

ERASMUS UNIVERSITEIT ROTTERDAM

Erasmus School of Economics

Bachelorscriptie

Begeleider: Spiritus, KFJ

Tweede beoordelaar: Delfgaauw, Josse

Datum: 17 juli 2024

Studentinformatie

Naam: Jesse Nieuwveld

Studentennummer: 581936

E-mail: 581936jn@eur.nl

Onderwerp: Het effect van de invoering van koolstofbelasting op de uitstoot per capita van koolstofdioxide in IJsland.

Het geschrevene in deze scriptie is de opvatting van de auteur en niet noodzakelijk die van de begeleider, tweede beoordelaar, Erasmus School of Economics of Erasmus Universiteit Rotterdam.

Abstract

Klimaatverandering is één van de grootste probleemstellingen voor overheden in de eenentwintigste eeuw. Een belangrijke oorzaak van klimaatverandering is de uitstoot van broeikasgassen, waarbij koolstofdioxide 79,7 procent van de totale uitstoot omvat. Onderzoek naar de effectiviteit van een belasting op koolstofdioxide kan bijdragen om de gevolgen van dit probleem te beperken. In deze studie staat dan ook de volgende onderzoeksvraag centraal: ‘Wat is het effect van de invoering van de koolstofbelasting op de uitstoot per capita van koolstofdioxide in IJsland?’

Om de onderzoeksvraag te beantwoorden is een kwantitatief onderzoek uitgevoerd aan de hand van een synthetische controle-analyse. Voordat deze analyse is uitgevoerd is eerst bepaald welke landen geschikt zijn voor de controlegroep. Ook is een aantal relevante voorspellende variabelen meegenomen. De benodigde gegevens voor het onderzoek zijn afgenomen bij gerenommeerde data-instituten. Uit het hoofdmodel van deze studie blijkt dat het invoeren van een koolstofbelasting in IJsland na 10 jaar resulteert in een 25,4 procent lagere uitstoot per capita van koolstofdioxide dan dat deze was geweest wanneer IJsland de koolstofbelasting niet had ingevoerd. Dit betekent dat overheden er verstandig aan doen om een koolstofbelasting in te voeren als zij de gevolgen van klimaatverandering willen beperken. IJsland is een relatief rijk land waarin reeds een groot aandeel van de energie duurzaam wordt opgewekt. Voor vervolgonderzoek kan het interessant zijn om te bekijken of de resultaten vergelijkbaar zijn voor armere landen of een land dat nog weinig energie duurzaam opwekt.

Inhoudsopgave

Abstract	2
1. Inleiding.....	4
2. Theoretisch kader.....	6
2.1 – De gevolgen van klimaatverandering	6
2.2 – De determinanten van de uitstoot van broeikasgassen.....	7
2.3 – Het literatuuroverzicht	8
3. Methodologie.....	12
3.1 – Het model.....	12
3.2 – De data	15
3.3 – De landen in de controlegroep	16
3.4 - De voorspellende variabelen.....	18
4. Resultaten	23
5. Conclusie	27
6. Discussie.....	28
7. Literatuurlijst	30

1. Inleiding

Klimaatverandering wordt gezien als één van de grootste ecologische en sociale uitdagingen van de eenentwintigste eeuw, waarvan de gevolgen nu al onomkeerbaar zijn (Solomon et al., 2009). Na recent onderzoek van het ICPP is gebleken dat de consequenties enkel zullen verergeren, naarmate de gemiddelde temperatuur blijft stijgen (Calvin et al., 2023). Eén van de belangrijkste veroorzakers van klimaatverandering is de uitstoot van broeikasgassen, zoals koolstofdioxide en methaangas (Dietz et al., 2020). Inzicht in de effectiviteit van een belasting op koolstofdioxide kan bijdragen aan het beperken van de gevolgen van klimaatverandering.

Volgens het EPA (2024) is met name koolstofdioxide de grootste veroorzakers van klimaatverandering, naar schatting omvat dit gas ongeveer 79,7 procent van de totale uitstoot van broeikasgassen. In de jaren 90 van de vorige eeuw werd om deze reden in een aantal Europese landen voor het eerst een belasting op koolstofdioxide geheven, een zogenoemde koolstofbelasting. Eerder studies onderzochten wat het effect van deze invoering was op de uitstoot van broeikasgassen. Zo vonden Lin en Li (2011) dat de koolstofbelasting in Finland de uitstoot per capita verminderde, terwijl in andere landen geen significant effect gevonden werd. Sindsdien zijn er steeds meer landen die een koolstofbelasting hebben ingevoerd (The World Bank, 2023c).

De bestaande literatuur spitst zich voornamelijk toe op de jaren 90 van de vorige eeuw. Een aantal van deze studies vond een negatief effect van de invoering van een koolstofbelasting op de uitstoot van broeikasgassen per capita, terwijl andere studies geen significant effect vonden. Hierdoor is het lastig om aan de hand van de bestaande literatuur beleidsaanbevelingen aan te dragen. Om beter te bepalen welk effect de invoering van een koolstofbelasting per heden heeft, onderzoekt deze studie een recenter voorbeeld van een land dat deze belastingsoort heeft ingevoerd.

IJsland heeft in 2010 een koolstofbelasting ingevoerd (The World Bank, 2023c). Deze belast de verbranding van fossiele brandstoffen, de voornaamste verspreider van broeikasgassen (OECD, 2021), met 10 euro per ton CO₂-equivalent. CO₂-equivalent is een eenheid waarmee de uitstoot van broeikasgassen wordt gemeten. Het doel van de belasting is om consumenten en bedrijven te stimuleren meer hernieuwbare energie te gebruiken in plaats van vervuilende energiebronnen. In deze studie zal onderzocht worden of de invoering van de koolstofbelasting

het gewenste effect heeft. De onderzoeksvraag die centraal staat in deze studie is dan ook als volgt:

‘Wat is het effect van de invoering van de koolstofbelasting op de uitstoot per capita van koolstofdioxide in IJsland?’

Om de onderzoeksvraag te kunnen beantwoorden is een synthetische controle-analyse uitgevoerd. Hiervoor is eerst bepaald welke landen deel uitmaken van de controlegroep aan de hand van de beschikbaarheid van de data en een Pearson-correlatietest. Deze landen zijn België, Duitsland, Hongarije, Italië, Nederland, Slowakije en Tsjechië. Ook is naar aanleiding van de bestaande literatuur een aantal voorspellende variabelen meegenomen om een zo nauwkeurig mogelijke schatting te maken van het effect. Het gaat hierbij om het BBP per capita, het aandeel zware industrie in een economie en de verstedelijkingsgraad. De gegevens zijn verzameld aan de hand van gepubliceerde cijfers van gerenommeerde data-instituten.

Na het uitvoeren van de synthetische controle blijkt dat het invoeren van een koolstofbelasting de uitstoot per capita van koolstofdioxide in IJsland na 10 jaar verlaagt van 6,09 ton CO₂-equivalent naar 4,54, ofwel 25,4 procent. Deze bevinding ligt deels in lijn met de bestaande literatuur. Ook is er een aantal robuustheids- en sensitiviteitstesten uitgevoerd om de nauwkeurigheid van het gevonden effect te verifiëren.

Het eerstvolgende hoofdstuk zal het theoretisch kader zijn. Hierin wordt uitgelegd wat de gevolgen van klimaatverandering zijn, wat de determinanten van de uitstoot van broeikasgassen zijn en vind je een literatuuroverzicht van bestaande literatuur over dit onderwerp. Vervolgens komt de methodologie sectie met daarin de uitleg en uitwerking van het model dat de hoofdvraag dient te beantwoorden, een beschrijving van de data, een specificatie welke landen tot de controlegroep behoren en welke voorspellende variabelen in het model meegenomen worden. In sectie 4 worden de resultaten van deze studie gepubliceerd en worden enkele robuustheids- en sensitiviteitstesten uitgevoerd. De resultaten worden gevolgd door de conclusie en daarop volgt de discussie. Sectie 7 bestaat uit de literatuurlijst.

2. Theoretisch kader

In dit hoofdstuk wordt het theoretische kader van deze studie geschetst. Allereerst worden de gevolgen van klimaatverandering beschreven. Vervolgens worden de belangrijkste determinanten van de uitstoot van broeikasgassen in een land benoemd. Tot slot wordt afgesloten met een literatuuroverzicht, waarin reeds gedaan onderzoek naar de invoering van een koolstofbelasting beschreven en met elkaar in verband gebracht wordt.

2.1 – De gevolgen van klimaatverandering

Er is veelvuldig wetenschappelijk onderzoek gedaan naar de gevolgen van klimaatverandering. Ongeveer 200 jaar geleden begon de industriële revolutie (Hardy, 2003). Dit proces heeft de mens veel gebracht, maar leidde ook tot de verbranding van fossiele brandstoffen. Koolstofdioxide in het bijzonder zorgt dat een deel van de warmte van de zon op aarde vastgehouden wordt. Dit is noodzakelijk voor al het leven op aarde (Wuebbles & Jain, 2001). Echter, door de verbranding van fossiele brandstoffen komt extra koolstofdioxide in de atmosfeer terecht wat betekent dat meer warmte op aarde wordt vastgehouden. Dit leidt tot een hogere temperatuur, waarbij geschat wordt dat de mens de gemiddelde temperatuur reeds met 1 graden Celsius heeft verhoogd. Solomon (2009) concludeerde dat de gevolgen van deze temperatuurstijging nu al onomkeerbaar zijn. Het ICPP geeft aan dat de negatieve effecten enkel zullen toenemen wanneer we doorgaan met het verbranden van fossiele brandstoffen (Calvin et al., 2023). De stijgende temperatuur verstoort veel natuurlijke processen, met enorme ecologische, sociale en economische consequenties.

Een belangrijk gevolg van klimaatverandering is de stijgende zeespiegel (Cazenave & Cozannet, 2014). Naar schatting leeft ongeveer 10 procent van de totale wereldbevolking, zo'n 634 miljoen mensen, in een kustgebied dat minder dan 10 meter boven de zeespiegel ligt (McGranahan, 2007). Wanneer de zeespiegel verder stijgt, zullen grote delen van deze kustgebieden onbewoonbaar zijn. Ook hoger gelegen gebieden zullen negatieve gevolgen ervaren van de stijgende zeespiegel. Stormen en tsunami's zullen vaker en heftiger voorkomen en grote schade met zich meebrengen (FitzGerarld et al., 2008). Bovendien leidt klimaatverandering over de hele wereld tot meer extreme weersomstandigheden (De Sario et al., 2013). De veranderende weerspatronen hebben negatieve gevolgen voor de menselijke gezondheid (Frumkin et al., 2008). De kans op oververhitting, onderkoeling, tropische ziekten

en ondervoeding zullen allemaal stijgen. Het laatstgenoemde ontstaat doordat de voedselzekerheid afneemt (Wheeler & Von Braun, 2013).

