



A simple formula for the social costs of carbon

Netwerk Groene Groei, 8 December 2015

Inge van den Bijgaart, Reyer Gerlagh, Matti Liski

Tilburg + Aalto University

CentER 

TILBURG  UNIVERSITY

Introduction / model / results / discussion

This research




- “Een eenvoudige formule voor de maatschappelijke kosten van CO₂”
 - ◆ rapport voor Ministerie van Infrastructuur en Milieu
- “A simple formula for the social cost of carbon”
 - ◆ Under review

CentER   TILBURG UNIVERSITY  UNIVERSITY Reyer Gerlagh 08 December 2015 2

De presentatie die ik hier geef is gebaseerd op een onderzoek, samen met Inge van den Bijgaart, PhD student in Tilburg, en Matti Liski, hoogleraar Economie aan de Aalto universiteit, Helsinki. Dit onderzoek ligt momenteel bij een tijdschrift ter publicatie, na een 2^e herziening. Inge en ik hebben ook een handzame beschrijving gemaakt voor het ministerie van IenM, als rapport. Beide manuscripten zijn, als het goed is, u ter beschikking gesteld voorafgaand aan deze presentatie.

Introduction / model / results / discussion
Literature: IAM

- Social Cost of Carbon (SCC) = monetized damage from emitting one unit of CO₂ to the atmosphere
- Obtained from computational Integrated Assessment Models (IAMs), e.g. Global2100, DICE, MERGE, CETA, FUND, PAGE, MIND, DEMETER, ... AR5-WG3-CH6
- Systematic assessments: Weyant, de la Chesnaye & Blanford, 2006; Hope, 2008; Nordhaus, 2008; Anthoff & Tol, 2013
 - ♦ Higher climate sensitivity, higher estimates of damages for given temperature change, and lower discount rates generally lead to higher SCC
- Fundamental problem: IAMs remain a black box / accepted or rejected on the basis of trust (Kelly & Kolstad, 1999a)

CentER   TILBURG UNIVERSITY  Reyer Gerlagh 08 December 2015 3

De ‘social cost of carbon’, in het Nederlands de ‘maatschappelijke kosten van CO₂’, is de netto contante waarde van de toekomstige schade die wordt veroorzaakt door de emissies van een eenheid CO₂. De meest gangbare eenheid in Europa is de metrische ton CO₂. In de Verenigde Staten wordt ook vaak de metrische ton C gebruikt. De twee eenheden kan je in elkaar omrekenen, net zoals je liters in Europa kan omrekenen in gallons in de VS. Een metrische ton C is 3.67 metrische ton CO₂. Een ander woord dat door economen wordt gebruikt is ‘schaduwprijs’. Omdat het korter is, zal ik vaak die term gebruiken.

De gangbare methode om de CO₂ schaduwprijs te berekenen is met behulp van zogenaamde ‘integrated assessment models’. Dit zijn computer-modellen van de wereld-economie, waar een beschrijving van de klimaatdynamica is opgenomen. Deze modellen berekenen scenarios voor de komende honderden jaren, en kunnen vervolgens berekenen wat 1 eenheid extra emissie aan extra schade oplevert, en wat daar de netto contante waarde van is.




Om deze modellen te gebruiken zijn heel veel veronderstellingen nodig en er zijn meerder gevoeligheidsanalyses gemaakt. In lijn met intuïtie, vinden we dat een grotere klimaatgevoeligheid (dat wil zeggen een hogere temperatuur bij gelijke concentratie CO₂), een hogere inschatting van de schade bij gelijke temperatuur, en een lagere discontovoet tot een hogere schaduwprijs lijden.

Een fundamenteel probleem in de literatuur blijft dat de uitkomsten een hoog ‘hocus pocus’ gehalte hebben. Ook al zijn de modellen die gebruikt worden sterk vereenvoudigd, het blijft voor de meeste mensen onduidelijk wat de essentiële veronderstellingen zijn, en wat bijkomstigheden zijn. Het gevolg is dat er heel veel verschillende schattingen van de CO₂ schaduwprijs in omloop zijn, en dat de meeste gebruikers een keuze moeten maken voor een bepaalde schatting op basis van impliciet vertrouwen in het model, zonder goed te begrijpen welke veronderstellingen gemaakt zijn om tot deze schatting te komen.

