilsier at vi hverken kan utelate kvadrert eller kubisk *BNP*, og impliserer derfor at den riktige modellspesifikasjonen er den som presenteres i kolonne (4).

7.2.1 Kontrollvariabler

Grunnmodellen kan tilføres flere kontrollvariabler for å undersøke hvordan erstatningsgraden påvirkes. Dersom modellen er robust, vil estimatet for erstatningsgraden endres lite av slike utvidelser. De fleste variablene som inkluderes i regresjon (5)-(10) er blitt brukt i York (2012) eller Liddle og Sadorsky (2014). De ulike modellene estimeres med MKM, og vi inkluderer et sett med årsummier, i tillegg til landfaste effekter, i alle modellene. Dette gjør at det kun er inkluderte kontrollvariabler som skiller modellene fra hverandre.

I regresjon (5) inkluderer vi total aggregert kapitalformasjon, *KAPITAL*, målt i amerikanske dollar satt til 2010-nivå. Denne er brukt som kontrollvariabel i Liddle og Sadorsky (2014). I regresjon (6) og (7) inkluderer vi henholdsvis andel av befolkningen som er i arbeidsalder (15-62 år), *AGE*, og et lineært og et kvadrert ledd for andel av befolkningen som bor i urbane områder, *URBAN*. Regresjon (8) er utført på en identisk modellspesifikasjon som modell 2 i York (2012), hvor variablene fra de to foregående modellene inkluderes.⁹ I modell (9) inkluderes handel målt som andel av BNP, *Handel*, for å kontrollere for effekten av økt globalisering.¹⁰

Resultatene fra regresjon (5) tilsier at aggregert kapitalformasjon, *KAPITAL*, ikke har en signifikant effekt på modellen, da den forkastes til 10%-nivået. Erstatningsgraden endres også svært lite, og som følge av mangler på observasjoner for variabelen velger vi å ikke gå videre med *KAPITAL*.

Andel av befolkningen som er i arbeidsalder, *AGE*, har en positiv signifikant effekt på 18.8 ved 1%-nivået. Det impliserer at fossil kraftproduksjon per innbygger øker med 18.8 kWh dersom

⁹Som følge av store mangler i data for verdiskapning i industrien, velger vi å ikke rapportere dette.

¹⁰Data for kontrollvariablene er hentet fra The World Bank (2017), og er tilgjengelig på nett.

AGE øker med 1 %-poeng. Resultatet fra regresjonen presenteres i kolonne (6), og erstatningsgraden estimeres til -0.381. Dette indikerer at utelatelse av denne fra modellen gir et utelattvariabel-problem, da erstatningsgraden har økt med 0.0326. Fordi koeffisienten for *AGE* er positiv, og erstatningsgraden har økt, tyder dette på at *AGE* kontrollerer for etterspørsel etter fossil kraftproduksjon. *AGE* er imidlertid ikke signifikant ved bruk av CR-standardavvik, noe som gjør at å utelate denne kan forsvares.¹¹ Det er også slik at endringen i erstatningsgraden er relativt liten, og konklusjonen vår endres ikke når *AGE* inkluderes i modellen: Erstatningsgraden har vært større for OECD27 i perioden 1980-2014 enn for resten av verden i perioden 1960-2009, men er fortsatt langt mindre enn -1. Vi inkluderer derfor ikke denne, men er samtidig klar over at dette er en variabel som kunne inngått i grunnmodellen for å kontrollere for etterspørsel etter fossil kraft.

I kolonne (7) er andelen av befolkningen som bor i urbane områder inkludert. Dette kan sees på som grad av modernisering, og inkluderes for å kontrollere for kraftetterspørsel. Erstatningsgraden endres i svært liten grad ved at denne inkluderes, da den faller til -0.344. Det er slik at urbanisering i stor grad assosieres med BNP per innbygger. Samtidig kan det tenkes at kausaliteten mellom urbanisering og kraftproduksjon går fra kraftproduksjon til urbanisering, og ikke motsatt vei. Vi inkluderer derfor ikke urbanisering i grunnmodellen.

I regresjon/modell (8) inngår alle kontrollvariablene som er inkludert i York (2012), og vi finner da en erstatningsgrad på -0.363. Denne er noe høyere enn erstatningsgraden på -0.3484 som vi fant i del 1 av analysen, men det er ikke en bemerkelsesverdig endring. Dette viser at estimatet for erstatningsgraden ved bruk av MKM på grunnmodellen, er robust overfor de kontrollvariablene som York bruker i sin analyse.

I regresjon (9) presenteres resultater fra en modell der handel er inkludert for å ta hensyn til globaliseringseffekter.¹² Argumentet for å inkludere handel som et mål på globalisering, er at jo større andel handel utgjør av BNP, desto sterkere er den økonomiske tilknytningen mellom land. Erstatningsgraden øker til -0.362, noe som er en beskjeden økning. I modell (10) er alle kontrollvariablene inkludert, og effekten på erstatningsgraden er liten.

¹¹Alle tidligere estimater har vært signifikante ved både D&K- og CR-standardavvik.

¹²Globalisering er et bredt begrep, men kan sies å være et system med gjensidig avhengighet (SNL, 2016)

Vi har nå sett at estimatet for erstatningsgraden og modellens forklaringskraft endrer seg svært lite når vi inkluderer alternative kontrollvariablene som er benyttet i tidligere litteratur. Dette tilsier at estimatet for erstatningsgraden er robust, og at vi ved å bruke grunnmodellen kontrollerer tilstrekkelig for etterspørselen etter kraft. Samtidig er vi klar over at det etter all sannsynlighet finnes variabler som kunne bidratt til å enda bedre kontrollere for etterspørsel etter fossil kraftproduksjon.¹³

7.3 Analyse og resultater del 2

I dette delkapittelet utvides analysen i to retninger. I den første utvidelsen utnytter vi at ikke-fossil kraftproduksjon per innbygger, IF , kan splittes opp i fornybar kraftproduksjon, vannkraftproduksjon og atomkraftproduksjon. Erstatningsgraden for hver av de ulike typene ikke-fossil kraftproduksjon vil så estimeres.¹⁴ I den andre utvidelsen benytter vi dummy-regresjon. Her skal vi undersøke erstatningsgraden i første og siste del av perioden, samt undersøke effekten av Kyoto-avtalen på erstatningsgraden.

7.3.1 Erstatningsgraden for de tre komponentene i IF

I tabell 7.2 presenteres resultatene ved bruk av MKM med landfaste effekter og D&K korrigerings av standardavvikene på modell 6.6, 6.7 og 6.8. På denne måten finner vi de separerte erstatningsgradene for henholdsvis fornybar, vannkraft og atomkraft.

Den estimerte erstatningsgraden for fornybar kraftproduksjon presenteres i kolonne (1), og er signifikant ved 10%-nivået med en verdi på -0.45. Dette impliserer at én kWh økning i fornybar kraftproduksjon reduserer fossil kraftproduksjonen med 0.45 kWh. For å redusere fossil kraftproduksjon med én kWh, må fornybar kraftproduksjon derfor øke med 2.22 kWh. Det kreves altså færre kWh fornybar enn ikke-fossil kraft (2.87), for å erstatte én kWh fossil kraft. Vi estimerer en erstatningsgrad mellom vannkraft og fossil kraftproduksjon på -0.34. Denne er signifikant ved 1%-nivået. Dette innebærer at for å redusere den fossile kraftproduksjonen med én

¹³Andel av befolkningen som er i arbeidsalder, AGE , er et eksempel på en slik variabel.

¹⁴Deskriptiv statistikk for disse variablene ble presentert i kapittel 5.

enhet, så må vannkraftproduksjonen øke med 2,94 enheter. Resultatene i regresjon (3) viser en erstatningsgrad mellom atomkraft og fossil kraftproduksjon som er lavere enn alle de andre erstatningsgradene, da den tar verdien -0.267. 3.75 kWh atomkraft kreves derfor for å erstatte én kWh fossil kraft.

