

Arbejdsrapport 85

Den klimaøkonomiske forskning: Kan resultaterne fra DICE guide klimapolitikken?

Line Andersen

Juni 2025

Den optimale pris på drivhusgasudledninger bør svare til de marginale globale skadevirkninger. Den klimaøkonomiske model DICE, senest opdateret i 2023, estimerer denne til 450-1.100 kr./ton CO₂e. Dette arbejdsrapport konkluderer, at på trods af usikkerheder kan klimaøkonomiske modeller bruges til at guide klimapolitikken, da de giver en indikation af om klimapolitikken står mål med de globale skadevirkninger.

Kontakt

Line Andersen

Økonom, CEPOS

line@cepos.dk

CEPOS

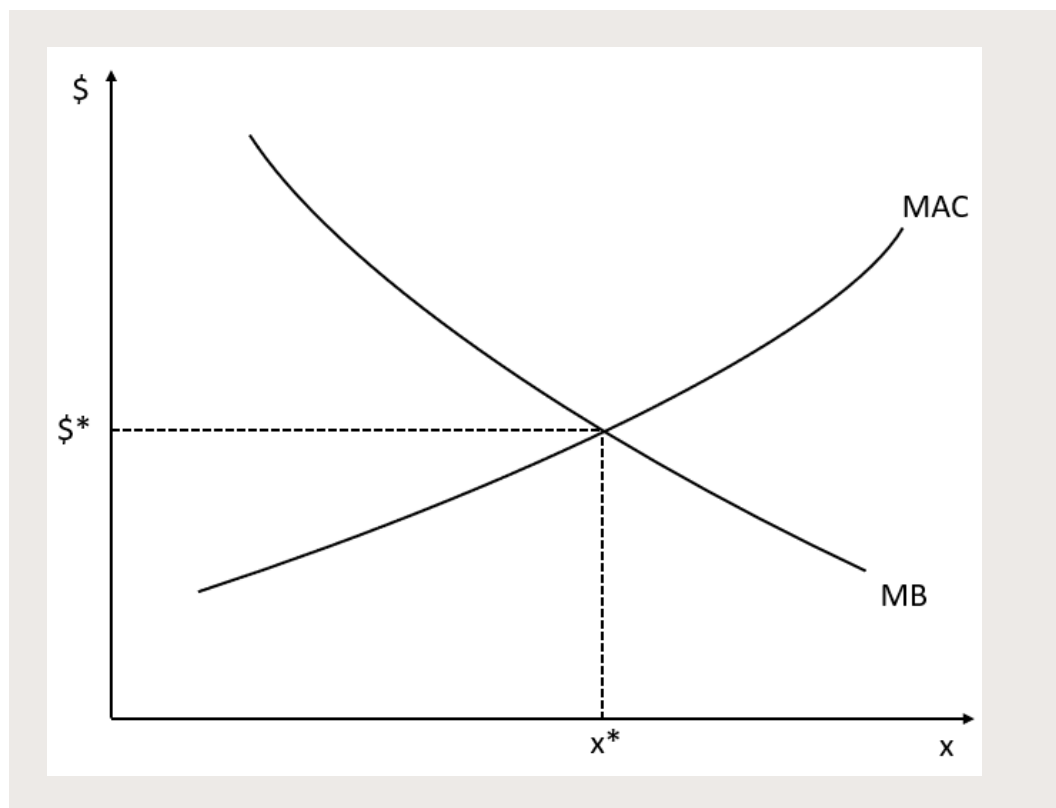
Indledning

Det indledende arbejde med at estimere en samfundsmæssig optimal CO₂e-pris startede i 1970'erne, og i 1992 blev den første klimaøkonomiske model, Dynamic Integrated Climate-Economy (DICE), introduceret af William D. Nordhaus. Modellen har blandt andet til formål at estimere en optimal CO₂e-pris. Modeller som DICE har mødt en del kritik, blandt andet for ikke at beskrive klimasystemet og risikoen for såkaldte vippepunkter tilstrækkeligt. Modellerne er dog løbende blevet revideret. DICE-2023 er den seneste version, hvor blandt andet klimasystemet og modellering af vippepunkter er blevet opdateret. Med DICE-2023 estimeres den optimale CO₂e-pris til 450-1.100 kr./ton CO₂e. På trods af usikkerheder i modellens resultater kan modeller som DICE være nyttige til at guide klimapolitikken, da resultaterne giver en indikation af om klimapolitikken står mål med de globale skadevirkninger.

Hvordan en omkostningseffektiv klimapolitik opnås, findes der et kort og simpelt svar på: Det kræver en ensartet CO₂e-pris på tværs af geografi, sektorer og anvendelse svarende til den globale skadevirkning på marginalen. Denne indsigt bygger på, at en negativ eksternalitet leder til suboptimale velfærdsniveauer, fordi den enkelte forurener ikke i tilstrækkelig grad tager højde for de skadevirkninger, som udledning af drivhusgasser medfører. En CO₂e-pris svarende til skadevirkningen på marginalen kan dermed i teorien bruges til at øge den samlede velfærd i samfundet, da den eksterne skadevirkning internaliseres i forurenerens beslutning. Hvorfor en CO₂e-pris vil være mest effektiv er beskrevet i Brøns-Petersen (2025).

Konklusionen har rødder helt tilbage til Pigou (1920). Figur 1 illustrerer den grundlæggende logik bag. Niveauet for reduktion af drivhusgasser er på x-aksen, mens prisen på udledninger er på y-aksen. MAC er de marginale reduktionsomkostninger ved drivhusgasudledninger, mens MB er de marginale gevinster ved drivhusgasreduktioner. Det optimale niveau for udledningskontrol findes, hvor MAC=MB. Her er den optimale CO₂e-pris, i en markedsøkonomi uden andre markedsfejl, \$*.

