



Vlaanderen
is milieu



Blauwdruk Systeemdynamisch Model Vlaanderen

MIRA/2016/01

Blauwdruk Systeemdynamisch Model Vlaanderen

Jean-Luc De Kok, Peter Viaene, Stijn Vranckx,
Karolien Vermeiren, Guy Engelen, Inge Mayeres,
Leo De Nocker, Pieter Valkering en Wouter Wetzels

VITO

**Studie uitgevoerd in opdracht van MIRA,
Milieurapport Vlaanderen**

Onderzoeksrapport MIRA/2016/01
VITO/2015/RMA/R/0367

Januari 2016

DOCUMENTBESCHRIJVING

Titel

Blauwdruk Systeemdynamisch Model Vlaanderen

Dit rapport verschijnt in de reeks MIRA Ondersteunend Onderzoek van de Vlaamse Milieumaatschappij. Deze reeks bevat resultaten van onderzoek gericht op de wetenschappelijke onderbouwing van het Milieurapport Vlaanderen. Dit rapport is ook beschikbaar via www.milieurapport.be.

Samenstellers

Jean-Luc De Kok, Peter Viaene, Stijn Vranckx, Karolien Vermeiren, Guy Engelen, Inge Mayeres, Leo De Nocker, Pieter Valkering en Wouter Wetzels
VITO

Wijze van refereren

De Kok J.-L., Viaene P., Vranckx S., Vermeiren K., Engelen G., Mayeres I., De Nocker L., Valkering P. en Wetzels W. (2016), Blauwdruk Systeemdynamisch Model Vlaanderen, studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, MIRA, MIRA/2016/01, VITO, VITO/2015/RMA/R/0367.

Verantwoordelijke uitgever

Michiel Van Peteghem, Vlaamse Milieumaatschappij

Vragen in verband met dit rapport

Vlaamse Milieumaatschappij
Milieurapportering (MIRA)
Van Benedenlaan 34
2800 Mechelen
tel. 053 72 67 35
mira@vmm.be

Depotnummer

D/2016/6871/027

ISBN

9789491385513

NUR

973/943

Foto cover

Shutterstock

DANKWOORD

De volgende experts worden uitdrukkelijk bedankt voor hun deelname aan de workshops, die in het kader van deze opdracht werden georganiseerd, en andere bijdragen aan de uitvoering van het project of afronding van dit rapport:

Veerle Beyst, Ingrid Schockaert (SVR/DAR), Sylvie Danckaert (LV), Koen Smeets (OVAM), Patrick Wilmots (OVAM/LNE), Sara Ochelen, Kris Rongé, Kristof Rubens, Els Van Hover, Ludo Vanongeval, Axel Verachtert (LNE), Johan Couder (UA), Michel Boucneau, Johan Brouwers, Caroline De Geest, Sander Devriendt, Frans Fierens, Bob Peeters, Igor Struyf, Line Vancraeynest, Erika Vanderputten, Michiel Van Peteghem, Marleen Van Steertegem (VMM), Annette Kuhk (KUL/ASRO), Geert Mertens, Stijn Vanacker (RWO), Jochem Beullens, Marleen Govaerts, Joris Liebens (MOW), Toon Van Daele (INBO), Bert de Vries (IMEW/UU)

De volgende VITO medewerkers worden eveneens bedankt voor het leveren van een bijdrage aan de uitvoering van de opdracht: Jurgen Buekers, Felix Deutsch, Laurent Franckx, Anne Gobin, Hans Hooyberghs, Tim Op 't Eyndt, Rudi Torfs, Inge Uljee, Marlies Vanhulsel, en Katrien Bultynck.

VITO leverde uit eigen middelen een substantiële financiële bijdrage aan deze studie in voorbereiding op de Brussels Sustainable Development Summit 2015 (<https://bsds2015.vito.be/>) waarin het Systeemmodel Vlaanderen, het onderwerp van deze studie, werd ingezet.

BEPERKTE VERSPREIDINGSLIJST

Marleen Van Steertegem, Sander Devriendt, Igor Struyf, leden van het MIRA-team (VMM);

Ludo Vanongeval (LNE)

Bert de Vries (UU)

Guy Engelen, Stijn Janssen, Jean-Luc de Kok, Peter Viaene, Stijn Vranckx, Karolien Vermeiren, Leo De Nocker, Inge Mayeres, Tim Op 't Eyndt, Pieter Valkering, Wouter Wetzels (VITO)

SAMENVATTING

Dit rapport beschrijft de ontwikkeling van een eerste werkende versie van een systeemdynamisch model gericht op de ondersteuning van toekomstverkenningen rond het langetermijnmilieubeleid in Vlaanderen, zoals de Milieuverkenning. Dergelijke toekomst- en beleidsverkenningen zijn afhankelijk van de bestaande cijfers en de gebruikte projecties voor de individuele deeldomeinen (energie, water, lucht, mobiliteit ...), wat de integratie tussen de thema's bemoeilijkt. Bij de formulering van het langetermijnmilieubeleid moet onder meer rekening gehouden worden met de onzekere ontwikkeling van de beschikbaarheid van arbeidskrachten, grondstoffen, energie en water, de toegankelijkheid van bedrijfsterreinen of de versnippering van open ruimte. De interactie tussen de processen voor de verschillende deeldomeinen is van groot belang voor de tijdsafhankelijke ontwikkeling van het 'Systeem Vlaanderen' en daarmee de mate waarin beleidskeuzes tot het gewenste resultaat leiden. In toenemende mate worden narratieve verhaallijnen ingezet om toekomstverkenningen in te vullen en uiteenlopende wereldbeelden een vorm te geven, en om met geopolitieke, technologische, sociale, ecologische en andere soorten onzekerheden in de omgeving om te gaan. Kwantificering van de onderliggende conceptuele modellen door systeemdynamische modellering biedt de mogelijkheid dergelijke wereldbeelden expliciet en meer systematisch te onderzoeken en vergelijken op beleidsrelevante resultaten.

Systeemdynamische (SD) modellen of systeemmodellen vormen een natuurlijk raamwerk voor de beschrijving en analyse van de tijdsafhankelijke ontwikkeling van complexe systemen op hoofdlijnen. De systeemdynamische modellering vindt haar oorsprong in het Wereldmodel dat eind jaren '60 voor de Club van Rome werd ontwikkeld (Forrester, 1971). Een systeemdynamisch model beschrijft de terugkoppelingen tussen de toestandsvariabelen die van belang zijn voor het dynamische gedrag van het systeem. Bij dit type van modellen ligt de nadruk eerder bij een voldoende volledige weergave van het systeem en (terug)koppelingen dan de details in de beschrijving van de deelsectoren. Dit maakt het mogelijk verschillende combinaties van exogene omgevingsscenario's en beleidsscenario's op coherente wijze door te rekenen, en de impact op middellange en lange termijn te bepalen. Daarmee zijn systeemdynamische modellen zeer nuttig voor de ondersteuning van langetermijntoekomstverkenningen en beleidsanalyses. Typische kenmerken zijn een hoge mate van consistentie, flexibiliteit, transparantie en rekensnelheid. Systeemdynamische modellering neemt dan ook een centrale plaats in het eerder voorgestelde 4-stappenplan voor de ondersteuning van toekomstverkenningen voor het Vlaams milieubeleid (Op 't Eyndt, 2012):

1. Een kwalitatieve systeemanalyse om de relevante thema's, problemen en oorzaken, actoren e.d. in kaart te brengen en op hoofdlijnen met elkaar in verband te brengen, alsmede verhaallijnen voor verschillende wereldbeelden op te stellen.
2. Een kwantitatieve, systeemdynamische modellering waarmee de verhaallijnen op hoofdlijnen integraal kunnen worden doorgerekend.
3. Thematische verdieping door modellering voor de componenten van het systeemdynamische model uit Stap 2 in geval deze om meer detail vragen.
4. Toetsing van bestaande en geplande beleidsmaatregelen aan de beleidsdoelstellingen aan de hand van de modellen uit Stappen 2 en 3.

Als aanzet naar een volledig operationeel systeemmodel werd een “blauwdruk” van een systeemmodel voor het langetermijnmilieubeleid in Vlaanderen ontwikkeld. Hierin zijn de terugkoppelingen tussen toestandsvariabelen voor 10 thema’s (Demografie, Economie, Mobiliteit, Energie, Ruimtegebruik, Landbouw & Voeding, Water, Lucht, Natuur & Milieu, en Afval & Materialen) in beschouwing genomen. Het model kan volledig zelfstandig gedraaid worden om de tijdsafhankelijke ontwikkeling van het totale “Systeem Vlaanderen” voor de periode 2010-2050 door te rekenen. De architectuur van het model maakt gebruik van herbruikbare, generieke modelbouwstenen, en is in de software ExtendSim® geïmplementeerd. Met het model kan de ontwikkeling van een groot aantal beleidsindicatoren onder verschillende condities (klimaat, energieprijzen, immigratie, economische ontwikkeling ...) worden onderzocht. De aansturing van buiten het systeem is gebaseerd op demografische, economische, klimatologische en andere model-exogene variabelen, die het systeem op verschillende punten kunnen beïnvloeden. De tijdsafhankelijke ontwikkeling van deze factoren kan op verschillende wijzen worden ingesteld, om zo goed mogelijk aan te sluiten bij de kwalitatieve verhaallijnen van milieubeleidsverkenningen en toekomststudies zoals Megatrends, de Algemene Omgevingsanalyse, Welvaart en Leefomgeving, en de MIRA-milieuverkenningen. Daarmee leent het model zich zowel voor multi-actor en interactieve toepassingen rond systeemdenken als scenarioanalyses door en met domein- en milieu-experten. Met het oog op de toepassing binnen het 4-stappenplan werd ook de mogelijkheid van thematische verdieping door koppeling met een rekenmodel gedemonstreerd voor het ruimtelijk-dynamische landgebruiksmodel RuimteModel Vlaanderen.

Het nu beschikbare systeemmodel biedt een analytisch raamwerk om problemen over de grenzen van deelthema’s te analyseren. De mogelijkheid om de dynamiek van het systeem voor verschillende wereldbeelden te vergelijken, open architectuur van het model, en flexibiliteit voor aanpassingen vergemakkelijken dergelijke denkoefeningen aanzienlijk en zijn sterke eigenschappen van het model. Voor het ontwerp van complexe systeemmodellen zoals deze blauwdruk wordt doorgaans een iteratieve benadering gevolgd, waarbij het model stapsgewijs wordt aangepast zodat de resultaten en mogelijkheden zo goed mogelijk aansluiten bij de wensen en verwachtingen van de opdrachtgevers en mogelijke gebruikers. Bij de ontwikkeling van het systeemmodel is een participatieve benadering gevolgd, waarin de keuze van variabelen en causale relaties daartussen, en voorstellen voor de kwantificering van deze relaties zijn voorgelegd aan een groot aantal domein- en MIRA-experts voor de verschillende thema’s. Het binnen de beschikbare middelen en tijd ontwikkelde model is een ‘blauwdruk’ en zeker niet definitief. Dit betekent dat de basisprincipes van de systeemdynamische modellering en thematische prioriteiten en voorkeuren van potentiële gebruikers van het systeemmodel al in beschouwing zijn genomen bij de ontwikkeling, maar dat het model nog niet direct inzetbaar is voor de ondersteuning van het langetermijnmilieubeleid. Ter voorbereiding van een dergelijke operationele toepassing zou een mogelijk vervolgtraject zich in de eerste plaats moeten richten op een kritische evaluatie van de gemaakte aannames en resultaten en, indien noodzakelijk, aanpassing of verfijning van de wiskundige formuleringen voor de deelthema’s met de eerder bij het project betrokken experts. Dit zou het draagvlak en toepassingsmogelijkheden voor een toekomstige systeemdynamische inbedding van milieuverkenningen in het kader van het 4-stappen plan zeker ten goede kunnen komen.

SUMMARY

This report describes the development of the first version of a running system dynamics model aimed at supporting prospective studies for long-term environmental planning in Flanders such as the MIRA Environmental Exploration. The environmental projections and policy studies depend on the available data and forecasts which are used for the individual domains (energy, water, air quality, transport ...), thereby hampering the cross-disciplinary integration. Long-term environmental planning should among other things take into consideration the uncertain development of the availability of labor forces, material supplies, energy, the accessibility of industry zones or fragmentation of open land scape. The interaction of processes related to different domains is of key importance for the time-dependent behavior of the “System Flanders” and hence the effectiveness of different policy options. Narrative storylines are increasingly used to complete prospective studies and define different world views, and to account for the geo-political, technological, social and other uncertainties in the environment. Quantification of the underlying mental models by means of system dynamics modelling enables a comparison of these world views for policy-relevant results in an explicit and more systematic manner.

System Dynamics (SD) models, or system models, provide a natural framework for describing and analyzing the time-dependent development of complex systems at the outline level of analysis. System Dynamics Modelling originates in the World Model, which was developed for the Club of Rome by the late '60s (Forrester, 1971). A system dynamics model describes the feedback mechanisms between the state variables which determine the dynamic behavior of a system. In this type of model the emphasis lies with a sufficiently complete representation of the system and feedback mechanisms rather than details used to describe the subsectors. This makes it possible to analyze different combinations of environmental and policy scenarios in a coherent manner, and to determine the mid- and long-term impacts of the different alternatives. Therefore, system dynamics models are very useful for supporting long-term prospective studies and policy analyses. A high degree of consistency, flexibility, transparency and computational speed are typical characteristics. System dynamics modelling therefore plays a central role in the 4-step approach aimed at supporting Flemish environmental policy making (Op 't Eyndt, 2012):

1. A qualitative systems analysis to identify the relevant themes, problems, causes and actors etc., relate these to one another at the main level of analysis, and formulate story lines for the different world views.
2. Quantitative system dynamics modelling to process these story lines in an integrated and consistent manner at the main level of analysis.
3. Thematic deepening by modelling the key components of the system dynamics model resulting from step 2 in case these require a more detailed description.
4. Verification of existing and planned policy options for the given objectives by means of the models resulting from steps 2 and 3.

A “blueprint” of a system model for long-term environmental policy in Flanders was developed as a start towards a fully operational version of a systems dynamics model. The model takes into consideration the feedback mechanisms between the state variables for 10 themes (Demography, Economics, Mobility, Energy, Landuse, Agriculture and Food, Water, Air Quality, Nature and Environment, and Waste and Material Use). The model can be run independently to simulate the development of the “System Flanders” for the years 2010 to 2050. The model architecture is based on reusable, generic model building components, which have been implemented in the ExtendSim® software platform. The model can be used to analyze the dynamic development of a large number of policy indicators under different conditions (climate change, energy prices, immigration,

economic development ...). The external driving of the system depends on demographic, economic, climatological and other exogenous variables, which can affect the system in multiple ways. The temporal evolution of these factors can be set in different ways, to meet the qualitative story lines of environmental projections and future studies such as Megatrends, Welfare and Prosperity, and the MIRA environmental explorations for Flanders. This makes the model useful for multi-actor and interactive applications related to systems thinking and scenario analyses by and with domain and environmental experts. The potential for thematic deepening in view of the application in the 4-step approach has been demonstrated for the spatial-dynamic land use model RuimteModel Flanders.

The system model which is now available provides an analytical framework for analyzing problems across the thematic boundaries. The potential for comparing the dynamics of the system for different world views, open architecture of the model, and flexibility for adaptations simplify such thinking exercises considerably and are strong selling points of the model. In general an iterative procedure is followed for the design of system models such as this blueprint, with stepwise adaptations in order to ensure the results and functionalities meet the requirements and expectations of the clients and potential users as well as possible. A participatory approach has been followed for the development of the model, in which the selection of key variables and causal relationships between these variables, as well as propositions for the quantification of these relationships were presented to a large number of domain-, environmental and MIRA-team experts. The model which has been developed with the available resources and time is a "blue print". Although the basic principles of system dynamics modelling and thematic priorities and preferences of potential users of the model have been taken into account, the model cannot directly be deployed for supporting long-term environmental policy-making. Anticipating operational use of the model, a follow-up project should first focus on a critical evaluation of the model assumptions and results and, if necessary, adaptation or refinement of the mathematical formulations used for the subsystems with the experts that were involved in the project. The next step would be to select thematic models to test the exchange of data with the systems dynamics model more profoundly. This would benefit the support for and application of systems dynamics models in model-based environmental projective studies as envisaged in the 4-step approach.

INHOUD

SAMENVATTING	I
SUMMARY	III
INHOUD	V
LIJST VAN TABELLEN	VII
LIJST VAN FIGUREN	VIII
LIJST VAN AFKORTINGEN	XI
HOOFDSTUK 1. INLEIDING	1
1.1. CONTEXT	1
1.2. AANLEIDING VOOR DE OPDRACHT	3
1.3. DOELSTELLINGEN VAN DE OPDRACHT	4
1.4. KWALITATIEF ONTWERP	4
1.5. KWANTITATIEF ONTWERP EN IMPLEMENTATIE	5
1.6. TOEPASSING BELEIDSVERKENNING	6
1.7. TECHNISCH MODELRAAMWERK	7
1.8. LEESWIJZER	8
HOOFDSTUK 2. SYSTEEMDYNAMISCHE MODELLERING	9
2.1. BEGRIPPENKADER	9
2.2. SYSTEEMDYNAMISCHE MODELLERING	11
2.3. HET WORLD03 MODEL	13
2.4. IMAGE2.4	15
2.5. WADBOS2.0	17
2.6. THRESHOLD 21	19
2.7. TOEPASSINGSKADER	21
HOOFDSTUK 3. KWALITATIEF ONTWERP	23
3.1. INLEIDING	23
3.2. KWALITATIEF SYSTEEMONTWERP	25
HOOFDSTUK 4. SYSTEEMARCHITECTUUR	35
4.1. INLEIDING	35
4.2. SOFTWARE PLATFORM	35
4.3. MODELARCHITECTUUR	36
HOOFDSTUK 5. KWANTITATIEF ONTWERP	41
5.1. INLEIDING	41
5.2. DEMOGRAFIE	43
5.3. ECONOMIE	46
5.4. MOBILITEIT	53
5.5. ENERGIE	57
5.6. LANDBOUW EN VOEDING	62
5.7. RUIMTEGEBRUIK	63
5.8. LUCHTKWALITEIT	67
5.9. WATER	71
5.10. NATUUR EN MILIEU	75
5.11. AFVAL EN MATERIALEN	77
5.12. KALIBRATIE EN GEVOELIGHEIDSANALYSES	80

HOOFDSTUK 6. TOEPASSING OP HET MILIEUBELEID	87
6.1. INLEIDING	87
6.2. WLO-WERELDBEELDEN VOOR VLAANDEREN.....	89
6.3. TOEPASSING SYSTEEMMODEL OP DE WERELDBEELDEN	94
6.4. WORKSHOP SYSTEEMDENKEN BSDS 2015	98
HOOFDSTUK 7. TECHNISCH RAAMWERK.....	99
7.1. INLEIDING	99
7.2. KOPPELING RUIMTEMODEL VLAANDEREN.....	101
HOOFDSTUK 8. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	111
BRONNEN	116
ONLINE BRONNEN	125
BIJLAGE 1: SNELSTARHANDLEIDING EXTENDSIM® EN MODL	126
BIJLAGE 2: SYSTEEMDIAGRAMMEN DEELTHEMA'S	129
BIJLAGE 3: MODELBOUWSTENEN MODL	140
BIJLAGE 4: GENERIEKE TABELLEN	142

LIJST VAN TABELLEN

Tabel 3-1 Voorbeeld typische relaties in het systeemdiagram uit Figuur 3-1.	27
Tabel 3-2 Samenvatting WLO-wereldbeelden per deelthema voor toepassing op Vlaanderen (Engelen et al., 2011a).	29
Tabel 3-3 Selectie milieu-gerelateerde beleidsindicatoren systeembeschrijving Vlaanderen.	33
Tabel 5-1 Beginwaarden toestandsvariabelen voor het economisch deelsysteem.	48
Tabel 5-2 Modelparameters en bronnen economisch deelsysteem.	49
Tabel 5-3 Modelparameters en bronnen deelsysteem energie.	59
Tabel 5-4 Vergelijking van de verdeling over de verschillende bronnen van energie voor de kalibratie van de energiemodule en een gedetailleerde berekening van het Planbureau voor het GHG40 scenario.	60
Tabel 5-5 Landgebruiksklassen deelmodel ruimtegebruik voor Vlaanderen zonder Brussel.	64
Tabel 5-6 Landwaarde landgebruiksklassen categorie a voor allocatie.	65
Tabel 5-7 Gevoeligheid op basis van genormaliseerde correlatie in het bereik [-1,+1] voor de exogene variabelen. De correlaties zijn bepaald uit 10.000 simulaties (zie Tabel 5-8 voor definities) voor een kleine selectie van alle mogelijke beleidsindicatoren.	81
Tabel 5-8 Doelwaarden van de beleidsindicatoren voor de kalibratie van het BAU scenario en de vier wereldbeelden.	84
Tabel 5-9 Optimale instelling exogene variabelen voor de vier WLO-wereldbeelden, verkregen na iteratie op basis van 2.500 simulaties.	85
Tabel 6-1 De vier scenario's van de WLO studie (www.welvaartenleefomgeving.nl).	91
Tabel 7-1 Relatie landgebruiksklassen RuimteModel en Systeemmodel.	103

LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1-1 Koppeling van deeldomeinen via een systeemdynamisch model.	2
Figuur 2-1 De structuur van het oorspronkelijke World Dynamics model (Forrester, 1971).	14
Figuur 2-2 Modelstructuur IMAGE2.4 model (Bouwman et al., 2006).	16
Figuur 2-3 Systeendiagram WadBOS (Engelen et al., 2003).	17
Figuur 2-4 Systeemdynamisch model voor de economische sectoren binnen WadBOS - voorbeeld schelpenwinning.	18
Figuur 2-5 Conceptueel model voor de samenhang van ecologische en fysische toestandsvariabelen en processen binnen WadBoS (Maes, 2008).	18
Figuur 2-6 Conceptueel model van het Threshold21 raamwerk (http://www.millennium-institute.org/).	20
Figuur 2-7 Structuur T21 model voor Italië (bron http://www.millennium-institute.org/).	21
Figuur 3-1 Thematische integratie van de deeldomeinen in een systeembeschrijving gericht op het Milieubeleid in Vlaanderen. Zie Figuur 8-12 voor een gedetailleerde weergave van het totale systeem tot op het niveau van de toestandsvariabelen.	26
Figuur 3-2 Voorbeeld kwalitatief systeendiagram voor het thema “Bevolking”.	27
Figuur 4-1 Gebruik gegevensbanken door de modelbouwstenen en uitwisseling gegevens in het systeemmodel.	36
Figuur 4-2 Thematische modebibliotheken met toegang tot herbruikbare modelbouwstenen in het systeemmodel.	37
Figuur 4-3 Voorbeeld van een in ModL gecodeerde modelbouwsteen voor het Bruto Regionaal Product met dialoogvenster voor parameterkeuze, en het structuurvenster dat toegang biedt tot de ModL code en het ontwerp van het grafisch icoon.	38
Figuur 4-4 Tafelfunctie voor de invloed van “Duurzaam gedrag en beleid” op de productie van huishoudelijk afval per inwoner.	39
Figuur 4-5 Technieken om modelbouwstenen te koppelen en gegevens uit te wisselen in ExtendSim.	39
Figuur 4-6 Dashboard voor de instelling van de ontwikkeling van exogene variabelen en beleidsparameters die het systeemmodel aansturen.	40
Figuur 4-7 Voorbeeld van de visualisatie van beleidsindicatoren, zoals gebruikt in de interactieve workshop systeemmodellering tijdens de BSDS 2015 (zie Sectie 6.4).	40
Figuur 5-1 Demografisch deelmodel op basis van leeftijdscohorten.	43
Figuur 5-2 Verloop gemiddeld aantal kinderen per vrouw in de vruchtbare leeftijd van 15-49 jaar (FPB, 2014).	44
Figuur 5-3 Verloop immigratie van mannen en vrouwen (FPB, 2014).	44
Figuur 5-4 Leeftijdsprofiel immigranten (FPB).	44
Figuur 5-5 Groene, grijze en witte druk voor het BAU scenario.	45
Figuur 5-6 Modelstructuur economisch deelsysteem ontleend aan economische module ASTRA model (Fermi et al., 2014).	46
Figuur 5-7 Ontwikkeling sectorale verdeling tewerkstelling.	49
Figuur 5-8 Bijdrage deelvariabelen aan de totale sociale milieukosten voor de ISEW Lite indicator voor het BAU scenario. Het verlies aan ecosysteemdiensten is weinig significant en werd hier buiten beschouwing gelaten.	51
Figuur 5-9 Economische indicatoren voor de wereldbeelden Global Economy (GE) en Regional Communities (RC).	52
Figuur 5-10 Deelmodel voor de Mobiliteit.	53
Figuur 5-11 Voorbeeld nesting structuur modale keuze voor personenverkeer (I. Mayeres, 2015).	54
Figuur 5-12 Deelmodel voor Energie.	58

Figuur 5-13 Fractie van het finale energieverbruik die door hernieuwbare energie wordt geleverd voor verschillende scenario's. BAU is het 'business-as-usual', referentiescenario. De andere scenario's tonen het effect van wijzigingen in de brandstofprijzen en de prijs voor CO ₂ in het model. _____	61
Figuur 5-14 Verloop van het finaal verbruik voor het referentie (BAU) en twee alternatieve scenario's. _____	61
Figuur 5-15 Deelsysteem Landbouw en Voeding. _____	62
Figuur 5-16 Opzet deelmodel voor het ruimtegebruik. _____	63
Figuur 5-17 Dichtheid als functie van de druk per landgebruiksklasse. _____	65
Figuur 5-18: Schematische modelstructuur deelsysteem luchtkwaliteit. _____	67
Figuur 5-19: Aannames O ₃ -problematiek: een niet-lineair verband tussen O ₃ -overschrijdingen en NO _x -concentraties met gerapporteerde cijfers als volle symbolen en de extrapolaties als open symbolen (linker figuur). De rechter figuur toont de toename van overschrijdingen met aantal hittedagen (historische data), hiervoor wordt een lineair verband aangenomen. _____	70
Figuur 5-20 Schematische modelstructuur deelsysteem luchtkwaliteit. _____	71
Figuur 5-21 Regressies voor de relatieve emissiefactoren voor alle pollutanten samen (stikstof en fosfor) in de tijd. _____	73
Figuur 5-22 Regressies in de tijd voor de relatieve emissiefactoren voor stikstof en fosfor afkomstig van de landbouw. _____	74
Figuur 5-23 Regressies tussen de emissies voor stikstof en fosfor stoffen en de concentraties voor nitraat en fosfaat. _____	75
Figuur 5-24 Regressies tussen het aantal meetplaatsen die aan de norm voldoen en de gemiddelde concentraties voor nitraat en fosfaat. _____	75
Figuur 5-25 Deelmodel voor Natuur en Milieu. _____	76
Figuur 5-26 Tabelfunctie voor de aquatische biodiversiteit als functie van het percentage meetplaatsen waarvoor de stikstofnorm niet overschreden wordt. De waarde 100 komt overeen met de waarde van de biodiversiteit in 2010. _____	77
Figuur 5-27 Deelmodel Afval en Materialen. _____	78
Figuur 5-28 Tabelfunctie voor de invloed van de index voor 'Duurzaam Gedrag en Beleid' op de productie van huishoudelijk en bedrijfsafval. _____	79
Figuur 5-29 Semi-automatische kalibratie van de instelling voor de exogene variabelen en modelparameters in het systeemmodel. _____	82
Figuur 5-30 Voorbeeld trendaanpassing door instelling exogene variabele "Omvang huishouden" (zie ook Figuur 4-6). _____	83
Figuur 6-1 Het assenstelsel van de WLO-studie en de 4 resulterende wereldbeelden (www.welvaartenleefomgeving.nl). _____	89
Figuur 6-2 Samenhang voor de thematische integratie in de WLO-studie (Janssen et al., 2006). _____	90
Figuur 6-3 Beleidsindicatoren voor 2050 voor het BAU scenario en de vier wereldbeelden (Global Economy (1), Strong Europe (2), Transatlantic Markets (3) en Regional Communities (4)), vergeleken met het beginjaar 2010. _____	95
Figuur 6-4 Impact klimaatverandering op gezondheid en aandeel hernieuwbare energie. _____	96
Figuur 6-5 Totale broeikasgasemissies in Mton CO ₂ -equivalenten per jaar voor het BAU scenario en de vier wereldbeelden. _____	97
Figuur 6-6 Jaarlijkse productie van industrieel afval (primaire en secundaire) voor het BAU scenario en de vier wereldbeelden. _____	97
Figuur 7-1 Thematische verdieping en modellering via een systeemdynamisch model. _____	99
Figuur 7-2 Aansturing van het RuimteModel Vlaanderen door het systeemdynamische model voor Vlaanderen. _____	102
Figuur 7-3 Netto landgebruikswijzigingen in het systeemmodel tussen 2010 en 2050 in Vlaanderen, uitgedrukt als percentage van het totale oppervlak. _____	104
Figuur 7-4 Landgebruik in de regio Antwerpen in 2010. _____	105

Figuur 7-5 Landgebruik in de regio Antwerpen in 2050 volgens de 4 wereldbeelden _____	106
Figuur 7-6 Verschilkaarten 2010-2050 voor Residentieel gebied volgens de vier wereldbeelden _____	106
Figuur 7-7 Concentraties voor Werken volgens een business-as-usual scenario voor 2050 _____	107
Figuur 7-8 Verschilkaarten voor de concentratie van Werken ten opzichte van een business-as-usual scenario volgens de vier wereldbeelden voor 2050 _____	107
Figuur 7-9 Verschilkaarten voor verstedelijking ten opzichte van een business-as-usual scenario volgens de vier wereldbeelden voor 2050 _____	107
Figuur 7-10 Verschilkaarten 2010-2050 voor concentratie diensten in Vlaanderen volgens de vier wereldbeelden _____	108
Figuur 7-11 Verschilkaarten 2010-2050 voor verstedelijkingsgraad Vlaanderen volgens de vier wereldbeelden _____	108
Figuur 7-12 Integratie ExtendSim en PCRaster in het SPICOSA project (www.spicosa.eu). _____	109
Figuur 8-1 Hergebruik van modelbouwstenen in het deelmodel voor de Demografie. _____	127
Figuur 8-2 Systeemdiagram voor het deelsysteem "Demografie". _____	129
Figuur 8-3 Systeemdiagram voor het deelsysteem "Economie". _____	130
Figuur 8-4 Systeemdiagram voor het deelsysteem "Mobiliteit". _____	131
Figuur 8-5 Systeemdiagram thema "Energie". _____	132
Figuur 8-6 Systeemdiagram deelsysteem "Landbouw & Voeding". _____	133
Figuur 8-7 Opzet deelmodel voor het Ruimtegebruik. De economische sectoren Industrie en Diensten worden afzonderlijk gemodelleerd om de werking van het deelmodel beter te kunnen weergeven. _____	134
Figuur 8-8 Systeemdiagram thema "Luchtkwaliteit". _____	135
Figuur 8-9 Systeemdiagram thema "Water". _____	136
Figuur 8-10 Systeemdiagram deelsysteem "Natuur en Milieu". _____	137
Figuur 8-11 Systeemdiagram voor het deelsysteem "Afval en Materialen". _____	138
Figuur 8-12 Systeemdiagram totale systeem _____	139

LIJST VAN AFKORTINGEN

ADSEI	Algemene Directie Statistiek en Economische Informatie
BRP	Bruto Regionaal Product
CA	Cellular Automata
CAR	Calculation of Air pollution from Road traffic
DMI	Directe Materialen Input
DPSIR	Driver Pressure State Impact Response
DSS	Decision Support System
EEA	European Environment Agency
EMC	Eigen Materialen Consumptie
FPB	Federaal Plan Bureau
IMAGE	Integrated Model to Assess the Global Environment
INBO	Instituut voor Natuur en Bos Onderzoek
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISEW	Indicator for Sustainable Economic Welfare
LNE	Departement Leefmilieu, Natuur en Energie van de Vlaamse overheid
MIRA	Milieurapport Vlaanderen
MKM	Milieu Kosten Model
NARA	Natuurrapport Vlaanderen
OECD	Organisation for Economic Cooperation and Development
OVAM	Openbare Vlaamse Afvalstoffen Maatschappij
PBL	PlanBureau voor de Leefomgeving
RIVM	Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu
SDM	Systeem Dynamisch Model
SPICOSA	Science Policy Interface for Coastal System Assessment
SRES	Special Report on Emission Scenarios
SVR	Studiedienst van de Vlaamse Regering
T21	Threshold21
VITO	Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek
VMM	Vlaamse Milieumaatschappij
WadBOS	Waddenzee Beslissings Ondersteund Systeem
WLO	Welvaart en Leefomgeving

HOOFDSTUK 1. INLEIDING

1.1. CONTEXT

De dienst MIRA van de VMM heeft de opdracht om wetenschappelijk onderbouwde milieuraapportages op te stellen die voor een breed publiek toegankelijk zijn. Deze rapportages dienen ter onderbouwing van het Vlaams milieubeleid en moeten het maatschappelijk draagvlak daarvoor versterken. In het 4-stappenplan uit de “Begeleidingsopdracht Toekomstverkenningen Milieu en Natuur” (Op 't Eyndt et al., 2012) is er behoefte aan een systeemdynamische onderbouwing van toekomstverkenningen op middellange en lange termijn (2030-2050). De vier stappen uit de begeleidingsopdracht zijn de volgende:

1. Een kwalitatieve systeemanalyse om de relevante thema's, problemen en oorzaken, actoren e.d. in kaart te brengen en op hoofdlijnen met elkaar in verband te brengen, alsmede verhaallijnen voor verschillende wereldbeelden op te stellen.
2. Een kwantitatieve, systeemdynamische modellering waarmee de verhaallijnen op hoofdlijnen integraal kunnen worden doorgerekend.
3. Thematische verdieping door modellering voor de componenten van het systeemdynamische model uit Stap 2 in geval deze om meer detail vragen.
4. Toetsing van bestaande en geplande beleidsmaatregelen aan de beleidsdoelstellingen aan de hand van de modellen uit Stappen 2 en 3.

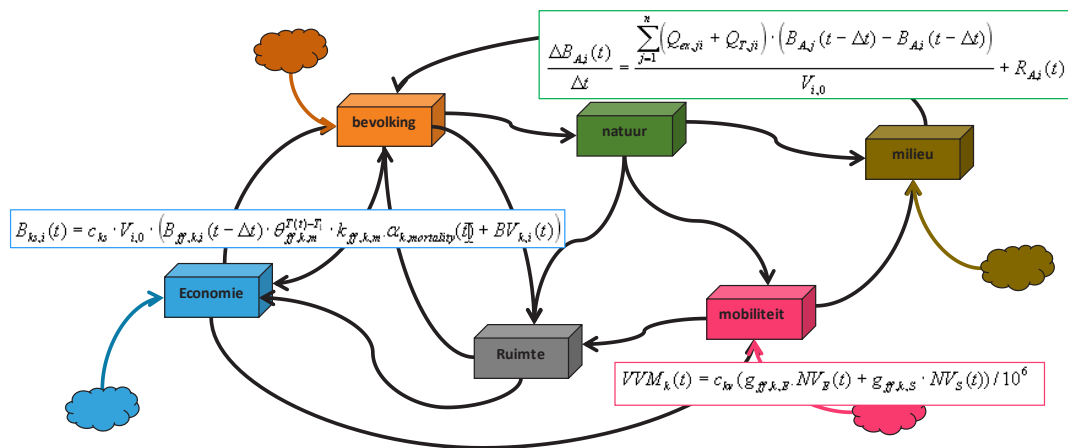
Uit de lessen die in Vlaanderen getrokken kunnen worden uit onder meer de MIRA-S (Van Steertegem et al., 2009) en NARA-S (Dumortier et al., 2009) scenariostudies, verdient het aanbeveling om in een toekomstverkenning gebruik te maken van een systeemmodellering, meer specifiek een systeemdynamische modellering.

Een Systeemdynamisch Model (SDM) kan de verbanden tussen de belangrijkste stuur- en toestandsvariabelen voor Vlaanderen op hoofdlijnen beschrijven. Dit type modellering garandeert een afdoende mate van consistentie in de verdere uitwerking van de scenario's die anders erg moeilijk te realiseren is. Ze vormt een logisch vervolg op, en bouwt voort op de resultaten van, de kwalitatieve systeemanalyse uit de eerste stap. Een systeemdynamisch model kan antwoorden leveren op vragen zoals: hoe werkt op hoofdlijnen het 'Systeem Vlaanderen' in de context van de verschillende wereldbeelden? Voorbeelden zijn de invloed van demografische ontwikkelingen op de ruimte die beschikbaar is voor landbouw, en economische groei op de luchtkwaliteit. Voor het beantwoorden van dit soort vragen zijn thematische rekenmodellen ontwikkeld, maar deze beperken zich in het algemeen tot de deeldomeinen zonder in te gaan op de onderlinge samenhang op het systeemniveau. Juist de terugkoppelingen tussen verschillende fysische, ecologische en sociaaleconomische processen kunnen in bepaalde omstandigheden van grote invloed zijn op het systeemgedrag, en daarmee de gevolgen en effectiviteit van de gekozen beleidsstrategieën. Dit is het domein van de systeemanalyse, en in het bijzonder de Systeemdynamische (SD) modellering (SDM), die haar oorsprong vindt in de jaren '60 en '70 (Forrester, 1968; Meadows, 1972; Randers, 1980; Wolstenhome en Coyle, 1983; Coyle, 1996; Stave, 2002; Meadows, 2008). Sterke punten van systeemdynamische modellering zijn onder meer (Winz et al., 2009):

- flexibiliteit m.b.t. de keuze van problemen, variabelen en relaties, alsmede het aantal deelmodellen;
- de bewezen, transparante methodiek waarvoor een groot aantal software producten (o.m. Stella®, PowerSim®, ExtendSim®, Simile® ...) beschikbaar is;
- de ruimte om modelaannames aan te passen en te testen, en in te zetten voor discussies met belanghebbenden.

In de context van deze opdracht zullen de technieken en principes uit de systeemdynamica ingezet worden om te komen tot een kwantitatief raamwerk, waarmee verschillende toekomstverkenningen op het hoogste abstractieniveau vergeleken kunnen worden. De inzet is te komen tot een meer effectieve ondersteuning en onderbouwing van toekomstig milieubeleid met het beschikbare modelinstrumentarium, met inachtneming van het systeemgedrag op hoofdlijnen. Dit betekent dat antwoord gegeven kan worden op vragen zoals: hoe reageert het ‘Systeem Vlaanderen’ op een reeks van exogene ontwikkelingen die erop afkomen? Hoe werkt dit dan door via de toestandsvariabelen en onderlinge terugkoppelingen van het systeem op de belangrijkste factoren, sectoren, en actoren? Wat betekent dit voor het beleid? Wat is de rol en het belang van het overheidsbeleid en welk zijn de instrumenten die het nog kan bespelen? Hiermee kan de respons op de sturende variabelen of ‘driving forces’ uit de DPSIR milieuverstoringsketen (OECD, 2003) worden geanalyseerd.

Een systeemdynamisch model kent een hoge mate van abstractie waarbij voorrang wordt gegeven aan de beschrijving van de (terug)koppelingen in de breedte tussen sectoren en thema’s (Figuur 1-1) boven het detail in de beschrijving van elke sector en thema in het model.



Figuur 1-1 Koppeling van deeldomeinen via een systeemdynamisch model.

Het systeemmodel kan wel een hoge mate van complexiteit hebben in de betekenis van het aantal koppelingen en terugkoppelingen tussen de sectoren, systeemcomponenten en toestandsvariabelen van het model. Dit hoeft niet te betekenen dat het model ‘complex’ is in de betekenis van ‘gecompliceerd’ of ‘moeilijk’. Integendeel, het moet zo eenvoudig mogelijk worden gehouden zodat het voldoende transparant blijft en traceerbare uitkomsten oplevert. Het is op basis van de systeemanalytische complexiteit dat het model de capaciteit heeft om contra-intuïtieve resultaten te genereren wanneer er zogenaamde omslagpunten (‘tipping points’) worden overschreden, en het systeem ander gedrag vertoont. In toekomstverkenningen die gebruik maken van de methodiek van de wereldbeelden kan men stellen dat de wereldbeelden feitelijk overeenstemmen met mogelijke toekomstige toestanden van het systeem die onderling verschillen door een aantal omslagpunten die werden overschreden in de loop van de tijd. In het paradigma

van de zelf-organiserende systemen (Prigogine, 1980) kan men stellen dat de wereldbeelden van elkaar verschillen doordat het evoluerende systeem verschillende bifurcaties heeft ondergaan en dus tot verschillende toestanden is geëvolueerd die feitelijk gelijkwaardig zijn en met een even grote waarschijnlijkheid tot ontwikkeling kunnen komen. Het systeemmodel ondersteunt aldus denkoefeningen die, zoals het vaak gesteld wordt, 'alle hoeken van de kamer verkennen'. De mogelijkheid verrassende uitkomsten te genereren die door individuele domeinexperts niet te voorzien waren is een belangrijke meerwaarde van het systeemmodel.

Een minstens even belangrijke rol van het systeemmodel is het bewaren van de consistentie tussen de systeemcomponenten in de toekomstverkenningen. Inderdaad zorgen de complexe terugkoppelingen van het systeemmodel ervoor dat veranderingen groot en klein in de ene systeemcomponent doorwerken op de andere en dit doorheen het gehele systeem. Dit geldt zowel voor de rechtstreeks als onrechtstreeks gekoppelde onderdelen van het model.

1.2. AANLEIDING VOOR DE OPDRACHT

Het 4-stappenplan zoals het uit de "Begeleidingsopdracht Toekomstverkenningen Milieu en Natuur" (Op 't Eyndt et al., 2012) is voortgekomen tracht een oplossing te bieden voor een problematiek die goed gekend is in de wetenschap, maar die vooralsnog zeer onvolledig opgelost is gebleven. Ofschoon in de wetenschap de overtuiging bestaat dat complexe problemen, niet in het minst milieuproblemen, een integrale aanpak vereisen blijkt het bijzonder lastig om dit in de praktijk te realiseren. Er bestaan algemeen twee conflicterende visies op de te volgen benadering:

- De aanhangers van thematische modellen zijn overtuigd van de noodzaak om problemen gedetailleerd aan te pakken met de best beschikbare wetenschappelijke modellen. Ze stellen dat een onderlinge koppeling van dergelijke modellen een oplossing biedt. Maar, ze lopen algemeen vast in de praktische moeilijkheden die hiermee gepaard gaan, namelijk het ontstaan van erg gecompliceerde, weinig transparante en data-hongerige modellen die nog nauwelijks te kalibreren en te valideren zijn en aldus bekend staan als 'integronsters'. Bovendien ontbreekt het aan handelbare softwaretools om deze modellen te ontwerpen, te implementeren, te draaien en te beheren op een efficiënte wijze.
- Aan het andere einde van het spectrum staan de systeemdynamicici die stellen dat de kennis van het niet-lineaire gedrag van het systeem in zijn echte volle omvang vele malen belangrijker is dan de kennis van de details in een kleiner aantal sectoren. Systeemdynamische modellen zijn daarvoor de beste oplossing. Ze zijn echt integraal, meer alomvattend, en bevatten daardoor meer verschillende processen van meer verschillende sectoren en actoren, maar ontberen de diepgang van de thematische aanpak. Vooral voor management en korte termijnbeleid wordt dit laatste vaak als problematisch ervaren omdat deze modellen niet de antwoorden leveren in het detail dat men beoogt. Er bestaan talrijke modelplatformen die het bouwen en draaien van systeemdynamische modellen ondersteunen.

Een oplossing voor het probleem kan er uit bestaan de voordelen van beide aanpakken te combineren zonder de nadelen. Een systeemdynamisch model heeft een grote meerwaarde voor de ondersteuning van beleidsverkenningen en integrale analyse van het systeem op hoofdlijnen. Indien voor bepaalde thema's of processen toch meer detail gevraagd wordt kan het systeemmodel vervolgens als raamwerk voor modelkoppeling worden ingezet, door de thematische rekenmodellen te draaien binnen de context en randvoorwaarden van het systeemdynamische model. Dit is de aanpak voorgesteld in Stap 3 van het 4-stappenplan. Een demonstratie van deze toepassing wordt in HOOFDSTUK 7 gegeven.

1.3. DOELSTELLINGEN VAN DE OPDRACHT

Het doel van deze opdracht is meervoudig en omvat zowel het ontwerp en de software implementatie van een systeemmodel voor Vlaanderen als de ontwikkeling van een presentatie waarmee de meerwaarde van het systeemdynamische model kan worden toegelicht en gedemonstreerd. Het systeemdynamische model past binnen Stap 2 van het 4-stappenplan van de Begeleidingsopdracht (Op 't Eyndt, 2012) en moet ook de mogelijke koppeling met thematische rekenmodellen ondersteunen. Als tijdshorizon voor het model wordt het jaar 2050 gehanteerd, met een tijdstap van een jaar en een typische simulatietijd van enkele minuten. Een onderliggend doel van het systeemmodel en de presentatie is ook het vergroten van het draagvlak voor systeemdynamische ondersteuning van beleidsverkenningen onder de Vlaamse beleidsinstellingen en modelontwikkelaars welke zich hiermee bezig houden. Daarom werd een breed veld van thematische en milieuexperts van de dienst MIRA en de opdrachtnemer betrokken bij het kwalitatief ontwerp van het systeemmodel, en een eerste voorstel voor de te hanteren wiskundige formuleringen voor de kwantificering daarvan. Bovendien werd tijdens de Brussel Sustainable Development Summit 2015 (Oktober, 2015) een interactieve praktijkoefening georganiseerd om de bruikbaarheid van het systeemmodel te testen.

Zoals duidelijk gesteld in de titel van de opdracht is het te ontwikkelen model een *blauwdruk* voor een systeemdynamisch model voor Vlaanderen. Hiermee wordt een eerste, werkende versie van een systeemmodel voor Vlaanderen bedoeld, ter voorbereiding van een operationeel en beleidsondersteunend systeemmodel. Het betreft dus een 'blauwdruk' voor een systeemdynamisch model. De basisprincipes van de systeemdynamische modellering en thematische prioriteiten en voorkeuren van potentiële gebruikers van het systeemmodel zijn al in beschouwing genomen bij de ontwikkeling, zonder dat het model direct inzetbaar is voor beleidsondersteuning. Na een fase waarin het model grondig wordt getest en geëvalueerd en eventueel op onderdelen wordt versterkt of van betere data wordt voorzien, wint het model snel aan inzetbaarheid voor beleidsdoeleinden. Voor zover bekend is een dergelijk model momenteel nog niet beschikbaar voor Vlaanderen, zelfs niet als 'blauwdruk'.

1.4. KWALITATIEF ONTWERP

Het kwalitatief ontwerp van het systeem bestaat uit de uitwerking van een conceptueel model voor Vlaanderen waarin de sleutelvariabelen en causale verbanden daartussen zijn vastgelegd in de vorm van een kwalitatief systeemdiagram. Dit systeemdiagram vormt het uitgangspunt voor de functionele architectuur van het kwantitatieve systeemdynamische model.

De thema's die in het systeemdiagram aan bod komen zijn: demografie en economie, ruimtegebruik, mobiliteit, energie, water, lucht, natuur, landbouw en materialen (afval). Het aantal toestandsvariabelen per thema is beperkt tot een minimum. Deze stap bouwt voort op de resultaten van de Haalbaarheidsstudie Systeemdynamische Modelling (De Kok en Engelen, 2013) en de daarbinnen ontwikkelde systeemdiagrammen. Deze systeemdiagrammen zijn in een ééndaagse workshop (12 maart, 2015) voorgelegd aan een selectie van domein- en milieuexperts om de keuze en definitie van variabelen en causale verbanden nog eens door te lichten en te verbeteren of aan te passen waar dit nodig werd geacht. Benadrukt werd dat de systeemdiagrammen het systeem op hoofdlijnen dienen te beschrijven, en vooral gericht zijn op een juiste representatie van de (terug)koppelingen die het systeemgedrag bepalen. Typische voorbeelden van dit soort terugkoppelingen zijn: de invloed van transportkosten op de economie (verlies congestie-uren), de invloed van luchtkwaliteit op de levensverwachting, en het potentieel aandeel lokale productie van landbouwproducten om in de eigen voedselbehoefte te kunnen voorzien.

De deelnemers aan de workshop werd gevraagd variabelen te definiëren en in meetbare eenheden uit te drukken, indien mogelijk. Het 4-stappenplan, de beginselen van systeemdynamische modellering, en de stand van zaken m.b.t. het kwalitatieve systeemmodel werden in de presentatie voorafgaand aan de workshop toegelicht. Daarna werden de deelnemers ingedeeld in vier groepen van 4-6 personen cf. de socio-technische subsystemen van de Megatrends studie:

- Productie & Consumptie (thema's bevolking, economie, landbouw en materialen);
- Energie (energie, bevolking, economie en lucht);
- Mobiliteit (transport, ruimtegebruik, milieu en bevolking);
- Ruimtelijke Ordening (ruimtegebruik, natuur, lucht en water).

Iedere groep kreeg de beschikking over een aantal thematische schema's voor persoonlijke notities en diagrammen voor het totale systeem op A0 formaat. De diagrammen werden bediscussieerd tijdens de workshop. Aanpassingen werden gemaakt na een extra iteratieronde met bijkomend overleg met de thema-experten. De algemene conclusies kunnen beknopt worden samengevat als volgt:

- De workshop verliep open en constructief, er lijkt onder de deelnemers een draagvlak te zijn voor de ontwikkeling en toepassing van dit type model.
- De systeemdiagrammen zijn bruikbaar, en het systeemdynamische model wordt algemeen gedragen.
- Bijkomende controle van de diagrammen op consistentie en benaming van variabelen is noodzakelijk om de gebruiksvriendelijkheid te waarborgen. Sommige onderdelen van de diagrammen bevatten nog te veel detail en horen niet thuis in de modelvergelijkingen.

De kwalitatieve systeemdiagrammen voor de afzonderlijke thema's en het totale systeem zijn inmiddels aangepast aan de opgeleverde versie van het systeemmodel en in Bijlage 2 terug te vinden (zie Figuur 8-2 tot en met Figuur 8-12). HOOFDSTUK 3 geeft een meer gedetailleerd overzicht van het kwalitatief systeemontwerp en onderliggende stappen.

1.5. KWANTITATIEF ONTWERP EN IMPLEMENTATIE

Het kwantitatief ontwerp van het systeem bouwt voort op het kwalitatieve ontwerp en omvat de wiskundige vergelijkingen en parameterinstellingen waarmee de causale verbanden uit het kwalitatief systeemmodel worden gekwantificeerd. De parameters van het model kunnen deels worden ontleend of afgeleid uit beschikbare basisgegevens (bevolkingsomvang, stikstofproductie, prijselasticiteit energiegebruik huishoudens ...) of worden ingesteld door kalibratie van de deelmodellen of het gehele systeemmodel. Om de inhoudelijke kwaliteit te waarborgen werd een tweede workshop georganiseerd (op 25 juni 2015) met grotendeels dezelfde domeinexperts als in de eerste workshop.

Het systeemmodel en de onderliggende vergelijkingen zijn geïmplementeerd in het systeemdynamische softwareplatform ExtendSim® (www.extend-sim.com). Deze keuze is te verdedigen op basis van de lage licentiekosten, flexibiliteit, vrij beschikbare demonstratielicentie, grafische functionaliteit, interface met externe bestanden (o.m. MS Excel, txt en ftp), ondersteuning van gevoeligheids- en onzekerheidsanalyses, en de ervaring van VITO met dit softwareplatform. De architectuur van ExtendSim® en het systeemmodel (zie HOOFDSTUK 4) is gebaseerd op herbruikbare en zelf te ontwerpen modelbouwstenen, die in modelbibliotheken kunnen worden opgeslagen en beheerd. Modelbouwstenen kunnen worden ontwikkeld door het manipuleren en schakelen van grafische objecten, maar kunnen evenzeer worden geprogrammeerd in ModL, een op de programmeertaal C gelijkende softwaretaal die eigen is aan

ExtendSim® en een groot aantal voorgedefinieerde functies omvat voor het aansturen van berekeningen, lezen van gegevens, en doorgeven van resultaten tussen modelbouwstenen e.d. Modellen kunnen bovendien hiërarchisch worden opgezet om de transparantie te verbeteren. De mogelijkheid om met modelbouwstenen complexe deelmodellen in te bouwen of gegevens daarmee uit te wisselen biedt een belangrijk voordeel voor de ontwikkeling en het onderhoud van het systeemdynamische model.

De implementatie van het systeemdynamische model verliep in drie stappen. Eerst werden de vergelijkingen met bijbehorende parameterinstellingen als afzonderlijke modelbouwstenen op het niveau van de toestandsvariabelen geïmplementeerd. Een voorbeeld van een dergelijke modelbouwsteen is een systeemcomponent die de omvang en het leeftijdsprofiel van de totale mannelijke en vrouwelijke bevolking van Vlaanderen van jaar tot jaar berekent. Vervolgens werden met deze modelbouwstenen deelmodellen geconstrueerd op het niveau van de deelsystemen (bijvoorbeeld Economie, Bevolking en Energie). Deze deelsystemen worden getest op het gedrag over de simulatieperiode en daarna geïntegreerd in een volledig systeemmodel. In een laatste stap werden testen met het totale systeemmodel uitgevoerd. HOOFDSTUK 5 geeft een meer gedetailleerd overzicht van het kwantitatief systeemontwerp en de implementatie van het systeemmodel.

1.6. TOEPASSING BELEIDSVERKENNING

De beleidsmatige meerwaarde van de systeemdynamische benadering boven thematische toekomstverkenningen moet blijken uit de aanvullende inzichten welke met het systeemmodel worden verkregen ten gevolge van de terugkoppelingen tussen deelcomponenten waarmee wordt rekening gehouden in het model. Dit is algemeen het geval als de terugkoppelingen tussen de demografie, economie, transport en het milieu een rol beginnen te spelen. Een voorbeeld van een dergelijke terugkoppeling is de invloed van economische groei en activiteit op de emissies naar lucht, en achtereenvolgens de invloed op de luchtkwaliteit, gezondheidseffecten, arbeidsproductiviteit en daarmee weer de economische groei. De terugkoppeling kan bovendien beïnvloed worden door het (milieu)beleid, technologische ontwikkelingen, demografische veranderingen etc. De gezamenlijke invloed van een combinatie van dergelijke terugkoppelingen in één model op de beleidsindicatoren kan complex zijn. Bovendien zijn bijbehorende toestandsvariabelen en daarmee vaak ook de relaties daartussen tijdsafhankelijk. Ook kunnen bepaalde modelrelaties gekenmerkt worden door drempelwaarden of plafonds, waarbuiten geen verandering optreedt in de sterkte van de relatie. Hierdoor kan het systeemgedrag op een zeker tijdstip sterk veranderen. De belangrijkste meerwaarde van het systeemmodel (boven thematische modellen) schuilt in de mogelijkheid om met dergelijke terugkoppelingen rekening te kunnen houden.

Toekomstverkenningen zijn denkconstructies van een nog niet bestaande werkelijkheid. Ze geven informatie over de samenhang en dynamiek van een systeem of van een samenleving in zijn geheel en zijn daardoor relevant voor het beleid (Engelen et al., 2011a). Scenario's vormen hierin paden in de vorm van verhaallijnen en rekenoefeningen naar mogelijke toekomstbeelden die verschillende interpretaties van de toekomst weerspiegelen (EEA, 2008). Toekomstverkenningen plaatsen met name het milieubeleid in zijn maatschappelijke context door keuzes te expliciteren over de aanvaardbaarheid van risico's, over hen die de risico's moeten dragen en over de sturende rol van de overheid hierin. Ze verwoorden en verbeelden aldus op een integrale wijze de onzekerheden inherent aan een duurzame toekomst en creëren het noodzakelijke kader voor gedegen kwantitatieve analyses.

Een kwalitatieve benadering voor de beschrijving van de onzekere toekomstige randvoorwaarden in toekomstverkenningen bestaat uit de formulering van sterk uiteenlopende wereldbeelden in de vorm van verhaallijnen, waarmee de “hoeken van de kamer” kunnen worden verkend. Dit is bijvoorbeeld gebeurd voor de WLO-studie voor Nederland (Janssen et al., 2006), die later vertaald is naar de Vlaamse context (Kuhk et al., 2011; Engelen et al., 2011a). De vier wereldbeelden “Global Economy”, “Strong Europe”, “Transatlantic Markets”, en “Regional Communities” verschillen in termen van de sturende rol van de overheid en de mate van globalisering, economische groei, ruimtelijke differentiatie, milieu- en immigratiebeleid e.d. Voordat een systeemdynamisch model kan worden ingezet om dergelijke wereldbeelden te analyseren dienen deze vertaald te worden in kwantitatieve indicatoren, waarmee het systeemmodel kan worden aangestuurd. Vervolgens kunnen de wereldbeelden worden doorgerekend en onderling vergeleken op beleidsrelevante indicatoren. In HOOFDSTUK 6 wordt aan de hand van enkele voorbeelden voor de naar Vlaanderen vertaalde WLO-wereldbeelden toegelicht hoe het systeemmodel kan worden toegepast voor de kwantitatieve ondersteuning van scenario analyses.

1.7. TECHNISCH MODELRAAMWERK

Voor wat de thematische verdieping in het kader van Stap 3 van het 4-stappen plan betreft is voorlopig gekozen voor een demonstratie voor het RuimteModel Vlaanderen (Engelen et al., 2011a). Voor een optimale afstemming van het systeemdynamische model op de aansturing van thematische (milieu)modellen is het noodzakelijk dat:

1. de met het systeemmodel uit te wisselen koppelvariabelen vastgelegd zijn;
2. het systeemdynamische model geschikte tijdreeksen kan leveren voor deze koppelvariabelen;
3. vastgelegd is hoe de thematische modellen met deze gegevens om kunnen gaan en welke eventuele aanpassingen nodig zijn in de thematische modellen (een ‘protocol’).

Deze afstemming richt zich hoofdzakelijk op het doorgeven van gegevens, die door de modellen gelezen en gebruikt kunnen worden voor het uitvoeren van de thematische bewerkingen. Noodzakelijke modelaanpassingen omvatten één of meer van de volgende aspecten:

- het inbreken in de tijdslus van een thematisch model en het tussentijds onderbreken van de modelberekening om sleutelvariabelen uit het systeemmodel in te lezen;
- (beperkte) wijzigingen in de broncode van het thematische model om voor- of nabewerking uit te voeren op gegevens ontvangen uit het systeemdynamische model;
- wijzigingen in de invoerbestanden of de wijze waarop deze worden gebruikt door het thematische model.

HOOFDSTUK 7 beschrijft de resultaten voor het RuimteModel verkregen met uitvoer uit het systeemdynamische model.