Introduction / model / results / discussion

Literature: SCC formulas

- Analytical formula for SCC
- Golosov et al. (2014) derive an analytical formula for the SCC
 - ◆ based logarithmic utility, climate-change damages proportional to output and exponential in the atmospheric CO₂.
 - ◆ Barrage et al. (2014) sensitivity analysis of the assumptions
- Gerlagh and Liski (2012) add better climate system + time-inconsistent preferences.

CentER   TILBURG UNIVERSITY  Reyer Gerlagh 08 December 2015
4

Een recente ontwikkeling is dat er zogenaamd ‘analytische’ formules zijn ontwikkeld voor de CO₂ schaduwprijs.

Een belangrijke bijdrage hierin is gemaakt door Golosov en collegae, in het tijdschrift *Econometrica*, een van de absolute wereldwijde top-5 economietijdschriften. In dat artikel ontwikkelen ze een model dat zover gestileerd is dat er een eenduidige formule uitkomt voor de schaduwprijs van CO₂. Om dit te bereiken moeten ze veel sterke veronderstellingen maken, die nog verder gaan dan de gangbare veronderstellingen in de voorgaande modellen. In een bijlage, met Barrage als eerste auteur, laten ze voor sommige veronderstellingen zien hoe belangrijk, of onbelangrijk, deze veronderstellingen zijn voor de schaduwprijs.

Met Matti Liski heb ik een artikel geschreven waar we de formule van Golosov et al. op twee manieren uitbreiden. We laten zien hoe de formule wordt bij een meer realistische beschrijving van de klimaatdynamica, en we passen de formule aan voor meer algemene tijdsvoorkeuren.




Introduction / model / results / discussion

This paper

- Present a 'simple formula' for the social costs of carbon
 - ◆ Based on balanced growth approximation
- More complicated vis-à-vis Golosov et al. (2014) & Gerlagh and Liski (2012)
 - ◆ Added: non-logarithmic utility, population growth, flexible damages
- Test formula

Purpose

- 'simple' derivation: education of SCC user
- simple rule: easy to test normative/descriptive choices

CentER   TILBURG UNIVERSITY  Reyer Gerlagh 08 December 2015 5

In het artikel dat ik nu presenteren doen we het volgende.

1. We herschrijven de analytische formule van Golosov et al. en van Matti en mij in een continue vorm, zodat deze makkelijker interpreteerbaar is.

2. We breiden de formule uit met elementen die door de wetenschappers in het veld als belangrijk worden aangemerkt. Deze uitbreiding doen we op basis van een zogenaamde 'balanced growth' analyse.

De zaken die we toevoegen zijn een meer algemene nutsfunctie, bevolkingsgroei, een meer algemene schadefunctie die afhangt van inkomen en temperatuur.

3. We testen we hoe goed (of slecht) de analytische formule werkt, door de uitkomsten van de formule te vergelijken met de uitkomsten van een werkelijk zogenaamd 'integrated assessment' model.

Het doel is een formule voor de CO₂ schaduwprijs te presenteren die getest is en goed is bevonden, en die relatief eenvoudig is te begrijpen.

Als we daarin slagen, kunnen bijvoorbeeld beleidsmakers eenvoudiger zelf inzien hoe hun veronderstellingen over toekomstige ontwikkelingen zich vertalen in een hogere of lagere CO₂ schaduwprijs, maar ook hoe normatieve keuzes de schaduwprijs beïnvloeden.

Introduction / model / results / discussion

Educational purpose

Based on




- Fundamentals of climate change dynamics
- Fundamentals of economic analysis

Advantages:

- Provides precise insights in the relevant assumptions
 - ◆ positive (carbon cycle, temperature sensitivity, damages, discount rate)
 - ◆ normative (damages, discount rate)
- Explains the uncertainty in SCC estimates to the laymen
- Shows mechanisms for SCC growth over time

Tested

- The formula explains 99% of within-model SCC variation (DICE - Monte Carlo)

CentER   TILBURG UNIVERSITY  Reyer Gerlagh 08 December 2015 6

De formule heeft twee type componenten.

Ten eerste de parameters die de fundamentele klimaatdynamica beschrijven.
Als tweede de parameters die de fundamentele economische mechanismen beschrijven.

Door deze eigenschappen kan de gebruiker bijvoorbeeld direct zien hoe een hoger of lagere klimaatgevoeligheid zich vertaalt in een hoger of lagere schaduwprijs. Dit is zogenaamde positieve onzekerheid.

Maar ook laat de formule zien hoe een hoger of lagere economische groei zich vertaalt in een hoger of lagere CO₂ schaduwprijs.