Figur 1

Det sociale optimale niveau for drivhusgasudledningskontrol

Kilde: Egen illustration baseret på Hanley, N., Shogren, J. F., & White, B. (2007)

Hvad niveauet for en sådan CO₂e-pris i praksis bør være, er derimod langt mindre simpelt at give et svar på. Arbejdet med at estimere en CO₂e-pris begyndte allerede tilbage i 1970'erne. På det tidspunkt var der blandt forskere inden for naturvidenskaben et stigende fokus på sammenhængen mellem afbrænding af fossile brændstoffer og global opvarmning, som kunne medføre en række skader. I den forbindelse påbegyndte William D. Nordhaus sit omfattende arbejde med at modellere samspillet mellem økonomien og klimaforandringer. Dette arbejde har vist sig så betydningsfuldt, at det i 2018 førte til, at Nordhaus modtog Nobelprisen i økonomi (Nobel Prize Outreach AB, 2018).

I 1990'erne introducerede Nordhaus som den første en integrated assessment model (IAM), der kobler naturvidenskabelige og økonomiske indsigter. En IAM beskriver det komplekse globale samspil mellem økonomien og klimaet. Således blev DICE (Dynamic Integrated Climate-Economy)-modellen introduceret i Nordhaus (1992). Sidenhen er en bred vifte af IAMs anvendt til at forstå samspillet mellem samfundet og eksempelvis klimaets udvikling.

Den grundlæggende logik i Integrated Assessment Models

Den grundlæggende logik i IAMs er, at drivhusgasudledninger fører til højere koncentration af drivhusgasser i atmosfæren, som igen medfører global opvarmning, hvilket resulterer i økonomiske skader. IAMs har rødder i Robert Solows vækstmodel¹. En klimaøkonomisk IAM muliggør, at klimaforandringer og den samlede økonomi kan analyseres ud fra et cost-benefit perspektiv (Nobel Prize Outreach AB, 2018).

Der findes en række IAMs, herunder DICE, FUND (The Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution) og PAGE (Policy Analysis of Greenhouse Effect) m.fl. IAMs kan opdeles i to klasser: politikoptimerings- og politikevalueringsmodeller. DICE er primært designet til politikoptimering, men kan også anvendes som politikevalueringsmodel (Barrage og Nordhaus 2024).

DICE-modellen integrerer økonomien og klimasystemet. Verdensøkonomien er repræsenteret gennem en klassisk Ramsey-model, hvor væksten drives af kapitalakkumulation og eksterne teknologiske fremskridt, der løbende øger totalfaktorproduktiviteten. Klimasystemet er modelleret med det formål, at den i en forenklet form søger at efterligne resultaterne fra store, detaljerede klimamodeller (Sørensen, 2018). Det betyder, at IAMs forsøger at beskrive sammenhængen mellem udledninger og klimaforandringer, uden at skulle inkludere alle detaljer fra de store klimamodeller (Nordhaus, 2013). Uden denne simplificering, ville det være stort set umuligt at bruge modellerne til politikanalyse ved at beregne optimale og alternative scenarier. Ikke desto mindre understreger Nordhaus, at man bør undgå simplificeringer, der fører til uhensigtsmæssige konklusioner (Nobel Prize Outreach AB, 2018).

DICE-modellen indeholder to væsentlige omkostningsfunktioner. Den første er reduktionsomkostningsfunktionen, hvor de marginale omkostninger ved at reducere CO₂e-udledningen per produceret enhed stiger, jo større indsatsen er. Den anden er skadeomkostningsfunktionen, som angiver omfanget af skader, omregnet til andel af det globale output, der går tabt, som følge af de skader, klimaforandringer forårsager (Sørensen, 2018).

Med en IAM, som DICE, undersøges, hvad den cost-benefit-optimale temperaturstigning vil være. Det gøres ved at beregne, hvilken temperaturmålsætning der minimerer den diskonterede sum af reduktionsinvesteringer og skader fra klimaforandringer. Det svarer til at vælge en politik, der maksimerer nettofordelene (Nordhaus, 2013).

Økonomiske skader som følge af klimaforandringer

Økonomiske skader som følge af klimaforandringer dækker over både markedsmæssige og ikke-markedsmæssige klimaskader og omregnes til andelen af globalt output.

Markedsmæssige klimaskader dækker over en række sektorer, herunder eksempelvis landbrug, skovbrug og fiskeri. Her undersøges ændringer i udbytte fra afgrøder samt ændringer i fiskebestanden som følge af klimaforandringer. Derudover estimeres det, hvordan kystzoner påvirkes af stigninger i havniveauet og skader fra stigninger i hyppigheden af højintensive orkaner mm. (Dellink m.fl., 2019). Ikke-markedsmæssige klimaskader dækker blandt andet over områder som sundhed og biodiversitet. Eksempelvis dækker Dellink m.fl. (2019) effekter, som ændringer i dødelighed og sygelighed ved klimarelaterede sygdomme.

Ifølge Hassler m.fl. (2024) er der to nyere metastudier, der opsamler resultater fra studier, der aggregerer klimaøkonomiske skader. Det er af hhv. Howard og Sterner (2017) samt af Nordhaus og Moffat (2017)². Skadesfunktionen fra Nordhaus og Moffat (2017) er senere blevet opdateret i Barrage og Nordhaus (2024).