Tabell 7.2: Modellutvidelse

	(1)	(2)	(3)
Estimeringsmetode	MKM/FE	MKM/FE	MKM/FE
Type standardavvik	Driscoll&Kraay	Driscoll&Kraay	Driscoll&Kraay
Tidsdummier	Ja	Ja	Ja
Avhengig variabel	F	F	F
BNP	392.8604*** (24.2958)	427.1409*** (37.6982)	438.2241*** (39.8900)
BNP^2	-6.2417*** (0.4281)	-7.0546*** (0.6824)	-7.1737*** (0.7407)
BNP^3	0.0354*** (0.0028)	0.0403*** (0.0038)	0.0407*** (0.0041)
Fornybar	-0.4510* (0.2661)		
Vannkraft		-0.3404*** (0.0591)	
Atomkraft			-0.2668*** (0.0885)
Konstantledd	-2,997.8677*** (379.0835)	-2,828.7226*** (535.8160)	-3,409.0217*** (553.9155)
Antall observasjoner	945	945	945
Within- R^2	0.65	0.67	0.68
Antall land	27	27	27

Standardavvik i parentes

*** betyr at estimatene er signifikante ved 1% signifikansnivå ($p < 0.01$)** betyr at estimatene er signifikante ved 5% signifikansnivå ($p < 0.05$)* betyr at estimatene er signifikante ved 10% signifikansnivå ($p < 0.10$)

Av de tre kildene som inngår i ikke-fossil kraftproduksjon er det fornybar som har den største erstatningsgraden, mens atomkraft har den minste. Fra kapittel 3 husker vi at kraftproduksjonen fra samtlige av disse kildene økte fra 1980 til 2014, mens produksjonen som andel total kraft-

miks økte med 8% for atomkraft og fornybar, og falt med 6% for vannkraft (se diagrammer på side 12 og 15). Atomkraft har den lavest erstatningsgraden, til tross for at det er denne som har økt mest (tangerer fornybar) som andel av total kraftmiks. Dette er interessant, da det impliserer at andelsendringer ikke er en god indikator for størrelsen på de individuelle erstatningsgradene. Det samme gjelder for produksjonsvolum, da lav produksjonsvekst relativt til de andre komponentene i kraftmiksen gir lavere andel. Dette er derfor et godt eksempel på hvor viktig det er å kontrollere for etterspørsel etter fossil kraft når erstatningsgraden estimeres. Veksten i atomkraftproduksjon har hovedsakelig funnet sted samtidig som produksjonen fra fossile kilder har vært konstant eller økt, noe som også gjelder for fornybare kilder. Når vi kontrollerer for etterspørselsveksten, vil det imidlertid være slik at fornybar erstattet mer fossil kraftproduksjon enn det atomkraft gjør.

York (2012) foretar en lignende utvidelse av sin analyse. Her estimeres signifikante estimater for erstatningsgraden tilhørende vannkraft og atomkraft, på henholdsvis -0.221 og -0.099. Koeffisienten for erstatningsgraden tilhørende fornybar kraftproduksjon er ikke signifikant, og tar en positiv verdi.

7.3.2 Erstatningsgraden i to perioder – før og etter 1997

Det vil være interessant å undersøke hvorvidt erstatningsgraden har endret seg i løpet av tidsperioden. Flere virkemidler både for å fremme ikke-fossil kraftproduksjon, og for å redusere fossil kraftproduksjon, har som vi så i kapittel 3 blitt innført fra 1980-2014. Som følge av økt miljøbevissthet og implementering av stadig flere virkemidler, er det grunn til å tro at erstatningsgraden var ulik i første og siste del av perioden. Som vi også har sett, har utviklingen i fossil og ikke-fossil kraftproduksjon i OECD vært svært ulik gjennom hele perioden. Dette gir grunn til å tro at erstatningsgraden ikke har vært konstant over tid.

Grunnmodellen fra kapittel 6 modifiseres for dette formålet ved å inkludere et interaksjonsledd mellom IF og en dummy-variabel

$$F_{it} = \beta_0 + \beta_1 IF_{it} + \beta_2 BNP + \beta_3 BNP^2 + \beta_4 BNP^3 + \beta_5 (IF_{it} \times D_{1997}) + \sum_{s=2}^T \delta_s D_{st} + \eta_i + \epsilon_{it} \quad (7.1)$$

der D_{1997} er dummyvariabel for å skille mellom tidsperiodene, slik at:

$$D_{1997} = \begin{cases} 1 & \text{For år etter 1997} \\ 0 & \text{Ellers} \end{cases} \quad (7.2)$$

β_5 gir oss da tilleggseffekten på erstatningsgraden av årene 1998-2014.

Det er hensiktsmessig å bruke året 1997 som skillepunkt av to grunner. 1997 er median-året i datasettet, slik at det er liten forskjell i antall observasjoner i hver periode. I tillegg er det slik at mange av landene bandt seg til å redusere CO_2 -utslippene sine gjennom Kyoto-avtalen ved utgangen av 1997.

Ved å estimere 7.1 med MKM med landfaste effekter og D&K-standardavvik, kan vi undersøke om erstatningsgraden var ulik i perioden frem til og etter 1997. Vi skiller mellom effekten før og etter 1997 på følgende måte.

- Forventet erstatningsgrad 1980-1997: $E\left(\frac{\partial F}{\partial IF} \mid D_{1997} = 0\right) = \beta_1$
- Forventet erstatningsgrad 1998-2014: $E\left(\frac{\partial F}{\partial IF} \mid D_{1997} = 1\right) = \beta_1 + \beta_5$

MKM på 7.1 gir følgende resultat, standardavvikene i parentes.

$$F_{it} = \underset{(350.43)}{-2754.99} - \underset{(0.037187)}{0.3385} IF_{it} + \underset{(23.02)}{427.98} BNP - \underset{(0.39)}{6.845} BNP^2 + \underset{(0.0022)}{0.038} BNP^3 - \underset{(0.01075)}{0.0146} (IF_{it} \times D_{1997}) \quad (7.3)$$

Det kommer tydelig frem at koeffisienten for tilleggseffekten av periode 2, $\hat{\beta}_5$, ikke er signifikant ved 10%-nivået. Vi kan med andre ord si at det ikke er en signifikant forskjell mellom erstatningsgraden i perioden før og etter 1997. Dette er overraskende med tanke på utviklingen i kraftproduksjonen som vi presenterte i kapittel 3.

Effekten av Kyoto-avtalen på erstatningsgraden

Selv om erstatningsgraden ikke er signifikant forskjellig i perioden 1980-1997 og 1998-2014, kan det fortsatt være slik at den er forskjellig i de to periodene mellom ulike grupper land. Fordi Kyoto-avtalen fant sted ved utgangen av 1997, vil det være interessant å undersøke hvorvidt

erstatningsgraden i de to periodene endret seg for Kyoto-landene i forhold til landene som ikke bandt seg til avtalen.¹⁵

Det er mulig at land som ikke bandt seg til avtalen, men som er en del av vårt utvalg, bidrar til at vi ikke finner en signifikant forskjell mellom periodene. For å finne tilleggseffekten av Kyoto-avtalen på erstatningsgraden, bruker vi landene som bandt seg til avtalen som behandlingsgruppe, og landene som ikke bandt seg til avtalen som kontrollgruppe. Ved å skape et interaksjonsledd mellom behandlingsgruppe, en dummyvariabel for år>1997, D_{1997} og IF , vil forskjellen i erstatningsgraden mellom behandlingsgruppen og kontrollgruppen i de to periodene kunne estimeres. Koeffisienten foran interaksjonsleddet vil da representere tilleggseffekten av Kyoto-avtalen på erstatningsgraden.¹⁶

Definerer dummyvariabel for om landet bandt seg til Kyoto-avtalen eller ikke på følgende måte:

$$D_{kyoto} = \begin{cases} 1 & \text{behandlingsgruppe} \\ 0 & \text{kontrollgruppe} \end{cases} \quad (7.4)$$

Modellen vi bruker for å estimere tilleggseffekten av Kyoto-avtalen er gitt ved

$$F_{it} = \beta_0 + \beta_1 IF_{it} + \beta_2 BNP_{it} + \beta_3 BNP_{it}^2 + \beta_4 BNP_{it}^3 + \beta_5 (IF_{it} \times D_{1997}) + \beta_6 (IF_{it} \times D_{signert}) + \gamma (IF_{it} \times D_{1997} \times D_{signert}) + \sum_{s=2}^T \delta_s D_s + \eta_i + \epsilon_{it}$$

, der β_5 , β_6 og γ er koeffisientene til tre interaksjonsleddene.