Naast bovengenoemde gevolgen zijn er tal van andere consequenties van klimaatverandering. Zo komt ook de biodiversiteit onder druk te staan. In welke mate dit is, verschilt per model, maar in het meest extreme scenario zal het uitstervingscijfer zo hoog liggen dat er gesproken kan worden van de zesde massaextinctie (Bellard et al., 2012). Al deze mogelijke gevolgen ontstaan door het verbranden van fossiele brandstoffen. Mede om deze reden kiezen steeds meer overheden voor een belasting op broeikasgassen om de uitstoot van koolstofdioxide te beperken (The World Bank, 2023c).

2.2 – De determinanten van de uitstoot van broeikasgassen

Om een accuraat beeld te kunnen schetsen van het effect van een koolstofbelasting op de uitstoot per capita van koolstofdioxide is het belangrijk om de onderliggende determinanten van de uitstoot van broeikasgassen te begrijpen. Gonzáles-Sánchez en Martín-Ortega (2020) hebben een uitgebreide studie met paneldata en meerdere lineaire regressiemodellen gedaan naar deze determinanten voor Europese landen. Zij vinden een aantal factoren, waarvan het bruto binnenlands product per capita en het uiteindelijke energiegebruik het belangrijkste zijn.

Het bruto binnenlands product per capita lijkt de sterkste determinant te zijn van de uitstoot van broeikasgassen. Dogan en Seker (2016) concluderen dat het effect van BBP per capita op de uitstoot in Europa een Kuznets-curve volgt. Dit houdt in dat landen met een laag BBP per capita de uitstoot van broeikasgassen zullen zien toenemen naarmate het BBP per capita stijgt, terwijl landen met een relatief hoog BBP per capita juist minder broeikasgassen per capita zullen uitstoten bij economische groei. Uçak et al. (2014) hebben hetzelfde onderzocht voor twintig hoge-inkomenslanden in de OECD. Zij vonden een positieve relatie tussen de uitstoot van koolstofdioxide en het BBP per capita.

Naast BBP per capita is het uiteindelijke energiegebruik een belangrijke determinant. Dit wordt gedefinieerd als de totale energie die wordt geleverd aan huishoudens, industrie en landbouw op jaarbasis. Gonzáles-Sánchez en Martín-Ortega (2020) vinden een positieve correlatie. Dit betekent dat naarmate een land meer energie verbruikt, des te hoger de uitstoot van broeikasgassen per capita. Flavio et al. (2019) vinden vergelijkbare resultaten.

Een andere determinant voor de uitstoot van broeikasgassen per capita is het aandeel duurzame energie ten opzichte van de totale energieconsumptie. Saidi en Omri (2020) deden

onderzoek naar de correlatie tussen het gebruik van duurzame energie en de uitstoot van koolstofdioxide. Water-, wind- en zonne-energie werden in deze studie gezien als duurzame energiebronnen. Er werd een negatief significant effect gevonden.

Boqiang en Liu (2017) hebben onderzocht welke invloed de structuur van de economie van een land heeft op de uitstoot van broeikasgassen per capita. Zij concluderen dat hoe groter het aandeel is dat zware industrie opmaakt van het totale BBP, hoe hoger de uitstoot van broeikasgassen per capita. Er wordt dus een positief effect gevonden.

De verstedelijkingsgraad van een land speelt ook een rol bij de uitstoot van broeikasgassen per capita. De verstedelijkingsgraad is simpelweg het percentage van de bevolking dat in een stad woont. Aller et al. (2022) vinden een negatief significant effect van verstedelijking op uitstoot van broeikasgassen. Zij verklaren deze bevinding met het idee dat de energie-infrastructuur efficiënter gebruikt kan worden wanneer meer mensen bij elkaar wonen. Ook maken meer mensen in de stad gebruik van het openbaar vervoer ten opzichte van de auto. Hierdoor daalt de uitstoot van broeikasgassen per capita.

Naast bovengenoemde vijf determinanten zijn er nog tal van andere factoren die invloed hebben op de uitstoot van broeikasgassen per capita. Denk hierbij aan politieke factoren (Wang et al., 2022), de publieke opinie over het belang van klimaatverandering (De Best-Waldhober et al., 2012) en de geografische locatie ten opzichte van duurzame en fossiele energiebronnen (Wang et al., 2018). Deze zijn echter lastig in cijfers uit te drukken. Interessant om te benoemen is dat er geen eenduidig antwoord uit de literatuur komt of energieprijzen een rol spelen in de uitstoot van broeikasgassen per capita. Yang en Timmermans (2012) en Gonzáles-Sánchez en Martín-Ortega (2020) vinden geen significante resultaten. Terwijl Hammoudeh et al. (2014) wel een negatief effect vinden.

2.3 – Het literatuuroverzicht

Onderzoek naar het effect van een koolstofbelasting op de uitstoot per capita van broeikasgassen is al een aantal keer gedaan. Hieronder volgt een beschrijving van de belangrijkste studies over dit onderwerp, waarbij de bevindingen worden samengevat, geanalyseerd en met elkaar in verband gebracht worden.

De koolstofbelasting werd voor het eerst in Europa ingevoerd in begin jaren 90 van de vorige eeuw in Denemarken, Finland, Nederland, Noorwegen en Zweden. Lin en Li (2011) hebben onderzocht wat de invoering van de belasting in deze landen had op de uitstoot per

capita van broeikasgassen. Zij maakten in hun onderzoek gebruik van een Difference-in-Difference-analyse. Andere Europese landen die de belasting niet invoerde, en ook geen vergelijkbare belasting hadden, dienden als de controlegroep. Deze groep bestond uit dertien landen. In de regressie werd gecontroleerd voor zes variabelen: BBP per capita, uiteindelijke energiegebruik, uitstoot per eenheid energieconsumptie, energieprijzen, verstedelijking en industriestructuur. Lin en Li (2011) vonden enkel een negatief significant effect voor Finland. De coëfficiënten voor de andere landen waren wel negatief, maar niet significant. De onderzoekers concludeerden dat dit waarschijnlijk het gevolg is van verschillen in de hoogte van de koolstofbelasting, belastinguitzonderingen voor bepaalde sectoren en allocatie door de overheid van de belastingopbrengst. Nederland schafte overigens een aantal jaar later de koolstofbelasting af.

Ook Andersson (2019) heeft onderzoek gedaan naar het effect van de invoering van een koolstofbelasting in Europa. Hij keek echter, in tegenstelling tot Lin en Li (2011), niet naar meerdere landen, maar enkel naar Zweden. De controlegroep bestond uit alle 25 OECD-landen, dus ook de andere landen die eveneens een koolstofbelasting hadden ingevoerd. Aan de hand van paneldata werd de jaarlijkse uitstoot van koolstofdioxide per capita bepaald. Andersson (2019) voerde een synthetische controle-analyse uit. Uit deze analyse bleek dat Zweden ongeveer 11 procent minder uitstootte als gevolg van de koolstofbelasting ten opzichte van wat Zweden had uitgestoot als zij de belasting niet hadden ingevoerd. Deze resultaten verschillen dus met de resultaten van Lin en Li (2011), zij vonden geen significant effect voor Zweden. Mogelijk is dit verschil ontstaan door verschillen in de controlegroep en methodologie.

Net na de invoering van de koolstofbelasting publiceerden Agostini et al. (1992) een studie waarin de effectiviteit van een koolstofbelasting werd bestudeerd. In tegenstelling tot Lin en Li (2011) en Andersson (2019) werd in deze studie gekeken naar een andere periode. Er werd gewerkt met data uit de periode 1978 tot en met 1988, dus vóór de invoering van een koolstofbelasting. Als behandelde eenheid namen Agostini et al. (1992) de cijfers van de OECD-landen als één samengevoegd land. Er werd een simulatiemodel opgesteld om te kijken welk effect een koolstofbelasting zou hebben op de vraag naar fossiele brandstoffen in verschillende sectoren: huishoudens, transport, elektriciteitscentrales en industrie. Uit de simulatie bleek dat enkel in de elektriciteitscentrales significant minder vraag was naar fossiele brandstoffen. In de andere sectoren waren de gevonden effecten niet significant. Vervolgens werd enkel naar Italië gekeken om te beoordelen of hier de effecten zouden verschillen. Dit was het geval: ook de industriesector liet nu significante resultaten zien. De conclusie van deze

studie was dat het invoeren van een koolstofbelasting in bepaalde sectoren effectief kon zijn. Wel zou er goed aan gedaan worden om dit niet als enige maatregelen tegen klimaatverandering te nemen, maar om goed te kijken welke maatregelen per regio het meest effectief werken.

Naast deze drie studies over de invloed van een koolstofbelasting op de uitstoot per capita van broeikasgassen, hebben Köppl en Schratzensteller (2022) een literatuuroverzicht opgesteld van de overige belangrijke wetenschappelijke artikelen die te maken hebben met dit onderwerp. Per mei 2022 hadden 46 overheidsorganen een vorm van een koolstofbelasting ingevoerd, welke wereldwijd verantwoordelijk zijn voor 5,7% van alle uitstoot van broeikasgassen (The World Bank, 2022). De vorm van belasting verschilt sterk per land. Zo hebben veel landen uitzonderingen voor bepaalde industrieën. In Noorwegen wordt de meeste uitstoot van broeikasgassen belast, namelijk 98%, terwijl in Spanje slechts 2,9% van alle uitstoot belast wordt (Köppl & Schratzensteller, 2022). Ook het tarief waarmee belast wordt is niet gelijk per land. In Polen is het belastingtarief het laagst, terwijl Zweden het hoogste belastingtarief kent, respectievelijk 0,08 dollar en 129,89 dollar per ton CO₂-equivalent.