Daarnaast laat de formule zien hoe een normatieve keuze voor een hoger of lagere discontovoet de schaduwprijs beïnvloedt.

De formule laat daarmee ook mooi zien waarom er zoveel verschillende schattingen in omloop zijn. Er zijn fundamentele onzekerheden voor de meeste parameters, en deze leiden tot een onzekerheid voor de prijs van CO₂.

Uit de tests die we hebben uitgevoerd blijkt dat de formule ongeveer 99% van de variatie in de schaduwprijs die we met een standaardmodel vinden, kan ‘verklaren’, of ‘voorspellen’.

Introduction / model / results / discussion




Testing the formula

How much of the SCC variation is captured by the formula?

- The formula explains 99% of within-model SCC variation (DICE - Monte Carlo)

Where does the formula perform badly?

- Interaction between convexity of damages and discount rate is absent from formula

CentER   TILBURG UNIVERSITY  Reyer Gerlagh 08 December 2015 7

We hebben ook gekeken naar de condities waarin de formule het niet goed doet. Het blijkt dat bij extreme veronderstellingen ten aanzien van de schadefunctie in combinatie met extreme veronderstellingen voor de discontovoet tot structurele afwijkingen leidt.




Kort gezegd: als de schade bijna afwezig is voor kleine temperatuurveranderingen, en extreem sterk toeneemt bij temperaturen boven de 3 graden Celsius, dan zal de formule een te lage schaduwprijs berekenen bij een heel lage discontovoet, en een te hoge schaduwprijs bij een hoge discontovoet.

Introduction / model / results / discussion

Deriving the formula: available on request in 30mins

```
graph TD; A[Carbon emission] --> B[Carbon concentration]; B --> C[Temperature increase]; C --> D[Economic damage];
```

1. Calculate damage per CO₂ when considering atmospheric CO₂ without decay
2. Add CO₂ decay
3. Add temperature lag
4. Determine effective discount rate

CentER   TILBURG UNIVERSITY  Reyer Gerlagh 08 December 2015 8

Deze presentatie is te kort om de formule helemaal uit te leggen. Indien iemand daar in geïnteresseerd is kan hij of zij het rapport lezen, of mij vragen om een keer een uitgebreidere presentatie te geven.

De manier waarop de formule het makkelijkste begrepen kan worden is door haar in stukjes op te delen, en voor elk stuk apart de mechanismes te bekijken die een rol spelen. Dit hebben we gedaan in het rapport voor het ministerie. Op deze slide staan de vier stappen die we daarvoor gebruiken, maar vandaag laat ik dat buiten beschouwing.

Introduction / model / results / discussion

Step 1a: what if climate change was immediate?



- Assume 3 Kelvin climate sensitivity

$$IMD = \frac{1.3\omega}{m} Y$$

The *Immediate Marginal Damage* depends on

- ω : Damage parameter [%GDP] at 3K
- m : natural atmospheric CO₂ [TtCO₂]
- Y : Income [T€/yr]

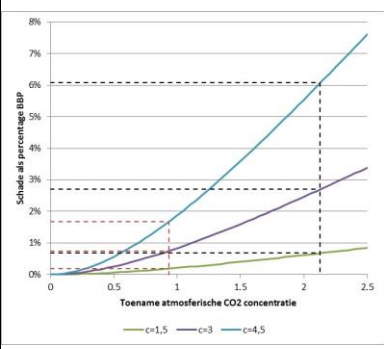
$$IMD = \frac{1.3 \cdot 0.027}{2.1} 60 = 1 \text{ €/tCO}_2$$

CentER  TILBURG UNIVERSITY  Reyer Gerlagh 08 December 2015 9

De eerste stap is dat we de schaduwprijs berekenen voor het theoretische geval dat klimaatveranderingen direct plaatsvinden. Als we de CO₂ in de atmosfeer verdubbelen, verhogen we de hoeveelheid met m , 2.1 Teraton CO₂, de ‘natuurlijke’ hoeveelheid CO₂ in de atmosfeer. De temperatuur stijgt dan met c graden Celsius. Als we veronderstellen dat die gelijk is aan 3 graden Celsius, wordt de economische schade geschat op omega keer het inkomen. De marginale schade is dan de totale schade gedeeld door de totale hoeveelheid CO₂. Voor standaard parameters komen we uit op 1 euro per tonCO₂. De factor 1.3 corrigeert voor het feit dat de schade licht convex is, waardoor het marginale effect iets groter is dan het gemiddelde effect.