Ved å ta forventet verdi av $\frac{\partial F}{\partial IF}$, betinget på verdien til dummyvariabelene, har vi at:

1. Kontrollgruppe før Kyoto: $E(\frac{\partial F}{\partial IF} | D_{1997} = 0, D_{signert} = 0) = \beta_1$
2. Behandlingsgruppe før Kyoto: $E(\frac{\partial F}{\partial IF} | D_{1997} = 0, D_{signert} = 1) = \beta_1 + \beta_5$
3. Kontrollgruppe etter Kyoto: $E(\frac{\partial F}{\partial IF} | D_{1997} = 1, D_{signert} = 0) = \beta_1 + \beta_6$

¹⁵Se *Appendiks A* tabell A.1 for for oversikt over hvilke land som ikke bandt seg til avtalen, men som er en del av vårt utvalg.

¹⁶Dette er en variant av difference-in-differences estimatoren.

4. Behandlingsgruppe etter Kyoto: $E(\frac{\partial F}{\partial IF} | D_{1997} = 1, D_{signert} = 1) = \beta_1 + \beta_5 + \beta_6 + \gamma$

Får da at koeffisienten for tilleggseffekten av Kyoto-avtalen på erstatningsgraden er gitt ved

$$\gamma = [(\beta_1 + \beta_5 + \beta_6 + \gamma) - (\beta_1 + \beta_6)] - [(\beta_1 + \beta_5) - \beta_1] = \hat{\gamma}^{Kyoto}$$

slik at det er koeffisienten γ foran interaksjonsleddet ($IF_{it} \times D_{1997} D_{signert}$), som representerer tilleggseffekten på erstatningsgraden for land som bandt seg til Kyoto-avtalen. Denne noteres videre som $\hat{\gamma}^{Kyoto}$.

Ved å estimere modellen med *MKM* finner vi følgende koeffisienter:¹⁷

$$F = -3040 + 0.0479IF - 0.3933IF \times D_{kyoto} + 0.0105IF \times D_{1997} - 0.0347IF \times D_{1997}D_{kyoto} \quad (7.5)$$

(524) (0.0567) (0.0529) (0.02) (0.0143)

Av 7.5 ser vi at det å ha bundet seg til å redusere sine utslipp gjennom Kyoto-avtalen har en signifikant negativ effekt på erstatningsgraden, lik $\hat{\gamma}^{Kyoto} = -0.0347$. Dette betyr *ikke* at erstatningsgraden er -0.0347 høyere for avtaleland enn for ikke-avtaleland. Tolkningen er derimot at avtalelandene, uavhengig av størrelsen på erstatningsgraden relativt til ikke-avtaleland, ved å binde seg har hatt en tilleggseffekt på erstatningsgraden lik -0.0347.

Det kan selvfølgelig stilles spørsmål ved om denne effekten kun representerer Kyoto-avtalens påvirkning på erstatningsgraden. Andre begivenheter enn Kyoto-avtalen kan også bidra til størrelsen på denne effekten, men slikt er det vanskelig å kontrollere for. Dersom Kyoto ikke representerer denne effekten i det hele tatt, må alle landene som skrev under på avtalen ha vært utsatt for et felles sjokk i 1997 eller senere, mens de som ikke skrev under ikke ble utsatt for dette sjokket.

¹⁷Vi rapporterer kun de relevante koeffisienter her. Den fullstendige regresjonen ligger i *Appendiks D*, tabell D.4.

7.4 Oppsummering

Vi har nå estimert erstatningsgraden mellom ikke-fossil og fossil kraftproduksjon i perioden 1980-2014 ved bruk av MKM på grunnmodellen. Erstatningsgraden på -0.3486 er estimert signifikant ved 1%-signifikansnivå, og er stor sammenlignet med tidligere litteratur. Vi har ekskludert Island og Norge fra vårt datasett, noe som bidrar mye til at erstatningsgraden tar denne størrelsen. Ved å bruke samme metode som i York (2012) finner vi også større erstatningsgrad enn det York gjør, selv når han også ekskluderer Island og Norge.¹⁸ Våre resultater viser at OECD27 i perioden 1980-2014 har erstattet mer fossil kraftproduksjon per innbygger for hver nye kWh ikke-fossil kraft per innbygger, enn det verden som helhet har gjort i perioden 1960-2014. I robusthetsanalysen så vi at estimatene var robuste mot inkludering av kontrollvariable brukt i tidligere litteratur. Dette gir oss grunn til å tro at grunnmodellen følger forutsetning 1 for MKM, om at modellen som estimeres er spesifisert riktig.

I del 2 av analysen estimerte vi separate koeffisienter for erstatningsgraden for fornybar kraftproduksjon, vannkraft og atomkraft på henholdsvis -0.45 , -0.34 og -0.267 . Vi så også at erstatningsgraden for ikke-fossil kraftproduksjon ikke var signifikant forskjellig i perioden før og etter 1997, men at Kyoto-avtalen bidro til en signifikant høyere erstatningsgrad for landene som underskrev avtalen.

¹⁸Se sitat fra e-post i *Analyse og resultater del 1*.

8 | Konklusjon

Vi har i denne oppgaven undersøkt hvorvidt ikke-fossil kraftproduksjon per innbygger har påvirket fossil kraftproduksjon per innbygger, for et utvalg bestående av 27 OECD-land i perioden 1980-2014. Formålet har vært å estimere erstatningsgraden, altså i hvilken grad ny ikke-fossil kraftproduksjon erstattet eksisterende fossil kraftproduksjon i løpet av perioden. Vi har med dette utfordret den konvensjonelle tankegangen beskrevet i York (2012), om at ny ikke-fossil kraftproduksjon erstatter fossil kraftproduksjon med et en-til-en forhold.

Grunnmodellen vi benyttet for å estimere erstatningsgraden er basert på modellen til York (2012). I robusthetsanalysen viste vi at grunnmodellen var robust i forhold til inkludering av kontrollvariabler som er brukt i tidligere litteratur. Vi konkluderte derfor med at grunnmodellen med real-BNP per innbygger som eneste kontrollvariabel var en god modellspesifikasjon for å estimere erstatningsgraden.

Den eksisterende litteraturen som tar for seg erstatningsgraden ble presentert i Kapittel 1 *Introduksjon*, og består hovedsakelig av York (2012) og to andre forskningsartikler. Av resultatene i disse forventet vi å estimere en erstatningsgrad i intervallet $[-1, 0]$. Samtidig forventet vi at erstatningsgraden for OECD27 – hovedresultatet i denne oppgaven – skulle være større enn -0.089 , som er erstatningsgraden York (2012) fant. Dette begrunnet vi med de økonomiske karakteristikene ved vårt utvalg sammenlignet med utvalget i York (2012), og EKC-sammenhengen, som sier at miljøpåvirkningen avtar og etterhvert faller med BNP per innbygger.

Ved å estimere grunnmodellen med MKM fant vi en erstatningsgrad på -0.3484 , som var signifikant ved 1%-nivået. Derfor, for å erstatte 1 kWh fossil kraftproduksjon kreves det at 2.87 kWh ikke-fossil kraft genereres. Erstatningsgraden vi finner er større enn den i York (2012), men langt mindre enn -1 . Dette er verdien den måtte tatt dersom ikke-fossil kraftproduksjon skulle erstattet fossil kraftproduksjon med et en-til-en forhold. Selv om erstatningsgraden på -0.3484 er større enn den i York (2012), fant vi det vanskelig å konkludere med at erstatningsgraden for OECD27 var større enn for verden som helhet. For det første benytter York en annen estimeringsmetode, for det andre ser han på en lengre tidsperiode, og for det tredje er Norge og Island

inkludert i hans analyse. Ved å estimere grunnmodellen med tilsvarende metode som i York (2012) økte erstatningsgraden til -0.406 . Etter e-post-kommunikasjon med York, fikk vi vite at erstatningsgraden økte fra 0.089 til cirka 0.30 i den relevante regresjonen, når han ekskluderte Norge og Island fra analysen. Ut fra dette kan vi konkludere med at erstatningsgraden for OECD27 i perioden 1980-2014 var større enn for resten av verden i perioden 1960-2009.