Vrijwel alle studies over dit onderwerp maken gebruik van empirische onderzoeksmethoden waarbij een onderscheid gemaakt kan worden tussen ex-ante en ex-post analyses. Lin en Li (2011) en Agostini et al. (1992) maakten gebruik van ex-ante analyses terwijl Andersen (2004), Rafaty et al. (2022) en Green (2021) juist ex-post studies uitvoerden. De laatstgenoemde deed een meta-review. Ex-post studies hebben als voordeel dat de schattingen over het algemeen betrouwbaarder zijn. Het is echter lastiger met deze onderzoekstechniek om vast te stellen of het gevonden effect het resultaat is van de behandeling, dus de invoering van een koolstofbelasting, of ook andere factoren meegenomen worden in de gevonden schatting. Deze onderzoeken worden veelal gedaan aan de hand van interviews met experts in het veld, zoals bij Andersen (2004) of door beschrijvende statistiek, zoals Rafaty et al. (2022). Ex-ante studies maken vaak gebruik van simulatiemodellen.

De gevonden resultaten verschillen per studie. Andersen (2004) onderzocht het effect van het invoeren van een koolstofbelasting op de uitstoot van broeikasgassen in Denemarken door middel van een literatuuronderzoek. Hij beschrijft dat eerdere studies een relatief sterk negatief effect vonden, terwijl latere studies een zwakker effect vonden. Larsen en Nesbakken (1997) onderzochten welk effect de invoering in Noorwegen had per sector aan de hand van een synthetische controle-analyse. Uit dit onderzoek bleek dat voor heel Noorwegen de uitstoot 3 tot 4% lager was dan dat het zou zijn geweest als zij de belasting niet hadden ingevoerd. In de

industriese sector werd een niet-significant effect van slechts 0,5% gevonden. Rafaty et al. (2022) vinden ook een gering effect van de invoering van een koolstofbelasting op de uitstoot van broeikasgassen per capita.

De bestaande literatuur geeft geen eenduidige conclusies over het effect van een koolstofbelasting op de uitstoot van broeikasgassen per capita. Lin en Li (2011) concluderen dat de effectiviteit verschilt per land, Andersson (2019) en Andersen (2004) vinden een relatief sterk effect voor respectievelijk Zweden en Denemarken, terwijl Agostini et al. (1992) en Larsen en Nesbakken (1997) de conclusie trekken dat de effectiviteit verschilt per sector, waarbij Larsen en Nesbakken (1997) en Rafaty et al. (2022) een zwak effect vinden. Bovendien kijken veel studies naar een interventie van vóór 1994. Het is interessant om een nieuw model op te stellen en te onderzoeken wat het effect van de invoeringen van een koolstofbelasting is in een meer recente situatie.

3. Methodologie

Om te bepalen wat het effect van de invoering van een koolstofbelasting in IJsland op de uitstoot per capita van koolstofdioxide is, is een kwantitatief onderzoek opgesteld. Er is een synthetische controle-analyse uitgevoerd, met paneldata gepubliceerd door gerenommeerde data-instituten.

3.1 – Het model

In deze studie is gebruik gemaakt van een synthetische controle-analyse. IJsland voerde in 2010 (The World Bank, 2023c) een koolstofbelasting in. Er is een aantal Europese landen dat vóór 2020 nog geen koolstofbelasting had ingevoerd, namelijk: België, Bulgarije, Cyprus, Duitsland, Griekenland, Hongarije, Italië, Litouwen, Luxemburg, Malta, Nederland, Oostenrijk, Roemenië, Slovenië, Slowakije en Tsjechië. Deze landen kunnen in potentie dienen als controlegroep. IJsland is de behandelde eenheid.

Het doel van een synthetische controle is om het effect van een beleidsmaatregel te schatten (Kreif et al., 2015). Wanneer een koolstofbelasting op nationaalniveau wordt ingevoerd, is er geen controlegroep binnen dit land om de gemeten resultaten mee te vergelijken. In plaats daarvan tracht een synthetische controle-analyse een synthetische versie van de behandelde eenheid op te stellen die niet behandeld wordt. Door te vergelijken wat de uitstoot per capita van koolstofdioxide van werkelijk-IJsland is ten opzichte van synthetisch-IJsland kunnen we het effect van de invoering van een koolstofbelasting schatten.

Een andere veelgebruikte onderzoeksmethode om de effectiviteit van een beleidsmaatregel te bepalen, is de Difference-in-Difference-analyse. Bij deze methode is het belangrijk dat de controlegroep relatief groot is. Later in deze studie zal blijken dat een groot deel van de landen die in potentie bij de controlegroep horen in werkelijkheid ongeschikt zijn. Hierdoor neemt de grootte van de controlegroep sterk af. Bij een synthetische controle-analyse is de grootte van de controlegroep minder belangrijk. Hierom is in deze studie gekozen voor een synthetische controle-analyse in plaats van een Difference-in-Difference-analyse.

De trend van synthetisch-IJsland wordt opgesteld aan de hand van data uit het verleden voor zowel de controlegroep als de behandelde eenheid. In deze studie wordt een pre-behandelingsperiode van 10 jaar genomen, dus van 2000 tot en met 2009. Hierdoor is er voldoende data om een accurate synthetische controle-analyse uit te voeren. De

beschikbaarheid van data vóór 2000 is aanzienlijk minder. De behandeling vindt plaats op 1 januari 2010. Als post-behandelingsperiode is hierom gekozen voor 2010 tot en met 2019. De uitstoot per capita van koolstofdioxide in 2020 is minder goed bruikbaar in verband met Covid-19. Dit virus zorgde voor een afname van de uitstoot van koolstofdioxide van 8,8 procent (Liu et al., 2020).

Bij het uitvoeren van een synthetische controle-analyse moet voldaan worden aan een drietal voorwaarden. Allereerst, het is belangrijk dat er geen invloed ontstaat tussen de eenheden. Wat dit inhoudt in de context van deze studie is dat de invoering van de koolstofbelasting in IJsland geen effect mag hebben op de uitstoot per capita van koolstofdioxide van een van de landen uit de controlegroep. Het is denkbaar dat bedrijven die in IJsland veel koolstofdioxide uitstoten door de invoering van deze belasting geprikkeld worden om te verplaatsen naar het buitenland, en hier dus de uitstoot per capita verhogen. In de literatuur zijn hiervan echter geen gevallen bekend. Hierom kunnen we aannemen dat aan deze voorwaarde is voldaan.

De tweede aanname waaraan voldaan dient te worden, is vergelijkbaarheid vóór de behandeling. Dit betekent dat de landen uit de controlegroep een vergelijkbare trend moeten vertonen als IJsland vóór de behandeling. In de sectie ‘3.3 – *De landen in de controlegroep*’ zal de uitstoot per capita van koolstofdioxide in de periode 2000 tot en met 2009 tussen de potentiële landen uit de controlegroep vergeleken worden. Landen die een sterk afwijkende trend van IJsland vertonen, zullen verwijderd worden uit de controlegroep. Hierdoor is ook aan de tweede voorwaarde voldaan. De laatste aanname houdt in dat de uitkomst voorspelbaar moet zijn. De uitstoot van koolstofdioxide per capita in IJsland mag na de behandeling niet een andere trend aannemen zonder dat dit het gevolg is van de invoering van de koolstofbelasting. Dit is potentieel wel het geval. Hierop zal in het hoofdstuk ‘6. *Discussie*’ dieper ingegaan worden

Nu is vastgesteld dat aan de voorwaarden voldaan wordt, kan het regressiemodel opgesteld worden. Laat E_{it} de uitstoot per capita van koolstofdioxide per CO₂-equivalent in IJsland zijn op tijd t en \hat{E}_{it} dezelfde waarde voor synthetisch-IJsland op tijd t . \hat{E}_{it} wordt geconstrueerd door de uitstoot per capita van koolstofdioxide van de landen uit de controlegroep een bepaald gewicht ω_x mee te geven. Waarbij x een specifiek land is uit de controlegroep. N is het totaal aantal meegenomen landen in de controlegroep. Om welke landen dit gaat, zal in de sectie ‘3.3 – *De landen in de controlegroep*’ verder aan bod komen. De uitkomst van de afhankelijke variabele van synthetisch-IJsland wordt bepaald aan de hand van de volgende formule:

$$\hat{E}_{it} = \sum_{x=1}^N (\omega_x E_{xt})$$

De gewichten worden gekozen met behulp van de pre-behandelingsvariabelen met als doel om het verschil tussen werkelijk-IJsland en synthetisch-IJsland te minimaliseren. Ze worden bepaald met de volgende formule, waarbij $\sum_{x=1}^N (\omega_x) = 1$ en $\omega_x \geq 0$:

$$\min_{\omega} \sum_{t=2000}^{T_{2009}} (E_{it} - \sum_{x=1}^N (\omega_x E_{xt}))^2$$

Vervolgens wordt het verschil tussen werkelijk-IJsland en synthetisch-IJsland geanalyseerd. Hiermee kan het behandelingseffect τ_t op tijd t bepaald worden, namelijk: $\tau_t = E_{it} - \hat{E}_{it}$. Deze geeft het verschil aan tussen de uitstoot per capita van koolstofdioxide in IJsland ten opzichte van wat de uitstoot per capita was geweest wanneer de koolstofbelasting niet zou zijn ingevoerd.

Hierop volgend zal een aantal robuustheidschecks uitgevoerd worden om te bepalen in welke mate het gevonden behandelingseffect nauwkeurig is. De eerste test zal de gewichtsrobuustheid beoordelen. Door te analyseren hoe de gewichten verdeeld zijn, kan al veel duidelijk worden. In een potentiële situatie waarbij één meegegeven gewicht erg groot is, kan het resultaat sterk beïnvloed worden door andere variabelen die dit land uit de controlegroep beïnvloeden. Dit zorgt voor een onnauwkeurige schatting van het behandelingseffect. Initieel zal geen gewichtslimiet gelden. Hierdoor worden de optimale gewichten meegegeven en is de schatting van het behandelingseffect het meest zuiver. Vervolgens wordt dezelfde analyse gedaan met een gewichtslimiet van 0,5. Bij vergelijkbare resultaten zal dit ten goede komen aan de robuustheid van het model. De tweede test die uitgevoerd wordt, controleert de sensitiviteit van het model. Het gaat om een *place-in-time*-analyse. Hierbij wordt de interventieperiode artificieel vijf jaar naar voren geplaatst, dus op 1 januari 2005. Vervolgens wordt een synthetische controle-analyse opgesteld van 2000 tot en met 2009 op basis van de nieuwe behandelingsperiode. Wanneer de trend van synthetisch-IJsland en werkelijk-IJsland vergelijkbaar zijn, komt dit ten goede aan dit onderzoek.

