

**THE EFFICIENT AND SUSTAINABLE USE  
OF ENVIRONMENTAL RESOURCE SYSTEMS**

*Samenvatting*

ACADEMISCH PROEFSCHRIFT

ter verkrijging van de graad van doctor aan  
de Vrije Universiteit te Amsterdam,  
op gezag van de rector magnificus  
prof.dr. T. Sminia,  
in het openbaar te verdedigen  
ten overstaan van de promotiecommissie  
van de faculteit der economische wetenschappen en econometrie  
op donderdag 18 februari 1999 om 13.45 uur  
in het hoofdgebouw van de universiteit  
De Boelelaan 1105

door

Reyer Gerlagh

geboren te Brokopondo, Suriname

promotoren: Prof. M.A. Keyzer  
Prof. H. Verbruggen

## HET EFFICIËNT EN DUURZAAM GEBRUIK VAN MILIEUHULPBRONNEN

*Nederlandse samenvatting van, en conclusies uit, "The efficient and sustainable use of environmental resource systems", R. Gerlagh, Thela Thesis, Amsterdam, 1998, ISBN 90-5170-476-3 (f 49,50).*<sup>1</sup>

Verscheidene mondiale milieuproblemen vragen onze aandacht, onder andere ontbossing, verlies aan biodiversiteit, aantasting van de ozonlaag, en het versterkte broeikaseffect door de uitstoot van zogenaamde broeikasgassen. Deze milieuproblemen worden veroorzaakt door menselijk ingrijpen. Hoewel deze milieuproblemen verstrekende gevolgen kunnen hebben voor de welvaart van toekomstige generaties, ontbreekt het aan adequaat beleid. Door sommigen wordt 'sterke duurzaamheid' nagestreefd, gericht op de absolute bescherming van het milieu, vaak door middel van fysieke regulering. Zulk beleid kan tot onnodige beperkingen van milieugebruik leiden, en daarmee tot inefficiëntie. Anderen bepleiten de privatisering van milieuhulpbronnen of markt-conform beheer, om het efficiënt gebruik te bevorderen. Als men zich alleen op efficiëntie richt kan dat echter tot onherstelbare schade aan het milieu leiden, en daardoor komt de welvaart van toekomstige generaties in het gedrang.

In deze studie verkennen we de economische principes die gebruikt kunnen worden om optimaal gebruik van het milieu te bevorderen. Daarbij letten we zowel op het efficiënte gebruik van de hulpbronnen voor de productie van welvaart, als op een billijke verdeling hiervan tussen mensen. De *intragenerationele* verdeling van welvaart (tussen mensen die in dezelfde tijd leven) is niet onbelangrijk, maar valt buiten het bestek; we beperken ons tot *intergenerationele* verdelingsaspecten.

Als basis voor de welvaartsanalyse gelden de volgende vooronderstellingen en (Pareto) waarde oordelen:

- (i) Ieder individu handelt rationeel en heeft zelf het beste oordeel over zijn eigen welvaart.
- (ii) De sociale welvaart (dat is de welvaart van de maatschappij als geheel) hangt af van de welvaart van de individuen, en deze hangt alleen af van de uiteindelijke allocatie - verdeling van goederen -, niet van de manier waarop deze bereikt is.
- (iii) Er is geen animositeit tussen individuen, en als de welvaart van de één stijgt, zonder dat de welvaart van een ander daalt, dan stijgt de sociale welvaart.

Op basis van deze vooronderstellingen en principes is het mogelijk om verschillende economische allocaties met elkaar te vergelijken. In het algemeen zal een allocatie die gebaseerd is op rationele beslissingen en vrije keuzen van de individuen tot een Pareto optimum leiden, dat is een allocatie waarin het niet mogelijk is de sociale welvaart te verhogen zoals in (iii) weergegeven.

---

<sup>1</sup> Ook direct te verkrijgen bij: Reyer Gerlagh, IVM-VU Instituut voor Milieuvraagstukken, Vrije Universiteit, De Boelelaan 1115, 1081 HV Amsterdam, tel. 020 - 44 49502, fax. 020 - 44 49553, email reyer.gerlagh@ivm.vu.nl.

De Pareto principes zijn echter niet in staat om verschillende allocaties te rangschikken indien de welvaart van sommige individuen stijgt en die van anderen daalt, en dus zijn ze onvoldoende indien we verdelingsvraagstukken willen analyseren. Het is voor verdelingsvraagstukken nodig om een expliciet waardeoordeel toe te voegen, bijvoorbeeld dat een verdeling alleen billijk is als het laagste inkomen voldoende is om in de basisbehoeften te voorzien. Voorbeelden van basisbehoeften zijn voeding, huisvesting, onderwijs, zorg, en een schoon milieu.

In deze studie wordt duurzaamheid geanalyseerd als een verdelingsvraagstuk:

*Een duurzame ontwikkeling betekent dat iedere generatie voldoende inkomen heeft om in haar basisbehoeften te voorzien.*

Deze definitie van duurzaamheid is gebaseerd op het rapport van de ‘World Commission on Environment and Development’ die voor een duurzame ontwikkeling pleit “that meets the needs of the present, without compromising the ability of future generations to meet their own needs”. Deze definitie is niet vanzelfsprekend.