Vi viste i kapittel 3 at utviklingen i kraftandelene til de forskjellige komponentene som inngår i ikke-fossil kraftproduksjon var svært forskjellig over perioden. Med bakgrunn i dette ønsket vi å undersøke om, og i hvilken grad, deres respektive erstatningsgrader var ulike. Grunnmodellen ble derfor dekomponert i tre spesifikasjoner, med henholdsvis fornybar kraftproduksjon, vannkraft- og atomkraftproduksjon som forklaringsvariabel. Ved å estimere de tre modellene fant vi en erstatningsgrad for atomkraft på -0.267 , en erstatningsgrad for vannkraft på -0.34 , og en erstatningsgrad for fornybar på -0.451 . Ut fra disse forklarte vi at andelsendringer i total kraftproduksjon ikke er en god indikator for de individuelle erstatningsgradene.

Andelene til fossil og ikke-fossil kraftproduksjon varierte mye over perioden. Vi ønsket derfor å undersøke om erstatningsgraden var ulik i første og andre del. Et interaksjonsledd mellom en dummyvariabel og ikke-fossil kraftproduksjon per innbygger ble inkludert i grunnmodellen, og en ikke-signifikant forskjell mellom erstatningsgraden i de to periodene ble estimert. Vi konkluderer derfor med at erstatningsgraden ikke var ulik i de to periodene. Dette ga oss motivasjon til å undersøke tilleggseffekten av Kyoto-avtalen på erstatningsgraden, da signeringen av avtalen skjedde i skillet mellom de to periodene. Ved å bruke en variant av *difference-in-differences estimatoren* fant vi at landene som bandt seg til Kyoto-avtalen hadde en signifikant positiv tilleggseffekt på erstatningsgraden, tilsvarende -0.0347 . Alt annet likt, konkluderer vi derfor med at Kyoto-avtalen hadde en tilleggseffekt på erstatningsgraden i OECD27 lik -0.0347 .

Faglitteraturen som tar for seg erstatningsgraden er liten, og denne oppgaven har derfor kommet med flere viktige bidrag. Vi har vist at erstatningsgraden er større for OECD27 i perioden 1980-2014 enn for verden som helhet i perioden 1980-2009. Vi har også bevist at det i empiriske analyser av erstatningsgraden er hensiktsmessig å utelate Norge og Island, da disse innehar ekstremverdier som gir sterk skjevhet i estimatet for erstatningsgraden. Et annet viktig bidrag er at erstatningsgraden for OECD27 ikke var signifikant forskjellig i periodene 1980-1997 og 1998-

2014, til tross for strukturelle endringer både i kraftmarkedene og kraftproduksjonen. Vi fant også en tilleggseffekt på erstatningsgraden av å binde seg til Kyoto-avtalen.

Målt i CO_2 -utslipp er kraft- og varmegenerering den største menneskeskapte enkeltkilden (IPCC, 2014), og i henhold til IPCC (2011, s. 18-20, 190) er det produksjon av kraft fra fossile kilder som er mest forurensende. I OECD og resten av verden har virkemidler og tiltak for å fremme ikke-fossil kraftproduksjon, og for å redusere fossil kraftproduksjon blitt implementert gjennom politikken. Til tross for at vi finner en relativt høy erstatningsgrad på -0.3484 for OECD27, vil fremtidig økonomisk vekst fortsatt medføre økt etterspørsel etter fossil kraft. For å gjennomføre et skifte bort fra bruk av fossile kilder i kraftproduksjon, vil det derfor kreves andre tiltak enn å kun øke den ikke-fossile. Erstatningsgraden er med andre ord for liten til at man i dag kun kan basere seg på økt ikke-fossil kraftproduksjon for å begrense den fossile. I tillegg til å produsere ny ikke-fossil kraft, må OECD derfor – på lik linje med resten av verden – også begrense bruken av fossile kilder i kraftproduksjonen.

Videre undersøkelser

Fordi York (2012) estimerer erstatningsgraden i en annen periode enn det vi gjør, kan vi ikke med sikkerhet si at erstatningsgraden for OECD27 er større enn for verden som helhet. En interessant utvidelse av litteraturen kan derfor være å estimere erstatningsgraden for to datasett. Ett med tilsvarende utvalg som i York (2012), ekskludert Norge og Island, for perioden 1960-2014 eller 1980-2014. Det andre med OECD27 for perioden 1960-2014 eller 1980-2014. Man vil da kunne trekke en konklusjon om erstatningsgraden for OECD27 er større enn for verden som helhet. En annen tilnærming kan være å undersøke erstatningsgraden nærmere over tid. Mer avanserte difference-in-differences estimatorene kan utledes, eller man kan bruke *Chow-testing* for å se på forskjeller mellom erstatningsgraden i perioder. En mer detaljert beskrivelse av årsdummyene i denne analysen ville også fungert til dette formålet. Å utnytte tidsdimensjonen vil gjøre det enklere å undersøke potensielle faktorer som har en varierende effekt på erstatningsgraden. Eksempelvis vil effekten av politiske virkemidler og tiltak kunne analyseres.

Et tips akademikere som i fremtiden skal estimere erstatningsgraden, er å håndtere ekstremver-

dier i observasjonene for ikke-fossil og fossil kraftproduksjon på en hensiktsmessig måte. Som vi har sett i denne oppgaven, er erstatningsgraden svært sensitiv ovenfor slike.

Referanser

- Al-Sunidy, A. og Green, R. (2006). Electricity deregulation in OECD countries". *Energy*, 31(6-7):769 - 787.
- Beck, N. og Katz, J.N . (1995). "What to do (and not to do) with time-series cross-section data". *American political science review*, 89(03):634 - 647.
- Breusch, T.S og Pagan, A.R. (1980). The Lagrange Multiplier Test and its Applications to Model Specification in Econometrics". *The Review of Economic Studies*, 47(01):239-253.
- Bruntlandkommissjonen (1987). Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future". <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>
- Cameron, A. C., og Miller, D. L. (2015). "A practioners guide to cluster-robust inference". *Journal of Human Resources*, 50(2), 317-372.
- Coondoo, D. og Dinda, S. (2002). "Causality between income and emission: a country group-specific econometric analysis". *Ecological Economics*, 40(03):351 -3 67.
- Dinda, S. (2004). Environmental Kuznets curve hypothesis: a survey". *Ecological economics*, 49(04):431 - 455
- Driscoll, j. og Kraay, A. (1998). "Consistent Covariance Matrix Estimation With Spatially Dependent Panel Data". *The Review of Economics and Statistics*, 80(04):549-560.
- Ehrlich, P. og Holdren, J. (1970). The People Problemby Paul R. Ehrlich and John P. Holdren". *The Saturday Review*
- EU (2016). The EU Emissions Trading System (EU ETS)".
https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/factsheet_ets_en.pdf (Hentet:15.02.2017)
- European Commision (2012a). Energy and environment".
http://ec.europa.eu/competition/sectors/energy/overview_en.html. (Hentet:21.04.2017)
- European Commision (2012b). Energy and Climate Change".
http://ec.europa.eu/competition/sectors/energy/environment_en.html. (Hentet:21.04.2017)
- European Parliament (2017). "Internal energy market".
<http://www.europarl.europa.eu/ftu/pdf/en/FTU5.7.2.pdf>. (Hentet:21.04.2017)
- FlÅæten, O. og Skonhoft, A. (2014). *Naturressursenes Åykonomi*. Gyldendal akademiske, Oslo, 1. utgave.
- Han, C. og Lee, H. (2013). Dependence of economic growth on CO2 emissions". *Jounral of Economic Development*, 38(1):47 - 57
- Hoyos, R.E.D og Sarafidis, V (2006). <http://www.stata-journal.com/sjpdf.html?articlenum=st0113> *The Stata Journal*, 6:482 - 496