1.8. LEESWIJZER

Een overzicht van de achtergrond, het begrippenkader en voorbeelden van systeemdynamische modellen wordt gegeven in HOOFDSTUK 2. Ter illustratie worden enkele voorbeelden van systeemdynamische modellen toegelicht. HOOFDSTUK 3 beschrijft de gevolgde procedure en resultaten voor het kwalitatief ontwerp van het systeemmodel. Hierin worden de stuur- en toestandsvariabelen, en beleidsindicatoren beschreven voor elk van de tien deelsystemen (Demografie, Economie, Mobiliteit, Energie, Ruimtegebruik, Landbouw & Voeding, Water, Lucht, Natuur & Milieu, en Afval & Materialen). De terugkoppelingen tussen de variabelen binnen en tussen de deelsystemen zijn in de vorm van systeemdiagrammen vastgelegd (zie Bijlage 2). HOOFDSTUK 4 geeft een overzicht van de architectuur van het totale systeemmodel, die gebaseerd is op een netwerk van een groot aantal herbruikbare modelbouwstenen voor de deelthema's, en de gebruiksmogelijkheden. De kwantificering van de relaties uit het kwalitatief systeemmodel wordt in HOOFDSTUK 5 toegelicht voor elk van de deelsystemen, aan de hand van de opzet van het deelmodel, de belangrijkste vergelijkingen, en de gebruikte bronnen. Voor een gedetailleerde beschrijving van de modellen wordt verwezen naar de bijlagen in pdf-formaat met de broncode van de modelbouwstenen in ModL. In HOOFDSTUK 6 wordt het model toegepast op verschillende wereldbeelden om de gebruiksmogelijkheden en meerwaarde van het model ten opzichte van thematische rekenmodellen te onderzoeken. HOOFDSTUK 7 licht het technisch raamwerk voor de aansturing van thematische modellen toe aan de hand van het RuimteModel Vlaanderen. Het afsluitende HOOFDSTUK 8 omvat een synthese van de resultaten, beschrijft de randvoorwaarden voor de toepasbaarheid van het systeemmodel in het 4-stappenplan, en geeft een aantal aanbevelingen voor een mogelijk vervolgtraject van deze opdracht. Een literatuuroverzicht, korte handleiding voor het gebruik van ExtendSim, gedetailleerde systeemdiagrammen voor alle deelsystemen, en een overzicht van alle modelbouwstenen zijn te vinden in de bijlagen die achteraan dit rapport zijn toegevoegd.

HOOFDSTUK 2. SYSTEEMDYNAMISCHE MODELLERING

2.1. BEGRIPPENKADER

Alvorens de achtergrond en principes van de systeemdynamische modellering aan de hand van een aantal belangrijke voorbeelden van systeemdynamische modellen toe te lichten verdient het de aanbeveling een aantal kernbegrippen nog eens kort te definiëren in het kader van deze opdracht. Dit voorkomt begripsverwarring met andere studies en verduidelijkt de gehanteerde begrippen in de context van deze studie. We beginnen met enkele begrippen uit de systeemleer. Een kernachtige definitie van het begrip *systeem* werd door Dale (Dale, 1970) en later Kramer en De Smit (Kramer en De Smit, 1991) gegeven:

“... een systeem is een verzameling entiteiten tezamen met de relaties daartussen ...”

Uitgaand van deze definitie kunnen een aantal andere begrippen gedefinieerd worden. Elk systeem kan in principe hiërarchisch zijn opgebouwd en in *deelsystemen* ontleed worden (Dale, 1970), die ook weer uit entiteiten of systeemvariabelen bestaan. De keuze van deze systeemvariabelen is de verantwoordelijkheid van de domeinexperts (Dale, 1970) en legt de mate van detail of het *aggregatieniveau* van het deelsysteem vast. Een te laag aggregatieniveau kan aanvankelijk beter vermeden worden (Randers, 1980). Voor praktische toepassingen zou het totale aantal entiteiten tussen de 30 en 300 moeten liggen (Dale, 1970). Variabelen die van invloed zijn op de relaties tussen de systeemvariabelen maar geen deel uitmaken van het systeem zijn *exogeen* en behoren tot de *omgeving* van het systeem. Afhankelijk van de invloed van buiten kan onderscheid gemaakt worden tussen *open* en *gesloten* systemen. Het *systeemgedrag* kan vervolgens worden gedefinieerd als de tijdsafhankelijke verandering van de toestand van het systeem. Deze *systeemtoestand* verwijst naar de relevante eigenschappen van het systeem op een bepaald tijdstip (Dale, 1970; Ackhoff, 1981). In de regeltechniek wordt onderscheid gemaakt tussen *voorwaartse koppelingen* en *terugkoppelingen*. De laatste ontstaan wanneer de uitgangsvariabelen van invloed zijn op de ingangsvariabelen van het systeem (Kramer en De Smit, 1991). Deze terugkoppeling kan positief (versterking van hetingangssignaal) of negatief (verzwakking) zijn. De *systeemanalyse* is een wetenschappelijk benadering om complexe problemen op te lossen (Dale, 1970), vaak ondersteund door modellen. Voor deze studie zullen we de volgende, praktische werkdefinities hanteren:

- *Beleidsindicatoren* – deze beschrijven de beleidsrelevante uitgangsvariabelen van het systeem en kunnen soms overeenkomen met toestandsvariabelen. Voorbeelden zijn het Bruto Regionaal Product (BRP), Areaal Natuur of de ISEW indicator voor duurzame economische welvaart (Bleys et al., 2015) die in 1989 door Herman Daly en John Cobb (Daly en Cobb, 1989) werd voorgesteld als indicator voor duurzame economische welvaart (Wikipedia 01.07.13). Beleidsindicatoren dienen vooral leesbaar en interpreteerbaar door beleidsmakers te zijn. Wetenschappelijke, modelgerelateerde indicatoren zijn vaak minder geschikt.
- *Blauwdruk* – systeemdynamisch model waarin de ontwerpprincipes van systeemdynamische modellering (participatieve benadering, nadruk op terugkoppelingen, modellering op hoofdlijnen ...) al in beschouwing zijn genomen, maar dat nog niet voldoende operationeel is om het in te zetten voor feitelijke beleidsondersteuning.

- *Hulpvariabele*: Regelmatig is het nodig gebruik te maken van *afhankelijke* of zogenaamde hulpvariabelen. Deze combineren andere variabelen tot een bruikbaar resultaat voor de andere delen van het systeemdynamische model of de modelgebruikers. Een voorbeeld is de totale energieopwekking als som van de centrale en decentrale energieopwekking.
- *Ingangsvariabele*: variabele die hetingangssignaal naar een (deel)systeem beschrijft, vaak een toestandsvariabele waarmee een causale relatie bestaat.
- *Scenario* – een scenario beschrijft op basis van een coherente en consistente set van aannames rond kernrelaties en drijvende krachten mogelijke en/of gewenste toekomstige ontwikkelingen binnen een toekomstverkenning (Op 't Eyndt et al., 2012).
- *Stuurvariabelen* – omgevings- of beleidsvariabelen die het systeem, zoals dat gemodelleerd is, van buitenaf kunnen beïnvloeden. Voorbeelden zijn beleidsvariabelen zoals het immigratievriendelijkheid van het beleid, de uitgaven aan sociale zekerheid en investeringen in transportinfrastructuur (wegen, openbaar vervoer ...), of omgevingsvariabelen zoals klimaat, de wereldbrandstofprijs of huishoudenverduunning. Deze stuurvariabelen worden als *exogeen* beschouwd omdat deze onzeker en/of moeilijk te beïnvloeden zijn. De ontwikkeling van het beleid zelf maakt dus geen expliciet deel uit van de modelkern, maar is wel gerepresenteerd in de aansturing daarvan.
- *Systeem* – samenhangend geheel van oorzaak-gevolg relaties en terugkoppelingen tussen sturende variabelen, toestandsvariabelen en beleidsindicatoren.
- *Systeemanalyse* – systematische analyse om van problemen tot oplossingen te komen, gebaseerd op systeemdenken. Een volledige systeemanalyse omvat een kwalitatieve en kwantitatieve beschrijving van het systeem.
- *Systeemdenken* – analyse van problemen waarbij de nadruk op de samenhang tussen deelaspecten en gevolgen daarvan voor het systeemgedrag ligt, in plaats van op de afzonderlijke deelaspecten en deelmodellen.
- *Systeemdynamisch model of systeemmodel* – kwantitatief, mathematisch systeemmodel waarin het temporele aspect is meegenomen, met nadruk op de terugkoppelmechanismen van het systeem. De ontwikkeling in de tijd wordt dynamische doorgerekend, met een tijdsresolutie/tijdstap afgestemd op het doel van het model en de gemodelleerde processen (zie ook http://www.systemdynamics.org/what_is_system_dynamics.html).
- *Tabelfunctie* - grafisch instelbaar verband voor de (niet)lineaire relatie tussen twee toestandsvariabelen, waarvoor (nog) geen wiskundige formulering beschikbaar is. De punten voor de relatie worden in een tabel opgeslagen.
- *Terugkoppeling* – versterkende (positieve) of dempende (negatieve) relatie tussen twee of meer toestandsvariabelen.
- *Thematisch rekenmodel* – kwantitatief, domeingerelateerd (bijvoorbeeld energie) of sectoraal (bijvoorbeeld landbouw) model gericht op een deelaspect (of milieuthema) van het systeem zoals water- of luchtkwaliteit, ruimtegebruik of energie.
- *Toekomstverkenning* – kwalitatieve en/of kwantitatieve verkenning van toekomstige ontwikkelingen gericht op beleidstoepassing, waarbij een kwalitatieve vergelijking van de verschillende ontwikkeltrajecten voorop staat. Vanuit het beginjaar vindt een projectie plaats naar het eindjaar, eventueel via projecties voor de tussentijdse jaren. Een toekomstverkenning is gebaseerd op een systematische analyse van het systeem en wordt gekenmerkt door een hoge mate van onzekerheid (vooral veroorzaakt door maatschappelijke factoren en keuzes), dit in tegenstelling tot prognoses en projecties (Op 't Eyndt et al., 2012).
- *Toestandsvariabelen* – deze staan centraal in de systeemdynamische modellering en beschrijven de toestand van het systeem als functie van de tijd. Het gaat dan om belangrijke variabelen zoals de totale bevolkingsomvang, het areaal open ruimte of het totale energiegebruik. De causale relaties tussen deze toestandsvariabelen kunnen

kwantitatief beschreven worden of kwantitatief door een wiskundige vergelijking. De waarden van de toestandsvariabelen zelf zijn in nominale, ordinale of numerieke waarden uit te drukken.

- *Uitgangsvaariabele*: variabele die het uitgangssignaal van een (deel)systeem beschrijft, valt vaak samen met toestandsvariabelen.

Aan deze definities is al te zien dat de begrippen systeemmodel, toekomstverkenning en systeemdynamisch model gerelateerd en deels overlappend zijn. Dit betekent dat toekomstverkenningen zoals de Algemene Omgevingsanalyse (SVR, 2009), de Milieuverkenning 2030 (Paredis et al., 2009), Natuurverkenning (Dumortier et al., 2009), en de WLO-studie (Janssen et al., 2006) ook impliciet gebruik maken van systeemdenken en concepten uit de systeemdynamische modellering.

2.2. SYSTEEMDYNAMISCHE MODELLERING

De historie van de *systeemdynamische modellering* (<http://www.systemdynamics.org>) vraagt om een nadere toelichting. Het doel is het gedrag van complexe systemen onder verschillende omstandigheden te analyseren door de terugkoppelingen tussen toestandsvariabelen in kaart te brengen en te kwantificeren. Een wezenlijk uitgangspunt van SD modellering is dat de structuur van het systeem samen met de elementen bepalend is voor het gedrag van het totale systeem. De toepassingen lopen uiteen van strategische beleidsanalyse, bedrijfskunde, sociologie, populatiedynamica en ecosysteemmodellering tot econometrie evenals combinaties van deze domeinen. Meer voorbeelden zijn rijkelijk aanwezig in de tekstboeken van onder andere: de grondlegger Jay W. Forrester (Forrester, 1968), Eric F. Wolstenholme (Wolstenholme, 1983; 1990), John D. Sterman (Sterman, 2000), Peter M. Senge (Senge, 2006) en Alexey Voinov (Voinov, 2008) en gespecialiseerde tijdschriften zoals: *Systems Dynamics Review*, *Earth System Dynamics*, *International Journal of System Dynamics Applications*, *Dynamical Systems*. Typische voorbeelden van toepassingen gericht op beleidsvragen rond duurzame ontwikkeling zijn onder meer het World3-03 model (Meadows, 2004), het MedAction model (Van Delden et al., 2007), het WadBOS model voor de Waddenzee (Engelen et al., 2003; Engelen, 2004) en het IMAGE model (Bouwman et al., 2006) voor de globale gevolgen van klimaatverandering.

Typische kenmerken van systeemdynamische modellen (Sterman, 2000):

- Er wordt rekening gehouden met terugkoppelingen in het systeem tussen toestandsvariabelen.
- Het detailniveau, bepaald door de keuze van toestandsvariabelen en causale relaties, is redelijk consistent en afgestemd op de toepassing.
- Er is gekozen voor een middellange of langetermijntijdhorizon (10-100 jaar).
- De probleemcontext is bepalend voor de structuur van het systeem, eerder dan de noodzaak om beschikbare modellen en gegevens te integreren. Hierbij dient opgemerkt te worden dat in deze opdracht bewust een 'bottom-up' benadering gevolgd is die uitgaat van de beschikbare gegevens en projecties voor de verschillende thema's en sectoren.
- Elk model vraagt om afbakening, een systeemmodel moet zodanig afgebakend zijn dat de externe aansturing beperkt is tot beleidscondities en onzekere omgevingsfactoren die op het systeem inwerken, terwijl de kernprocessen binnen het systeemmodel worden afgehandeld (en modelendogen zijn). Deze onzekerheden in de aansturing van het model werken dus wel door in het systeem. Bovendien is de (endogene) kern van een modelsysteem ook onderhevig aan andere onzekerheden t.g.v. de gemaakte aannames, parametrisaties e.d.

Systeemdynamische modellen worden, afhankelijk van de gekozen tijdstap, ook gekenmerkt door een hoge rekensnelheid. Typerend voor systeemdynamische modellering is de toepassing van zogenaamde differentievergelijkingen. Hierin wordt de nieuwe waarde van een toestandsvariabele X op tijdstip $t+\Delta t$ berekend uit zijn waarde voor het vorige tijdstip t :

$$X(t + \Delta t) = X(t) + \left(\frac{dX}{dt}\right) \times \Delta t$$

waarin Δt de tijdstap is. Meer complexe differentievergelijkingen, waarin toestandsvariabelen gecombineerd worden, en, algebraïsche vergelijkingen, worden ook toegepast. Een andere mogelijkheid is het gebruik van grafisch instelbare 'tabel functies' (zie ook Sectie 4.3).

De Systeemdynamische Modellering (SDM) vindt haar oorsprong in de jaren '50 toen Jay W. Forrester van het Massachusetts Institute of Technology de taak op zich nam methoden uit de techniek en exacte wetenschappen toe te passen om bedrijfsprocessen te analyseren (Wikipedia 23.01.13). Forrester was in staat problemen met betrekking tot de productie en werkgelegenheid te verklaren aan de hand van de onderliggende terugkoppelmechanismen ('feedbacks'). Een belangrijk kenmerk van het gebruikte systeemmodel was het onderscheid tussen toestandsvariabelen (zgn. 'stocks' of 'levels') en in- en uitgangsvaariabelen (Kramer en De Smit, 1991) die de verbanden daartussen beschrijven (zgn. 'flows' of 'rates'). Verder wordt indien nodig rekening gehouden met de mogelijkheid van tijdsvertragingen ('time delays') in de processen. De resultaten van dit werk zijn beschreven in *Industrial Dynamics* (Forrester, 1961). Tot op heden is de analyse van bedrijfsprocessen nog steeds een van de meest voorkomende toepassingen van SDM, wat ook zijn weerslag heeft op de mogelijkheden en beperkingen van de softwareomgevingen die hiervoor ontwikkeld zijn. De systeemdynamische modellering leent zich echter voor een groot aantal andere toepassingen. Eind jaren '60 verscheen een toepassing op het gedrag van sociale systemen van de hand van Forrester (Forrester, 1969). In 1970 werd Forrester door de Club van Rome uitgenodigd een systeemmodel te ontwikkelen waarmee een mogelijke wereldcrisis als gevolg van de eindige draagkracht van hulpbronnen ('carrying capacity') zou kunnen worden beschreven. Dit leidde tot het World-2 model, dat beschreven is in *World Dynamics* (Forrester, 1970). Het World-2 model legt gekwantificeerde verbanden tussen de beschikbaarheid van voedsel, energie, bevolkingsomvang en industriële productie (www.systemdynamics.org) en voorspelde een wereldcrisis in de 21^e eeuw. Op grond hiervan liet de Club van Rome een verbeterde versie van het model ontwikkelen, World3, dat in 'Limits to Growth' beschreven is (Meadows, 1972). De kritiek op de gebruikte systeemdynamische benadering richtte zich vooral op het realisme van het model en de beperkte kwantificeerbaarheid van het grote aantal variabelen en in te stellen parameters dat voor de beschrijving van complexe sociale systemen noodzakelijk was. Volgens de systeemdynamici (Featherston and Doolan, 2012) doet dergelijke kritiek echter tekort aan de fundamentele waarde van SDM, welke is gericht op het begrijpen van systeemgedrag eerder dan een zo nauwkeurig mogelijke weergave daarvan. Het belang van de systeemdynamische modellering blijkt ook uit het grote aantal toepassingen gedurende de afgelopen decennia. Zo heeft de System Dynamics Society aan het Massachusetts Institute of Technology een bibliografie samengesteld voor de periode 1950-2010 waarin meer dan 900 boeken, 2000 wetenschappelijke publicaties en 500 rapporten zijn opgenomen over systeemdynamische modellen of studies waarin een systeemdynamische benadering werd gevolgd (www.systemdynamics.org). Vanaf de jaren '90 verschenen ook steeds meer milieugerichte toepassingen van de systeembenadering met een toekomstverkenning of beleidsgericht doel zoals het IMAGE2.4 model (Kram en Stehfest, 2006) en TARGETS model van het RIVM, het MedAction model (Mulligan, 2000), het WadBOS (Engelen et al., 2003) model en het Elbe DSS (De Kok et al., 2009). Veel milieugerelateerde modelleerprojecten waarin integratie tussen verschillende kennisdomeinen een belangrijke rol speelt volgen in feite een systeemdynamische benadering. Voorbeelden daarvan zijn de Europese projecten SPICOSA

(www.spicosa.eu), waarin de koppeling tussen de sociale, ecologische en fysische processen in kustzones centraal stond, en MODULUS (Engelen et al., 2000), dat zich richt op gevolgen van klimaatverandering en landdegradatie in het Middellandse Zeegebied (<http://www.riks.nl/projects/MODULUS>).

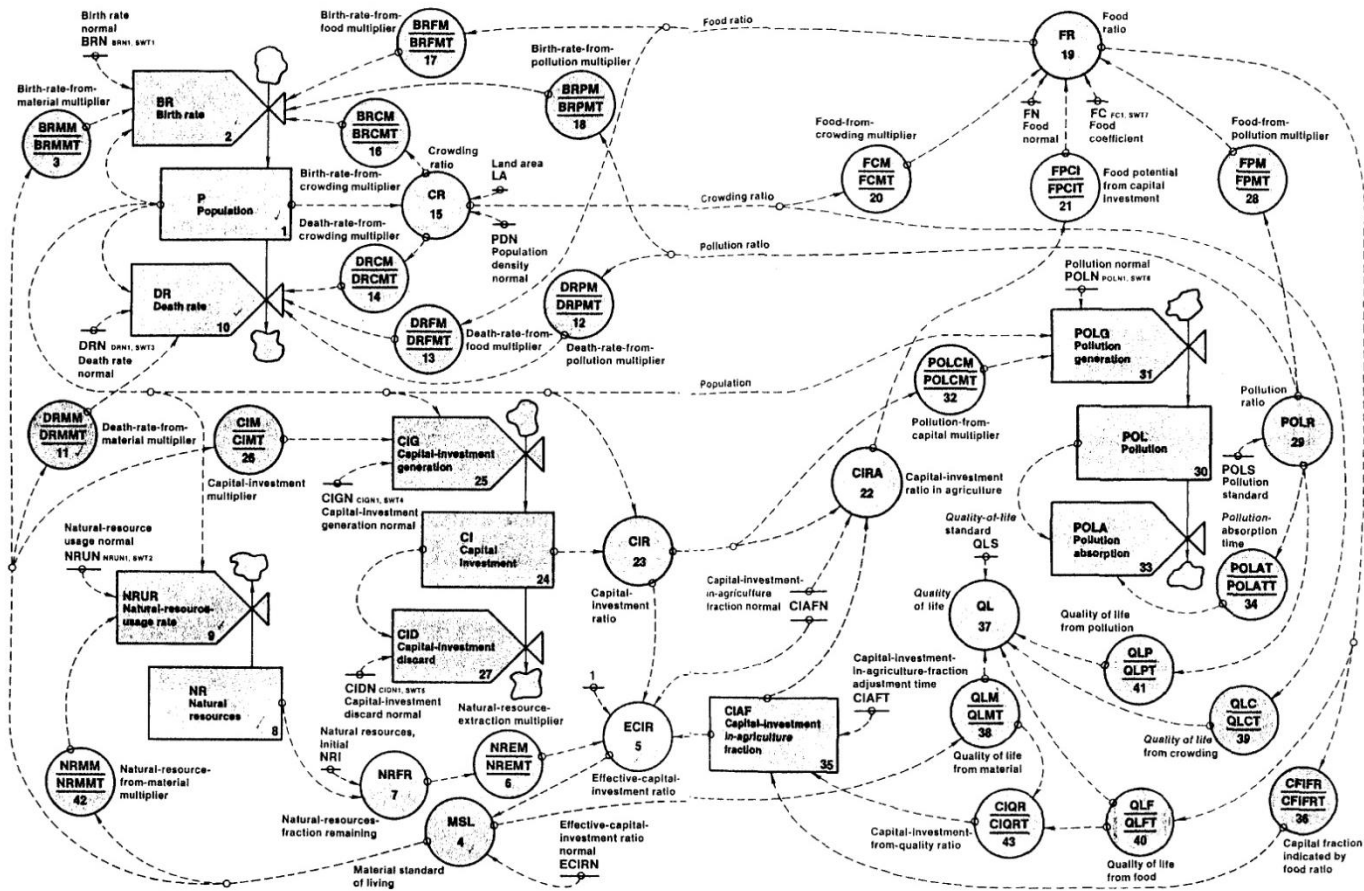
In de volgende paragrafen worden een aantal inspirerende voorbeelden van systeemdynamische modellen kort besproken.

2.3. HET WORLD03 MODEL

Het World03 model, waarvan in 1991 en 2000 verbeterde versies verschenen, omvat vijf gekoppelde deelmodules voor de bevolking, industrie, voedsel en landbouw, vervuiling en de niet-herbruikbare hulpbronnen. Voor de oorspronkelijke implementatie van het model is gebruik gemaakt van de modelleertaal DYNAMO, later gevolgd door onder meer Stella[®]. Inmiddels is er ook een web-gebaseerde applicatie (<http://www.iseesystems.com/software/NetSimWizard.aspx>). Deze versie van het World Dynamics model vormt de basis voor de globale duurzaamheidsverkenning die in “Limits to Growth” beschreven is (Meadows, 1972). In 2003 verscheen een nieuwe 30-jarige update van het model (Meadows et al., 2004). Hierin was onder meer een welzijnsindex en ecologische voetafdruk opgenomen (Lighthouse Leadership, 2010).

De modelberekening heeft betrekking op de periode 1900-2100 (tot 1970 kalibratie). Het wereld systeem wordt iteratief doorgerekend, waarbij onderscheid gemaakt wordt tussen de toestandsvariabelen (“levels”) en stroomvariabelen (“rates”) die tot verandering van de voorgaande kunnen leiden. Een voorbeeld is de bevolkingsomvang, een toestandsvariabele die afhankelijk gesteld is van de geboorte en sterftcijfers. Het World03 model en de eerdere versies daarvan is een sterk geaggregeerde representatie van de processen die in werkelijkheid plaatsvinden. Verfijning van de toestandsvariabelen en stroomvariabelen is mogelijk, en soms zinvol. Bijvoorbeeld door de bevolkingsomvang per leeftijdscohort te berekenen, rekening te houden met de invloed van armoede op geboortecijfers, en tijdsvertragingen in de relatie tussen variabelen. Buiten beschouwing blijven in World03 model onder meer de sociale en politieke factoren, en bijvoorbeeld ook fysische en biochemische processen (water, klimaat ...). Door aanpassing van de groei voor belangrijke variabelen zoals de bevolkingsomvang via geboortebeperving, beperking van vervuiling en groene industrie en efficiënter gebruik van grondstoffen (Lighthouse Leadership, 2010) konden vier verschillende ontwikkelingen met het model beschreven worden:

- continuering van de bestaande trends (‘business-as-usual’);
- geleidelijke groei tot stabiliteit bereikt is;
- oscillatie rond een stabiel niveau;
- ineenstorting door overconsumptie en achteruitgang van hulpbronnen (“overshoot and collapse”).



Figuur 2-1 De structuur van het oorspronkelijke World Dynamics model (Forrester, 1971).

http://www.friends-partners.org/GLOSAS/Peace%20Gaming/System%20Dynamics/World%20Dynamics-II/WD_Model_Diagram/WD_Diagram.html

De belangrijkste conclusie was dat de grenzen van de groei binnen 100 jaar (gerekend vanaf 1972) bereikt zouden zijn. Na ruim dertig jaar was het mogelijk de modeluitkomsten te toetsen tegen de waargenomen trends gedurende de periode 1972-2008 (Turner, 2008). Deze vergelijking viel, ondanks de vereenvoudigde representatie van de werkelijkheid, in het voordeel van het World03 model uit: de berekende bevolkingsgroei, voedselproductie en het gebruik van niet-herwinbare hulpbronnen stemden redelijk tot zelfs goed overeen met de waargenomen trends. Tegelijkertijd kan worden vastgesteld dat de mensheid toch het standaard 'business-as-usual' scenario gevolgd heeft en niet een van de alternatieve ontwikkelingen die met het model konden worden beschreven (Lighthouse Leadership, 2010).

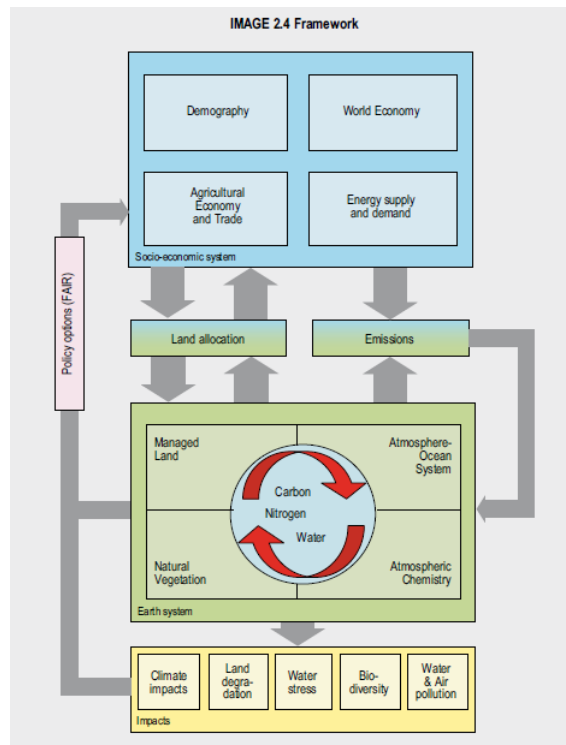
Kennelijk heeft het World03 model geen rol gespeeld of politieke betekenis gehad. Maar, het model en zijn gebruik door de Club van Rome heeft ontegensprekelijk een belangrijke maatschappelijke discussie op gang gebracht die helaas ook deels is vervallen in een polemiek tussen aanhangers en tegenstanders. Zonder meer kan gesteld worden dat de resultaten van de modeloefening het bewustzijn hebben gestimuleerd dat hulpbronnen eindig zijn, dat milieuproblemen reëel zijn, en dat oplossingen moeten komen van een integrale aanpak.

Zoals in de meeste systeemodynamische modellen wordt in het World03 model (nog) geen rekening gehouden met de ruimtelijke aspecten: toestandsvariabelen zijn geaggregeerd tot op het wereldniveau. In totaal gebruikt het model meer dan veertig toestandsvariabelen en parameters. De beschrijving van het systeem op hoofdlijnen met een beperkt aantal toestandsvariabelen vereenvoudigt de inpassing van thematische modellen.

2.4. IMAGE2.4

Het IMAGE (Integrated Model to Assess the Global Environment) model (Bouwman et al., 2006) biedt een raamwerk om de interactie tussen processen op wereldschaal te analyseren (bevolkingsgroei, landgebruik, klimaat, water, koolstof en stikstofcyclus). De macro-economische en demografische ontwikkelingen zijn de belangrijkste sturende variabelen. Het IMAGE model is voor een groot aantal beleidstoepassingen ingezet, de belangrijkste daarvan de ondersteuning van klimaatgerelateerde IPCC-SRES emissiescenario's (De Vries, 2000). Het model is te complex voor algemeen gebruik en wordt hoofdzakelijk toegepast door de ontwikkelaars van RIVM. De eerste versie van het model IMAGE1.0, dat als Integrated Assessment Model wordt beschouwd, verscheen in de late jaren '80 en was gebaseerd op een koppeling van deelmodules op het globale niveau (Rotmans, 1990). Inmiddels worden 24 regio's onderscheiden, waaronder West Europa (Bouwman et al., 2006). De aan landgebruik gerelateerde processen worden met een relatief hoge resolutie van $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (ca. 50 x 50 km in NW Europa) beschreven, wat het bijzonder geschikt maakt voor ruimtelijke toepassingen en de modelintegratie. De tijdshorizon is ca. 100 jaar (pers. comm. A. Gobin). Kenmerkend voor IMAGE is de toepassing van regionale emissiemodellen en raster-gebaseerde biofysische modellering (Bouwman et al., 2006). Er zijn drie gekoppelde basismodules voor energiegebruik en industrie, de terrestrische omgeving, en de oceaana-atmosfeer module waarin de opbouw van broeikasgassen wordt berekend. Veranderingen in de patronen voor neerslag en temperatuur worden ontleend aan globale klimaatmodellen, die worden geschaald tot op het regionale niveau. Een schematische weergave van de structuur van de laatste modelversie, IMAGE2.4 is in Figuur 2-2 te vinden.

De eigen demografische module (PHOENIX) maakt gebruik van een cohortenmodel voor 28 regio's op basis van 100 jaarklassen per geslacht. De regionale fertiliteits-, mortaliteits- en migratiecijfers zijn gekoppeld aan economische (GDP, uitgaven onderwijs etc.) en milieufactoren (aanbod voedsel en water, temperatuur etc.). De gegevens op macroniveau (nationaal, regionaal) worden verdeeld tot op het niveau van de rastercellen.



Figuur 2-2 Modelstructuur IMAGE2.4 model (Bouwman et al., 2006).

Het IMAGE2.4 model kan ook met exogene bevolkingsprojecties werken. Het TIMER model gebruikt een systeem-dynamische benadering om de langetermijnontwikkeling van vraag en aanbod van energie te beschrijven, aangestuurd door de demografische en economische ontwikkeling. Er is sprake van 26 regio's en 12 energiedragers (kolen, olie, gas, biomassa, waterstof etc.). Hernieuwbare bronnen zijn ook meegenomen. De terugkoppeling tussen vraag en aanbod verloopt voornamelijk via de energieprijzen. Verder is er een module voor de productie en handel van voedsel (GTAP) die gebruik maakt van de economische waarde van land. De voedselproductie en vraag worden door biofysische modellering (bodemgeschiktheid e.d.) berekend. Deze is ruimtelijk verdeeld met terugkoppeling naar het economische model. Het gecombineerd gebruik van verschillende modelparadigma's vraagt nog om meer onderzoek. Andere modules beschrijven veeteelt (twee typen landgebruik), het landgebruik (HYDE3), de uitwisseling van koolstof tussen de terrestrische biosfeer en CO₂ in de atmosfeer, het transport van nutriënten (N, P) uit punt- en diffuse bronnen, klimaatverandering (ECBilt), biodiversiteit, en een kostenmodel (FAIR). Het FAIR model kan ook interactief ingezet worden om de communicatie tussen onderzoekers en beleidsmakers te ondersteunen (www.mnp.nl/fair). Dit FAIR model bestaat uit een vereenvoudigde versie van het klimaatmodel dat in IMAGE gebruikt wordt, een emissiemodel, en een kostenmodel. In de context van deze studie laat het IMAGE model zich als volgt samenvatten:

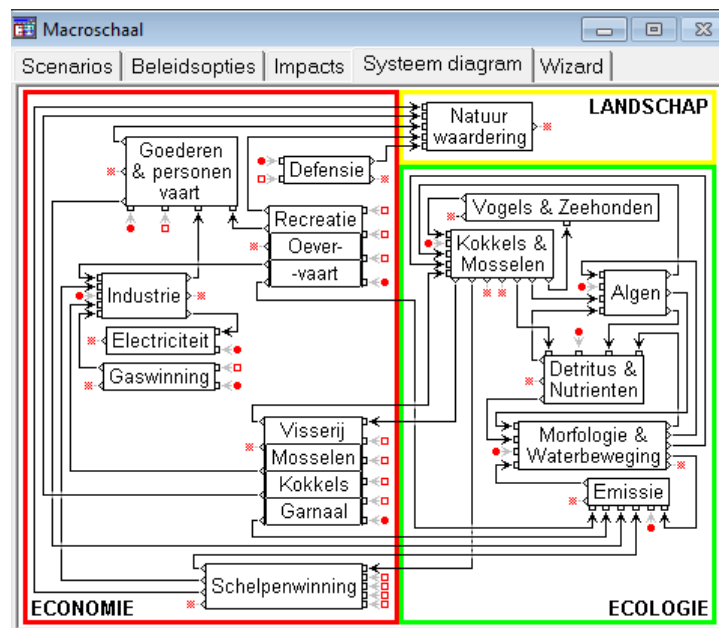
- langetermijnperspectief, tijdhorizon 50-100 jaar;
- gebruik van het model vraagt domeinexpertise;
- ruimtelijke differentiatie op basis van regio's en 50x50 km raster;

- combinatie eigen en exogene modules wordt ondersteund;
- deels conflicterende modelparadigma's;
- operationele inzet beleidsanalyse op globaal en EU niveau;
- scenario analyse mogelijk;
- geen expliciet ruimtelijke modellering; vraagt om veelvuldig schalen modelvariabelen;
- toepassing/aansluiting op bestaande nationale en regionale databases.

Algemeen kan gesteld worden dat het IMAGE model, net zoals veel integrale modellen, vooral een modelketen is waarin thematische modellen zijn opgenomen die nogal wat variatie in complexiteit vertonen. Dit betekent dat de beschikbaarheid van rekenmodellen deels sturend is geweest voor de invulling van de thema's, eerder dan de noodzaak om alle terugkoppelingen goed te beschrijven. Op het hoogste, macroniveau (zie Figuur 2-2) is er wel sprake van terugkoppelingen.

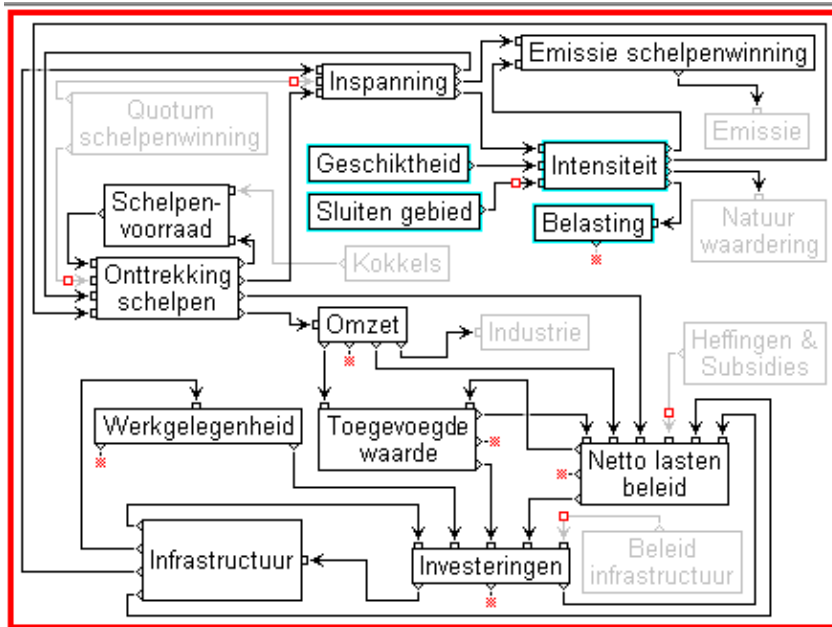
2.5. WADBOS2.0

Het WadBOS model (Uljee en Engelen, 2002; Engelen et al., 2003) is een beleidsondersteunend instrument voor de Waddenzee in Nederland waarmee beleidsmakers, wetenschappers en belanghebbenden de gevolgen van verschillende scenario's en beleidskeuzes kunnen analyseren (Figuur 2-3). Het WadBOS2.0 model is bedoeld voor de integratie van kennis uit verschillende domeinen en de ondersteuning van communicatie. De resultaten zijn ook beschikbaar in de vorm van GIS-bestanden. De tijdhorizon is 120 maanden, maar kan worden aangepast. De tijdsresolutie van de gemodelleerde processen varieert van dagen tot jaren. Er zijn twee geografische niveaus te onderscheiden. Op het macroniveau worden processen globaal beschreven (gehele Waddenzee of 12 compartimenten), op het microniveau gaat het om cellen van 25 ha. De uitwisseling van informatie tussen beide niveaus is significant. GIS-kaartlagen voor de geschiktheid, beleidsstatus, intensiteit van menselijke activiteiten, blootstelling en druk ("pressure") worden gebruikt om de dynamische verdeling van variabelen op het microniveau te bepalen.



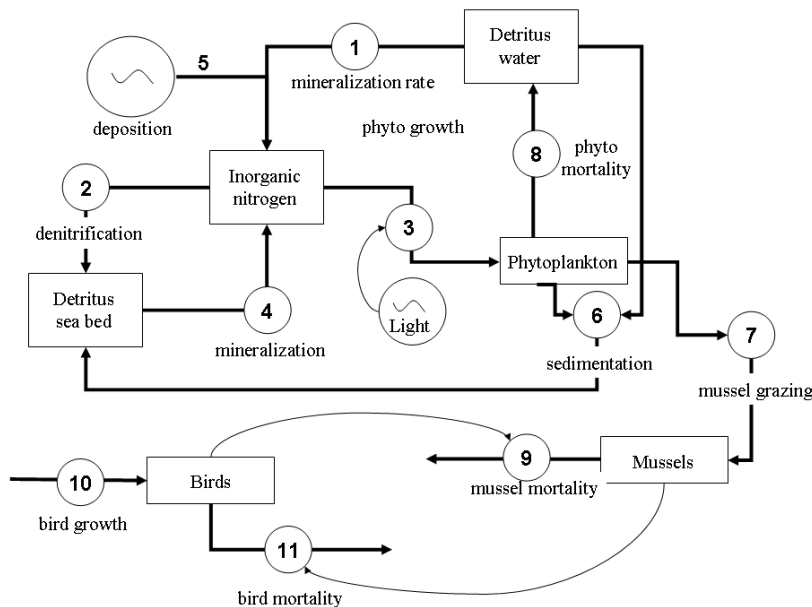
Figuur 2-3 Systeemdiagram WadBOS (Engelen et al., 2003).

Zoals het systeemdiagram laat zien is sprake van een hoge mate van integratie tussen de ecologische en economische deelmodellen. Economische modules waarin de wisselwerking met de ecologie sterk is, zoals die voor de kokkelvisserij en recreatie, zijn in detail uitgewerkt, andere zoals de gaswinning en defensie worden met minder detail weergegeven op basis van scenario's en kaartlagen. Voor de uitgewerkte economische deelmodellen wordt een generiek systeem-dynamisch model gebruikt met als belangrijkste variabelen: de beschikbare infrastructuur, de inspanning, de werkgelegenheid, de toegevoegde waarde, investeringen en winst (zie Figuur 2-4). Beleidsopties betreffen bijvoorbeeld beperkingen op de infrastructuur en quotamaatregelen.



Figuur 2-4 Systeemdynamisch model voor de economische sectoren binnen WadBOS - voorbeeld schelpenwinning.

De ecologisch-fysische modules zijn gebaseerd op het EcoWasp model (Brinkman, 1993) (Figuur 2-5). De binnen WadBOS gebruikte versie van EcoWasp werkt op basis van één enkele verticale (water)laag maar wel met 12 compartimenten.



Figuur 2-5 Conceptueel model voor de samenhang van ecologische en fysieke toestandsvariabelen en processen binnen WadBoS (Maes, 2008).

De primaire productie wordt dynamisch berekend. Vijf manieren waarop socio-economische activiteiten het natuurlijke systeem beïnvloeden worden ruimtelijk-dynamisch becijferd: aanwezigheid, verstoring, geluid, ontginning, en emissies. De emissies van olie, PAK's, TBT's, en koper worden berekend maar hebben geen invloed op het ecosysteem omdat de normstelling niet wordt overschreden. Er is ook nog een derde module voor de ruimtelijke waardering. Deze berekent een kaart voor de landschappelijke waarde op basis van de invloed van menselijke activiteit en aanwezige ecotopen.

In totaal is het economisch deelmodel voor de activiteiten op een tiental toestandsvariabelen gebaseerd, het ecosysteemmodel werkt met acht toestandsvariabelen.

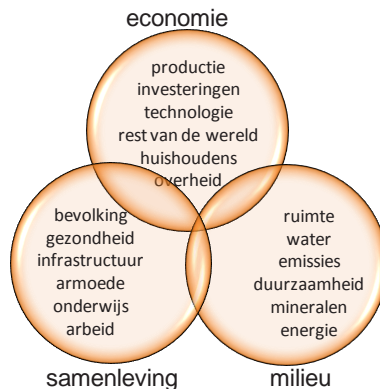
De belangrijkste kenmerken van WadBOS2.0:

- sterke integratie biofysische en economische deelmodellen;
- ruimtelijke differentiatie weergegeven in kaartlagen;
- beleidstoepassingsdoel maar beperkte operationele inzet;
- hiërarchisch opgebouwd systeemmodel;
- geen directe integratie/aansturing modellen van derden (alleen herimplementatie en vereenvoudiging);
- detailniveau deelmodellen vergelijkbaar;
- het abstractieniveau van de deelmodellen is vereenvoudigd omwille van de consistentie op systeemniveau.

2.6. THRESHOLD 21

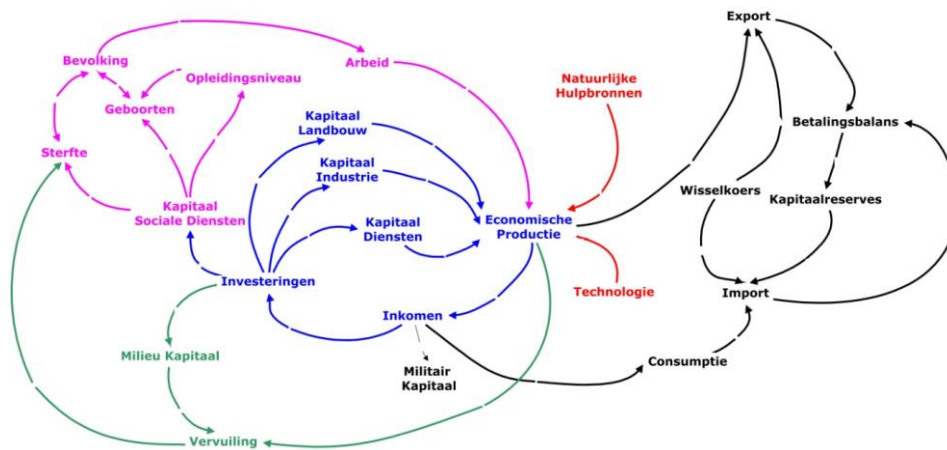
Het Threshold 21 (T21) model (Millenium Institute, 2013a; 2013b) werd de afgelopen 20 jaar ontwikkeld door het Millenium Institute (www.millenium-institute.org) in samenwerking met de Wereldbank, VN en NGO's en is vooral bedoeld om de langetermijnplanning van landen te ondersteunen. Het betreft een systeemdynamisch model met een relatief groot basisraamwerk met ongeveer 60 toestandsvariabelen, duizenden vergelijkingen en terugkoppelingen. De gebruikte simulatiesoftware is Vensim (www.vensim.com). Typische deelmodellen en factoren in een T21 model zijn een demografisch model op basis van leeftijdscohorten, een economisch model dat rekening houdt met vraag en aanbod voor deelsectoren, prijsontwikkeling, belastingen en investeringen, de invloed van geletterdheid op de vruchtbaarheid en levensverwachting, het onderscheid tussen hernieuwbare en niet-hernieuwbare hulpbronnen, lucht- en watervervuiling, broeikasgassen en de invloed van de gezondheid op de bevolkingsgroei en productiviteit. Het macro-economisch model is een input-output model ("social accounting matrix") waarin rekening gehouden wordt met de economische uitwisseling tussen sectoren. De finale vraag is gebaseerd op de bevolkingsomvang en inkomen per hoofd van de bevolking. De coëfficiënten uit het input-output model worden met intervallen van jaren vastgelegd; in principe is een i/o model dus een statisch model. Dit betekent dat de structuur van de economie zeer gedetailleerd is vastgelegd. Toch kan een dergelijk model in een dynamische modelcontext worden ingezet. In de eerste plaats kunnen exogene, sturende variabelen zoals de consumptie als functie van de bevolkingsomvang tijdsafhankelijk gemaakt worden. Hetzelfde kan gebeuren met de coëfficiënten uit de input-output tabel. Dit laatste betekent dat de structuur van de economie en daarmee de interacties tussen sectoren variabel worden. Het detailniveau kan naar behoefte worden aangepast. Het T21 modelsysteem is in feite open en de nationale economie staat in wisselwerking met een sector "Rest van de Wereld", met inbegrip van handel, kapitaalstromen en schulden e.d. Het basisraamwerk omvat 37 modules die zijn verdeeld over de hoofdthema's ("spheres") economie, samenleving en milieu, en weer zijn opgedeeld over 18 sectoren welke aan specifieke deelthema's

gekoppeld zijn (Figuur 2-6). Deze sectoren kunnen zelf weer uit meerdere deelmodules bestaan zoals vraag en aanbod van water voor de sector water. Interacties tussen modules binnen en tussen sectoren zijn mogelijk. Het detailniveau van de modules is zodanig gekozen dat de inhoud te overzien blijft voor de gebruikers.



Figuur 2-6 Conceptueel model van het Threshold21 raamwerk (<http://www.millennium-institute.org/>).

De toepassing van het basisraamwerk om te komen tot een nationaal systeemmodel naar de wensen van de gebruikers is een interactief en iteratief proces met nationale belanghebbenden en experts dat ongeveer een jaar vraagt. Hierbij wordt het model afgestemd op de wensen van de gebruikers en gekalibreerd aan de hand van historische gegevens. Een gekalibreerd T21 model kan worden ingezet voor het testen, volgen en evalueren van nationale beleidsplannen op middellange en lange termijn. Inmiddels zijn meer dan 15 van dit soort integrale modellen ontwikkeld voor onder meer Italië (Barney et al., 1998), de Verenigde Staten (Bassi et al., 2010), het eiland Saint Lucia, en China (investeringen auto-industrie en milieueffecten). De bestaande toepassingen richten zich met name op armoedebestrijding in het kader van de Millennium Development Goals (<http://www.un.org/millenniumgoals>) en andere nationale beleidsplannen. Een aangepast T21 model is gebruiksvriendelijk opgezet en biedt toegang tot de modelstructuur, gebruikte historische tijdreeksen, verschillende scenario's waaronder het basisscenario en de resultaten voor de gekozen beleidsstrategieën. Gebruikers kunnen de beleidskeuzes en de sterkte van de systeemrelaties aanpassen en nagaan of de beleidsdoelstellingen bereikt kunnen worden. Beleidsmakers kunnen hiermee vertrouwd raken met het gedrag van complexe systemen (<http://www.millennium-institute.org/>). Net als bij het IMAGE2.4 model zijn de toepassingen van het Threshold21 raamwerk niet expliciet ruimtelijk, in de zin dat de modellen op een geografisch raster worden doorgerekend indien de processen daarom vragen. Het Threshold21 model gebruikt meer dan duizend variabelen en duizenden terugkoppelingen daartussen (Barney et al., 1998) en draait met een minimale rekentijd (enkele seconden voor een simulatie van 20 jaar). Hoewel het model complex is, vereenvoudigt de gevolgde systeemdynamische benadering de inpassing van thematische modellen. De modelresultaten worden in de vorm van economische (per capita BRP, per capita energiegebruik, aandeel hernieuwbare energiegebruik ...), sociale (bevolkingsgroei, immigratie, vruchtbaarheid, bevolkingsdichtheid ...) en milieu-indicatoren gericht op duurzaamheid (emissies broeikasgassen, per capita watergebruik, landbouwareaal, bosareaal ...) uitgedrukt (Barney et al., 1998). Een eerdere toepassing van het raamwerk voor Italië richtte zich op de reductie van broeikasgassen, met name CO₂. Figuur 2-7 toont het kwalitatief systeemdiagram voor de toepassing van het Threshold21 raamwerk op Italië.



Figuur 2-7 Structuur T21 model voor Italië (bron <http://www.millennium-institute.org>).

Het model onderscheidde de volgende sectoren: landbouw, bevolking, economie, onderwijs, energie, milieu, bosbouw, goederen, gezondheid, landgebruik, defensie, voeding, sociale zekerheid, technologie, handel en water (Barney et al., 1998).

2.7. TOEPASSINGSKADER

Het 4-stappenplan (Op 't Eyndt, 2012) is er op gericht toekomstverkenningen ter ondersteuning van het Vlaams milieubeleid te ondersteunen door een benadering gebaseerd op vier geïntegreerde stappen:

1. Een kwalitatieve systeemanalyse om de relevante thema's, problemen en oorzaken, actoren e.d. in kaart te brengen en op hoofdlijnen met elkaar in verband te brengen, alsmede verhaallijnen voor verschillende wereldbeelden op te stellen.
2. Een kwantitatieve, systeemdynamische modellering waarmee de verhaallijnen op hoofdlijnen kunnen worden doorgerekend.
3. Thematische verdieping door modellering van de belangrijkste componenten van het systeemdynamische model uit Stap 2.
4. Toetsing van bestaande en geplande beleidsmaatregelen aan de beleidsdoelstellingen aan de hand van de modellen uit Stappen 2 en 3.

Een systeemdynamisch model legt de verbanden vast tussen de toestandsvariabelen die van belang zijn voor het dynamische gedrag van het systeem. Dit maakt het mogelijk verschillende combinaties van scenario's en beleidskeuzes op coherente wijze door te rekenen, en de impact op middellange en lange termijn te bepalen. Daarmee zijn systeemdynamische modellen zeer nuttig voor de ondersteuning van langetermijntoekomstverkenningen en beleidsanalyses zoals in de WLO-toekomststudie (Janssen et al., 2006) en de Megatrends studie (VMM, 2014a). Eerder dan een nauwkeurige prognose van het systeemgedrag in alle detail is het doel van dit soort studies de "tipping points" te identificeren, waarbij het systeemgedrag sterk verandert. Tevens vormt een systeemdynamisch model een praktisch analytisch raamwerk om de integratie tussen de relevante thema's zoals mobiliteit, energie, demografie, milieu, landbouw, etc. te ondersteunen.

HOOFDSTUK 3. KWALITATIEF ONTWERP

3.1. INLEIDING

Voordat ingegaan wordt op de inhoudelijke details van de blauwdruk en verkregen resultaten vatten we de gevolgde werkwijze voor het ontwerp van het model samen. Deze omvat een kwalitatieve en kwantitatieve fase, welke deels overlappend zijn en iteratief zijn doorlopen. De kwalitatieve systeemdiagrammen spelen een centrale rol in het kwalitatief systeemontwerp. Het ontwerp van een kwalitatief systeemdiagram, bestaande uit de keuze van variabelen en relaties daartussen, is een essentieel onderdeel van een systeemanalyse en het ontwerp van systeemdynamische modellen. In de literatuur en projecten worden verschillende termen gebruikt voor kwalitatieve systeemdiagrammen: mindmaps, concept networks, causal loop diagrams, invloedsdiagram, system maps, etc. Bij mindmaps en concept networks worden de variabelen en relaties aangeduid, maar niet de sterkte van de relaties. De verschillen in terminologie verwijzen naar de verschillende doelstellingen van de diagrammen. Voor mindmaps en concept netwerken blijven die vaak beperkt tot het faciliteren van brainstormsessies en het delen van inzichten van betrokkenen, en dit, zonder het ultieme doel een mathematisch model te ontwikkelen en toe te passen. Maar in wezen liggen de doelen niet ver uit elkaar: visualisatie van de samenhang en dus de complexiteit van systemen. Met het systeemdiagram wordt de modelstructuur vastgelegd, bovendien is het een instrument om de samenhang van het systeem zichtbaar te maken, domeinkennis (kwalitatief) te integreren, complexe informatie te communiceren en de bijdragen van belanghebbenden te stimuleren (Foresight, 2010) en in te winnen.

Toch wordt in de literatuur relatief weinig aandacht besteed aan deze belangrijke stap. Het ontwerp van een goed systeemdiagram wordt vaak eerder als een “kunst” dan een “kunde” beschouwd. Ondanks het gebrek aan een duidelijke systematische, wetenschappelijk onderbouwde benadering zijn er toch een aantal principes die het proces kunnen vergemakkelijken. Een praktisch inzetbaar systeemmodel met voldoende detail zou, afhankelijk van de toepassing, 30 tot 300 systeemvariabelen kunnen omvatten (Foresight, 2010). Een aantal zeer nuttige aandachtspunten voor het tekenen van causale relatiediagrammen werd door Kim gegeven (Kim, 1992):

- beginnen met de selectie van de thema's;
- bepalen van een geschikte tijdhorizon;
- grafische weergave van het tijdsafhankelijke gedrag van variabelen; dit helpt bij de keuze van variabelen en het bepalen van de causale afhankelijkheden;
- bepalen van de systeemgrenzen, afhankelijk van de gekozen thema's;
- keuze van het juiste aggregatie/detail niveau gekoppeld aan de tijdhorizon en processen die van belang zijn voor de relaties tussen de systeemvariabelen;
- bepalen van de belangrijke tijdsvertragingen in relaties ('delays').

We voegen daar nog aan toe:

- bepalen van het doel van het model;
- bepalen van de gewenste output;
- bepalen van de ruimtelijke entiteit(en) en ruimtelijke schaalniveau('s) waarvoor het model wordt ontwikkeld.

Het verdient dus aanbeveling om vanuit een aantal thema's (demografie, kwaliteit leefomgeving, energie, etc.) te beginnen, om vervolgens de domeinoverschrijdende integratie tussen de thema's vorm te geven. Voor deze studie zullen de volgende thema's gericht op milieubeleid in beschouwing genomen worden: Demografie, Economie, Mobiliteit, Energie, Ruimtegebruik, Landbouw en Voeding, Natuur, Lucht, Water, en Afval en Materiaalgebruik. Deze omvatten de zes MIRA-sectoren (Huishoudens, Industrie, Energie, Landbouw, Transport en Handel & Diensten), de drie milieucompartimenten (Lucht, Water en Ruimte), en de hulpbronnen (Water, Energie, Ruimte, en Afval en Materialen). Deze inperking is gebaseerd op de aspecten die in eerdere toekomstverkenningen en systeemmodellen gericht op milieubeleid zijn meegenomen. De thema's zijn vanuit de vorige studies gekend en gedefinieerd. Ze zijn bovendien voldoende breed geïnterpreteerd en ingezet om samen een voldoende integrale aanpak te ondersteunen.

Zoals bij de analyse van systeemdynamische modellen bleek, worden veel van deze modellen extern aangestuurd door variabelen gerelateerd aan klimaatverandering, demografische en economische ontwikkeling. Deze informatie is zowel nuttig voor de afbakening van het systeemmodel als voor de keuze van het aggregatieniveau. Het is ook van belang dat men zich realiseert dat het perfecte systeemdiagram niet bestaat en ook weinig zinvol is (Foresight, 2010). Systeemdiagrammen zijn vooral een visualisatie van de complexiteit van een systeem. Transparantie is daarbij wel belangrijk, wat ook de reden is om meerdere hiërarchische niveaus te onderscheiden indien mogelijk.

Een groot deel van de verantwoordelijkheid voor de keuze van deze systeemvariabelen ligt bij de domeinexperts (Dale, 1970). De rol van de systeemmodellereurs richt zich op drie aspecten:

- communicatie met, en ondersteuning van, de domeinexperts bij de keuze van de systeemvariabelen binnen de domeinen en relaties daartussen;
- identificeren van de domeinoverschrijdende systeemrelaties;
- bewaken van het aggregatieniveau en een voldoende mate van consistentie van het systeemmodel op de verschillende hiërarchische niveaus.

Met consistentie wordt hierbij verwezen naar een juiste balans van de gebruikte variabelen en (deel)modellen in termen van modelcomplexiteit, afgestemd op het doel van het totale systeemmodel. Zo kan het vaak zinvol zijn om in een demografisch model leeftijdscohorten te onderscheiden, maar het aantal cohorten zal afhankelijk zijn van het doel van het model (mobiliteit, werkgelegenheid, gezondheid ...).

Er zijn ook verschillende instrumenten ontwikkeld om de (interactieve) ontwikkeling van systeemdiagrammen te ondersteunen zoals Visual Understanding Environment (<http://vue.tufts.edu>) en Mindtools (<http://www.mindtools.com>). Een open-source raamwerk dat door ons geschikt bevonden werd voor deze studie is Cmaps van het Institute for Human and Machine Cognition (<http://cmap.ihmc.us/>). Cmaps is bedoeld om conceptuele netwerkdiagrammen op te stellen waarbij de verbanden tussen variabelen (zgn. proposities) ook kunnen worden benoemd. Voor deze toepassing kunnen deze verbanden ordinaal worden gekwalificeerd in termen van maximaal zes categorieën "sterk negatief of --", "negatief of -", "zwak negatief of -+", "zwak positief of +-", "positief of +" en "sterk positief of ++". Een aantal sterke kanten van Cmaps zijn de gebruiksvriendelijkheid, ondersteuning visualisatie (kleuren e.d.), de mogelijkheid een systeemdiagram hiërarchisch op te bouwen, automatische diagrammen van deelsystemen te koppelen door herkenning van gemeenschappelijke variabelen, de opbouw van een systeemdiagram in een presentatie te vervatten, de mogelijkheid de diagrammen op te slaan en uit te wisselen (ook via een web platform), en de mogelijkheid zoektermen te gebruiken om in een complex diagram naar

een variabele (“concept”) te zoeken. Ook de mogelijkheid om de opbouw van een diagram te animeren is behulpzaam bij het verklaren van de structuur tijdens een presentatie of discussie.