Enerzijds vinden zogenaamde ‘ecologische economen’ dat duurzaamheid directer moet worden gedefinieerd als het behoud van het milieu, en zij pleiten voor sterke duurzaamheid, zoals boven beschreven. Onze formulering in termen van inkomen laat de mogelijkheid open dat milieudegradatie wordt afgekocht met extra consumptie van door mensen gemaakte goederen. Het eerste Pareto principe maakt duidelijk waarom wij de voorkeur geven aan onze eigen formulering. De toekomstige generaties zullen zelf bepalen of zij een schoon milieu of extra consumptiegoederen prefereren. De huidige generatie beperkt zich ertoe om het huidige milieugebruik in overeenstemming te laten zijn met de verwachte toekomstige voorkeuren.

Anderzijds is het onder economen die vertrouwd zijn met inkomen als indicator voor welvaart gebruikelijk om duurzame ontwikkeling te definiëren als een pad waarin het inkomen en de welvaart niet dalen. Een belangrijk nadeel van deze definitie is dat zij zich niet eenvoudig laat uitbreiden tot intragenerationele verdelingsvragen. Onze eigen keuze heeft een duidelijke generalisatie: een verdeling van inkomen, over en binnen generaties, is duurzaam als alle consumenten in hun basisbehoeften kunnen voorzien.

We hebben nu aangegeven wat we onder (Pareto-)efficiëntie en duurzaamheid verstaan, nu moeten we nog verklaren waarom het gebruik van milieuhulpbronnen onze aandacht behoeft. De intergenerationele verdeling van welvaart hangt nauw samen met de hoeveelheid kapitaal die wordt nagelaten aan volgende generaties, en dat gebruikt kan worden voor de productie van welvaart. We onderscheiden daarbij milieukapitaal, zoals bossen en schone rivieren, van door mensen gemaakt kapitaal, zoals machines. De milieuhulpbronnen die samen het milieukapitaal vormen hebben enkele eigenschappen die van belang zijn voor de analyse van duurzame ontwikkeling. We beperken ons hierbij tot zogenaamde vernieuwbare hulpbronnen.

- (i) Ze zijn essentieel voor de productie van welvaart.
- (ii) Ze zijn vernieuwbaar, in de zin dat ze de capaciteit hebben om zich te regenereren en een oneindige stroom van waardevolle diensten te leveren.
- (iii) Ze zijn uitputbaar, in de zin dat een overexploitatie tot een onomkeerbare reductie van de productie-capaciteit kan leiden.
- (iv) Er zijn substantiële vertragingen in de dynamica van de milieusystemen.

De eerste eigenschap maakt duidelijk dat het ons niet alleen om 'lokale' milieuproblemen gaat, maar om de aantasting van de draagkracht van mondiale systemen, zoals de verminderde biodiversiteit en het versterkte broeikaseffect. De tweede eigenschap geeft weer dat het milieu een (in menselijke termen) oneindige bron van welvaart is, en dus zeer waardevol. De derde eigenschap benadrukt dat een zorgvuldig beheer nodig is. De vierde eigenschap, ten slotte, betekent dat maatregelen uit voorzorg moeten worden genomen, voordat milieuproblemen urgent zijn.

De laatste drie eigenschappen onderscheiden milieukapitaal van door mensen gemaakt kapitaal. Dit vergaat maar is goed vervangbaar door nieuw kapitaal, en de tijd die tussen de investeringen en het gebruik van het kapitaal ligt is verwaarloosbaar in verhouding tot de vertragingen in de milieudynamica. Daarom richten we ons vooral op het milieukapitaal. Indien dit wordt aangetast kan dat verstrekende gevolgen hebben, die niet eenvoudig te corrigeren zijn.

In deze studie wordt het versterkte broeikaseffect als illustratie gebruikt. Het onderliggende biogeochemische systeem - dat bestaat uit in elkaar grijpende biologische, geologische en chemische cycli - heeft alle vier de boven beschreven eigenschappen. (i) Het huidige mondiale klimaat biedt een geschikte omgeving voor diverse ecosystemen en daarmee voor de voorziening in menselijke basisbehoeften. (ii) Het huidige klimaatsysteem lijkt, binnen de *natuurlijke* variatie, ook op de langere termijn, stabiel. (iii) De huidige klimaatmodellen geven aan dat de antropogene emissies van broeikasgassen tot onomkeerbare klimaatveranderingen (kunnen) leiden. (iv) De gevolgen van huidige emissies zullen naar verwachting pas over tientallen tot honderden jaren volledig duidelijk worden.

De analyse vindt plaats binnen de context van de welvaartseconomie. We formuleren een algemeen dynamisch competitief evenwichtsmodel en werken dit uit voor zowel een zogenaamd dynastisch (Ramsey) model, waarin een centrale planner de sociale welvaart maximaliseert voor alle generaties tegelijk, als voor een zogenaamd overlappende generaties (OLG) model, waarin iedere generatie haar eigen inkomsten en uitgaven met elkaar in overeenstemming brengt. Daarnaast ontwikkelen we een reeks van gestileerde modellen, ALICE, dat staat voor 'Applied Long-term Integrated Competitive Equilibrium model', waarin een verdergaande analyse mogelijk is van de milieu- en welvaartseffecten van verschillend milieubeleid. Deze modellen worden ook gebruikt om voor het klimaatprobleem te berekenen wat de mogelijke gevolgen zijn van verschillend klimaatbeleid. Uit de analyse komen de volgende conclusies.