- Hu, Y. and Cheng, H. (2017). Displacement efficiency of alternative energy and trans-provincial imported electricity in China" *Nature Communications*, 8
- IEA (2010). Technology roadmap: Nuclear energy".
https://www.iea.org/media/freepublications/technologyroadmaps/nuclear_roadmap2010.pdf.
 (Hentet:28.04.2017)
- IEA (2012). Technology roadmap: Hydropower". <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/2012HydropowerRoadmap.pdf>.
 (Hentet:23.04.2017)
- IEA (2014). Technology roadmap: Energy storage". <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapEnergyStorage.pdf>.
 (Hentet:23.04.2017)
- IEA (2015). Technology Roadmap: Nuclear Energy 2015". <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/NuclearRM2015FINALWEBSept2015v3.pdf>.
 (Hentet:28.04.2017)
- IEA (2017). Policies and Measures Databases". <https://www.iea.org/policiesandmeasures/>.
 (Hentet:03.03.2017)
- IMF (2017). Real GDP growth:Annual percent change"
http://www.imf.org/external/datamapper/NGDP_RPCH@WEO?year=2017
 (Hentet:02.04.2017)
- IPCC (2011). Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation"
https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_full.pdf.
 (Hentet:03.04.2017)
- IPCC (2014). "Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change".
https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_full.pdf. (Hentet:03.04.2017)
- IRENA (2014). Power Generation: Overview"
<http://costing.irena.org/technology-costs/power-generation.aspx> (Hentet:23.05.2017)
- Jamasab, T. og Pollitt, M. (2005). Electricity Market Reform in the European Union: Review of Progress toward Liberalization & Integration". *The Energy Journal*, 26:11 - 41.
- Kutznets, S. (1955). Economic growth and income inequality". *The American Economic Review*, 45:2- 28.
- Liddle, B. og Sadorsky, P. (2014). "How Much Does Increasing Nonfossil Fuels in Electricity Generation Reduce Carbon Dioxide Emissions?". *Presented at the 4th IAEE Asian Conference, Beijing, China.*

- Liddle, B. og Sadorsky, P. (2017). "How Much Does Increasing Nonfossil Fuels in Electricity Generation Reduce Carbon Dioxide Emissions?". *Applied Energy*, 197:212 - 221.
- OECD (2011). "OECD Green Growth Studies: Energy".
<http://www.oecd.org/greengrowth/greening-energy/49157219.pdf> (Hentet: 21.04.2017)
- OECD (2017). "OECD Data". <https://data.oecd.org/> (Hentet: 21.02.2017)
- Perman, R., Ma, Y., Common, M. Maddison, D., og McGilvray, J. (2011). *Natural resource and environmental economics*. Pearson Education, Harlow, 4th edition.
- Perman, R. og Stern, D. I. (2003) Evidence from panel unit root and cointegration tests that the Environmental Kuznets Curve does not exist". *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 47(3):325 - 347.
- Regjeringen (2014). Elsertifikatorordningen".
<https://www.regjeringen.no/no/tema/energi/fornybar-energi/elsertifikater1/id517462/>
 (Hentet: 15.02.2017)
- Renn, O. og Marshall, J. P. (2016). "Coal, nuclear and renewable energy policies in Germany: From the 1950s to the 2010s". *Energy Policy*, 99:224 - 232.
- Schubert, S. R., Pollak, J., og Kreutler, M. (2016). *Energy Policy of the European Union*. Palgrave Macmillan, Basingstoke.
- SINTEF (2015). Klimaordboken"<http://www.sintef.no/siste-nytt/klimaordboken/>. (Hentet: 15.02.2017)
- SNL (2017). Store norske leksikon". <https://snl.no/sekund%C3%A6reenergi> , https://snl.no/fossilt_brensel og <https://snl.no/globalisering>. (Hentet: 05.04.2017)
- Solow, R. M. (1956). "A Contribution to the Theory of Economic Growth". *The Quarterly Journal of Economics*, 70(1):65 - 91.
- SSB (2016). Production and consumption of energy, energy balance, 2014-2015, final figures".
<https://www.ssb.no/en/energi-og-industri/statistikker/energibalanse>. (Hentet: 08.04.2017)
- Statnett (2014). "75 prosent av Europas kraftmarked koblet sammen".
<http://www.statnett.no/Media/Nyheter/Nyhetsarkiv-2014/75-prosent-av-Europas-kraftmarked-koblet-sammen/>. (Hentet: 12.04.2017)
- The World Bank (2017). "World Development Indicators: Data".
<http://data.worldbank.org/data-catalog/world-development-indicators>
- UNEP (2017). Global Trends in Renewable Energy Investment 2017". <http://fs-unep-centre.org/sites/default/files/publications/globaltrendsinrenewableenergyinvestment2017.pdf>.
 (Hentet: 12.04.2017)

Verbeek, M. (2012) *A Guide to Modern Econometrics*. John Wiley and Sons Ltd, United Kingdom, 4th edition.

WEC (2013). "World Energy Perspective: Cost of Energy Technologies". https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/WEC_J1143_Cost_of_TECHNOLOGIES_021013_WEB_Final.pdf. (Hentet: 12.05.2017)

Woolridge, J. M. (2013). *Introductory Econometrics A Modern Approach*. CENGAGE learning, United Kingdom, 5th edition

York, R. (2012). Do alternative energy sources displace fossil fuels?". *Nature Climate Change*, 2:441 - 443.

York, R., Rosa, E. A., og Dietz, T. (2013). STIRPAT, IPAT and impact: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts" *Ecological Economics*, 46(3):351 - 365.

A | Appendiks A: Definisjoner

Tabell A.1: Grupperinger av land

Land	OECD35	OECD29	OECD27	Kyoto-land*
Australia	X	X	X	-
Belgia	X	X	X	X
Canada	X	X	X	-
Chile	X	X	X	X
Danmark	X	X	X	X
Estland	X	-	-	X
Finland	X	X	X	X
Frankrike	X	X	X	X
Hellas	X	X	X	X
Irland	X	X	X	X
Island	X	X	-	X
Israel	X	-	-	X
Italia	X	X	X	X
Japan	X	X	X	X
Latvia	X	-	-	X
Luxembourg	X	X	X	X
Mexico	X	X	X	X
Nederland	X	X	X	X
New Zeland	X	X	X	X
Norge	X	X	-	X
Polen	X	X	X	X
Portugal	X	X	X	X
Slovakia	X	-	-	X
Slovenia	X	-	-	X
Spania	X	X	X	X
Storbritania	X	X	X	X
Sveits	X	X	X	X
Sverige	X	X	X	X
Sør-Korea	X	X	X	X
Tsjekkia	X	-	-	X
Tyrkia	X	X	X	-
Tyskland	X	X	X	X
Ungarn	X	X	X	X
USA	X	X	X	-
Østerrike	X	X	X	X

*X markerer om landene i kolonne «Land» er del av kategoriseringen øverst i samme kolonne.

*Landene vi definerer som Kyoto-land bandt seg til avtalen innen 2005. I tillegg er det krav at ingen av landene trakk seg fra avtalen før utgangen av 2014.