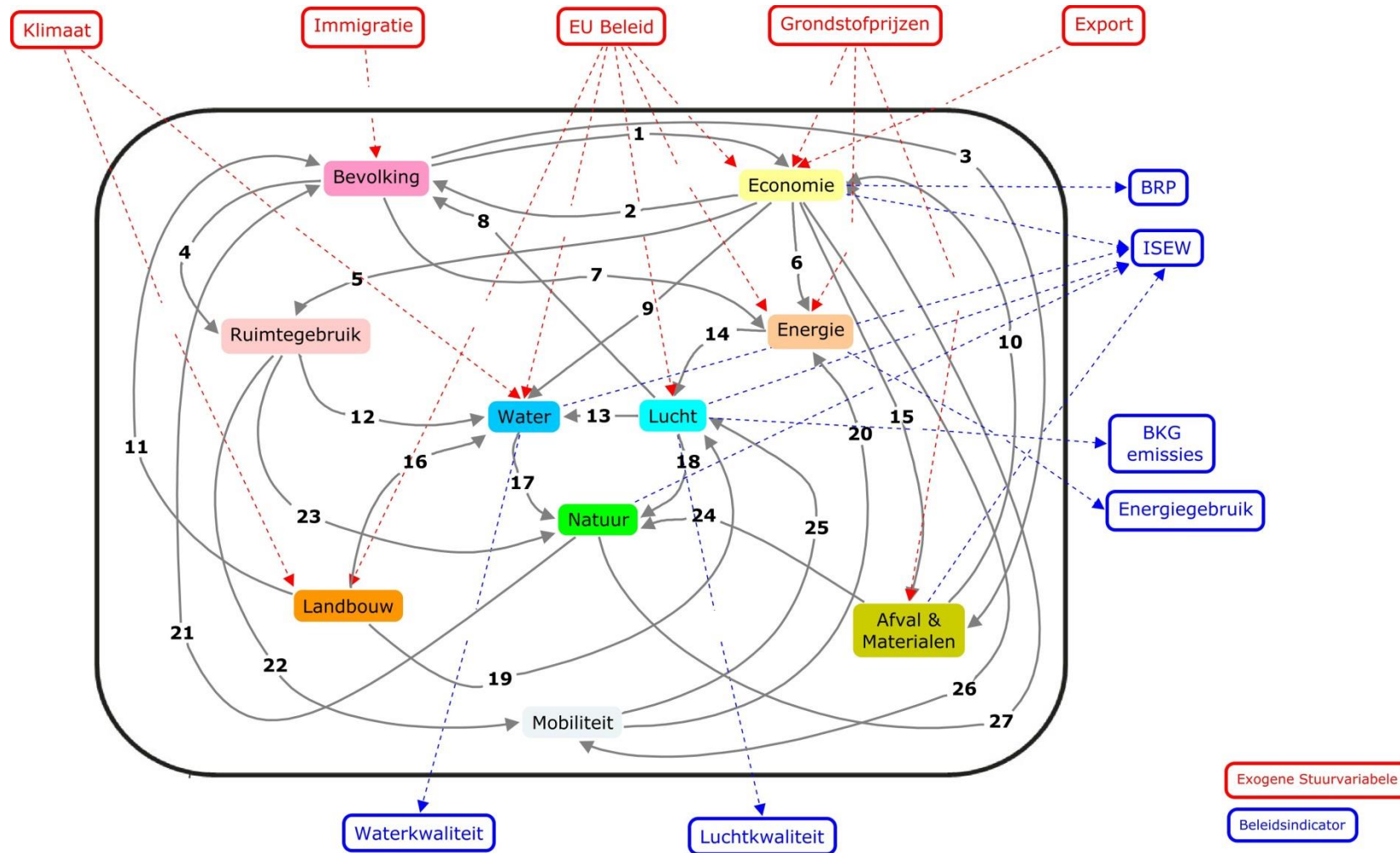
3.2. KWALITATIEF SYSTEEMONTWERP

Het doel van de *kwantitatieve fase* is de relevante problemen, onderliggende oorzaken en aanknopingspunten voor beleid te vertalen in kwalitatieve systeemdiagrammen op het niveau van de 10 deelthema’s (Demografie, Economie, Mobiliteit, Ruimtegebruik, Energie, Landbouw & Voeding, Water, Lucht, Natuur & Milieu, en, Afval en Materiaalgebruik) uit de haalbaarheidsstudie uit 2013 (De Kok en Engelen, 2013). Op 12 maart werd in het kader van deze opdracht een workshop georganiseerd met een groot aantal domeinexperts voor de verschillende thema’s. Doel van deze workshop was de beschikbare systeemdiagrammen na te kijken op volledigheid en correctheid in termen van de selectie van toestandsvariabelen en terugkoppelingen. Ook werden de deelnemers gevraagd variabelen te definiëren en in meetbare eenheden uit te drukken. De deelnemers werden ingedeeld in vier groepen van 4-6 personen volgens de socio-technische subsystemen van de Megatrends studie (VMM, 2014a):

- Productie & Consumptie (thema’s bevolking, economie, landbouw en materialen);
- Energie (energie, bevolking, economie en lucht);
- Mobiliteit (transport, ruimtegebruik, milieu en bevolking);
- Ruimtelijke Ordening (ruimtegebruik, natuur, lucht en water).

De systeembenadering werd algemeen gedragen, en de systeemdiagrammen bruikbaar bevonden. Wel bleek er nog ruimte te zijn voor verbetering van de consistentie van de systeemdiagrammen voor de verschillende thema’s (vooral op het vlak van detailniveau). De definitieve (met het systeemmodel corresponderende) systeemdiagrammen voor de thema’s zijn in Bijlage 2 te vinden.

Figuur 3-1 toont de mogelijke thematische integratie van de deeldomeinen in het totale systeem op een hoog abstractie niveau. Voor de overzichtelijkheid is het thema Klimaat als exogene invloedsfactor opgenomen.



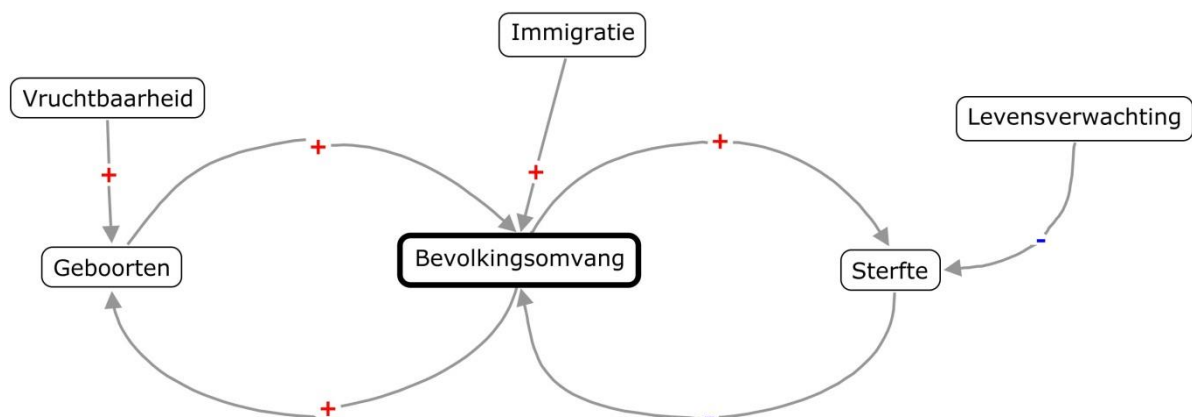
Figuur 3-1 Thematische integratie van de deeldomeinen in een systeembeschrijving gericht op het Milieubeleid in Vlaanderen. Zie Figuur 8-12 voor een gedetailleerde weergave van het totale systeem tot op het niveau van de toestandsvariabelen.

1. Beschikbaarheid arbeid, consumptie
2. Tewerkstelling, inkomen,
3. Materiaalgebruik bevolking
4. Residentiele ruimtevraag
5. Ruimtevraag activiteiten
6. Energievraag sectoren
7. Energievraag huishoudens
8. Invloed luchtkwaliteit op welzijn en gezondheid
9. Invloed economische activiteiten op waterkwaliteit
10. Kosten materiaalverbruik
11. Voedselconsumptie
12. Invloed verhard oppervlak op runoff
13. Atmosferische depositie
14. BKG emissies
15. Materiaalvraag industrie
16. Diffuse bronnen
17. Invloed waterkwaliteit op natuur, versnippering
18. Invloed luchtkwaliteit
19. Invloed landbouw op luchtkwaliteit (NH₃, ...)
20. Energiegebruik transport
21. Invloed ecosysteemdiensten op welzijn en gezondheid
22. Toegankelijkheid, invloed op woon-werk verkeer
23. Verweving, versnippering
24. Afvalproductie
25. Emissies transport
26. Invloed economische activiteit op transportvraag
27. Milieukosten

Tabel 3-1 Voorbeeld typische relaties in het systeemdiagram uit Figuur 3-1.

Het kwalitatieve systeemdiagram voor het totale systeem geeft een overzicht van de samenhang tussen de verschillende domeinen en kan als leidraad gebruikt worden voor de keuze van het juiste detailniveau waarop de thematische modellen geïntegreerd zouden moeten worden.

De systeemdiagrammen voor de deelsystemen (zie Bijlage 2) geven de processen in meer detail weer. Op dit volgende hiërarchische niveau vinden we de toestandsvariabelen. Een voorbeeld voor het thema Bevolking is in onderstaande Figuur 3-2 te vinden. We zien hier dat voor de toestandsvariabele “Bevolkingsomvang” sprake is van twee terugkoppelingen: een versterkende, positieve terugkoppeling van het aantal geboorten, en een dempende, negatieve terugkoppeling via de sterfte. Een derde variabele die van invloed is de “Immigratie”.



Figuur 3-2 Voorbeeld kwalitatief systeemdiagram voor het thema “Bevolking”.

Het systeemgedrag, d.w.z. de ontwikkeling van de bevolkingsomvang in de tijd, zal afhankelijk zijn van de parameters “Vruchtbaarheid” en “Levensverwachting”, de “Immigratie”, en sterkte van de causale relaties die in het systeemdiagram zijn weergegeven. Integratie met andere thema’s is mogelijk via koppellende variabelen. Zo kan de levensverwachting worden gekoppeld aan de luchtkwaliteit en de immigratie aan een economisch model.

Bij het ontwerpen en aanpassen van de systeemdiagrammen zijn de volgende aspecten van belang:

- Toepassing: het doel van de systeemdiagrammen, communicatie, moet steeds voor ogen gehouden worden. De diagrammen dienen om de structuur en werking kwalitatief weer te geven. Transparantie en consistentie zijn belangrijker dan een volledige representatie van het systeem op alle detailniveaus (dit is minder zinvol en past eerder binnen de thematische modellering).
- Aggregatieniveau: het verdient aanbeveling de systeemdiagrammen enigszins abstract te houden met een beperkt (10-15) aantal toestandsvariabelen.
- Nomenclatuur: het is van belang geschikte, ondubbelzinnige definities en benamingen voor de variabelen te kiezen zodat geen begripsverwarring ontstaat en tevens zoveel mogelijk wordt aangesloten bij de binnen de bestaande toekomstverkenningen gehanteerde begrippen.
- Afbakening: in verband met de gehanteerde tijdshorizon en toepassing op het Vlaams Gewest kunnen grenzen gesteld worden aan de systemen voor de deeldomeinen. Dit betekent bijvoorbeeld dat modelexogene, sturende variabelen zoals de “zeespiegelstijging” en “olieprijs” afhankelijk gesteld worden van de gekozen scenario’s zonder dat een thematisch of sectoraal model nodig is om deze variabelen te berekenen.
- Het detailniveau: dit hangt nauw samen met de keuze van toestandsvariabelen en complexiteit van de terugkoppelingen daartussen, en is van invloed op de transparantie. Domeinexperts zijn snel geneigd om processen zo adequaat en gedetailleerd mogelijk op te nemen in het systeemdiagram dat daarmee eerder een representatie wordt voor de werking van het door hen gekende of gehanteerde thematisch model dan een uitgangspunt voor integratie met andere thema’s. Er zou bijvoorbeeld voor de demografie gekozen kunnen worden voor modellering van de totale bevolkingsomvang en de beroepsbevolking. Een indeling naar leeftijdscohorten, zoals in de demografische projecties van het Federaal Planbureau, biedt dan weer de mogelijkheid om rekening te houden met de leeftijdsafhankelijkheid van de arbeidsparticipatie en verschuivingen daarin.

De begrippen exogene invloedsvariabele (de ‘drivers’ van het systeem) en de beleidsindicatoren vragen om een nadere toelichting en definitie (Zie ook 2.1).

De **exogene stuur- en invloedsvariabelen** of kortweg exogene omgevings- en beleidsvariabelen houden verband met onzekere, factoren die het Systeem Vlaanderen beïnvloeden zonder dat dit andersom het geval is. Deze worden niet gemodelleerd, maar zijn wel instelbaar. Daarmee bepalen deze (model)exogene variabelen de grenzen van het (model)systeem. Bedoeld wordt hiermee dat de beïnvloeding andersom, van het systeem op de invloedsvariabelen, verhoudingsgewijs onvoldoende belangrijk of meetbaar is om in het systeemmodel opgenomen te worden. De regelaars voor deze omgevings- en beleidsvariabelen worden gebruikt om de gebruiker de aansturing van het model te laten instellen, het beleid zelf maakt geen expliciet onderdeel uit van de modelkern. Voorbeelden zijn de gemiddelde temperatuur en extreme neerslagwaarden (klimaatverandering), globalisering en de wereldolieprijs. In de WLO-studie zijn voor vier wereldbeelden samenhangende combinaties opgesteld voor de ontwikkeling van de sturende politieke, sociaaleconomische, fysische en ruimtelijke factoren (Janssen et al., 2006).

Eerder werden de WLO-wereldbeelden vertaald naar de Vlaamse context en als volgt samengevat op het niveau van de deelthema's (Engelen et al., 2011a):

Thema	Strong Europe	Global Economy	Regional Communities	Transatlantic Markets
Algemeen beeld	Sterke overheid en rol EU, sociaal EU, energie efficient, duurzaam, matiging, open grenzen, rem EU op druk open ruimte	Econ. groei, terugtrekkende overheid, technocratisch eerder dan democratisch, econ polarisatie, beperking migratie, mobiliteit privaat geregeld, beperkt natuurbelief	solidariteit, overheid alleen lokaal sterk, EU zwak, meer collectieve diensten, sociaal voorz lokaal, alleen asiëlmigr, lokaal mob beleid	Privaat-nationaal, overheid zwak, vrije markt dominant, soc voorz beperkt, mobiliteitsbeleid beperkt, weinig aandacht natuur,
Demografie en Migratie	grote bevolkingsgroei, open grenzen, arme migranten, verdere vergrijzing	groei bevolking, vooral door migratie; migratie afgestemd op arbeidsmarkt, high potentials vertrekken	negatief saldo migratie, regionale krimp, verdere vergrijzing, arme migranten	matige groei bevolking en lichte vergrijzing, migratie afgestemd op behoefte arbeidsmarkt
Huishoudens	modaal gezin is norm, grootte huishoudens blijft stabiel	meer singles, huishoudenverdunding	geen verdunding wel groepering huishoudens,	meer singles, huishoudenverdunding
Waarden	stedelijk-landelijk onderscheid belangrijk, milieubewust, draagvlak OV	één grote verstedelijkte ruimte, rol OV onduidelijk, weinig milieubewust, oriëntatie afh soc-econ status	lokale focus, milieubewust, OV gesteund	surubaan voor kansrijken, oriëntatie afh soc-econ status, weinig milieubewust
Energie	uitputting fossiele brandstoffen, grondstoffen onder druk	energieprijs stijgt sterk, groene energie is alternatief, druk op grondstoffen	energiecrisis, innovatie gericht op verlaging energieverbruik	energiebronnen afh kostprijs, ook bv kolen
Sociaal-economisch	blijvend hoge welvaart, hoge arbeidsproductiviteit, langer werken, arbparticipatie gelijk, telewerken, sterke koopkracht, brain drain, beperking expansie, EU milieuoelagen	welvaart stijgt, polarisatie, hoge arbeidsparticipatie, rat race, stijgende werkgelegenheid door groei en uitbesteding diensten, langer werken, verdere tertiërisering, weinig milieuoelagen	welvaart daalt, werkloosheid neemt toe, meer thuiswerken en jobs dichter bij huis, krimpende economie, export daalt, basis industrie verdwijnt, kleinschaligheid	matige groei, beperkte stijging werkloosheid, meer en langer werken, telewerken, wisselende conjunctuur, hoge arbeidsparticipatie, weinig milieuoelagen
Mobiliteit	brandstofkosten stijgen, OV betrouwbaar, pendel neemt af, wel meer telewerken, meer vrijetijdsverkeer	polarisatie autobezit, transportvolume verdrievoudigt, randstedelijk wonen voor minder rijken, meer mob lange afstanden	autobezit daalt, sterke stijging brandstofkosten, investeringen OV, geen investeringen wegennet, minder woonwerk verkeer	mobiliteit duur, rekeningrijden, privaat financiering werken, weinig onderhoud, minder pendel voor onderlaag
Milieu, Natuur, Landbouw	EU2020 agenda weegt sterk, weinig druk open ruimte, veel randvoorwaarden landbouw, lokale consumptie, integraal waterbeleid versterkt	klimaatverdragen afgezwakt, privatisering beheer open domein, extensieve landbouw zonder randvoorwaarden, natuur onder druk, sterke toename verkeer	positief voor milieu, landbouw voor zelfvoorziening, minder druk op natuur, aansluiting landbouw en natuur op elkaar, integraal waterbeheer, meer collectief vervoer	weinig sturing, landbouw extensief, schaalvergroting landbouw, privatisering beheer open domein
Algemene ruimtelijk patronen	druk open ruimte blijft, stadsvlucht, druk Brussel neemt toe, verstedelijking GEREMD en BEPERKT, sociale segregatie, suburbanisatie	wanorde, verbetering binnensteden, toename belang grote centra tkv kleiner plaatsen, verstedelijking ONBEPERKT en ONGEREMD, extreme socio-spatiale segregatie,	gespreide bebouwing blijft, rem stedelijke uitbreiding, verstedelijking GEREMD en BEPERKT, socio-spatiale segregatie beperkt,	wanorde, imagowaarde steden, gettovorming, parkstad, vergroeiing steden, verstedelijking ONGEREMD maar BEPERKT, polarisering
Ruimte Wonen	grotere dichtheden nodig ivm vergrijzing, woning duur, collectief beheer groene ruimte	markt negeert woonvraag minder bededen, gated communities, woningprijzen stijgen sterk, opschonen steden, dichter oopen wonen	geen prijsdaling, hergebruik woonbestand, gespreide leegstand, dichtheid blijft gelijk	hoogbouw voor armen, sterke stijging woonprijzen, dichter oopen wonen
Ruimte Sectoren	versterking stedelijk structuur, concentratie diensten in steden, verweven economie, ruimte vrij havens en industrie, geen	verdere verstedelijking, complexe verweving, alle ruimte econ ontwikkeling, verspreiding economie, versnippering, uitbouw econ poorten,	stedelijk-landelijk onderscheid vervaagt, kleinschaligere economie, gespreide locaties, aangepaste productie, krimp	stedelijke economie blijft belangrijk, tertiaire sector eerder stedelijk, toename bedrijfsterrinen in corridors,
Ruimte Mobiliteit	huidig wegennet blijft, behoud huidig OV net	hoge transportgevoeligheid, centrale assen verdichten, grote toename luchtverkeer, selectieve ontwikkeling OV net	regionale boulevards, behoud huidig net, Zaventem minder belangrijk, waterhubs belangrijker, behoud huidig OV net	selectieve reductie huidig OV net, goederenvervoer stijgt, splitsing wegennet (betaald/onbetaald), rem groei luchthavens
Open Ruimte	druk rond agglomeraties, ruimte water, uitbouw natuurgebieden, lokale recreatie, VERWEVING, glastuinbouw	druk open ruimte Vlaamse ruit, verdere verdichting, druk op open ruimte, verlies natuuraeraal voor verweving	geen druk open ruimte, Parklandschap, GEEN afname landbouwareaal, nieuwe functie snelwegen (biocorridor)	druk open ruimte, geen coördinatie waterbeheer, snelle verstening, verweving meer frequent, grootschalig/informele landbouw,
Ontwikkeling Brussel	toenemende druk, suburbanisatie, geremde en beperkte verstedelijking, Brussel blijft belangrijk	ongeremde en onbeperkte verstedelijking, verdichting, toenemende belang Brussel, competitief voordeel	geremde en beperkte verstedelijking, geen verdichting, rem stedelijke uitbreiding, minder belangrijk als mainport, minder rush naar Brussel	ongeremde maar beperkte verstedelijking, gettovorming, hoogbouw, verdichting, Brussel blijft belangrijk

Tabel 3-2 Samenvatting WLO-wereldbeelden per deelthema voor toepassing op Vlaanderen (Engelen et al., 2011a).

Een meer gedetailleerde beschrijving van de vervlaamste WLO-wereldbeelden wordt in HOOFDSTUK 6 gegeven.

Voor de blauwdruk zijn negen (model)exogene omgevings- en beleidsvariabelen gedefinieerd waarvan de ontwikkeling en daarmee de aansturing van het 'Systeem Vlaanderen' kan verschillen:

1. Technologie & Innovatie (investeringen in R&D);
2. Duurzaam Gedrag & Beleid;
3. Het onderwijsniveau;
4. De wereld brandstofprijs;
5. Het immigratiebeleid;
6. De grootte van huishoudens;
7. De levensduur van kapitaal;
8. De maximale transportcapaciteit van het hoofdwegennet;
9. Klimaatverandering (temperatuurstijging tussen 2000 en 2100).

Deze exogene stuurvariabelen geven de modelgebruiker de mogelijkheid de aansturing van het systeem in te stellen en kunnen het systeem op verschillende plaatsen beïnvloeden. Zo werkt de variabele 'Technologie & Innovatie' door op de arbeidsproductiviteit, de intensiteit van de landbouw, de efficiëntie van energie- en materiaalgebruik, de afvalproductie per hoofd van de bevolking en productiviteit van de industrie, en de emissies van pollutanten in het water door de bevolking, industrie, landbouw en diensten. De variabele 'Duurzaam gedrag en beleid' werkt door op het aandeel autogebruik in het personenverkeer, de keuze voor energiedragers, het aandeel dierlijk voedsel in de consumptie, de afvalproductie, de vraag naar water en de emissies naar de lucht en het water. De variabele 'Onderwijsniveau' werkt door op de vruchtbaarheid van vrouwen en de gezondheid. Indirect werken de variabelen door op een groot aantal processen welke met het systeemmodel kunnen worden gemodelleerd zoals de bevolkingsgroei, de economische groei en welvaart, de mobiliteit en congestie, verstedelijking en versnippering van open ruimte en het residentieel landgebruik, en ruimtegebruik voor landbouw, industrie en diensten.

We lichten de stuurvariabelen hier kort toe:

1. **Technologie (Technology and Innovation):** een dimensieloze index die de ontwikkeling meet van inspanningen in, en houding ten opzichte van, de ontwikkeling van technologie en innovatie ten opzichte van het beginjaar 2010 (waarde 100) op een schaal tussen 50 en 150. Deze gaan samen met investeringen in R&D, onderwijs, en de aanpassingen van regelgeving zodat nieuwe technologieën beter en sneller kunnen worden geïntroduceerd. Een hogere waarde voor deze variabele stimuleert de groei van de economie (het bruto regionaal product) op (middel)lange termijn en zorgt voor een meer efficiënte inzet van arbeid en kapitaal om goederen en diensten te produceren, en een hogere arbeidsproductiviteit. Echter, technologische ontwikkeling gericht op een meer efficiënt gebruik van natuurlijke hulpbronnen, grondstoffen, energie en lagere emissies van bijvoorbeeld het wegtransport moet in het model voorlopig worden ingesteld via de index voor **Duurzaam Gedrag en Beleid** (zie onder). Deze opsplitsing is noodzakelijk aangezien de ontwikkeling van de duurzaamheid en technologie kunnen verschillen voor bepaalde wereldbeelden. Ook bestaat er een duidelijk verband met de exogene variabele "Onderwijs"; meer investeringen in R&D gaan doorgaans ook samen met beter Onderwijs. Er is momenteel nog geen expliciet verband tussen Technologie en Onderwijs in het model.
2. **Duurzaam Gedrag en Beleid (Sustainable Behavior and Policy):** een dimensieloze index voor de ontwikkeling van de duurzaamheid van de Vlaamse bevolking en het milieubeleid in Vlaanderen. Deze wordt gemeten op een schaal tussen 50 en 150, ten opzichte van de beginwaarde van 100. Deze index beïnvloedt het systeem direct en indirect op diverse punten (verkeersvolume, gebruik publiek transport, aandeel hernieuwbare energie, emissies broeikasgassen en pollutanten in lucht en water, afvalproductie ...). Deze index moet kwalitatief geïnterpreteerd worden.

De volgende onzekere omgevingsfactoren grijpen in op verschillende punten in het systeem, zoals dat gemodelleerd is, en zijn om deze reden eveneens mee opgenomen in de lijst van in te stellen stuurvariabelen:

3. **Onderwijs (Level of Education):** dimensieloze index voor de ontwikkeling van de gemiddelde opleidingsgraad van de bevolking in Vlaanderen op de schaal tussen 50 en 150. Deze beïnvloedt de gezondheidsindex (zie Deelsysteem Demografie) door aanpassing van leef- en voedingsgewoonten (positief verband) en vruchtbaarheid van vrouwen (negatief verband).
4. **Brandstofprijs (World Fuel Price):** dimensieloze index tussen 50 en 150 voor de ontwikkeling van de kosten van fossiele brandstoffen en andere energiedragers (nucleair, biomassa). Deze variabele heeft een positieve invloed op energiebesparing en het aandeel hernieuwbare energie, maar een negatieve invloed op het recreatief personentransport.
5. **Migratiebeleid (Migration Policy):** dimensieloze multiplicator in het bereik tussen 0.5 en 3.0. Deze bepaalt de ontwikkeling van de immigratie-vriendelijkheid van het beleid in Vlaanderen ten opzichte van de referentieontwikkeling van de immigratie volgens het Federaal Planbureau (zie Figuur 4-6). Een lagere of hogere waarde dan de neutrale waarde 1.0 zorgt voor een lagere of hogere immigratie dan in de referentieontwikkeling. Dit gebeurt op basis van een factor die lineair toeneemt tot in het eindjaar wanneer de gekozen waarde van de ingestelde index bereikt wordt.
6. **Huishoudensgrootte (Household Size Multiplier):** dimensieloze multiplicator in het bereik tussen 0.75 en 1.25. Deze bepaalt de ontwikkeling van de gemiddelde grootte van alle huishoudens in Vlaanderen (2.35 personen voor het beginjaar) ten opzichte van de referentieontwikkeling volgens de Studiedienst (zie Figuur 5-30). Een lagere of hogere waarde dan de neutrale waarde 1.0 zorgt voor een aangepaste verdunning of verdichting van huishoudens dan in de referentieontwikkeling. Dit gebeurt op basis van een factor die lineair toeneemt tot in het eindjaar wanneer de gekozen waarde van de ingestelde index bereikt wordt.
7. **Levensduur van kapitaal (Capital Life Time):** deze economische indicator beschrijft de technische en financiële levensduur van de voorraad kapitaalgoederen, met inbegrip van onroerende goederen, de transport infrastructuur, machineparken en ICT. De snelheid waarmee de opbouw van kapitaal door investeringen (één van de toestandsvariabelen in het economisch deelmodel) plaatsvindt is een maat voor de efficiëntie van de opbouw en instandhouding van de productiecapaciteit van de Vlaamse economie. Een hoger productiekapitaal leidt tot een hoger productiepotentieel, en een hoger potentieel Bruto Regionaal Product (indien de finale vraag voldoende hoog is). Anders gesteld: een hogere technisch-economische levensduur van kapitaal vergt minder investeringen om kapitaal te vervangen, en biedt meer ruimte voor investeringen in R&D, onderwijs en milieu. De geschatte levensduur van kapitaal in Vlaanderen is gemiddeld 15 jaar, variërend van enkele jaren voor het ICT deel tot 50 jaar of meer voor gebouwen. Afhankelijk van het relatieve aandeel van deze onderdelen van de kapitaalvoorraad kan de gemiddelde levensduur ook variëren. Afhankelijk van het relatieve aandeel van deze onderdelen van de kapitaalvoorraad kan de gemiddelde levensduur ook variëren. De variatie van de gemiddelde kapitaalvoorraad is ingesteld op een bereik tussen 10 en 20 jaar. Het economisch deelmodel is zeer gevoelig voor deze parameter, daarom is het aan te bevelen de standaardwaarde te gebruiken (zie ook Tabel 5-9).
8. **Capaciteit wegennet (Road Capacity Multiplier):** dimensieloze multiplicator in het bereik tussen 0.5 en 1.5 die de ontwikkeling van de capaciteit van het hoofdwegennet regelt. Deze wordt doorgaans in miljarden voertuigkm uitgedrukt (zie Sectie 5.4). De ingestelde waarde bepaalt de capaciteit voor het eindjaar, relatief ten opzichte van de waarde voor het beginjaar

(door kalibratie van de verliesuren door congestie ingesteld op 250 miljard voertuigkm). De index beïnvloedt de congestietijd, en daarmee de ISEW Lite indicator (zie Sectie 5.3).

9. De variabele **Klimaatverandering** is gekoppeld aan de temperatuurstijging tussen de jaren 2000 en 2100. De gebruiker kan momenteel in het model kiezen tussen één van de drie standaard scenario's uit het 5th Assessment Report van het IPCC (<http://www.ipcc.ch/>) voor de ontwikkeling van de emissies van broeikasgassen of Representative Concentration Pathways (RCP). Gebruikers kunnen bovendien ook een eigen trend instellen voor de temperatuurstijging (Figuur 4-6). Voor de drie RCP-scenario's is de gemiddelde luchttemperatuur en de jaarlijkse neerslag voor Vlaanderen gegeven en werd de evolutie van het aantal hittedagen (temperatuur > 21.5°C) en aantal verwarmingsgraaddagen (cumulatief aantal graden onder 15°C) bepaald. Deze laatste twee zijn nodig in het model bij de berekening van het gezondheidseffect en het energieverbruik voor de verwarming van gebouwen. Recentelijk werden specifiek voor Vlaanderen drie klimaatscenario's afgeleid in het MIRA-klimaatrapport 2015 dat recentelijk is verschenen (Brouwers et al., 2015). Voor deze scenario's zijn in het MIRA-klimaatrapport evenwel het aantal hittedagen (er is een verschillende definitie voor het aantal hittedagen in het MIRA-rapport) en het aantal verwarmingsgraaddagen niet expliciet gegeven. Eens deze bepaald zijn kunnen de Vlaamse scenario's de RCP-scenario's worden vervangen in het model. We merken ook op dat de klimaatscenario's voor Vlaanderen verder bouwen op de resultaten uit de IPCC-rapporten zodat de verschillen wellicht beperkt zullen zijn.

Behalve de onzekerheden in de aansturing van het systeem is ook sprake van onzekerheden ten gevolge van de gemaakte modelaannames, parameterwaarden e.d. Met deze laatste onzekerheden is nog niet expliciet rekening gehouden in het systeemmodel. Het gebruikte softwareplatform Extendsim® biedt wel de ondersteuning voor dergelijke onzekerheidsanalyses.

Het eerste doel van het systeemdynamische model is toekomstverkenningen in het kader van het 4-stappenplan te ondersteunen via een raamwerk dat rekening houdt met de terugkoppelingen die het systeemgedrag beïnvloeden (De Kok en Engelen, 2013). De veranderingen in de toestand van het systeem dienen daartoe uitgedrukt te worden in **beleidsindicatoren** die inzichtelijk zijn voor beleidsmakers en belanghebbenden. Volledige overeenstemming met de indicatoren uit EU-richtlijnen en het Vlaamse beleidsinstrumentarium zoals Pact2020 (Bral, 2012), het Milieubeleidsplan 2011-2015 (www.milieubeleidsplan.be) en het MIRA-Indicatorrapport (Van Steertegem, 2012) is niet haalbaar en weinig zinvol omdat deze parameters zijn ontwikkeld als meetwaarden of resultaten van gedetailleerde thematische rekenmodellen eerder dan indices die door een systeemmodel moeten kunnen worden beschreven. Het is de bedoeling dat met deze indicatoren toekomstverkenningen en daarmee beleid kan worden ondersteund. Tabel 3-3 toont een selectie van beleidsrelevante indicatoren, die met het model berekend kunnen worden, en, die de toestand van het systeem op (middel)lange termijn beschrijven. Andere selecties zijn ook denkbaar en kunnen uit de systeemdiagrammen van hoofdstuk 5 afgeleid worden. De selectie in Tabel 3-3 is gemaakt om tot een representatieve set te komen die toch voldoende beleidsindicatoren per thema geeft om enig reliëf te bekomen. Daarbij komt ook dat deze indicatoren, als output van het systeemmodel, op niveau Vlaanderen met een zekere ruimtelijke resolutie en een tijdstap van 1 jaar kunnen gepresenteerd worden.

De indicator "ISEW Lite" is een vereenvoudigde versie van de ISEW indicator voor duurzame welvaart, waarin milieu- en andere kosten rond duurzaamheid zijn verwerkt (Bleys et al., 2015). Een toelichting is te vinden in Sectie 5.3.

Thema	Beleidsindicatoren (eenheid)
Demografie	Totale Bevolkingsomvang (aantal) Omvang Beroepsbevolking (aantal) Gezondheid (index)
Economie	Bruto Regionaal Product (BRP in Euro per jaar) Aangepaste versie ISEW indicator voor duurzame welvaart (Bleys et al., 2015)
Energie	Energiegebruik (PJ/jaar) verschillende sectoren Aandeel hernieuwbare energie (%) Broeikasgasemissie door inlandse energieproductie en -transformatie
Mobiliteit	Intensiteit Wegverkeer (10^9 vkm/jaar) Congestieverlies (10^6 uur/jaar) BKG-emissies (aandeel)
Ruimtegebruik	Landbouwruimte (ha) Open Ruimte (ha) Bebouwde Ruimte (ha) Versnippering open ruimte (index) Verstedelijking (index)
Natuur & Milieu	Oppervlakte effectief onder natuurbeheer (ha) Oppervlakte (toegankelijk) bos (ha)
Landbouw	Consumptie dierlijk voedsel (ton/jaar) Consumptie plantaardig voedsel (ton/jaar) kunstmestgebruik pesticidegebruik BKG emissies (aandeel)
Afval en Materiaalgebruik	Materiaalverbruik Industrie (ton/jaar) Materiaalverbruik Huishoudens (ton/jaar) Afvalproductie Industrie (ton/jaar) Afvalproductie Huishoudens (ton/jaar)
Lucht	Totale en sectorele emissies fijn stof, NO _x , SO _x , NH ₃ (ton/jaar) en broeikasgassen (ton CO ₂ -equivalenten/jaar) Luchtkwaliteit: pollutieconcentraties (µg/m ³) en overschrijdingsdagen
Water	Emissies van nitraat, fosfaat en zuurstofbindende stoffen Gebruik drink-, regen-, grond- en oppervlaktewater (m ³) Kwaliteit oppervlaktewater (concentratie NO ₃ , O ₂ , PO ₄)

Tabel 3-3 Selectie milieu-gerelateerde beleidsindicatoren systeembeschrijving Vlaanderen.

HOOFDSTUK 4. SYSTEEMARCHITECTUUR

4.1. INLEIDING

Net als de kwalitatieve systeemdiagrammen is het systeemdynamische model opgebouwd rond tien thema's. Binnen de thema's zijn de volgende modelbenaderingen gebruikt:

- Demografie: cohort model met beschikbare trends FPB voor immigratie en vruchtbaarheid.
- Economie: systeemdynamisch model ASTRA op Vlaanderen toegepast.
- Ruimtegebruik: aansturing bevolkingsgroei en tewerkstelling, met verdichting.
- Landbouw: voedselconsumptie per inwoner (vlees en groente), omrekening naar virtuele ruimtelijke "voedsel footprint" (Danckaert et al., 2013) en vergelijking werkelijk beschikbare ruimte; aanpassing emissies bedrijven met normoverschrijding aan de hand van verandering atmosferische depositie. De aanlevering van biomassa voor energievoorziening en industriële toepassingen is voorlopig buiten beschouwing gelaten, maar heeft een hoge prioriteit voor een vervolgtraject (zie ook HOOFDSTUK 8).
- Mobiliteit: modale verdeling transport personen en goederenvervoer op basis van gegeneraliseerde kosten (monetair en tijd), aansturing economische groei en bevolkingsomvang.
- Energie: prijsgedreven investeringen in verschillende energiedragers (fossiel, nucleair, biomassa, hernieuwbaar), beïnvloed door klimaat, duurzaamheid en innovatie.
- Water: waterbalans (vraag en aanbod) met onderscheid regen-, drink-, grond- en oppervlaktewater, en waterkwaliteit op basis van emissies landbouw, bevolking en industrie.
- Lucht: omrekening activiteiten (huishoudens, landbouw, energiesector, transport, industrie en handel & diensten) naar emissie m.b.v. emissiefactoren, en vervolgens naar concentraties aan de hand van correlaties en brontoewijzing.
- Afval en Materialen: aansturing afvalproductie en materiaalgebruik vanuit bevolkingsomvang en BRP industrie, terugkoppeling recycling afval naar materiaalgebruik.
- Natuur en Milieu: invloed stressoren (temperatuur, wegtransport, versnippering open ruimte en verstedelijking) op aquatische biodiversiteit, terrestrische biodiversiteit en invasieve soorten via tabel-functies, MSA index GLOBIO en lineaire schaling.

De opzet van de deelmodellen en onderliggende modelvergelijkingen zullen in meer detail worden toegelicht in HOOFDSTUK 5.

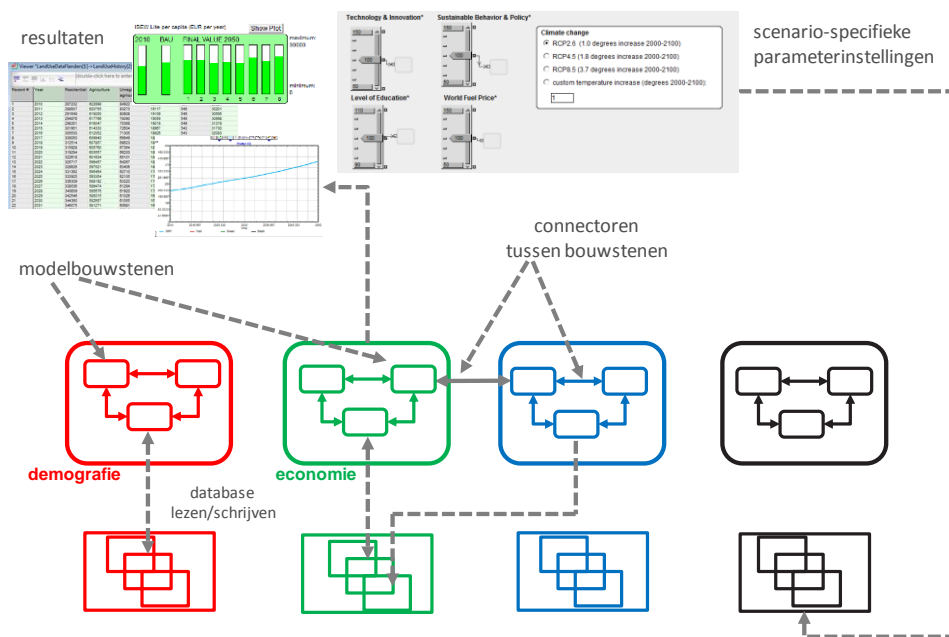
4.2. SOFTWARE PLATFORM

Voor de blauwdruk wordt ExtendSim® gebruikt (ImagineThat, 2013). Deze keuze is te verdedigen op basis van de lage licentiekosten, flexibiliteit van het softwareplatform, de mogelijkheid modellen te gebruiken met een vrij beschikbare demonstratielicentie, de grafische functionaliteit, interface met externe bestanden (o.m. MS Excel, txt en ftp), ondersteuning van gevoeligheids- en onzekerheidsanalyses, en de ervaring van VITO met dit softwareplatform. De architectuur van ExtendSim® is gebaseerd op herbruikbare en zelf te ontwerpen modelbouwstenen, die in modelbibliotheken kunnen worden opgeslagen en beheerd. ExtendSim® ondersteunt hiermee een

‘open platform’ waarin verschillende ontwikkelaars aan de slag kunnen om onderdelen van het systeemdynamische model te ontwikkelen of te verbeteren. Modelbouwstenen kunnen worden ontwikkeld door het manipuleren en schakelen van grafische objecten, maar kunnen evenzeer worden geprogrammeerd in de op C gelijkende computertaal ModL die eigen is aan ExtendSim®. Een korte handleiding met een toelichting op de belangrijkste basisfuncties van ModL is te vinden in Bijlage 1. Dit biedt geïnteresseerden de mogelijkheid om de code van de modelbouwstenen in het systeemmodel te lezen en de toegepaste wiskundige formuleringen te volgen. Modellen in ExtendSim® kunnen bovendien hiërarchisch worden opgezet om de leesbaarheid te verbeteren. De blauwdruk maakt gebruik van vier van dergelijke hiërarchische niveau’s (hoofdmodules, thema’s, toestandsvariabelen en in enkele gevallen een tussenliggend niveau). ExtendSim® legt aan de modelbouwers een strak template op waaraan elke modelbouwsteen moet voldoen. Dit is een noodzakelijke voorwaarde om in een ‘community van ontwikkelaars’ een complex softwareproduct te ontwikkelen (De Kok et al., 2015). Het vergemakkelijkt ook het beheer en reduceert de kosten van het uiteindelijke product. In eerdere projecten is bovendien aangetoond dat ExtendSim® de mogelijkheid biedt om door middel van speciaal ontworpen modelbouwstenen modellen aan te sturen die niet in ExtendSim® zelf ontwikkeld zijn (zie ook Figuur 7-12).

4.3. MODELARCHITECTUUR

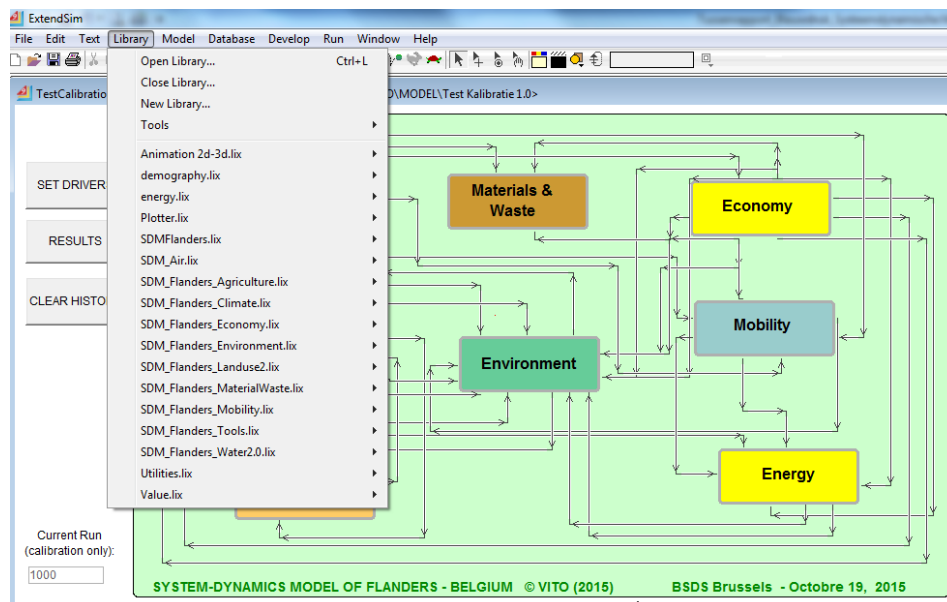
Het systeemmodel rekent met een tijdstap van één jaar de periode van 2010 tot 2050 door, waarbij aan het eind van het jaar een groot aantal toestands- en hulpvariabelen (totale omvang bevolking, omvang beroepsbevolking, bruto regionaal product, concentratie fijn stof ...) in tabellen wordt opgeslagen. Deze variabelen zijn uitgedrukt in absolute eenheden of, indien dit niet mogelijk was, als relatieve index gedefinieerd (gezondheid, biodiversiteit, versnippering open ruimte ...) ten opzichte van de waarde voor het beginjaar. De architectuur van het systeemmodel is eveneens gebaseerd op herbruikbare modelbouwstenen. Deze modelbouwstenen kunnen gegevens inlezen of uitwisselen via connectoren of tabellen, die zijn opgeslagen in de interne gegevensbanken die aan het model zijn toegevoegd (Figuur 4-1).



Figuur 4-1 Gebruik gegevensbanken door de modelbouwstenen en uitwisseling gegevens in het systeemmodel.

Elke modelbouwsteen heeft een uniek referentienummer, waarnaar in de interne code van de modelbouwstenen kan worden verwezen, en een rangorde voor het doorrekenen van de keten van modelbouwstenen tijdens iedere tijdstap. Deze rangordening is normaal gebaseerd op de wijze waarop de modelbouwstenen gekoppeld zijn ("Flow Control"). In de blauwdruk zijn in totaal ca. 250 modelbouwstenen gebruikt, waarvan er ruim 70 zelf ontworpen zijn. Deze zijn in 17 thematische en generieke modelbibliotheken opgeslagen. Bijlage 3 geeft een overzicht van de belangrijkste thematische modelbouwstenen en modelbouwstenen met ondersteunende, technische functionaliteiten. De gedetailleerde ModL code van al deze modelbouwstenen is in de vorm van pdf bestanden toegevoegd aan dit rapport. De overige modelbouwstenen zijn technisch van aard en standaard beschikbaar binnen ExtendSim, en de functionaliteit wordt in de gebruikershandleiding van ExtendSim uitvoerig beschreven. De basisvergelijkingen voor de deelsystemen worden besproken in HOOFDSTUK 5. Het merendeel van de gebruikte modelbouwstenen en bibliotheken is speciaal voor dit project ontwikkeld.

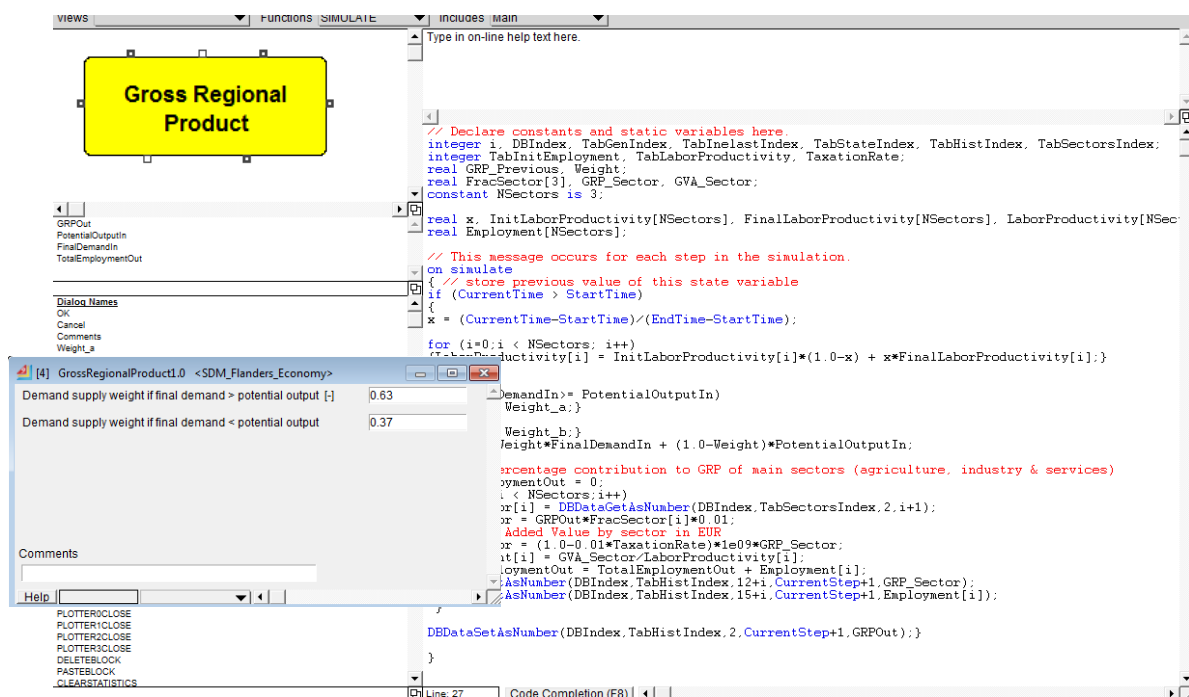
De modelbouwstenen kunnen volledig gecodeerd zijn in ModL (zie Bijlage 1) of bestaan uit een grafische structuur van gekoppelde modelbouwstenen, zogenaamde "Hierarchy Blocks" of H-Blocks. Het gebruik van H-blocks maakt de hiërarchische organisatie van modellen mogelijk. Voor de blauwdruk zijn vier hiërarchische niveau's gebruikt. Op het hoogste niveau (Figuur 4-2) vinden we de deelmodules voor de thema's uit de systeemiagrammen (Demografie, Economie, Ruimte, Energie, Mobiliteit, Landbouw, Materiaalgebruik en Afval en Milieu). Omwille van het overzicht en de grafische vormgeving zijn de thema's Lucht, Water en Natuur ondergebracht in de deelmodule Milieu. Op het laagste (vierde) niveau vinden we de individuele modelbouwstenen.



Figuur 4-2 Thematische modebibliotheken met toegang tot herbruikbare modelbouwstenen in het systeemmodel.

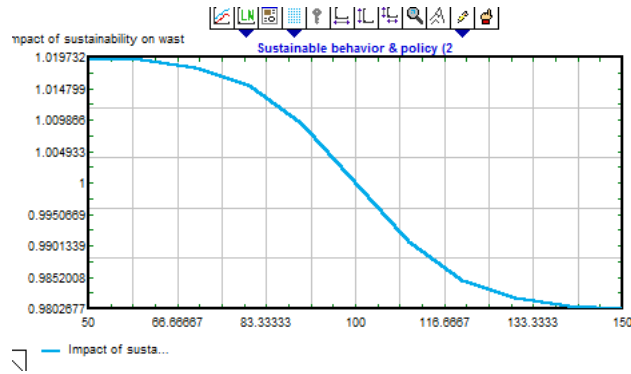
ExtendSim biedt ook de mogelijkheid gegevens uit te wisselen met externe bestanden (bijvoorbeeld MS Excel), maar van deze mogelijkheid is voorlopig geen gebruik gemaakt. In het model wordt gebruik gemaakt van 10 thematisch en 3 generieke gegevensbanken, onder meer voor het inlezen van de beginwaarde van variabelen (bevolkingsomvang, areaal landbouw ...), model parameters, en het wegschrijven van tijdreeksen met resultaten.

Iedere modelbouwsteen wordt gekenmerkt door een grafisch icoon voor visualisatie in het systeemschema, al dan niet met connectoren om gegevens in- of uit te voeren, een dialoogvenster, en de interne structuur (in het geval van als H-block ontworpen modelbouwstenen) of code (in het geval van in ModL gecodeerde modelbouwstenen). De dialoogvensters zijn optioneel en kunnen gebruikt worden om de gebruiker de mogelijkheid te geven parameters in of bij te stellen. Voor de gemiddelde *gebruiker* van de modelbouwstenen volstaat een begrip van de functionaliteit. *Modelontwikkelaars* kunnen via het structuurvenster (Figuur 4-3) toegang krijgen tot de modelvergelijkingen en het grafisch ontwerp van het icoon (bijvoorbeeld om connectoren toe te voegen). Voor het ontwerp van de modelbouwstenen is geen standaardprocedure beschikbaar, maar er zijn wel een aantal ontwerpprincipes die de herbruikbaarheid en uitwisselbaarheid van de modelbouwstenen ten goede komen (De Kok et al., 2014). Een beperking van het aantal in- en uitgaande connectoren, definitie op het niveau van toestandsvariabelen, en goede documentatie komen de herbruikbaarheid van een modelbouwsteen ten goede.



Figuur 4-3 Voorbeeld van een in ModL gecodeerde modelbouwsteen voor het Bruto Regionaal Product met dialoogvenster voor parameterkeuze, en het structuurvenster dat toegang biedt tot de ModL code en het ontwerp van het grafisch icoon.

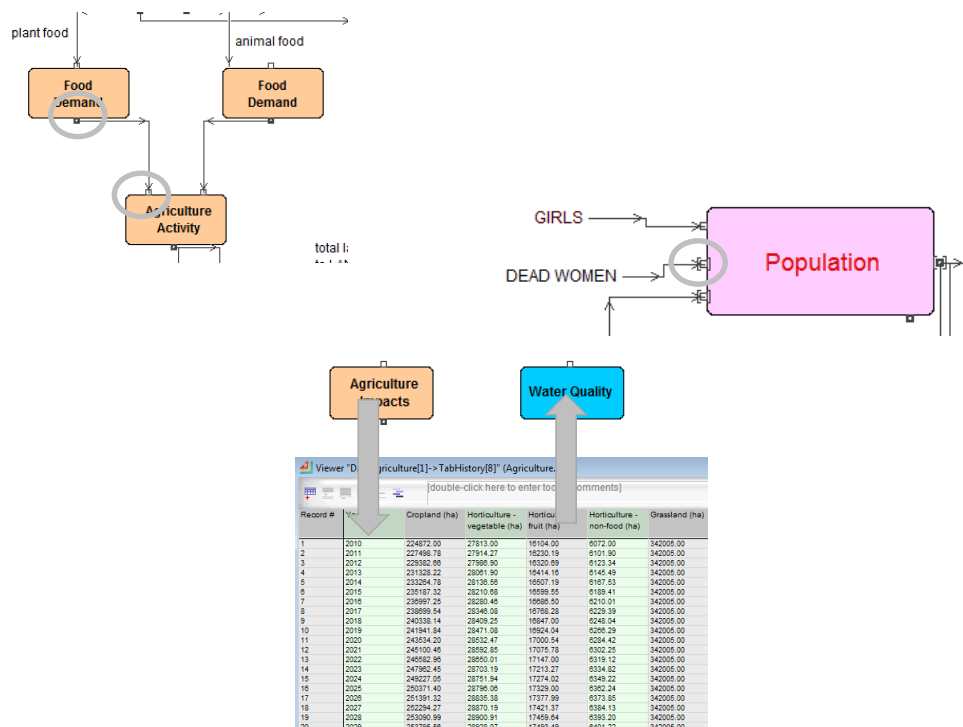
Het merendeel van relaties tussen modelvariabelen is vervat in de modelvergelijkingen, die zijn gecodeerd in de modelbouwstenen. In sommige gevallen is nog geen kwantitatief model beschikbaar of is de relatie tussen twee variabelen onzeker, terwijl toch verwacht kan worden dat deze een belangrijke functie heeft binnen het systeemmodel. Dit is bijvoorbeeld het geval met de invloed van innovatie op de arbeidsproductiviteit van werknemers, of de invloed van duurzaam gedrag op de afvalproductie per inwoner (Figuur 4-4). In dit soort gevallen is de toepassing van zogenaamde **tafel functies** gebruikelijk in systeemdynamische modellen (Sterman, 2000). Dit zijn grafisch instelbare functies voor (niet)lineaire relaties tussen variabelen, die door experts kunnen worden ingesteld of aangepast indien nodig. Indien een beter deelmodel beschikbaar komt kan de tabel functie worden vervangen door een geschikte modelbouwsteen. Tafel functies zijn standaard beschikbaar binnen ExtendSim, alle gebruikte tabel functies worden centraal beheerd vanuit één tabel.



Figuur 4-4 Tabelfunctie voor de invloed van “Duurzaam gedrag en beleid” op de productie van huishoudelijk afval per inwoner.

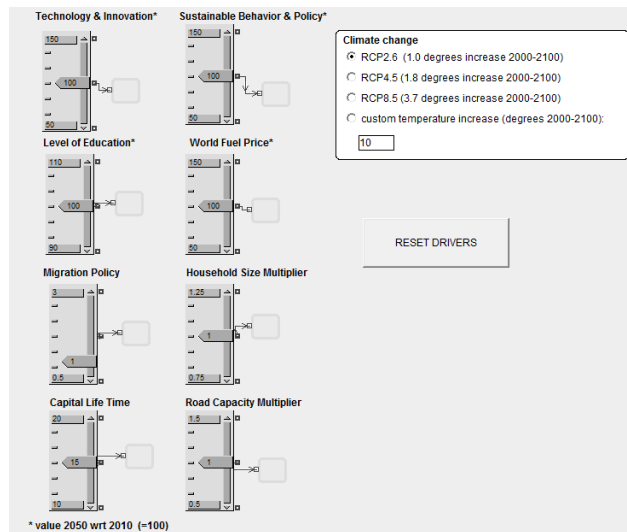
Binnen het model is gebruik gemaakt van een combinatie van drie technieken om modelbouwstenen te koppelen (Figuur 4-5), elk met voor en nadelen:

- Koppeling via de connectoren: dit is de meeste gebruikelijke en transparante wijze om modellen op te zetten in ExtendSim, maar het nadeel is dat complexere modellen toch snel onoverzichtelijk worden als het aantal koppelingen groot is. Dit kan deels voorkomen worden door een model hiërarchisch te organiseren (zoals het geval is met de blauwdruk).
- Koppeling via “catch”- en “throw”-blocks: deze techniek maakt gebruik van speciale modelbouwstenen die in ExtendSim beschikbaar zijn en op afstand gegevens kunnen doorgeven, zonder dat sprake is van een zichtbare koppeling. Dit maakt modellen overzichtelijker, maar verbergt wel de complexiteit als deze er is.
- Uitwisseling van gegevens door het lezen uit, en schrijven naar, gegevenstabellen. Dit maakt modellen eveneens overzichtelijker, maar vraagt meer inspanning van de modelleers. Ook deze techniek verbergt de complexiteit van modellen.



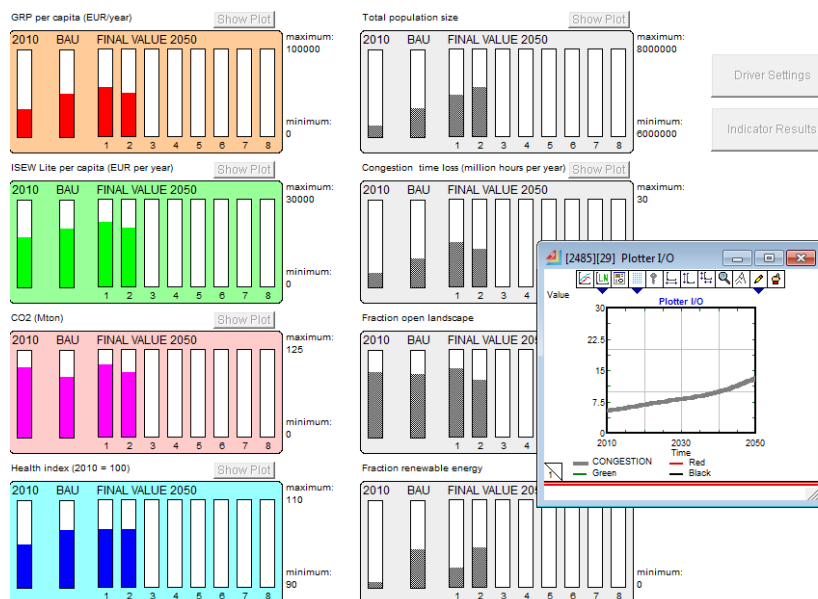
Figuur 4-5 Technieken om modelbouwstenen te koppelen en gegevens uit te wisselen in ExtendSim.

Voor het instellen van de **exogene variabelen** voor de aansturing van het model (zie Figuur 4-6) en de visualisatie van resultaten in de vorm van **beleidsindicatoren** (zie Sectie 3.2) is volop gebruik gemaakt van de grafische mogelijkheden van ExtendSim. De afwijking van de ontwikkeling van deze exogene variabelen ten opzicht van het neutrale, ‘business-as-usual’ scenario kan in het model via een dashboard worden ingesteld (Figuur 4-6).



Figuur 4-6 Dashboard voor de instelling van de ontwikkeling van exogene variabelen en beleidsparameters die het systeemmodel aansturen.

Figuur 4-7 toont de eindwaarden van een selectie van indicatoren voor verschillende simulaties naast de waarde voor het aanvangsjaar 2010 en de eindwaarde voor het referentie- of business-as-usual-scenario (BAU). Het tijdsverloop van de indicatoren, opgeslagen in de gegevensbanken, kan ook getoond worden in grafieken. De organisatie van het “dashboard” met de invloedsvariabelen en het scherm met indicatoren kunnen met relatief weinig inspanning worden aangepast omdat ook hier weer gebruik gemaakt is van herbruikbare modelbouwstenen.



Figuur 4-7 Voorbeeld van de visualisatie van beleidsindicatoren, zoals gebruikt in de interactieve workshop systeemmodellering tijdens de BSDS 2015 (zie Sectie 6.4).