Om de nauwkeurigheid van het gevonden effect te verhogen, zal een aantal voorspellende variabelen in het model geïntroduceerd worden. Dit komt bovendien de robuustheid van het model ten goede. Voorspellende variabelen dienen meegenomen te worden wanneer zij

mogelijk correlatie hebben met de uitkomstvariabele. In ‘2.2 – *De determinanten van de uitstoot van broeikasgassen*’ is gekeken naar welke factoren volgens de literatuur invloed hebben op de uitstoot van broeikasgassen. Deze determinanten kunnen potentieel in het model meegenomen worden als voorspellende variabelen. Het gaat dan om het BBP per capita, het uiteindelijke energiegebruik, het aandeel duurzame energie, het aandeel zware industrie in een economie en de verstedelijkingsgraad. Later in deze studie, in de sectie ‘3.4 – *De voorspellende variabelen*’ wordt verder uitgewerkt welke variabelen in het model meegenomen worden. De energieprijis wordt niet meegenomen. Hierover is weinig accurate data te vinden en de literatuur is niet eenduidig of dit de uitstoot van koolstofdioxide beïnvloedt.

3.2 – De data

In deze studie zijn zowel wetenschappelijke artikelen als paneldata gebruikt. De data voor het model zijn samengesteld aan de hand van databases van verschillende gerenommeerde data-instituten. Allereerst, data voor de belangrijkste variabele, de uitstoot van koolstofdioxide per capita, is opgehaald bij het IEA (2022). Het International Energy Agency is een autonome intergouvernementele organisatie, wiens leden ruim 80 procent van alle vraag naar energie omvatten. Deze organisatie publiceert ieder jaar voor al haar deelnemers verschillende gegevens met betrekking tot energie. Cijfers over de uitstoot van alle broeikasgassen zijn pas vanaf 2013 beschikbaar, en daarmee niet toereikend voor dit onderzoek. Wel publiceert het IEA (2023b) cijfers over de uitstoot per capita van koolstofdioxide in de periode van 2000 tot en met 2022. Koolstofdioxide beslaat 79,7 procent van de uitstoot van alle broeikasgassen en is daarmee een erg goede indicator voor de totale uitstoot van broeikasgassen (EPA, 2024). De uitstoot wordt weergegeven in ton CO₂-equivalent.

Om te bepalen welke verklarende variabelen toegevoegd dienen te worden heeft een literatuuronderzoek plaatsgevonden. Deze is besproken in de sectie ‘2.2 – *De determinanten van de uitstoot van broeikasgassen*’. De belangrijkste bron over dit onderwerp was het artikel van González-Sánchez en Martín-Ortega (2020). Cijfers over het bruto binnenlands product per capita (2023a), het aandeel zware industrie in een economie (2022) en de verstedelijkingsgraad (2023b) zijn opgehaald bij The World Bank. Het BBP per capita wordt weergegeven in huidige US Dollars. Het aandeel zware industrie in een economie is het percentage van het BBP van een land dat vergaard wordt in de industriële sector van een land. De verstedelijkingsgraad is simpelweg het percentage inwoners van een land dat in een stad woont ten opzichte van het

totale aantal inwoners van het desbetreffende land. Ook de data voor de invoering van een koolstofbelasting zijn ontleend van The World Bank (2023c).

Data voor de andere twee potentieel verklarende variabelen, het uiteindelijke energiegebruik en het aandeel duurzame energie, zijn eveneens opgehaald bij het IEA (2023a). In deze database wordt informatie gepubliceerd over het totale energieaanbod in een land van 2000 tot en met 2022 gemeten in kilojoule. Het totale energieaanbod wordt omschreven als de geproduceerde energie en de energie-import minus de energie-export en de opslag, dit is dus gelijk aan het uiteindelijke energiegebruik. Ook wordt getoond van welke bron deze energie afkomstig is, namelijk kool, nucleair olie, aardgas, water, wind- en zonne-energie en bioafval. De laatste drie categorieën worden gezien als duurzame energiebronnen. Door de som van het aanbod in kilojoule van de duurzame energiebronnen te delen door het uiteindelijke energiegebruik in kilojoule verkrijgen we het percentage duurzame energie.

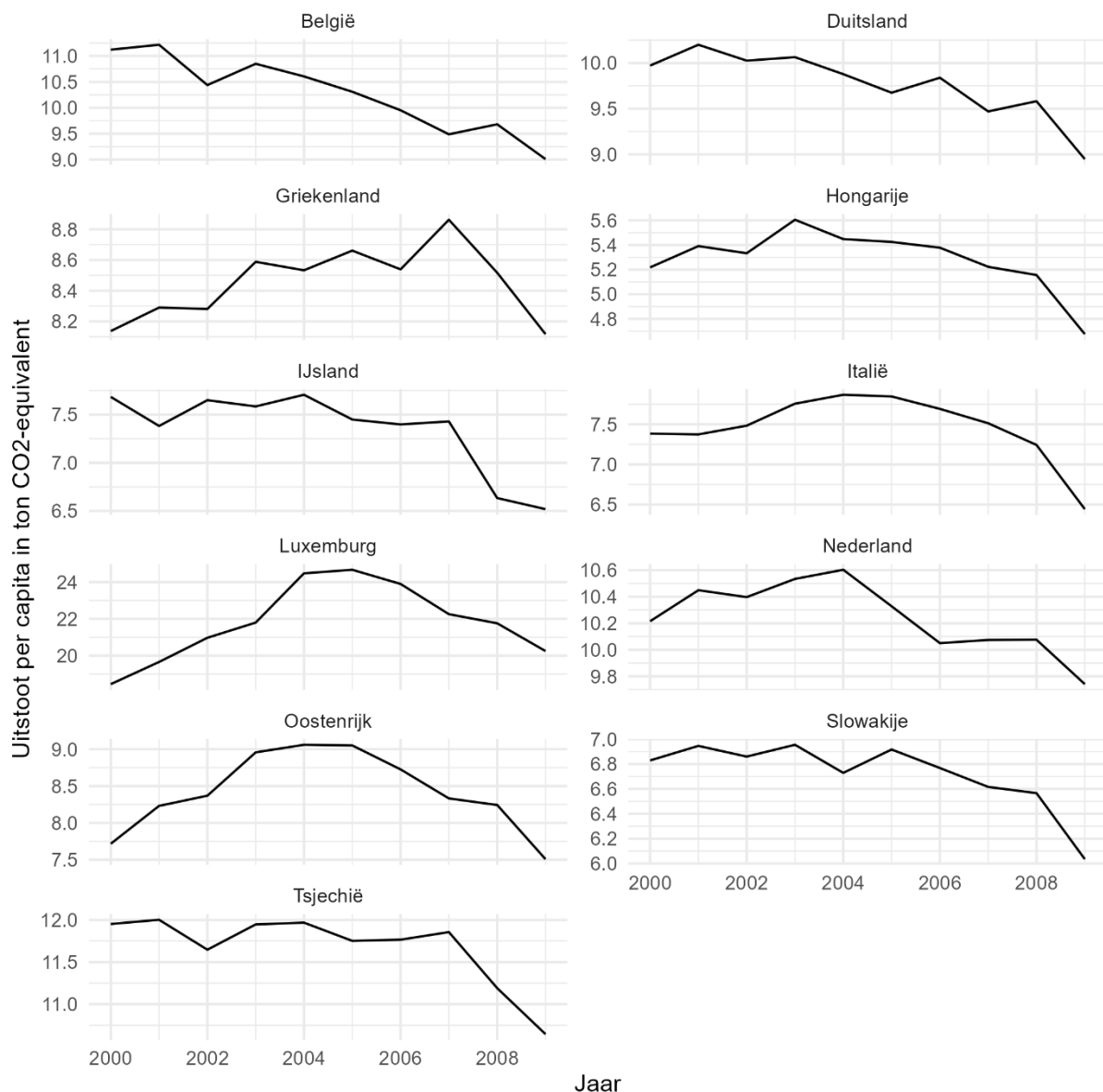
Door bovengenoemde data in het model te verwerken, probeert deze studie een zo accuraat mogelijke schatting van het effect van de invoering een koolstofbelasting in IJsland op de uitstoot per capita van koolstofdioxide te verkrijgen. De synthetische controle-analyse en overige toetsen zijn uitgevoerd met behulp van statistiekprogramma ‘*RStudio*’.

3.3 – De landen in de controlegroep

Om de synthetische controle-analyse correct uit te voeren moet nauwkeurig gekeken worden naar de landen in de controlegroep. In het volgende deel zal uitgelegd worden welke landen deel zullen uitmaken van de controlegroep, en welke landen uit de controlegroep verwijderd zullen worden. De potentiële landen die tot de controlegroep kunnen behoren zijn België, Bulgarije, Cyprus, Duitsland, Griekenland, Hongarije, Italië, Litouwen, Luxemburg, Malta, Nederland, Oostenrijk, Roemenië, Slovenië, Slowakije en Tsjechië. Dit zijn alle landen die vóór 2020 nog geen koolstofbelasting hadden ingevoerd.

Het IEA (2022) publiceert enkel gegevens van haar deelnemers. Niet ieder land dat behoort tot de potentiële controlegroep is lid van het IEA. De volgende landen zijn niet aangesloten bij deze organisatie: Bulgarije, Cyprus, Litouwen, Malta, Roemenië en Slovenië. Over deze landen is hierom minder accurate data te vinden, deswege worden ze uit de potentiële controlegroep gehaald. De overgebleven landen in de potentiële controlegroep zijn: België, Duitsland, Griekenland, Hongarije, Italië, Luxemburg, Nederland, Oostenrijk, Slowakije en Tsjechië.

Zoals in de sectie ‘3.1 – Het model’ besproken is één van de voorwaarde van een synthetische controle-analyse dat er vergelijkbaarheid vóór de behandeling dient te zijn tussen IJsland en de landen die deel uitmaken van de controlegroep. In de context van deze studie houdt dit in dat de uitstoot per capita van koolstofdioxide in de controlegroep een vergelijkbare trend moet volgen als IJsland vóór de invoering van de koolstofbelasting, dus vóór 1 januari 2010. In *Grafiek 1* is de uitstoot per capita van koolstofdioxide in CO₂-equivalent weergegeven in de periode van 2000 tot en met 2009 voor alle landen die zijn overgebleven in de potentiële controlegroep én IJsland.