*(i) Dynamische efficiëntie*

De illustratie met ALICE 0 laat zien dat door de toenemende levensverwachting in de volgende eeuw de spaartegoeden voor het (langere) pensioen mogelijk zullen toenemen. Hierdoor komt de (reële) rente op de besparingen onder druk te staan, en kan deze uiteindelijk negatief worden. Dit betekent dat de allocatie ‘dynamisch inefficiënt’ is en dat een deel van de besparingen beter geconsumeerd kan worden. Zowel de aanwezigheid van milieuhulpbronnen in een economie als van een hieronder te specificeren claim kan deze inefficiëntie voorkomen.

Het feit dat milieuhulpbronnen een oneindige stroom van waardevolle diensten kunnen produceren betekent dat deze een niet te verwaarlozen waarde hebben. En indien een deel van de milieuhulpbronnen in eigendom wordt gegeven aan de eerste generatie betekent dit dat het economische evenwicht in een OLG economie dynamisch efficiënt is.

Als er geen milieuhulpbronnen zijn, of als deze niet in eigendom worden gegeven, is er een alternatief om dynamische efficiëntie te garanderen door de overheid verhandelbare claims uit te laten geven aan de dan levende generaties. Deze claims zijn vergelijkbaar met obligaties. Ze geven de eigenaar in iedere periode het recht op een betaling die gelijk is aan een vast (klein) aandeel van het totale inkomen. De betalingen aan de eigenaars van de claims worden gefinancierd uit belastingen. Het komt in zekere zin neer op een positieve overheidsschuld waarbij de interestbetalingen een vast deel van het totale inkomen uitmaken.

*(ii) Duurzaamheid*

De toegepaste milieu-economie heeft tot nu toe vooral geijverd voor invoering van zogenaamde Pigou-belastingen op het milieu, om de kosten van het milieugebruik door te laten werken in de prijzen van de geproduceerde goederen. Recentelijk is er ook aandacht voor de mogelijkheid om milieuhulpbronnen verhandelbaar te maken en in eigendom te geven, zodat de eigenaars zorg dragen voor het efficiënt gebruik. De economische literatuur laat echter zien dat deze maatregelen, die er voor zorgen dat - verwachte - toekomstige preferenties in de huidige prijzen worden opgenomen, niet voldoende zijn om duurzaamheid te garanderen. In deze studie hebben we naar extra milieumaatregelen gekeken, zowel vanuit het dynastisch als vanuit het OLG perspectief.

Binnen het dynastisch perspectief is het gebruikelijk dat de dynastische welvaartsfunctie die gemaximaliseerd wordt bestaat uit de gewogen som van de welvaartsfuncties van de opeenvolgende generaties, waarbij de gewichten exponentieel afnemen. De snelheid van de afname heet de pure tijdspreferentie. Een populaire methode om een duurzaam welvaartsmaximum te bevorderen bestaat eruit dat de tijdspreferentie wordt gereduceerd, zodat toekomstige generaties een hoger gewicht krijgen in de geaggregeerde welvaartsfunctie. Dit is echter geen goede oplossing, omdat het tot niet realistische resultaten leidt, en daarmee de huidige preferenties klaarblijkelijk niet correct weergeeft. Het is eenvoudig mogelijk om expliciete duurzaamheidscriteria op te nemen in die zin dat de welvaart niet onder een kritiek minimum (geassocieerd met de basisbehoeften) mag komen. Een ander

alternatief, het opleggen van fysieke beperkingen aan het milieugebruik, is ook niet wenselijk omdat dit tot onnodige inefficiëntie kan leiden.

Binnen het OLG-perspectief is er geen ruimte voor exogene duurzaamheidscriteria. In plaats daarvan formuleren we een ‘milieubeheerfonds’, dat is een instelling die het initiële eigendom krijgt over de milieuhulpbronnen, en de inkomsten hieruit gebruikt om de huidige en toekomstige generaties voldoende inkomen te geven om in de basisbehoeften te voorzien. (In het Engels gebruiken we het woord ‘trust fund’. Dat verwijst in het gangbare taalgebruik naar een fonds waarin de erfenis van een minderjarige erfgenaam wordt gestort. Deze wordt beheerd door een vertrouwenspersoon, en komt pas beschikbaar bij meerderjarigheid van de erfgenaam.) Het beheerfonds heeft als opdracht om op ieder moment een vermogen aan te houden dat gelijk is aan de waarde - bij de huidige prijzen - van de milieuhulpbronnen die nodig zijn om in de basisbehoeften van alle toekomstige generaties te voorzien. Het beheerfonds hoeft deze milieuhulpbronnen niet zelf als activa aan te houden, het is dus geen ‘groenfonds’ dat alleen in natuur en milieuvriendelijke activiteiten belegt. Ook worden er geen fysieke beperkingen aan het milieugebruik opgelegd. Het milieubehoud wordt dus niet geforceerd, maar het beheerfonds zorgt ervoor dat de - verwachte - preferenties van toekomstige generaties een voldoende gewicht krijgen in de huidige prijzen.