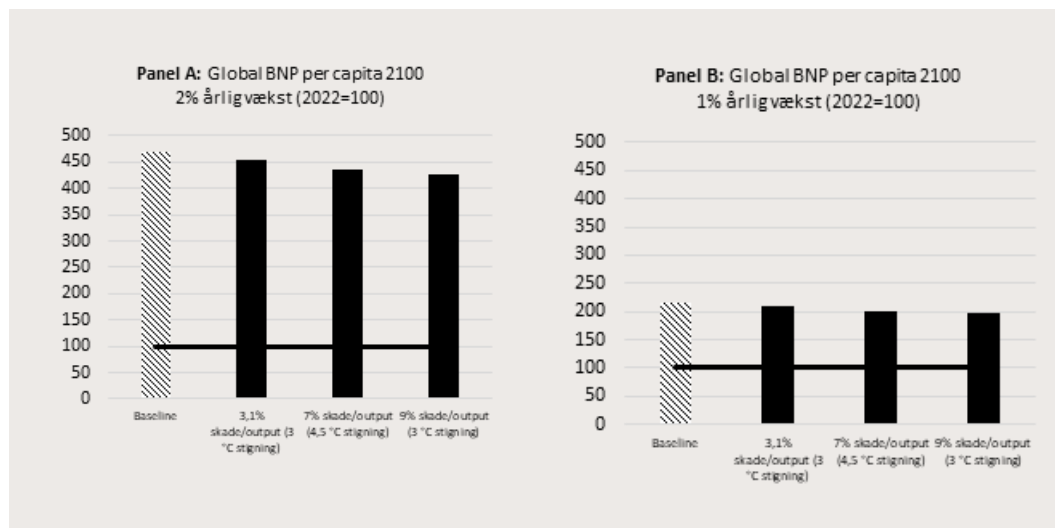
Der er stort overlap mellem de studier, der anvendes i de to metastudier. Alligevel er der betydelig forskel på det estimerede niveau af klimaskader ved temperaturstigninger. Howard og Sterner (2017) introducerer en række specifikationer til at undersøge sammenhængen mellem temperaturstigninger og klimaskader. Barrage og Nordhaus (2024) vurderer, at et rimeligt mellemestimat for Howard og Sterner (2017)s foretrukne estimater er, at en temperaturstigning på 3 °C medfører skadesomkostninger svarende til 9 pct. af globalt output³. Til sammenligning anvendes i Barrage og Nordhaus (2024) en skadesfunktion, der estimerer, at en temperaturstigning på hhv. 3 °C og 4,5 °C medfører skadevirkninger svarende til 3,1 pct. og 7,0 pct. af globalt output.

Howard og Sterner (2022) har undersøgt, hvad der driver forskellene i Howard og Sterner (2017) samt af Nordhaus og Moffat (2017). Howard og Sterner (2022) finder, at forskellene stammer fra forskelle i metodiske og subjektive beslutninger. Hvilken skadesfunktion der er mest retvisende, ligger uden for denne artikels rammer.

Selvom skadesomkostningerne estimeres til at være tre gange højere i Howard og Sterner (2017) end i Barrage og Nordhaus (2024) illustrerer figur 2, at det der har størst betydning for velstandsniveauet i år 2100 er vækstraten per capita fremfor niveauet for skadesomkostninger i hhv. Howard og Sterner (2017) og Barrage og Nordhaus (2024) (panel A vs. panel B).

Figur 2

Velstandsniveauet i år 2100 under forskellige vækstsценарier og klimaskader



Kilde: Egne beregninger baseret på World Bank og med mindre bearbejdning af Our World in Data (2023), Howard og Sterner (2017) samt Barrage og Nordhaus (2024).

De sribede søjler (baseline) i figur 2 illustrerer, hvad velstandsniveauet i år 2100 ville være under de angivne vækstforudsætninger, hvis klimaforandringer ikke havde indflydelse på velstandsniveauet. Selvom det ikke er realistisk, tjener søjlen det formål at illustrere, i hvilket omfang klimaforandringer ventes at påvirke velstandsniveauet. Den horisontale linje indikerer velstandsniveauet i dag (2022-BNP per capita). Figur 2 illustrerer, at velstandsniveauet i år 2100 vil være markant højere end i dag, også med klimaforandringer (Panel A og B) og selv meget lave vækstrater (panel B).

Reduktionsomkostninger for at begrænse temperaturstigninger

Hvert ton CO₂e, der skal reduceres, kommer med en omkostning (MAC i figur 1). Omkostningerne består i, at samfundet skal begrænse drivhusgasintensive aktiviteter, producere varer og tjenester med lav eller ingen klimabelastning samt fjerne allerede udledte drivhusgasser fra atmosfæren (Nordhaus, 2013).

Opgørelsen af reduktionsomkostninger bygger blandt andet på skøn for omkostningerne ved et sæt teknologier, som sol- eller vindenergi, sikker atomkraft eller en endnu ikke opdaget kilde, der fuldt kan erstatte alle fossile brændstoffer – en såkaldt 'backstop-teknologi'. Omkostningerne ved backstop-teknologien antages at være høj på kort sigt, men faldende over tid som følge af teknologisk udvikling (Barrage og Nordhaus, 2024). I Barrage og Nordhaus (2024) antages det, at omkostningerne til backstop-teknologien falder med 1 pct. om året fra 2020 til 2050 og 0,1 pct. om året derefter. I DICE modelleres reduktionsomkostningerne, så de marginale reduktionsomkostninger ved en kontrolrate⁴ på 100 pct. er lig med backstop prisen (ibid.).

Social Cost of Carbon

Når man har stier for økonomiske skader samt reduktionsomkostninger ved at begrænse temperaturstigninger, er det muligt at beregne the Social Cost of Carbon (SCC) som er et udtryk for den diskonterede værdi af en ændring i forbrug forårsaget af udledning af et ekstra ton CO₂e. I fraværet af øvrige markedsfejl vil SCC svare til Pigouskatten: den optimale pris på drivhusgasudledninger (MAC=MB i figur 1). Derfor er SCC et nøglebegreb inden for klimaøkonomi, da den beskriver den cost-benefit optimale CO₂e-pris ud fra et globalt velfærdsperspektiv. Alternativt kan SCC også beregnes for politisk besluttede scenarier, som eksempelvis en målsætning om, at den globale temperaturstigning ikke må overstige 2 °C.

Estimer for SCC er som regel stigende over tid. Ligesom prisen på andre udtømmelige naturressourcer, som begrænset plads i atmosfæren er, skal SCC vokse med renten, for at nutidsværdien er konstant over tid. Dermed opnås en optimal allokering af udledninger over tid.

Resultaterne fra DICE-modellen, herunder cost-benefit optimale temperaturstigninger og estimer for SCC, er under antagelse om en effektiv implementering af en CO₂e-afgift og fuld deltagelse fra alle lande. Ifølge Nordhaus (2018b) vil realistiske antagelser om politikker og deltagelse derimod øge omkostningen ved grøn omstilling betydeligt. Eksempelvis illustrerer Nordhaus (2013), at ved lavere deltagelsesrater vil det omkostningsminimerende temperaturmål være højere end under fuld deltagelse.