Introduction / model / results / discussion




Step 1b: what if climate change was immediate?



$$IMD = \frac{1.3\omega(c/3)^\psi}{m} Y$$

The *Immediate Marginal Damage* depends on

- ω : Damage parameter [%GDP] at 3K
- c : Temperature sensitivity [K] at doubling CO₂
- ψ : convexity of damages [.]
- m : natural atmospheric CO₂ [TtCO₂]
- Y : Income [T€/yr]

CentER   TILBURG UNIVERSITY  Reyer Gerlagh 08 December 2015 10

De directe marginale schade kunnen we eenvoudig uitbreiden voor willekeurige klimaatgevoeligheid, en convexiteit van schade. De formule wordt iets ingewikkelder, maar de basis blijft hetzelfde. Je deelt de schade de hoeveelheid CO₂.

Introduction / model / results / discussion
Step 2: Persistence

$$PF = \frac{1}{\delta_S + \sigma}$$

The *Persistence Factor* depends on

- δ_S : Carbon cycle deprecation [%/yr]
- σ : Effective discount rate [%/yr]

$$PF = \frac{1}{0.01/yr + 0.02/yr} = 33 \text{ yr}$$

Reyer Gerlagh

08 December 2015
11

CO₂ die we uitstoten blijft gemiddeld voor wel honderd jaar of langer in de atmosfeer. De grafiek aan de linker kant laat voor verschillende klimaatmodellen zien welk deel van de emissies in de atmosfeer blijft, na een aantal jaren. Toekomstige schade wordt ook verdisconteerd, met de discontovoet sigma.

De formule vermenigvuldigd de directe schade met het totale gewicht van de toekomst. Voor typische parameter waarden komen we dan uit op een factor 33. De schaduwprijs van CO₂ is nu berekend op 33 euro per tonCO₂.

Introduction / model / results / discussion




Step 2: Delay

$$DF = \frac{\varepsilon}{\varepsilon + \sigma}$$

The *Persistence Factor* depends on

- σ : Effective discount rate [%/yr]
- ε : Temperature adjustment speed [%/yr]

$$DF = \frac{0.02/\text{yr}}{0.02/\text{yr} + 0.02/\text{yr}} = 0.5$$

CentER   TILBURG UNIVERSITY  Reyer Gerlagh 08 December 2015 12

De aarde heeft een grote massa die langzaam opwarmt. Elk jaar warmt de aarde met epsilon op, richting de evenwichtstemperatuur. Dit deel van de formule is het moeilijkste uit te leggen. Maar het resultaat is eenvoudig te begrijpen. Omdat klimaatveranderingen vertraagt zijn, krijgen ze een lager gewicht als je de toekomst verdisconteert. Voor typische parameter waarden is het effect een half. We hebben nu 33 x een half, dus een schaduwprijs van 16.5 euro per tonCO2 berekend.




Introduction / model / results / discussion

A simple formula for the social costs of carbon

$$SCC = \frac{1.3\omega(c/3)^\psi}{m} \frac{1}{\delta_S + \sigma} \frac{\varepsilon}{\varepsilon + \sigma} Y$$

The SCC depends on

- ω : Damage parameter [%GDP] at 3K
- c : Temperature sensitivity [K] at doubling CO2
- ψ : convexity of damages [.]
- δ_S : Carbon cycle deprecation [%/yr]
- σ : Effective discount rate [%/yr]
- ε : Temperature adjustment speed [%/yr]
- Y : Income [€/yr]

CentER   TILBURG UNIVERSITY  Reyer Gerlagh 08 December 2015 13

Dit is de formule voor de CO2 schaduwprijs.




Hij ziet er misschien nog best ingewikkeld uit, maar als je er een paar keer mee werkt, valt dat best mee.

Introduction / model / results / discussion

Everyone can calculate the SCC!

$$SCC = \frac{1.3\omega(c/3)^\psi}{m} \frac{1}{\delta_S + \sigma} \frac{\varepsilon}{\varepsilon + \sigma} Y$$

- Temperature sensitivity: 3K at 2.1 TtCO₂
- Damage parameter: 2.7% at 3K
- Damages quadratic: $\psi = 2$
- CO2 deprecation: 0.01 [./yr]
- Temperature adjustment speed 0.02 [./yr]
- Income: 60 [T€/yr]
- Effective discount rate: 0.02 [./yr]
- SCC: [1.3/2.1] [0.027] [3/3]² [1/0.03] [1/0.04] [60] = 17 [€/tCO₂]

CentER   TILBURG UNIVERSITY  Reyer Gerlagh 08 December 2015 14

In deze presentatie wil ik vooral laten zien hoe de formule werkt.
Als eerste neem ik enkele standaardveronderstellingen uit de literatuur.