Het beheerfonds is gebaseerd op de veronderstelling van een gegeven pad voor de bevolkingsgroei. Als de bevolkingsgroei binnen het model verklaard moet worden, en als we veronderstellen dat ouders empathie hebben voor hun kinderen, krijgt de duurzaamheidsdiscussie een ander karakter. Ouders zullen er zelf zorg voor dragen dat hun kinderen in de basisbehoeften kunnen voorzien. Indien dit niet mogelijk is door ernstige milieuvuiling zullen zij, in het uiterste geval, geen kinderen krijgen. (Hierbij gaan we voorbij aan de wenselijkheid van kinderen op zich. Wel laat het model de mogelijkheid open dat mensen om andere redenen geen kinderen willen.) In plaats van duurzaamheid, is de mogelijke extinctie een probleem. Het beheerfonds zal deze situatie voorkomen, omdat het er voor zorgt dat elke generatie voldoende inkomen heeft om in de basisbehoeften van een aantal mensen te voorzien.

### (iii) *Continua van ‘steady states’ en pad-afhankelijkheid*

Een ‘steady state’ is een economisch evenwicht dat constant blijft in de tijd. In de economische literatuur wordt er meestal vanuit gegaan dat er afzonderlijke steady states zijn. Stel dat er twee economieën zijn met een klein verschil in de beginvoorwaarden, dan zal dit verschil, tenzij het leidt tot de keuze voor andere steady states, verdwijnen in de loop der tijd als de economieën naar dezelfde steady state convergeren. Dit betekent bijvoorbeeld dat de welvaart op de lange termijn niet wordt beïnvloed als milieubeleid op de korte termijn wordt uitgesteld.

Uit de studie blijkt dat in een economie met milieuhulpbronnen de steady states niet afzonderlijk zijn, maar dicht tegen elkaar aanliggen en continua vormen. Men kan denken aan een lijn waarvan elk punt een steady state is, in tegenstelling tot losse punten van afzonderlijke steady states. (Zie figuren 2.1 en 2.2 in het proefschrift.) Het gevolg is dat verschillen in beginvoorwaarden niet verdwijnen, maar leiden tot de selectie van een andere steady state (binnen hetzelfde continuüm). Dit

betekent dat het huidige milieubeleid blijvende invloed heeft op de welvaart in de toekomst; uitstel van milieubeleid kan tot een blijvende daling van de welvaart lijden.

*(iv) De representatie van milieukwaliteit in het formele model*

De toepassing van de theorie op de praktijk is niet zonder moeilijkheden. Eén van de belangrijke problemen is dat milieudegradatie een kwaliteitsverlies van het milieu betekent en geen vermindering van de 'hoeveelheid milieu'. Het blijkt echter dat het onderscheid tussen kwantiteit en kwaliteit formeel goed weergegeven kan worden door een onderscheid te maken tussen rivaliserende goederen en niet-rivaliserende goederen, waarbij bepalend is of het gebruik door de één het gebruik door een ander uitsluit. Bijvoorbeeld, ten aanzien van emissies is de kwantiteit belangrijk, en het gaat hier om het rivaliserend gebruik van de absorptiecapaciteit van het milieu. Bij een daling van biodiversiteit, of bij klimaatveranderingen, is de kwaliteit belangrijk, en het gaat hierbij om het niet-rivaliserend gebruik van de gesteldheid van het milieu. Dit betekent dat het formele model in principe aanknopingspunten biedt om de essentie van het gebruik van milieuhulpbronnen in de economie goed weer te geven, namelijk als een uitruil tussen de productie van rivaliserende en niet-rivaliserende goederen.

*(v) Klimaatveranderingen*

De mogelijke klimaatveranderingen en andere gevolgen (zoals een zeespiegelstijging) van de emissies van broeikasgassen maken duidelijk dat duurzaamheid een praktisch probleem is. Ondanks dat de gevolgen ernstig kunnen zijn en tot hoge kosten kunnen leiden, suggereren de meeste economisch georiënteerde beleidsmodellen dat het optimaal is om de emissiereductie zoveel mogelijk uit te stellen. Volgens dezelfde modellen zal dat leiden tot een stijging van de gemiddelde mondiale temperatuur met 3 graden Celsius in 2100, en met 6 graden Celsius in 2200. Vanwege de verdiscontering van de toekomstige kosten wegen deze niet op tegen de (lagere) kosten van emissiereducties nu.

Echter, de berekeningen met ALICE laten zien dat de prijs van emissies, en het optimale gebruik van het biogeochemische systeem sterk afhangt van de verdeling van eigendomsrechten. Als de huidige generaties het milieu als hun eigendom mogen beschouwen is het optimaal om de emissies van broeikasgassen 'gewoon' verder te laten stijgen. Dit komt erop neer dat we het milieu als afvaldepot gebruiken. Als we, in tegenstelling hiermee, toekomstige generaties een claim geven op een 'schoon milieu' - dat betekent hier, per definitie, een milieu van een kwaliteit die bereikt wordt als er vanaf nu geen netto emissies van broeikasgassen meer plaatsvinden - en een beheerfonds opzetten om deze claim te implementeren, dan komt uit de berekeningen met ALICE naar voren dat dit tot een significante reductie van de emissies leidt. De bereikte duurzaamheid blijkt niet afhankelijk te zijn van eventuele tijdsvertragingen in de milieudynamica. Deze berekeningen zijn gebaseerd op velerlei veronderstellingen, maar de conclusie lijkt gerechtvaardigd dat optimaal



klimaatbeleid niet los kan worden gezien van de intergenerationele verdeling van rechten op het milieugebruik.