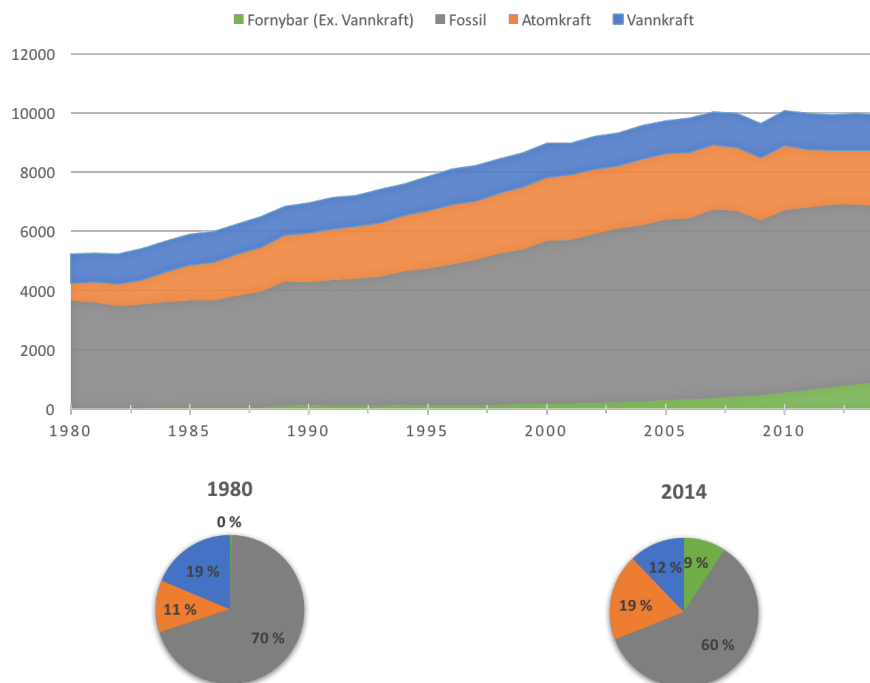
Tabell A.2: Multipler av Watt

Watt	
Kilowatt	10^3
Megawatt	10^6
Gigawatt	10^9
Terawatt	10^{12}

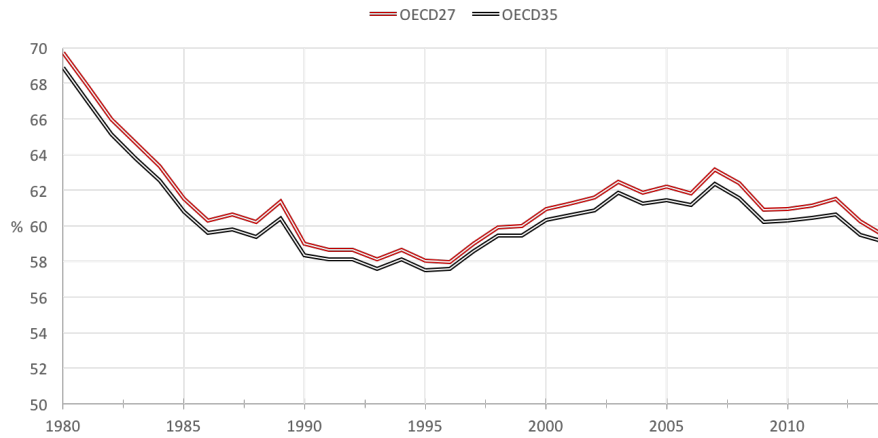
B | Appendiks B: Grafer

I Grafer OECD27

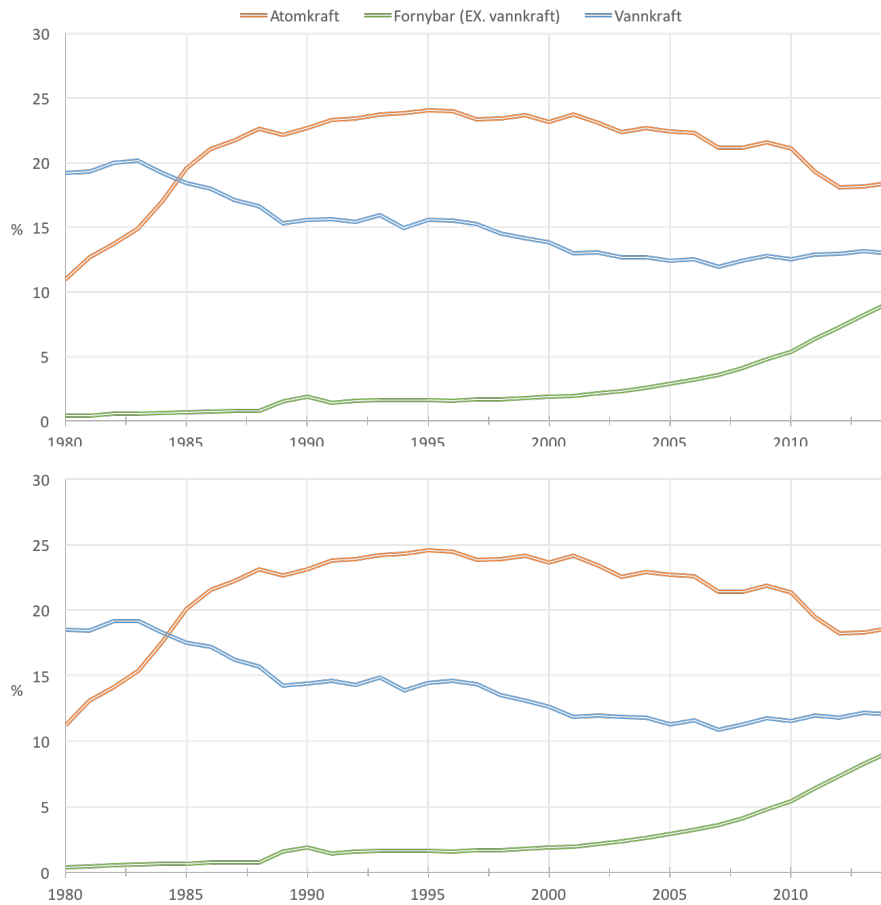
Grafene i denne delen av Appendiks B, er inkludert for å illustrere forskjellene mellom OECD35 og OECD27. Vi bruker OECD27 som utvalg i analysen, mens OECD35 brukes når vi beskriver utviklingen i OECDs kraftproduksjon i Kapittel 3. En fellesnevner for alle grafene er at de ikke er forskjellige fra de i Kapittel 3. Det betyr at presentasjonen av utviklingen i OECDs kraftproduksjon i kapittel 3 er relevant for resultatene i analysen. Alle grafer har vi produsert selv ut fra data hentet hos The World Bank (2017), OECD (2017) eller



Figur B.1: Kraftproduksjon for OECD27 i perioden 1980-2014. Sektordiagrammene viser andelen til de ulike kraftkildene av den total produksjon i 1980 og 2014. Datakilde: The World Bank (2017) og OECD (2017)

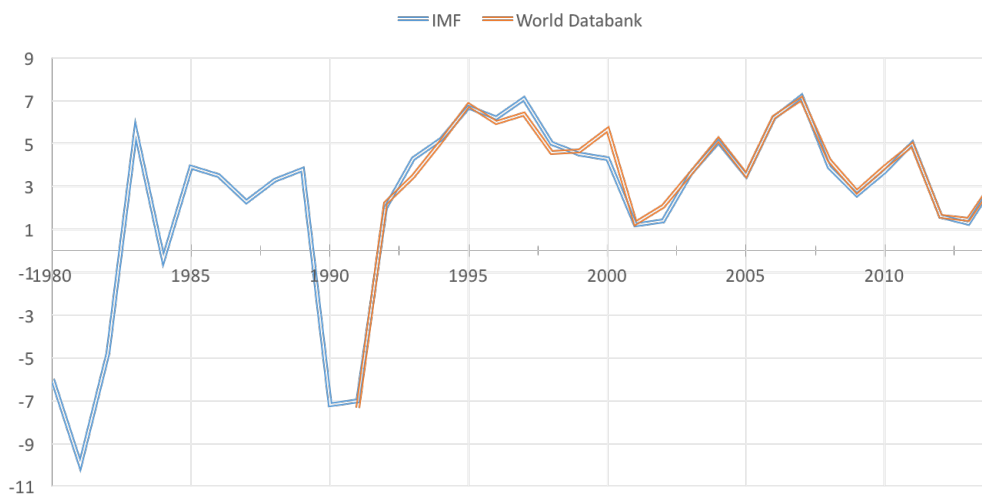


Figur B.2: Fossilandelen for OECD27 og OECD35 i perioden 1980-2014.

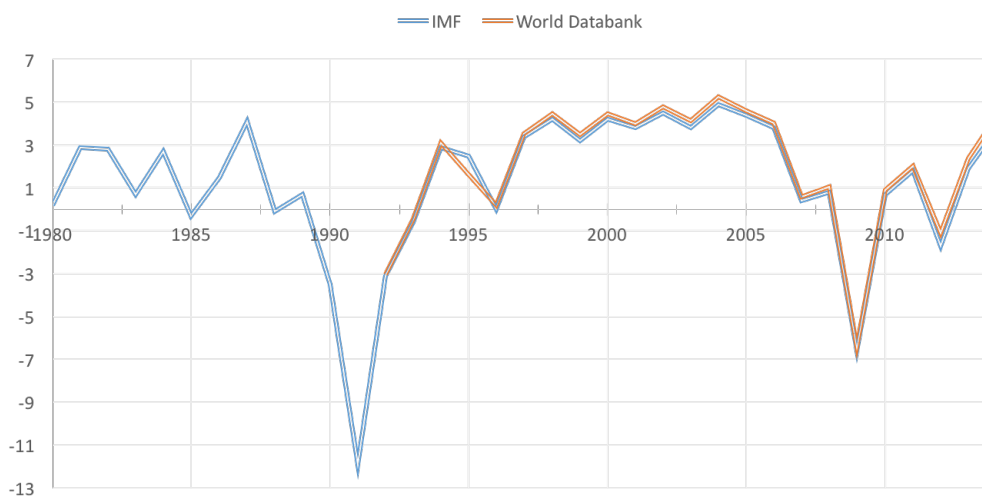


Figur B.3: Ikke-fossile kraftandeler for OECD35 (øverst) OECD27 (nederst) i perioden 1980-2014. Datakilde: The World Bank (2017)

II Proxy for real-BNP i Polen og Ungarn



Figur B.4: Real BNP-vekst i Polen fra 1980 til 2014. Datakilde: The World Bank (2017) og IMF (2017)



Figur B.5: Real BNP-vekst i Ungarn fra 1980 til 2014. Datakilde: The World Bank (2017) og IMF (2017)

Det var mangler i real BNP dataen fra The World Bank (2017) for Polen og Ungarn, i perioden 1980-1990. For å ta hensyn til dette hentet vi data for real BNP-veksten fra IMF og genererte en approksimasjon (proxy) for de manglende verdiene. I figur B.4 og B.5 illustreres dataen grafisk. For å regne oss frem til proxyen tok vi utgangspunkt i dataen fra *World Databank*. Real BNP vekstraten fra år t til $t+1$ kan skrives som g_t . Dermed var real BNP i år t : $BNP_t = (1 - g_t) \times BNP_{t+1}$.