Stel dat een verdubbeling van de hoeveelheid CO₂ in de atmosfeer (dat wil zeggen dat we 2.5 Teraton CO₂ toevoegen) leidt tot een temperatuurstijging van 3 graden Celsius.

Stel dat bij een temperatuurstijging van 3 graden Celsius (=3K), de schade door klimaatveranderingen wordt gewaardeerd op 2.7% het inkomen.

Stel dat de economische waardering van klimaatschade kwadratisch toeneemt met de temperatuurstijging

Stel dat per jaar ongeveer 1% van het CO₂ overschot uit de atmosfeer wordt verwijderd door groei van bomen, opname in de oceanen, enz.

Stel dat de temperatuur van de aarde zich elk jaar met een snelheid van 2% aanpast aan de evenwichtstemperatuur

Stel dat we het huidige wereldwijde inkomen schatten op 60 biljoen euro per jaar

Stel dat we een discontovoet hanteren van 2% per jaar

Dan komt volgens de formule de CO₂ schaduwprijs uit op 17 euro per ton CO₂.

Ter vergelijking, de prijs in de EU-ETS is momenteel tussen de 5 en de 10 euro per ton CO₂.

De prijs die de formule berekent is de prijs die mondiaal zou moeten gelden, gemiddeld voor rijke en arme landen. Daar zijn we duidelijk nog ver van verwijderd. Zulk een prijs zou een sterk signaal zijn en grote effecten hebben op emissies.




Introduction / model / results / discussion

You think the discount rate should be 1%?

$$SCC = \frac{1.3\omega(c/3)^\psi}{m} \frac{1}{\delta_S + \sigma} \frac{\epsilon}{\epsilon + \sigma} Y$$

- Damage parameter: 2.7% at 3K
- Temperature sensitivity: 3K at 2.1 TtCO₂
- Damages quadratic: $\psi = 2$
- CO2 deprecation: 0.01 [./yr]
- Effective discount rate: 0.01 [./yr]
- Temperature adjustment speed 0.02 [./yr]
- Income: 60 [T€/yr]

▪ SCC: [1.3/2.1] [0.027] [3/3]² [1/0.02] [1/0.03] [60] = 33 [€/tCO₂]

CentER   TILBURG UNIVERSITY  Reyer Gerlagh 08 December 2015 15

De formule maakt het heel eenvoudig om te zien wat het belang is van de discontovoet. Als de discontovoet 1% per jaar is, in plaats van 2% per jaar, en we vullen deze verandering in, dan vinden we dat de schaduwprijs verdubbelt van 17 naar 33 euro per tonCO₂.




Introduction / model / results / discussion

Feeling lucky: you think the climate is stable?

$$SCC = \frac{1.3\omega(c/3)^\psi}{m} \frac{1}{\delta_S + \sigma} \frac{\epsilon}{\epsilon + \sigma} Y$$

- Damage parameter: 2.7% at 3K
- Temperature sensitivity: 1K at 2.1 TtCO₂
- Damages quadratic: $\psi = 2$
- CO2 deprecation: 0.01 [./yr]
- Effective discount rate: 0.02 [./yr]
- Temperature adjustment speed 0.02 [./yr]
- Income: 60 [T€/yr]

▪ SCC: [1.3/2.1] [0.027] [1/3]² [1/0.03] [1/0.04] [60] = 1.9 [€/tCO₂]

CentER   TILBURG UNIVERSITY  Reyer Gerlagh 08 December 2015 16

Maar je kunt de formule ook gebruiken om te zien wat het effect is van een optimistisch scenario, waarin de temperatuur misschien maar met 1 graad Celsius stijgt. Dat is wetenschappelijk gezien een mogelijkheid. Niet erg waarschijnlijk, maar toch.

Het gevolg van zulk optimisme is dat de schaduwprijs daalt van 17 naar 2 euro per tonCO₂!




Introduction / model / results / discussion

Pessimistic & responsible?