Er zijn nog velerlei obstakels op weg naar een internationaal gecoördineerd duurzaam milieubeleid. De internationale politiek lijkt gematigd positief te staan tegenover initiatieven om het klimaatprobleem effectief en efficiënt aan te pakken, en laat stap voor stap de vorming van een internationaal regime zien. In de toekomst moet betaald worden voor de uitstoot van broeikasgassen, en wordt geld ontvangen voor de absorptie, bijvoorbeeld door bossen aan te planten. Tot nu toe zijn de initiatieven nog voornamelijk gericht op de *intragenerationele* verdelingsaspecten, en ze worden gebaseerd op een ‘willekeurig’ jaarlijks netto emissieplafond. De principes van het beheerfonds kunnen worden gebruikt om ook de *intergenerationele* verdeling mee te nemen. Dit kan betekenen dat de benodigde emissierechten voor de huidige uitstoot ‘gehuurd’ kunnen worden van de toekomstige eigenaren. Dit zal niet eenvoudig zijn, omdat er geen eenduidige milieuhulpbron is waarvoor we eigendomsrechten kunnen specificeren. Daarbij komt dat het precieze functioneren van het klimaatsysteem nog onduidelijk is. Derhalve zal een beheerfonds constant de activiteiten moeten aanpassen aan de laatste wetenschappelijke inzichten. De milieueconomie zal een belangrijke bijdrage hieraan moeten leveren, om zo de ontwikkeling van een internationaal regime mogelijk te maken dat een efficiënt en duurzaam milieugebruik bevordert.

**TABLE OF CONTENTS<sup>2</sup>**

Table of Contents.....	i
List of Tables .....	iv
List of Figures .....	v
List of Assumptions .....	vi
List of Theorems .....	vii
<b>1. INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
1.1. Introduction.....	1
1.2. Describing environmental resource systems .....	3
1.2.1. Current environmental concerns .....	3
1.2.2. Climate change: current status and trends .....	5
1.2.3. Four perspectives on environmental stability.....	8
1.3. Managing the environmental resources .....	11
1.3.1. The early debates .....	11
1.3.2. Social welfare as the aim of production .....	12
1.3.3. Efficiency and decentralization through markets .....	14
1.3.4. Equity and sustainability, the need for policy intervention.....	16
1.3.5. Intergenerational distribution of welfare: the role of capital transfers.....	17
1.4. Thesis and overview.....	19
1.4.1. Physical characteristics of the environmental resource systems .....	19
1.4.2. Approach.....	21
1.4.3. Overview.....	22
<b>2. AN INFINITE HORIZON OLG/DYNASTIC ECONOMY .....</b>	<b>25</b>
2.1. Introduction.....	25
2.2. Basic model formulation.....	27
2.2.1. Model set up.....	27
2.2.2. Consumers.....	28
2.2.3. Producers .....	31
2.2.4. Competitive equilibrium.....	32
2.3. Dynastic optima and OLG equilibria.....	36
2.3.1. Dynastic welfare optimum.....	36
2.3.2. OLG equilibrium.....	43
2.4. Exhaustible resources, steady states and equilibrium paths .....	52
2.4.1. Introduction.....	52
2.4.2. Steady states, general specification.....	54
2.4.3. A continuum of steady states, illustration, generalization, and discussion.....	56
2.5. Using truncated economies for applications .....	61
2.5.1. Determinacy and finite approximation of OLG economies.....	61
2.5.2. A mixed OLG/dynastic economy .....	64
2.6. Model extensions and an illustration.....	68
2.6.1. Multiple period OLG.....	68

---

<sup>2</sup> Een deel van de studie komt beschikbaar via  
[http://ohrid.cca.vu.nl/english/o\\_o/instituten/IVM/projects/phd-projects/reyer.htm](http://ohrid.cca.vu.nl/english/o_o/instituten/IVM/projects/phd-projects/reyer.htm)

2.6.2. Multiple dynasties, an illustration for OLG versus dynastic modeling.....	69
2.6.3. Irreducibility, a weakening of the strictly desired commodity assumption.....	72
2.7. Concluding remarks.....	73
ANNEXES TO CHAPTER 2.....	75
2A. Notation.....	75
2B. Extending concave (convex) functions.....	76
3. DYNAMIC EFFICIENCY IN OLG ECONOMIES.....	79
3.1. Introduction.....	79
3.2. Formal analysis.....	82
3.2.1. Introduction.....	82
3.2.2. Dynamic efficiency and the value of endowments.....	83
3.2.3. Time preference and empathy.....	85
3.2.4. A non-negligible environmental resource.....	88
3.2.5. A non-negligible income claim.....	91
3.3. The non-negligible claim, an illustration.....	94
3.3.1. Aging population causing dynamic inefficiency.....	94
3.3.2. Restoring efficiency by issuing a non-negligible claim.....	99
3.4. A non-negligible resource, an illustration.....	102
3.4.1. An exhaustible resource with amenity value, model specification.....	102
3.4.2. Steady state analysis.....	107
3.4.3. Numerical application to climate change.....	111
3.5. Conclusions.....	115
ANNEXES TO CHAPTER 3.....	117
3A. Model description for ALICE 0.....	117
3A.1. Model set up.....	117
3A.2. Steady states.....	119
3A.3. Accounting.....	120
3B. Model description for ALICE 1.0.....	120
3B.1. Demographic transition.....	120
3B.2. Function and parameter specifications.....	122
3B.3. Computation.....	123
3B.4. Accounting.....	125
4. SUSTAINABILITY IN DYNASTIC AND OLG ECONOMIES.....	126
4.1. Introduction.....	126
4.1.1. Sustainability in a competitive economy.....	126
4.1.2. Formal definition of sustainability.....	128
4.2. The dynastic framework.....	132
4.2.1. Incorporating sustainability criteria.....	132
4.2.2. Small or zero discount rates.....	134
4.2.3. Imposing physical bounds.....	135
4.3. The OLG framework.....	136
4.3.1. Intergenerational dependence.....	136
4.3.2. Environmental policies in OLG economies.....	139
4.3.3. A trust fund for attaining sustainability.....	139
4.3.4. Combining efficiency and sustainability.....	143