C | Appendiks C: Effisiens og testing

I Hausman-test

Test-observatoren under Hausman-testen er gitt ved

$$\hat{W} = (\hat{\beta}^{FE} - \hat{\beta}^{RE})' [v\hat{ar}(\hat{\beta}^{FE}) + v\hat{ar}(\hat{\beta}^{RE})]^{-1} (\hat{\beta}^{FE} - \hat{\beta}^{RE}) \quad (C.1)$$

der $\hat{\beta}^{FE}$ og $\hat{\beta}^{RE}$ er vektorer bestående av estimerte koeffisienter fra henholdsvis OLS på within-transformert modell og GLS på opprinnelig modell.

Under H_0 kan det vises at W er asymptotisk χ^2 -fordelt med 1 frihetsgrad. H_0 forkastes dersom \hat{W} overstiger kritisk verdi i χ^2 -fordelingen. Hausman gir en \hat{W} -verdi på 45.48, som innebærer at vi forkaster H_0 . Vi konkluderer derfor med at det finnes landspesifikke effekter i η_i som korrelerer med én eller flere uavhengige variabler.

II Effisiens

I kapittel 6 presenterte vi en rekke potensielle problemer vi kan risikere å stå overfor tilknyttet effisiens. For å avgjøre hvilken estimeringsmetode og korrigeringsmetode som best egner seg for vår modell, vil det være lurt å sammenligne resultatene ved bruk av flere metoder. Dette for at potensielle uregelmessigheter i standardavvikene avdekkes. I tabell C.1 presenterer vi derfor fire forskjellige regresjoner basert på grunnmodellen, 6.5.

Estimeringsmetodene som benyttes i kolonne (3) til (5) er identiske med den i kolonne (2), men forskjellige korrigeringer av standardavvikene er tatt i bruk. De estimerte standardavvikene i kolonne (3) tillater seriekorrelasjon og heteroskedastisitet i ϵ_{it} . Dette fordi standardavvikene er cluster-robuste (CR). I kolonne (4) implementerer vi Driscoll og Kraay-standardavvik, som tillater autokorrelasjon og generelle former for heteroskedastisitet i ϵ_{it} . I kolonne (5) presenteres

en regresjon hvor standardavvikene tillater tverrsnittskorrelasjon og heteroskedastisitet. Estimeringsmetoden som benyttes i kolonne (6) er Prais–Winsten, som håndterer seriekorrelasjonen i ϵ_{it} før restleddene korrigeres med PCSE, som i kolonne (5). Regresjonen i kolonne (7) er identisk med den som ble gjennomført i York (2012), der korreksjoner for første-ordens seriekorrelasjon gjennomføres ved å bruke Prais–Winsten-estimering.

Tabell C.1: Hovedanalyse med fokus på effisiens

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7) York
Estimeringsmetode	GLS/RE	MKM/FE	MKM/FE	MKM/FE	MKM/FE	Prais–Winsten/FE	Prais–Winsten/FE
Type standardavvik	-	-	Cluster-robust	Driscoll og Kraay	PCSE	PCSE	-
Årsdummier	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Avhengig variabel	F	F	F	F	F	F	F
IF	-0.3443*** (0.0339)	-0.3486*** (0.0365)	-0.3486** (0.1273)	-0.3486*** (0.0614)	-0.3486*** (0.0331)	-0.4166*** (0.0383)	-0.4058*** (0.0390)
BNP	418.9467*** (21.2100)	436.6506*** (22.1373)	436.6506*** (112.6307)	436.6506*** (41.6112)	436.6506*** (28.1504)	315.3999*** (48.1156)	265.9064*** (56.0211)
BNP ²	-6.8330*** (0.3630)	-7.0215*** (0.3698)	-7.0215*** (1.8296)	-7.0215*** (0.7481)	-7.0215*** (0.5510)	-4.3498*** (1.0624)	-3.2870*** (0.9104)
BNP ³	0.0387*** (0.0021)	0.0395*** (0.0021)	0.0395*** (0.0097)	0.0395*** (0.0041)	0.0395*** (0.0034)	0.0213*** (0.0067)	0.0148*** (0.0047)
Konstantledd	-2,551.7131*** (465.1263)	-2,836.8375*** (345.3997)	-2,836.8375 (1,683.5967)	-2,836.8375*** (531.9576)	-94.0074 (476.2148)	1,313.8417* (743.9572)	-1,016.4163*** (165.8800)
Antall observasjoner	945	945	945	945	945	945	918
Within- R^2	0.63	0.63	0.63	0.63	0.93	0.69	0.24
Antall land	27	27	27	27	27	27	27

Standardavvik i parentes

*** betyr at estimatene er signifikante ved 1% signifikansnivå ($p < 0.01$)** betyr at estimatene er signifikante ved 5% signifikansnivå ($p < 0.05$)* betyr at estimatene er signifikante ved 10% signifikansnivå ($p < 0.10$)

Tabell C.2: Tester for autokorrelasjon og heteroskedastisitet

Test	Restleddsegenskap	Nullhypotese	Signifikans	H_0 forkastes
Modifisert Wald-test	Gruppevis heteroskedastisitet	$H_0: \sigma_{it}^2 = \sigma_\epsilon^2$ for alle i	$Prob > \chi^2 = 0.0000$	JA
Breuch-Pagan LM-test	Tverrsnittskorrelasjon	$H_0: E(\epsilon_{it}\epsilon_{jt}) = 0$, for $i \neq j$	$Prob > \chi^2 = 0.0000$	JA
Wooldridge-test	Seriekorrelasjon	$H_0: \sigma_{it}^2 = \sigma_\epsilon^2$ for alle t	$Prob > F = 0.0028$	JA

Bakgrunnen for disse testene ble diskutert i kapittel 6.

Som vi diskuterte i kapittel 6, og som vi formelt beviser med testene som presenteres i tabell C.2, er ϵ autokorrelert og heteroskedastisk. Vi har med andre ord brudd på de tre forutsetningene om BLUE-estimer, og standardavvikene kan både være større eller mindre i forhold til sin sanne verdi. De estimerte standardavvikene i regresjon (2) vil derfor være skjeve, men det er vanskelig å si hvilken retning skjevheten går. Ved å se nærmere på de tre ulike robuste standardavvikene i henholdsvis (3), (4) og (5) vil vi imidlertid kunne si mer om det.

Det ukorrigerede standardavviket i regresjon (2) estimeres til 0.036. Ved å benytte cluster-robust inferens som rapporteres i kolonne (3), øker det imidlertid til 0.127. Dette fordi CR-standardavvik tillater seriekorrelasjon og heteroskedasitet. Det gjenstår dermed å se hva som skjer med standardavviket dersom vi også tillater tverrsnittskorrelasjon. I regresjon (6) rapporteres en regresjon på 6.5 med Driscoll og Kraay-standardavvik, som tar verdien 0.061. Det er en dobling av standardavviket sammenlignet med det ukorrigerede rapportert i kolonne (2), og stemmer godt overens med tester gjort i Driscoll og Kraay (1998).¹ Standardavviket er derimot halvparten av størrelsen på CR-standardavviket, noe som kan indikere positiv skjevhet i CR-standardavviket. Dette underbygges av brudd på forutsetningen for bruk av cluster-robust inferens, om ingen tverrsnittskorrelasjon i restleddet. Dette ble forklart i kapittel 6. Cameron og Miller (2015, s. 4-5), argumenterer for at CR-standardavvikene vokser med graden av tverrsnittskorrelasjon. Om dette er tilfelle i vår modell er vanskelig å si med sikkerhet, men det faktum at D&K-standardavvikene tar en verdi midt i mellom standardavvikene fra MKM og CR underbygger dette.² Regresjon (6) med D&K-korrigerede standardavvik er ut fra argumentasjonen over nærmest de sanne. I resten av oppgaven brukes derfor Driscoll og Kraays metode for å korrigere standardavvikene.