Kritik og udvikling af Integrated Assessment Models

Siden den første DICE-model blev introduceret i 1992 har modellen været under en lang række revisioner (Nordhaus, 2017). På tidspunktet for tildelingen af Nobelprisen til Nordhaus i 2018 var den nyeste kalibrering af DICE-modellen DICE-2016R2. I standardkalibreringen var SCC estimeret til \$30 per ton CO₂e for udledninger i 2015 (2010-priser), svarende til omtrent 200 kr. (2024-priser). I denne standardkalibrering ville det være optimalt at acceptere en stigning i den globale gennemsnitstemperatur på 4,1 °C frem mod år 2100 (Nordhaus, 2018a)⁵.

Der har igennem tiden været rejst en del kritik af DICE-modellen. Pindyck (2013;2017) har været en skarp kritiker af IAMs, som DICE-modellen, ved grundlæggende at argumentere for, at IAMs er ubrugelige som værktøjer til politisk analyse. Kritikken går blandt andet på; at diskonteringsrenten er vilkårlig, da økonomer ikke er enige om niveauet for denne, men at den har meget stor indflydelse på modellens estimer for SCC; at der er usikkerhed om klimasensitiviteten, dvs. hvor meget temperaturen stiger som følge af en fordobling af koncentrationen af CO₂e i atmosfæren; at skadesfunktionen skulle være arbitrært udledt, da der ikke findes teori og data, den kan udledes fra; at IAMs ikke kan sige noget om sandsynligheden eller den forventede effekt af eksempelvis meget høje temperaturstigninger. Samlet set kritiserer Pindyck, at IAM-baserede analyser oversælger validiteten af modellerne, som kan betyde, at beslutningstagere misledes.

Hvilken diskonteringsrente bør anvendes ved evaluering af klimapolitik?

Den anvendte diskonteringsrente har stor indflydelse på SCC og har givet anledning til betydelige diskussioner i litteraturen.

Diskonteringsrenten anvendes til at sammenligne nutidige og fremtidige værdier. En lav diskonteringsrente medfører, at fremtidige værdier vægtes tættere på nutidige værdier end det gøres ved en højere diskonteringsrente.

I DICE-modellen anvendes som udgangspunkt en diskonteringsrente, der svarer til det observerede gennemsnitlige afkast af kapital. I DICE-2016 anvendes en diskonteringsrente på omtrent 5 pct. på kort sigt (Nordhaus, 2018a).

I kontrast hertil argumenterer eksempelvis Stern (2006)⁶, at det er uetisk at tillægge fremtidige generationers velfærd en lavere vægt end deres egen velfærd. Derfor antager Stern (2006) meget lave diskonteringsrenter i sin analyse af klimaspørgsmålet.

Ifølge Becker m.fl. (2011) er valget om diskonteringsrenten ikke et filosofisk spørgsmål om, hvad den korrekte etiske vægt er at placere på fremtidige generationer, ligesom det heller ikke er et spørgsmål om, at man "bør" diskontere fremtidige generationers indkomst, fordi de vil være rigere end i dag- det handler derimod om

alternativomkostninger. Derfor argumenterer Becker m.fl. (2011) for, at den anvendte diskonteringsfaktor som udgangspunkt bør svare til markedsrenten. Det skyldes, at investeringer eksempelvis i at begrænse global opvarmning, konkurrerer med andre investeringsalternativer, som kan bruges til at efterlade arv til kommende generationer. Da andre investeringer afkaster en markedsrente, bør også klimainvesteringer kunne bære en tilsvarende forrentning – ligegyldig om disse klimainvesteringer kun er gennemført i kommende generationers interesse. Ved opsparing bør man altså vælge den investering, der kan forrente det højeste afkast. Fremtidige generationer bliver ikke bedre stillet af, at der i dag investeres i lav-afkasts projekter.

Så længe markedsafkastet repræsenterer alternativomkostningen ved investeringen, bør klimainvesteringer diskonteres med markedsrenten. Men klimainvesteringer kan formentlig ikke fuldt ud substitueres med øvrige kapitalinvesteringer, der forrentes med markedsrenten. Et varmere klima kan formentlig ikke fuldt opvejes af investeringer i kapital i øvrigt. Der er derfor argumenter for at anvende en anden diskonteringsrente til klimainvesteringer end markedsrenten. Det kan være en indikation af, at de tidligere DICE-modeller har anvendt en for høj diskonteringsrente, hvis der er begrænset substitution, hvorimod den ikke kan anfægtes på et rent etisk grundlag.

Modellering af klimasystemet og skadesfunktionen

Nordhaus (2014) beskriver, ligesom Pindyck (2013;2017), at der er usikkerhed forbundet med klimasensitiviteten, som indgår i modelleringen i DICE.

Nordhaus m.fl. har forsøgt at modellere klimasystemet i DICE således, at temperatureffekten af en højere koncentration af CO₂e i atmosfæren nogenlunde svarer til den i de store klimamodeller, der anvendes i klimavidenskaben (Sørensen, 2020). Dietz m.fl. (2021a) viser, ved at sammenligne med FAIR (Finite Amplitude Impulse Response)-modellen⁷, at DICE-2016 ikke lykkes med det. Eksempelvis slår en højere CO₂e-koncentration meget langsommere igennem på temperaturen i DICE end i nyere klimamodeller. Derudover tager DICE-2016 heller ikke højde for, at højere temperaturer mindsker havenes og biosfærens evne til at optage CO₂e fra atmosfæren, hvilket skaber såkaldte positive feedback-effekter. Dietz m.fl. (2021a) finder, at disse skævheder fører til at SCC undervurderes. Derfor anbefaler Dietz m.fl. (2021a) at klimamodulerne i økonomiske klimamodeller, som DICE, opdateres til blandt andet at inkorporere positive feedback-effekter, som FAIR gør.

Howard og Sterner (2017) anerkender Pindycks (2013) synspunkt om, at det er særdeles vanskeligt at vurdere skaderne fra hidtil usete klimaforandringer, hvilket gør dem fundamentalt ukendte. Ikke desto mindre argumenterer Howard og Sterner (2017) for, at det er værdifuldt at forsøge at kvantificere disse skader, trods betydelige udfordringer.