4.4. A single exhaustible resource with amenity value .....	144
4.4.1. Model and policy specification.....	144
4.4.2. Steady state analysis .....	150
4.4.3. Numerical application to climate change .....	157
4.5. An exhaustible resource with cause-effect delay .....	159
4.5.1. Model specification and steady state analysis.....	159
4.5.2. Numerical application to climate change .....	161
4.6. An exhaustible and a renewable resource .....	162
4.6.1. Model specification and steady state analysis.....	162
4.6.2. Numerical application to climate change .....	164
4.7. Conclusion.....	166
ANNEX 4A. MODEL SPECIFICATION FOR ALICE 1.2 .....	169
5. ENVIRONMENTAL RESOURCES AND DEMOGRAPHIC CHANGE .....	170
5.1. Introduction.....	170
5.2. An IAM with climate change.....	171
5.2.1. Introduction.....	171
5.2.2. Modeling the biogeochemical system.....	173
5.2.3. Biodiversity: variety as an aggregate (non-rival) good.....	175
5.2.4. Welfare maximization, equilibrium and specification of three policies.....	177
5.3. Numerical illustration .....	182
5.3.1. Introduction.....	182
5.3.2. Consumption, production and emissions .....	182
5.3.3. Climate change .....	185
5.3.4. Welfare.....	187
5.4. Environmental production .....	188
5.4.1. Quantity and quality; rival versus non-rival use.....	188
5.4.2. Non-convexities, indivisibilities and diffusion processes.....	190
5.5. Demography, sustainability and non-extinction.....	192
5.5.1. Demand and supply of essential resources.....	192
5.5.2. Welfare and the optimal population.....	193
5.5.3. Extending the trust fund to ensure non-extinction.....	197
6. CONCLUSIONS.....	200
6.1. Summary of main results .....	200
6.2. Further analysis with ALICE.....	204
6.3. Issues outstanding.....	205
REFERENCES.....	211
SAMENVATTING IN HET NEDERLANDS (SUMMARY IN DUTCH).....	220

**LIST OF TABLES**

Table 3.1. Characterization of steady states for ALICE 0 .....	97
Table 3.2. Scenario results for ALICE 1.0 .....	114
Table 3.3. Parameter values for ALICE 0 .....	118
Table 3.4. Parameter values for demographic transition in ALICE 1.0.....	121
Table 3.5. Population and Life-expectancy in ALICE 1.0.....	121
Table 3.6. Parameter values for consumers in ALICE 1.0.....	123
Table 4.1. Environmental policy options .....	139
Table 4.2. Scenario results for ALICE 1.0 .....	158
Table 4.3. Scenario results for ALICE 1.1 .....	161
Table 4.4. Scenario results for ALICE 1.2 .....	165
Table 5.1. Parameter values for the linear Maier-Reimer and Hasselman 5-box model .....	174

**LIST OF FIGURES**

Figure 1.1. ‘Nature ephemeral’ → ‘Small is beautiful’ .....	9
Figure 1.2. ‘Nature benign’ → ‘Laissez faire’ .....	9
Figure 1.3. ‘Nature tolerant/perverse’ → ‘Hierarchical control’ .....	10
Figure 1.4. ‘Nature capricious’ → ‘Fatalism’ .....	10
Figure 2.1. Convergence paths for distinct steady states .....	60
Figure 2.2. Convergence paths to one continuum steady state segment.....	61
Figure 2.3. Turnpike behavior and finite approximation. ....	63
Figure 3.1. Welfare and interest turnpikes for truncated economy without transfers.....	99
Figure 3.2. Relative welfare during the transition.....	101
Figure 3.3. Interest rates during the transition.....	101
Figure 4.1. Steady state selection for the strong sustainability scenario.....	152
Figure 4.2. Steady state selection for grandfathering scenario .....	153
Figure 4.3. Steady state selection for trust fund policy.....	156
Figure 5.1. Frontier of biogeochemical production possibility set.....	180
Figure 5.2. Frontier of utility possibility set.....	181
Figure 5.3. CO2 emission prices.....	183
Figure 5.4. Net CO2 emissions.....	183
Figure 5.5. man-made capital/GDP ratios.....	184
Figure 5.6. Relative consumption .....	185
Figure 5.7. Atmospheric CO2 concentrations.....	186
Figure 5.8. Global mean temperatures.....	186
Figure 5.9. Relative welfare .....	187