Grafiek 1 – Uitstoot per capita van koolstofdioxide voor de potentiële controlegroep

Bij het vaststellen van de vergelijkbaarheid zijn de absolute waarden niet van belang. Het gaat om het relatieve verloop van de trend. IJsland heeft in het begin, met een uitstoot van

ongeveer 7,5 ton CO₂-equivalent per capita, een relatief hoge uitstoot. Deze waarde blijft ongeveer gelijk, maar daalt vanaf 2007 sterk, naar 6,5 ton CO₂-equivalent per capita in 2009. Aan de hand van een visuele analyse valt op dat de meeste landen uit de potentiële controlegroep een vergelijkbare trend volgen, waarbij de uitstoot per capita van koolstofdioxide eerst relatief hoog is, en later daalt. Om te bepalen welke trend van de landen uit de controlegroep de trend van IJsland het best volgt, is een Pearson-correlatietest uitgevoerd. In *Tabel 1* zijn de Pearson-correlatiecoëfficiënten weergegeven voor alle landen uit de potentiële controlegroep.

Tabel 1 – Pearson-correlatiecoëfficiënten per land

Land	Correlatie
België	0,730
Duitsland	0,757
Griekenland	0,207
Hongarije	0,776
Italië	0,789
Luxemburg	0,159
Nederland	0,756
Oostenrijk	0,512
Slowakije	0,800
Tsjechië	0,906

Uit *Tabel 1* blijkt dat de trend van de uitstoot van koolstofdioxide per capita van Tsjechië de trend van IJsland het sterkst volgt, met een Pearson-correlatiecoëfficiënt van 0,906. Daarop volgt een groot aantal landen met waarden tussen de 0,730 tot 0,800. Deze landen zijn dus relatief vergelijkbaar met IJsland. De landen die de trend van IJsland het minst sterk volgen zijn Oostenrijk, Griekenland en Luxemburg. De Pearson-correlatiecoëfficiënten van deze landen zijn respectievelijk 0,512, 0,207 en 0,159. Om aan de tweede aanname van de synthetische controle-analyse te voldoen zullen deze landen uit de controlegroep verwijderd worden. Hiermee wordt zeker gesteld dat aan de voorwaarde wordt voldaan. De zeven landen die deel uitmaken van de definitieve controlegroep zijn België, Duitsland, Hongarije, Italië, Nederland, Slowakije en Tsjechië.

3.4 - De voorspellende variabelen

Zoals eerder besproken in deze studie is het voor de nauwkeurigheid van het behandelingseffect essentieel om voorspellende variabelen mee te nemen in de synthetische controle-analyse. De vijf belangrijkste determinanten van de uitstoot van broeikasgassen uit de literatuur zijn het bruto binnenlands product per capita, het uiteindelijke energiegebruik, het

aandeel duurzame energie, het aandeel zware industrie in een economie en de verstedelijkingsgraad van een land (González-Sánchez & Martín-Ortega, 2020). In de volgende sectie wordt vastgesteld of deze variabelen inderdaad invloed hebben op de uitstoot per capita van koolstofdioxide door een OLS-regressie toe te passen en te bekijken of de gevonden schattingen statistische significantie vertonen.

Allereerst volgt een beschrijvende statistiek van het gemiddelde van de verklarende variabelen die potentieel meegenomen worden in de synthetische controle-analyse. Ook de uitkomstvariabele, de uitstoot van koolstofdioxide per capita, is meegenomen in *Tabel 2*. Te zien is dat de uitstoot per capita in CO₂-equivalent en het aandeel in een economie van zware industrie over de tijd afnemen. Het bruto binnenlands product in huidige USD neemt, net als het aandeel duurzame energie en de verstedelijkingsgraad, geleidelijk toe. Het uiteindelijke energiegebruik in kilojoule neemt in de eerste jaren wat toe, tot deze variabele in 2006 zijn hoogtepunt bereikt en vervolgens een dalende trend vertoont.

Tabel 2 – Een beschrijving van de variabelen

Jaartal	Uitstoot in ton CO ₂ -equivalent	BBP per capita in huidige USD	Uiteindelijke energiegebruik in KJ	Aandeel duurzame energie (%)	Aandeel zware industrie (%)	Verstedelijkingsgraad (%)
2000	8,797	17.665	3.773.050	12,64	26,44	75,41
2001	8,870	17.572	3.846.360	12,69	26,59	75,59
2002	8,729	19.452	3.907.342	12,79	25,85	75,83
2003	8,912	23.836	3.892.556	12,91	25,53	76,07
2004	8,851	27.671	3.921.670	13,05	25,94	76,31
2005	8,713	29.815	3.927.498	13,80	25,80	76,54
2006	8,605	31.363	3.973.328	14,65	26,44	76,77
2007	8,459	36.705	3.868.349	15,77	26,10	76,98
2008	8,266	38.377	3.882.441	16,33	26,11	77,18
2009	7,752	33.400	3.660.407	17,61	24,33	77,39
2010	7,982	33.265	3.845.104	18,65	25,04	77,56
2011	7,574	36.166	3.651.438	19,31	25,16	77,72
2012	7,385	33.750	3.605.501	20,17	24,82	77,87
2013	7,328	35.343	3.615.141	20,82	24,32	78,02
2014	6,959	36.467	3.440.970	21,14	24,59	78,16
2015	7,161	32.180	3.496.505	21,32	24,58	78,30
2016	7,020	33.922	3.527.834	21,20	24,19	78,44
2017	7,019	36.848	3.569.767	21,27	23,98	78,59
2018	6,899	39.617	3.484.542	21,58	23,93	78,74
2019	6,601	38.485	3.484.542	22,45	23,84	78,90

Om te beoordelen welke variabelen het meest invloed hebben op de uitstoot van koolstofdioxide per capita, zijn de waarden van de variabelen gestandaardiseerd. Door de

waarden van de variabelen eerst te standaardiseren kunnen deze onderling beter met elkaar vergeleken en gecombineerd worden. De waarden worden per variabele per land gestandaardiseerd naar een gemiddelde van 0 en een standaarddeviatie van 1. Vervolgens worden de waarden per land voor elk jaar bij elkaar opgeteld en hierover wordt het gemiddelde genomen. Over de gecombineerde en gestandaardiseerde variabelen wordt uiteindelijk een OLS-regressie toegepast, waarvan de resultaten in *Tabel 3* zijn weergegeven. Zoals in sectie ‘2.2 – De determinanten van de uitstoot van broeikasgassen’ is besproken volgt het BBP per capita een Kuznets-curve. Hierom is voor deze variabele ook het kwadratisch verband meegenomen in de OLS-regressie. Een bijkomend voordeel van standaardisatie is dat modellen die gebruik maken van machine learning, zoals een synthetische controle-analyse, efficiëntere en accuratere schattingen kunnen maken wanneer de variabelen een vergelijkbare schaal hebben.

Tabel 3 – OLS-regressie van de gestandaardiseerde determinanten op de gestandaardiseerde uitstoot per capita van koolstofdioxide

	Schatting	Standaardfout	t-waarde	Pr (> t)
(Constate)	0,035	0,028	1,240	0,237
BBP per capita	-0,106	0,050	-2,135	0,052 ⁺
BBP per capita ²	-0,040	0,026	-1,568	0,141
Uiteindelijke energiegebruik	0,327	0,063	5,170	0,000 ^{***}
Aandeel duurzame energie	-0,588	0,101	-5,799	0,000 ^{***}
Aandeel zware industrie	0,096	0,052	1,836	0,089 ⁺
Verstedelijkingsgraad	-0,164	0,131	-1,250	0,233

*** = significant op 0,001, ** = significant op 0,01, * = significant op 0,05 en ⁺ = significant op 0,1

Zoals te zien in *Tabel 3* zijn alleen het uiteindelijke energiegebruik en het aandeel duurzame energie significant op een 5%-niveau, waarbij het uiteindelijke energiegebruik een positieve coëfficiënt heeft en het aandeel duurzame energie een negatieve. Deze variabelen zijn niet enkel significant op een 5%-niveau, maar zelfs op een 0,1%-significantieniveau. Er lijkt dus sterk bewijs te zijn dat hoe hoger het uiteindelijke energiegebruik, hoe hoger de uitstoot van koolstofdioxide per capita. En hoe hoger het aandeel van het uiteindelijke energiegebruik uit duurzame bronnen, hoe lager de uitstoot van koolstofdioxide per capita. Dit betekent echter niet dat deze variabelen in het model meegenomen dienen te worden als voorspellende variabelen.

Het IEA (2021) schrijft dat de uitstoot van koolstofdioxide in een land via een aantal wegen gedrukt kan worden. De twee voornaamste manieren zijn het optimaliseren van productieprocessen en het gebruik van energiezuinige apparaten waardoor het uiteindelijke energiegebruik daalt, en het inzetten op investeringen van zonne- en windenergie waardoor het totale uiteindelijke energiegebruik leidt tot minder uitstoot van broeikasgassen. Het doel van de IJslandse overheid bij de invoering van een koolstofbelasting was om de uitstoot van broeikasgassen te beperken. Dit gebeurt dus door óf een daling van het uiteindelijke energiegebruik óf een toename in het aandeel duurzame energie. Als deze twee variabelen meegenomen zouden worden als voorspellende variabelen wordt een groot deel van het effect van de invoering van een koolstofbelasting gevangen door deze twee variabelen en wordt dus een onnauwkeurige schatting van de behandeling verkregen. In het model dienen deze variabelen dus niet meegenomen te worden. In *Tabel 4* is opnieuw een OLS-regressie over de gestandaardiseerde en gecombineerde variabelen uitgevoerd, waarbij het uiteindelijke energiegebruik en het aandeel duurzame energie zijn weggelaten. De overgebleven variabelen, het BBP per capita in huidige USD, het aandeel zware industrie in een economie en de verstedelijkingsgraad, worden gezien als potentieel voorspellende variabelen.