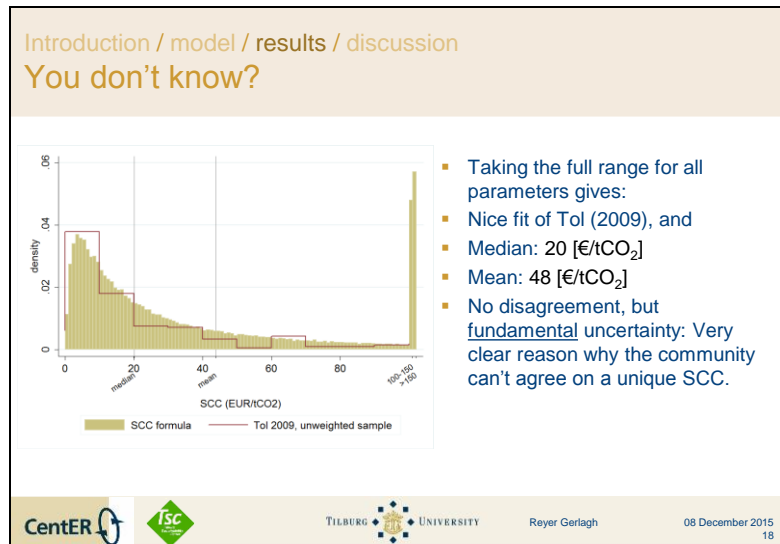
$$SCC = \frac{1.3\omega(c/3)^\psi}{m} \frac{1}{\delta_S + \sigma} \frac{\epsilon}{\epsilon + \sigma} Y$$

- Damage parameter: 2.7% at 3K
- Temperature sensitivity: 5K at 2.1 TtCO₂
- Damages quadratic: $\psi = 3$
- CO2 deprecation: 0.01 [./yr]
- Effective discount rate: 0.01 [./yr]
- Temperature adjustment speed 0.02 [./yr]
- Income: 60 [T€/yr]

▪ SCC: [1.3/2.1] [0.027] [5/3]³ [1/0.02] [1/0.03] [60] = 155 [€/tCO₂]

CentER   TILBURG UNIVERSITY  Reyer Gerlagh 08 December 2015 17

Aan de andere kant kunnen we ook een pessimistisch scenario snel doorrekenen. Als het klimaat gevoeliger is, en we gaan uit van een temperatuurstijging van 5 graden Celsius bij een verdubbeling van de CO₂, en we rekenen ons verantwoordelijk voor de toekomst, uitgedrukt in een relatief lage discontovoet, dan stijgt de CO₂ prijs van 17 naar 155 euro per ton CO₂. Bij zo'n prijs wereldwijd zouden emissie heel snel dalen. Om een idee te geven, dit is ver voorbij wat we kunnen verwachten dat in Parijs wordt gerealiseerd.



We hebben gezien hoe we kunnen ‘spelen’ met de parameters in de formule. We kunnen dat ook meer systematisch doen. Voor elke parameter kunnen we uit de literatuur een verdeling afleiden voor redelijke waarden. Als we al deze informatie combineren, kunnen we daarmee een verdeling van de schaduwprijs berekenen. Dit plaatje laat het resultaat zien. De helft van alle combinaties van parameters geeft een schaduwprijs onder de 20 euro per tonCO₂, de andere helft geeft een hogere prijs. Omdat de verdeling asymmetrisch is, blijkt de gemiddelde prijs een stuk hoger: 48 euro per tonCO₂.

De grafiek laat daarmee zien dat de schaduwprijs onzeker is. Het is belangrijk om te beseffen dat deze onzekerheid geen weergave is van meningsverschil in de wetenschap. Het gaat om fundamentele wetenschappelijke vragen waar we het precieze antwoord nog niet op weten. Als wetenschappers een model gebruiken maken ze hun eigen inschatting, en het resultaat is een ‘waaier’ van uitkomsten.

Wat ook een leuk resultaat is van onze analyse is dat de verdeling die we vinden inderdaad overeenkomt met een overzicht die Richard Tol in het verleden heeft gemaakt. Onze formule biedt daarmee een mooie interpretatie.