**LIST OF ASSUMPTIONS**

Assumption N1. Population convergence .....	28
Assumptions U1-U4. Standard properties of utility functions.....	29
Assumptions $\Omega 1$ - $\Omega 2$ . Standard properties of per capita flow endowments.....	30
Assumptions F1-F6. Standard properties of transformation functions .....	31
Assumptions H1-H5. Welfare aggregation for dynastic economy .....	38
Assumptions D1. Standard assumptions for dynastic economy .....	39
Assumptions L1-L4. Transfer functions for OLG economy .....	45
Assumptions O1. Standard assumptions for OLG economy .....	45
Assumptions M1. Standard assumptions for a mixed OLG/dynastic economy .....	64
Assumptions R1-R2. Irreducibility of the OLG economy .....	73
Assumption F7. Existence of a non-negligible resource .....	89
Assumption F8. Existence of a stationary sustainable production bundle .....	130
Assumption F9. Existence of a period-wise sustainable production bundle .....	137

**LIST OF THEOREMS**

Theorem 2.1. Existence of a dynastic optimum.....	42
Theorem 2.2. Existence of an OLG equilibrium.....	51
Theorem 2.3. Exhaustible resource with amenity value and continuums of steady states .....	58
Theorem 2.4. Existence of a mixed OLG/dynastic equilibrium.....	67
Theorem 3.1. Dynamic efficiency of a stylized economy .....	87
Theorem 3.2. Dynamic efficiency if there is a non-negligible resource .....	90
Theorem 3.3. Dynamic efficiency if there is a non-negligible claim .....	92
Theorem 3.4. Continuum of steady states for ALICE 1.0 .....	109
Theorem 3.5. Steady state welfare reduction by grandfathering policy.....	110
Theorem 4.1. Sustainability of dynastic equilibrium .....	133
Theorem 4.2. Sustainability of OLG equilibrium under Assumption F9.....	138
Theorem 4.3. Sustainability of OLG equilibrium supported by a trust fund.....	143
Theorem 4.4. Steady state welfare reduction by grandfathering policy.....	154
Theorem 4.5. Pareto improvement by trust fund policy.....	155
Theorem 4.6. Steady state welfare increase by trust fund policy.....	156

## SELECTIE VAN TEKSTEN

### Uit Hoofdstuk 2:

EXAMPLE 2.24. *An exhaustible resource with use value generating a continuum of steady states.*

Let there be a one-good economy, whose resource has regeneration factor of 2. The extracted resource can be used to produce the consumption good:  $x_y + x_o = 1 + y$  and  $y_t + k_{t+1}^p \leq 2k_t$ . To prevent unbounded accumulation of capital (Assumption F4), we may additionally assume that there is some capacity constraint in production, which however, does not become binding in the example below. We therefore omit the explicit specification of this constraint. Generations maximize a Cobb-Douglas utility function in which the second period has expenditure share 1/3. The young generation has one (unit of) endowment, the old generation none. The steady state equations are:

$$x_y + x_o = 1 + y \quad (2.51)$$

$$k = k^p \quad (2.52)$$

$$y + k^p \leq 2k \perp \lambda \geq 0 \quad (2.53)$$

$$x_y + \beta x_o = 1 \quad (2.54)$$

$$\beta x_o = 1/2 x_y \quad (2.55)$$

$$1 = \lambda \quad (2.56)$$

$$\psi = 2\lambda \quad (2.57)$$

$$\beta\psi = \lambda \quad (2.58)$$

where prices are normalized by  $p=1$ . The solution is given by  $x_y=2/3$ ,  $x_o=2/3$ ,  $y=1/3$ ,  $k=k^p=1/3$ ,  $\beta=1/2$ ,  $\psi=2$ ,  $\lambda=1$ . In the steady state, savings,  $1-x_y=1/3$ , balance with capital,  $\beta\psi k=1/3$ . So far, this steady state is not unusual. Now, let us assume that the resource is exhaustible. Extraction of the resource for consumption is still possible, but it is not possible to recover the resource afterwards by abandoning extraction. This property is formally represented by an additional constraint,  $k_{t+1}^p \leq k_t$ , which implies that any extraction of the resource is irreversible. The steady state system changes into

$$x_y + x_o = 1 + y \quad (2.59)$$

$$k = k^p \quad (2.60)$$

$$y + k^p \leq 2k \perp \lambda_1 \geq 0 \quad (2.61)$$

$$k^p \leq k \perp \lambda_2 \geq 0 \quad (2.62)$$

$$x_y + \beta x_o = 1 \quad (2.63)$$

$$\beta x_o = 1/2 x_y \quad (2.64)$$

$$1 = \lambda_1 \quad (2.65)$$

$$\psi = 2\lambda_1 + \lambda_2 \quad (2.66)$$

$$\beta\psi = \lambda_1 + \lambda_2 \quad (2.67)$$

There is one new equation (2.62), and one new variable,  $\lambda_2$ . The previous solution is still valid, for  $\lambda_2=0$ . However, the Jacobian of the system of equations has become structurally singular. The second and fourth equation partly coincide, and as a result, the steady states form a continuum. To generate the continuum of steady states, take any  $0 < k \leq 1/3$ , and we then have the solution  $x_y=2/3$ ,  $x_o=1/3+k$ ,  $y=k^p=k$ ,  $\beta=1/(1+3k)$ ,  $\psi=1+1/3k$ ,  $\lambda_1=1$ ,  $\lambda_2=1/3k-1$ . Again, life-cycle savings,  $1-x_y=1/3$ , balance with capital,  $\beta\psi k=1/3$ . ♣