HOOFDSTUK 5. KWANTITATIEF ONTWERP

5.1. INLEIDING

In de grond zijn twee benaderingen mogelijk om van het conceptuele systeemmodel, weergegeven in een systeemdiagram zoals dat in Figuur 3-1, tot een kwantitatief systeemdynamisch model te komen. Ten eerste kan een “bottom-up” aanpak gevolgd worden: hierbij wordt voor de kwantificering van de relaties tussen variabelen zoveel mogelijk uitgegaan van de beschikbare gegevens, rapportages en projecties. Dit betekent ook dat het kwalitatief systeemontwerp soms bijgesteld wordt, om beter aan te sluiten bij de bestaande inzichten en gegevens. Bij een “top-down” benadering wordt juist zoveel mogelijk gebruik gemaakt van de systeemdiagrammen: voor elke relatie tussen twee variabelen wordt getracht een, indien nodig nieuwe, wiskundige formulering te bedenken. Dit zijn altijd algebraïsche of differentievergelijkingen. Voor het instellen van de parameters wordt dan wel weer van bestaande gegevens gebruik gemaakt. Het World03 model en ook het WadBos2.0 model is een voorbeeld van een systeemdynamisch model gebaseerd op een “top-down” benadering: het aantal toestandsvariabelen is relatief beperkt en de complexiteit van het model zit niet in de vergelijkingen maar in de structuur van terugkoppelingen. Voor de blauwdruk is hoofdzakelijk een bottom-up benadering gevolgd. Dit heeft weliswaar tot gevolg dat de deelmodellen kunnen verschillen in complexiteit, maar zo wordt zo goed mogelijk gebruik gemaakt van de bij de Vlaamse overheden en kennisinstellingen beschikbare gegevens en modellen.

De voor de kwantificering van variabelen en koppelingen daartussen gevolgde benaderingen kunnen als volgt geïnclassificeerd worden:

- a. Toepassing van bestaande modellen of de daarin toegepaste benaderingen (al dan niet omgezet naar de Vlaamse context): leeftijdsklassen bevolking, sterftetafels, systeemdynamisch model economie, MSA index terrestrische biodiversiteit ...;
- b. Aanpassing trends: vruchtbaarheid vrouwen, participatiegraad arbeidsmarkt (SVR), immigratie (FPB) ...;
- c. Toepassing van omrekencoëfficiënten: omrekening landbouw economische activiteit en demografie naar emissies water en lucht, omrekening luchtmissies naar concentraties op basis van brutoemissionsgegevens en historische data, effecten luchtkwaliteit op arbeidsproductiviteit, impact emissies op ISEW;
- d. Schaling op basis van de verhouding aansturende variabelen t.o.v. initiële waarden in combinatie met elasticiteiten die de gevoeligheid bepalen: invloed verstedelijking en intensiteit wegtransport op geluidsverstoring t.o.v. waarde beginjaar;
- e. Tabelfuncties voor niet-lineaire verbanden variabelen: impact gezondheid op arbeidspopulatie, invloed NO_x-concentraties op aantal O₃-overschrijdingsdagen;
- f. Overige typen van modellering zoals de modale verdeling van transport op basis van de gegeneraliseerde kosten, input-output modellering verdeling economische sectoren.

Het *kwantitatief ontwerp* is er op gericht de terugkoppelingen in de systeemdiagrammen (zie Sectie 3.2) te bepalen in de vorm van kwantitatieve systeemdynamische vergelijkingen, met inbegrip van de inventarisatie van modelliteratuur en bestaande toekomstverkenningen en het verzamelen van de benodigde gegevens. Tijdens een tweede workshop georganiseerd in het

project is een eerste voorstel voor de te hanteren modelvergelijkingen voorgesteld. De werking van het totale systeemdynamische model, waarvan intussen een allereerste werkende versie was ontwikkeld, is toegelicht aan de hand van een aantal voorbeelden. Met de verschillende experts die de studie opvolgden, het MIRA-team en VITO werd nagegaan in hoeverre de kwantificering van de relaties tussen de variabelen uit de systeemdiagrammen om aanpassing of verfijning vroeg. De mogelijkheid om zeer snel scenario's door te rekenen, en resultaten te vergelijken werd positief ontvangen, evenals de ingebouwde semi-automatische kalibratieprocedure en visualisatie. Er waren ook een aantal kanttekeningen:

- De afbakening tussen modelexogene factoren en modelendogene factoren was niet altijd duidelijk.
- De consistentie van het totale systeem en verschillen in detailniveau vroegen hier en daar om verbetering; budgettaire ruimte voor milieumaatregelen, fysieke begrenzingen, en de rol van im- en export zijn nog niet in beschouwing genomen.
- Belangrijke terugkoppelingen zoals tussen mobiliteit/water/milieu en de economie, het ruimtegebruik en de landbouw ontbraken nog en zouden moeten worden meegenomen.
- Een aantal deelsystemen gebruikten, omwille van de transparantie, lineaire verbanden om de begintoestand te projecteren naar de eindwaarde. Meer complexe of flexibele functies met drempelwaarden e.d. zijn voor langetermijnprojecties aangewezen.
- De rol van technologie en innovatie bleef nog onderbelicht, dat geldt ook voor gezondheid (nu alleen via de invloed van luchtkwaliteit op de levensverwachting) of het onderwijs.

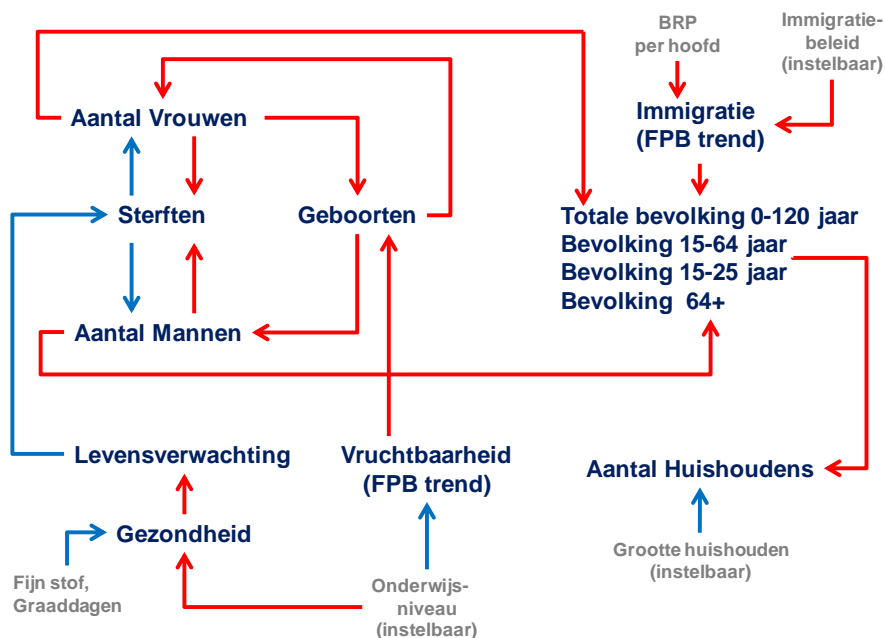
Inmiddels is aan talrijke punten van kritiek tegemoet gekomen. Het “dashboard” in Figuur 4-6 geeft de gebruiker op overzichtelijke wijze toegang tot de sturende, exogene factoren en beleidsontwikkelingen (bijvoorbeeld de energieprijzen en het immigratiebeleid), waarmee de instelling daarvan duidelijk gescheiden is van het systeemmodel. Een budgettaire begrenzing van maatregelen is nog niet geïmplementeerd, maar kan relatief eenvoudig worden toegevoegd (bijvoorbeeld met een puntensysteem). Wel is een vereenvoudigde versie van de ISEW-indicator voor duurzame welvaart toegevoegd (zie Sectie 5.3), waarin milieukosten zijn verwerkt. Een aantal terugkoppelingen tussen de deelmodellen voor de Demografie, Economie en Landgebruik is toegevoegd in de vorm van wiskundige vergelijkingen of grafische tabelfuncties (zie Figuur 4-4) die niet-lineaire verbanden toestaan. Voor de gezondheid is binnen het deelsysteem voor de Demografie een aparte modelbouwsteen ontwikkeld, en de rol van Technologie & Innovatie is toegevoegd aan de exogene factoren. Deze sturende variabele beïnvloedt het systeem op een groot aantal punten (onder meer de arbeidsproductiviteit, energieverbruik en afvalproductie). De begrenzing van de economie is in het model onder meer meegenomen via het beschikbare arbeidspotentieel (uit de demografie en tewerkstellingsgraad naar leeftijdsklasse), de arbeidsproductiviteit (gekoppeld aan de gezondheid en technologische vooruitgang) en de levensduur van kapitaal (ook een stuurvariabele). Zie ook Sectie 5.3.

Voor elk van de tien thema's (Demografie, Economie, Mobiliteit, Energie, Landbouw en Voeding, Ruimtegebruik, Luchtkwaliteit, Water, Natuur en Milieu, en Afval en Materialen) geven we een kort overzicht van de opzet van het onderliggende deelmodel. De deelmodellen zijn algemeen een vereenvoudiging van de beschikbare rekenmodellen, maar beschrijven wel de belangrijkste toestandsvariabelen (bijvoorbeeld bevolkingsomvang, verkeersvolume, bebouwd ruimtegebruik, biodiversiteit). De beschikbare gegevens en bestaande projecties voor Vlaanderen zijn gebruikt voor het instellen van de begintoestanden, de kalibratie van groeiconstantes en drempelwaarden, en methodologische principes (bijvoorbeeld een leeftijds-cohort benadering voor de demografie en prijsgedreven modale keuze in transport).

De structuur van ieder deelmodel is in vereenvoudigde systeemdiagrammen samengevat (rood = positieve, versterkende invloed van variabele, blauw = negatieve, dempende invloed). De begrippen ‘positief’ en ‘negatief’ dienen hier niet als goed en slecht opgevat te worden, maar verwijzen naar de wiskundige relaties tussen variabelen. Om deze reden is gekozen voor de kleuren rood en blauw. De meer gedetailleerde systeemdiagrammen, uitgewerkt tot op het niveau van de toestandsvariabelen en modelparameters, zijn te vinden in Bijlage 2. Variabelen uit andere deelmodellen, of exogene variabelen waarvan de ontwikkeling instelbaar is via het dashboard van Figuur 4-6, zijn in de kleur grijs aangegeven. De belangrijkste modelvergelijkingen worden besproken, voor de modeltechnische details wordt men verwezen naar de bijlagen met de ModL code van de betreffende modelbouwstenen (zie ook het overzicht van Bijlage 3).

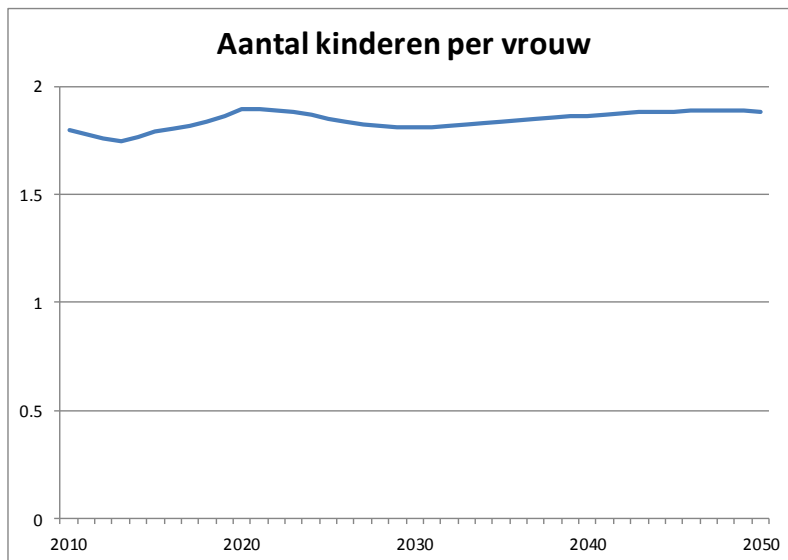
5.2. DEMOGRAFIE

Het deelmodel voor de Demografie vormt samen met dat voor de Economie, de “motor” van het gehele systeemmodel. Deze twee deelmodellen zijn onderling gekoppeld, en beïnvloeden direct of indirect vrijwel alle deelthema’s. Het deelmodel voor de Demografie gebruikt een leeftijd-cohort benadering en de gegevens van het Federaal Planbureau (FPB, 2014), die eerder ook voor het RuimteModel Vlaanderen gebruikt werden (Engelen et. al., 2011). Binnen het model wordt rekening gehouden met drie demografische variabelen: geboorte, sterfte en (netto) immigratie (Figuur 5-1).

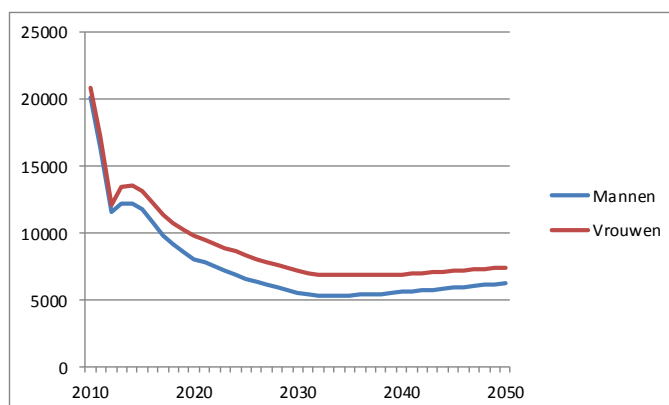


Figuur 5-1 Demografisch deelmodel op basis van leeftijdscohorten.

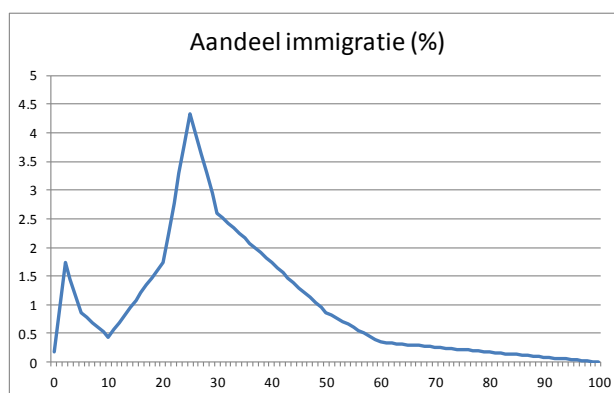
In een leeftijd-cohort model wordt de bevolking ingedeeld in leeftijdscohorten, waarvan een deel na elke tijdstap doorschuift naar het volgende cohort. Om praktische redenen, en omwille van de hoge rekensnelheid van het systeemmodel, is gekozen voor leeftijdscohorten van één jaar in de leeftijd van 0 tot 120 jaar. Bovendien wordt onderscheid gemaakt tussen mannen en vrouwen. Voor het BAU scenario worden in het model trends gebruikt op basis van projecties van het Federaal Planbureau voor de vruchtbaarheid van vrouwen (Figuur 5-2) en de immigratie van mannen en vrouwen (Figuur 5-3). Het leeftijdsprofiel van de immigranten is ook gebaseerd op een verdeling van het Federaal Planbureau (Figuur 5-4).



Figuur 5-2 Verloop gemiddeld aantal kinderen per vrouw in de vruchtbare leeftijd van 15-49 jaar (FPB, 2014).



Figuur 5-3 Verloop immigratie van mannen en vrouwen (FPB, 2014).

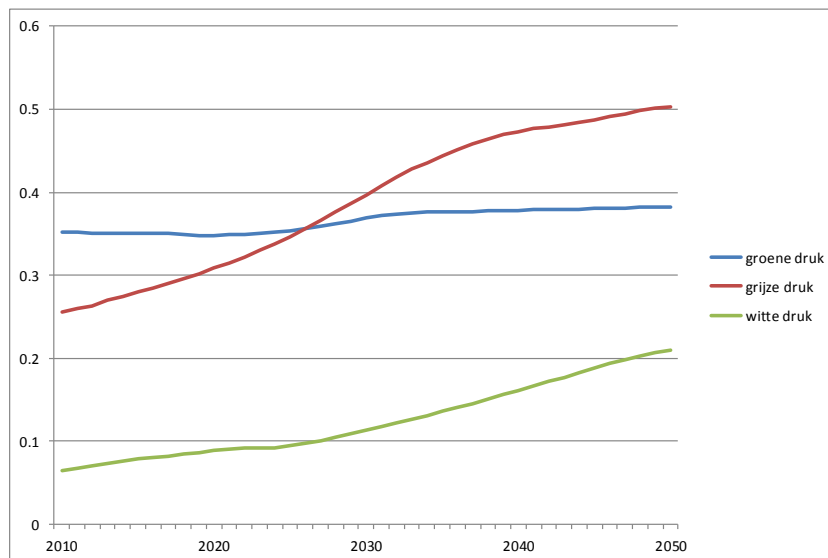


Figuur 5-4 Leeftijdsprofiel immigranten (FPB).

Drie instelbare exogene stuurvariabelen (zie Sectie 3.2) beïnvloeden de demografie: het immigratiebeleid, de omvang van huishoudens en het onderwijsniveau. De immigratie is bovendien gekoppeld aan het BRP per hoofd van de bevolking via een tabel-functie waarmee er een terugkoppeling is van de economie naar de demografie. Deze terugkoppeling werkt in het model in op het effect van het migratiebeleid en heeft dus enkel een invloed als het migratiebeleid wijzigt.

De variabele Gezondheid is een index, die de gezondheidstoestand van de Vlaamse bevolking ten opzichte van het beginjaar meet. Deze is een functie van het aantal hittedagen ten gevolge van klimaatverandering (hittegolven), het onderwijsniveau (voedingsgewoonten en levensstijl), en de concentratie fijn stof. Binnen het deelmodel beïnvloedt de Gezondheid de sterftekans, buiten het deelmodel wordt een koppeling gemaakt met de arbeidsproductiviteit in het deelmodel Economie. Voor beide koppelingen wordt een tabel-functie gebruikt.

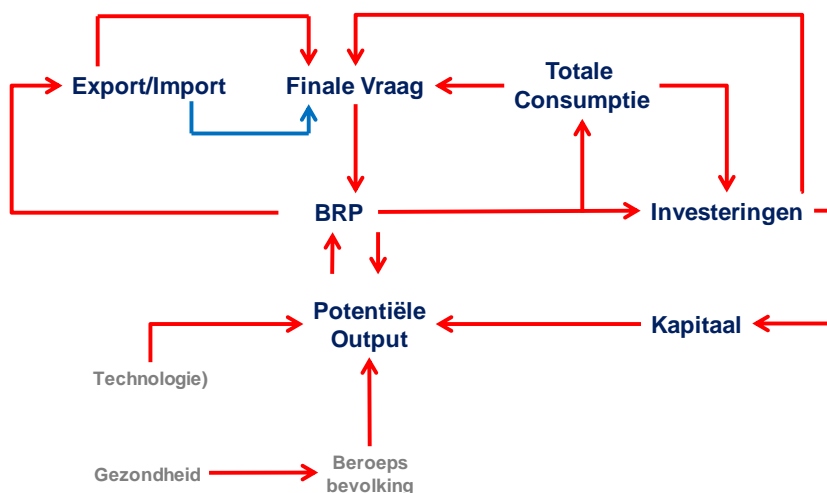
Drie afgeleide variabelen worden berekend: het aantal personen in de leeftijd 15-64 jaar (actieve bevolking en arbeidsaanbod), het aantal personen in de leeftijd 65+, en het aantal personen in de leeftijd 5-25 jaar (schoolverkeer). Twee belangrijke demografische indicatoren zijn de “groene druk” en de “grijze druk” (Pelfrene, 2009). De groene druk is de verhouding tussen het aantal personen in de leeftijd van 5 tot 25 jaar ten opzichte van het aantal personen op actieve leeftijd (15-64 jaar). De grijze druk is de verhouding tussen het aantal personen ouder dan 64 ten opzichte van het aantal personen op actieve leeftijd. Deze twee indicatoren worden in het model berekend en worden in Figuur 5-5 getoond voor het BAU scenario. De “witte druk” (de verhouding tussen het aantal personen ouder dan 80 jaar ten opzichte van het aantal personen op actieve leeftijd wordt ook getoond. Deze verviervoudigt in dezelfde periode waarover de “grijze druk” al verdubbelt.



Figuur 5-5 Groene, grijze en witte druk voor het BAU scenario.

5.3. ECONOMIE

Het deelsysteem voor de economie neemt een centrale plaats in het systeemmodel in. Niet alleen zijn veel processen een direct of indirect gevolg van economische activiteit (transportvraag, ruimtegebruik, immigratie, gebruik van materialen en grondstoffen ...) maar bovendien werken veel thema's in op de economie (vergrijzing, kosten van congestie, milieukosten ...). In tegenstelling tot de binnen de economie gangbare keuze voor evenwichtoplossingen en statische, boekhoudkundige benaderingen, is gekozen voor een dynamische modellering met terugkoppelingen binnen het thema. Deze is gebaseerd op een vereenvoudiging van de economische module uit het ASTRA model (Schade, 2005; Fermi et al., 2014), een geïntegreerd Europees transport-economisch systeem-dynamisch model dat onder de coördinatie van het Fraunhofer Instituut werd ontwikkeld. De vereenvoudigingen betreffen onder meer de sectorale differentiatie (drie sectoren i.p.v. tien), het gebruik van een proportionele verdeling i.p.v. een input-output model, de administratieve differentiatie tot één enkele regio, en de koppeling met een eigen demografisch en transportmodel (zie Secties 5.2 en 5.4). De centrale indicator voor economische ontwikkeling is het Bruto Regionaal Product (BRP), dat door vraag en aanbod bepaald wordt (Figuur 5-6). Verder bevat het model neoklassieke, Keynesiaanse elementen zoals Cobb-Douglas productiefuncties (Cobb en Douglas, 1928; Fermi et al., 2014). De potentiële productiviteit of Potentiële Output van de economie wordt door technologie en innovatie aangestuurd, uitgedrukt in de technologie factor 'Total Factor Productivity' (TFP), welke gekoppeld is aan de exogene variabele "Technologie" (Figuur 5-6) (D'Auria, 2010; Biatour, 2008; Lebrun, 2015). Aan de vraagzijde wordt de Finale Vraag (FV) bepaald door de private en overheidsconsumptie, im- en export, en totale investeringen. Aan de aanbodzijde worden de productiemiddelen bepaald door de beschikbaarheid van arbeidskrachten (verkregen uit het demografisch deelsysteem) en de beschikbaarheid van kapitaal (infrastructuur, machines en geld). Het aanbod arbeidskrachten is aan de toestandsvariabele Gezondheid uit het deelsysteem voor de demografie (Figuur 5-1) gekoppeld om ziekteverzuim te verrekenen. Er zijn twee belangrijke terugkoppelingen binnen het deelsysteem: tussen economische groei en consumptie, en tussen economische groei, investeringen, kapitaal en potentiële output. De aansturing gebeurt dus door de technologie en vanuit het demografisch deelsysteem.



Figuur 5-6 Modelstructuur economisch deelsysteem ontleend aan economische module ASTRA model (Fermi et al., 2014).

Omwille van de centrale rol van dit deelmodel en de complexiteit ervan geven we een overzicht van de gebruikte systeemdynamische basisvergelijkingen voor de toestandsvariabelen Bruto Regionaal Product (BRP), Finale Vraag (FV), Consumptie (C), Investerings (INV), Kapitaal (K), Arbeidsaanbod (A), Potentiële Output (PO), Export (EX), Import (IM) en de totale tewerkstelling (TW):

$$BRP(t) = \alpha \times FV(t) + (1-\alpha) \times PO(t) \quad (1)$$

$$C_{priv}(t) = C_{priv}(t-\Delta t) + \gamma_{1,priv} \times (1-q_1) \times (1-q_2) \times (BRP(t)-BRP(t-\Delta t)) \quad (2)$$

$$C_{govt}(t) = C_{govt}(t-\Delta t) + \gamma_{1,govt} \times q_1 \times (BRP(t)-BRP(t-\Delta t)) \quad (3)$$

$$INV(t) = INV(t-\Delta t) + \gamma_2 \times (C_{priv}(t) - C_{priv}(t-\Delta t)) \quad (4)$$

$$FV(t) = C(t) + EX(t) + INV(t) - IM(t) \quad (5)$$

$$PO(t) = TFP \times A(t)^\beta \times K(t)^{(1-\beta)} \quad (6)$$

$$A(t) = POP_{15-64}(t) \times \gamma_4 \times p(t) \quad (7)$$

$$K(t) = K(t-\Delta t) + INV(t) - INV(t-T) \quad (8)$$

$$TW(t) = TW(t-\Delta t) \times (BRP(t)/BRP(t-\Delta t)) \times (\pi(t-\Delta t)/\pi(t)) \quad (9)$$

$$IM(t) = IM(t-\Delta t) + \gamma_6 \times (C(t) - C(t-\Delta t)) \quad (10)$$

$$EX(t) = EX(t-\Delta t) + \gamma_7 \times (BRP(t) - BRP(t-\Delta t)) \quad (11)$$

Hierin is α een dimensieloze weegfactor, γ_1 de invloed van het BRP op de private en overheidsconsumptie, q_1 de fractie belastingen op het BRP, q_2 de fractie gespaard BRP, β de elasticiteit van de productie voor kapitaal en arbeid (zie ook Havik et al., 2014), γ_2 de invloed van private consumptie op de investeringen, γ_4 het aantal gewerkte uren per jaar (afhankelijk van de participatiegraad en wordt gecorrigeerd voor ziekteverzuim als functie van de gezondheid (zie deelmodel Demografie), $p(t)$ de participatiegraad van de bevolking op actieve leeftijd, T de levensduur van kapitaal, γ_5 een dimensieloze kalibratieconstante voor de tewerkstelling, δ de fractie belasting op arbeid, $\Pi(t)$ de sector- en tijdsafhankelijke arbeidsproductiviteit in EUR per capita per jaar, γ_6 en γ_7 de invloed van de totale consumptie en het BRP op de import en export. Deze laatste variabele kan nog eens gekoppeld worden aan de graad van technologische ontwikkeling. De totale tewerkstelling wordt proportioneel verdeeld over de drie sectoren landbouw, industrie en diensten, waarbij uitgegaan wordt van het sectorale BRP voor het beginjaar 2010 ("constant share"). Hetzelfde gebeurt met het bruto regionaal product. Het investeringsmodel (vgl. 4) is Keynesiaans, wat wil zeggen dat de investeringen bepaald worden door de private consumptie. Het arbeidsaanbod wordt bepaald uit de omvang van de actieve bevolking op leeftijd tussen 15 en 64 jaar, waarbij de grenzen kunnen worden aangepast (bijvoorbeeld i.v.m. een verhoging van de pensioenleeftijd). Het werkloosheidspercentage wordt tenslotte bepaald uit het verschil tussen het arbeidsaanbod $A(t)$ en de tewerkstelling $TW(t)$. Net als in het ASTRA model wordt de weegfactor α afhankelijk van het belang van vraag en aanbod ingesteld. Dit gebeurt door opsplitsing van vergelijking (1):

$$BRP(t) = \alpha_1 \times FV(t) + (1-\alpha_1) \times PO(t) \quad \text{als} \quad FV(t) \geq PO(t) \quad (12)$$

$$BRP(t) = \alpha_2 \times FV(t) + (1-\alpha_2) \times PO(t) \quad \text{als} \quad FV(t) < PO(t) \quad (13)$$

Bij de totale consumptie wordt nog eens onderscheid gemaakt tussen de private- en overheidsconsumptie. Het langetermijngroei-pad van een economie wordt voornamelijk bepaald door de potentiële output, maar de reële groei schommelt hierrond in functie van de conjunctuur (D'Auria, 2010). Een veel gebruikte economische indicator om de conjunctuur van landen te meten

is de zogenaamde Output Gap (Jahan en Mahmud, 2013), het verschil tussen reële en potentiële productie van een economie (vaak uitgedrukt als percentage van het bruto regionaal product):

$$Output\ Gap = (BRP(t) - PO(t)) / BRP(t) \quad (14)$$

De Output Gap combineert vraag en aanbod in één indicator en beschrijft de mate waarin de economie van een regio of land tegemoet kan komen aan de vraag. In tijden van hoogconjunctuur is de Output Gap positief, wat betekent dat de potentiële productie achterblijft bij de werkelijke productie. Dit gaat gepaard met prijsstijgingen. Omgekeerd zal in de tijden van recessie de Output Gap negatief zijn, en zullen prijzen dalen. Bijgesteld na de crisis, varieerde de Output Gap voor België tussen de -4 % en +3 % van het BRP in de jaren 1999-2015 met een waarde van ca. -2 % voor het jaar 2010 (Lebrun, 2015). Het bepalen van de Output Gap is geen eenvoudige zaak, en met veel onzekerheid omgeven. Voor het beginjaar 2010 is de met het systeemmodel berekende Output Gap -2.3 %.

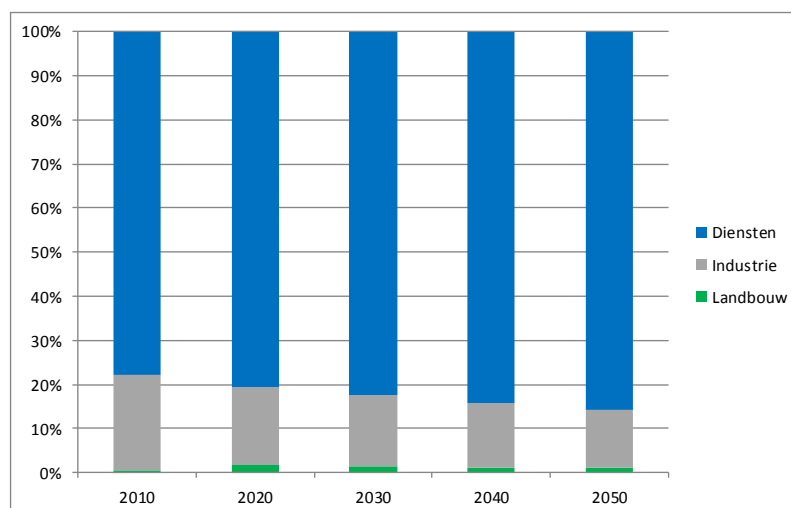
Tabel 5-1 geeft een overzicht van de beginwaarden voor de toestands- en hulpvariabelen, en gebruikte bronnen.

Variabele/parameter	Eenheid	Waarde 2010	Bron / Berekening
Bruto regionaal product	BEUR per jaar	204	Studiedienst
Bruto regionaal product (België)	BEUR per jaar	356	Planbureau
Overheidsconsumptie	BEUR per jaar	49.14	Planbureau + schaling op basis BRP
Private consumptie	BEUR per jaar	107.42	Planbureau + schaling op basis BRP
Export	BEUR per jaar	161.86	Planbureau + schaling op basis BRP
Import	BEUR per jaar	157.58	Planbureau + schaling op basis BRP
Kapitaalvoorraad	BEUR per jaar	400	Schatting
Investerings	BEUR per jaar	40.76	Planbureau + schaling op basis BRP
Arbeidsaanbod	Miljoen Personen (15-64 jr)	3.84	Demografisch deelsysteem
Aandeel BRP landbouw	%	0.93	INR, Studiedienst uit % bruto toegevoegde waarde
Aandeel BRP industrie	%	26.02	"
Aandeel BRP diensten	%	73.05	"
Totale tewerkstelling landbouw	Personen (FTE)	2526000	Federaal Planbureau

Tabel 5-1 Beginwaarden toestandsvariabelen voor het economisch deelsysteem.

In de context van een economisch groeimodel weerspiegelt de kapitaalvoorraad de productiefactor kapitaal, en dit omvat gebouwen, machines en ICT-infrastructuur. De kapitaalvoorraad stijgt door de jaarlijkse investeringen en daalt door het gebruik van het kapitaal, de technische en economische veroudering, zoals bepaald door de levensduur van kapitaal (zie hoofdstuk 3). Omdat die laatste factor moet geschat worden is ook de totale kapitaalvoorraad een schatting (Gorzig, 2007; Derbyshare, 2010). Voor een langetermijngroeimodel moet kapitaalvoorraad, afschrijving en zijn invloed op de groei een consistent geheel zijn, en wordt de kapitaalvoorraad voor het startjaar bijgesteld bij de ontwikkeling en toetsing van het model. Hierdoor is de kapitaalvoorraad in het startjaar zo'n 15 % lager dan de schattingen van de NBB. Deze bijstelling is nodig omdat we de kapitaalvoorraad als één geheel beschouwen, met één afschrijvingspercentage of levensduur.

De ontwikkeling van de totale tewerkstelling wordt, uitgaand van de waarde voor het beginjaar 2010, berekend uit de groei van het Bruto Regionaal Product en de ontwikkeling van de arbeidsproductiviteit. Deze laatste parameter is gekoppeld aan de exogene stuurvariabele "Technologie" (zie Sectie 4.3) via een tabelfunctie. Voor de verdeling van de totale tewerkstelling over de hoofdsectoren landbouw, industrie en diensten wordt gebruik gemaakt van de resultaten van het RuimteModel (Engelen et al., 2011b) om de tertiaïrisering van de economie te verrekenen (Figuur 5-7).



Figuur 5-7 Ontwikkeling sectorale verdeling tewerkstelling.

Een toekomstige versie van het model zou een input-output tabel (FPB, 2012) kunnen gebruiken om de wisselwerking tussen een groter aantal economische deelsectoren te beschrijven. Input-output tabellen geven heel goed de interacties tussen sectoren weer voor het jaar waarvoor ze gemaakt zijn maar de gebruikte coëfficiënten zijn te statisch om de dynamische interacties tussen sectoren op langere termijn te kunnen vatten. Het economisch deelmodel is wel zo opgezet dat meer of andere sectoren eenvoudig kunnen worden toegevoegd. Vergelijking (7) is een vereenvoudiging: voor de participatiegraad wordt geen gemiddelde gebruikt, maar waarden die aan leeftijds- en geslachtsafhankelijke cohorten zijn gekoppeld (Pelfrene, 2009). De gebruikte modelparameters (Tabel 5-2) zijn in principe tijdsafhankelijk, maar kunnen tijdsafhankelijk gemaakt worden als dat nodig is. Zo is bijvoorbeeld de participatiegraad, het percentage personen in de actieve leeftijd, dat daadwerkelijk tewerkgesteld is, tijdsafhankelijk. De afschrijving van kapitaal (vergelijking 8) gebeurt op basis van de levensduur. Voor de jaren 1980-2009 wordt een historische tijdreeks voor de investeringen gebruikt (momenteel met de beginwaarde voor 2010, i.v.m. gebrek aan gegevens).

Parameter	Eenheid	Waarde 2010	Bron/berekening
Weegfactor α_1	Dimensieloos (-)	0.33	Geschat, D'Auria (2010)
Weegfactor α_2	Dimensieloos (-)	0.67	Geschat, D'Auria (2010)
β Cobb-Douglas	"	0.63	Havik et al., 2014
Invloed BRP op private consumptie $\gamma_{1,priv}$	"	0.53	Planbureau, verhouding groei private consumptie en BRP voor jaren 1995-2012
Invloed BRP op private consumptie $\gamma_{1,govt}$	"	0.24	Planbureau, verhouding groei overheids consumptie en BRP voor 1995-2012
Taxatie op BRP q_1	%	50	Instelbaar
Gespaard deel BRP (privaat) q_2	%	10	Instelbaar
Invloed private consumptie op investeringen γ_2	dimensieloos	0.40	Planbureau, verhouding groei investeringen private consumptie en BRP voor 1995-2012
Aantal werkuren per jaar γ_4	Uren/capita/jaar	1560	
participatiegraad $p(t)$	% actief per cohort	Variabel	Pelfrene, 2009
Levensduur kapitaal T	jaren	15	NBB, 2014; Gorzig, 2008, instelbaar
Belasting op arbeid	fractie	0.5	Instelbaar, aanname.
Schaalfactor tewerkstelling γ_5	-	1.78	Afgeleid uit totale tewerkstelling, BRP en arbeidsproductiviteit
Invloed consumptie op import γ_6	dimensieloos	0.5	Planbureau, verhouding groei import en consumptie voor jaren 1995-2012
Invloed BRP op export γ_7	dimensieloos	0.5	Planbureau, verhouding groei export en BRP voor jaren 1995-2012

Tabel 5-2 Modelparameters en bronnen economisch deelsysteem.

De economische module is verder uitgewerkt om rekening te houden met de terugkoppelings-effecten van milieukwaliteit op de economische groei. In lijn met het JRC (Vrontisi, 2014), en (NAM, 2009; Ostblom, 2004) hanteren we een “Human Capital” benadering om de impacts van luchtkwaliteit en verlies van groene ruimte op economie in te schatten, via een gedetailleerde analyse van de effecten op demografie, gezondheid, absentieïsme en hun afgeleide effecten op het potentiële BRP. Voor de modellering van de effecten van luchtkwaliteit (concentraties fijn stof) op gezondheid en absentieïsme hanteren we het impact model dat de Europese Commissie, WHO en MIRA hanteren (Holland, 2014; WHO, 2014, Buekers et al. 2012). Voor effecten van verlies van open groene ruimte hanteren we het impact model van Vito, toegepast in het kader van de ecosysteemdiensten (Broekx et al., 2014).

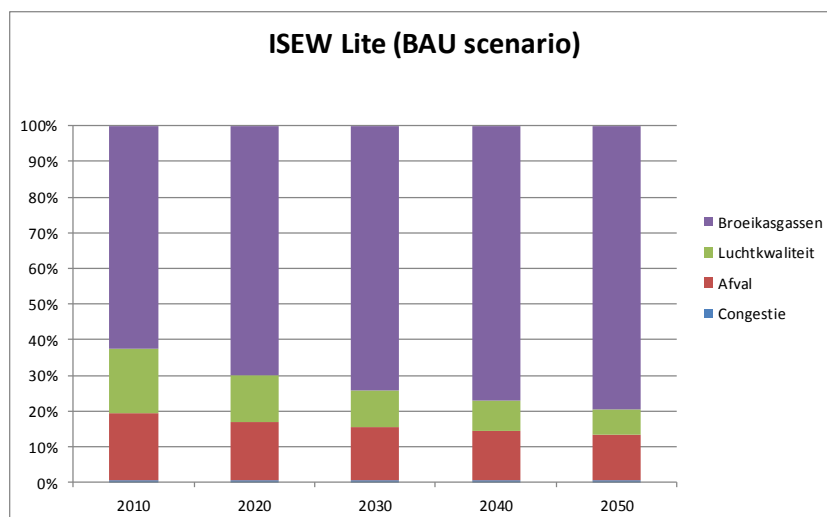
De effecten zijn meervoudig. Ten eerste is er een terugkoppeling via effecten van levensverwachting op mortaliteit, waardoor de totale bevolking en dus werkende bevolking daalt (zie Sectie 5.2). Ten tweede is er een significant effect van de luchtkwaliteit op het ziekteverzuim en daarmee de arbeidsproductiviteit via de Gezondheid (zie Sectie 5.2). Op basis van de epidemiologische studies zoals gehanteerd in bovenvermelde impactmodellen en data over absentieïsme voor Vlaanderen schatten we het verlies aan arbeidsuren door luchtverontreiniging in Vlaanderen (Broekx et al., 2014). Voor elke verandering van luchtkwaliteit met een daling van de fijnstof concentratie met $1.0 \mu\text{g PM}_{2.5}$ per m^3 stijgt het aantal verloren werkdagen met 0.024 %. Dit kan geïnterpreteerd worden als een verlies van arbeidsproductiviteit van 0.024 %. Voor de huidige situatie (luchtkwaliteit en totaal aantal werkdagen) komt dit neer op een verlies 0.42 % (in vergelijking met een situatie zonder luchtverontreiniging) of omgerekend 11600 VTE (voltijds equivalenten).

Verlies van open groene ruimte leidt eveneens tot verlies van gezondheid (extra ziektebeelden), geschat op basis van epidemiologische literatuur. De relatie tussen extra ziektebeelden en absentieïsme op het werk is per ziektebeeld geschat op basis van Belgische of internationale data (WHO, 2014, Buekers et al. 2012). Op basis van deze gegevens schatten we dat het verlies van één hectare open groene ruimte, leidt tot een verlies van arbeidsproductiviteit van $1,46 \text{ E-}08$. In het systeemmodel wordt hiermee nog geen rekening gehouden.

Het BRP heeft zijn beperkingen als indicator voor de evolutie van welvaart en welzijn omdat de omvang van economische transacties wordt ingeschat, zonder onderscheid naar activiteiten die welvaart positief of negatief beïnvloeden. De **Index voor Duurzame Economische Welvaart** (ISEW) is een complementaire, monetaire indicator voor de economische dimensie van welzijn, gebaseerd op de kosten en baten van economische activiteiten, en reeds geïmplementeerd voor Vlaanderen voor MIRA (Bleys et al., 2015). De ISEW-indicator houdt rekening met niet-marktactiviteiten zoals huishoudelijke arbeid, inkomensverdeling en de impact van productie en consumptie op de leefomgeving. Omdat het systeemmodel gericht is op het Milieubeleid in Vlaanderen beperken we ons tot laatstgenoemde elementen. De term “ISEW-Lite” reflecteert deze inperking en wordt als volgt berekend:

ISEW Lite = private consumptie
+ overheidskosten voor educatie
– congestiekosten
– verlies van ecosysteemdiensten voor verlies van groene ruimte (landbouw, natuur en bos)
– kosten afvalverwerking
– kosten luchtverontreiniging
– kosten broeikaseffecten

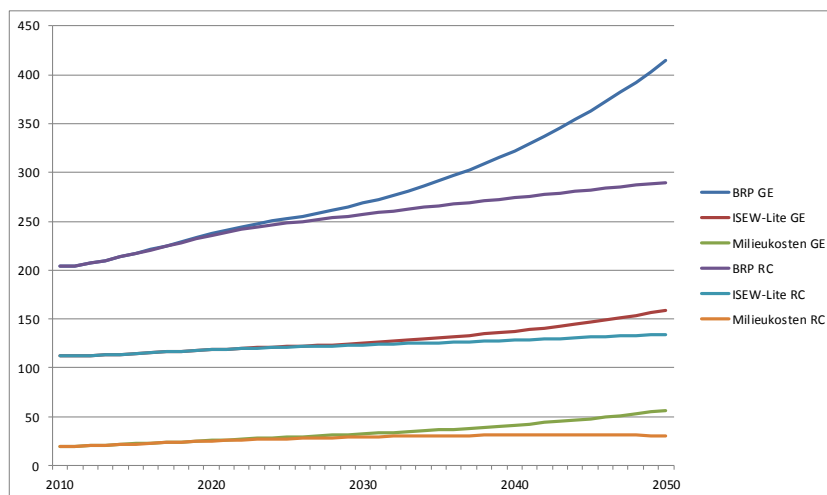
Hierbij is de focus op elementen die in het systeemmodel zijn meegenomen als variabele, en die we binnen het bestek van deze studie goed onderbouwd kunnen moneteriseren, hetzij op basis van methodes en kengetallen uit de MIRA-studie (Bleys et al., 2012), hetzij op basis van eigen informatie of met het model berekende indicatoren (bijvoorbeeld voor congestie, gezondheidskosten en ecosysteem-diensten van groene ruimtes). Sommige milieu-impacts (zoals water en uitputting van grondstoffen) zijn niet meegenomen omdat we dit binnen het bestek van deze studie onvoldoende goed konden inschatten en consistent moneteriseren. Anderzijds hebben we effecten op congestie en verlies van ecosysteemdiensten wel meegenomen, op basis van data en literatuur voor Vlaanderen (De Ceuster, 2010; Broekx et al., 2014). Figuur 5-8 toont het verloop van de ISEW-Lite indicator voor het BAU scenario. Het is mogelijk om in vervolgstappen de ISEW-Lite indicator vollediger te maken voor de milieu- en grondstoffencomponenten en deze zo beter te laten aansluiten bij de Vlaamse definitie van de ISEW indicator. Voor de sociale componenten (met name inkomensongelijkheid) is dit minder evident omdat bijvoorbeeld de inkomensongelijkheid nog niet in het model is opgenomen.



Figuur 5-8 Bijdrage deelvariabelen aan de totale sociale milieukosten voor de ISEW Lite indicator voor het BAU scenario. Het verlies aan ecosysteemdiensten is weinig significant en werd hier buiten beschouwing gelaten.

We vergelijken nu drie economische indicatoren voor twee sterk uiteenlopende WLO-wereldbeelden (zie ook Tabel 3-2): Global Economy (GE) en Regional Communities (RC). Figuur 5-9 toont de ontwikkeling van het Bruto Regionaal Product, de ISEW Lite indicator, en de totale milieukosten die in deze indicator verwerkt zijn. De betekenis van de scenario's en de effecten op bijvoorbeeld demografie en milieu zijn meer in detail uitgewerkt in Hoofdstuk 6. Er is brede consensus over de bruikbaarheid van de toegepaste Cobb-Douglas productiefunctie (Cobb en Douglas, 1928; Schade, 2005) voor de modellering van de economie, maar een beperking voor de evaluatie van milieuproblemen is dat de beschikbare en begrensde natuurlijke hulpbronnen niet expliciet worden meegenomen. Deze beperking heeft onder meer betrekking op het leveren van niet-hernieuwbare en hernieuwbare grondstoffen en energiebronnen, het opvangen en reinigen van vervuilende stoffen, en het bieden van een gezonde en aangename leefomgeving. Een deel van de productie die traditioneel aan kapitaal of arbeid wordt toegeschreven, zou eigenlijk moeten toegeschreven worden aan natuurlijke hulpbronnen. Er is evenwel onvoldoende literatuur en data om dit goed onderbouwd te doen voor alle aspecten, en een dergelijke benadering valt ook buiten het kader van de opdracht. Meer voor de hand liggend is het inbouwen van terugkoppelingen tussen de economie en het gebruik van al deze natuurlijke hulpbronnen. Dit vraagt om een consistente en consequente uitwerking van een groot aantal modelrelaties, en zou stapsgewijs

moeten gebeuren. Binnen de middelen van deze studie is dit beperkt tot enkele terugkoppelingen (via de arbeidsproductiviteit en gezondheid).



Figuur 5-9 Economische indicatoren voor de wereldbeelden Global Economy (GE) en Regional Communities (RC).

Ten eerste illustreert Figuur 5-9 de bandbreedte voor de ontwikkeling van het BRP in het systeemmodel. Een eerste les is dat de economische groei voor de komende decennia relatief beperkt zal zijn. Zelfs in scenario's met een maximale focus op economische groei (GE-scenario) is dit beperkt tot net geen 2 % groei per jaar. Dit illustreert het belang van beperkingen op de factoren die de lange-termijn-groei bepalen zoals beschikbare arbeid (vergrijzing), structuur van de economie en verwachtingen m.b.t. technologie en gevolgen voor productiviteit (NBB, 2015). Dit is in lijn met de lange-termijn-trends en alle ons gekende studies naar langetermijngroei voor hoog ontwikkelde landen (d'Auria, 2010; OECD, 2012). In scenario's met minder accent op groei, zoals het RC-scenario, blijft de economie naar verwachting groeien, omdat we aannemen dat de maatschappij ernaar zal streven om de aanwezige factoren voor verdere economische ontwikkeling te benutten.

Anderzijds betekent de gematigde groei van 0.5 % tot 2 % per jaar nog altijd dat de druk vanuit het economisch systeem op milieu en grondstoffen over enkele decennia sterk toeneemt, met bijvoorbeeld 50 tot 100 % in de hierboven beschouwde scenario's. Dit illustreert het belang om enerzijds het BRP als indicator mee te nemen en anderzijds te kijken naar de evolutie van de milieukosten, voor zover we deze kunnen becijferen. Een centrale vraag is in welke mate we mogen verwachten dat de economische groei en milieu impact ontkoppeld zijn, rekening houdend met het huidige of – binnen de context van een scenario, verwachte – beleid.

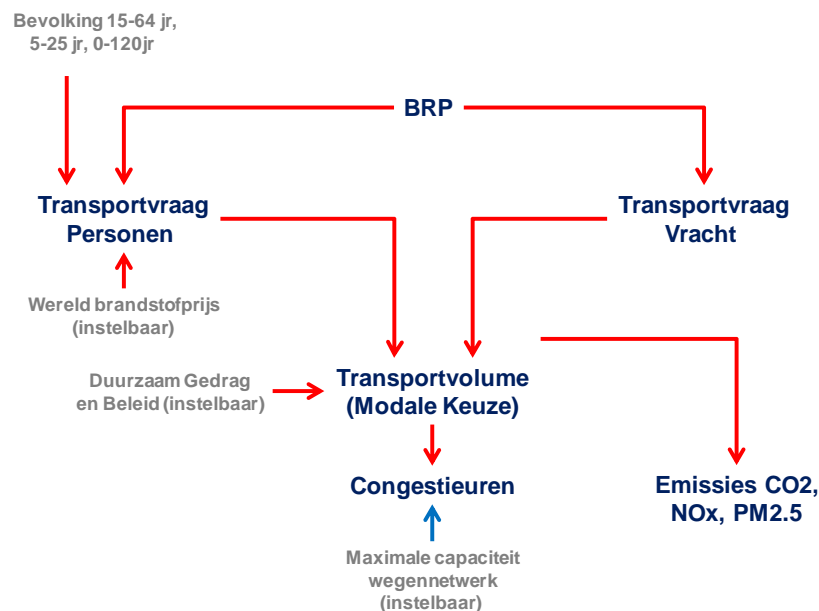
Als we kijken naar de milieukosten (de onderste lijnen in Figuur 5-9), dan zien we dat deze in het GE-scenario blijven toenemen, aan een iets hoger ritme dan de economische groei. De impact voor de onderscheiden milieucomponenten wordt in meer detail besproken in HOOFDSTUK 6. Het totaalbeeld uit Figuur 5-9 is dat we in dit scenario geen ontkoppeling zien van economische groei en milieukosten, en dat de sterke stijging van de groei leidt tot meer dan een verdubbeling van de milieukosten. Ook in het RC-scenario zien we geen echte ontkoppeling tussen economische groei en milieukosten. Omwille van een lagere groei van het BRP zijn de totale milieukosten in 2050 wel bijna de helft lager dan in het GE-scenario.

De ISEW-Lite indicator geeft een eerste, ruwe inschatting van het netto effect op welvaart. Op basis van de ISEW-Lite indicator is de welvaart in het startjaar 2010 ongeveer de helft lager in vergelijking met de BRP indicator. Dit bevestigt het belang om rekening te houden met de baten en kosten van economische groei, zelfs als niet alle elementen kunnen meegenomen worden. Voor zowel het GE- als RE-scenario, zien we dat de groei lager is (0.5 % tot 1 %) dan de BRP groei, omdat de baten zoals consumptie trager groeien en de kosten voor milieu, congestie ... sterker groeien. Om scenario's nog beter te vergelijken verwijzen we naar hoofdstuk 6, omdat we bijvoorbeeld ook rekening moeten houden met de evolutie op basis van BRP en ISEW-Lite per capita.

We moeten tot slot opmerken dat in absolute termen (miljoen euro) de ISEW-Lite indicator voor het startjaar 2010 meer dan twee keer zo hoog is dan de ISEW indicator uit MIRA, omdat we belangrijke verliesposten als gevolg van inkomensongelijkheid en uitputting grondstoffen niet meenemen (Bleys et al., 2015). Dit impliceert dat de toename van de sociale en milieukosten voor bijvoorbeeld het GE-wereldbeeld nog hoger kan zijn.

5.4. MOBILITEIT

Binnen het deelmodel Mobiliteit worden acht vervoerswijzen of transportmodi voor personenverkeer onderscheiden (auto solo, carpooling, trein, bus, tram, metro, langzaam verkeer, en motor) en vier voor vrachtverkeer (vrachtwagen, bestelwagen, trein en binnenscheepvaart). Het model houdt rekening met de transport- en tijdskosten, de capaciteit van het wegennet, en congestie (Figuur 5-10).



Figuur 5-10 Deelmodel voor de Mobiliteit.

Bovendien wordt voor het personenverkeer onderscheid gemaakt tussen het woon-werk verkeer, schoolverkeer, en recreatief verkeer. Het BRP beïnvloedt alle typen van verkeer (woon-werk, school-, en recreatief personenverkeer, en vrachtverkeer). Van de wereldbrandstofprijs is verondersteld dat deze alleen van invloed is op het recreatief personenverkeer. Zoals binnen de transportmodellering gebruikelijk is, worden de *gegeneraliseerde* kosten gebruikt om de modale verdeling over de transporttypen te berekenen. Doordat het systeemmodel niet ruimtelijk gedesaggregeerd is, houdt het deelmodel geen rekening met de routekeuze. Het berekent de jaarlijkse gemiddelde verkeersvolumes in voertuigkm, reizigerskm en tonkm voor elk transporttype.

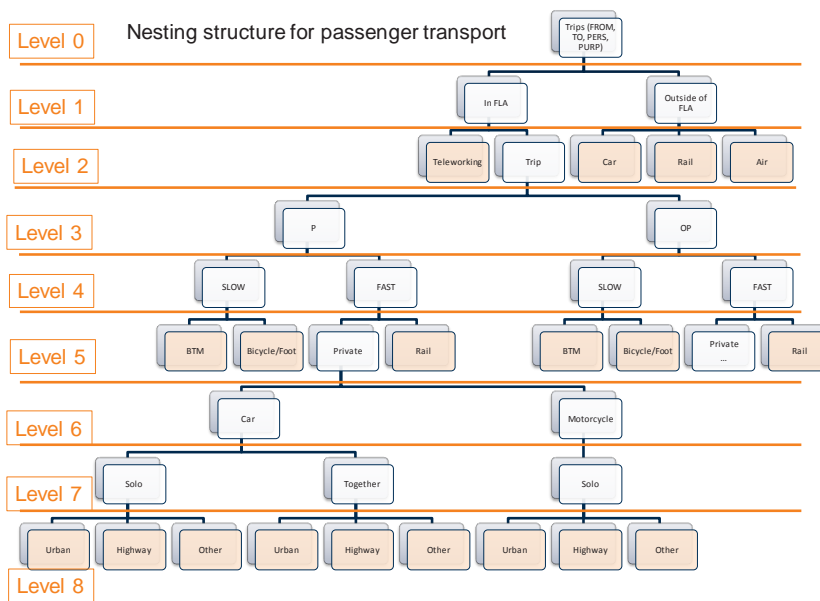
De twee belangrijkste elementen van het model zijn het algoritme voor de modale keuze en de congestiefunctie. Met een congestiefunctie voor de relatie tussen de snelheid en verkeersintensiteit kan de tijdskost per km berekend worden, evenals de jaarlijkse verliestijd aan congestieuren voor het wegverkeer. Uit de berekende transportvolumes en de ontwikkeling van de emissiefactoren (zie ook Sectie 5.8) worden tenslotte de emissies berekend van broeikasgassen, fijn stof, SO_x, NO_x en NH₃.

Voor iedere tijdstap wordt binnen de modelbouwsteen *Transportvraag* eerst de totale transportvraag berekend voor personentransport (in reizigerskm) en goedertransport (in tonkm). Voor het personentransport gebeurt dit als functie van de demografische toestand (totale bevolkingsomvang, omvang schoolgaande bevolking 5-25 jaar, en de bevolking op actieve leeftijd 15-64 jaar), de economische toestand (Bruto Regionaal Product) en de energieprijzen. Voor het goedertransport wordt de transportvraag berekend als functie van de economische toestand (Bruto Regionaal Product). Voor de verandering van de transportvraag ten opzichte van de vorige tijdstap wordt gebruik gemaakt van vergelijkingen van het type:

$$Y(t+\Delta t) = Y(t) \times \left(\frac{N(t+\Delta t)}{N(t)}\right)^{\sigma_1} \times \left(\frac{BRP(t+\Delta t)}{BRP(t)}\right)^{\sigma_2} \times \left(\frac{q(t+\Delta t)}{q(t)}\right)^{\sigma_3}$$

waarin $Y(t)$ de transportvraag is, $N(t)$ de bevolkingsomvang, $BRP(t)$ het Bruto Regionaal Product, en $q(t)$ de wereld energieprijz index uit Figuur 4-6. De modelparameters σ_1 , σ_2 en σ_3 geven de gevoeligheid weer van de transportvraag ten opzichte van veranderingen van de bevolking, BRP en energieprijz.

Vervolgens wordt binnen de modelbouwsteen voor de modale keuze (Modal Split) berekend hoe de transportvraag verdeeld wordt over de verschillende transportmodi. Dit gebeurt op basis van een "nesting-structuur". Een voorbeeld hiervan wordt gegeven in Figuur 5-11:



Figuur 5-11 Voorbeeld nesting structuur modale keuze voor personenverkeer (I. Mayeres, 2015).

In de huidige versie van het model wordt voorlopig met twee lagen gewerkt (totaal aantal trips en transportmiddel) voor zowel het personen- als vrachtverkeer. Later zal dit uitgebreid worden naar een nesting structuur met meerdere lagen die een meer realistische weergave kan geven van de reactie van de modale keuze op verandering in beleid of exogene evoluties. De modale keuze wordt verder beïnvloed door de exogene variabele “Duurzaam Gedrag en Beleid”, welke van invloed is op het aandeel autogebruik in het personenverkeer (hiervoor wordt een tabelfunctie gebruikt). Het principe van het algoritme voor de modale keuze met congestie wordt hier toegelicht aan de hand van een vereenvoudigd voorbeeld, de modale keuze tussen transport per auto en trein voor personenverkeer. Voor meer transporttypen en goederentransport is het algoritme vergelijkbaar, maar zijn de modelparameters anders.

We gebruiken de volgende basisgegevens:

- weegfactoren α_1 en α_2 , substitutie elasticiteit σ van de modified constant elasticity of substitution (MCES) functies;
- monetaire kosten per km voor auto en trein c_1 en c_2 ;
- reistijd per km met de auto (zonder congestie) en trein t_{10} en t_{20} ;
- waarde van de tijd of Value Of Time (VOT) (EUR/uur) voor de berekening van de tijdskosten;
- congestie functie voor de bepaling van de snelheid als functie van het transportvolume en de maximale wegcapaciteit;
- de bezettingsgraad μ voor de auto (gemiddeld aantal personen per auto).

Op het hoogste niveau (0) kennen we uit de transportvraag het totale verkeersvolume, uitgedrukt in het totaal aantal trips of persoonkm per jaar. Dit wordt beschreven door de vergelijking:

$$X_0 = \left[\alpha_1^\sigma X_1^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} + \alpha_2^\sigma X_2^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \right]^{\frac{\sigma}{\sigma-1}} \quad (1)$$

waarbij X_1 en X_2 het transportvolume in persoonkm voor de twee onderscheiden transportmodi, auto (1) en trein (2).

Stap 1. - initialisatie voor beginjaar 2010. Met het verkeersvolume voor beide modi, de waarden voor α en σ en vgl. (1) berekenen we het totale transportvolume X_0 op het hoogste niveau. X_0 is nu bekend. Een alternatief is het totaal aantal trips te berekenen uit het gemiddeld aantal km per trip per doel (woon-werk, woon-school, overig) en het aantal persoonkm per doel. Voor latere jaren kan het aantal trips geschaald worden op het BRP en de bevolkingsomvang.

Stap 2. Voor beide transportmodi berekenen we de gegeneraliseerde transportkosten per km:

$$p_1 = c_1 + VOT \times t_1 = c_1 + \frac{VOT}{v_1}$$

$$p_2 = c_2 + \frac{VOT}{v_2}$$

Voor de autosnelheid v_1 gebruiken we hier een beginwaarde, een gemiddelde voor de snelheid die het wegennet toestaat bij verkeer zonder congestie.

Stap 3. We berekenen nu de gegeneraliseerde kosten per km op niveau 0 met de resultaten van Stap 2:

$$p_0 = [\alpha_1 p_1^{1-\sigma} + \alpha_2 p_2^{1-\sigma}]^{\frac{1}{1-\sigma}}$$

Stap 4. Met het resultaat uit Stap 1-3 berekenen we de transportvolumes op niveau 1:

$$X_1 = X_0 \alpha_1 \left(\frac{p_0}{p_1}\right)^\sigma \text{ en } X_2 = X_0 \alpha_2 \left(\frac{p_0}{p_2}\right)^\sigma$$

Stap 5. Voor de auto worden de persoonkm omgezet naar voertuigkm, uitgaand van de bezettingsgraad μ :

$$X_1 \rightarrow \frac{X_1}{\mu}$$

Stap 6. Met een congestiefunctie berekenen we vervolgens de reistijd per km uit het transportvolume en de maximale wegcapaciteit K (in miljard voertuigkm per jaar):

$$t_1 = t_{10} \left(1 + \alpha \left(\frac{X_1}{K}\right)^\beta\right)$$

Deze congestie functie heeft betrekking op het niveau van het gehele gewest wordt verondersteld lineair te zijn ($\beta = 1$).