Katastrofale hændelser med lav sandsynlighed

DICE-modellen er også blevet kritiseret for ikke at tage hensyn til de store usikkerheder om virkningerne af drivhusgasudledninger, herunder risikoen for vippepunkter⁸. Overskrides et vippepunkt i jordens klimasystem, kan klimaforandringerne forstærkes og

dermed accelerere opvarmning og forværre konsekvenserne ved klimaforandringer (Richardson, 2021).

Weitzman (2009;2014) argumenterer for, at usikkerhed om risikoen for lav-sandsynligheds katastrofale hændelser fører til såkaldte 'tykke' haler i tæthedsfunktion. Det implicerer, at der er relativt højere risiko for sjældne hændelser end i en 'tyndhalet' tæthedsfunktion. Derfor mener Weitzman (2009;2014) ikke, at standardøkonomisk analyse kan anvendes og at katastrofale hændelser med lav sandsynlighed derfor bør styre klimapolitikken.

Selvom Nordhaus (2009) mener, at Weitzman rejser en relevant kritik om valg af sandsynlighedsfordelinger under usikkerhed, mener Nordhaus (2009) ikke, at det giver anledning til, at standardøkonomisk analyse ikke kan anvendes. Da der kun er sparsom evidens fra klimahændelser, undersøger Nordhaus (2012) historiske økonomiske katastrofer, der kan betragtes som analoger til økonomiske konsekvenser af klimahændelser. Nordhaus (2012) finder dog ikke empirisk bevis for forekomsten af tykke haler.

Nordhaus (2009) fremhæver, at der findes mange potentielle, katastrofale hændelser med lav risiko, der ikke er begrænset til klimaområdet. Her fremhæves bioteknologi, strangelets, løsslupne computersystemer, spredning af atomvåben, uregerligt ukrudt og insekter, nanoteknologi, nye tropiske sygdomme, rumvæsener, asteroider, slavebinding af avancerede robotter osv.

Martin og Pindyck (2015) finder, at hvis samfundet står over for flere forskellige potentielle katastrofale hændelser, bør der tages højde for både antallet og deres indbyrdes afhængig, når politik, der har til formål at undgå eller reducere sandsynligheden for sådanne hændelser formuleres. Det kan betyde, at det ikke er optimal politik at sætte ind mod alle risici, ligesom det kan tale for ikke at sætte ind i et omfang som en isoleret cost-benefit-analyse tilsiger. Det kan tale for ikke, at lade katastrofale klimahændelser med lav sandsynlighed styre klimapolitikken.

Det er dog klart, at hvis der ikke tages højdes for potentielle vippepunkter vil DICE undervurdere den nødvendige klimainsats. At kunne modellere vippepunkter forudsætter, at man kender sandsynligheden for at udløse et vippepunkt ved en given temperaturstigning samt hvordan forskellige vippepunkter interagerer med hinanden. Det er der stor videnskabelig usikkerhed forbundet med. Lemoine og Traeger (2016) finder med DICE-2007, at inklusion af tre forskellige vippepunkter næsten fordobler SCC. Dietz m.fl. (2021b) finder, at SCC øges med 25 pct., når en række vippepunkter modelleres i en meta-analytisk IAM, der sammenfatter den litteratur, der undersøger enkelte vippepunkter i en given IAM. Mere viden om vippepunkter ser derfor ud til at øge SCC.

DICE-2023

I Barrage og Nordhaus (2024) introduceres den seneste DICE-model: DICE-2023. Modellen har undergået en række større revisioner, der imødekommer noget af den kritik, der har været af modellen. Ændringerne betyder eksempelvis at temperaturstigningen ved det

cost-benefit optimale scenarie er noget lavere end i tidligere opgørelser med DICE-modellen.

Ifølge Barrage og Nordhaus (2023) er der fire store ændringer i DICE-2023. Den mest betydningsfulde revision er opdaterede kulstof- og klimakredsløb. I DICE-2023 integreres DFAIR, som er DICE versionen af FAIR-modellen, som anbefalet af Dietz m.fl. (2021a). Barrage og Nordhaus (2023) beskriver, at DFAIR løser problemet med for stor træghed i global opvarmning som følge af drivhusgasudledninger ved tidligere udgaver af DICE. Samlet set vurderes DFAIR at fungere tilfredsstillende. Modulet giver dog en mindre underforudsigelse af atmosfæriske koncentrationer på kort sigt, samt nogle mindre forskelle fra de fulde jordsystemmodeller. Barrage og Nordhaus (2023) vurderer dog at indflydelsen er minimal og opfordrer til yderlige forskning for øvrige forbedringer.

En anden metodisk ændring i DICE-2023 er behandlingen af diskontering. Tidligere har diskonteringsrenten i DICE været bestemt af det observerede gennemsnitlige afkast af kapital, uden eksplicit at tage højde for om klimainvesteringer kan substitueres med øvrige kapitalinvesteringer. I DICE-2023 justeres diskonteringsrenten på klimainvesteringer, for at reflektere, at klimainvesteringer kan have en anden risikoprofil end konventionelle investeringer. Det gøres ved at introducere et klimabeta på 0,5 fra Dietz m.fl. (2018). Derudover indarbejdes et skøn for forsigtighedseffekten på grund af usikkerhed om fremtidig vækst. På baggrund af revisionerne anvendes i DICE-2023 en diskonteringsrente på 4,5 pct./år på kort sigt mod 5 pct./år i DICE-2016, og betydeligt lavere på længere sigt.