### **Uit hoofdstuk 3:**

**THEOREM 3.3.** *The infinite horizon OLG equilibrium (Definition 2.16 under standard assumptions O1) exists and is (dynamically) efficient if the transfers are supported by a claim with a non-negligible real interest rate, that is given to the first generation as a transfer (equations (3.33), (3.34), and (3.35)).*

*Proof.* The implied transfers do not only depend on present and past prices. This implies that Assumption  $\Lambda 2$  is violated and Theorem 2.2 does not apply. However, the economy is equivalent to an artificial economy without transfers for which the theorem applies. In the artificial economy, endowments of all generations are reduced by a factor  $\gamma$ . Assumptions  $(\Omega 1)$  and  $(\Omega 2)$  will still be satisfied. Next, a resource is defined with a stock that regenerates itself and generates an output equal to  $\gamma$  times the original endowments. This resource satisfies assumptions  $(F1-F6)$ , and  $(F7)$  because utility is strictly increasing in the own endowments. Therefore, the constructed economy has an equilibrium, and is efficient (Theorem 3.2). Because of the equivalence, the original economy has also an efficient equilibrium. ♣



## Uit hoofdstuk 4:

TABLE 4.2. Scenario results for ALICE 1.0<sup>1</sup>

	Unit	Strong sustainability	Grand- fathering	Trust Fund
Price of emission units in first period	US\$/tC	400.	9.	50.
Cumulative Emissions	GtC <sup>2</sup>	0.	2000.	500.
Real interest rate (2020) <sup>3,4</sup>		0.056	0.086	0.051
Real interest rate after 2400 <sup>3</sup>		0.028	0.055	0.014
Welfare of first generation		1.00	1.23	1.04
Welfare of generations born after 2400		1.00	0.88	1.01

1. Without aging

2. Gigaton Carbon in CO<sub>2</sub> equivalents

3. Price ratio between two periods minus unity, on an annual basis

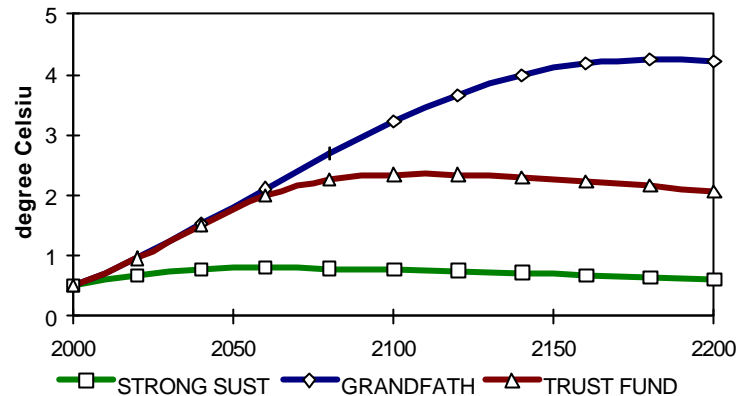
4. Between the first two periods

The first indicator is the price of emission units, and is equivalent to the CO<sub>2</sub> tax in other models. The table only shows the emission price for the first period (2000-2020) because this is the measure of direct relevance to the present day economy. Recall that the reduction of emissions is assumed to be linear in price: a 1 per cent point reduction per 4 US\$/tC. Thus, the emission price in the strong sustainability scenario (400 US\$/tC) reduces emissions by 100 per cent. The emission price of 9 US\$/tC for the grandfathering scenario reduces emissions by 2 per cent, whereas the 50 US\$/tC in the trust-fund scenario reduces emissions by 12 per cent. The activity of the trust fund increases the current optimal reduction of GHG emissions by factor six.

...

The third and fourth indicator are 'real' interest rates, defined as the price ratio for consumer goods between two periods minus unity. Their value is expressed on an annual basis. For the grandfathering scenario, the interest rates are higher than in the other two scenarios, because there is an increased demand for savings to balance the value of the capitalized biogeochemical system. The long term interest rates are in accordance with Theorem 4.4 and 4.6:  $\beta^{GF} < \beta^{SS} < \beta^{TF}$ . These outcomes relate to the lively discussion on the proper use of discount rates in the current debate on policies to address climate change, cf. [IPCC 1996, Chapter 4]. Our results suggest that a sustainable and efficient policy requires a flexible discount rate that decreases substantially in the long term. This puts to question the dynastic Ramsey-type formulation in most IAMs with exogenous and constant discount rates.

## Uit hoofdstuk 5:

FIGURE 5.8. *Global mean temperatures*

The temperature figure suggest clearly that a climate change policy has to consider the long term. As we have seen in Figure 5.4, under the trust fund policy, emissions reach their maximum during the first half of the 21<sup>st</sup> century, and the atmospheric CO<sub>2</sub> concentration reaches its maximum several decades later in the second half of the 21<sup>st</sup> century. The temperature lags still further behind and reaches its maximum by 2100 after a steady increase during the 21<sup>st</sup> century. Only after 2050, we find a small deviation between the trust fund and the grandfathering policy, which, however, increases rapidly (Figure 5.8). A policy that focuses on the short term only will easily lead to emission levels that harm generations for centuries to come. This emphasizes the need of present day actions though effects might not be witnessed by the present decision makers.