Stap 7. Uit de reistijd per km uit Stap 6 volgt een nieuwe autosnelheid v_1' :

$$v_1' = \frac{1}{t_1}$$

Stap 8. De snelheid v_1' wordt vergeleken met de gebruikte beginwaarde v_1 uit Stap 2. Als het verschil significant is, is er een congestie effect ten nadele van de auto. In dat geval worden de gegeneraliseerde kosten per km herberekend met de nieuwe snelheid v_1' op basis van Stap 2. Vervolgens worden de stappen 3-7 opnieuw doorlopen om de snelheid te herberekenen. Deze procedure wordt herhaald totdat het verschil met de gevonden snelheid uit de vorige iteratiestap niet meer significant is. In de praktijk blijken enkele iteraties te volstaan.

De huidige versie van de Mobiliteitsmodule is eenvoudig gehouden. Voor de toekomstige ontwikkelingen voorzien wij de volgende stappen:

- Voor de bepaling van de totale transportvraag kan er rekening gehouden worden met de evolutie van de gegeneraliseerde kosten, in plaats van de energieprijis. De gegeneraliseerde kost omvat naast de monetaire kosten, zoals de brandstofkosten, ook de tijdskosten.
- Voor de modale keuze kan de nesting structuur uitgebreid worden om een meer realistische weergave te geven van de reacties op transportbeleid en exogene evoluties. Dit geldt zowel voor het personen- als het goederenvervoer. Voor het personenvervoer kan een onderscheid gemaakt worden tussen verschillende ritmotieven, en voor het goederenvervoer tussen goederentypes en binnenlands, internationaal en transitvervoer. Voor het woon-werkverkeer kan telewerken als een alternatieve modus worden opgenomen.
- Dit impliceert ook een herkalibratie van de module op basis van elasticiteiten uit de literatuur; hierbij dient rekening gehouden te worden met het verschil in gevoeligheid van de transportvraag voor verschillende ritmotieven, oorsprong- en bestemmingsparen, enz.

- Bij de bepaling van de emissies per km dient er rekening gehouden te worden met de invloed van de brandstofprijzen en een veranderend emissiebeleid op de emissiefactoren.
- Naast congestie en emissies kunnen de impacts van transport uitgebreid worden naar verkeersongevallen.
- In de huidige versie van het model wordt ad-hoc een exogene invloed vooropgesteld van “Duurzaam gedrag en beleid”. Er dient onderzocht te worden hoe dit op een andere wijze kan opgenomen worden.

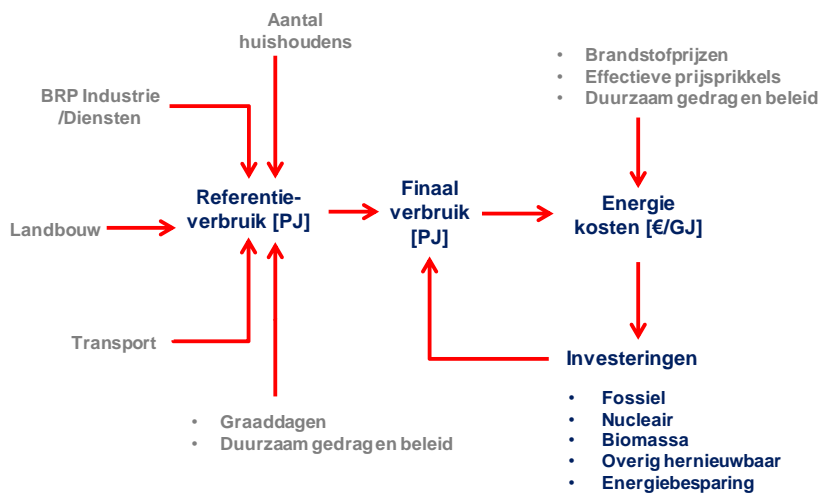
5.5. ENERGIE

Het deelsysteem energie is eveneens sterk verweven met de andere deelsystemen in het systeemmodel Vlaanderen. De energievraag wordt met name gedreven door de bevolkingsgroei, de economische groei en de transportbehoefte. De manier waarop aan deze vraag wordt voldaan bepaalt vervolgens relevante impacts voor onder andere het klimaat (via broeikasgasemissies), milieu (via luchtverontreiniging) en de economie (via de kosten en baten). Op dit moment wordt de energiebehoefte nog grotendeels met fossiele brandstoffen ingevuld. Echter, de komende tientallen jaren wordt vanuit het beleid ingezet op een energietransitie naar een op termijn CO₂-neutrale samenleving. Deze transitie zal vrij zeker gekarakteriseerd worden door een efficiënter verbruik van energie en een flinke stijging van het aandeel hernieuwbare energie. Echter, de snelheid van deze veranderingen en precieze invulling van de energiemix op de lange termijn zijn nog erg onzeker.

Om dergelijke ontwikkelingen te kunnen verkennen is een eenvoudig model ontwikkeld. Op hoofdlijnen werkt het model als volgt, zie Figuur 5-12. Allereerst wordt voor elke tijdstap een referentieverbruik bepaald aan de hand van de ontwikkeling van de sectoren residentieel, tertiair (MIRA sector Handel & Diensten), industrie, landbouw en transport. Het referentieverbruik is het (theoretisch) eindverbruik van energie in het geval dat er vanaf het basisjaar (2010) geen energiebesparing zou plaatsvinden. In het referentieverbruik is geen verdere uitsplitsing gemaakt naar energiedrager (bijvoorbeeld naar warmte/elektriciteit/kolen/aardolie/gas). Deze keuze is bewust gemaakt om het aantal indicatoren en modelaannames te beperken. Het effect van verschillende omzettingsrendementen wordt in rekening gebracht bij de verschillende opties voor energieproductie (zie onder).

De ontwikkeling van het referentieverbruik bepaalt samen met de afschrijving van het bestaande productiepark de totale investering die nodig is om vraag en aanbod in balans te brengen. Hiertoe ‘kiest’ het model uit de beschikbare opties op hoog geaggregeerd niveau. Dit zijn een aantal opties voor energieproductie te weten fossiel (zoals olie, gas en kolen), nucleair, biomassa, en overige hernieuwbare bronnen (zoals zon en wind), en een algemene optie voor energiebesparing. Voor elk van deze opties is een gemiddeld omzettingsrendement van primaire energie naar finale energie aangenomen (zie Tabel 5-3). Het aandeel van de verschillende opties is hierbij afhankelijk van hun kosten per eenheid geleverde (of bespaarde) energie, waarbij de goedkoopste opties het grootste aandeel leveren. Voor de opties fossiel, nucleair en biomassa zijn de kosten mede afhankelijk van de ontwikkeling van de brandstofprijzen. Verder worden een aantal prijsprikkels voorzien. Voor optie fossiel wordt rekening gehouden met de ontwikkeling van de CO₂-prijs. Voor de opties biomassa, overige hernieuwbare bronnen en energiebesparing is een mogelijke stimulering ingebouwd in de vorm van een effectieve prijsprikkel per eenheid opgewekte energie. Deze prijsprikkel kan een werkelijke subsidie vertegenwoordigen, maar ook ander stimulerend beleid of motivatie voor duurzaam gedrag modelleren.

Om de werking van de module Energie (Figuur 5-12) toe te lichten beschrijven we in iets meer detail de bepaling van het referentieverbruik. De referentieverbruiken voor de sectoren huishoudens, tertiair, industrie, landbouw en transport schalen lineair met respectievelijk het aantal huishoudens (voor de sector residentieel), het sectorale BRP (voor de sectoren tertiair en industrie), de productie in de landbouw (voor de sector landbouw) en de gewogen transportvolumes voor personen- en vrachtovervoer (voor de sector transport). Ook wordt rekening gehouden met een aantal relevante parameters, zoals de ontwikkeling van het aantal graaddagen en indices voor efficiënt ruimte- en materiaalgebruik. Het effect van de verandering van graaddagen wordt hierbij meegenomen voor de sectoren huishoudens en tertiair die het grootste aandeel warmteverbruik vertegenwoordigen. Een klimaatcorrectie voor de landbouw (met name de glastuinbouw) zou wenselijk zijn, maar is nog niet ingebouwd.



Figuur 5-12 Deelmodel voor Energie.

Het referentieverbruik voor de sector residentieel E_{REF}^R wordt bijvoorbeeld gegeven door:

$$E_{REF}^R = E_0^R * \frac{HH(t)}{HH(0)} * (1 + F_W^R * (GD(t) - GD(0)) * e_{GD}) * \frac{i_r(0)}{i_r(t)}$$

met E_0^R het referentieverbruik in het basisjaar, $HH(t)$ het aantal huishoudens, F_W^R de fractie warmteverbruik in het totale energieverbruik van huishoudens, $GD(t)$ het aantal graaddagen, e_{GD} de graaddagenelasticiteit en $i_r(t)$ de index efficiënt ruimtegebruik.

We kijken ook in iets meer detail naar de berekening van de kosten van de verschillende keuzes voor energiedragers die, zoals hierboven al aangegeven, het aandeel bepalen in de totaal benodigde investering op elke tijdstap. Hiertoe wordt in concreto de zogenaamde ‘levelised cost’ bepaald. Deze omvat de investeringskost, de kosten voor beheer en onderhoud, eventuele brandstofkosten en eventuele prijsprikkels. De prijsprikkels kunnen ontmoedigen, bijvoorbeeld in de vorm van kosten voor benodigde CO₂ emissierechten voor de optie fossiel, ofwel stimuleren in de vorm van een subsidie of effectieve prijsprikkel per eenheid bespaarde of hernieuwbare energie. De levelised cost LC_i van de optie i vat al deze posten onder één noemer samen, uitgedrukt in € per GJ finaal geleverde (of bespaarde) energie. Het aandeel A_i van optie i in de totaal benodigde energie investering op tijdstap t wordt vervolgens gegeven door de vergelijking:

$$A_i(t) = \frac{e^{-LC_i(t)/g}}{\sum_j e^{-LC_j(t)/g}}$$

waarbij de sommatie geldt over alle investeringsopties en g een kalibratie parameter is.

Een belangrijke component van de levelised cost is de investeringskost. Om deze te bepalen wordt voor elke optie uitgegaan van een bepaalde kostencurve. Deze curve geeft aan in welke mate de investering hoger wordt naar gelang het potentieel van de betreffende optie verder wordt ingevuld. In de energiemodule worden deze kostencurves geparametriseerd op basis van een aangenomen technisch potentieel. Via de duurzaamheid kunnen de investeringskosten voor minder duurzame vormen van energie minder aantrekkelijk en dus verhoogd worden ten voordele van de meer duurzame alternatieven zoals energiebesparing en hernieuwbare energiebronnen. Ook wordt rekening gehouden met kostendalingen van technologieën voor hernieuwbare energie ten gevolge van innovatie.

De implementatie van de energiemodule is gestoeld op verschillende databronnen (Tabel 5-3). De belangrijkste bronnen zijn:

Parameter	Eenheid	Waarde 2010	Bron/berekening
Finaal energieverbruik basisjaar huishoudens; tertiaire sector; land- en tuinbouw; industrie; transport	petajoule	205; 98; 31; 400; 198	Energiebalans Vlaanderen 1990-2013 (beknopt), VITO, 2014. Voorlopig nog geen klimaatcorrectie voor de landbouw (glastuinbouw).
Graaddagenelasticiteit	1/graaddag	0,04%	Het klimaatbeleid na 2012: Analyse van scenario's voor emissiereductie tegen 2020 en 2050. Federaal Planbureau, Brussel, 2006.
Aandeel warmtevoorziening in referentieverbruik huishoudens; tertiaire sector	-	84%; 54%	Gebaseerd op: Energiebalans Vlaanderen 1990-2013 (beknopt), VITO, 2014.
Commodityprijs fossiele brandstoffen referentiejaar	€ ₂₀₁₅ /gigajoule	9,0	Gebaseerd op: EU ENERGY, TRANSPORT AND GHG EMISSIONS; TRENDS TO 2050; REFERENCE SCENARIO 2013, EC, 2013.
Commodityprijs biomassa referentiejaar	€ ₂₀₁₅ /gigajoule	8,0	Gebaseerd op: Biomass for power generation, IRENA 2012.
Commodityprijs nucleaire brandstoffen referentiejaar	€ ₂₀₁₅ /gigajoule	0,8	Gebaseerd op: OPEERA (VITO)
Gemiddeld omzettingsrendement primair naar finaal: fossiel; nucleair; biomassa; overig hernieuwbaar	-	75%; 33%; 71%; 100%	Gebaseerd op: statistische definities en Energiebalans Vlaanderen 1990-2013 (beknopt), VITO, 2014.
Gemiddeld verhouding finale en primaire energiebesparing	-	68%	Gebaseerd op: Energiebalans Vlaanderen 1990-2013 (beknopt), VITO, 2014.
Finaal energiegebruik basisjaar fossiel; nucleair; biomassa; overig hernieuwbaar	petajoule	808; 77; 4; 42	Energiebalans Vlaanderen 1990-2013 (beknopt), VITO, 2014.
Beheer- en onderhoudskosten	-	2% van investering	Aanname
Gemiddelde levensduur energieproductiecapaciteit	jr	25	Aanname
Gemiddelde levensduur energiebesparende technologie	jr	15	Aanname
Technisch potentieel nucleair (finaal)	petajoule	0	Veronderstelling geen nieuwe investeringen
Technisch potentieel biomassa (finaal)	petajoule	142	Gebaseerd op: Towards 100% renewable energy in Belgium by 2050" BFP-FPB, ICEDD, VITO, 2013
Technisch potentieel overig hernieuwbaar	petajoule	733	Aanname
Technisch potentieel energiebesparing	Petajoule	733	Gebaseerd op: Data Base on Energy Saving Potentials, http://www.eepotential.eu/results_cty_pot.php
Gemiddelde investering basisjaar fossiel; nucleair; biomassa; overig hernieuwbaar; energiebesparing	€ ₂₀₁₅ /gigajoule	45; 182; 73; 593; 119	Gebaseerd op: PRIMES Model Presentation for Peer Review – Part 1, E3MLab, 2011; Subsidieregeling SDE+ 2010; Beleidsstudie naar WKK- en warmtepomptechnologieën Eindrapport 21 juni 2011, ECN, 2011; Investing EU ETS auction revenues into energy savings, ECN, 2013.

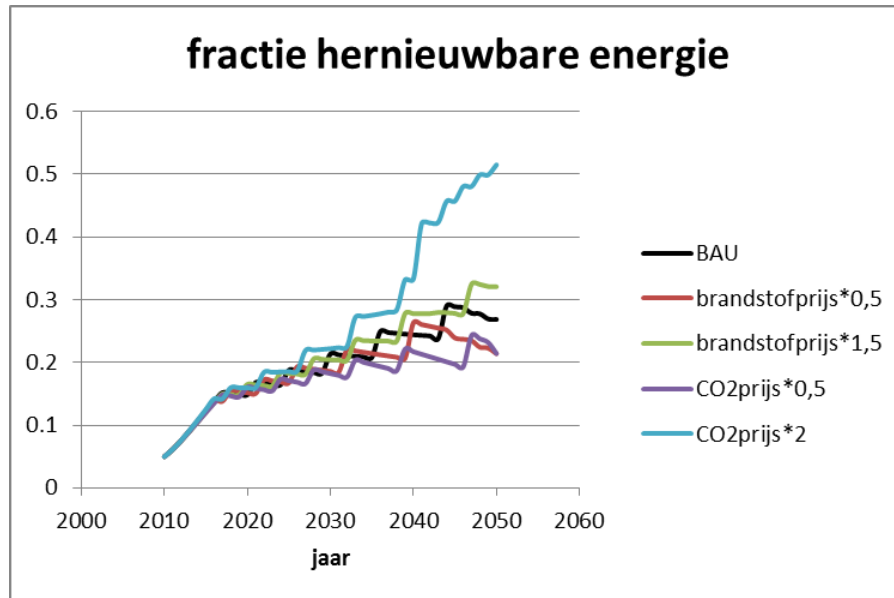
Tabel 5-3 Modelparameters en bronnen deelsysteem energie.

Tot slot is het model getoetst en beperkt gekalibreerd op basis van de scenario's opgesteld door het Federaal Planbureau met het gedetailleerde PRIMES model (FPB, 2015). Hierbij zijn de aannames van deze studie m.b.t. bijvoorbeeld de ontwikkelingen van huishoudens, transport, economie, brandstofprijzen, en klimaat zoveel mogelijk opgenomen in de energiemodule. Vervolgens is gekeken in hoeverre de berekende ontwikkeling van de energievraag en energiemix in overeenstemming waren, waarbij de prijsprikkels voor energiebesparing en hernieuwbare energie, evenals de parameter g in bovenstaande vergelijking als kalibratieparameters zijn gebruikt. Uit deze analyse bleek een voldoende overeenstemming tussen beide modelbenaderingen. In Tabel 5-4 staan de resultaten van de twee modellen naast elkaar voor wat betreft de verdeling van de primaire energieproductie over de verschillende energiebronnen voor het GHG40 scenario. In dit scenario wordt een emissiereductie van 40 % in 2030 tot 80 % in 2050 verondersteld op basis van een CO₂ prijsstijging tot 260 €/ton in 2050. De kalibratierun komt in grote lijnen met dit scenario overeen, met een significante afname van fossiel en toename van hernieuwbare energie. Er zijn ook verschillen. Zo zien we dat in de kalibratierun de afbouw van de nucleaire sector minder drastisch verloopt en dat het aandeel biomassa in het totale aandeel hernieuwbare energie op middellange termijn (tot 2030) wordt overschat. Nieuwe investeringen in de kernenergie zijn in het model onmogelijk door het technisch potentieel gelijk te stellen aan 0. Een volgende versie van het model zou expliciet rekening kunnen houden met een kernuitstap. Merk op dat de standaardrun van het systeemmodel vanwege benodigde consistentie tussen de verschillende modules op een aantal punten afwijkt van de kalibratierun van de energiemodule. Zo worden de onderliggende ontwikkelingen van huishoudens, transport, economie en graaddagen niet exogeen bepaald, maar volgen deze endogeen uit de andere deelsystemen van het systeemmodel. Ook is de in de FPB studie aangenomen kostenreductie van hernieuwbare energietechnologie niet meegenomen waardoor de ontwikkeling van hernieuwbare energie (excl. biomassa) lager uitvalt.

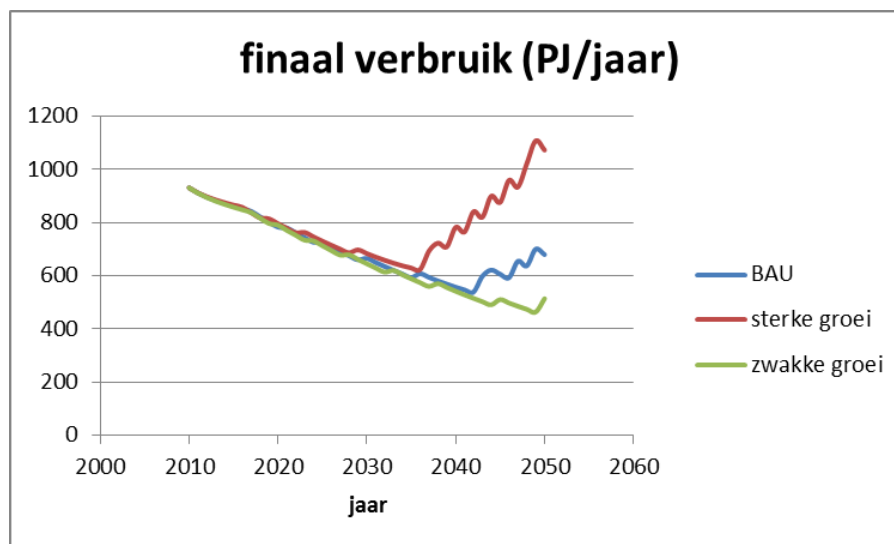
Optie	Systeemmodel – kalibratierun energiemodule			FPB2015 – GHG40 scenario		
	2010	2030	2050	2010	2030	2050
Fossiel	78%	68%	56%	71%	78%	54%
Nucleair	17%	11%	4%	23%	0%	0%
Hernieuwbare energie excl. biomassa	0%	3%	27%	5%	13%	27%
Biomassa	4%	17%	13%	2%	4%	12%

Tabel 5-4 Vergelijking van de verdeling over de verschillende bronnen van energie voor de kalibratierun van de energiemodule en een gedetailleerde berekening van het Planbureau voor het GHG40 scenario.

Figuur 5-13 toont de fractie hernieuwbare energie als de brandstofprijs voor alle brandstoffen (dus inclusief biomassa die voor een deel van de hernieuwbare energie zorgt) verandert. De brandstofprijs wordt gewijzigd door de initiële brandstofprijs voor 2010 te vermenigvuldigen met een factor die lineair wijzigt tussen 1,0 voor het initiële jaar en respectievelijk 0,5 en 1,5 in het eindjaar. Voor de CO₂ prijs wordt vertrokken van een initiële prijs in 2010 die ieder jaar met een constante waarde van 6,22 €/ton toeneemt met als eindwaarde 260 €/ton in 2050. Voor de twee CO₂ scenario's werd de jaarlijkse constante toename respectievelijk gehalveerd en verdubbeld met als respectievelijke eindwaardes 135,6 €/ton en 508.8 €/ton in 2050.



Figuur 5-13 Fractie van het finale energieverbruik die door hernieuwbare energie wordt geleverd voor verschillende scenario's. BAU is het 'business-as-usual', referentiescenario. De andere scenario's tonen het effect van wijzigingen in de brandstofprijs en de prijs voor CO₂ in het model.

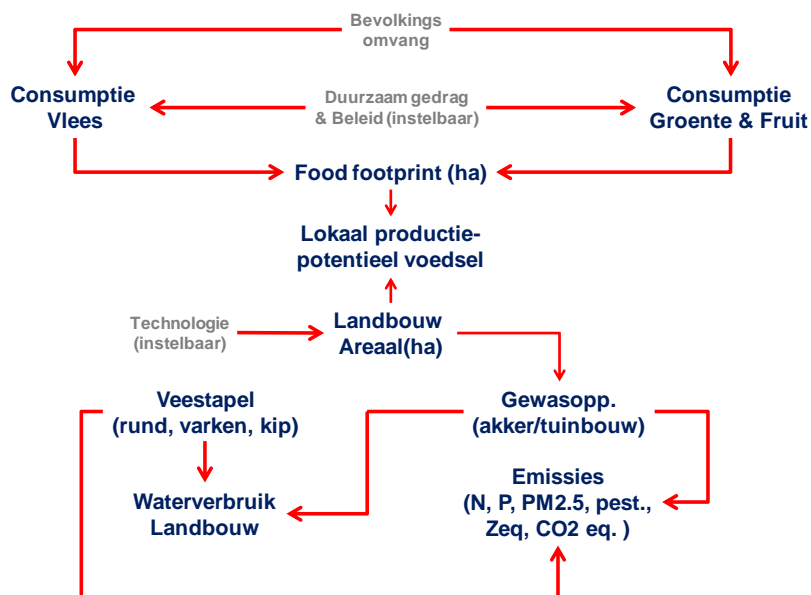


Figuur 5-14 Verloop van het finaal verbruik voor het referentie (BAU) en twee alternatieve scenario's.

Figuur 5-14 toont de ontwikkeling van het finaal verbruik voor het BAU scenario en twee scenario's met een verschillende ontwikkeling van het finale verbruik. Het 'sterke groei' scenario wordt bekomen in het model als op technologie en innovatie wordt ingezet, meer migratie wordt toegelaten en de huishoudens kleiner zijn waardoor het BRP, de bevolking en het aantal gezinnen toeneemt in vergelijking met het BAU scenario. Het resultaat voor het 'zwakke groei' scenario bekom je dan door de technologie en innovatie te verminderen, minder immigratie toe te laten en met grotere huishoudens te rekenen. Opvallend in de figuur is het voorkomen van een omslagpunt waarbij het finaal verbruik terug toeneemt. Dit omslagpunt is te wijten aan de gebruikte kostencurves en treedt op als het technisch potentieel voor energiebesparingen bereikt wordt.

5.6. LANDBOUW EN VOEDING

Het deelmodel voor Landbouw en Voeding beschrijft op hoofdlijnen de ontwikkeling van de landbouw in Vlaanderen (dierlijke en plantaardige productie) en de mate waarin Vlaanderen in de eigen voedselbehoefte zou kunnen voorzien (afgezien van de import- en export van voedsel). Oorspronkelijk was dit deelmodel sterk economisch georiënteerd: uit de bevolkings- en economische groei werd een trend berekend voor de consumptie van dierlijke en plantaardige landbouwproducten. Hieruit werd dan weer berekend hoe de veestapelomvang en het landbouwareaal zich ontwikkelden. Naar aanleiding van de 2^e workshop met de MIRA-experts en consultatie van interne landbouwexperts werd besloten dat deze benadering niet aansloot bij de bestaande ontwikkeling van de landbouw in Vlaanderen, die eerder door milieunormen gestuurd wordt. In plaats van een reductie of toename van de veestapel zal de sector eerder geneigd zijn de emissies te reduceren (Deutsch et al., 2013), waarbij innovatie een rol kan spelen. Daarom is een andere benadering gevolgd, die rekening houdt met het consumptiepatroon van de Vlaming, de emissies van de sector, en het watergebruik (Figuur 5-15). De exogene variabelen Technologie en Duurzaam Gedrag en Beleid zijn ook van invloed: innovatie in de landbouw leidt tot een reductie in de ruimtevrage (hogere productie per ha) terwijl duurzaam gedrag tot een lagere vleesconsumptie leidt.



Figuur 5-15 Deelsysteem Landbouw en Voeding.

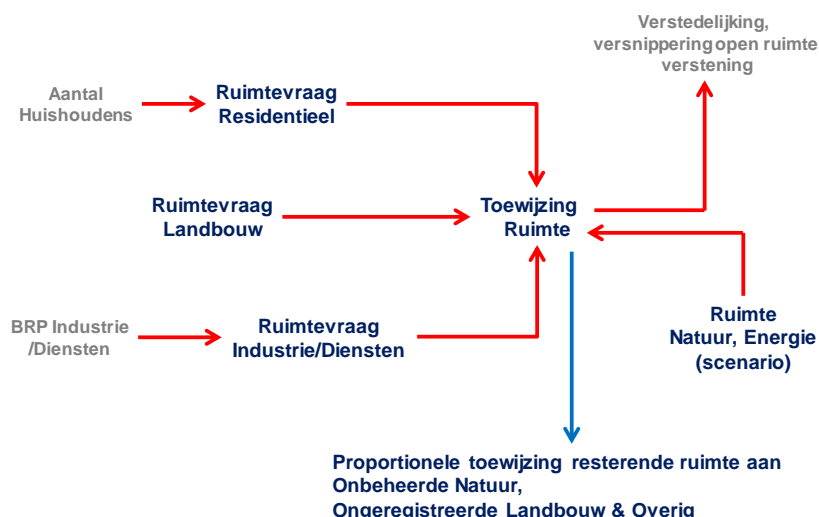
De voedselconsumptie van de Vlaming is recentelijk in detail doorgerekend (Danckaert et al., 2013). De inwoners eten gemiddeld 2.8 kg per dag, met inbegrip van de consumptie van dranken. Het ruimtebeslag (al dan niet in Vlaanderen) voor plantaardige productie bedraagt 222.700 ha landbouwgrond, dat voor dierlijke productie 586.000 ha. Een verschuiving naar de consumptie van dierlijke naar plantaardig voedingspatroon leidt dus tot een vermindering van dit ruimtebeslag (de “food footprint”). Uitgaande van de bevolkingsomvang en voedselconsumptie (dierlijk en plantaardig) kan dus berekend worden wat het totale ruimtebeslag is om aan deze vraag te voldoen. Dit kan worden vergeleken met het beschikbare landbouwareaal in Vlaanderen (dat in de deelmodule voor het Ruimtegebruik wordt berekend). Hoewel de import- en export van voedsel hierin niet zijn verrekend geeft dit een indicatie van de ontwikkeling van de afhankelijkheid van de Vlaamse bevolking van de landbouwproductie buiten de regio. Technologie en Duurzaamheid zijn ingebouwd als exogene variabelen die de productiviteit van de landbouw en het voedselpatroon (minder dierlijk voedsel) kunnen beïnvloeden.

De landbouwemissies worden berekend uit het areaal landbouw. De landbouw is onderverdeeld in vijf akkerbouwklassen (akkerbouw, tuinbouw groente, tuinbouw fruit, tuinbouw overig en grasland) en een veestapel met drie diertypen (runderen, varkens en pluimvee). Voorlopig wordt aangenomen dat de veestapelomvang constant blijft voor de drie diertypen. Het totaal toegewezen areaal voor de vijf akkerbouwklassen is gekoppeld aan het totaal berekende areaal landbouw uit het deelmodel Ruimtegebruik, via proportionele schaling. Uitgaand van de begintoestand, de ontwikkeling van de landbouwruimte uit het deelmodel Ruimtegebruik, en emissiefactoren voor het jaar 2010 uit het Landbouwrapport 2012 (Platteau et al., 2012) wordt berekend wat de emissies zijn van een groot aantal stoffen (N, P, CO₂, verzurende emissies, fijn stof, pesticiden, CO₂, NO_x, SO_x en NH₃). Deze resultaten worden binnen het deelmodel Water en Lucht onder meer gebruikt om de concentraties te berekenen, de emissies van broeikasgassen, en de atmosferische depositie.

Milieunormen spelen een belangrijke rol in de landbouw. In dit kader is een modelbouwsteen ontwikkeld waarmee de emissies van landbouwbedrijven, die zich in de nabijheid van kwetsbare natuur bevinden en niet aan de norm voldoen, periodiek kan worden bijgesteld. De invoervariabele voor deze modelbouwsteen is de atmosferische depositie uit het deelmodel Lucht. De modelbouwsteen is operationeel, en berekent de bijgestelde emissiefactoren, maar de resultaten worden nog niet gebruikt in het systeemmodel, omdat het belang van deze terugkoppeling op dit moment nog beperkt lijkt te zijn (priv. comm. Felix Deutsch-VITO, sept. 2015).

5.7. RUIMTEGEBRUIK

Het deelsysteem voor het ruimtegebruik in Vlaanderen beschrijft de ontwikkeling van het ruimtegebruik per landgebruiksklasse, uitgaand van de demografische ontwikkelingen en economische groei (Figuur 5-16).



Figuur 5-16 Opzet deelmodel voor het ruimtegebruik.

De opstelling van het deelsysteem steunt op de onderliggende principes van het RuimteModel Vlaanderen (Engelen G. et al., 2011b), dat expliciet ruimtelijk rekt op een raster van cellen van 100x100 m. met 37 landgebruiksklassen. In het systeemmodel zijn deze geaggregeerd tot 10 landgebruiksklassen (Tabel 5-5) en is er geen ruimtelijke differentiatie.

Landgebruiksklasse systeemmodel	Landgebruiksklassen RuimteModel	Allocatie	Ruimtegebruik 2010 (ha)
Residentieel	Residentieel Overig industrieel/commercieel/residentieel	a	287232
Geregistreerde Landbouw	Productiegrasland met natuur- en milieudoelen Productiegrasland Akker met natuurdoelen Akker met milieudoelen Akker	a	622898
Industrie	Lichte industrie Zware industrie Afval en afvalwater, waterwinning en waterdistributie Mijnbouw	a	19144
Diensten	Groothandel en transport en verkeer Detailhandel en horeca Kantoren en administratie Overige diensten	a	29824
Energie	Energie (productie)	b	454
Beheerde Natuur	Grasland met natuurbeheer Bos met natuurbeheer Bos met bosbeheer Moeras met natuurbeheer Heide met natuurbeheer Kustduin met natuurbeheer Slik en schorre	b	155354
Vaste elementen	Zeehaven Recreatie- en sportterrein Park Militaire voorziening Infrastructuur Water	c	83522
Ongeregistreerde landbouw	Niet geregistreerde landbouwgrond	d	84923
Onbeheerde Natuur	Niet geregistreerd grasland met natuurwaarde Moeras zonder natuurbeheer Heide zonder natuurbeheer Kustduin zonder natuurbeheer	d	38861
Overig	Overig	d	41713

Tabel 5-5 Landgebruiksklassen deelmodel ruimtegebruik voor Vlaanderen zonder Brussel.

Het initieel ruimtegebruik voor iedere landgebruiksklasse stemt overeen met dat in het RuimteModel (Engelen et al., 2011b). Evenals voor het RuimteModel wordt met een tijdstap van een jaar gerekend. De wijze waarop voor de 10 landgebruiksklassen de uiteindelijke toewijzing van ruimte (allocatie) plaatsvindt, verschilt (zie kolom 3 in Tabel 5-5):

- Competitie op basis van de totaal beschikbare ruimte, de ruimtevraag, en de waarde van het landgebruik per oppervlakte eenheid (residentieel, landbouw, industrie en diensten).
- Directe toewijzing van de ruimte voor elk jaar volgens een in te lezen scenario (energie en beheerde natuur).
- Direct toewijzing van het ruimtegebruik, dat voor de gehele simulatieperiode constant is (vaste elementen).
- Proportionele toewijzing van de resterende ruimte (ongeregistreerde landbouw, onbeheerde natuur en overig landgebruik).

Vanuit de deelsystemen Demografie en Economie krijgt het deelsysteem Ruimtegebruik respectievelijk jaarlijks het Vlaams totaal aantal huishouden en totaal aantal tewerkgestelden in de sectoren Industrie en Diensten. Doordat veel thema's inwerken op de demografie en economie (vergrijzing, milieukosten ...) werken deze ook indirect door op het Vlaams ruimtegebruik.

De ontwikkeling van het ruimtegebruik voor de verschillende landgebruiksklassen is complex, en wordt sterk bepaald door de competitie van de overeenstemmende sectoren. Een meer gedetailleerde representatie van de werking van het deelmodel voor het ruimtegebruik op het niveau van de toestandsvariabelen en modelparameters is te vinden in Figuur 8-7.

Voor de vertaling van de ruimtevraag naar de uiteindelijke toewijzing van ruimte voor de landgebruiksklassen uit categorie a zijn twee factoren van belang, de **druk op ruimte** en de **dichtheid**. Deze worden als volgt berekend:

$$\text{Druk op ruimte}_{(t,i)} = \text{Areal}_{(t,i)} / \text{Maximaal beschikbare ruimte}_{(t)}$$

$$\text{Dichtheid}_{(t,i)} = \text{Dichtheid}_{(t-\Delta t,i)} * (1 + 0,01 * \Delta \text{Dichtheid}_{(\Delta t,i)})$$

Uitgaand van het beginareaal voor de landgebruiken uit het RuimteModel en het totaal aan activiteiten uit het deelsysteem Demografie en Economie, wordt voor de landgebruiksklassen residentieel, industrie en diensten eerst een initiële dichtheid berekend, uit het aantal huishoudens of tewerkgestelden per ha. Deze dichtheden zijn tijdsafhankelijk en kunnen wijzigen tijdens de voortgang van de simulatie onder invloed van de druk die uitgeoefend wordt op de totale ruimte. Er kan zowel sprake zijn van verdunning (verspreiding van bestaande activiteiten over vrije ruimte) als verdichting (bijvoorbeeld hoogbouw).

Voor de landgebruiksklassen uit categorie a (vrije competitie) geldt, hoe meer ruimte een bepaald landgebruik inneemt, hoe meer druk dat landgebruik uitoefent op de totale beschikbare ruimte van Vlaanderen. Er is sprake van een negatieve terugkoppeling (zie Figuur 8-7).

De relatie tussen de druk en dichtheid is gebaseerd op resultaten uit het RuimteModel (Figuur 5-17). Aan de hand van een schaalfactor, kan het effect van verdichting of verdunning versterkt respectievelijk afgezwakt worden, als dit nodig bleek om de resultaten van het RuimteModel te kunnen reproduceren. De uiteindelijke dichtheid bepaalt de initiële ruimtevraag van het landgebruik.



Figuur 5-17 Dichtheid als functie van de druk per landgebruiksklasse.

Voor de finale toewijzing van ruimte aan elke landgebruiksklasse uit de categorie a is de economische landwaarde bepalend (Tabel 5-6).

Landgebruiksklasse	Landwaarde factor per ha (-)
Residentieel	10.0
Landbouw	0.1
Industrie	1.0
Diensten	3.0

Tabel 5-6 Landwaarde landgebruiksklassen categorie a voor allocatie.

De landwaarde is geen absolute weergave van de economische waarde van elk landgebruik, maar een index voor de proportionele verdeling van het landgebruik. Hierbij wordt de totaal bijkomende ruimte voor deze landgebruiksklassen proportioneel verdeeld aan de hand van die economische waarde. Voor de economische landgebruikscategorieën (categorie a), behalve de landbouw, is de verandering van het ingenomen areaal ruimte als volgt berekend:

$$Areaal_{(t, i)} = Areaal_{(t-\Delta t, i)} + (Landwaarde_{(i)} / \sum Landwaarde_{(i \text{ behalve landbouw})}) * \sum Landvraag_{(i, \Delta t)}$$

Voor landbouw wordt een aangepaste vergelijking toegepast:

$$Areaal_{(t, i)} = Areaal_{(t-\Delta t, i)} - \alpha_{(i)} * (1 - Landwaarde_{(i)} / \sum Landwaarde_{(i)}) * \sum Landvraag_{(i, \Delta t)}$$

Waarin:

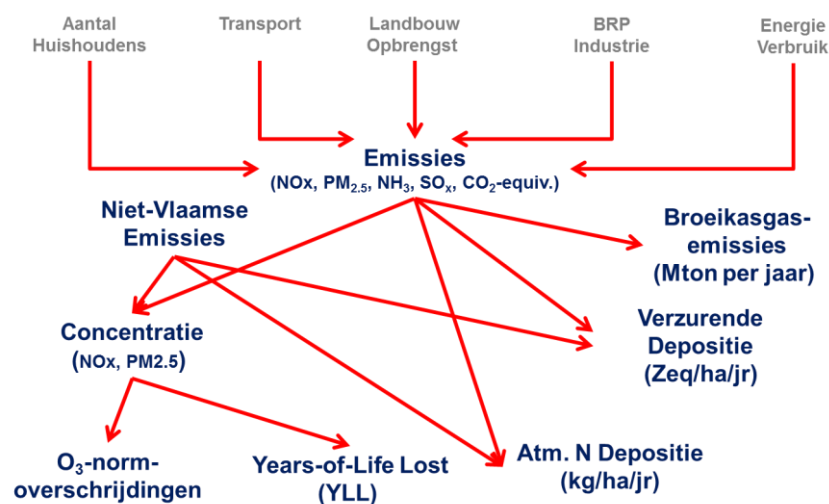
- Areaal = aantal ha land dat toegewezen wordt;
- Landwaarde = proxy van de economische waarde;
- Landvraag = gevraagde ruimte op basis van dichtheid = Activiteiten_(i) / dichtheid_(i, t);
- α = dimensieloze schaalfactor.

Vanuit de toegewezen arealen per landgebruiksklasse, worden drie ruimtelijke indicatoren berekend, die van belang zijn voor de andere deelsystemen: de verstedelijkingsgraad, toegankelijkheid van gebouwde landgebruikscategorieën ten opzichte van het bestaande wegennet, versnippering van open ruimte, en de versteningsgraad (zie ook Figuur 8-7).

De kalibratie van het Systeemmodel toont dat het ruimtegebruik het meest gevoelig is aan de exogene variabelen "Migratiebeleid" en "omvang huishoudens". Beide variabelen hebben een belangrijk effect op het totaal aantal inwoners en/of huishoudens en tewerkgestelden. Die op hun beurt dan de input vormen van het deelsysteem Ruimtegebruik en daardoor een belangrijke impact hebben op de arealen voor de verschillende landgebruikscategorieën. Bij een business-as-usual scenario wordt verwacht dat het areaal residentieel uitbreidt met 6 % tot ca. 304.500 ha terwijl de (geregistreerde) landbouw afneemt met 4 % tot ca. 600.000 ha. Extreme simulaties geven aanleiding tot een stijging van het residentieel met bijna 50 % terwijl anderzijds een daling van het aantal huishoudens aanleiding kan geven tot een afname van het residentieel areaal van 14 %. Deze cijfers zijn mogelijk aangezien het model toelaat dat bij een extreme daling van het aantal huishoudens er ook effectief residentiële ruimtes verdwijnen. Dit betekent dat leegstaande woningen weer vrij zouden komen voor andere landgebruiken, al dan niet bebouwd. Zo kan de landbouw bijvoorbeeld ook toenemen in zo een extreem scenario tot bijna 10 %, wat in combinatie met een dalende bevolking een weinig intensieve landbouw tot gevolg zou hebben.

5.8. LUCHTKWALITEIT

De blootstelling aan de verschillende luchtpolluenten (Figuur 5-18) heeft een ernstige gezondheidsimpact. De luchtkwaliteit is in Vlaanderen voor de gezondheid van de bevolking de grootste milieu impact, met fijn stof als belangrijkste boosdoener. Het aantal doden door fijn stof wordt voor België vier maal hoger ingeschat dan het aantal verkeersdoden (Global Burden of Disease, GDB 2012, <http://www.healthdata.org/gdb>). Aangezien het aantal slachtoffers van deze tweede categorie over het algemeen aanzienlijk jonger zijn dan bij luchtvervuiling is het verschil in aantal verloren levensjaren kleiner, maar ook dan blijft luchtkwaliteit belangrijk met een factor 1.5. Naast fijn stof, kan ook het inademen van andere polluenten zoals ozon (O_3) en NO_2 de gezondheid schaden. De langetermijnpact van fijn stof is aanzienlijk groter, maar op korte termijn hebben zomerse O_3 -episodes echter eveneens een aanzienlijke impact (gereduceerde longcapaciteit). Naast invloed op de volksgezondheid, leiden verhoogde O_3 -concentraties en verhoogde verzurende en vermestende deposities tot negatieve effecten voor de vegetatie. Tenslotte omvat de luchtkwaliteitsmodule van dit systeemmodel ook de Vlaamse broeikasgasemissies.



Figuur 5-18: Schematische modelstructuur deelsysteem luchtkwaliteit.

De luchtkwaliteit in Vlaanderen wordt beïnvloed door zowel de activiteiten in Vlaanderen als het buitenland en de meteorologische omstandigheden. In het deelsysteem rond luchtkwaliteit wordt als input de activiteiten in de verschillende sectoren genomen, waarbij de totale Vlaamse emissies zijn onderverdeeld in residentiële emissies en emissies verbonden aan mobiliteit, landbouw, industriële activiteiten en energieproductie.

De Vlaamse emissietotalen per sector worden jaarlijks gerapporteerd voor verschillende polluenten die de luchtkwaliteit beïnvloeden (VMM, 2014c; VMM, 2015b). Van de 45 VLEM-sectoren uit deze rapportage kunnen er 41 gelinkt worden aan de 5 sectoren die we meenemen, de overige 4 sectoren (defensie, handel en diensten, WKK tertiaire sector en afvalverwerking) maken slechts 1% van het emissietotaal uit en kunnen worden verwaarloosd. Naast deze historische emissiedata zijn er ook emissieprognoses opgesteld (Van Steertegem, 2009). Voor de broeikasgasemissies vormen de gerapporteerde emissies uit de VMM-rapportage (VMM, 2014c) het landbouwrapport (Platteau et al., 2012) en de emissies per transportmodi voor mobiliteit (Vanhulsel M., 2015). Voor de verschillende sectoren kunnen dus emissiefactoren worden opgesteld door de emissies te bekijken in functie van activiteitsindicatoren per sector. Voor het luchtkwaliteitsdeelsysteem is zo een analyse gemaakt van de volgende verbanden:

- Residentiële emissies als functie van het aantal huishoudens;
- Industriële emissies als functie van het industriële BRP;
- Emissies energie-producerende sector als functie van het gebruik van fossiele brandstoffen en biomassa door de energie-producerende sector.

Voor de landbouwsector kunnen uit het landbouwrapport (Platteau et al., 2012) en de gerapporteerde emissies emissiefactoren per landbouwsubsector opgesteld worden:

- Emissies rundsveeteelt vs. aantal runderen;
- Emissies varkenshouderij vs. aantal varkens;
- Emissies pluimveehouderij vs. pluimveestapel;
- Emissies akkerbouw vs. akkerbouwareaal;
- Emissies tuinbouw vs. tuinbouwareaal.

Voor de transportsector zijn emissiefactoren beschikbaar voor de verschillende transportmodi (Vanhulsel M., 2015). Op basis van het aantal voertuigkilometers per transportmodus kunnen hieruit de totale emissies afkomstig van mobiliteit berekend worden.

De evolutie van emissies doorheen de tijd wordt enerzijds verklaard door de wijzigingen in activiteitsgraad in de verschillende sectoren. Zo kan verwacht worden dat een toename van het aantal voertuigkilometers leidt tot een toename van de transportemissies. Anderzijds zijn emissiefactoren geen constanten en wijzigen deze eveneens doorheen tijd. Door technologische ontwikkelingen en verstrengde regelgeving is het industriële GDP tussen 1990 en 2010 aanzienlijk gegroeid terwijl de industriële emissies tegelijkertijd zijn afgenomen. Om deze effecten in het systeemmodel op te nemen zijn de emissiefactoren tijdsafhankelijk. Het model rekent met de emissiefactor zoals bepaald voor het startjaar 2010, en een emissietrend opgesteld op basis van de emissieprognoses en historische emissies.

De emissietrend op basis van huidige prognoses is een business-as-usual benadering die beïnvloed kan worden door innovaties. Om de mogelijkheid in te bouwen om de evolutie van emissiefactoren afhankelijk te maken van innovatie, wordt de trend bepaald door de parameter 'duurzaam gedrag en beleid'. De mate waarin dit de emissies beïnvloedt, is bepaald op basis van Milieuverkenning 2030, waarbij het visionair scenario met maximale emissiereducties als leidraad heeft gediend voor een maximale instelling voor duurzaamheid.

Voor Vlaanderen omvat het systeemdynamisch model de emissies van de volgende luchtkwaliteitspolluenten: $PM_{2.5}$, NO_x , NH_3 en SO_x . De broeikasgasemissies worden als een totaal beschouwd uitgedrukt in equivalenten CO_2 . Verschillende broeikasgassen kunnen immers samengeteld worden op basis van hun potentieel om de atmosfeer op te warmen ten opzichte van CO_2 (Global Warming Potential). Voor landbouw, energie, huishoudens en industrie is rechtstreeks vanaf CO_2 -equivalenten gestart. Voor mobiliteit maakt CO_2 meer dan 99% van de totale broeikasgasemissies uit en kunnen de overige broeikasgassen verwaarloosd worden.

Voor de buitenlandse emissies wordt rechtstreeks met emissietotalen gewerkt aangezien een systeemmodel voor Vlaanderen geen indicatoren voor sectoren in het buitenland bevat. Op basis van de gerapporteerde emissietotalen en prognoses voor buurlanden en regio's zijn enerzijds emissietotalen voor 2010 bepaald en anderzijds de evolutie hiervan doorheen de tijd. Hoe de buitenlandse emissietotalen wijzigen doorheen de tijd zijn parameters waarvoor in het model doelwaardes kunnen worden opgenomen. Hiervoor kunnen de emissietrends van de WLO-wereldbeelden als referenties dienen (Janssen et al., 2006).

Uit de Vlaamse en buitenlandse emissies worden de jaargemiddelde fijn stof concentraties ($PM_{2.5}$), NO_x -concentraties en verzurende en vermestende deposities voor Vlaanderen bepaald. Het verband tussen concentraties en deposities enerzijds en emissies anderzijds is opgesteld op basis van de gerapporteerde emissies, deposities, concentraties en brontoewijzingen voor 2010 (Deutsch F. et al., 2010; Cools et al., 2015; Torfs R. et al., 2006; IRCEL, 2013; VMM, 2014c; VMM, 2015b).

Volgend voorbeeld voor fijn stof concentraties maakt dit concreter. De totale fijn stof concentratie is de som van de bijdrages van Vlaamse emissies (primair en secundair), buitenlandse emissies (primair en secundair) en niet-antropogene emissies.

$$[PM_{2.5}]_{tot} = [PM_{2.5}]_{Vl,prim.} + [PM_{2.5}]_{Vl,sec.} + [PM_{2.5}]_{Buitl.,prim.} + [PM_{2.5}]_{Buitl.,sec.} + [PM_{2.5}]_{overig} \quad (a)$$

Elke afzonderlijke component uit vergelijking a) kan worden berekend voor 2010 op basis van de gekende brontoewijzing en de gekende totale $PM_{2.5}$ concentratie (ruimtelijk gemiddelde voor Vlaanderen). De bijdrages van secundaire fijn stof emissies worden hierbij nog opgesplitst tussen de verschillende fijn stof precursoren NO_x , SO_x en NH_x . Op basis van deze cijfers wordt de ratio tussen emissies en concentraties per bron bepaald. Voor Vlaamse, primaire fijn stof emissies geeft dit:

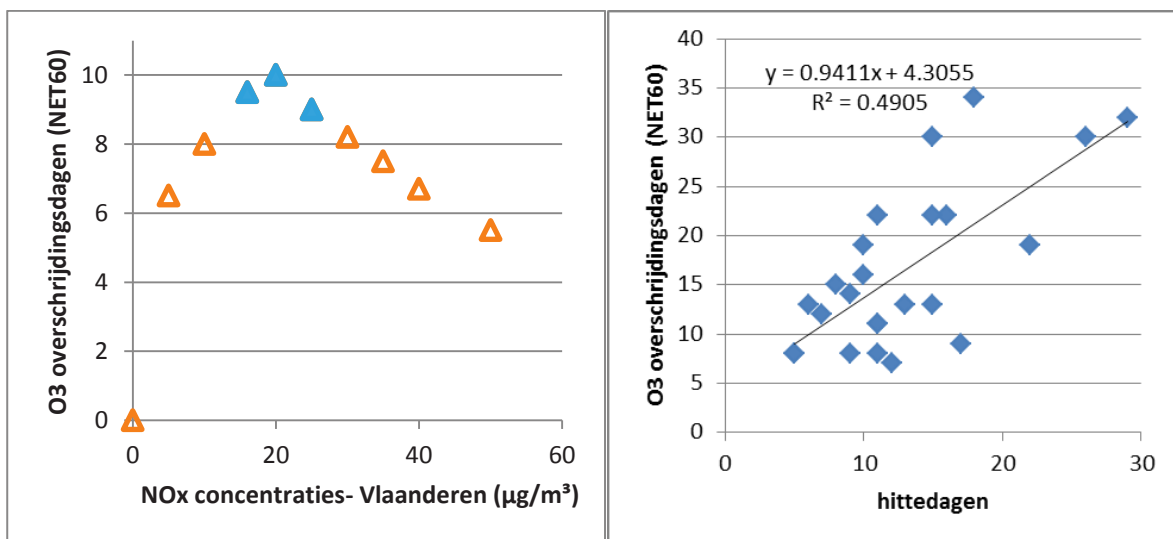
$$R_{PM_{2.5}Vl,prim.} = \frac{[PM_{2.5}]_{Vl,prim.}(2010)}{Emissie_{PM_{2.5}Vl,prim.}(2010)} \quad (b)$$

De bepaalde ratio (R) geeft dus de verhouding in $\mu g m^{-3}/Mton \text{ jaar}^{-1}$ die kan worden toegepast om toekomstige emissies om te rekenen naar concentratiebijdrages.

De luchtkwaliteit in Vlaanderen varieert door de invloed van meteorologische omstandigheden. In dit systeemmodel wordt voor de berekening van $PM_{2.5}$ -concentraties, NO_x -concentraties en verzurende en vermestende deposities abstractie gemaakt van deze meteorologische impact. De variabiliteit in bijvoorbeeld windsnelheden en windrichtingen is voor de toekomst niet gekend, door de keuze voor 2010 als referentiejaar nemen we dit meteojaar dus als ijkpunt. De invloed van toekomstige klimaatopwarming beïnvloedt wel de emissies. Belangrijk om te benadrukken is hier eveneens dat voor dit systeemdynamisch model steeds met ruimtelijke gemiddeldes voor Vlaanderen is gewerkt, aangezien een systeemdynamisch model per definitie niet ruimtelijk expliciet is.

Als indicator voor O_3 -problematiek is het aantal ozon-overschrijdingsdagen (NET60ppb-max8u) opgenomen. Deze indicator wordt berekend op basis van de NO_x -concentraties en het aantal warme hittedagen per jaar. Het verband tussen NO_x -concentraties en O_3 -overschrijdingsdagen is niet-lineair. NO_x is enerzijds een O_3 -precursor, anderzijds leiden hoge NO_x -concentraties tot O_3 -afbraak. Het exacte evenwicht tussen bijkomende ozonvorming of afbraak is complex en afhankelijk van de lokale hoeveelheden O_3 , NO , NO_2 en andere ozonprecursoren. Een vereenvoudigde voorstelling van deze complexiteit is noodzakelijk voor een systeemdynamisch model. Het verband tussen NO_x - en O_3 -verschrijdingen is in dit model opgesteld op basis van de gerapporteerde NO_x -concentraties en O_3 -overschrijdingen en verwachte toekomstige evoluties volgens de verschillende scenario's (MIRA Milieuverkenning 2030). Milieuverkenning 2030 toont dat bij dalende NO_x -concentraties, ten opzichte van 2010, het aantal overschrijdingsdagen eerst kan toenemen alvorens te dalen bij verdere daling van de NO_x -concentraties. Het gekende verband in 2010 en de toekomstverkenning zijn aangevuld met interpolaties en extrapolaties, zoals getoond in Figuur 5-19. De extrapolatie naar niet eerder bestudeerde NO_x -concentraties voor Vlaanderen is

hierbij momenteel slechts gebaseerd op de algemene kennis rond O₃-vorming en -afbraak. Hoewel dit slechts een beperkte wetenschappelijke fundering heeft omwille van de spanning tussen de complexiteit van de problematiek enerzijds en de beperkingen binnen dit model op hoofdlijnen, biedt dit een toepasbaar verband en een goed kwalitatief beeld. In het systeemmodel zijn verschillende klimaatscenario's instelbaar. Dit bepaalt de evolutie van het aantal hittedagen. Er wordt hier uitgegaan van een lineair verband tussen hittedagen en O₃-overschrijdingsdagen, eveneens in onderstaande figuur. Het aantal O₃-overschrijdingsdagen is als indicator beschikbaar en wordt vertaald naar gezondheidseffect als reductie in longcapaciteit (Buekers en Int Panis, 2013). Kortetermijnblootstelling aan verhoogde ozonconcentraties kan respiratoire effecten veroorzaken.

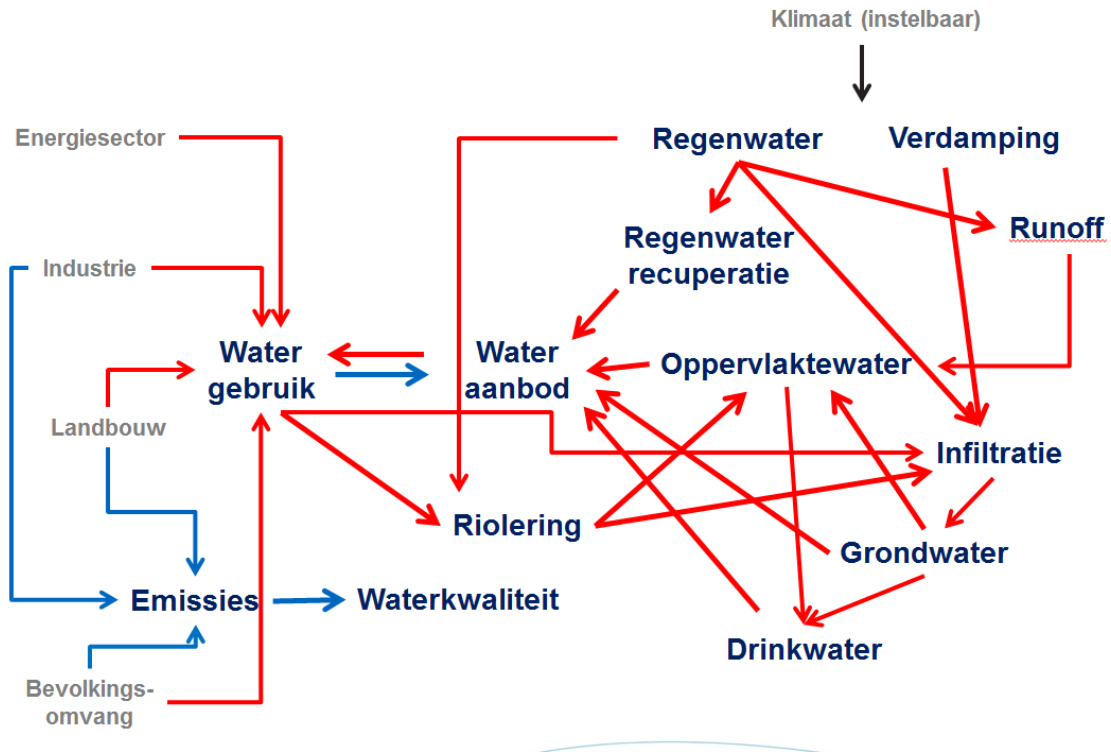


Figuur 5-19: Aannames O₃-problematiek: een niet-lineair verband tussen O₃-overschrijdingen en NO_x-concentraties met gerapporteerde cijfers als volle symbolen en de extrapolaties als open symbolen (linker figuur). De rechter figuur toont de toename van overschrijdingen met aantal hittedagen (historische data), hiervoor wordt een lineair verband aangenomen.

De luchtkwaliteitsmodule is dus aan de invoerzijde gekoppeld aan economie, industrie, mobiliteit, landbouw en demografie. Terugkoppeling is er naar natuur en landbouw via de impact van atmosferische deposities en naar demografie de impact van fijn stof op de volksgezondheid via verloren levensjaren (Buekers et al., 2012) en absentieïsme (zie Sectie 5.3).

5.9. WATER

Het deelsysteem water berekent zowel de hoeveelheid als de kwaliteit van het water. Bij de berekening van de hoeveelheid water maken we onderscheid tussen regen-, oppervlakte-, grond- en drinkwater als mogelijke bronnen voor water (Figuur 5-20). Bij de berekeningen en het afleiden van relaties wordt in deze module veelvuldig gebruik gemaakt van de MIRAdynamische kernset.



Figuur 5-20 Schematische modelstructuur deelsysteem luchtkwaliteit.