En tredje større ændring i DICE-2023 er en række opdateringer af skadesfunktionen. For det første udvides den estimerede skadesfunktion i Nordhaus og Moffat (2017) med nyere studier af de globale skadevirkninger af klimaforandringer baseret på et review af Piontek (2021). Derudover tilføjes en komponent til at tage højde for vippepunkter baseret på resultaterne i Dietz m.fl. (2021b). En tredje ændring er, at forfatterne tilføjer en skønnet komponent for at afspejle ikke-monetariserede virkninger. Dette skøn skal afspejle manglende sektorer, virkninger af klimaforandringer, der endnu ikke er pålideligt kvantificeret i litteraturen, usikkerhed og nyere forskning der endnu ikke er afspejlet i forfatterens syntese af de samlede skadesestimater. Den opdaterede skadesfunktion estimerer skadevirkninger ved globale temperaturstigninger på 3 °C til 3,1 pct. af globalt output. Det er højere end det tilsvarende estimat på 1,6 pct. i DICE-2016.

En fjerde større ændring i DICE-2023 er, at det i modellen nu er muligt at reducere andre drivhusgasser end industriel CO₂ i modellen. Det betyder, at modellen kan håndtere, at CO₂e fra arealanvendelse og andre udledninger også kan reduceres. Dermed kan 95% af udledningerne håndteres i DICE-2023. I DICE-2016 var den tilsvarende andel 80%.

Således har Barrage og Nordhaus (2024) imødekommet en række af de kritikpunkter, der har været af DICE-modellen.

Indsigter fra den klimaøkonomiske videnskab

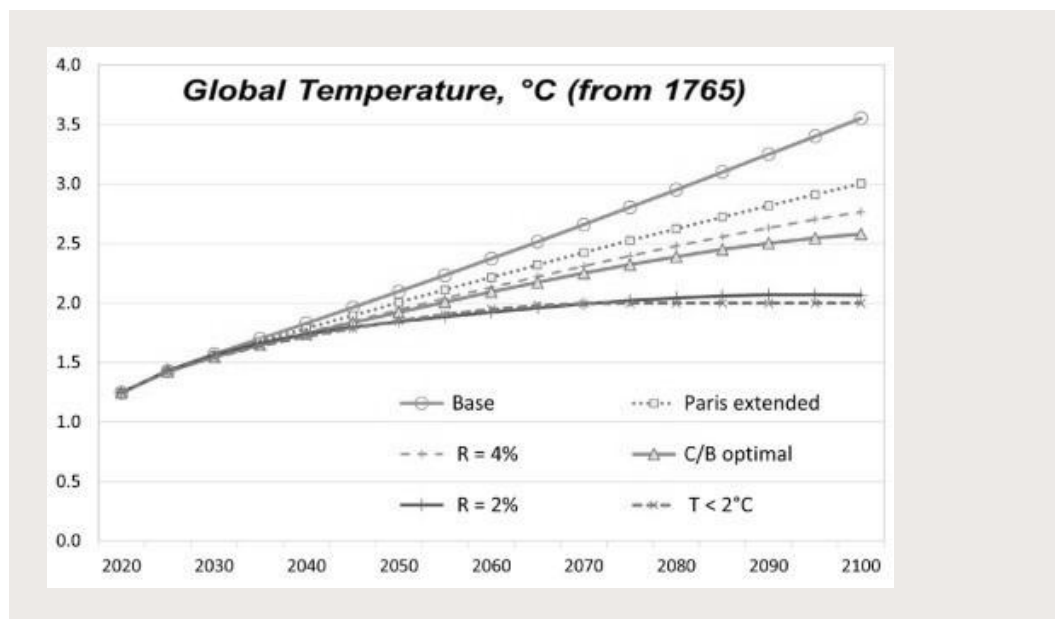
Scenarier i Barrage og Nordhaus (2024)

Barrage og Nordhaus (2024) præsenterer resultater fra DICE-2023 for en række scenarier.

I det cost-benefit-optimale scenarie (C/B optimal) maksimerer klimapolitikken den økonomiske velfærd i henhold til principperne for cost-benefit-analyse, med fuld deltagelse af alle nationer fra 2025. I et temperaturbegrænset scenarie, $T < 2^\circ\text{C}$ ($/T < 1,5^\circ\text{C}$), gennemføres de cost-benefit-optimale politikker med en yderligere begrænsning om, at den globale temperatur ikke overstiger 2°C ($/T < 1,5^\circ\text{C}$). I et alternativt scenarie (alternativ skadesfunktion), anvendes en skadesfunktion fra Howard og Sterner (2017) i DICE-2023. Her er skadesfunktionen, hvad Barrage og Nordhaus (2024) vurderer er et rimeligt mellemestimat for Howard og Sterner (2017)s foretrukne estimater. Det antages, at en temperaturstigning på 3°C medfører skadesomkostninger, svarende til 9 pct. af globalt output. I scenariet for Paris-aftalen udvidet (Paris extended) antages det, at landene opfylder deres mål i 2030 i henhold til deres reviderede løfter fra sommeren 2022 og der forventes en stigning på lidt mindre end 0,5 pct.-point om året i kontrolraten fra 2030-2100⁹. Basisscenariet (Basis) er estimater af nuværende klimapolitikker, og tager udgangspunkt i, at tendenserne i de nuværende politikker fra 2023 forlænges på ubestemt tid. R=X% indikerer scenarier med forskellige diskonteringsrenter.

Figur 3 illustrerer globale temperaturstigninger under forskellige scenarier relativt til den førindustrielle periode i Barrage og Nordhaus (2024).

Figur 3

Global temperaturstigning under forskellige scenarier

Kilde: Figur 3 i Barrage og Nordhaus (2024)

Af figur 3 fremgår det, at den forventede temperaturstigning i det cost-benefit-optimale scenarie forventes at være 2,6 °C i år 2100. Tilsvarende estimeres den optimale temperaturstigning med skadesfunktionen fra Howard og Sterner (2017) til 1,9 °C i år 2100. Disse resultater står i

kontrast til resultaterne fra DICE-2016, hvor det ville være optimalt at acceptere en stigning i den globale gennemsnitstemperatur på 4,1 °C frem mod år 2100 (Nordhaus, 2018a).

Social Cost of Carbon

For hvert scenarie i Barrage og Nordhaus (2024) præsenteres ligeledes estimater for SCC, som fremgår af tabel 1.