Tabel 4 – OLS-regressie van de gestandaardiseerde potentieel voorspellende variabelen op de gestandaardiseerde uitstoot per capita van koolstofdioxide

	Schatting	Standaardfout	t-waarde	Pr (> t)
(Constante)	0,096	0,105	0,911	0,377
BBP per capita	-0,071	0,167	-0,428	0,675
BBP per capita ²	-0,111	0,095	-1,177	0,258
Aandeel zware industrie	0,309	0,194	1,590	0,133
Verstedelijkingsgraad	-1,269	0,316	-4,017	0,001**

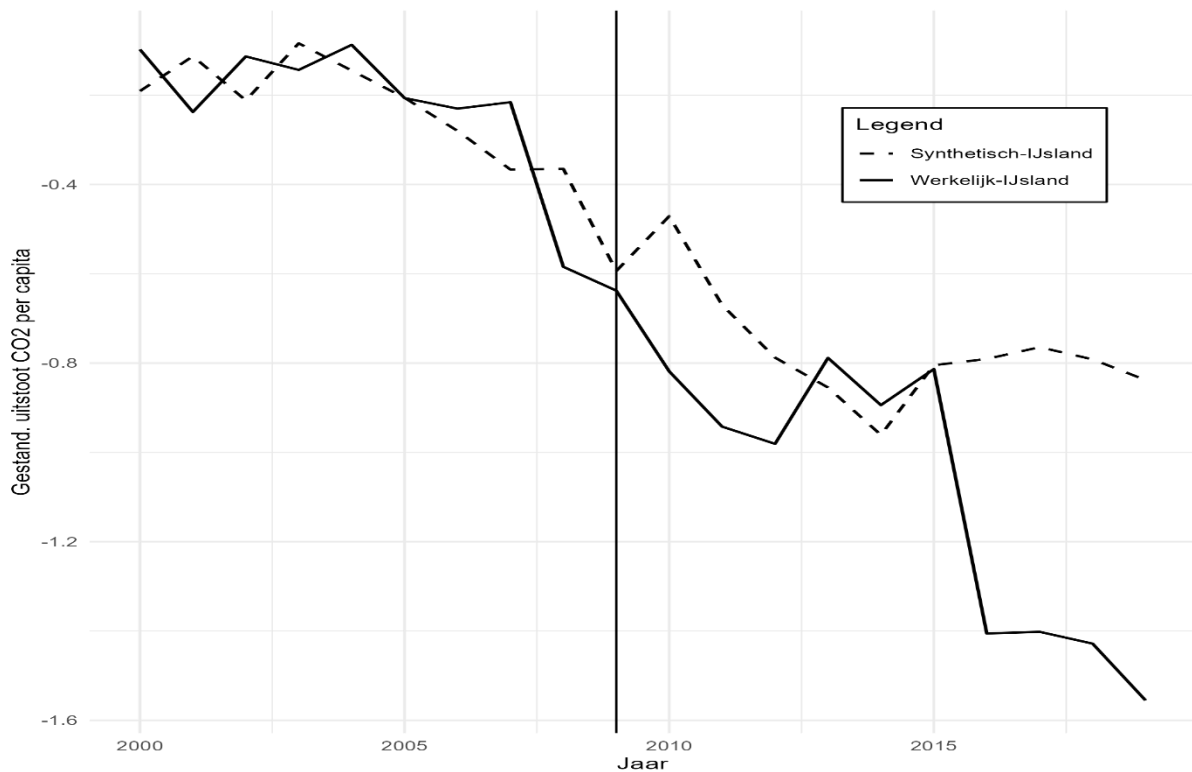
*** = significant op 0,001, ** = significant op 0,01, * = significant op 0,05 en + = significant op 0,1

Uit *Tabel 4* wordt duidelijk dat verstedelijkingsgraad een negatief significant effect heeft op de uitstoot van koolstofdioxide per capita op een 1%-niveau. Dit betekent dat hoe hoger de verstedelijkingsgraad in een land, hoe lager de uitstoot van koolstofdioxide per capita. Deze bevinding ligt in lijn met de literatuur (Aller et al., 2022). Het BBP per capita en het aandeel zware industrie in een economie geven geen significante resultaten. Wel zijn de tekens van de coëfficiënten overeenkomstig met wat de literatuur voorspelt. Het feit dat deze variabelen niet significant zijn, betekent niet dat deze niet meegenomen dienen te worden in de synthetische

controle-analyse. Uit de literatuur beschreven in sectie '2.2 – *De determinanten van de uitstoot van broeikasgassen*' blijkt dat deze variabelen een voorspellende kracht hebben op de uitstoot van koolstofdioxide per capita. De voorspellende variabelen die dus meegenomen worden in het hoofdmodel van deze studie zijn het BBP per capita, het aandeel zware industrie in een economie en de verstedelijkingsgraad.

4. Resultaten

Nu is uitgewerkt uit welke landen de controlegroep bestaat, namelijk België, Duitsland, Hongarije, Italië, Nederland, Slowakije en Tsjechië, en welke voorspellende variabelen meegenomen zullen worden, BBP per capita, het aandeel zware industrie in een economie en de verstedelijkingsgraad, kan de synthetische controleanalyse uitgevoerd worden. Eerst is de data per variabele over alle landen gestandaardiseerd naar een gemiddelde van 0 en een standaarddeviatie van 1. Dit zorgt ervoor dat de voorspellende variabelen een eerlijk gewicht krijgen doordat zij op dezelfde schaal gepresenteerd worden. Ook verbetert standaardisatie de efficiëntie en nauwkeurigheid van machine learning modellen. De resultaten van de synthetische controle-analyse zijn afgebeeld in *Grafiek 2*.



Grafiek 2 – De synthetische controle-analyse, zonder gewichtslimiet

Zoals weergegeven in *Grafiek 2* ligt de waarde van de gestandaardiseerde uitstoot van koolstofdioxide voor werkelijk-IJsland in 2019 op -1,555 standaarddeviaties. Teruggerekend naar de uitstoot per capita van koolstofdioxide in ton CO₂-equivalent is dat 4,54. De berekende waarde voor synthetisch-IJsland in 2019 is -0,838 standaarddeviaties, wat correspondeert met een uitstoot per capita van koolstofdioxide van 6,09 ton CO₂-equivalent. Dit betekent dat door de invoering van een koolstofbelasting de uitstoot per capita van koolstofdioxide in IJsland na

10 jaar 25,4 procent lager ligt dan dat het zou liggen als de overheid de koolstofbelasting niet had ingevoerd. Wel moet opgemerkt worden dat in 2013 tot 2015 de uitstoot per capita van koolstofdioxide van werkelijk-IJsland iets boven de berekende uitstoot per capita van synthetisch-IJsland ligt. Een mogelijke verklaring hiervoor wordt in het hoofdstuk ‘6. *Discussie*’ besproken. In deze synthetische controle-analyse geldt geen gewichtslimiet. De meegegeven optimale gewicht zijn getoond in *Tabel 5*. Hierin staan ook de optimale gewichten voor de synthetische controle-analyse met een gewichtslimiet van 0,5.

Tabel 5 – Berekende gewichten per land voor de synthetische controle-analyses

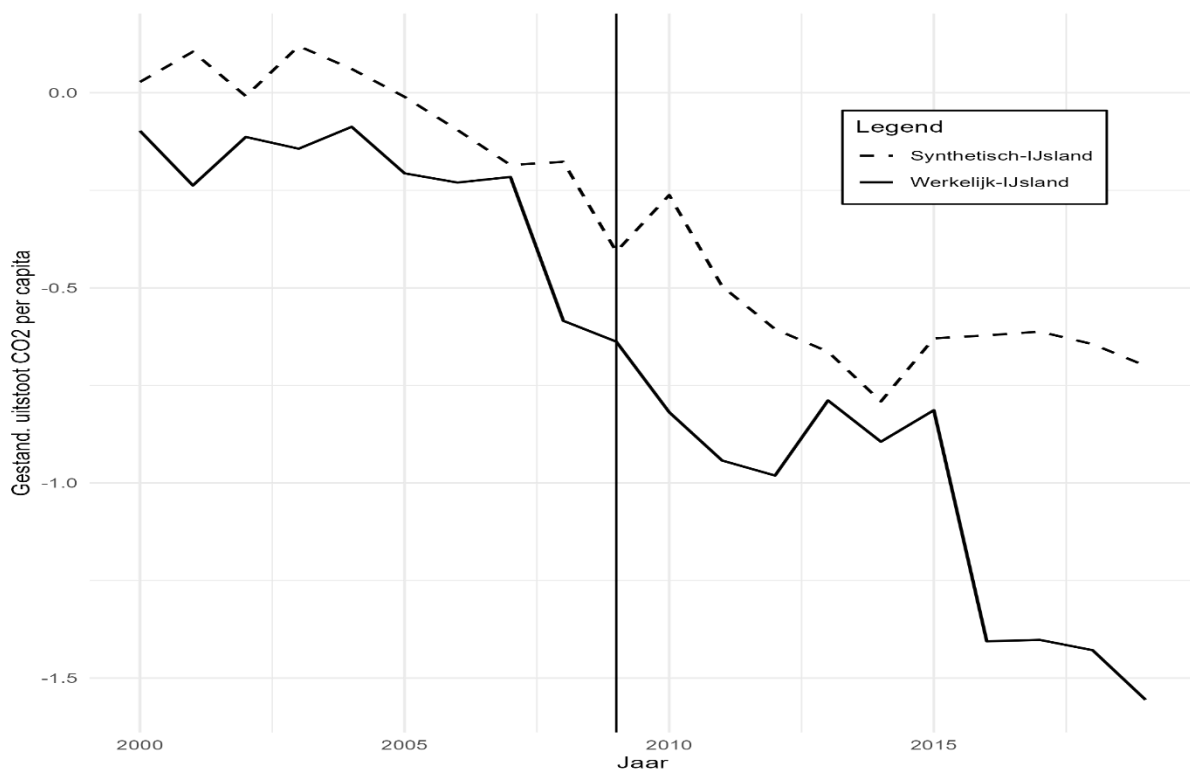
Land	Gewicht per land, zonder gewichtslimiet	Gewicht per land, gewichtslimiet 0,5
België	0,217	0,262
Duitsland	0,000	0,000
Hongarije	0,586	0,500
Italië	0,000	0,000
Nederland	0,197	0,238
Slowakije	0,000	0,000
Tsjechië	0,000	0,000
Totaal	1,000	1,000

In *Tabel 5* is af te lezen dat bij de synthetische controle-analyse zonder gewichtslimiet aan Hongarije het grootste gewicht meegegeven wordt. Dit land is in deze analyse dus erg bepalend voor de berekende trend van synthetisch-IJsland. Ook België en Nederland zijn bepalend voor de trend van synthetisch-IJsland. De andere landen worden niet meegenomen om de trend van synthetisch-IJsland te berekenen. In de volgende synthetische controle-analyse wordt een gewichtslimiet van 0,5 toegepast. De berekende optimale gewichten verschillen iets met die van het hoofdmodel van deze studie. Dit is logisch, daar Hongarije in de eerdere analyse een gewicht van meer van 0,5 heeft meegekregen. Het optimale gewicht van België en Nederland stijgt hierdoor iets. De andere landen die worden meegenomen in de synthetische controle-analyse houden een gewicht van 0.