Introduction / model / results / discussion

Discounting: extending the Ramsey rule

$$r = \rho + \eta g$$

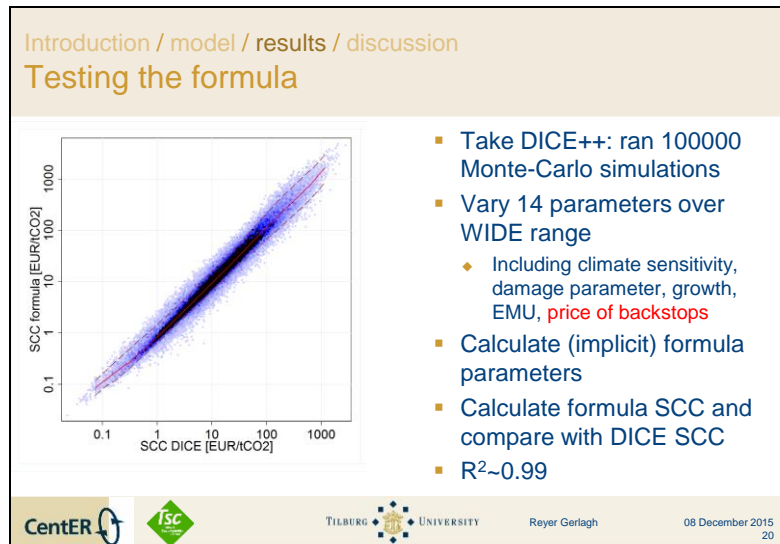
$$\sigma = r - \xi g - l = \rho + (\eta - \xi)g - l.$$

- σ : climate effective discount rate
- r : real rate of return on investments
- ρ : pure rate of time preferences [0-0.03 /yr]
- η : elasticity of marginal utility [0.5-3]
- ξ : elasticity of damages to income [0-2]
- g : economic per capita growth: [0.015-0.03 /yr]
- l : population growth rate [0.008-0.015 /yr]
- $\sigma = [0.02] + [2-1] [0.02] - [0.01] = 0.03$ /yr

CentER   TILBURG UNIVERSITY  Reyer Gerlagh 08 December 2015 19

Tot nu toe heb ik losjes gerefereerd aan de discontovoet in de formule, zonder op details in te gaan. De formule gebruikt een parameter die wij de ‘effectieve klimaatdiscontovoet’ noemen. Het blijkt dat deze afhangt van meerdere ‘diepere’ parameters.

De effectieve klimaatdiscontovoet stijgt met de zogenaamde pure tijdsvoorkeur, en daalt met de bevolkingsgroei. Hij daalt of stijgt met economische groei, afhankelijk van de nutsfunctie en de schadefunctie. De details van deze afleiding kunt u vinden in het artikel dat is meegestuurd.



We hebben de formule getest door de uitkomsten te vergelijken met de uitkomsten van het meest gebruikte model: DICE, van Nordhaus.

We hebben het DICE model uitgebreid zodat het, net als de formule, een meer flexibele schadefunctie heeft. Daarna hebben we 100.000 keer verschillende parameters genomen en het DICE model gedraaid en de schaduwprijs berekent. Vervolgens hebben we voor dezelfde parameters de formule gebruikt, en beide uitkomsten vergeleken.

Wat we zien is dat de schaduwprijs over een heel grote range varieert, van onder de 0.1 tot boven de 1000 euro per tonCO₂. En we zien ook dat de formule meestal dicht in de buurt blijft, dat wil zeggen, plusminus 25%. Dat betekent dat als de formule een prijs aangeeft van 100 euro per tonCO₂, dat het dan heel waarschijnlijk is dat de prijs van DICE bij dezelfde parameters tussen de 75 en 125 euro per tonCO₂ ligt. We bereiken een R² van 99%, en vinden dat zelf verbazingwekkend hoog.




Introduction / model / results / discussion

Testing the formula

Table 1: Relative gap between formula and DICE SCC values: dependence on main parameters.

	OLS gap (1)	OLS gap (2)	OLS gap (3)	OLS gap (4)	within-sample spread (5)	corner-center effect (6)
$\ln(c)$	0.255	0.255	0.255	0.225	1.563	0.199
$\ln(w)$	0.043	0.044	0.044	0.045	3.219	0.072
ψ	-0.037	-0.037	-0.037	-0.038	2.900	0.055
ξ	0.202	0.202	0.202	0.226	1.263	0.143
ρ	1.733	1.692	1.693	1.093	0.075	0.041
η	-0.100	-0.100	-0.100	-0.103	2.478	0.127
g	-3.793	-3.825	-3.849	-3.313	0.109	0.032
l	10.13	9.894	9.886	10.39	0.005	0.029
$\psi \times \rho$		9.279	9.278	9.803	0.142	0.694
$\psi \times \eta$		0.192	0.192	0.194	4.582	0.446
Other linear var's	NO	NO	YES	YES		
Other interactions	NO	NO	NO	YES		
Nr independent vars	8	10	16	105		
Nr obs	100.000	100.000	100.000	100.000		
R2	0.316	0.640	0.642	0.815		