De beschikbare waterhoeveelheid berekent de module op basis van een jaargemiddelde waterbalans. De neerslag wordt daarbij verdeeld over een natuurlijk, niet-verhard oppervlak en een bebouwd, verhard oppervlak op basis van het verharde oppervlak dat de landgebruiksmodule berekent. Het regenwater dat op het natuurlijk oppervlak terechtkomt, kan afstromen, verdampen en infiltreren. Voor de verdamping wordt de jaarlijks gemiddelde actuele verdamping (ET_{ACT}) berekend op basis van de methode beschreven in Turc(1955):

$$ET_{ACT} = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \left[\frac{P}{ET_{POT}}\right]^2}}$$

$$ET_{POT} = 300 + 25T + 0.05T^2$$

waarbij P de neerslag (mm), ET_{pot} de potentiële verdamping en T de temperatuur ($^{\circ}C$) zijn. Voor de berekening van de oppervlakkige afstroming voor de natuurlijke oppervlakken werd als afvoercoëfficiënt 13% aangenomen wat overeenkomt met de gemiddelde waarde van de afvoercoëfficiënt berekend door de jaarlijkse afvoer voor de onbevaarbare waterlopen te delen door de neerslag over de periode 1992-2007 ([indicatorfiche hydrologisch gedrag van onbevaarbare waterlopen](#)). De infiltratie is dan de neerslag verminderd met de actuele verdamping en de

oppervlakkige afstroming. Voor de fractie van het regenwater dat op de bebouwde oppervlakte terecht komt wordt rekening gehouden met de mogelijkheid tot regenwaterrecuperatie. Voor huishoudens, industrie en landbouw wordt vertrokken van een initiële inschatting van de regenwaterrecuperatie (dynamische kernset MIRA, 2015) om de initiële fractie van het regenwater dat gerecupereerd wordt, te berekenen. Vervolgens wordt ieder jaar deze fractie verhoogd met een constante fractie. Deze fractie moet gezien worden als een modelinvoer parameter waarmee verschillende beleidsscenario's rond regenwaterrecuperatie kunnen worden doorgerekend. Gezien de verplichting tot regenwaterrecuperatie bij nieuwbouw sinds 2014 wordt voor huishoudens deze fractie momenteel geschat op 0,5 % op basis van het aantal nieuwbouw eengezinswoningen (2014: 16.346) gedeeld door het totaal aantal woonegelegenheden (2014: 2,894,414). Voor industrie en landbouw werd aangenomen dat er geen toename in recuperatie is en bedraagt de fractie in het model dus 0 %. Het regenwater dat niet opgevangen wordt, komt afhankelijk van de aansluitingsgraad in de riolering terecht of infiltreert. Het deel dat rechtstreeks geloosd wordt in het oppervlaktewater wordt momenteel in het model niet afzonderlijk berekend maar meegenomen in het deel dat infiltreert.

De waterbehoefte in het model wordt berekend voor de bevolking, de industrie, de landbouw en het gebruik als koelwater voor de fossiele en nucleair energiesector afzonderlijk. Voor het koelwater in de energiesector houden we geen rekening met het oppervlaktewater dat na gebruik terug geloosd wordt. Voor ieder van deze sectoren werd de waterbehoefte berekend door de waterbehoefte per eenheid van een activiteitsindicator voor de sector te vermenigvuldigen met de activiteitsindicator voor de sector. Dit resulteert in de volgende relaties:

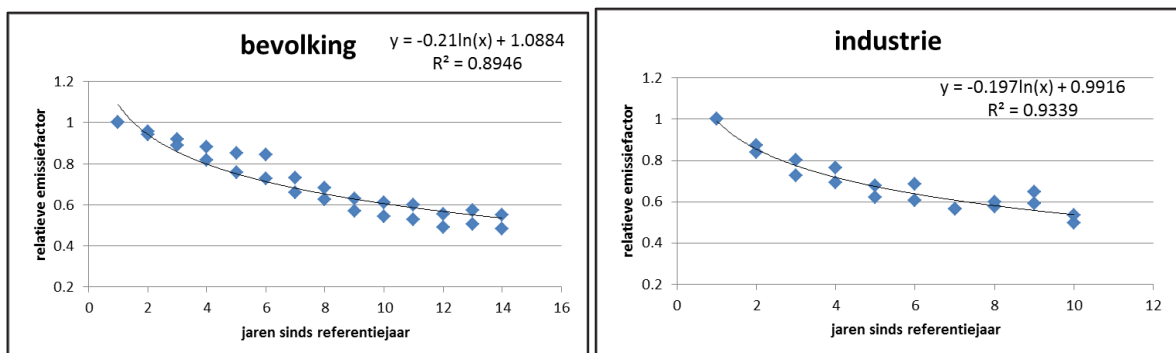
- huishoudelijk waterbehoefte per inwoner
- industrieel waterbehoefte per eenheid van het BRP
- waterbehoefte in de rundveeteelt per dier
- waterbehoefte in de varkensteelt per dier
- waterbehoefte in de pluimveeteelt per dier
- waterbehoefte per GJ geproduceerde energie (netto: zonder koelwater dat terug wordt geloosd) waarbij onderscheid werd gemaakt tussen de waterbehoefte voor fossiele (0,9 l/kWh) en nucleaire (1,8 l/kWh) energieopwekking

Voor de bevolking, de industrie en de energiesector baseren we ons daarbij op cijfers uit de dynamische kernset MIRA terwijl voor de landbouw de cijfers uit de 'Inschatting van het watergebruik in de landbouw' (MIRA, 2007) worden gebruikt. Om het waterverbruik voor de plantenteelt te begroten werd in eerste instantie getracht om dit te relateren aan de beschikbare neerslag. Op basis van de neerslag en waterbehoefte statistieken voor de plantenteelt voor de periode 2000-2005 kon echter enkel voor de akkerbouw een duidelijk verband ($R^2 = 0,75$) vastgesteld worden tussen de jaarlijkse neerslag en de waterbehoefte per ha gewas. Voor de tuinbouw kon zulk een duidelijk verband niet worden vastgesteld en werd besloten om met het waterverbruik per ha zoals vermeld in het MIRA-rapport verder te werken. De aldus berekende waterbehoefte per eenheid van de activiteitsindicatoren houdt geen rekening met wijzigingen in duurzaam gedrag. In het model wordt deze wijziging in duurzaamheid in rekening gebracht door de totale waterbehoefte met een factor te vermenigvuldigen die varieert tussen 1,2 en 0,8 die we berekenen op basis van de algemene duurzaamheidsindex die voor alle componenten van het model gebruikt wordt en die kan variëren tussen 50 en 150.

Een deel van de totale waterbehoefte kan door recuperatie van regenwater worden ingevuld. Zo blijkt uit gegevens van Waterlink dat momenteel het gebruik voor toilet, wassen en de tuin 46 % van het huishoudelijk watergebruik uitmaakt. Voor dit deel van het watergebruik kan ook regenwater gebruikt worden in de mate dat dit beschikbaar is. Indien de beschikbare hoeveelheid opgevangen regenwater groter is dan wat effectief kan gebruikt worden, komt dit afhankelijk van de aansluitingsgraad in de riolering terecht of infiltreert. Het deel van de totale waterbehoefte dat overblijft na het gebruik van regenwater wordt verdeeld over drink-, oppervlakte- en grondwater volgens de verdeling over deze bronnen in 2010. Na gebruik komt het water afhankelijk van de aansluitingsgraad in de riolering terecht, infiltreert of verdwijnt uit de balans (bijvoorbeeld door verdamping). Het water dat in de riolering terecht komt zal vervolgens deels door lekkage infiltreren en deels naar het oppervlaktewater geloosd worden. Het water dat infiltreert, gaat naar het grondwater en wordt daar dan verdeeld over een deel dat naar het oppervlaktewater gaat (basisdebiet) en een deel dat wordt opgepompt. De import/export van grond- en oppervlaktewater wordt niet in rekening gebracht in de balans.

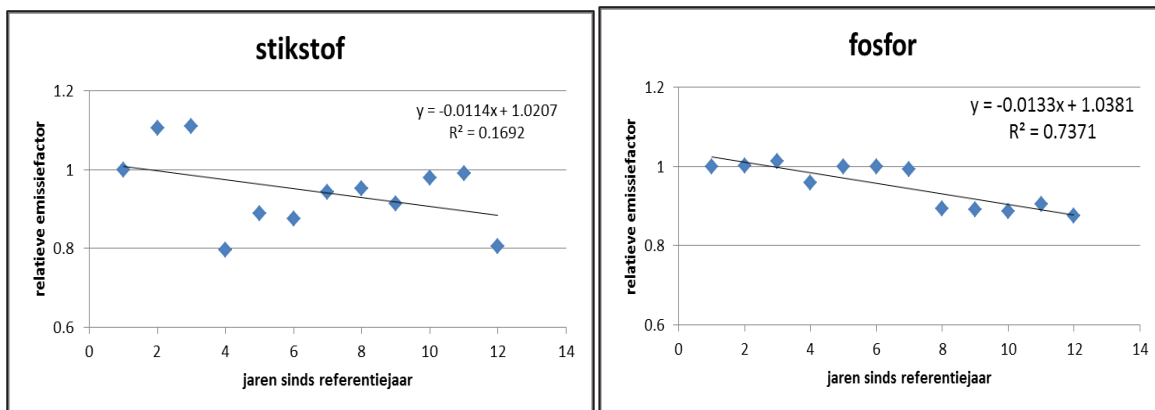
De productie van drinkwater gebeurt op basis van zowel grond - als oppervlaktewater. Uit de drinkwaterbalans voor Vlaanderen voor 2013 blijkt dat 49 % van het drinkwater momenteel op basis van grondwater wordt bereid (VMM, 2014b). Het model gebruikt fracties voor 2010 en voor 2050 waartussen lineair geïnterpoleerd wordt om voor ieder jaar de fractie grondwater bij de drinkwaterproductie te bepalen. De waarde van de fractie voor 2050 biedt de mogelijkheid om het effect van toekomstig beleid ten aanzien van het gebruik van grondwater te berekenen. Momenteel wordt voor de waarde in 2050, 30 % verondersteld waarbij we dus aannemen dat in de toekomst de drinkwaterproductie in vergelijking met de huidige situatie (49 %) eerder op basis van oppervlaktewater zal gebeuren. Bij de berekening van de drinkwaterproductie wordt rekening gehouden met de door de VMM gerapporteerde waarden voor de import en de verliezen tijdens de verdeling.

Voor de waterkwaliteit vertrekken we van de emissies voor stikstof en fosfor voor de bevolking, industrie en landbouw. De zuurstofbindende stoffen werden niet beschouwd omdat er geen cijfers voor de landbouw beschikbaar waren. Naar analogie met de waterbehoefte worden de emissies berekend op basis van emissiefactoren per eenheid van een activiteitsindicator voor ieder van deze sectoren. De emissiefactoren voor de bevolking en de industrie zijn opnieuw gebaseerd op de dynamische kernset. Per eenheid van de bevolking en BRP werden voor deze sectoren de emissiefactoren bepaald voor de jaren waarvoor data beschikbaar zijn waarbij bleek dat er een afname is van de emissiefactoren over de jaren heen. Om deze trend mee te nemen in de berekeningen wordt voor de bevolking en de industrie afzonderlijk op basis van de relatieve afname van de emissiefactoren ten opzichte van de emissiefactor voor het eerste jaar een trendfunctie gebruikt. Deze zijn weergegeven in Figuur 5-21 hieronder.



Figuur 5-21 Regressies voor de relatieve emissiefactoren voor alle polluenten samen (stikstof en fosfor) in de tijd.

Voor de landbouw worden waarden afkomstig van het landbouwrapport (LARA 2012, Departement Landbouw en Visserij) gebruikt om de totale toevoer van stikstof en fosfor uit de landbouw te begroten op basis van het aantal dieren en de landbouwoppervlakte. Door de emissies voor de landbouw zoals deze gerapporteerd worden in de dynamische kernset te delen door de toevoer van stikstof en fosfor, kunnen we vervolgens naar analogie met de bevolking en industrie emissiefactoren berekenen per eenheid toegevoerde stikstof en fosfor. Deze kunnen dan opnieuw gebruikt worden om trends te bepalen ten opzichte van een referentiejaar (Figuur 5-22).

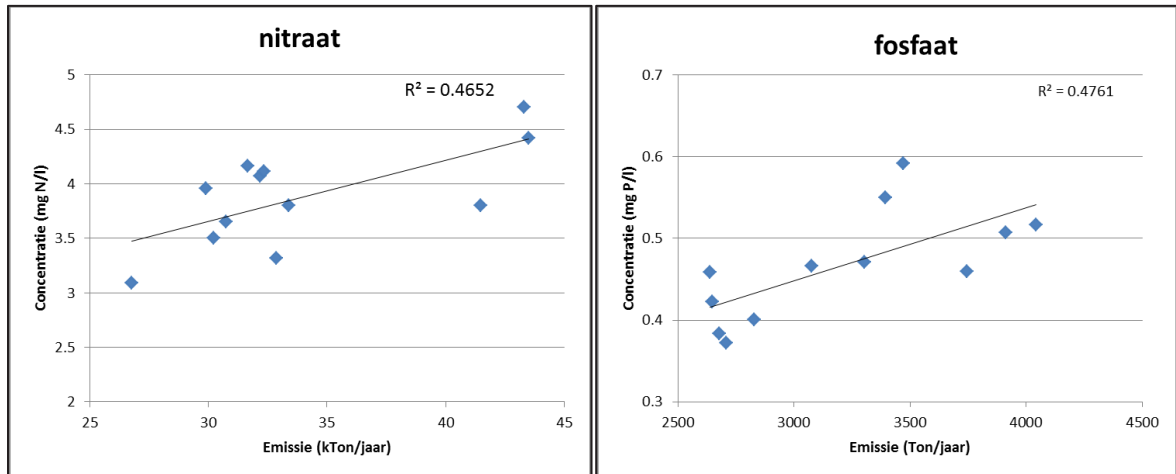


Figuur 5-22 Regressies in de tijd voor de relatieve emissiefactoren voor stikstof en fosfor afkomstig van de landbouw.

Voorals voor stikstof blijkt dat de trend voor landbouw minder duidelijk is en werd besloten om verder te werken met een gemiddelde constante emissiefactor op basis van alle beschikbare jaren. Voor fosfor wordt bij de berekening van de emissie wel met de trend rekening gehouden.

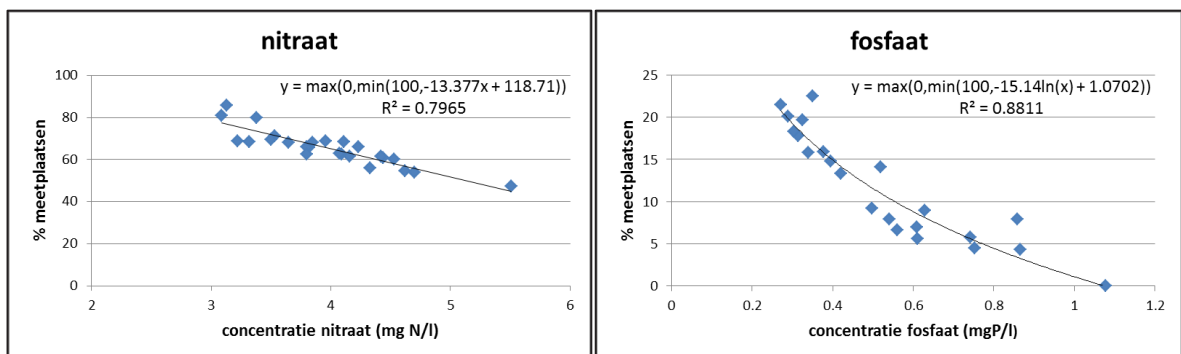
De emissies berekend op basis van de trend die bepaald werd op basis van de historische gegevens zijn de 'business-as-usual' (BAU) emissies. Deze houden dus rekening met de wijzigingen in duurzaam gedrag, wetgeving ... die gedurende de voorbije jaren plaatsvonden en gaan er van uit dat de emissiefactoren in de toekomst op eenzelfde manier ('trend') zullen veranderen. Om rekening te houden met een mogelijke wijziging in duurzaam gedrag worden de emissies net als de waterbehoefte nog vermenigvuldigd met een factor voor de duurzaamheid die voor het BAU scenario de waarde 1,0 heeft en waarvoor werd aangenomen dat die varieert tussen 0,8 en 1,2. Hierbij namen we dus aan dat meer duurzaam gedrag (duurzaamheidsindex 150) tot een bijkomende vermindering van de emissies met 20 % zou kunnen leiden terwijl de emissies met 20 % zullen toenemen in vergelijking met BAU bij minder duurzaam gedrag (duurzaamheidsindex 50). Tussen beide uiterste waarden varieert de waarde van de factor in functie van de algemene duurzaamheidsindex volgens een sigmoïde curve.

Om de emissies vervolgens om te rekenen naar concentraties werd in eerste instantie getracht om concentraties te berekenen op basis van de emissies en de oppervlaktewater afvoergegevens. Er bleek echter geen duidelijk verband te zijn tussen de berekende concentraties en de waargenomen gemiddelde concentraties. Daarom werd besloten om een eenvoudige regressie te gebruiken om de emissies rechtstreeks te vertalen naar oppervlaktewater concentraties op basis van de concentraties uit de indicatorfiches ([indicatorfiche oppervlaktewaterkwaliteit](#)). De resultaten voor deze regressies zijn weergegeven in Figuur 5-23.



Figuur 5-23 Regressies tussen de emissies voor stikstof en fosfor stoffen en de concentraties voor nitraat en fosfaat.

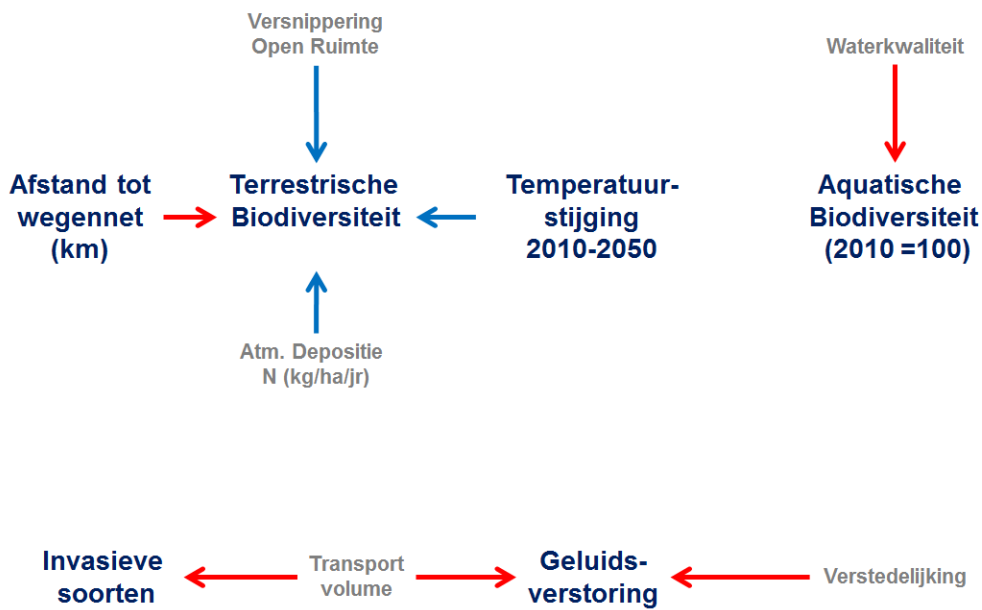
Als bijkomende indicator voor de waterkwaliteit berekent de module ook het percentage van de meetplaatsen waarvoor de waterkwaliteit aan de norm voldoet voor nitraat en fosfaat. Dit gebeurt op basis van regressies tussen het percentage meetplaatsen dat voldoet aan de norm en de gemiddelde nitraat- en fosfaatconcentraties zoals gerapporteerd in het rapport Fysisch-chemische kwaliteit oppervlaktewater 2014 van de VMM (Figuur 5-24).



Figuur 5-24 Regressies tussen het aantal meetplaatsen die aan de norm voldoen en de gemiddelde concentraties voor nitraat en fosfaat.

5.10. NATUUR EN MILIEU

Het deelmodel voor Natuur en Milieu bevindt zich aan het eind van de rekenketen van het systeemmodel en is opgezet rond de twee toestandsvariabelen: de aquatische en terrestrische biodiversiteit. Het gaat hier om indexvariabelen, gemeten ten opzichte van de waarde voor het beginjaar, die als jaargemiddelde voor geheel Vlaanderen dienen te worden opgevat. Tijdens de eerste interactieve workshop voor het kwalitatief ontwerp werd ook het belang van verstoring van de bevolking door geluid, en de mogelijkheid van een toename van het aantal invasieve soorten door transit vrachtverkeer genoemd. Daarom zijn deze twee variabelen ook aan het deelmodel toegevoegd, eveneens als indexvariabelen. Figuur 5-25 toont hoe de vier toestandsvariabelen gekoppeld zijn aan een aantal stressoren die door de andere deelmodellen worden berekend: verstedelijking, versnippering van open ruimte (uit het deelmodel voor het ruimtegebruik), verkeersvolume (deelmodel Mobiliteit), atmosferische depositie van stikstof (deelmodel Lucht), en de temperatuurstijging die is ingesteld door de gebruiker (zie Figuur 4-6).



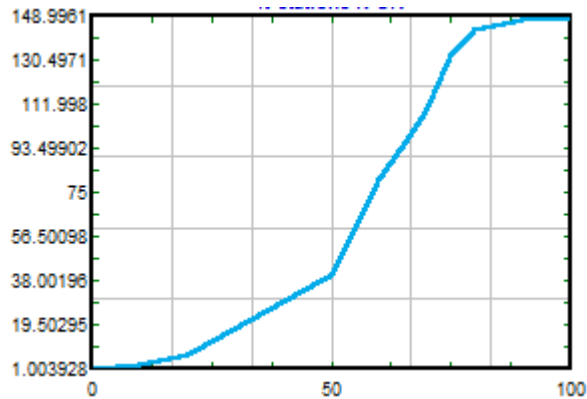
Figuur 5-25 Deelmodel voor Natuur en Milieu.

De modelbouwsteen voor de *terrestrische* biodiversiteit is gebaseerd op de Mean Species Abundance (MSA) index uit het GLOBIO3 model (Alkemade et al., 2009). De MSA index wordt ook gebruikt door het Europees Milieu Agentschap voor het Global Megatrends Rapport (EEA, 2015) en meet de biodiversiteit ten opzichte van de “natuurlijke” of onverstoorde toestand. Het GLOBIO3 model is een berekening van de impact van een combinatie van stressoren op de biodiversiteit van terrestrische soorten op het globale niveau. De MSA index is het product van vijf impactfactoren voor het landgebruik, de atmosferische depositie van stikstof, ontwikkeling van infrastructuur, versnippering van open ruimte en klimaatverandering (Alkemade, 2009):

$$MSA = MSA_{LU} \times MSA_N \times MSA_{infra} \times MSA_{frag} \times MSA_{temp}$$

Voor de toepassing op Vlaanderen binnen het systeemmodel wordt de index relatief ten opzichte van de waarde voor het beginjaar berekend, waarbij alleen rekening gehouden wordt met de overschrijding van de kritische last door atmosferische stikstofdepositie (Wuyts et al., 2009), de versnippering van open ruimte, en temperatuurstijging. Voor de volgende jaren wordt voor elk van deze drie impactfactoren berekend wat de proportionele verandering is, het product geeft vervolgens de proportionele verandering van de MSA index ten opzichte van de vorige tijdstap. Voor de berekening van de impactfactoren zelf worden de functies uit het GLOBIO model gebruikt (Alkemade, 2009).

Voor de *aquatische* biodiversiteit is de benadering eenvoudiger: deze toestandsvariabele wordt direct gekoppeld aan de waterkwaliteit via het aantal meetplaatsen waarvoor de stikstof norm niet overschreden wordt, berekend in het deelmodel voor water, d.m.v. een tabelfunctie (Figuur 5-26).



Figuur 5-26 Tabelfunctie voor de aquatische biodiversiteit als functie van het percentage meetplaatsen waarvoor de stikstofnorm niet overschreden wordt. De waarde 100 komt overeen met de waarde van de biodiversiteit in 2010.

De potentiële verstoring van de bevolking door geluid wordt gekoppeld aan de verstedelijking en het verkeersvolume. Het percentage potentieel gehinderden door geluid $P(t)$ bedraagt ca. 13 % voor het beginjaar (De Koninck et al., 2014). Voor de volgende jaren wordt dit percentage gecorrigeerd op basis van de verandering van de verstedelijking $U(t)$ en het verkeersvolume $X(t)$:

$$P(t+\Delta t) = P(t) \times \left(\frac{U(t+\Delta t)}{U(t)}\right)^\sigma \times \left(\frac{X(t+\Delta t)}{X(t)}\right)^\rho$$

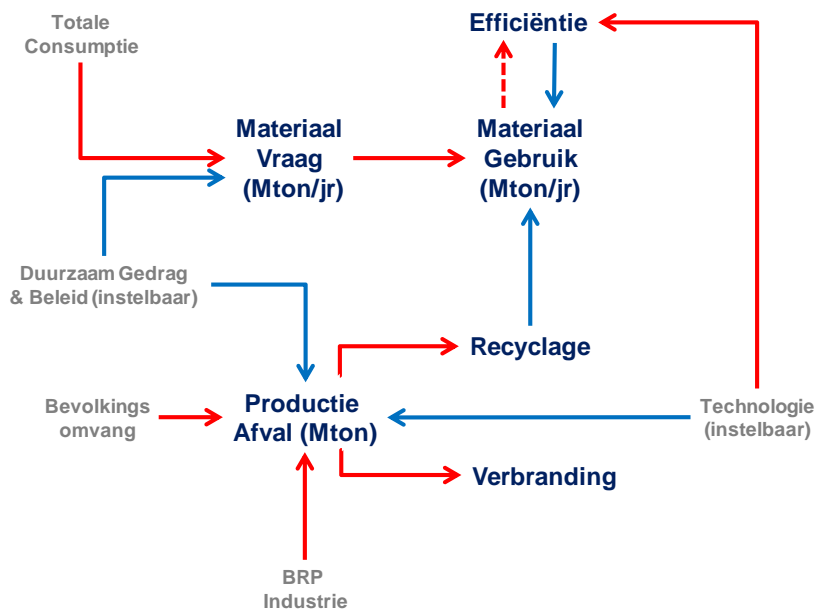
waarbij σ en ρ elasticiteiten zijn die het belang van de beide variabelen wegen.

Tenslotte wordt het belang van invasieve soorten berekend, hier voor wordt weer een tabel functie gebruikt, welke door domeinexperts is in te stellen.

5.11. AFVAL EN MATERIALEN

Het deelmodel “Afval en Materialen” beschrijft op hoofdlijnen de productie en verwerking van afval geproduceerd door huishoudens (De Groof en Princen, 2011) en bedrijven (Vervaeke et al., 2012), alsmede de totale vraag en het gebruik van materialen in Vlaanderen. In een latere fase zal bekeken worden of het model op één bepaalde materiaalstroom gericht moet worden. Dit deelmodel legt (nog) geen koppeling met de uitstoot van broeikasgassen, wat voor de beschrijving van een circulaire economie nodig zou zijn. Recentelijk verscheen ook een studie van het afvalbeheer in Vlaanderen, gebaseerd op een systeemdynamisch model (Inghels en Dullaert, 2010). Gebruikmakend van historische gegevens voor de periode 1991-2006, literatuuronderzoek en wiskundige relaties werd een SDM ontwikkeld om het gedrag van huishoudens m.b.t. de inzameling, het hergebruik, de recycling en het wegwerpen van afval te beschrijven voor een periode van 25 jaar met 2016 als tijdshorizon en een tijdstap van 1 jaar. Dit model werd bij nader inzien te gedetailleerd bevonden voor direct toepassing van de relaties in dit systeemmodel. De vier toestandsvariabelen (productie afval, verwerking afval, materiaalvraag en materiaalgebruik) worden in miljard ton per jaar uitgedrukt. De aansturing van het deelmodel gebeurt vanuit de demografie en economie, waarbij de exogene variabelen Technologie en Duurzaam Gedrag en Beleid ook van invloed zijn (Figuur 5-27). Technologie en innovatie leiden in het model tot een hogere efficiëntie in het materiaalgebruik en lagere productie van afvalstoffen per hoofd of Euro. De materiaalvraag en productie van zowel huishoudelijk als bedrijfsafval worden beïnvloed door de exogene variabele Duurzaam Gedrag en Beleid. Dit deelmodel is ook één van de onderdelen in het model waar sprake is van een tijdsvertraging of ‘time delay’. Dit soort ‘time delays’ zijn van belang

in systeemodynamische modellen, omdat daarmee bij een juist gebruik ongewenst (d.w.z. onrealistisch) oscillerend gedrag van het systeemmodel kan worden voorkomen (Sterman, 2000). Een hiervoor speciaal ontworpen modelbouwsteen is voor deze toepassing ingesteld op een tijdsvertraging van 1 jaar, waarbij de invoerwaarde van de vorige tijdstap telkens voor 50 % wordt meegewogen.

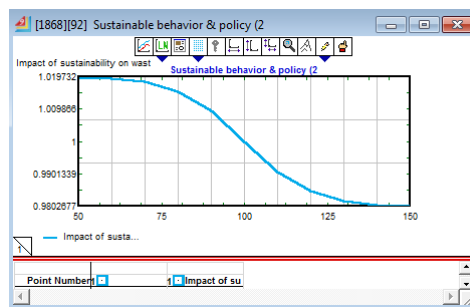


Figuur 5-27 Deelmodel Afval en Materialen.

De totale materiaalvraag van Vlaanderen, voornamelijk metalen, fossiele brandstoffen, mineralen en biomassa, wordt in het model gekoppeld aan de totale consumptie uit het economisch deelmodel. Dit betekent dat de materiaalvraag voor productie van export, die ruim de helft van de Direct Material Input (DMI) uitmaakt (MIRA, 2005), niet in rekening gebracht wordt. Het gebruik van materialen voor de export zou wenselijk zijn, maar de rol van export en interactie met het buitenland zou dan omwille van de consistentie moeten worden bekeken voor het totale systeemmodel (landbouw, mobiliteit ...). Dit was niet haalbaar in het kader van deze opdracht. Uitgaand van het grondstoffengebruik voor het jaar 2010 en de relatieve verandering van de totale consumptie ten opzichte van de vorige tijdstap wordt berekend hoe de vraag naar primaire en secundaire (gerecycleerde) materialen verandert. Deze materiaalvraag heeft betrekking op de finale vraag voor de consumptie in Vlaanderen, ofwel de Eigen Materiaal Consumptie (EMC). Voor het beginjaar wordt deze geschat op 100 miljoen ton per jaar, uitgaand van cijfers voor de periode 1995-2008 (Studiedienst, VMM-MIRA). Hiermee kan de verhouding tussen de materiaal vraag en totale consumptie voor het beginjaar worden geschat. Voor de volgende jaren wordt de trend voor de totale consumptie gebruikt om de verandering van de materiaalvraag te berekenen. Op deze vraag wordt nog een correctiefactor toegepast voor de exogene variabele Duurzaam Gedrag en Beleid, waarbij een tabelfunctie gebruikt wordt (Figuur 4-4). Het daadwerkelijk materiaalgebruik wordt berekend uit de materiaalvraag minus het aandeel recyclage, en gecorrigeerd voor de efficiëntie van het materiaalgebruik. Deze efficiëntie is een functie van de exogene variabele Technologie en het materiaalgebruik (met inachtneming van de eerder genoemde tijdsvertraging). Voor Vlaanderen en daarbuiten wordt dezelfde efficiëntie aangenomen. Het model houdt nog geen rekening met de invloed van de toenemende mondiale vraag naar materialen op de materiaalprijzen en het gebruik. Met materiaalverlies tijdens winning en productie wordt geen rekening gehouden. De terugkoppeling vanuit het deelmodel Landbouw & Voeding naar de

deelmodellen Afval & Materialen en Energie wordt nog niet in het model meegenomen. Dit komt onder meer doordat het deelmodel Landbouw & Voeding zich beperkt tot het consumptiepatroon, de watervraag en emissies. De rol van biomassa is wel al opgenomen in het deelmodel voor de Energie, via een prijsmechanisme (zie Sectie 5.5).

De productie en verwerking van afval in Vlaanderen wordt in twee stappen doorgerekend. In de eerste stap wordt de afvalproductie door huishoudens en het bedrijfsleven berekend. Voor het beginjaar 2010 is dit respectievelijk 525 kg per inwoner (De Groof en Princen, 2011) en 18.6 miljoen ton voor primair bedrijfsafval (Vervae et al., 2012). De afvalproductie voor de volgende jaren wordt berekend uit de verandering van de totale bevolkingsomvang (huishoudelijk afval) en het aandeel van de industrie aan het Bruto Regionaal Product (bedrijfsafval). Beide afvalstromen worden nog eens gecorrigeerd voor de invloed van Technologie (efficiëntie) en Duurzaam Gedrag en Beleid, waarvoor eveneens tabelfuncties gebruikt worden. Figuur 5-28 toont de tabelfunctie voor de invloed van Duurzaam Gedrag en Beleid op de productie afval.



Figuur 5-28 Tabelfunctie voor de invloed van de index voor 'Duurzaam Gedrag en Beleid' op de productie van huishoudelijk en bedrijfsafval.

Tenslotte wordt het aandeel gerecycleerd afval en de verbranding van restafval berekend. Het aandeel gerecycleerd afval kan als trend ingesteld worden, uitgaand van de percentages gerecycleerd huishoudelijk en bedrijfsafval voor het beginjaar, respectievelijk 71.4 % en 24.9 % (De Groof en Princen, 2011; Vervae et al., 2012). De percentages recyclage voor het beginjaar komt uit de afvalinventarisaties voor huishoudens (aandeel selectief) en bedrijven (recyclage en hergebruik). De waarde voor de volgende jaren wordt berekend uit een trend, die instelbaar is (toenemende recyclage). In een eventuele vervolgfase zou onderzocht moeten worden hoe kan worden omgegaan met secundaire en nieuwe grondstoffen.

5.12. KALIBRATIE EN GEVOELIGHEIDSANALYSES

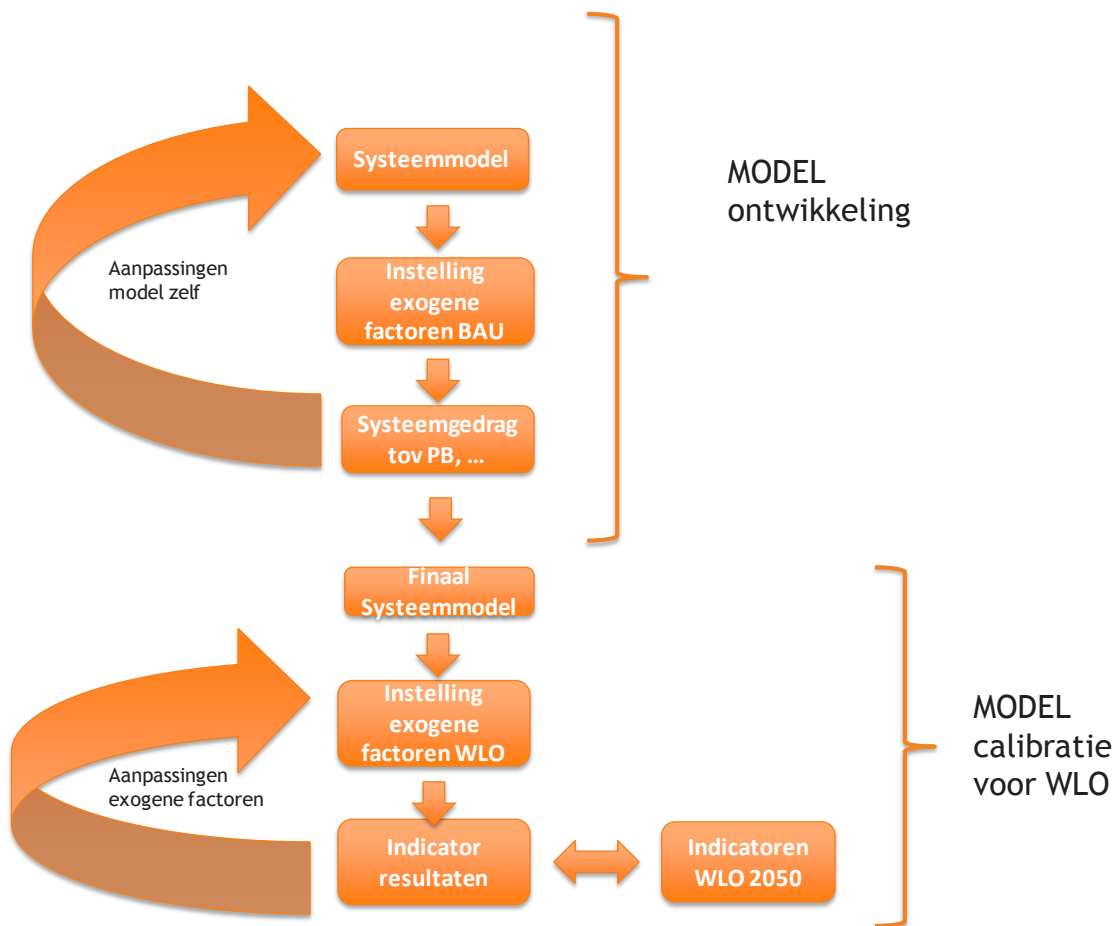
Voordat een systeemdynamisch model inzetbaar is voor beleidsverkenningen en andere toepassingen moet het worden gekalibreerd en gevalideerd. Dit is voor systeemdynamische modellen niet anders dan voor thematische rekenmodellen. De *kalibratie* houdt in dat de beginwaarden van variabelen, modelparameters en look-up tabelfuncties op de juiste manier worden ingesteld voor het referentie- of business-as-usual-scenario. Tijdens de ontwikkeling van de deelmodulen zijn op basis van literatuuronderzoek en analyse van beschikbare data de waarden en trends van variabelen en parameters ingesteld. In de meeste gevallen gebeurt dit op basis van data en coëfficiënten uit het (recente) verleden en beschikbare trends voor de nabije of verdere toekomst. De begintoestand van elk deelmodel sluit als gevolg hiervan zo nauw mogelijk aan bij de realiteit van vandaag. Het gedrag van elk deelmodel en de resultaten van de daarin gebruikte modelbouwstenen wordt verder uitgebreid getest en vergeleken met resultaten uit bestaande projecties en modelberekeningen. Nadat alle deelmodules zijn gekoppeld kan het gedrag van het totale systeem worden onderzocht. Dit is voor het eerst gebeurd in mei 2015. Voor de *validatie* van systeemdynamische modellen zijn een aantal tests beschikbaar (Forrester en Senge, 1980), waarbij onderscheid gemaakt kan worden tussen modelstructuur- en modelgedragstesten. In het eerste geval wordt onderzocht of de samenhang van het model, het detailniveau, de response op extreme condities of parameterwaarden worden vergeleken met waarnemingen en beschikbare gegevens. Ook worden de dimensies van berekeningen gecontroleerd. In het tweede geval wordt onder meer nagegaan wat de *gevoeligheid* van het modelgedrag is voor aanpassingen in de modelinvoer (bijvoorbeeld klimaatverandering of beleid gericht op duurzaamheid) of extreme modelinvoer. Het gedrag van het model is daarom niet enkel getoetst aan het business-as-usual scenario, maar ook aan de vier wereldbeelden van de Nederlandse WLO-toekomstverkenning (WLO) toegepast op Vlaanderen (Engelen et al., 2011a). Dit levert de zekerheid dat het model een plausibele uitkomst genereert in meer extreme condities. Het resulteert verder in het interval waarbinnen elke parameter en/of invloedsvariabele instelbaar is. Gevoeligheidsanalyses van dit type zijn niet alleen zeer nuttig voor de ondersteuning van de kalibratie, en validatie van het model (reageert het model zoals verwacht?) maar ook voor het opzetten van oefeningen met het systeemmodel. Deze kunnen zich zowel richten op de beleidskeuzes waarop het systeem wel reageert als de beleidskeuzes waarvoor dit niet het geval is.

Tabel 5-7 toont de gevoeligheid van een selectie van indicatoren voor de waarde van de exogene variabelen. Voor het bepalen van de gevoeligheid zijn een 10.000-tal simulaties uitgevoerd, waarna de genormaliseerde correlatiecoëfficiënt is bepaald van de invloedsvariabelen en indicatoren. De kleurcodes geven aan of het een positieve correlatie betreft (de indicator neemt toe of af in waarde als dat ook het geval is voor de invloedsvariabele) of een negatieve correlatie (verandering in tegengestelde richting) gaat. Sommige correlaties zijn een direct gevolg van relaties in het model. Zo mag verwacht worden dat een toename van de maximale transportcapaciteit van het wegennetwerk tot een afname van de congestie leidt. In andere gevallen is de correlatie een gevolg van indirecte relaties, die verlopen via tussenliggende variabelen en de complexiteit van het systeemmodel. De correlaties in de tabel bieden nuttige informatie, maar dienen niet verward te worden met causaliteit. Als een correlatie niet overeenstemt met de verwachting dient de oorzaak onderzocht te worden, omdat er sprake kan zijn van een verkeerde of onvolledige relatie in het model.

	BRP per capita	Arbeidsproductiviteit	Totale Bevolkingsomvang	Grijze Druk	Aantal Huishoudens	Gezondheids Index	Verliesjaren	Verliesuren Congestie	Totaal Energieverbruik	Volume personenverkeer	Landbouwareaal	Residentieel Ruimtegebruik	Versnippering Open Ruimte	Verstoeljing	Toegankelijkheid	Totale Afvalproductie	Totale Emissies Broeikasgassen	Volume vrachtverkeer	ISEW Lite Index	Aandeel Open Ruimte	Fijn Stof	Aandeel Hernieuwbare Energie	Aquatische Biodiversiteit
Technologie & Innovatie	0.89	0.89	0.01	-0.01	-0.01	-0.02	0.00	0.30	0.76	0.57	0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.09	0.33	0.86	0.79	0.05	0.22	-0.07	-0.07
Duurzaam Gedrag & Beleid	-0.01	-0.01	-0.01	0.01	0.01	0.01	-0.01	-0.52	-0.24	-0.01	-0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	-0.97	-0.83	-0.01	0.24	-0.01	-0.75	0.93	0.97
Onderwijs	0.06	-0.01	-0.15	0.28	-0.03	0.96	-0.01	-0.01	0.00	-0.05	0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.01	0.02	0.01	0.01	0.20	0.02	0.01	-0.01	-0.01
Wereld brandstofprijs	0.00	-0.01	0.02	-0.02	-0.01	0.00	0.01	-0.10	-0.08	-0.46	0.01	-0.01	0.00	-0.01	-0.01	0.00	-0.03	0.00	0.01	0.01	-0.02	0.10	0.00
Levensduur van kapitaal	0.41	0.41	0.00	0.00	0.01	-0.01	0.00	0.16	0.35	0.27	-0.09	0.09	0.08	0.09	0.07	0.14	0.15	0.40	0.38	-0.09	0.09	-0.05	-0.04
Max. capaciteit wegennet	-0.02	-0.02	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	-0.68	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Migratie beleid	-0.02	-0.11	0.96	-0.88	0.24	0.01	1.00	0.19	0.34	0.59	-0.27	0.27	0.22	0.27	0.20	0.10	0.15	0.27	-0.14	-0.27	0.17	-0.05	-0.07
Omvang huishoudens	0.01	0.01	0.00	0.00	-0.96	0.00	-0.01	0.01	-0.23	0.00	0.94	-0.94	-0.93	-0.94	-0.93	0.01	-0.04	0.01	0.06	0.94	-0.26	0.01	-0.02
Temperatuurstijging	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	-0.18	0.00	0.01	-0.06	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00	-0.01	-0.02

Tabel 5-7 Gevoeligheid op basis van genormaliseerde correlatie in het bereik [-1,+1] voor de exogene variabelen. De correlaties zijn bepaald uit 10.000 simulaties (zie Tabel 5-8 voor definities) voor een kleine selectie van alle mogelijke beleidsindicatoren.

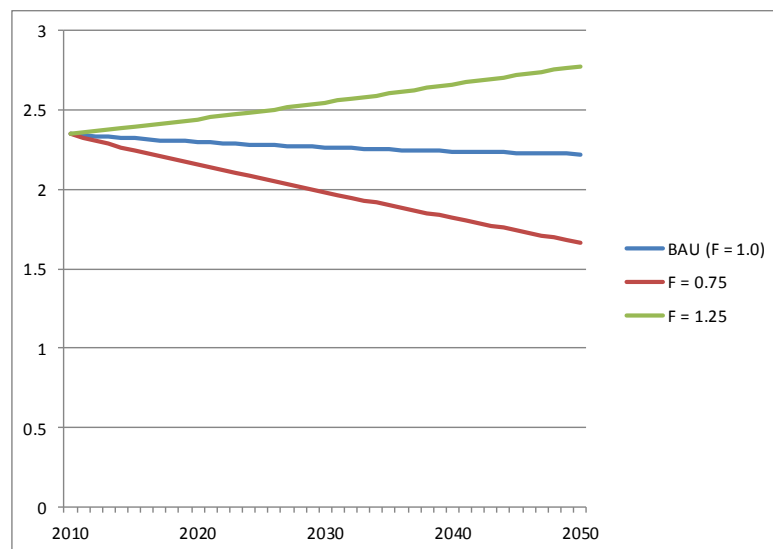
Handmatige kalibratie van individuele modelbouwstenen is alleen praktisch haalbaar als de rekentijd van het model en het aantal in te stellen modelparameters beperkt is. Voor het totale systeemmodel is een (semi)automatische kalibratie meer aangewezen (Figuur 5-29). Hiertoe werd een kalibratietool ingebouwd in het model.



Figuur 5-29 Semi-automatische kalibratie van de instelling voor de exogene variabelen en modelparameters in het systeemmodel.

Deze gebruikt de “Monte Carlo”-optie van ExtendSim om een groot aantal modelsimulaties (bijvoorbeeld 10.000) te draaien, waarbij voor een selectie van in te stellen modelparameters de waarden worden gevarieerd. De kalibratietool kan gebruikt worden voor het instellen en testen van specifieke modelparameters voor de deelmodellen, voor de gevoeligheidsanalyses, en voor het instellen van de exogene variabelen zodat de modelresultaten zo goed mogelijk aansluiten bij die voor toekomstverkenningen zoals die van de WLO-studie (Janssen et al., 2006). Hiervoor kunnen de resultaten voor indicatoren vergeleken worden met kwantitatieve doelwaarden voor het eindjaar 2050 en een gekozen tussenjaar, als deze bekend zijn. Als bijvoorbeeld bekend is hoe de bevolkingsomvang, het energiegebruik, emissies van broeikasgassen, afname van landbouwareaal e.d. veranderen voor de verschillende wereldbeelden. De combinatie van parameters waarvan het verschil met de doelwaarde voor het eindjaar het kleinst is kan dan als instelling voor dat wereldbeeld gezien worden.

De parameterwaarden van de deelmodellen voor het referentie- of business-as-usual-scenario voor de Vlaamse context zijn afzonderlijk ingesteld aan de hand van vergelijking met Vlaamse bronnen en modelstudies (Federaal Planbureau, Studiedienst, RuimteModel Vlaanderen, Landbouwrapport, OVAM ...). Voor de ontwikkeling van alle exogene variabelen worden de instelregelaars uit Figuur 4-6 vervolgens op een neutrale of standaard waarde ingesteld. Voor de exogene variabelen “Technologie”, “Duurzaam Gedrag en Beleid”, “Onderwijsniveau”, en “Brandstofprijs” is dit de waarde 100.0, voor de variabelen “Migratiebeleid”, “Maximale capaciteit van het wegennetwerk”, en “Omvang Huishouden” de waarde 1.0, voor de “Levensduur van kapitaal” de waarde 15 jaren, en voor de het “Klimaat” de waarde 1.0 (graden). Als de modelgebruiker voor deze instellingen kiest, veranderen de invloedsvariabelen niet van waarde tijdens de simulatie en zal het systeemmodel het BAU scenario volgen. Vervolgens is voor elke van de exogene variabelen een inschatting gemaakt van het bereik waarbinnen de variabelen kunnen variëren. Indien de gebruiker voor een andere waarde binnen dit toegestane bereik kiest zal de exogene variabele toe- of afnemen tot voor het eindjaar 2050 de gekozen waarde is bereikt. De modelgebruiker stelt dus een trend in. Er is één uitzondering: de exogene variabele “Levensduur van kapitaal” of “Capital Life Time”. In het geval van de demografische variabelen “Migratiebeleid” en “Omvang huishouden” is sprake van multiplicatoren. Dit betekent dat bestaande trends worden aangepast, op basis van de gekozen eindwaarde. Figuur 5-30 laat zien hoe dit werkt voor de ontwikkeling van de variabele “Omvang huishouden”.



Figuur 5-30 Voorbeeld trendaanpassing door instelling exogene variabele “Omvang huishouden” (zie ook Figuur 4-6).

Tabel 5-8 toont de doelwaarden voor de beleidsindicatoren waarop is gekalibreerd voor het BAU scenario en de vier andere wereldbeelden. De doelwaarden voor het BAU scenario zijn verkregen met de standaardinstellingen voor de exogene variabelen, en dienen slechts om de kalibratieprocedure te testen en te valideren. Om de flexibiliteit van het totale systeemmodel en de mate waarin extremen kunnen worden gemodelleerd (“de hoeken van de kamer”) te onderzoeken en demonstreren is het model vervolgens gekalibreerd voor de vier WLO-wereldbeelden. Maar dit betekent uitdrukkelijk niet dat de toepassing zich tot deze vier wereldbeelden beperkt. Het model is zo ontworpen dat gebruikers eenvoudig een eigen wereldbeeld kunnen instellen via het dashboard van Figuur 4-6. De doelwaarden voor de vier WLO-wereldbeelden zijn bepaald door de groeipercentages uit de WLO-toekomststudie toe te passen op de waarden voor Vlaanderen voor het beginjaar 2010.

Doelwaarde Indicator 2050	BAU	GE	SE	TA	RC
Totale bevolkingsoomvang (personen)	6970463	7502380	7252300	6752142	6251983
Vruchtbaarheid vrouwen 15-45 jaar	1.90	1.77	1.77	1.57	1.47
Aantal huishoudens	3136708	3963617	3354131	3313480	2703995
Levensverwachting mannen	86.00	84.48	84.48	82.86	81.24
Levensverwachting vrouwen	89.00	86.83	86.83	85.22	83.61
Cumulatieve immigratie 2010-2050	678113	817787	613340	327115	81779
Grijze fractie (65+ t.o.v. 15-64 jaar)	0.28	0.25	0.26	0.27	0.27
Omvang huishouden	2.22	1.89	2.16	2.04	2.31
Participatiegraad	0.70	0.71	0.66	0.69	0.65
BRP per capita (EUR)	48595	60700	48824	55421	42226
BRP Totaal (BEUR)	338.73	477.31	333.67	419.85	282.85
Totaal personen verkeer (miljard pkm)	107.54	113.68	105.26	96.84	84.21
Totaal vrachtverkeer (miljard tonkm)	73.71	111.19	69.82	82.75	46.54
Congestie uren verlies (miljoen uren)	10.65	9.38	5.40	4.83	1.42
Treingebruik	14.00	15.23	15.23	14.03	12.49
CO2 emissies (Megaton per jaar)	22.20	31.68	22.08	24.96	17.28
NOx emissies (kton per jaar)	30.01	39.19	17.81	28.50	14.25
Energiegebruik per jaar per hoofd (GJ per hoofd per jaar)	88.30	196.11	141.20	203.95	141.20
Landbouwareaal (ha)	598896	544073	525077	561061	574291
Arbeidsproductiviteit (EUR per uur)	83.51	91.37	79.45	87.40	73.49

Tabel 5-8 Doelwaarden van de beleidsindicatoren voor de kalibratie van het BAU scenario en de vier wereldbeelden.

Om de juiste instelling voor de ontwikkeling van de exogene variabelen voor de wereldbeelden te bepalen is een iteratieve procedure gevolgd, gebaseerd op een combinatie van automatische en handmatige kalibratie die het beste resultaat bleek te geven. Het gelijktijdig optimaliseren van meer dan twee exogene invloedsvariabelen bleek geen goed resultaat te geven, omdat het daarvoor benodigde aantal simulaties praktische onhaalbaar was. Daarom is een benadering gevolgd, waarbij telkens één van de variabelen werd gekalibreerd. De procedure omvat drie stappen:

Stap 1: Met behulp van de automatische kalibratietool worden een 10.000-tal simulaties uitgevoerd, waarbij voor elke simulatie een andere, willekeurige waarde voor de instelling van de exogene variabele “Technologie” binnen het toegestane bereik wordt gekozen. Alle andere exogene variabelen zijn neutraal ingesteld. Het resultaat is een eerste orde benadering voor de optimale instelling van de exogene variabele “Technologie” voor elk van de vier wereldbeelden.

Stap 2: Voor elk wereldbeeld afzonderlijk wordt de eerste stap herhaald, waarbij nu de tweede exogene variabele (“Duurzaam Gedrag en Beleid”) wordt gevarieerd. De variabele “Technologie” blijft ingesteld op de optimale waarde die in Stap 1 is gevonden voor elk wereldbeeld. De overige variabelen blijven ingesteld op de neutrale waarde. Nadat de optimale instelling voor de tweede variabele zo is bepaald, wordt deze (eveneens per wereldbeeld) vastgezet op de gevonden optimale waarde. De berekening wordt herhaald totdat zo alle exogene variabelen per wereldbeeld zijn ingesteld op een eerste orde benadering.

Stap 3: De eerste stap wordt opnieuw herhaald voor ieder wereldbeeld afzonderlijk, waarbij alleen de eerste exogene variabele wordt gevarieerd. De overige variabelen worden vastgezet op de waarden gevonden in Stap 2. De berekening wordt herhaald totdat alle variabelen opnieuw zijn ingesteld. Tenslotte wordt de berekening nog één keer herhaald voor de eerste variabele (“Technologie”), om na te gaan of deze nog veranderde. Tabel 5-9 toont de instelling van de parameters voor de exogene variabelen voor het BAU scenario, en de vier wereldbeelden na kalibratie volgens bovenstaande procedure. Hoewel de deelmodellen voor de thema’s Economie, Mobiliteit en Energie gevoelig zijn voor de ontwikkeling van de Levensduur van kapitaal (zie Tabel 5-7) is besloten deze exogene variabele niet aan te passen aan de vier wereldbeelden.

Exogene variabele	BAU	GE	SE	TA	RC
Technologie & Innovatie	100	147	90	110	50
Duurzaam gedrag en beleid	100	98	106	100	130
Onderwijs	100	109	109	101	110
Wereldbrandstofprijs	100	74	142	144	150
Levensduur kapitaal	15	15	15	15	15
Capaciteit wegennetwerk	1.00	1.47	1.37	1.49	1.50
Migratiebeleid	1.00	1.63	0.82	0.50	0.50
Omvang huishoudens	1.00	0.81	0.88	0.88	1.04

Tabel 5-9 Optimale instelling exogene variabelen voor de vier WLO-wereldbeelden, verkregen na iteratie op basis van 2.500 simulaties.

Uiteraard zijn kwantitatieve cijfers niet altijd beschikbaar. In dat geval kunnen de invloedsvariabelen per toekomstbeeld ingesteld worden op basis van expertmeningen, waarbij gekozen kan worden uit een beperkt aantal waarden (bijvoorbeeld [50, 75, ..., 150] voor “Duurzaam gedrag en Beleid”).

Een aantal generieke tabellen zijn van belang voor de ondersteuning van de kalibratie en gevoeligheidsanalyses, een overzicht is te vinden in Bijlage 4.

HOOFDSTUK 6. TOEPASSING OP HET MILIEUBELEID

6.1. INLEIDING

Toekomstverkenningen doen een uitspraak over de toekomst van complexe dynamische systemen op basis van een wetenschappelijk onderbouwde analyse (De Smedt, 2005). Veranderingen op de middellange en lange termijn worden geschetst aan de hand van mogelijke toekomstbeelden (of wereldbeelden) en -paden. De analyses vertrekken maximaal vanuit beschikbare cijfergegevens over de toestand nu en in het verleden om op basis van simulatiemodellen en wiskundige vergelijkingen een beschrijving van de toestand op verschillende momenten in de toekomst te genereren. De analyse richt zich echter vaak op systemen en ontwikkelingen waarvoor tijdreeksen ontbreken of onvolledig zijn. Om met onzekerheid om te gaan gebruiken toekomstverkenningen een multi-perspectief benadering waarin op basis van scenario's een invulling wordt gegeven van onzekerheden betreffende belangrijke sociale, economische en politieke ontwikkelingen. Toekomstverkenningen zijn daarmee bij uitstek geschikt om het aspect onzekerheid in het beleid op een meer gestructureerde wijze aan bod te laten komen en een langetermijnbeleid uit te stippelen dat anticipatief omgaat met de onzekerheden van de complexe realiteit waarmee het geconfronteerd wordt. Zulk langetermijnbeleid is een noodzaak om voor de kortere termijn beleidsinstrumenten en maatregelenpakketten uit te vaardigen die op een consistente en continue wijze bijdragen tot de realisatie van de doelstellingen op de langere termijn. De participatieve methoden die algemeen deel uitmaken van verkenningen zijn ook een middel om te streven naar consensus bij betrokkenen om maatschappelijke problemen aan te pakken met een langere tijdshorizon voor ogen en om los te komen van ad-hoc beleid (Engelen et al., 2011a).

Systeemdynamische modellen zijn bijzonder nuttig voor de kwantitatieve ondersteuning van toekomstverkenningen, vanwege de nadruk op hoofdlijnen, het langetermijnperspectief, de mogelijkheid met terugkoppelingen tussen deelsystemen rekening te houden, het bewaren van de consistentie tussen thema's, en de inzetbaarheid voor interactieve toepassingen als gevolg van de hoge rekensnelheid. Het eerder genoemde 4-stappenplan (Op 't Eyndt, 2012) is er op gericht toekomstverkenningen ter ondersteuning van het Vlaams milieubeleid te begeleiden door een benadering gebaseerd op vier geïntegreerde stappen:

1. Een kwalitatieve systeemanalyse om de relevante thema's, problemen en oorzaken, actoren e.d. in kaart te brengen en op hoofdlijnen met elkaar in verband te brengen, alsmede verhaallijnen voor verschillende wereldbeelden op te stellen.
2. **Een kwantitatieve, systeemdynamische modellering waarmee de verhaallijnen op hoofdlijnen kunnen worden doorgerekend.**
3. Thematische verdieping door modellering van de belangrijkste componenten van het systeemdynamische model uit Stap 2.
4. Toetsing van bestaande en geplande beleidsmaatregelen aan de beleidsdoelstellingen aan de hand van de modellen uit Stappen 2 en 3.

Het Megatrends project (VMM, 2014a) past binnen de MIRA Milieu- en Natuurverkenning (Van Steertegem et al., 2009; Dumortier et al., 2009), en richt zich op de langdurige sociaaleconomische, technologische, politiek en fysische veranderingen binnen en buiten Vlaanderen. Deze zijn deels al waarneembaar en kunnen ingrijpende gevolgen hebben op de (middel)lange termijn (2020, 2050). Het doel is de impacts van deze veranderingen in kaart te brengen, en de consequenties daarvan voor het Vlaams milieubeleid te bepalen. Er worden zes megatrends onderscheiden (VMM, 2014a):

- verandering in demografisch evenwicht (bevolkingsgroei, immigratie, vergrijzing, verdunning van huishoudens ...);
- versnelde technologische ontwikkeling (ICT, nano-technologie, productietechnieken, landbouwtechnieken, auto-industrie ...);
- groeiend tekort aan grondstoffen en hulpbronnen (energie, water, voedsel, open ruimte, arbeidskrachten ...);
- groeiende multi-polariteit (individualisering, multi-culturele samenleving, globalisering ...);
- klimaatverandering (temperatuurstijging, droogte, neerslagextremen, zeespiegelstijging ...);
- toenemende kwetsbaarheid van de sociale, economische, financiële, politieke en ecologische systemen ...

De beïnvloeding van het milieu in Vlaanderen wordt belicht aan de hand van vier socio-technische deelsystemen (VMM, 2014a):

- i. Ruimtelijke Ordening
- ii. Mobiliteits Systeem
- iii. Energie Systeem
- iv. Productie- en Consumptie Systeem

Elk van de megatrends heeft een directe of indirecte impact op vrijwel alle onderdelen van het voorliggende systeemmodel, maar de 10 thema's die in de blauwdruk zijn opgenomen kunnen wel gekoppeld worden aan de socio-technische systemen: Ruimtelijke Ordening (demografie, economie, ruimtegebruik en natuur, lucht en water), Mobiliteit (demografie, economie, mobiliteit en energie), Energiesysteem (demografie, economie, mobiliteit, energie, lucht) en Productie- en Consumptie (bevolking en economie, landbouw, materialen en afval).