Tabel 1

SCC under forskellige scenarier (DKK/ton, 2024 DKK)

Scenarie (DKK/ton, 2024 DKK)	2020	2025	2050
Cost-benefit optimal	400	450	950
T < 2 °C	600	700	1.650
T < 1,5 °C	27.400	32.250	127.50
Alternativ skadesfunktion	950	1.100	2.150
Paris-aftalen udvidet	450	550	1.200
Basis	500	600	1.350
R=5%	250	300	550
R=4%	400	450	800
R=3%	650	800	1.350
R=2%	1.350	1.600	2.350
R=1%	3.750	4.400	5.350

Note.: SCC er omregnet ved først at konvertere til danske kr. i det givne års priser. Derefter er SCC fremskrevet med nettoprisindekset. SCC er afrundet til nærmeste 50 kr.

Kilde: Tabel 2 i Barrage og Nordhaus (2024)

Af tabel 1 fremgår det, at SCC for udledninger i 2025 i det cost-benefit-optimale scenarie er omtrent 450 kr./ton CO₂e. Med den alternative skadesfunktion er den tilsvarende SCC estimeret til 1.100 kr./ton CO₂e. At nå Paris-aftalens mål om en maksimal temperaturstigning på 1,5 °C vil betyde, at SCC er mere end 30.000 kr. /ton CO₂e for udledninger i 2025. At nå dette mål vil kræve et katastrofalt tab af output. Barrage og Nordhaus (2024) beskriver da også, at målet er urealistisk inden for rammerne af realisme og de teknologier, der inkluderes. Hvis målet om højst 1,5 °C skal nås, skal udledningerne falde til næsten nul i løbet af de næste fem år. Det vil medføre en dyb depression, hvor produktion skal falde med omkring 75 pct. eller en usandsynlig kraftig stigning i udledningsreduktionerne, med mindst 50 pct. inden for et årti. Ifølge Barrage og Nordhaus (2024) kan scenariet bedst betragtes som uigennemførligt.

I hverken det cost-benefit optimale scenarie i Barrage og Nordhaus (2024) eller scenariet baseret på skadesfunktionen i Howard og Sterner (2017) estimeres nettonul udledninger globalt i 2050. I det cost-benefit optimale scenarie i Barrage og Nordhaus (2024) estimeres det, at der udledes 37,1 Gt CO₂ i 2050. Tilsvarende for scenariet baseret på Howard og Sterner (2017) estimeres det, at der udledes 20,9 Gt CO₂ i 2050 (Barrage og Nordhaus, 2023).

Scenarierne for R=X% illustrerer, hvor følsom SCC er over for diskonteringsrenten, hvor en diskonteringsrente på 1 pct. implicerer en SCC på 4.400 kr. /ton CO₂e for udledninger i 2025. Det er 15 gange større end den tilsvarende SCC med en diskonteringsrente på 5 pct.

DICE kan bruges til at guide klimapolitikken

Det er svært at forestille sig, at uenigheden i den klimaøkonomiske videnskab og kritikken af DICE er forsvundet med opdateringen i DICE-2023. Ikke desto mindre har DICE-2023 gennemgået betydelige revisioner, og herunder imødekommet en del af den kritik der har været af modellen. Det handler blandt andet om, at modellering af klimasystemet og vippepunkter er blevet opdateret i DICE-2023 på baggrund af anbefalinger i litteraturen.

DICE forsøger så vidt muligt at balance omkostninger og gevinster i klimapolitikken og kan anvendes som et redskab til at guide beslutninger på området. Hvorvidt den optimale CO₂e-pris er 450 kr. /ton CO₂e, som estimeret i det cost-benefit-optimale scenarie i DICE-2023 eller om den derimod er 1.100 kr./ton CO₂e, som estimeret med den alternative skadesfunktion baseret på Howard og Sterner (2017)s skadesfunktion er ikke entydigt bestemt. Ikke desto mindre giver intervallet 450-1.100 kr. /ton CO₂e en indikation af, hvilken intensitet, der kan retfærdiggøres i klimapolitikken ud fra et cost-benefit perspektiv. Dermed kan resultaterne fra DICE bruges til at vurdere, om et politisk klimamål afspejler de globale skadesomkostninger.

Selvom DICE-2023 har gennemgået betydelige opdateringer i forhold til tidligere versioner, er der stadig usikkerhed forbundet med modellens resultater. Dette skyldes både usikkerheder i modellens input, der skal forudsige fremtidig udvikling – en opgave, som altid vil være forbundet med usikkerhed – samt usikkerheder omkring selve implementeringen.

Klimapolitikken kan også betragtes som en forsikring, hvilket vil tale for en strammere klimapolitik, end hvad standardkalibreringen af DICE-2023 lægger op til. Hvis man ønsker, at klimapolitikken skal fungere som et slags forsikringselement mod fremtidens klima, bør man stadig være opmærksom på alternativomkostninger. Som Becker m.fl. (2011) fremhæver, så konkurrerer klimainvesteringer med alternative investeringer, der kan bruges til at efterlade arv til kommende generationer. Fremtidige generationer er bedst stillet gennem investeringer, der forrenter det højeste afkast.

Selvom den optimale CO₂e-pris ikke kan fastlægges præcist, bør klimapolitikken sigte mod at afveje omkostninger og gevinster. Ellers er der risiko for, at løsningen bliver mere skadelig end problemet. Til denne afvejning kan IAM-modeller som DICE være nyttige, selv med deres begrænsninger.

Litteratur

Barrage, Lint, og William D. Nordhaus (2023): "Supplemental Materials: Statistical and Methods. Appendices to the DICE-2023 Model".

Barrage, Lint, og William D. Nordhaus (2024): "Policies, projections, and the social cost of carbon: Results from the DICE-2023 model," *Proceedings of the National Academy of Sciences - PNAS* 121(13). <https://doi.org/10.1073/pnas.2312030121>.

Becker, Gary S., Kevin Murphy, og Robert Topel (2011): "On the Economics of Climate Policy," *The B.E. Journal of Economic Analysis & Policy* 10 (2). <https://doi.org/10.2202/1935-1682.2854>.

Brøns-Petersen (2025): "Klimapolitik – afgifter eller reguleret planøkonomi," *LIBERTAS* xx.