- Main error of formula: omission of convexity-discount rate interaction




CentER   TILBURG UNIVERSITY  Reyer Gerlagh 08 December 2015 21

We hebben ook een systematische analyse uitgevoerd naar de afwijkingen tussen DICE en de formule. Deze tabel laat de resultaten zien. De belangrijkste uitkomst is te zien in de twee rode getallen in de rechter kolom. We vinden dat de grootste fout wordt gemaakt bij een specifieke combinatie van parameters. De verklaring is technisch, en opgenomen in het artikel. Wat voor de gewone gebruiker relevant is, is te weten dat de grootste fout van de formule wordt veroorzaakt door een interactie tussen parameters die bewust buiten de formule is gelaten. De mechanismen die zijn meegenomen in de formule werken goed.

Introduction / model / results / discussion

Summary

- SCC can be understood through a simple formula
 - ◆ Useful to laymen, policy makers, researchers
- Skewed distribution:
 - ◆ Most chance of low SCC
 - ◆ But some chance of 'high' SCC
- Uncertainty of 'true' SCC value is clear from uncertainty of fundamental parameters (climate sensitivity)
- and subjective parameters (damage sensitivity, discount rate)

CentER   TILBURG UNIVERSITY  Reyer Gerlagh 08 December 2015 22

Om samen te vatten. We hebben een eenvoudige formule voor de CO₂ schaduwprijs. De formule geeft gebruikers, beleidsmakers zowel als wetenschappers, inzicht in de mechanismen die de schaduwprijs bepalen, en inzicht in de uitkomsten bij de veronderstelling die gemaakt wordt. De formule laat zien dat door de interactie tussen verschillende onzekerheden de schaduwprijs een brede asymmetrische verdeling heeft, met een kleine, maar niet heel kleine, kans dat de schaduwprijs heel hoog is.

De formule helpt ook om onzekerheid over klimaat en economische groei los te koppelen van normatieve keuzes, zoals over het gewicht dat een beleidsmaker wil geven aan toekomstige generaties.

Introduction / model / results / discussion

The Excel file

Parameters	Value (choice)	More or less optimistic than median?	Value within bounds of distribution?
1			
2	3.00	equal	Yes
3	2.70	equal	Yes
4	2.0%		
5	1.5		
6	2.0%		
7	1.1%		

Parameters	Implied values	More or less optimistic than median?	Value within bounds of distribution?
10	0.003	equal	Yes
11	1.5%	more optimistic	Yes

Model number	Model choice
14	CLIMBER2-SP1
15	GENES_KIMMON

Choose values/model

- Put in the numbers
- Select the carbon- and temperature climate model
- SCC comes out.

CentER TILBURG UNIVERSITY Reyer Gerlagh 08 December 2015 23

Bij het manuscript hoort ook een Excel file waar een gebruiker zelf keuzes kan maken en direct kan zien wat de bijbehorende CO2 schaduwprijs is. De gebruiker kan bijvoorbeeld kiezen wat de verwachte klimaatgevoeligheid is, wat de verwachte referentieschade is bij een temperatuurstijging van 3 graden Celsius, wat de economische groei, bevolkingsgroei, en discontovoet is.




In het onderste blok kan de gebruiker kiezen welk koolstof klimaatmodel en welk temperatuur-klimaatmodel gebruikt moet worden.

De Excel file berekent dan, in het gele blok, de CO2 schaduwprijs.

Introduction / model / results / discussion

Next steps

- Extension to CH₄, major GHG gas for agricultural sector
- 'short-lived', thus needs thorough analysis of continuous versus discrete time
- Needs new IAM (most IAMs focus on CO₂)

CentER   TILBURG UNIVERSITY  Reyer Gerlagh 08 December 2015
24

We kunnen een vergelijkbare analyse maken voor methaan, om inzicht te krijgen in de effectiviteit van beleid gericht op fossiele brandstoffen versus beleid gericht op de landbouw sector. Een dergelijke analyse zal wel veel werk kosten. Omdat methaan relatief snel verdwijnt uit de atmosfeer, zijn er aanvullende uitdagingen die opgelost moeten worden.