Het nu beschikbare systeemmodel beschrijft in combinatie met de exogene aansturing (zie Sectie 3.2) een groot aantal van de variabelen die noodzakelijk zijn om de processen die aan de megatrends ten grondslag liggen te kwantificeren (Megatrends Factsheets): vergrijzing, gezinsverdunning, immigratie, volksgezondheid, transport en milieubewustzijn, energieverbruik en energiemix, verstedelijking, verlies open ruimte, versnippering natuur, grondstofgebruik, afval, waterkwaliteit, luchtkwaliteit, broeikasgassen, biodiversiteit ... Bovendien stemmen de in het model beschikbare exogene omgevings- en beleidsvariabelen in redelijke mate overeen met een aantal belangrijke ontwikkelingen die in de Megatrends (VMM, 2014a) gehanteerd worden. De beschreven grootschalige evoluties kunnen dus als verhaallijnen gebruikt worden om het model aan te sturen. Hierbij moet wel een vertaalslag gemaakt worden tussen de beschreven trends en de dwarsverbanden met andere trends om tot één coherent toekomstbeeld te komen als startinstelling voor simulaties aan de hand van het model. Met coherentie wordt hier bedoeld: de aan de verhaallijn ontleende ontwikkelingen voor de verschillende thema's zijn samenhangend. Anderzijds zijn een aantal aspecten niet 'as-such' onderdeel van de huidige blauwdruk, bijvoorbeeld de toenemende multi-polariteit in de samenleving en kwetsbaarheid van systemen zijn niet zonder een diepgaande analyse te beschrijven en vertalen in kwantitatieve indicatoren die toepassing binnen het systeemmodel mogelijk maken. Wel is het Megatrends rapport als inspiratie en context gebruikt voor de ontwikkeling van de blauwdruk.

We onderzoeken in dit Hoofdstuk de toepasbaarheid van het systeemmodel voor de inzetbaarheid binnen Stap 2 - de systeemdynamische modellering om verhaallijnen op hoofdlijnen te kunnen doorrekenen – aan de hand van indicatoren voor de WLO-wereldbeelden die voor Vlaanderen zijn vertaald. De kwantificering van de vier wereldbeelden (Global Economy, Strong Europe, Transatlantic Markets, en Regional Communities) in termen van kwantitatieve indicatorwaarden voor 2040 (Janssen, 2006) en eerdere toepassing op het RuimteModel Vlaanderen (Engelen et al., 2011a) maken de kalibratie van het systeemmodel volgens de in Sectie 5.12 beschreven procedure eenvoudiger.

6.2. WLO-WERELDBEELDEN VOOR VLAANDEREN

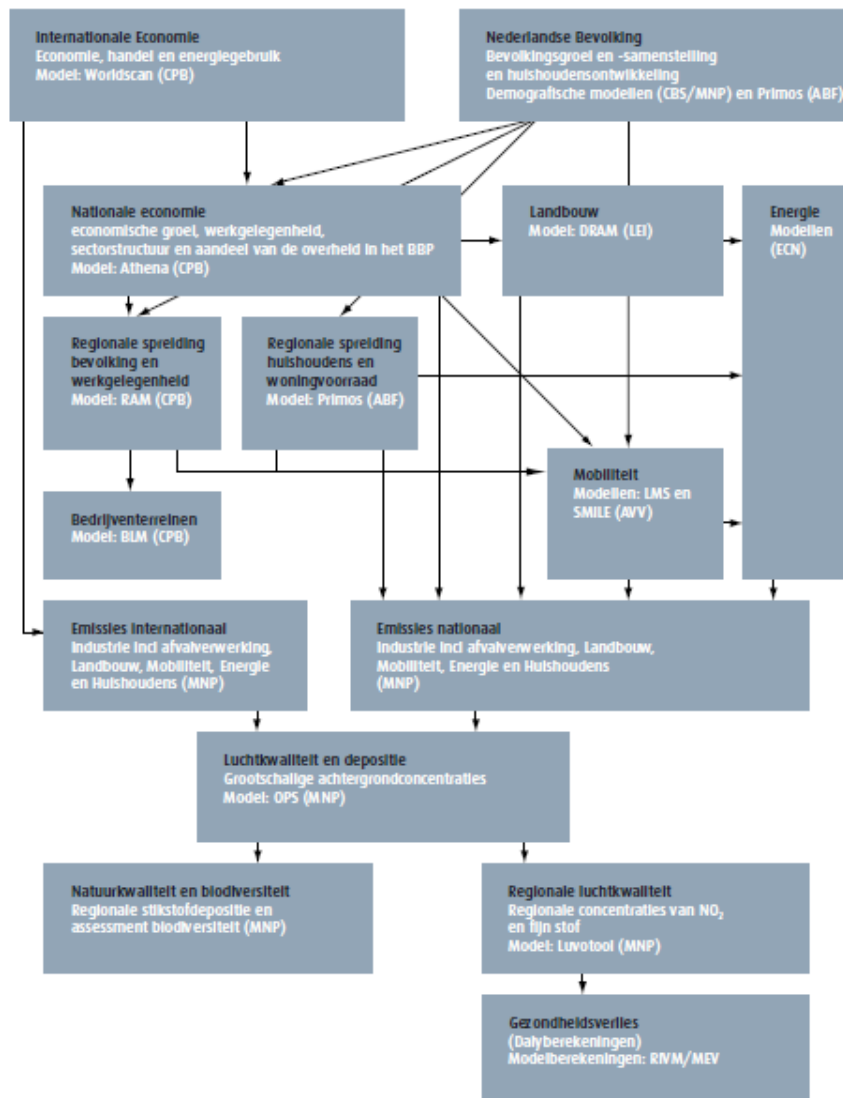
In de WLO-toekomststudie (www.welvaartenleefomgeving.nl) bundelden het Centraal Planbureau (CPB), het Milieu en Natuur Planbureau (MNP) en het Ruimtelijk Planbureau (RPB) de krachten om aan de hand van scenario's een beeld te schetsen van de fysieke omgeving in Nederland in 2040 en om inzichten te verwerven in de belangrijkste factoren die de ontwikkelingen zullen beïnvloeden (Janssen et al., 2006). De WLO-studie analyseert ontwikkelingen rond een zevental thema's: wonen, werken, mobiliteit, landbouw, energie, milieu, natuur en water. Doel is bij uitstek om de sectoroverschrijdende ontwikkelingen in beeld te brengen en adviezen te formuleren m.b.t. tot het te voeren beleid. De studie beoogt ontwikkelingen op het niveau van Nederland, maar kijkt ook naar de toekomst en het ruimtebeslag van de grote steden en het platteland. De onzekerheden met betrekking tot de ontwikkelingen in Nederland worden in beeld gebracht aan de hand van 4 scenario's die verder bouwen op de studie 'Four futures of Europe' van het Centraal Planbureau in Nederland (Lejour, 2003). Hetzelfde assenstelsel werd daarbij gekozen (Figuur 6-1).



Figuur 6-1 Het assenstelsel van de WLO-studie en de 4 resulterende wereldbeelden (www.welvaartenleefomgeving.nl).

De sleutelonzekerheden zijn dus enerzijds (1) de mate waarin landen bereid zijn om internationaal samen te werken (as nationaal – internationaal), en (2) de verdeling tussen publieke en private verantwoordelijkheden (as publiek – privaat). Ook de benamingen van de scenario's blijven dezelfde: Global Economy, Strong Europe, Transatlantic Markets en Regional Communities. De scenario's uit de WLO-studie hebben betrekking op acht thema's met elk een eigen model-instrumentarium (Janssen et al., 2006): wonen, werken, mobiliteit, landbouw, energie, milieu, natuur en water. De WLO-scenario's zijn niet het directe resultaat van een dynamisch systeemmodel; het betreft projecties naar 2020 en vervolgens 2040. Wel is het in principe mogelijk uit de scenario's een onderliggend systeemmodel af te leiden, dat de samenhang tussen demografische, politieke, economische en andere factoren weergeeft (Figuur 6-2). Integratie tussen de acht thema's was noodzakelijk om de samenhang van de scenario's te kunnen behouden.

Dit gebeurde door de thematische rekenmodellen te koppelen en de consistentie van de parameters te controleren (Janssen et al., 2006). De economische en demografische ontwikkelingen functioneerden daarbij als drivers van het "Systeem Nederland". Hierbij zijn geen terugkoppelingen meegenomen zoals de invloed van congestie op de economie of het effect van een afname van groene ruimte op de vraag naar woningen.



Figuur 6-2 Samenhang voor de thematische integratie in de WLO-studie (Janssen et al., 2006).

Bijzondere kenmerken van de WLO-studie:

- narratieve scenario's gekwantificeerd
- hoog abstractieniveau
- geen terugkoppelingen
- thematische inschatting parameters per scenario
- sommige specifiek Nederlandse modelthema's (woningmarkt, overstromingsrisico ...)
- geen expliciet ruimtelijke dimensie

Tabel 6-1 vat de verschillen tussen de vier wereldbeelden in termen van de geo-politieke, demografische, sociaal-economische, fysische en ruimtelijke ontwikkelingen samen.

<p>Strong Europe In Strong Europe is er veel aandacht voor internationale samenwerking. De Europese instituties worden succesvol hervormd en landen geven een deel van hun soevereiniteit op. Daarmee wordt Europa een invloedrijke speler op het economische en politieke wereldtoneel, en internationale milieuvraagstukken kunnen gecoördineerd aangepakt worden. Europa doet enige concessies aan de Verenigde Staten, die daarna het Kyotoverdrag ratificeren. Turkije treedt toe tot de Europese Unie. Het sociaal-economisch beleid is net als in het scenario Regional Communities gericht op solidariteit en op een gelijkmatige inkomensverdeling, al vinden er wel enige hervormingen plaats. Door deze hervormingen, door hogere investeringen in onderwijs en onderzoek, en door de grotere markt groeit de arbeidsproductiviteit meer dan in Regional Communities. Ook de economische groei en de bevolkingsgroei, vooral door immigratie, zijn in dit scenario hoger.</p>	<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Internationala</p>	<p>Global Economy In Global Economy breidt de EU zich nog verder naar het oosten uit. Naast Turkije worden ook landen als Oekraïne lid. De WTO-onderhandelingen zijn succesvol, en daar vaart de internationale handel wel bij. De deelnemende landen integreren echter niet in politiek opzicht. Internationale samenwerking op andere gebieden dan handelsvraagstukken mislukt. Net als in Transatlantic Market benadrukt de overheid in dit scenario de eigen verantwoordelijkheid van burgers. Vergeleken met Transatlantic Market groeit de arbeidsproductiviteit in dit scenario nog extra door de sterke wereldwijde economische integratie. De groei van zowel de materiële welvaart als van de bevolking (vooral door immigratie) is in dit scenario dan ook het hoogst. Net als in Transatlantic Market komt er geen overeenkomst op grensoverschrijdende milieuvraagstukken aan te pakken. Dit en de wereldwijde hoge economische groei leiden tot forse milieuvervuiling. Wel leidt de hoge groei tot lokale milieu-initiatieven.</p>
<p style="text-align: center;">Publiek</p> <p>Regional Communities In Regional Communities hechten landen sterk aan hun eigen soevereiniteit. Daardoor slaagt de Europese Unie er niet in om institutionele hervormingen door te voeren. Ook mondiale handelsliberalisatie komt niet van de grond, waardoor de wereld uiteenvalt in een aantal handelsblokken. Internationale milieuvraagstukken worden niet aangepakt. Toch is de milieudruk relatief laag, omdat de bevolkingsgroei en de economische groei bescheiden zijn. De collectieve sector wordt in dit scenario nauwelijks hervormd. Collectieve regelingen blijven in stand, waarbij de nadruk erop ligt de inkomens gelijkmatig te verdelen en solidair te zijn. Door geringere prikkels in de sociale zekerheid en de hoge belasting- en premietarieven is de arbeidsparticipatie relatief laag en de werkloosheid hoog. Minder concurrentie remt de noodzaak voor bedrijven om te innoveren. De verbrokkelde markten belemmeren dat kennis zich snel verspreidt, en door de kleine inkomensverschillen is de stimulans om te investeren in onderwijs beperkt. De arbeidsproductiviteit stijgt jaarlijks maar weinig en de economische groei is gering.</p>	<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Nationaal</p>	<p style="text-align: right;">Privaat</p> <p>Transatlantic market In Transatlantic Market wordt de uitbreiding van de Europese Unie geen politiek succes. Daarvoor hechten landen te veel aan hun soevereiniteit: ze lossen problemen liever op nationaal niveau op. Wel wordt de handel tussen de Verenigde Staten en Europa vérgaand geliberaliseerd, waardoor op termijn een nieuwe interne markt ontstaat. Dit scenario kenmerkt zich door een overheid die de eigen verantwoordelijkheid van burgers benadrukt. De verzorgingsstaat wordt ingeperkt en publieke voorzieningen worden versoberd. Hierdoor neemt de inkomensongelijkheid toe. Doordat de macht van vakbonden afneemt, wordt de arbeidsmarkt flexibeler. Door de versobering van de sociale zekerheid groeit de arbeidsparticipatie, de internationale concurrentie verhoogt de prikkel om te innoveren, en de grotere inkomensverschillen maken studeren aantrekkelijk. De groei van de arbeidsproductiviteit en de economische groei zijn hoger dan in het scenario Strong Europe, terwijl de bevolking slechts matig toeneemt. Grensoverschrijdende milieuvraagstukken worden in dit scenario niet opgepakt. Lokale milieu-initiatieven gericht op bijvoorbeeld geluid- en stankoverlast kunnen zich wel voordoen.</p>

Tabel 6-1 De vier scenario's van de WLO studie (www.welvaartenleefomgeving.nl).

Recentelijk zijn de vier WLO-wereldbeelden vertaald naar de Vlaamse context (Kuhk et al., 2011; Engelen et al., 2011a). Samenvattend zijn de vier wereldbeelden **voor Vlaanderen** als volgt te definiëren:

Strong Europe

Strong Europe is een wereldbeeld waarin de Europese eenmaking lukt. Europa breidt verder uit naar het oosten. Maar, Europa wordt meer competitief: het sociale vangnet en ook subsidie-regelingen zijn niet langer houdbaar. De EU en andere overheden treden sterk regulerend op. Dat is zeker zo in beleidsdomeinen als landbouw, milieu, natuur, energie, transport en ook ruimtelijke ordening. De bevolking groeit sterk onder meer als gevolg van economische immigratie vooral door gezinshereniging. Het betreft vaak immigranten zonder specifieke opleiding uit ontwikkelingslanden. De immigranten komen Vlaanderen binnen via de grotere steden en vanuit Brussel. Ze worden opgevangen in het economische systeem dat lijdt onder de veroudering van de Vlaamse bevolking. De steden verdichten en nieuwe woonwijken groeien aan de randen van de grotere en de regionale steden. Een potentieel gebrek aan voldoende woningen doet zich voor. Extra inspanningen zijn noodzakelijk. De economische activiteiten groeien, vooral in de dienstensector en handel. Ze concentreren zich in de randen van steden en de economische poorten en assen.

Industriële activiteit evolueert naar meer hoogtechnologische activiteiten, maar de tewerkstelling in de sector en ook het areaal gaat achteruit. Landbouw boet aan belang in en evolueert naar meer tuinbouw en glastuinbouw. Ook de havenactiviteiten lopen terug. Er komt ruimte vrij in de grote havengebieden voor andere activiteiten, zoals de industriële, niet-landgebonden landbouw. Sociale bescherming van de bevolking blijft belangrijk. Milieumaatregelen worden strikt opgelegd: Vlaanderen heeft een voortdurende inhaalbeweging te maken om alsmaar strengere normen te halen zoals ze uitgeschreven staan in een groeiend aantal EU-kaderrichtlijnen, strategische plannen en doelstellingen. In Vlaanderen groeit de natuur als gevolg van het overheidsbeleid dat inzet op biodiversiteitsnatuur, onder meer aangestuurd door EU-normen. Milieunormen en duurdere energie, die in toenemende mate bestaat uit hernieuwbare energie, zijn onder meer aanleiding tot het verdichten van het wonen en ook het werken in de stedelijke gebieden. Telewerken wordt gemeengoed. Het mobiliteitsprobleem wordt aangepakt door een performant systeem van openbaar vervoer. Nieuwe lightrail en sneltramverbindingen worden aangelegd en verbinden de steden van Vlaanderen. Ze worden gefinancierd door de overheid.

Global Economy

In Global Economy prevaleert de individuele vrijheid en het private initiatief. Dit ontplooit zich in een sterk geglobaliseerde wereld. De rol van de overheid wordt fel ingeperkt en teruggedrongen tot traditionele taken zoals onder meer ordehandhaving en veiligheid. Europa verwordt opnieuw tot een economische unie. Private bedrijven en systemen nemen overheidstaken, zoals ziekenzorg, natuurbehoud, en publiek transport over. Dit is het wereldbeeld met de sterkste bevolkingsgroei en de jongste bevolking in Vlaanderen. In belangrijke mate is dit te wijten aan immigratie. Zowel hoog- als laaggeschoolden worden aangetrokken en in de economische bedrijvigheden betrokken. Opnieuw gebeurt de inwijking vooral via de grotere steden. Sociale ongelijkheid typeert dit wereldbeeld. Zij die het zich kunnen veroorloven leven in het buitengebied of de geherwaardeerde stadskernen. De verlinting en urban sprawl in het buitengebied worden de regel. De armere bevolkingsgroepen belanden in stadswijken met hoge bevolkingsdensiteit die aan verpaupering onderhevig zijn. Global Economy wordt gekenmerkt door de hoogste economische groei. Het zet sterk in op technologische ontwikkeling en vernieuwing. De ruimte voor bedrijvigheid neemt toe en manifesteert zich in de vorm van grotere ruimtelijke entiteiten in de stedelijke randen en langsheen de verkeersassen. De waterwegen en spoorwegen worden geherwaardeerd om congestie op de weg te vermijden. Rekeningrijden is algemeen ingevoerd. Er is weinig aandacht voor de klimaatproblematiek en milieukwaliteit. Het natuurareaal groeit omdat er land beschikbaar komt uit de landbouw die overschakelt op hoog productieve agro-industrie en aan schaalvergroting onderhevig is om concurrentieel te kunnen blijven op de wereldmarkt. Maar, de natuurgebieden komen in handen van private partijen die ze commercieel uitbaten. De biodiversiteitsnatuur komt onder druk omwille van het dure onderhoud. Global Economy is het meest energie consumptieve scenario. Aan de energiebehoeften wordt voldaan op basis van vooral fossiele brandstoffen en kernenergie. Zodra nieuwe technologieën voor hernieuwbare energie concurrentieel worden, worden ze versneld ingevoerd.

Regional Communities

Regional Communities is het wereldbeeld dat diametraal staat ten opzichte van Global Economy. Het wordt gekenmerkt door een verlies aan materiële welvaart. De immateriële levenskwaliteit wordt hoog gewaardeerd. Solidariteit en sociale gelijkheid zijn belangrijke waarden. Er is een sterke focus op de regionale identiteit. Het bestuurlijke apparaat is hierop ingericht met sterke lokale overheden die lokale initiatieven stimuleren en ondersteunen met de beperkte overheidsmiddelen die beschikbaar zijn. De economische groei is traag. De activiteit is kleinschalig en voor een belangrijk deel gericht op regionale autonomie en zelfvoorziening. De productie-consumptieketens worden kort gehouden. Er is veel aandacht voor biotechnologieën en groene productiemethoden. Door gebrek aan economische groei is de aantrekkingskracht van Vlaanderen voor immigranten laag. De bevolking neemt af door veroudering en uitwijking. De steden verliezen bevolking. Kleine kernen in het buitengebied groeien uit tot nuclei met een hoge mate van autonomie en zelfvoorziening waarin gewoond, gewerkt en aan voedselproductie wordt gedaan. Het telen van eigen voedsel ontlast het familiebudget. De energiebehoeften en milieubelasting van deze maatschappij zijn het laagst. Er wordt vooral ingezet op hernieuwbare energiebronnen, waaronder biobrandstoffen die reststromen verwerken uit landbouw en bio-industrie. Het milieubewustzijn is hoog. Natuur neemt toe maar krijgt weinig specifieke aandacht omdat men natuur ervaart in zijn groene woonomgeving met relatieve lage dichtheden. Er is ook weinig budget om te besteden aan het onderhoud van de biodiversiteitsnatuur. Op basis van vrijwilligerswerk wordt dit deels opgevangen. Mobiliteit is minder problematisch in dit wereldbeeld. Woon-werkverplaatsingen lopen sterk terug. Thuiswerken is alom ingevoerd. Transport over water en ontwikkeling van multimodaal ontsloten 'water-hubs' vormen kernen van meer geconcentreerde bedrijvigheid. Ook de kernen van de grotere steden vervullen opnieuw een belangrijke functie in de voorziening van bovenregionale diensten en commerciële activiteiten. Uitbreiding van het openbare vervoer is niet aan de orde: de bestaande vervoerswijzen voldoen aan de behoeften. De havenactiviteiten lopen sterk terug. Haventerreinen komen beschikbaar voor andere activiteit.

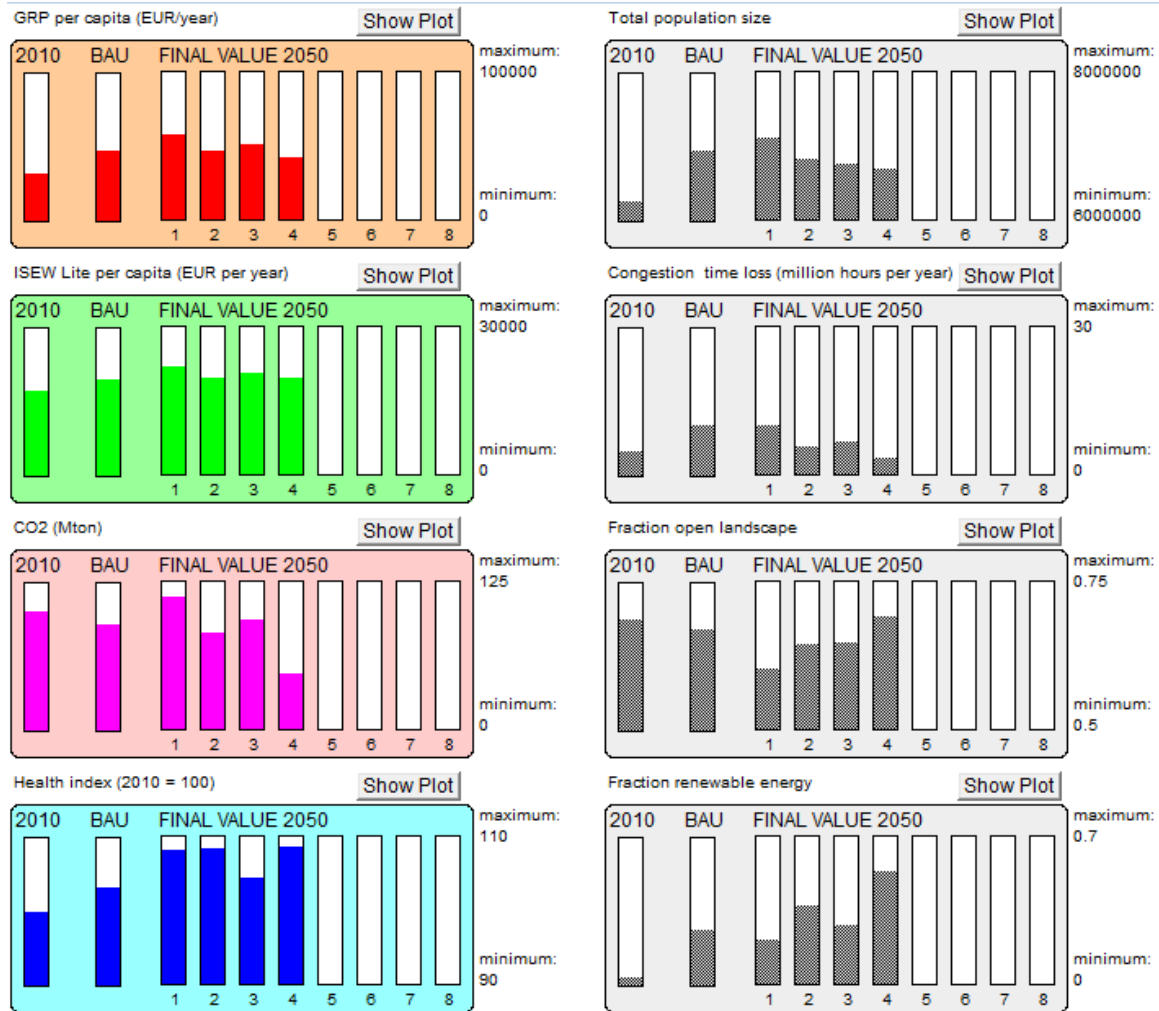
Transatlantic Markets

Transatlantic Markets is het wereldbeeld waarin, net als in de Global Economy, het private initiatief en de individuele vrijheid sterk bepalend zijn voor de economische ontwikkeling. Alleen is de schaal waarop dit gebeurt nu niet globaal, maar regionaal. Dit is te verstaan in de zin van een redelijk protectionistische economische activiteit. Coalities worden opgezet voor internationale of intercontinentale uitwisselingen en samenwerking. Dit is dus een Global Economy met één voet op het gaspedaal en de andere op de rem. De economische groei is daardoor beperkter. De mogelijkheden voor technologische innovatie zijn minder en de innovatie verloopt trager. Er wordt minder welvaart gegenereerd. De aantrekkingskracht op immigranten is minder. Immigratie wordt beperkt tot zij die een directe behoefte in de economie invullen. Dit zijn geschoolde werkkrachten. In eerste instantie is er een bevolkingstoename, maar die buigt om totdat er ongeveer een gelijk aantal inwoners is in 2050 als in 2010 in Vlaanderen. Er ontstaat een hoge mate van sociale ongelijkheid. Vooral de stadscentra worden plekken waarin minder gegoede bevolkingsgroepen geconcentreerd voorkomen. De rijkere groepen leven in de stedelijke rand of in het buitengebied in lage dichtheid. De overheden treden terug. Ze nemen traditionele taken voor hun rekening. Private partners nemen overheidstaken over, maar krijgen minder mogelijkheden en armslag dan in de Global Economy. Bepaalde overheidstaken blijven daardoor oningevuld. Zorg voor openbaar vervoer is daarvan een voorbeeld. Vervoer verloopt vooral over de weg en in bepaalde mate via het water. Congestie op het wegennet blijft problematisch. Openbaar vervoer focust op de verbindingen tussen de grote steden. Aan de energiebehoeften wordt voldaan op basis van fossiele brandstoffen en kernenergie. Er is weinig stimulans voor het ontwikkelen van hernieuwbare energie.

De aandacht voor milieu is erg beperkt: de milieukwaliteit gaat achteruit. Ook in dit wereldbeeld is er meer areaal natuur omwille van vrijgekomen landbouwland. Landbouw focust op tuinbouw, glastuinbouw en agro-industrie. Voor natuurbehoud is er weinig animo omwille van de kostprijs. Biodiversiteitsnatuur gaat achteruit en natuurgebieden bestaan vooral uit bossen die voor opbrengsten uit hout zorgen.

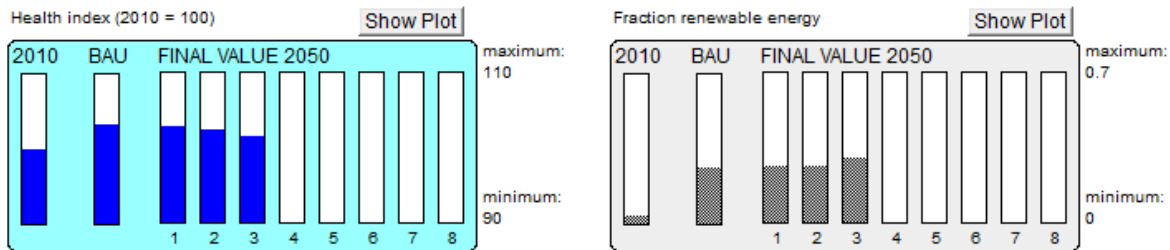
6.3. TOEPASSING SYSTEEMMODEL OP DE WERELDBEELDEN

We gebruiken nu het systeemmodel om de verschillen tussen de vier vervlaamste WLO-wereldbeelden te onderzoeken. Figuur 6-3 toont de verschillen tussen de waarde voor het eindjaar 2050 voor de vier wereldbeelden (Global Economy (1), Strong Europe (2), Transatlantic Markets (3) en Regional Communities (4)) en het BAU scenario, en de waarde voor het beginjaar. Binnen een fractie van seconden kunnen de verschillende wereldbeelden tegelijkertijd worden doorgerekend, nadat de exogene variabelen zijn ingesteld. Een groot aantal andere indicatoren wordt hier niet getoond maar is wel beschikbaar in de vorm van tabellen binnen de deelmodellen. De demografische en economische beleidsindicatoren (Totale bevolkingsomvang en BRP per hoofd van de bevolking) in Figuur 6-3 vertonen een duidelijke toename, met name voor het Global Economy wereldbeeld. Zoals te verwachten, vertoont het wereldbeeld Regional Communities de minste groei voor deze indicatoren. Typische milieu-indicatoren (de emissies van broeikasgassen, verlies-tijd aan congestie, versnippering van open ruimte en het aandeel hernieuwbare energie) vertonen het omgekeerde beeld. Opvallend zijn de geringe verschillen voor de Gezondheidsindex tussen de wereldbeelden Global Economy, Strong Europe en Regional Communities. Deze zijn te verklaren uit de geringe verschillen in het bereikte onderwijsniveau voor het eindjaar, de demping van de effecten op de gezondheid voor de berekende waarden van de fijnstof concentratie voor deze drie wereldbeelden, en de klimaatevolutie die modelmatig los van de vier wereldbeelden wordt beschouwd.



Figuur 6-3 Beleidsindicatoren voor 2050 voor het BAU scenario en de vier wereldbeelden (Global Economy (1), Strong Europe (2), Transatlantic Markets (3) en Regional Communities (4)), vergeleken met het beginjaar 2010.

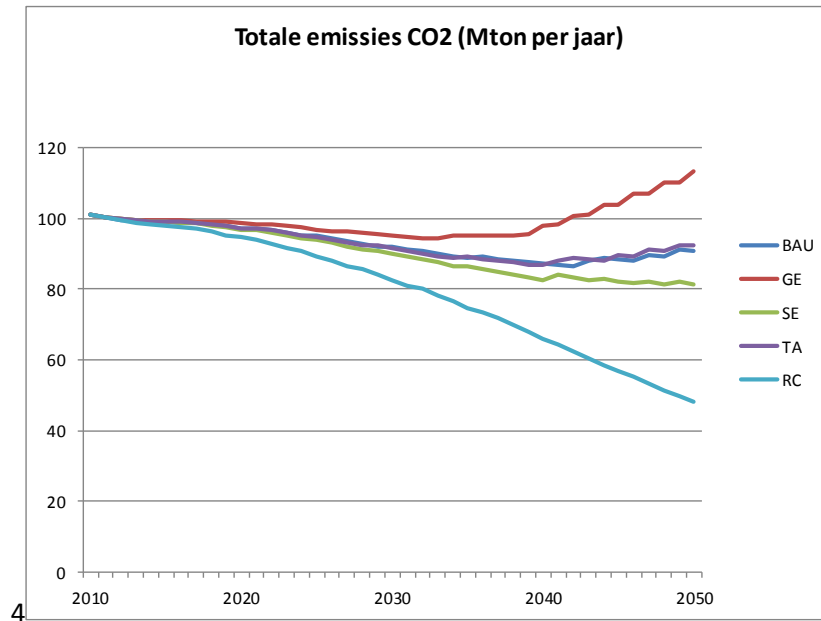
In Figuur 6-4 vergelijken we de indicatoren voor Gezondheid en het Aandeel hernieuwbare energie voor het BAU scenario met drie klimaatscenario's met een temperatuurstijging van +2.0 °C (1), +3.0 °C (2) en +5.0 °C (3) voor de jaren 2000-2100. De gezondheidsindex omvat zowel de impact van klimaat (hittegolven) als luchtkwaliteit (fijn stof) en onderwijs. De index verbetert ten opzichte van het beginjaar door de positieve luchtkwaliteitsevolutie. De verschillen van de klimaatscenario's met het BAU scenario zijn pas merkbaar bij een temperatuurstijging van meer dan 3.0 °C, waar de verhoogde impact van hittegolven duidelijk wordt. Ook blijkt dat het aandeel hernieuwbare energie toeneemt door de temperatuurstijging (zie ook de gevoeligheid voor deze exogene variabele in Tabel 5-7). De temperatuurstijging heeft een daling van de energievraag voor verwarming voor gevolg. Door de gebruikte kostencurves bij de keuze van de energiebron treedt hierbij een verschuiving op naar hernieuwbare energie.



Figuur 6-4 Impact klimaatverandering op gezondheid en aandeel hernieuwbare energie.

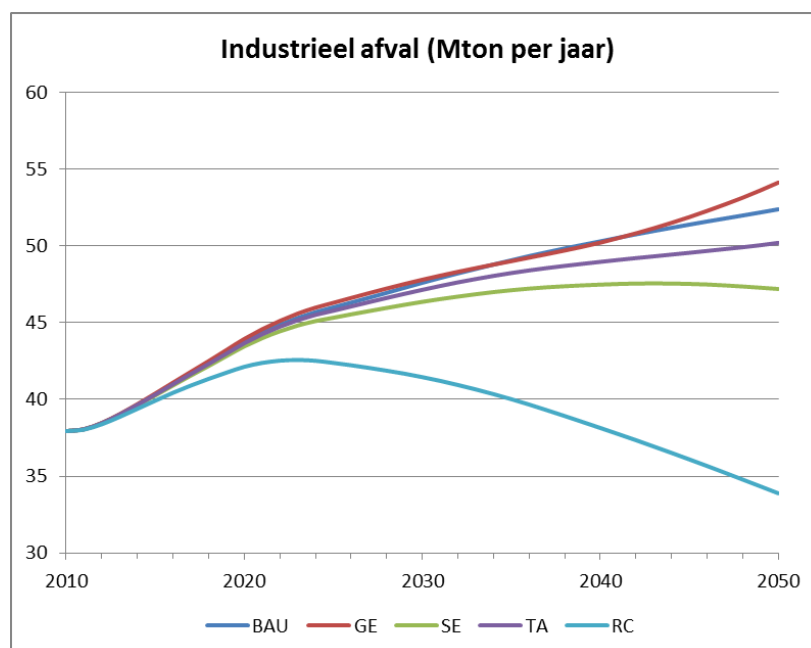
Op een aantal wezenlijke punten verschilt een systeemdynamisch model niet van thematische rekenmodellen: het model vraagt om validatie, de resultaten zijn geen absolute voorspellingen zonder onzekerheid, en het model is gebaseerd op bepaalde aannames. Een, terecht, gestelde vraag tijdens het ontwikkeltraject is de vraag of met het model nieuwe inzichten verkregen kunnen worden. Binnen de systeemdynamische modellering wordt hiernaar verwezen onder de noemer “counter-intuitive behavior” (Sterman, 2000). In zijn simpelste interpretatie betekent dit dat het model een resultaat toont dat behoorlijk tegen de algemene verwachtingen ingaat. Bijvoorbeeld, dat beleid op korte termijn het beoogde bereikt, maar dat op (middel)lange termijn het tegengestelde bereikt wordt. Ook interessant zijn “tipping points” waarbij toestandsvariabelen een omslagpunt vertonen. De mate waarin het model dit soort gedrag kan genereren hangt af van de complexiteit, in de termen van de terugkoppelingen tussen de thema’s, en de aanwezigheid van voldoende drempelfuncties, tijdsvertragingen e.d. De kwaliteit van het model op systeemniveau is dus belangrijk. We onderzoeken het systeemgedrag voor een aantal combinaties van scenario’s en indicatoren.

“Tipping points” doen zich voor het BAU scenario onder meer voor bij de actieve bevolking (deze is het product van de bevolking op werkzame leeftijd en participatiegraad), de verhouding tussen het landbouwareaal (al dan niet in Vlaanderen) dat nodig is om de Vlaamse bevolking te voeden en de met het model berekende beschikbare landbouwruimte, het totaal energiegebruik, de emissies van broeikasgassen, en het aantal ozon overschrijdingsdagen. Figuur 6-5 toont de verschillen in de ontwikkeling van de totale emissies broeikasgassen tussen de wereldbeelden voor de duur van de simulatie. Alleen het Global Economy (GE) wereldbeeld vertoont een sterk “tipping point”, voor de overige wereldbeelden is sprake van een licht “tipping point” (business-as-usual en Transatlantic Markets), stabilisatie (Strong Europe) of een blijvende afname (Regional Communities). Kwalitatief zijn de onderlinge verschillen tussen de wereldbeelden (Tabel 6-1) te begrijpen, maar de kwantificering geeft aanvullende informatie over de hernieuwde toename van CO₂ emissies na 2030.



Figuur 6-5 Totale broeikasgasemissies in Mton CO₂-equivalenten per jaar voor het BAU scenario en de vier wereldbeelden.

In contrast met de evoluties van broeikasgasemissies toont het model een verdere toename van de hoeveelheid industrieel afval. Het materiaalengebruik wordt weliswaar efficiënter, getuige de afname van verhouding tussen industrieel afval en BRP van de industrie. De toename van de afvalproductie door de groei van de industriële sector overtreft de afname door efficiëntiewinsten in de komende jaren. Figuur 6-6 toont de evolutie voor de verschillende scenario's. Slechts in het wereldbeeld Regional Communities (RC) wordt er echter vrij snel een tipping point bereikt. Strong Europe (SE) toont een omkerende trend na 2045, terwijl de andere wereldbeelden een continue groei kennen. De jaarlijkse afvalproductie in Vlaanderen wordt gedomineerd door industrieel afval.



Figuur 6-6 Jaarlijkse productie van industrieel afval (primair en secundair) voor het BAU scenario en de vier wereldbeelden.

6.4. WORKSHOP SYSTEEMDENKEN BSDS 2015

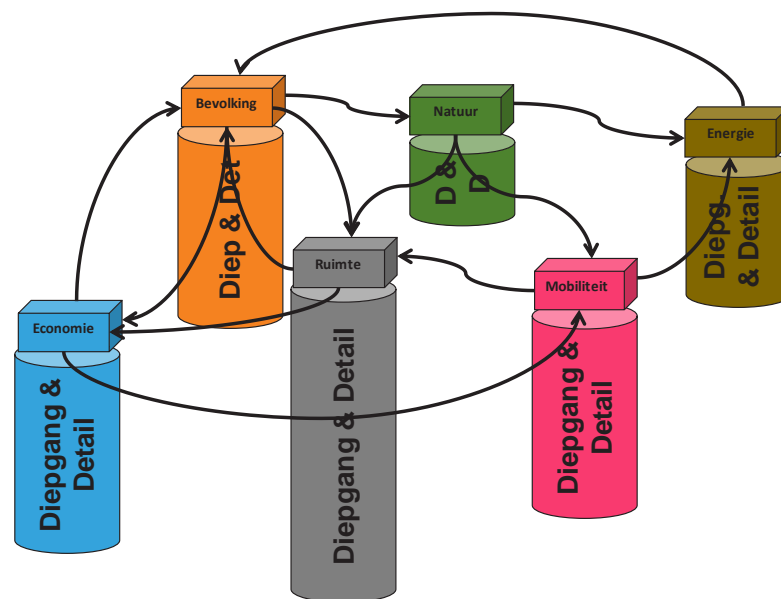
Een eerste, interactieve, toepassing van het systeemmodel met gebruikers met een uiteenlopende thematische achtergrond werd georganiseerd tijdens de Brussels Sustainable Development Summit (BSDS). Deze werd door VITO in oktober 2015 georganiseerd om internationale vertegenwoordigers van de wetenschappelijke wereld, overheid en private sector bijeen te brengen om over de uitdagingen en technische mogelijkheden rond duurzaamheid (materialen, energie, klimaat) van gedachten te wisselen (<https://bsds2015.vito.be/>). Eén van de parallelle sessies werd gewijd aan Duurzame Regionale Ontwikkeling, met een nadruk op systeemdenken en systeemdynamische modellering. Als onderdeel van deze sessie werd een interactieve workshop georganiseerd met het systeemdynamische model Vlaanderen. Omwille van de beperkte tijd - slecht 2 uur - en om inhoudelijke discussies tot een minimum te herleiden werd het model niet uitgebreid toegelicht. Een spelsituatie werd gecreëerd. De +/- 30 deelnemers werden in twee groepen ingedeeld. De groepen kregen de opdracht om op basis van hun inzichten en discussies in groepsverband binnen enkele minuten geschikte combinaties van instellingen van exogene variabelen (keuze uit 8) voor te stellen met het oog op een verhoging van de duurzaamheid, zoals uitgedrukt aan de hand van 8 duurzaamheidsindicatoren. Deze combinaties werden plenair doorgerekend, geanalyseerd en bediscussieerd. Bij aanvang van de oefening werd aan de deelnemers hand-outs uitgereikt waarin de 8 exogene invloedsvariabelen (Technologie & Innovatie, Duurzaam Gedrag en Beleid, Onderwijs ...) en de selectie van eveneens 8 beleidsindicatoren (Totale Bevolkingsomvang, BRP per hoofd van de bevolking, Emissies Broeikasgassen ...) werd toegelicht. Afgezien van de inhoudelijke betekenis van de resultaten kunnen een aantal conclusies getrokken worden over deze toepassing van het model:

1. Hoewel de meeste deelnemers niet onbekend waren met de toepassing van modellen binnen de eigen domeinexpertise bleek dit meestal niet het geval te zijn met dit type van (systeemdynamische) modellen. De hoge mate van interactiviteit, hoge rekensnelheid en directe presentatie van resultaten werden als vernieuwend gezien.
2. Tijdens de workshop bleek dat veel van de voorgestelde aanpassingen aan de sturende variabelen een beperkt invloed hadden op het verloop van de beleidsindicatoren. De reden daarvan was de deelnemers niet duidelijk. Een duurzamer gedrag, daarentegen, bleek wel een sterke invloed te hebben. M.a.w. het systeem bleek redelijk robuust te zijn voor extreme keuzes, wat niet noodzakelijk fout hoeft te zijn. Door de beperkte tijd was er geen ruimte om voorbeelden te tonen van de sterke evoluties die combinaties van verschillende drivers teweeg kunnen brengen.
3. Het zou zinvol zijn om, voorafgaand aan een dergelijke denkoefening, de resultaten voor enkele typische simulaties te tonen en plenair te analyseren om de werking van het model toe te lichten.
4. Gevoeligheidstabellen voor de relatieve invloed van iedere exogene variabele op een groot aantal beleidsindicatoren waren beschikbaar, maar zijn niet aan de deelnemers getoond om ze niet te beïnvloeden in het spel. Na afloop van een denkoefening zou informatie over de gevoeligheid van het systeem getoond kunnen worden in de vorm van een grafisch modelschema waarin zwakke en sterke verbindingen direct zichtbaar zijn.

HOOFDSTUK 7. TECHNISCH RAAMWERK

7.1. INLEIDING

De derde stap van de toekomstverkenning in het 4-stappenplan (Op 't Eyndt, 2012; De Kok en Engelen, 2013) is de thematische verdieping op basis van thematische en sectorale rekenmodellen. Deze rekenmodellen onderscheiden zich van het systeemdynamische model door hun oriëntatie op een specifieke sector of thema en de diepgang en het detail dat ze betrachten in de weergave ervan (Figuur 7-1). Het beoogde technisch modelraamwerk uit de opdrachtomschrijving omvat de randvoorwaarden en een protocol voor een raamwerk waarmee thematische rekenmodellen zouden kunnen worden aangestuurd via een systeemdynamisch model. De integratie van thematische rekenmodellen binnen een systeemmodel is een complex onderwerp dat groeiende belangstelling geniet (Argent, 2004; Gregersen et al., 2007; Van Delden et al., 2007).



Figuur 7-1 Thematische verdieping en modellering via een systeemdynamisch model.

De thematische rekenmodellen worden in hun gedrag aangestuurd door randvoorwaarden opgelegd door het systeemdynamische model en zijn ook onderling gekoppeld via een uitwisseling met het systeemdynamische model. Ontbrekende modelonderdelen kunnen gaandeweg worden aangevuld en het verdient aanbeveling om de modellen ook naar detailniveau en ambitie geleidelijk op gelijke leest te schoeien. De onderlinge wisselwerking van de modellen verloopt indirect via de uitwisseling met het systeemdynamische model, al dan niet door het simultaan draaien van beide. Op die manier behouden de thematische en/of sectorale aspecten hun focus en noodzakelijke diepgang. Bovendien blijft zo het bestaande modelinstrumentarium in belangrijke mate benut. Dankzij het bovenliggende systeemdynamisch model kunnen de rekenmodellen optimaal gebruik maken van de data aangereikt uit andere domeinen en kunnen ook randvoorwaarden vanuit de sectoren beter, en vooral consistent, teruggekoppeld worden naar andere domeinen, sectoren en thema's.

Voor een overzicht van thematische rekenmodellen welke mogelijk inpasbaar zijn in een systeemdynamisch raamwerk wordt verwezen naar de eerdere “Haalbaarheidsstudie Systeemdynamische Modelling” uit 2013 (De Kok en Engelen, 2013). Men kan bij deze rekenmodellen onderscheid maken tussen dynamische procesmodellen, evenwichts- of optimalisatiemodellen, statische modellen en modellen gericht op “real-time forecasting” (De Kok en Engelen, 2013):

- **Dynamische procesmodellen** vinden we onder meer in de water- en luchtkwaliteitsmodellering. Dit soort modellen is vaak rekenintensief, maar kan wel ingezet worden om fysische, chemische en ecologische processen dynamisch door te rekenen.
- **Evenwichtsmodellen** onderscheiden zich van procesmodellen doordat niet het systeemgedrag als functie van de tijd wordt gemodelleerd, maar een optimale of meest waarschijnlijke eindtoestand van het systeem wordt berekend. Economische modellen zijn in het algemeen evenwichtsmodellen, die sterk steunen op het gebruik van zogenaamde input-output tabellen. Inpassing in een systeemdynamisch kader vereist dat deze toestand voor elke tijdstap wordt herbekeken voor de duur van de simulatie.
- Met **statische modellen** worden modellen bedoeld waarmee, al dan niet gebruikmakend van referentiegegevens, de systeemtoestand op één specifiek tijdstip wordt berekend. Meestal berekenen ze een aspect van de huidige toestand van het systeem, zoniet voor een bepaald moment gesteld in de toekomst. In het laatste geval moeten de noodzakelijke invoergegevens extern aangeleverd worden voor het moment in de toekomst. De veel gebruikte 4-traps verkeersmodellen zijn een voorbeeld van statische modellen.
- **Real-time forecasting modellen** gebruiken statistische relaties en actuele meetgegevens om op zeer korte termijn de waarde van toestandsvariabelen te voorspellen. De flexibiliteit van dit soort modellen is beperkter omdat veel proceskennis in statistische relaties is vervat. Deze modellen gebruiken vaak meetgegevens op korte termijn (uren tot dagen) om de verandering in de systeemtoestand te berekenen. Weermodellen zijn een voorbeeld van real-time forecasting modellen.
- **Optimalisatiemodellen** zijn meestal statische modellen. Ze berekenen een optimale oplossing of toestand gegeven de invoer en een set van criteria, bijvoorbeeld een kostencriterium. Als ze ingebed zitten in een dynamisch model, dan berekenen ze voor elke tijdstap een tussentijdse optimale oplossing. Bijvoorbeeld energiemodellen, die ingezet worden om de beste technologie te kiezen gegeven de kostprijs van de brandstoffen, zijn veelal optimalisatiemodellen.

Deze modellen zijn in principe inpasbaar, op voorwaarde dat het systeemdynamisch model de juiste gegevens kan aanleveren tijdens de simulatie. Methodologisch gesteld is de thematische verdieping in essentie een set van parallel uitgevoerde prognoses, die aangestuurd worden vanuit het systeemdynamische model. Er wordt namelijk gebruik gemaakt van een analyse en bijbehorende rekenmodellen die elk een uitspraak doen over ontwikkelingen in een enkele, specifieke sector. Bovendien worden daarvoor trends doorgerekend die binnen veel smallere bandbreedtes vallen dan degene die in het systeemdynamisch model kunnen worden gehanteerd. In het bijzonder de maatschappelijke keuzes en onzekerheden krijgen minder expliciet of geheel geen aandacht. Er wordt rekening gehouden met deze laatste vorm van onzekerheid door voor elk wereldbeeld apart een doorrekening van de modellen te doen, dus, het aantal prognoses te verveelvoudigen.

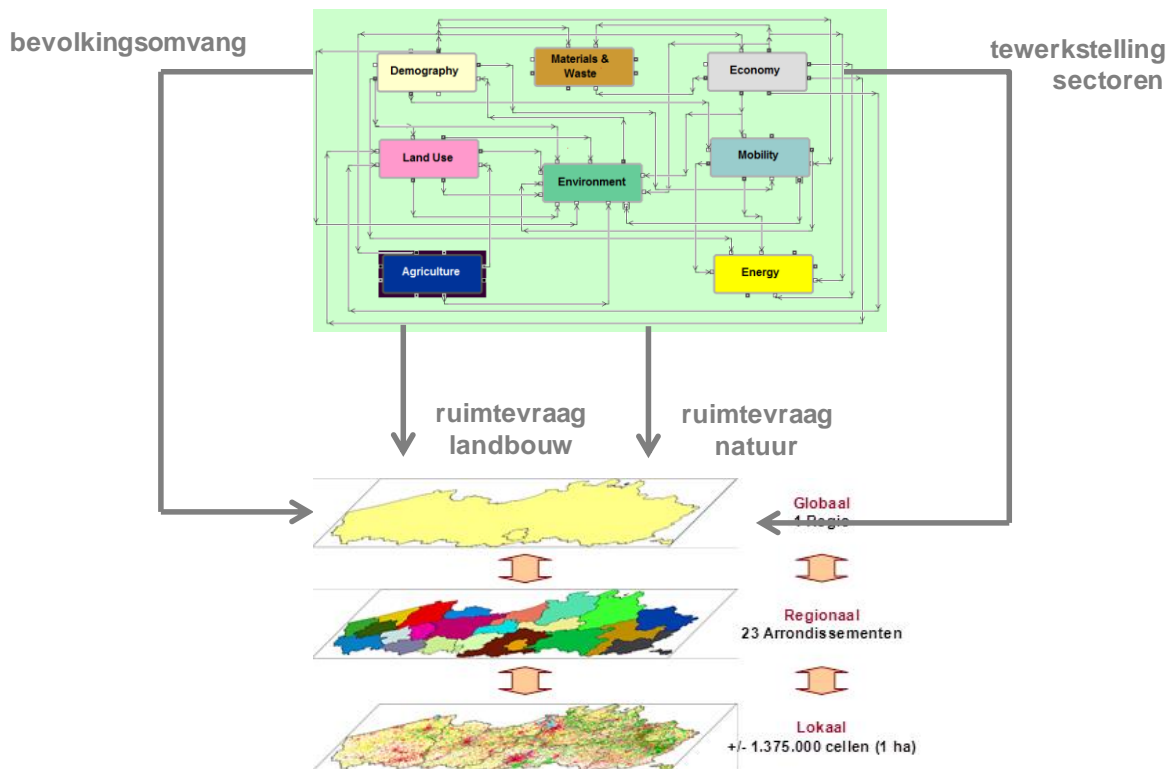
Dit type van prognostische modeloefening is in Vlaanderen al veel beter gekend. Bijvoorbeeld de gekoppelde MIRA-S (Van Steertegem, 2009) en NARA-S (Dumortier et al., 2009) zijn van dit type, maar ook de door verschillende instanties gepubliceerde prognoses betreffende demografische en economische groei, energiegebruik, waterkwaliteit, etc. Het vernieuwende in de voorgestelde aanpak is de verbeterde onderlinge koppeling van de thematische berekeningen door middel van het systeemdynamische model en het parallel doorrekenen in de context van elk scenario. De thematische verdieping zorgt ervoor dat de sterke elementen uit eerdere milieu- en natuurstudies behouden blijven, namelijk de ontwikkeling en inzet van een sector- en/of themadekkend analytisch (mathematisch) instrumentarium. Tegelijkertijd wordt een zwak element van deze denkoefeningen, namelijk de zwakke onderlinge koppeling, verholpen door de consistentie in de data-invoer en -uitwisseling sterk te verbeteren door de thematische prognoses te kaderen in een systeemmodellering. Het systeemdynamisch model levert dus scenario's aan de thematische modellen, aangevuld met randvoorwaarden voor modelparameters en -variabelen.

7.2. KOPPELING RUIMTEMODEL VLAANDEREN

Eerder werden een groot aantal thematische rekenmodellen onderzocht op hun inpasbaarheid in een systeemdynamisch raamwerk (De Kok en Engelen, 2013). De eerste selectie van modellen richtte zich op de meest relevante thema's voor het Milieubeleid in Vlaanderen, waarbij rekening is gehouden met bestaande toekomstverkenningen (Van Steertegem et al., 2009; Dumortier et al., 2009; SVR, 2009) en geschikte ontwerpcriteria zoals het dynamisch karakter, de tijdshorizon, en het detailniveau (De Kok en Engelen, 2013). Het RuimteModel Vlaanderen (Engelen et al., 2011a) is één van die onderzochte modellen, en scoorde goed op een aantal van deze ontwerpcriteria zoals de tijdshorizon, het dynamisch karakter en de rekensnelheid. Bovendien heeft het expliciet ruimtelijk karakter van het model, dat op een Cellulaire Automaten (CA) benadering is gebaseerd, een sterke toegevoegde waarde voor systeemdynamische modellen. Deze laatste rekenen in het algemeen niet ruimtelijk expliciet. Om deze redenen werd het RuimteModel geselecteerd om de praktische waarde van het beoogde technische raamwerk uit Figuur 7-1 te onderzoeken en te demonstreren. Koppelvariabelen (De Kok en Engelen, 2013) maken de uitwisseling van gegevens tussen de thematische rekenmodellen via het systeemdynamische model mogelijk. In het kader van deze opdracht beperkt de toepassing zich tot de aansturing van het RuimteModel in één richting door het systeemdynamische model: het RuimteModel krijgt wel invoer vanuit het systeemdynamische model, maar levert op zijn beurt, en als resultaat van zijn berekeningen, geen invoer aan het systeemdynamische model. De voor het RuimteModel relevante en voldoende koppelvariabelen die voor de demonstratie geselecteerd werden zijn:

- de totale bevolkingsomvang van Vlaanderen
- de totale tewerkstelling in de landbouw, industrie en dienstensector
- de ruimtevrage voor de landbouw
- de ruimtevrage voor (beheerde) natuur

Figuur 7-2 toont hoe het RuimteModel kan rekenen met modeluitvoer van het systeemdynamisch model.



Figuur 7-2 Aansturing van het RuimteModel Vlaanderen door het systeemdynamische model voor Vlaanderen.

Om de inzetbaarheid van het systeemdynamisch model als technisch raamwerk voor modelkoppeling te toetsen werden eerst tijdreeksen berekend voor de gekozen koppelvariabelen, voor de verschillende wereldbeelden. Deze werden vervolgens als invoer gebruikt voor het RuimteModel.

Binnen het RuimteModel Vlaanderen is in dit verband sprake van Residentieel Landgebruik, twee landgebruiksklassen voor de industrie (Lichte Industrie en Zware Industrie), vijf voor de diensten (Groothandel, Detailhandel, Kantoren en Administratie, Overheid en Onderwijs, en Overig Residentieel, Commercieel en Diensten), vijf voor de Geregistreeerde Landbouw (Grasland met Natuur- en Milieudoelen, Productiegrasland, Akker met Natuurdoelen, Akker met Milieudoelen, en Akker), en zeven voor Beheerde Natuur (Grasland met Natuurbeheer, Bos met Natuurbeheer, Bos met Bosbeheer, Moeras met Natuurbeheer, Heide met Natuurbeheer, Kustduin met Natuurbeheer, en Slik en Schorre). Bovendien worden nog vier bijzondere landgebruiksklassen onderscheiden, die corresponderen met economische activiteit: Afval, Mijnbouw, Energie en Havens. De ruimte vraag voor alle landgebruiksklassen is op arrondissementniveau (NUTS 3) gegeven.

In het systeemmodel worden tien landgebruiksklassen onderscheiden: Residentieel, Geregistreeerde Landbouw, Ongeregistreeerde Landbouw, Industrie, Energie, Diensten, Beheerde Natuur, Onbeheerde Natuur, Vaste element, en de categorie Overig. Het ruimtegebruik voor elk van deze landgebruiken wordt berekend op het NUTS 1 niveau van Vlaanderen. Het is dus noodzakelijk de door het systeemmodel berekende ruimte vraag te disaggregeren naar de landgebruiken uit het RuimteModel en het arrondissementniveau. Voor de landgebruiksklassen Residentieel, Geregistreeerde Landbouw, Beheerde Natuur, Industrie en Diensten uit het systeemmodel werd de onderverdeling uit Tabel 7-1 gebruikt, in combinatie met de tijdsafhankelijke verdelingscoëfficiënten voor het RuimteModel.

Systeemmodel	RuimteModel
Residentieel	Residentieel
Geregistreeerde Landbouw	Grasland met Natuur- en Milieudoelen, Productiegrasland, Akker met Natuurdoelen, Akker met Milieudoelen, Akker
Beheerde Natuur	Grasland met Natuurbeheer, Bos met Natuurbeheer, Bos met Bosbeheer, Moeras met Natuurbeheer, Heide met Natuurbeheer, Kustduin met Natuurbeheer, Slik en Schorre
Industrie	Lichte Industrie, Zware Industrie
Diensten	Groothandel, Detailhandel, Kantoren en Administratie, Overheid en Onderwijs, Overig Residentieel, Commercieel en Diensten

Tabel 7-1 Relatie landgebruiksklassen RuimteModel en Systeemmodel.

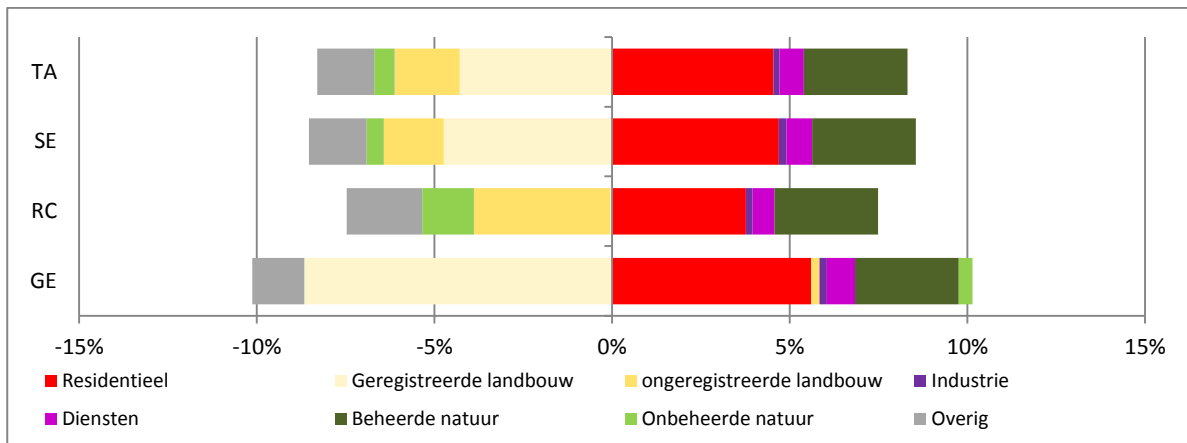
Voor alle overige landgebruiksklassen werd de bestaande ruimtevrage in het RuimteModel gehandhaafd. De ruimtevrage voor Industrie in het systeemmodel werd bovendien gecorrigeerd voor de totale ruimtevrage voor Afval, Mijnbouw, Energie en Havens uit het RuimteModel.

Met deze opzet werden de volgende resultaten verkregen.