Dellink, Rob, Elisa Lanzi, og Jean Chateau (2019): "The sectoral and regional economic consequences of climate change to 2060," *Environmental and Resource Economics* 72, 309–363.

Dietz, Simon, Christian Gollier, og Louise Kessler (2018): "The climate beta," *Journal of Environmental Economics and Management* 87, 258–74. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jeem.2017.07.005>.

Dietz, Simon, Frederick van der Ploeg, Armon Rezai, og Frank Venmans (2021a): "Are Economists Getting Climate Dynamics Right and Does It Matter?," *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists* 8(5), 895–921. <https://doi.org/10.1086/713977>

Dietz, Simon, James Rising, Thomas Stoerk, og Gernot Wagner (2021b): "Economic impacts of tipping points in the climate system," *Proceedings of the National Academy of Sciences - PNAS* 118(34), 1–9. <https://doi.org/10.1073/pnas.2103081118>.

Hanley, Nick, Jason F. Shogren, og Ben White (2007): "Chapter 3. Market failure" i *Environmental economics: in theory and practice*. (2. udgave). Palgrave Macmillan.

Hassler, John, Per Krusell, og Conny Olovsson (2024): "The macroeconomics of climate change: Starting points, tentative results, and a way forward," *Working Paper*. Peterson Institute for International Economics.

Howard, Peter H., og Thomas Sterner (2017): "Few and Not So Far Between: A Meta-analysis of Climate Damage Estimates," *Environmental and Resource Economics* 68, 197–225.

Howard, Peter H., og Thomas Sterner (2022): "Between Two Worlds: Methodological and Subjective Differences in Climate Impact Meta-Analyses," *Working Paper*.

Lemoine, Derek, og Christian P. Traeger (2016): "Economics of tipping the climate dominoes," *Nature Climate Change* 6, 514-519.

Martin, Ian W. R., og Robert S. Pindyck (2015): "Averting Catastrophes: The Strange Economics of Scylla and Charybdis," *The American Economic Review* 105(10), 2947–85. <https://doi.org/10.1257/aer.20140806>.

Nobel Prize Outreach AB (2018): "Advanced information," NobelPrize.org. <https://www.nobelprize.org/prizes/economic-sciences/2018/advanced-information/>.

Nordhaus, William D. (1992): "The 'Dice' Model: Background and Structure of a Dynamic Integrated Climate-Economy Model of the Economics of Global Warming," *Cowles Foundation Discussion Papers*, nr. 1252. <https://elischolar.library.yale.edu/cowles-discussion-paper-series/1252>

Nordhaus, William D. (2009): "An Analysis of the Dismal Theorem," *Cowles Foundation Discussion Paper*, nr. 1686.

Nordhaus, William D. (2012): "Economic Policy in the Face of Severe Tail Events," *Journal of Public Economic Theory* 14(2), 197–219. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9779.2011.01544.x>.

Nordhaus, William D. (2013): *The climate casino: risk, uncertainty, and economics for a warming world*. New Haven: Yale University.

Nordhaus, William D. (2014): "Estimates of the Social Cost of Carbon: Concepts and Results from the DICE-2013R Model and Alternative Approaches," *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists* 1(1). <https://doi.org/10.1086/676035>.

Nordhaus, William D. (2016): "Projections and Uncertainties about Climate Change in an Era of Minimal Climate Policies," *NBER Working Paper Series*, nr. 22933. DOI 10.3386/w22933

Nordhaus, William D. (2017): "Evolution of Assessments of the Economics of Global Warming: Changes in the DICE Model, 1992-2017," *NBER Working Paper Series*, nr. 23319.

Nordhaus, William D. (2018a): "Projections and Uncertainties about Climate Change in an Era of Minimal Climate Policies," *American Economic Journal: Economic Policy* 10(3), 333-360. DOI: 10.1257/pol.20170046

Nordhaus, William D. (2018b): "Climate change: The Ultimate Challenge for Economics," Prize Lecture.

Nordhaus, William D., og Andrew Moffat (2017): "A Survey of Global Impacts of Climate Change: Replication, Survey Methods, and a Statistical Analysis," *NBER Working Paper*, nr. 23646. <https://doi.org/https://doi.org/10.3386/w23646>.

Pigou, Arthur Cecil (1920): *The Economics of Welfare*. Macmillan.

Pindyck, Robert S. (2013): "Climate Change Policy: What Do the Models Tell Us?," *Journal of Economic Literature* 51(3), 860–72. <https://doi.org/10.1257/jel.51.3.860>.

Pindyck, Robert S. (2017): "The Use and Misuse of Models for Climate Policy," *Review of Environmental Economics and Policy* 11(1), 100–114. <https://doi.org/10.1093/reep/rew012>.

Piontek, Franziska, Laurent Drouet, Johannes Emmerling, Tom Kompas, Aurélie Méjean, Christian Otto, James Rising, Bjoern Soergel, Nicolas Taconet, og Massimo Tavoni (2021): "Integrated perspective on translating biophysical to economic impacts of climate change," *Nature Climate Change* 11(7), 563–572. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01065-y>

Richardson, Katherine (2021): "tipping point," Lex.dk. Den Store Danske. https://denstoredanske.lex.dk/tipping_point.

Sørensen, Peter B. (2020): "Nobelprisen i økonomi 2018: Økonomisk vækst og klimaforandringer," *Samfundsøkonomen* 2020(2), 124-135. <https://doi.org/10.7146/samfundsokonomien.v0i2.122559>

Stern, Nicholas (2006): *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge University Press.

Weitzman, Martin L. (2009): "In modeling and interpreting the economics of catastrophic climate change," *The Review of Economics and Statistics* 91(1), 1–19.

Weitzman, Martin L. (2014): "Fat Tails and the Social Cost of Carbon," *American Economic Review* 104(5), 544–46. <https://doi.org/10.1257/aer.104.5.544>.

World Bank, og med mindre bearbejdning af Our World in Data (2023): "GDP per capita – World Bank – In constant 2017 international \$," https://ourworldindata.org/grapher/gdp-per-capita-worldbank?tab=chart&country=~OWID_WRL.