Vervolgens wordt een test uitgevoerd om de robuustheid van de resultaten te controleren. Hierin wordt eenzelfde synthetische controle-analyse gedaan als eerder, enkel met een gewichtslimiet van 0,5. De nieuwe trend van synthetisch-IJsland loopt vergelijkbaar met de trend van synthetisch-IJsland uit de vorige analyse, al correspondeert deze met iets hogere waarden. Ook valt op dat de pre-behandelingstrend van synthetisch-IJsland reeds boven die van werkelijk-IJsland ligt. In een synthetische controle-analyse moet de pre-behandelingstrend van de synthetische eenheid vergelijkbaar zijn met die van de werkelijke eenheid. Wanneer een

gewichtslimiet toegepast wordt, worden niet de optimale gewichten gebruikt om de trend van synthetisch-IJsland te bepalen. Hierdoor is de schatting minder nauwkeurig en kan het dus zijn dat de pre-behandelingstrend van de synthetische eenheid verschilt met die van de werkelijke. Voor deze robuustheidscheck is het voornamelijk belangrijk dat de gevonden resultaten niet sterk verschillen met de resultaten uit het hoofdmodel van dit onderzoek.

In *Grafiek 3* worden de resultaten van de robuustheidstest getoond. Uit deze grafiek is af te lezen dat de waarde in 2019 van synthetisch-IJsland op $-0,700$ standaarddeviaties ligt, wat correspondeert met een uitstoot per capita van koolstofdioxide in ton CO₂-equivalent van 6,39. Dit zou betekenen dat de invoering van een koolstofbelasting in IJsland na 10 jaar resulteert in een afname van 28,9 procent van de uitstoot per capita van koolstofdioxide wanneer een gewichtslimiet van 0,5 toegepast wordt. De resultaten bij dit gewichtslimiet zijn iets sterker dan de eerder gevonden resultaten. Desalniettemin blijkt uit beide analyses dat het invoeren van een koolstofbelasting een negatief effect heeft op de uitstoot per capita van koolstofdioxide.

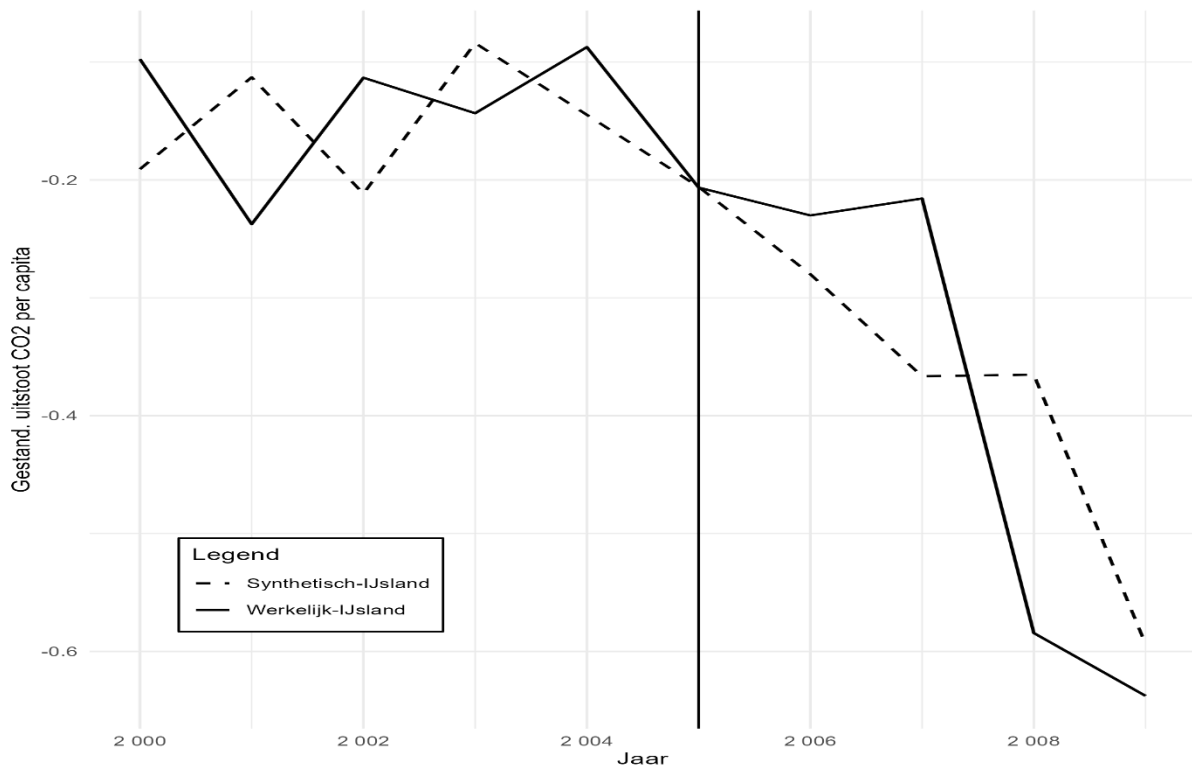


Grafiek 3 – De synthetische controle-analyse, met gewichtslimiet 0,5

De laatste check is een *place-in-time*-analyse en dient om de sensitiviteit van de resultaten te controleren. Deze analyse heeft als doel om te beoordelen in hoeverre het gevonden effect nauwkeurig is. Bij het uitvoeren van de *place-in-time*-analyse wordt de behandelingsperiode artificeel 5 jaar naar voren geplaatst, dus op 1 januari 2005 in plaats van 1 januari 2010.

Vervolgens wordt een synthetische controle-analyse uitgevoerd over de 5 jaar na de behandelingsperiode, dus van 2005 tot en met 2009. De verwachting is dat de trend van werkelijk-IJsland en synthetisch-IJsland erg vergelijkbaar zijn, aangezien de werkelijke behandeling niet heeft plaatsgevonden. De analyse wordt gedaan zonder gewichtslimiet.

In *Grafiek 4* is af te lezen dat de trend van werkelijk-IJsland en synthetisch-IJsland sterk vergelijkbaar zijn. De waarden van beide lijnen na 2005 schommelen steeds om elkaar heen. Dit betekent dat de synthetische controle-analyse een relatief goede schatting kan maken van wat de trend van IJsland zou zijn als deze niet een koolstofbelasting ingevoerd zou hebben. Het gevonden behandelingseffect dat IJsland als gevolg van de koolstofbelasting na 10 jaar 25,4 procent per capita minder koolstofdioxide uitstoot is dus vermoedelijk redelijk nauwkeurig.



Grafiek 4 – De time-in-place synthetische controle-analyse, met gewichtslimiet 0,5

5. Conclusie

De hoofdvraag die centraal stond in deze studie was: ‘Wat is het effect van de invoering van de koolstofbelasting op de uitstoot per capita van koolstofdioxide in IJsland?’. Om deze vraag te kunnen beantwoorden is een kwantitatief onderzoek uitgevoerd aan de hand van een synthetische controle-analyse met voorspellende variabelen. De benodigde gegevens om de hoofdvraag te beantwoorden zijn afkomstig van gerenommeerde data-instituten.

Uit dit onderzoek blijkt dat de belangrijkste determinanten voor de uitstoot per capita van koolstofdioxide in landen het uiteindelijke energiegebruik en het aandeel duurzame energie zijn. Deze variabelen zijn echter de manier waarop de uitstoot van koolstofdioxide per capita in een land wordt beïnvloed en hangen dus samen met de uitkomst. Verstedelijkingsgraad is een belangrijke voorspellende factor van de uitstoot van koolstofdioxide in een land. In mindere mate spelen ook het bruto binnenlands product per capita en het aandeel zware industrie in een economie een rol in de uitstoot van koolstofdioxide per capita.

Met behulp van een groep geschikte controlelanden is een schatting gemaakt van wat de hoogte van de uitstoot per capita van koolstofdioxide in IJsland was geweest wanneer zij de koolstofbelasting niet hadden ingevoerd. De gevonden resultaten in dit onderzoek bevestigen dat, zoals verwacht, het invoeren van een koolstofbelasting zorgt voor een minder hoge uitstoot per capita van koolstofdioxide. Uit het hoofdmodel van deze studie blijkt dat IJsland in 2019 als gevolg van de invoering van deze belasting 4,54 ton CO₂-equivalent heeft uitgestoot in plaats van 6,09 ton CO₂-equivalent, een afname van 25,4 procent.

6. Discussie

Bij het uitvoeren van deze studie is gebruik gemaakt van data van het IEA (2023a, 2023b) en The World Bank (2023a, 2023b). Beide data-instituten staan erg hoog aangeschreven en publiceren betrouwbare databases. De resultaten zijn doormiddel van meerdere robuustheids- en sensitiviteitstesten gecontroleerd. Het gevonden effect bleek aan de hand van deze test een nauwkeurige schatting te zijn van het behandelingseffect. Bij een replicatie van deze studie zullen vermoedelijk vergelijkbare resultaten gevonden worden.