Vi merker oss at PCSE implementert i regresjon (5) og (6) rapporterer lavere standardavvik enn i (2). Det kan tenkes at dette kommer av den sterke heteroskedasiteten i ϵ_{it} , noe som underbygges i Beck og Katz (1995, s.645). Vi utelukker derfor denne korrigeringsmetoden.

¹Driscoll og Kraay (1998) viser at vanlige MKM-standardavvik gjennomgående er halvparten så store som D&K-standardavvik i tilfeller der restleddet er seriekorrelert og korrelert i tverrsnittsdimensjonen.

²D&K-standardavvik vektet på en annen måte enn CR, slik at tverrsnittskorrelasjonen tas hensyn til.

D | Appendiks D: Regresjoner og tabeller tilknyttet kapittel 7

I Norge og Island

Tabell D.1: Hovedanalyse med Norge og Island

	(1)	(2)
Metode	MKM/FE	MKM/FE
Standardavvik	CR	D&K
Årsdummier	Ja	Ja
Avhengig variabel	F	F
IF	-0.0392** (0.0165)	-0.0392*** (0.0114)
BNP	437.2779*** (88.8460)	437.2779*** (33.9308)
BNP^2	-7.1262*** (1.4652)	-7.1262*** (0.6260)
BNP^3	0.0400*** (0.0080)	0.0400*** (0.0037)
Konstantledd	-3,728.6737*** (1,286.6771)	-3,728.6737*** (510.3781)
Observasjoner	1,015	1,015
Antall land	29	29
R^2	0.58	0.58 .

Standard errors in parentheses

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

I tabell D.1 presenteres resultater fra to regresjoner der Norge og Island er inkludert. Utvalget i disse regresjonene er derfor OECD29. Estimeringsmetode brukt i begge regresjonene er MKM med landfaste effekter. Forskjellen mellom regresjonene er at det i regresjon (1) er benyttet CR-standardavvik, og i regresjon (2) er det benyttet D&K-standardavvik.

Som vi ser estimeres erstatningsgraden i begge regresjonene til -0.0392. Det betyr at hver enhet ikke-fossil kraft generert i perioden 1980-2014, har erstattet 0.0392 enheter fossil kraftproduksjon. Derfor, for å erstatte 1 kWh fossil kraftproduksjon kreves det at 25.5 kWh ikke-fossil kraft genereres. Når Norge og Island inkluderes i analysen faller altså erstatningsgraden fra -0.3483 til -0.0392, og for å erstatte 1 kWh fossil kraftproduksjon kreves det nå at $25.5 - 2.87 = 22.8$ kWh ekstra kraft genereres sammenlignet med tidligere resultat.

York (2012) finner en høyere erstatningsgrad (-0.089) enn oss når vi inkluderer Norge og Island. Fordi vårt datasett er mye mindre enn det som brukes i York (2012), vil effekten på erstatningsgraden av å inkludere Norge og Island komme sterkere frem i våre resultater. Resultatene i D.1 understreker derfor viktigheten av å utelate Norge og Island fra analysen.

II Regresjoner fra robusthetsanalyse

Tabell D.2: Robusthetsanalyse: Viktigheten av *BNP* i grunnmodellen

	(1)	(2)	(3)	(4)
Estimeringsmetode	MKM/FE	MKM/FE	MKM/FE	MKM/FE
Type standardavvik	-	-	-	-
Årsdummier	Nei	Nei	Nei	Nei
Avhengig variabel	F	F	F	F
IF	0.2150** (0.0970)	-0.2204*** (0.0655)	-0.3284*** (0.0751)	-0.3722*** (0.0681)
<i>BNP</i>		88.4839*** (8.0585)	150.6484*** (19.2409)	448.5466*** (27.8100)
<i>BNP</i> ²			-0.5776** (0.2153)	-7.1258*** (0.6531)
<i>BNP</i> ³				0.0397*** (0.0039)
Konstantledd	2,490.2803*** (372.9940)	1,079.4701*** (319.4743)	224.9526 (335.7712)	-3,065.7960*** (223.5856)
Antall observasjoner	945	945	945	945
<i>R</i> ²	0.0249	0.41	0.44	0.59
Antall land	27	27	27	27
F-test	F(3,34) = 392.97 F(2,34) = 64.14 F(1,34) = 104.74			

Standardavvik i parentes

*** betyr at estimatene er signifikante ved 1% signifikansnivå ($p < 0.01$)** betyr at estimatene er signifikante ved 5% signifikansnivå ($p < 0.05$)* betyr at estimatene er signifikante ved 10% signifikansnivå ($p < 0.10$)

Tabell D.3: Inkludering av alternative kontrollvariabler

Estimeringsmetode	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Type standardavvik	MKM/FE	MKM/FE	MKM/FE	MKM/FE	MKM/FE	MKM/FE
Årsdummier	Driscoll og Kraay	Driscoll og Kraay	Driscoll og Kraay	Driscoll og Kraay	Driscoll og Kraay	Driscoll og Kraay
Avhengig variabel	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
	F	F	F	F	F	F
<i>IF</i>	-0.3679*** (0.0637)	-0.3811*** (0.0623)	-0.3439*** (0.0460)	-0.3634*** (0.0459)	-0.3624*** (0.0596)	-0.3690*** (0.0471)
<i>BNP</i>	444.2243*** (54.9567)	472.9966*** (51.8974)	422.9117*** (42.8009)	444.3814*** (47.0772)	478.2429*** (53.0196)	474.0480*** (55.2980)
<i>BNP</i> ²	-7.3227*** (0.8132)	-7.7143*** (0.9532)	-6.7643*** (0.7906)	-7.1630*** (0.8739)	-7.9960*** (0.8839)	-7.8765*** (0.9576)
<i>BNP</i> ³	0.0415*** (0.0042)	0.0432*** (0.0053)	0.0376*** (0.0044)	0.0397*** (0.0049)	0.0466*** (0.0047)	0.0451*** (0.0052)
KAPITAL	-0.0157 (0.0424)					
AGE		18.8002*** (6.4059)		12.1746*** (4.0597)		7.0360 (5.1920)
<i>URBAN</i>			-20,169.8023*** (2,438.6211)	-17,528.1719*** (2,229.2961)		-18,133.9505*** (2,203.3707)
<i>URBAN</i> ²			18,797.0219*** (1,470.8685)	16,982.2015*** (1,394.1755)		16,578.1755*** (1,520.9234)
Handel					-12.0272*** (2.4565)	-9.5417*** (2.8589)
Konstantledd	-2,853.1541*** (687.9762)	-4,296.5078*** (921.7206)	1,943.6186 (1,380.1717)	82.3639 (1,404.4925)	-2,644.4364*** (706.8702)	1,168.8627 (1,374.4222)
Observasjoner	917	945	945	945	924	924
<i>R</i> ²	0.64	0.63	0.67	0.67	0.66	0.69
Antall land	27	27	27	27	27	27

Standardavvik i parentes

*** betyr at estimatene er signifikante ved 1% signifikansnivå ($p < 0.01$)** betyr at estimatene er signifikante ved 5% signifikansnivå ($p < 0.05$)* betyr at estimatene er signifikante ved 10% signifikansnivå ($p < 0.10$)

III Kyoto-avtalen

Tabell D.4: Tilleggseffekt av Kyoto-avtalen

	(1)
Metode	MKM/FE
Standardavvik	D&K
Årsdummier	Ja
Avhengig variabel	<i>F</i>
IF	0.0479 (0.0567)
$IF \times D_{kyoto}$	-0.3933*** (0.0529)
$IF \times D_{1997}$	0.0105 (0.0208)
$IF \times D_{1997}D_{kyoto}$	-0.0347** (0.0143)
BNP	434.8360*** (41.8532)
BNP^2	-6.9857*** (0.7885)
BNP^3	0.0393*** (0.0044)
Kontantledd	-3,040.6343*** (523.9501)
Antall observasjoner	945
Antall grupperinger	27
R^2	0.64

Standardavvik i parentes

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1