Na het uitvoeren van de synthetische controle-analyse bleek dat de uitstoot per capita van koolstofdioxide in IJsland na 10 jaar ongeveer 25,4 procent lager lag door het invoeren van de koolstofbelasting. Dit resultaat sluit aan bij de verwachting dat een belasting op de uitstoot van broeikasgassen resulteert in een lagere uitstoot van koolstofdioxide. Het was immers het doel van de overheid van IJsland bij het invoeren van een koolstofbelasting om de uitstoot van broeikasgassen te beperken. Wel kende IJsland een hogere uitstoot per capita van koolstofdioxide dan verwacht tussen 2013 en 2015. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de wereldwijde vraag in deze periode naar aluminium sterk steeg als gevolg van het economisch herstel na de financiële crisis van 2008 (Financial Times, 2021). IJsland is een van 's werelds grootste producenten van aluminium (The New York Times, 2017). Om aan deze stijgende vraag te kunnen voldoen werd de productie opgevoerd waardoor de uitstoot per capita van koolstofdioxide steeg. Dit zou een schending van de derde voorwaarde van een synthetische controle-analyse betekenen en een mogelijke verklaring zijn voor de hogere uitstoot in deze periode.

De conclusie uit dit onderzoek sluit deels aan bij de bestaande literatuur. Eerder vond Andersson (2019) een vergelijkbaar effect voor Zweden en Lin en Li (2011) voor Finland. De laatstgenoemden vonden echter ook voor een aantal landen geen significant effect. Het doel van deze studie was om te beoordelen wat het effect van een koolstofbelasting is in een meer recente situatie. Hier was nog weinig onderzoek naar gedaan en daarom is deze studie een aanvulling op de reeds bestaande literatuur.

Een beleidsimplicatie die volgt uit de resultaten is dat het invoeren van een koolstofbelasting door overheden de gevolgen van klimaatverandering kunnen beperken. Deze belasting lijkt een effectieve maatregel te zijn om de uitstoot per capita van koolstofdioxide terug te dringen. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat IJsland een rijk land is waarin reeds

een relatief groot deel van de opgewekte energie uit duurzame bronnen komt. Of het gevonden effect ook geldt voor armere landen of landen waarin een relatief groot deel van de energie afkomstig is van fossiele brandstoffen is lastig te zeggen. Het kan dan ook interessant zijn voor vervolgonderzoek om te bestuderen wat het effect van een koolstofbelasting op de uitstoot van broeikasgassen voor deze landen is.

7. Literatuurlijst

- Agostini, P., Botteon, M., & Carraro, C. (1992). A carbon tax to reduce CO₂ emissions in Europe. *Energy Economics*, *14*(4), 279–290. [https://doi.org/10.1016/0140-9883\(92\)90034-b](https://doi.org/10.1016/0140-9883(92)90034-b)
- Aller, C., Ductor, L., & Grechyna, D. (2021). Robust determinants of CO₂ emissions. *Energy Economics*, *96*, 105154. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105154>
- Andersen, M. S. (2004). Vikings and virtues: a decade of CO₂taxation. *Climate Policy*, *4*(1), 13–24. <https://doi.org/10.1080/14693062.2004.9685507>
- Andersson, J. J. (2019). Carbon Taxes and CO₂ Emissions: Sweden as a Case Study. *American Economic Journal. Economic Policy*, *11*(4), 1–30. <https://doi.org/10.1257/pol.20170144>
- Bellard, C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W., & Courchamp, F. (2012). Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters*, *15*(4), 365–377. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01736.x>
- Boqiang, L., & Liu, K. (2017). Using LMDI to Analyze the Decoupling of Carbon Dioxide Emissions from China’s Heavy Industry. *Sustainability*, *9*(7), 1198. <https://doi.org/10.3390/su9071198>
- Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., . . . Ha, M. (2023). *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J.*

- Romero (eds.)). *IPCC, Geneva, Switzerland*. <https://doi.org/10.59327/ipcc/ar6-9789291691647>
- Cazenave, A., & Cozannet, G. L. (2014). Sea level rise and its coastal impacts. *Earth's Future*, 2(2), 15–34. <https://doi.org/10.1002/2013ef000188>
- De Best-Waldhober, M., Daamen, D., Ramirez, A. R., Faaij, A., Hendriks, C., & De Visser, E. (2012). Informed public opinion in the Netherlands: Evaluation of CO₂ capture and storage technologies in comparison with other CO₂ mitigation options. *International Journal Of Greenhouse Gas Control*, 10, 169–180. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.05.023>
- De Sario, M., Katsouyanni, K., & Michelozzi, P. (2013). Climate change, extreme weather events, air pollution and respiratory health in Europe. *European Respiratory Journal/ The αEuropean Respiratory Journal*, 42(3), 826–843. <https://doi.org/10.1183/09031936.00074712>
- Dietz, T., Shwom, R. L., & Whitley, C. T. (2020). Climate Change and Society. *Annual Review Of Sociology*, 46(1), 135–158. <https://doi.org/10.1146/annurev-soc-121919-054614>
- Dogan, E., & Seker, F. (2016). Determinants of CO₂ emissions in the European Union: The role of renewable and non-renewable energy. *Renewable Energy*, 94, 429–439. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.078>
- EPA. (2024, 11 april). Overview Of Greenhouse Gases. <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>
- Financial Times. (2021). *Aluminium Prices Melt Up On Booming Recovery in Global Economy*. <https://www.ft.com/content/a07c556d-2aa4-4b25-b00f-fdd42a2cf9b8>

- FitzGerald, D. M., Fenster, M. S., Argow, B. A., & Buynevich, I. V. (2008). Coastal Impacts Due to Sea-Level Rise. *Annual Review Of Earth And Planetary Sciences*, 36(1), 601–647. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.35.031306.140139>
- Flavio, R., Miguel, L. J., & Arroyo, M. (2019). The Trends of the Energy Intensity and CO2 Emissions Related to Final Energy Consumption in Ecuador: Scenarios of National and Worldwide Strategies. *Sustainability*, 12(1), 20. <https://doi.org/10.3390/su12010020>
- Frumkin, H., Hess, J., Luber, G., Malilay, J., & McGeehin, M. (2008). Climate change: the public health response. *American Journal Of Public Health*, 98(3), 435–445. <https://doi.org/10.2105/ajph.2007.119362>
- González-Sánchez, M., & Martín-Ortega, J. L. (2020). Greenhouse Gas Emissions Growth in Europe: A Comparative Analysis of Determinants. *Sustainability*, 12(3), 1012. <https://doi.org/10.3390/su12031012>
- Green, J. F. (2021). Does carbon pricing reduce emissions? A review of ex-post analyses. *Environmental Research Letters*, 16(4), 043004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abdae9>
- Hammoudeh, S., Nguyen, D. K., & Sousa, R. M. (2014). What explain the short-term dynamics of the prices of CO2 emissions? *Energy Economics*, 46, 122–135. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2014.07.020>
- Hardy, J. T. (2003). *Climate Change: Causes, Effects, and Solutions*. <http://ci.nii.ac.jp/ncid/BA62526790>
- IEA. (2021). Net Zero By 2050 – Analysis. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- IEA. (2022). About. <https://www.iea.org/about>
- IEA. (2023a). Energy Supply. <https://www.iea.org/countries/iceland/energy-mix>

- IEA. (2023b). Greenhouse Gas Emissions From Energy. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/greenhouse-gas-emissions-from-energy#documentation>
- Köppl, A., & Schratzenstaller, M. (2022). Carbon taxation: A review of the empirical literature. *Journal Of Economic Surveys*, 37(4), 1353–1388.
<https://doi.org/10.1111/joes.12531>
- Kreif, N., Grieve, R., Hangartner, D., Turner, A. J., Nikolova, S., & Sutton, M. (2015). Examination of the Synthetic Control Method for Evaluating Health Policies with Multiple Treated Units. *Health Economics*, 25(12), 1514–1528.
<https://doi.org/10.1002/hec.3258>
- Larsen, B. M., & Nesbakken, R. (1997). Norwegian emissions of CO2 1987–1994. *Environmental & Resource Economics*, 9(3), 275–290.
<https://doi.org/10.1007/bf02441400>
- Lin, B., & Li, X. (2011). The effect of carbon tax on per capita CO2 emissions. *Energy Policy*, 39(9), 5137–5146. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.05.050>
- Liu, Z., Ciaia, P., Deng, Z., Lei, R., Davis, S. J., Feng, S., Zheng, B., Cui, D., Dou, X., Zhu, B., Guo, R., Ke, P., Sun, T., Lu, C., He, P., Wang, Y., Yue, X., Wang, Y., Lei, Y., . . . Schellnhuber, H. J. (2020). Near-real-time monitoring of global CO2 emissions reveals the effects of the COVID-19 pandemic. *Nature Communications*, 11(1).
<https://doi.org/10.1038/s41467-020-18922-7>
- McGranahan, G., Balk, D., & Anderson, B. (2007). The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. *Environment And Urbanization*, 19(1), 17–37. <https://doi.org/10.1177/0956247807076960>
- OECD. (2021). Addressing Climate Change. <https://www.oecd-ilibrary.org/sites/510d93b0-en/index.html?itemId=/content/component/510d93b0->

- Uçak, H., Aslan, A., Yucel, F., & Turgut, A. (2014). A Dynamic Analysis of CO₂Emissions and the GDP Relationship: Empirical Evidence from High-income OECD Countries. *Energy Sources. Part B, Economics, Planning, And Policy/Energy Sources. Part B, Economics, Planning And Policy*, *10*(1), 38–50.
<https://doi.org/10.1080/15567249.2010.514586>
- Wang, Q., Feng, G., Wang, H., & Chang, C. (2022). The influence of political ideology on greenhouse gas emissions. *Global Environmental Change*, *74*, 102496.
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2022.102496>
- Wang, Y., Chen, W., Kang, Y., Li, W., & Guo, F. (2018). Spatial correlation of factors affecting CO₂ emission at provincial level in China: A geographically weighted regression approach. *Journal Of Cleaner Production*, *184*, 929–937.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.002>
- Wheeler, T., & Von Braun, J. (2013). Climate Change Impacts on Global Food Security. *Science*, *341*(6145), 508–513. <https://doi.org/10.1126/science.1239402>
- Wuebbles, D. J., & Jain, A. K. (2001). Concerns about climate change and the role of fossil fuel use. *Fuel Processing Technology*, *71*(1–3), 99–119.
[https://doi.org/10.1016/s0378-3820\(01\)00139-4](https://doi.org/10.1016/s0378-3820(01)00139-4)
- Yang, D., & Timmermans, H. (2012). Effects of Fuel Price Fluctuation on Individual CO₂ Traffic Emissions: Empirical Findings from Pseudo Panel Data. *Procedia: Social & Behavioral Sciences*, *54*, 493–502. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.767>