Figuur 7-3 toont de netto toe- of afname in oppervlak tussen 2010 en 2050 voor elk van de gegroepeerde landgebruikscategorieën op schaal van Vlaanderen in de 4 wereldbeelden. De balken in de grafiek geven per wereldbeeld weer hoeveel percentage elke categorie toe of afgenomen is tussen 2010 en 2050 waarbij de totale toename altijd gelijk is aan de totale afname aangezien de totale oppervlakte van Vlaanderen niet wijzigt. De grootste netto-wijzigingen vinden plaats in het Global Economy scenario: meer dan 10 % van het Vlaamse oppervlak verandert van gebruik. In het Regional Communities scenario is dit maar 7.5 %.

In elk wereldbeeld neemt het areaal residentieel toe. Opnieuw is de grootste toename te vinden in het Global Economy scenario (5.6 %) en de kleinste in het Regional Communities scenario (3.8 %). Deze categorie neemt vooral ruimte af van het landbouwareaal dat in alle wereldbeelden afneemt. Opvallend is dat in Global Economy de landbouw bijna 10 % afneemt waarbij de afname enkel binnen de geregistreeerde landbouw wordt gezocht terwijl in het Regional Communities scenario enkel ongeregistreeerde landbouw verdwijnt, en dit voor minder dan 5 %. Dit is te verklaren door het feit dat de categorie geregistreeerde landbouw arealen opgelegd krijgt door het Systeemmodel. In het laatste is de omvang van het areaal onderhevig aan economische marktprocessen. Dit geldt ook voor de categorieën residentieel, industrie en diensten.

De categorie beheerde natuur groeit voor de vier wereldbeelden volgens een ingelezen scenario. Hierdoor is de toename van het areaal voor deze categorie hetzelfde in de vier scenario's (bijna 3 %).

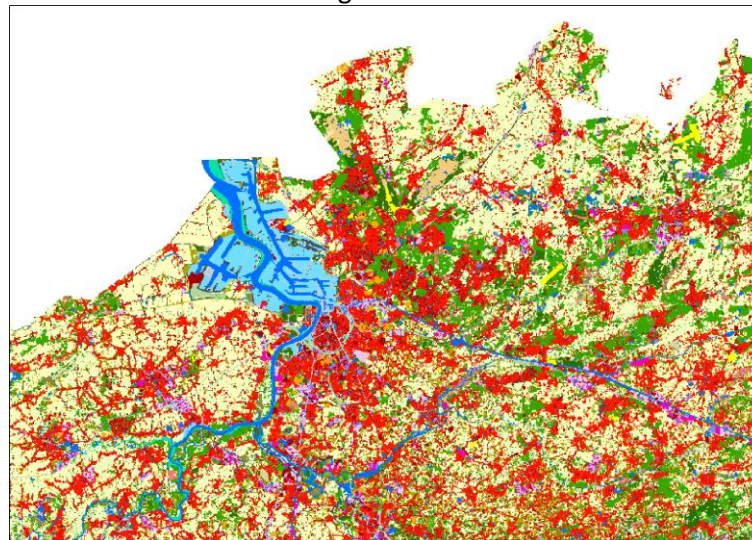


Figuur 7-3 Netto landgebruikswijzigingen in het systeemmodel tussen 2010 en 2050 in Vlaanderen, uitgedrukt als percentage van het totale oppervlak.

De thematische verdieping van het RuimteModel uit zich in een derde dimensie, de ruimtelijke dimensie, naast het type landgebruik en de tijd. Simulatieresultaten van de wereldbeelden zijn in Figuur 7-5 in kaart gebracht voor de regio Antwerpen en omgeving en kunnen worden vergeleken met de situatie voor het beginjaar 2010 in Figuur 7-4. Er is een sterke verstedelijking te zien in alle scenario's, maar de koploper is het Global Economy scenario, gevolgd door het Strong Europe scenario. Deze sterke verstedelijking is in lijn met de hogere bevolkingsgroei die deze wereldbeelden kenmerkt. Het is vooral de categorie landbouw die ter compensatie van deze uitbreiding sterk wordt teruggedrongen (zie ook Sectie 5.7). Om de verschillen tussen 2050 en 2010 beter te kunnen onderscheiden, worden de verschilkaarten voor de landgebruikscategorie Residentieel getoond in Figuur 7-6. Hierop is te zien dat de verstedelijkingsdruk het grootst is in het Global Economy scenario. Door suburbanisatie beginnen stad en platteland ten zuiden van Antwerpen in elkaar over te lopen.

Figuur 7-7 en Figuur 7-8 geven een vergelijking van de concentratie aan werklocaties, bestaande uit industrie en diensten, voor elke locatie in Vlaanderen. Die concentratie is een ruimtelijke maat. Voor elke cel van 1 ha wordt binnen een zone van 1.5 km het aandeel in oppervlakte van de betrokken categorieën in de totale oppervlakte berekend. De kaarten tonen het verschil in concentratie tussen een business-as-usual scenario en elk wereldbeeld in 2050. Volgens het business-as-usual scenario zijn het vooral de huidige stedelijke en industriële kernen die zullen versterken in de toekomst. In het Global Economy scenario is deze trend het sterkst aanwezig. Het sterkste effect doet zich voor in de industriële kern in het zuiden van West-Vlaanderen. Omgekeerd is dit de zone waar het Regional Communities scenario een minder sterke toename aan economische landgebruiken kent. In de verschilkaarten voor verstedelijking (Figuur 7-9) wordt voor elk wereldbeeld het aandeel aan bebouwde landgebruiken binnen een straal van 1.5 km vergeleken met die van het business-as-usual scenario in 2050. Gemiddeld genomen neemt de verstedelijking in alle scenario's toe, maar de intensiteit en locatie ervan verschilt. Vergeleken met het business-as-usual scenario neemt in het Global Economy scenario de verstedelijking toe over bijna gans Vlaanderen, terwijl in het Regional Communities scenario het omgekeerde gebeurt. Voor de overige twee scenario's vindt de verstedelijking meer gespreid plaats dan in het business-as-usual scenario waardoor er een mix van meer en minder verstedelijkte zones op kaart te zien is.

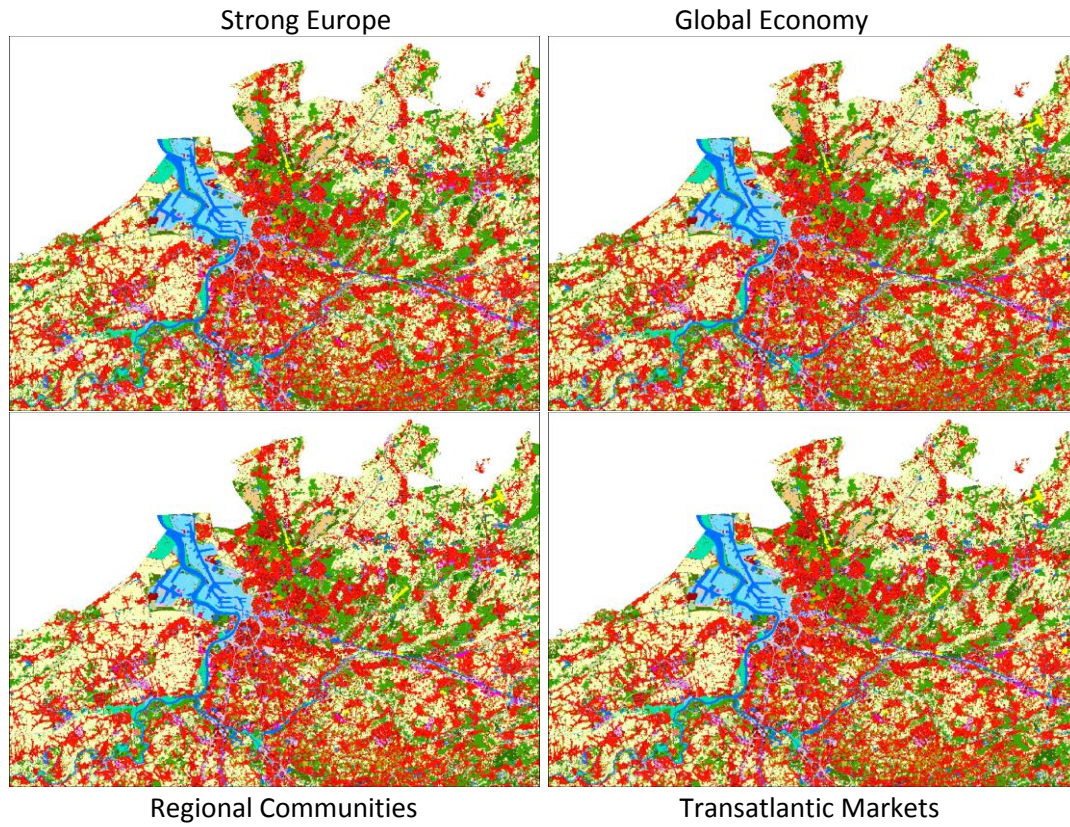
Landgebruik 2010



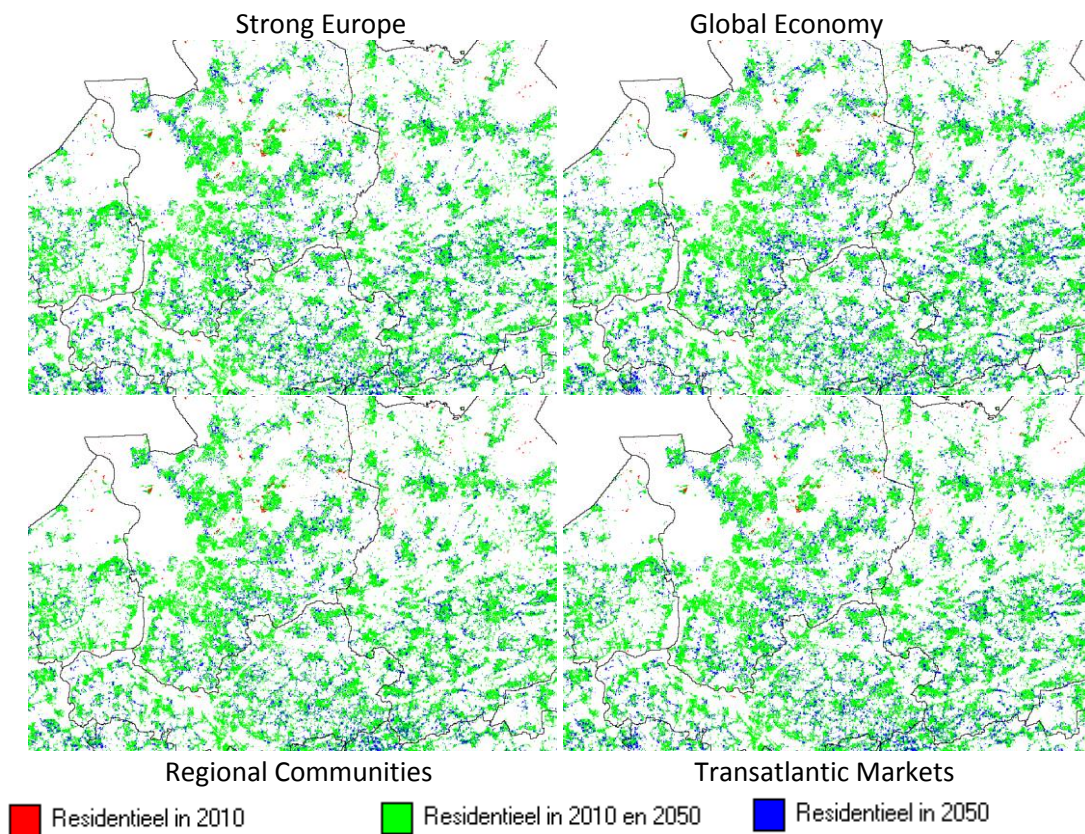
Legende

Overig	Detailhandel en horeca	Moeras met natuurbeheer
Niet geregistreerd grasland met natuurwaarde	Kantoren en administratie	Heide met natuurbeheer
Niet geregistreerde landbouwgrond	Overige diensten	Kustduin met natuurbeheer
Moeras zonder natuurbeheer	Overig industrieel/commercieel/residentieel	Slik en schorre
Heide zonder natuurbeheer	Zeehaven	Recreatie- en sportterrein
Kustduin zonder natuurbeheer	Grasland met natuurbeheer	Residentieel/commerciële bebouwing Brussel
Residentieel	Productiegrasland met natuur- en milieudoelen	Industrie Brussel
Lichte industrie	Productiegrasland	Park
Zware industrie	Akker met natuurdoelen	Militaire voorziening
Afval en afvalwater, waterwinning en waterdistributie	Akker met milieudoelen	Infrastructuur
Mijnbouw	Akker	Water
Energie	Bos met natuurbeheer	Buiten studiegebied
Groothandel en transport en verkeer	Bos met bosbeheer	

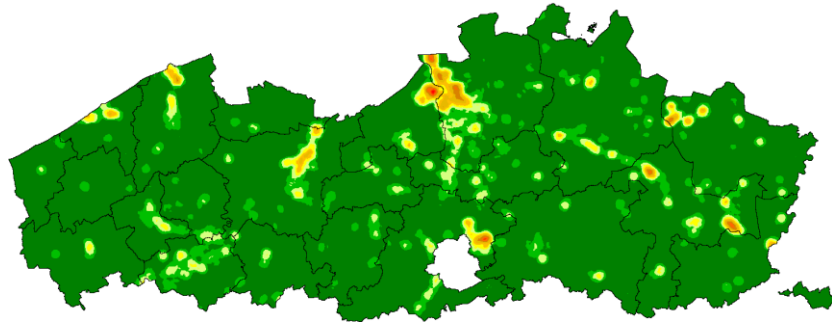
Figuur 7-4 Landgebruik in de regio Antwerpen in 2010.



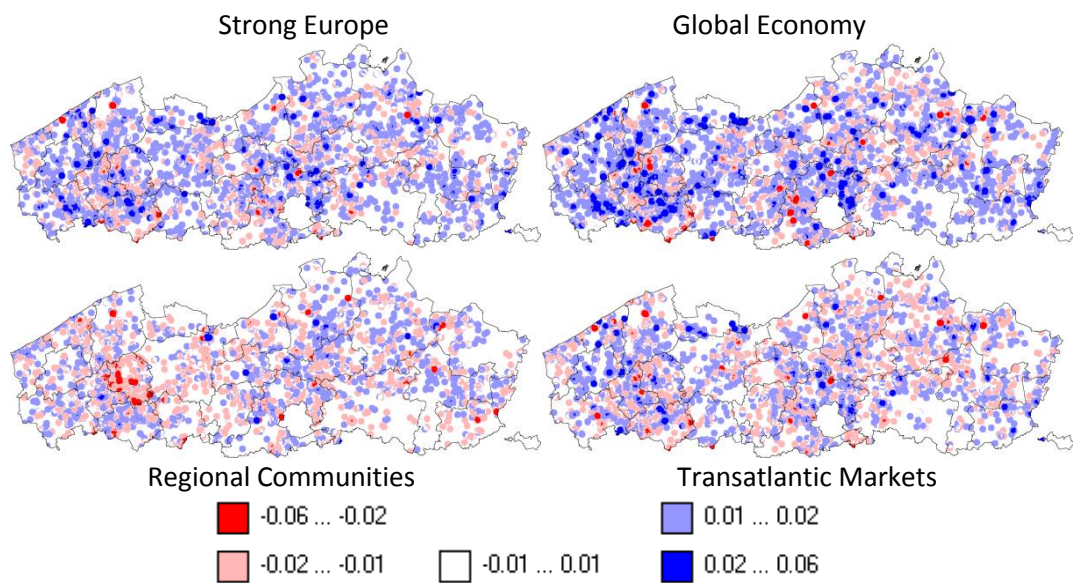
Figuur 7-5 Landgebruik in de regio Antwerpen in 2050 volgens de 4 wereldbeelden.



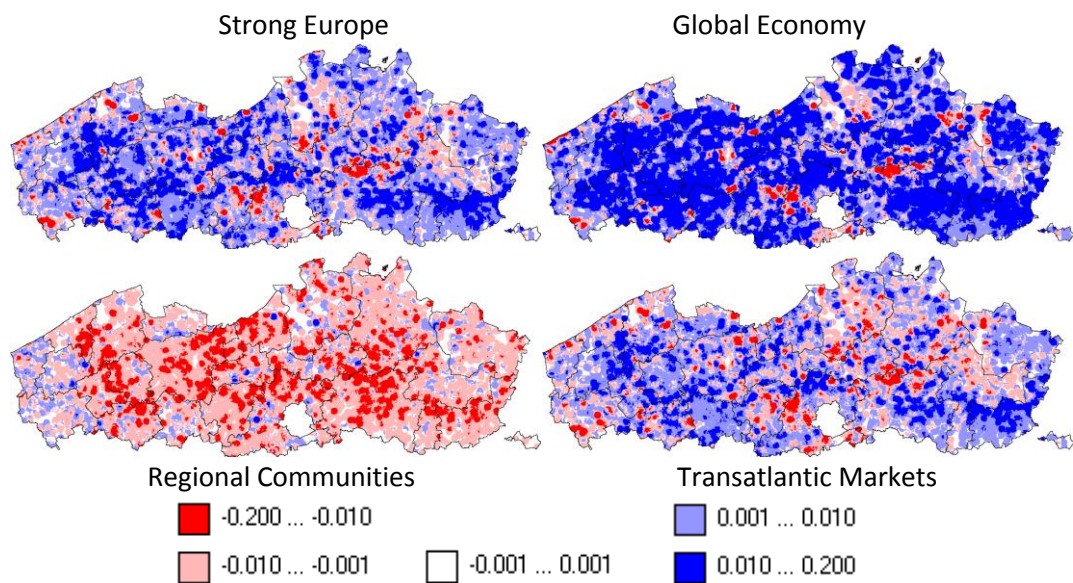
Figuur 7-6 Verschilkaarten 2010-2050 voor Residentieel gebied volgens de vier wereldbeelden.



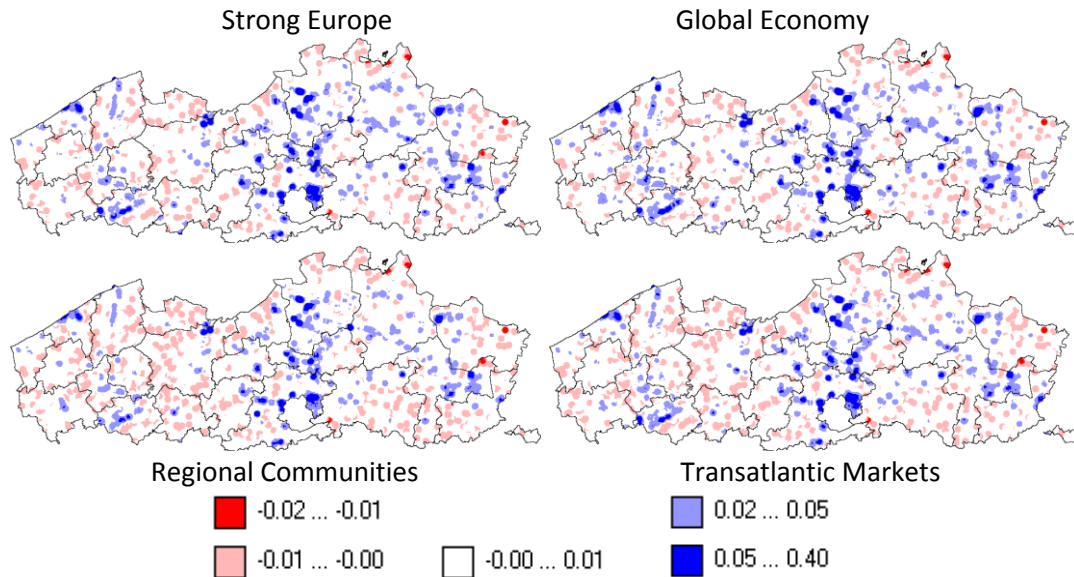
Figuur 7-7 Concentraties voor Werken volgens een business-as-usual scenario voor 2050.



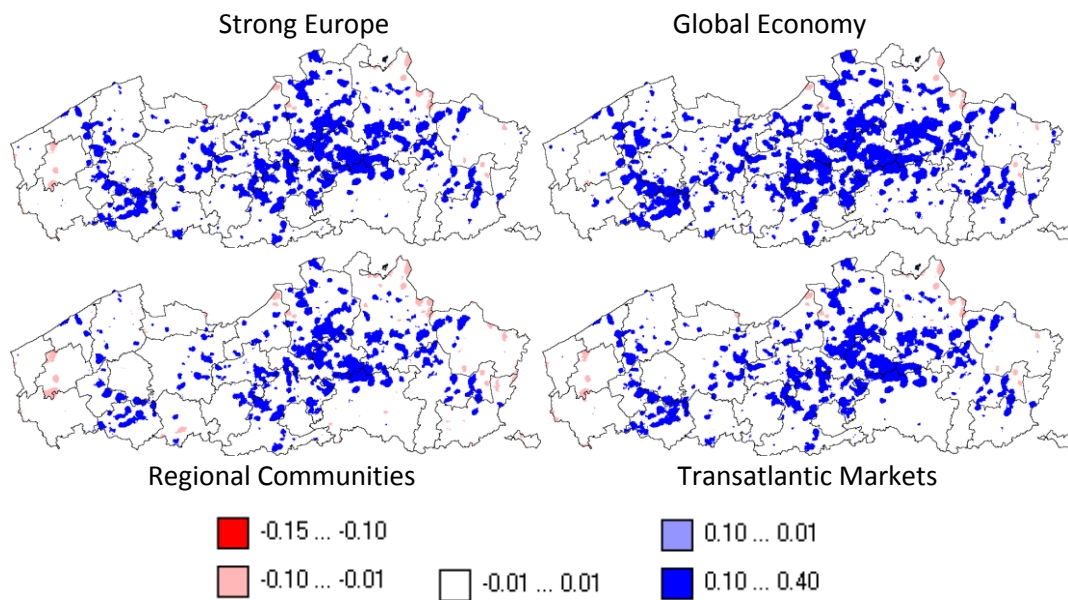
Figuur 7-8 Verschilkaarten voor de concentratie van Werken ten opzichte van een business-as-usual scenario volgens de vier wereldbeelden voor 2050.



Figuur 7-9 Verschilkaarten voor verstedelijking ten opzichte van een business-as-usual scenario volgens de vier wereldbeelden voor 2050.

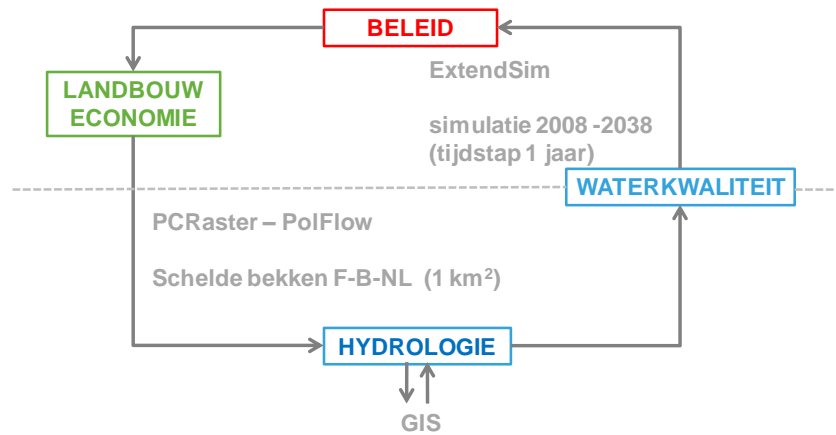


Figuur 7-10 Verschilkaarten 2010-2050 voor concentratie diensten in Vlaanderen volgens de vier wereldbeelden



Figuur 7-11 Verschilkaarten 2010-2050 voor verstedelijkingsgraad Vlaanderen volgens de vier wereldbeelden

Bij toepassing voor modelkoppeling (Figuur 7-12) wisselt het systeemdynamische model gegevens in twee richtingen uit met de thematische rekenmodellen. Eerder is met ExtendSim al ervaring opgedaan met een dergelijke uitwisseling van gegevens met externe modellen in het EU-FP6 project SPICOSA (Vermaat et al., 2012; De Kok et al., 2015). Hierbij is een systeemdynamisch model voor eutrofiëring in het Scheldebekken gekoppeld met een hydrologisch model dat in PCRaster (Van Deursen, 1995) geïmplementeerd was. PCRaster is een open-source platform voor ruimtelijk-dynamische modellering (<http://pcraster.geo.uu.nl>).



Figuur 7-12 Integratie ExtendSim en PCRaster in het SPICOSA project (www.spicosa.eu).

Voor de koppeling met het model in ExtendSim werd gebruik gemaakt van een speciale functie in ModL (WinShellExecute) en een zogenaamde “Lockfile”, een tijdelijk bestand waarmee de simulatie van ExtendSim werd stopgezet zodat de tweede applicatie kan verder rekenen. Dit is een praktische methode om verschillende applicaties te koppelen, die om beurten moeten rekenen. In toekomstige versie van het systeemdynamische model voor Vlaanderen zou de functie ingezet kunnen worden om het RuimteModel Vlaanderen te koppelen in twee richtingen.

HOOFDSTUK 8. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Een systeemdynamisch model of systeemmodel is een abstractie op hoofdlijnen. De meerwaarde van dit type van model schuilt vooral in de wijze waarop met terugkoppelingen tussen de belangrijke toestandsvariabelen rekening gehouden kan worden. Deze zijn van groot belang voor het tijdsafhankelijke gedrag van systemen op de (middel)lange termijn. De nadruk ligt eerder op de structuur van deze terugkoppelingen dan het detailniveau dat gebruikt wordt voor de wiskundige beschrijving van de deelsectoren. De beleidsrelevante indicatoren die met het systeemmodel beschreven kunnen worden zijn in eerste instantie gericht zijn op de transparantie voor beleidsmakers en het toetsen van de robuustheid van beleidskeuzes onder onzekere, uiteenlopende sociaal-maatschappelijke, klimatologische, en economische condities.

Het nu beschikbare systeemdynamische model voor Vlaanderen biedt verschillende toepassingsmogelijkheden. Het kan in multi- of interdisciplinair verband worden ingezet, om strategische discussies tussen en met experts in verschillende domeinen **kwantitatief en interactief** te ondersteunen. Evengoed kunnen gebruikers zelf beleidsverkenningen doorrekenen met het model, waarbij de **consistentie** van de berekeningen voor verschillende thema's van belang is. Daarnaast kan het model ook ingezet worden voor oefeningen in systeemdenken, probleemanalyses, en communicatieve acties rond milieubeleid en milieuverkenningen.

In vergelijking met thematische rekenmodellen heeft het nu beschikbare systeemmodel een aantal sterke punten. Op hoofdlijnen worden tien sociaaleconomische en ecologische thema's rond milieubeleid gekoppeld, waarbij rekening gehouden is met **terugkoppelingen** die van invloed zijn op de respons van het systeem op verschillende combinaties van beleid en exogene condities. Het model is inzetbaar voor (middel)langetermijnprojecties, en heeft een **hoge rekensnelheid** (30 seconden voor 1.000 simulaties). Dit vergemakkelijkt het interactief gebruik, zoals tijdens de BSDS workshop (<https://bsds2015.vito.be/>) en derde workshop van het project werd gedemonstreerd. Het maakt Monte Carlo toepassingen voor de ondersteuning van gevoeligheids- en onzekerheidsanalyses praktisch mogelijk. Deze hoge rekensnelheid is het resultaat van de systeemarchitectuur, het type van de gebruikte deelmodellen (geen rekenintensieve optimalisaties e.d.), en de beperkte ruimtelijke en temporele discretisatie (één resultaat voor heel Vlaanderen en een tijdstap van één jaar). Het ontwerp kent ook een hoge graad van **flexibiliteit** voor aanpassingen in de structuur en details van de deelmodellen. De speciaal voor dit project ontwikkelde **modelbouwstenen** kunnen desgewenst vervangen worden als aanpassingen in de interne code nodig blijken te zijn. In- en uitgaande connectoren kunnen worden toegevoegd om te koppelen met andere of nieuwe modelbouwstenen. Behalve deze connectoren maken de modelbouwstenen en deelmodellen ook veelvuldig gebruik van database tabellen om gegevens uit te wisselen. De dimensies van deze tabellen zijn dynamisch gedefinieerd, en waar mogelijk worden de tabellen automatisch aangepast als categorieën zoals landgebruiksklassen, diersoort, gewastypen, transportmodi, pollutanten, e.d. zouden moeten worden toegevoegd. De **gebruiksvriendelijkheid** van het model voor eindgebruikers, die beperkt bekend zijn met de achtergrond van de deelmodellen, is hoog. De grafische mogelijkheden van ExtendSim® zijn zo goed mogelijk benut om de modelkern te scheiden van de aansturing van het model (Figuur 4-6) en de presentatie van een selectie uit het grote aantal beleidsindicatoren dat met het model berekend wordt (Figuur 6-3). Een interessante mogelijkheid, waar nog geen gebruik van gemaakt is, is de toepassing van zelf samen te stellen indicatoren en het aggregeren van indicatoren met gewichten naar keuze.

Dit type van functionaliteit kan met weinig inspanning worden toegevoegd. De **ingebouwde kalibratie-tool** maakt gebruik van tabellen met te kalibreren parameters en doelwaarden voor indicatoren, die eenvoudig zijn uit te breiden en aan te passen. Het model is gekalibreerd op doelwaarden voor 2050, maar doelwaarden voor een tussenliggend jaar kunnen ook meegenomen worden in de kalibratie (hiervan is voorlopig geen gebruik gemaakt i.v.m. de beperkte beschikbaarheid van gegevens voor de WLO-wereldbeelden). De **open broncode** is beschikbaar via de modelbouwstenen voor de deelthema's, die in aparte bibliotheken zijn opgeslagen en in andere modellen kunnen worden gebruikt. Ondanks het groot aantal functies en toepassingsmogelijkheden van ExtendSim® is gebleken dat deze software snel kan ingezet worden, ook door beginnende modelleers. Hierbij is het wel belangrijk dat een aantal basisprincipes voor het ontwerp van de modellen en modelbouwstenen worden gevolgd (De Kok et al., 2015). Tenslotte is een **vrij beschikbare demonstratieversie** van ExtendSim® beschikbaar (http://www.extendsim.com/prods_demo.html). Hiermee kunnen bestaande modellen worden gebruikt zonder dat een betaalde licentie nodig is. Met het voorbeeld van het RuimteModel Vlaanderen (HOOFDSTUK 7) is gedemonstreerd dat het model ook inzetbaar is voor de aansturing van thematische rekenmodellen, als meer detailniveau nodig is (in Stap 3 uit het 4-stappen plan).

De **kwalitatieve systeemdiagrammen** (zie Bijlage 2), die in het kader van de opdracht samen met de domein-, VITO- en MIRA-experts zijn ontwikkeld, zijn eveneens van groot nut om de consistentie van toekomstverkenningen te verbeteren. Met het ontwerp van kwalitatieve systeemdiagrammen voor milieutoepassingen is eerder ook ervaring opgedaan in de systeemdynamische modelstudies en sommige toekomstverkenningen die in dit rapport zijn besproken. Een van de lessen is dat het ontwerpen van een systeemdiagram waarin variabelen en causale relaties met het juiste detailniveau zijn weergegeven geen eenvoudige oefening is. Het perfecte systeemdiagram bestaat niet, en, het is ook niet zinvol dit na te streven. Veeleer moet het bereikte resultaat gezien worden als een noodzakelijke stap binnen de benadering die gevolgd is om het systeem op hoofdlijnen te karakteriseren, een kwantitatieve modellering van het systeem voor te bereiden, en de werking van het systeem te representeren zodat communicatie en latere aanpassingen vergemakkelijkt worden. Ook geven de schema's inzicht in de toestandsvariabelen die essentieel zijn voor de inter-thematische samenhang van het systeemmodel (zoals het aantal huishoudens, de milieukosten, ecosysteemdiensten ...).

Met een systeemdynamische analyse op hoofdlijnen kunnen de verhaallijnen uit een kwalitatieve systeemanalyse zoals bedoeld in Stap 2 in het 4-stappenplan (Op 't Eyndt et al., 2011) kwantitatief worden onderbouwd. De systeemdynamische modellering gaat uit van een positivistische benadering die geen normen stelt voor te halen doelstellingen (het bereiken daarvan onder verschillende aannames is echter wel met het model te toetsen). De vraag is in hoeverre bij het ontwerp van een systeemdynamisch model rekening gehouden kan worden met transitieverschijnselen die van invloed kunnen zijn op de structuur van het systeem. Dit zou kunnen door bepaalde transitievariabelen in het diagram op te nemen. Is dat niet mogelijk, dan kunnen de gevolgen van (bijvoorbeeld) technologische veranderingen zoals de ICT-revolutie (internet, sociale media ...) ook niet worden meegenomen. Met een systeemdynamisch model kan bijvoorbeeld wel een scenario zonder kernenergie gedraaid worden door deze variabele een laag gewicht te geven. Als het systeemmodel voldoende generiek is opgebouwd zouden de gevolgen daarvan realistisch moeten kunnen worden beschreven.

Een kanttekening, die soms geplaatst wordt bij de inzetbaarheid van systeemdynamische modellen betreft het probleem van onverwachte, ingrijpende gebeurtenissen (“events”) zoals de olie- en kredietcrisis. Hiermee wordt vaak geen rekening gehouden in de vergelijkingen waarmee de relaties tussen de variabelen worden beschreven. In dit opzicht verschillen systeemdynamische modellen echter niet van gewone, thematische rekenmodellen. Wel is het zo dat systeemdynamische modellen flexibeler zijn, en met minder inspanning kunnen worden aangepast om met de effecten van dit soort gebeurtenissen om te gaan, als experts in staat zijn deze te voorzien in denkoefeningen die daar op gericht zijn.

Bij het ontwerp, de implementatie en demonstratie van het systeemmodel zijn een aantal wenselijke aanpassingen naar voren gekomen rond de opzet, en de interactieve inzetbaarheid van het model. Deze vragen om uitbreiding of zijn wenselijk binnen een mogelijk vervolgtraject. De mogelijke aanpassingen zijn thematisch-inhoudelijk, systeem-inhoudelijk, model-technisch of toepassingsgericht:

Thematisch-inhoudelijke aanpassingen:

- Demografie: verfijning gezondheidsindex, validatie referentieverloop vruchtbaarheid en immigratie voor BAU scenario, verfijning van de doorwerking van onderwijs.
- Economie: terugkoppeling milieukosten, verfijning indicator voor duurzame groei en uitbreiding invloedsvariabelen, input-output modellering sectorale verdeling groei en tewerkstelling, uitbreiding economische sectoren cf. RuimteModel, differentiatie participatiegraad immigranten versus bestaande bevolking, berekening sociale lasten, budgettaire indicaties en controle van totale hoeveelheid investeringen.
- Mobiliteit: toevoegen tussenlagen nesting structuur modale keuze voor telewerken, onderzoek belang terugkoppeling toegankelijkheid en ook verwevenheid vanuit het deelmodel Ruimtegebruik.
- Landbouw: koppeling emissiereductie aan overschrijding stikstofnormen voor specifieke landbouwbedrijven, aanpassing veestapel, consistentie landgebruiksklassen RuimteModel, rol biomassa.
- Water: overstromings- en laagwaterrisico, kosten van maatregelen rond waterkwantiteit en -kwaliteit.
- Lucht: relatie tussen algemene luchtkwaliteit in Vlaanderen en voorkomen van hotspots, impact van pollutieconcentraties op landbouwsector, doorwerken correcte termijn gezondheidseffecten op arbeid.
- Ruimtegebruik: verweving, uitbreiding sectoren (zie ook Economie)
- Afval & Materialen: biomassa (competitie energie), afvalstromen, en mogelijkheid materiaalschaarste.
- Natuur en Milieu: herzien indicatoren, invloed verweving, aanvullende indicatoren.

Systeem-inhoudelijke aanpassingen:

- Controle en uitbreiding tabelfuncties op bereik en noodzakelijkheid. Vervangen tabelfuncties door deelmodellen en/of vergelijkingen indien mogelijk/wenselijk.
- Uitbreiden terugkoppelingen deelsystemen, en representatie daarvan in modelvorm.
- Direct aansturing RuimteModel tijdens simulatie in twee richtingen.
- Budgettaire limitering uitgaven maatregelen combinaties.
- Differentiatie instelbare parameter Technologie & Innovatie naar toepassingsgebied.

Model-technische aanpassingen:

- Centrale controle simulatievolgorde en simultaan doorrekenen modelbouwstenen (het principe is beschikbaar en al getest, maar werd nog niet geïmplementeerd).
- Gebruik samengestelde indicatoren voor kalibratie systeemmodel en vergelijkingen scenario's.
- Betere, grafische visualisatie gevoeligheden systeemnetwerk (bijvoorbeeld via breedte verbindingen), als aanvulling op de correlatie matrix.

Aanbevelingen bij interactieve toepassing:

- Een korte, maar duidelijke, inleiding op de achtergrond van het model voorafgaand aan denkoefeningen is noodzakelijk.
- Referentiepatronen/gegevens om ontwikkeling indicatoren beter te kunnen begrijpen.
- Overzicht bestedingen beleid.
- Vertaling simulatie resultaten naar verhaallijnen die bij wereldbeelden passen.
- Voorbereiding enkele typische simulaties met toelichting om werking systeemmodel te verklaren.

Het nu voorliggende systeemmodel voor Vlaanderen vormt een eerste prototype voor een instrument waarmee milieubeleidsstudies en toekomstverkenningen in het kader van het 4-stappenplan (Op 't Eyndt, 2012) kunnen worden ondersteund. Het model is een **blauwdruk** van een ultiem systeemdynamisch model. Domeinexperts voor alle thema's werden betrokken bij ontwerp, maar de tijd en middelen ontbraken in onderhavig project voor een extra iteratieronde om de modelconcepten voor de deelthema's één-voor-één en in detail kritisch te evalueren en bij te stellen waar nodig.

Het resulterende model is wel in staat om effecten van veranderingen in exogene en endogene variabelen en parameters, waaronder beleidsgevoelige parameters, door te rekenen op een integrale, systematische en consistente wijze. Het levert kwantitatieve antwoorden in de vorm van toestandsvariabelen en indicatoren die courant gehanteerd worden in de beleidsthema's. Het biedt op die manier een functionaliteit die al veel verder reikt dan oefeningen op basis van kwalitatieve vormen van modelleren en redeneren. Maar het model is niet af. Een systeemmodel is, net als elk ander model, wellicht nooit af. De evoluerende wetenschappelijke kennis en inzichten, maar ook de veranderingen in de wereld, de problematiek en de wijze waarop de maatschappij er wenst mee om te gaan, zijn daaraan schuldig. De volgende stappen in de ontwikkeling van het systeemmodel vormen een interessant en logisch vervolg op deze opdracht, en zouden vooraf moeten gaan aan een operationele inzet voor de ondersteuning van het langetermijnmilieubeleid:

a. Een kritische, gedetailleerde evaluatie van de afzonderlijke modellen voor elk deelsysteem met de eerder betrokken domeinexperts, nieuw te betrekken andere deskundigen, en belanghebbenden. Het doel is hier de toegepaste modelconcepten, het gebruik van gegevens én het gedrag van het deelmodel te valideren, zodat het vertrouwen groeit in een voldoende weergave van de deelsystemen, en, een breed draagvlak gecreëerd wordt voor de inzetbaarheid van de modellen van de deelsystemen. De beschikbaarheid van het systeemdynamisch model van het totale systeem is hier een groot voordeel, maar ook een noodzaak, omdat de rol van het deelsysteem in het geheel hiermee beter kan worden toegelicht dan tijdens de opdracht het geval was. Desalniettemin moet dit traject deelsysteem per deelsysteem worden doorlopen.

b. Herimplementatie van het systeemmodel, voortbouwend op het al beschikbare model, de inzichten verkregen tijdens eerdere interactieve toepassingen (o.m. BSDS 2015 workshop), en de resultaten van de kritische evaluatie (Zie a). De geconstateerde inhoudelijke en model-technische verbeterpunten kunnen hierbij ook in beschouwing genomen worden. Een historische kalibratie van het nu beschikbare systeemmodel, bijvoorbeeld voor de periode 1990-2010, zou eveneens wenselijk zijn en onderdeel moeten uitmaken van een eventueel vervolgtraject.

c. Operationele toepassing van het systeemmodel. Verwijzend naar het bestek van deze opdracht wordt hieronder verstaan dat het systeemdynamische model inzetbaar gemaakt wordt voor de ondersteuning van milieubeleidsstudies en toekomstverkenningen zoals de Milieu- en Natuurverkenning. De wereldbeelden die onderliggend zijn aan de bestaande beleidsverkenningen worden waar mogelijk en wenselijk verfijnd, en in kwantitatieve sleutelindicatoren vertaald. Hiermee wordt het systeemdynamisch model optimaal afgestemd op de beschikbare en verder te ontwikkelen toekomstbeelden. Met het zo verkregen raamwerk kunnen beleidsverkenningen op regelmatige basis worden doorgerekend. Dit maakt (bijvoorbeeld) een jaarlijkse bijstelling van de middellange en langetermijnperspectieven mogelijk, waarmee de consequenties en onzekerheden rond beleidskeuzes inzichtelijk gemaakt kunnen worden voor beleidsmakers, domeinexperts en belanghebbenden. Een aanvullende uitbreiding van het raamwerk zou er uit kunnen bestaan dat voor geselecteerde beleidsoefeningen een online tool beschikbaar wordt gesteld, voor snel en interactief gebruik.

BRONNEN

Ackhoff RL. The art and science of Mess Management, TIMS Interfaces, Vol II, no.1, Feb. 1981, 20-26, 1981.

Alkemade R, Van Oorschot M, Miles L, Nelleman C, Bakkenes M en Ten Brink B. GLOBIO3: A Framework to Investigate Options for Reducing Global Terrestrial Biodiversity Loss. Ecosystem 12, 374-390, 2009.

Akcelik, R. (1991) Travel Time Functions for Transport Planning Purposes: Davidson's Function, Its Time Dependent Form and an Alternative Travel Time Function. Australian Road Research, 21, 49-59.

Argent RM. An overview of model integration for environmental applications-components, frameworks and semantics. Environmental Modelling & Software 19 (3), 219-234, 2004.

Bassi AM and Shilling JD. Informing the US Energy Policy Debate with Threshold 21. Technological Forecasting and Social Change 77(3), 396-410, 2010.

Barney GO, Qu W and Bogdonoff P. Sustainable Development for Italy, Part I: An Integrated Model-Based Report. Millennium Institute Professional Paper Nr. 17. Millennium Institute, Arlington (Va.). August 1998.

Biatour B.,C. Kegels (2008), Growth and productivity in Belgium, Working paper 17-08, Federal Planning bureau, Brussels, 2008.

Bleys B. (2015), De Index voor Duurzame Economische Welvaart (ISEW) voor Vlaanderen, 1990-2013, studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, MIRA, MIRA/2015/08, Universiteit Gent.

Bouwman AF, Kram T and Klein Goldewijk K. Integrated Modelling Global Environmental Change. An overview of IMAGE2.4. Netherlands Environmental Assessment Agency (MNP), Bilthoven, The Netherlands, 2006.

Bral L, Pact2020. Kernindicatoren Meting 2012. Studiedienst van de Vlaamse Regering. Diensten voor algemeen regeringsbeleid, 2012.

Brinkman A. Biological processes in the EcoWasp Ecosystem Model. IBN/DLO Report 93/6, 1993.

Broekx, S., De Nocker, L., Liekens, I., Poelmans, L., Sates, J., Van der Biest, K., Meire, P., Verheyen, K., 2014. Estimate of the Benefits Delivered by the Flemish Natura 2000 Network. Flemish Government Nature and Forestry Agency, p. 217.

Brouwers J., Peeters B., Van Steertegem M., van Lipzig N., Wouters H., Beullens J., Demuzere M., Willems P., De Ridder K., Maiheu B., De Troch R., Termonia P., Vansteenkiste Th., Craninx M., Maetens W., Defloor W., Cauwenberghs K. (2015) MIRA Klimaatrapport 2015. Vlaamse Milieumaatschappij i.s.m. KU Leuven, VITO en KMI. Aalst, Belgium, 147 p.

Buekers J., Int Panis L., 2013, Gezondheidsindicator blootstelling aan verhoogde ozon concentraties, studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, MIRA, MIRA/2013/13, VITO, 2014/MRG/49.

Buekers J., Torfs R., Deutsch F., Lefebvre W., Bossuyt M., Inschatting ziektebelasting en externe kosten veroorzaakt door verschillende milieufactoren in Vlaanderen, studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, MIRA, MIRA/2012/06, VITO, 2012/MRG/R/187, 2012.

CMap Tools. Institute for Human and Machine Cognition. <http://cmap.ihmc.us/>

Cobb, C. W.; Douglas, P. H. (1928). "A Theory of Production". American Economic Review 18 (Supplement): 139-165.

Coyle RG. System Dynamics Modelling, A Practical Approach. London: Chapman & Hall, 1996.

Cools et al., Impact-rapport in het kader van PAS, 2015.

D'Auria, F., Denis, Havik, Mc Morrow, Planas Raciborski, Röger, Rossi (2010), The production function methodology for calculating potential growth rates and output gaps, European Economy. Economic Papers 420, Brussels, 2010.

Dale MB. Systems Analysis and Ecology. Ecology 51(1), 2-16, 1970.

Daly, H. & Cobb, J. (1989), For the Common Good. Beacon Press, Boston.

Danckaert S., Deuninck J. & Van Gijsegem D. (2013) Food footprint: welke oppervlakte is nodig om de Vlaming te voorzien van lokaal voedsel? Een theoretische denkoefening, Departement Landbouw en Visserij, Brussel.

De Groof M. en Princen Y. Inventarisatie huishoudelijke afvalstoffen 2010. Openbare Vlaamse Afvalstoffen Maatschappij (OVAM). September 2011. 57 blz. <http://www.ovam.be/>

De Kok JL, Kofalk S, Berlekamp J, Hahn B, and Wind HG. From design to application of a decision-support system for integrated river-basin management, Water resources management 23, 1781-1811, 2009.

De Kok, JL en Engelen, G. Haalbaarheidsstudie systeemodynamische modellering. Eindrapport. Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek. Ref 2013/RMA/R/153. Augustus, 2013.

De Kok, J.L., Engelen, G., and Maes, J., 2015, Functional design of reusable model components for environmental simulation – A case study for integrated coastal zone management. Environmental Modelling and Software 68, 42-54.

De Koninck L., Botteldooren D. (2014), Actualisatie van de geluidsindicatoren, studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, MIRA, MIRA/2014/04, Universiteit Gent.

De Smedt, P. 2005. Verkennen van de toekomst met scenario's. Studiedienst van de Vlaamse Regering, Brussel.

Deutsch F., Vankerkom J., Veldeman N., Peelaerts W., Fierens F., Vanpoucke C., Trimpeneers E., Vancraeynest L., Bossuyt M., Verklarende factoren voor evoluties in luchtkwaliteit, studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, MIRA, MIRA/2010/07, VITO, 2010.

Deutsch F, Janssen L, Derden A, Viaene P, Veldeman N en Janssen S. Impact en kostprijs van verschillende emissiereductie-scenario's in de landbouwsector op verzurende deposities in de Natura 2000 gebieden in Vlaanderen, VITO rapport 2013/RMA/R/48, Studie in opdracht van Boerenbond, 2013.

Derbyshare D, Gardiner B., Waighs S. (2010), Pilot study on the estimation of regional capital stocks, a final report for the European Commission (Directorate General Regional Policy, Cambridge Econometrics, Cambridge, 2010.

Dhyne, E., Fuss, C., Main lessons of the NBB's 2014 Conference 'Total factor productivity: measurement, determinants and effects', Nationale Bank van België, 2014.

De Vogelaer, D., Gusbain D. D. Het Belgisch energiesysteem in 2050, wwaar naartoe, beschrijving van een referentiescenario voor België, Federaal Planbureau, Brussel, 2014.

Dumortier M, De Bruyn L, Hens M, Peymen J, Schneiders A, Van Daele T en Van Reeth W (Red.). Natuurverkenning 2030, Natuurrapport Vlaanderen. Mededeling van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek. INBO M.2009.7, 2009. www.nara.be

European Environment Agency (EEA). Modeling environmental change in Europe: towards a model inventory (SEIS/Forward) European Environment Agency Technical Report 11/2008, Copenhagen, Denmark. 2008.

European Environment Agency (EEA). European environment - State and Outlook 2015: Assessment of global megatrends, European Environment Agency, Copenhagen, 2015.

Engelen G, Van der Meulen M, Hahn B and Uljee I. MODULUS – A spatial modelling tool for integrated environmental decision-making - Synthesis. Final Report Contract ENV4-CT97-0685. Submitted to the Commission of the European Union. Directorate General XII, Environment (IV) Framework. Climatology and Natural Hazards Program, Brussels, Belgium, July, 2000.

Engelen G, Uljee I and Van de Ven K. WadBOS: Integrating Knowledge to Support Policy-making for the Wadden Sea. In: Planning Support Systems in Practice, Geertman S. and Stillwell J. (Eds). , 513-537, Springer, 2003.

Engelen G. Models in Policy Formulation and Assessment: The WadBOS Decision Support System. In: Environmental Modelling: Finding Simplicity in Complexity, edited by: John Wainwright and Mark Mulligan, p.257-271. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England, 2004.

Engelen G, Poelmans L, Uljee I, De Kok JL en Van Esch L. De Vlaamse Ruimte in 4 Wereldbeelden. Studie uitgevoerd in opdracht van het Steunpunt Ruimte en Wonen. Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek. Ref 2011/RMA/R/363. December. 2011a.

Engelen G, Van Esch L, Uljee I, De Kok JL, Poelmans L, Gobin A en Van der Kwast H. RuimteModel: Ruimtelijk-Dynamisch Landgebruiksmodel voor Vlaanderen. Eindrapport. VITO Rapport 2011/RMA/R/242. Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek. December, 2011b.

Featherston C and Doolan M. A Critical Review of the Criticisms of System Dynamics. Proceedings of the 30th International Conference of the System Dynamics Society. The 30th International Conference of the System Dynamics Society: St Gallen, Switzerland. 2012.

Federaal Planbureau. Input-outputanalyse. Modellen, Multiplicatoren, Linkages. Working Paper 12-12. September, 2012. www.plan.be

Federaal Planbureau. 2030 Climate and Energy Framework for Belgium. Impact assessment of a selection of policy scenarios up to 2050. Working Paper 03-15. April, 2015. www.plan.be

Federaal Planbureau en Algemene Directie Statistiek en Economische Informatie (FPB & ADSEI). Bevolkingsvooruitzichten 2013-2060. Bevolking, huishoudens en prospectieve sterftequotienten. April, 2014. www.plan.be

Fermi F., Fiorello D., Krail M., Schade W. (2014): Description of the ASTRA-EC model and of the user interface. Deliverable D4.2 of ASSIST (Assessing the social and economic impacts of past and future sustainable transport policy in Europe). Project co-funded by European Commission 7th RTD Programme. Fraunhofer-ISI, Karlsruhe, Germany. <http://www.assist-project.eu>

Foresight Land Use Futures. Systems maps. The Government Office for Science, London (UK), 2010.

Forrester JW. Principles of Systems. Cambridge (Ma.). Wright-Allen Press, 1968.

Forrester JW. Urban Dynamics. Pegasus Communications, 1969.

Forrester JW. World Dynamics. Cambridge (Ma.). Wright-Allen Press, 1971.

Forrester, J.W. and Senge, P.M. (1980). Tests for building confidence in system dynamics models. TIMS Studies in the Management Sciences 14, 209-228.

Franckx L, Mayeres I, Uljee I en Engelen G. Koppeling van ruimtemodel met transportmodel voor berekening toekomstscenario's, studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, MIRA, MIRA/2012/10, VITO, VITO/2013/TEM/R/29, 2013.

Gorzig B. (2007) Depreciation in EU Member States: empirical and methodological differences, paper for EU-KLEMS workshop, Capital Accounts, DIW, 2007.

Gregersen JB, Gijsbers PJA, Westen SJP. OpenMI: Open modelling interface. Journal of Hydroinformatics 9 (3), 175-191, 2007.

Havik K., Mc Morrow K., Orlandi F., Planas C., Raciborski R., Röger W., Rossi A., Thum-Thysen A. and Vandermeulen V. (2014), "The Production Function Methodology for Calculating Potential Growth Rates & Output Gaps", European Economy, Economic Paper No. 535, November.

Holland, M., (2014), Implementation of the HRAPIE recommendations for European Air pollution CBA work, Study for IAASA and the EC, EMRC, 2014.

ImagineThat Inc, 2013. User Manual ExtendSim 9. www.extendsim.com

IRCEL, 2013, Jaarrapport luchtkwaliteit in België, Intergewestelijke cel voor het leefmilieu.

Inghels D en Dullaert W. An analysis of household waste management policy using system dynamics modelling. *Waste Management & Research* 29(4), 351-70, 2010.

Jahan, S and Mahmud, AS. What is the Output Gap? Back to Basics. *Finance and Development*, September 2013. <http://www.imf.org/external/pubs/ft/fandd/2013/09/pdf/basics.pdf>

Janssen LHJM, Okker VR en Schuur J. Welvaart en Leefomgeving. Een scenariostudie voor Nederland in 2040. Centraal Planbureau, Milieu- en Natuurplanbureau, en Ruimtelijk Planbureau. 2006.

Kim DH. Guidelines for Drawing Causal Loop Diagrams. *The Systems Thinker* Vol. 3(1), Pegasus Communications, 1992. <http://www.thesystemsthinker.com/tstgdlines.html>

Kram T en Stehfest E. The IMAGE model: history, current status and prospects. In: *MNP – Integrated modelling of global environmental change. An overview of IMAGE2.4*. Netherlands Environmental Assessment Agency (MNP). Bilthoven, The Netherlands, 2006.

Kramer NJTA en Smit J. *De, Systeemdenken*, 5e ed., Stenfert-Kroese, Leiden/Antwerpen, 1991.

Kuhk A, Engelen G, Van den Broeck P, Lievois E, Schreurs J en Moolaert F. “De toekomst van de Vlaamse Ruimte in een veranderende wereld: Aanzet tot scenario-analyse voor het ruimtelijk beleid in Vlaanderen, vertrekkend van de studie Welvaart en Leefomgeving Nederland (2006) / kwalitatieve analyse”, 109 p, 2011.

Lebrun, I. Potential output growth in Belgium since the crisis. Lower and more uncertain. Federal Planning Bureau. Working paper 4-15. June, 2015. www.plan.be

Lejour A. Quantifying Four Scenarios for Europe. CPB Document 38. Centraal Planbureau. The Netherlands. 2003.

Lighthouse Leadership Ltd. A Critique of the “World3” Model Used in “The Limits to Growth”. Essay completed as part of MSc S. Rogers in Environmental Systems Engineering, University College London, UK. April, 2010.

Departement Leefmilieu, Natuur en Energie (LNE), 2010. Ontwerp Milieubeleidsplan 2011-2015, D/2010/3241/122.

Maes J. The WadBOS ecosystem model as an example for building block design and model documentation. Extend training material for the EU-FP6 project SPICOSA. Flemish Institute for Technological Research (VITO). 2008.

Meadows, DH. *Limits to Growth*. NewYork: University Books , 1972.

Meadows D, Randers J en Meadows D. *Limits to Growth, the 30-Year Update*. Routledge, 2004.

Meadows D. *Thinking in Systems. A primer*. Earthscan, 2008.

Meynaerts E., Ochelen S. en Vercaemst P. Milieukostenmodel voor Vlaanderen – Achtergrond-document. Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek. Maart, 2003.

Millenium Institute. A General Introduction to the Threshold21 Integrated Development Model. Arlington, Va. 2013a. www.millenium-institute.org

Millenium Institute. A Technical Introduction to the Threshold21 Integrated Development Model. Arlington, Va. 2013b. www.millenium-institute.org

MIRA (2005) Milieurapport Vlaanderen, Achtergronddocument 2005, Materiaalstromen in Vlaanderen, Gerlo J., Vanhoutte G., Goeminne G. & Vander Putten E., Vlaamse Milieumaatschappij, www.milieurapport.be

MIRA, 2007, Inschatting van het watergebruik in de landbouw op basis van nieuwe en geactualiseerde kengetallen per landbouwactiviteit Studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, MIRA Eindrapport MIRA/2007/04.

MIRA, 2013, Milieurapport Vlaanderen, Themabeschrijving kwaliteit oppervlaktewater. Peeters B., Vlaamse Milieumaatschappij, www.milieurapport.be

Montes de Oca Munguia O, Andrew O and Lennox J. A Quantitative Model in Support of the Four Futures for New Zealand Scenarios. New Zealand Centre for Ecological Economics. In: The Landcare Research Scenarios Workgroup. 4 Future Scenarios for New Zealand. Work in Progress Edition 2. Manaaki Whenua Press. Lincoln, New Zealand, 2007.

Montes de Oca Munguia O, Andrew O and Lennox J. The Use of A New Zealand Dynamic Ecological-Economic Model To Address Future Scenarios. In Oxley, L. and Kulasiri, D. (eds) MODSIM 2007 International Congress on Modelling and Simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand. pp. 1131-1137. December, 2007.

Mulligan M. MedAction. Development, testing and application of the climate, hydrology and vegetation components of a Desterification Policy Support System. Final Report for work undertaken as part of MedAction: Policies to combat desertification in the Northern Mediterranean region supported by the EC-DGXII under contract EVK2-2000-22032. 2000.

Nam K., Selin N., Reilly J., Paltsev S. (2009), Measuring Welfare Loss caused by air pollution in Europe, a CGE analysis, MIT JP on Science and policy of global change, report N° 178, Cambridge USA, 2009.

NBB (2014), Computing Capital Stock in the Belgian National Accounts according to the ESA 2010, Nationale Bank van België, 2014.

OECD (2012), *Economic Policy Reforms 2012: Going for Growth*, OECD Publishing, Paris. DOI: <http://dx.doi.org/10.1787/growth-2012-en>

Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD). OECD Environmental Indicators. Development, Measurement and Use. Reference Paper. OECD Environment Directorate. Environmental Performance and Information Division. 37 pp. Paris, 2003.

Op 't Eyndt T, Engelen G, Cools I, Janssen S, Lodewijks P en De Nocker L. Begeleidingsopdracht toekomstverkenningen milieu en natuur. Eindrapport. Studie uitgevoerd in opdracht van de LNE – Planningsgroep. Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek. Ref: RMA/8118/2011-0002, 2012.

Ostblom G., Samakovlis, E. (2004), Costs of climate policy when pollution affects health and labour productivity a general equilibrium analysis applied to Sweden, Working paper N° 93, NIER, Stockholm, 2004.

Paredis E, Vander Putten E, Maes F, Larosse J, Van Humbeeck P, Lavrijsen J, Van Passel S en De Jonge W. Vlaanderen in transitie?, Milieuverkenning 2030, Milieurapport Vlaanderen, VMM, Aalst, p. 345-374, 2009. www.milieurapport.be

Pelfrene E. De nieuwe bevolkingsvooruitzichten 2007-2060. Een vergelijking met vorige prognoses. SVR-Rapport 2009/03. Studiedienst Vlaamse Regering. Brussel, 2009.

Platteau J., Van Gijsegem D., Van Bogaert T. & Maertens E. (reds.) (2012), Landbouwrapport 2012, Departement Landbouw en Visserij, Brussel.

Prigogine I. From Being To Becoming. Freeman. ISBN 0-7167-1107-9, 1980.

Randers J. (Ed.). Elements of the System Dynamics Method. Cambridge (Ma.). Productivity Press, 1980.

Rotmans J, 1990. IMAGE, An integrated model to assess the greenhouse effect, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands.

Schade W. (2005): "Strategic Sustainability Analysis: Concept and application for the assessment of European Transport Policy". Dissertation, NOMOS-Verlag, ISBN 3-8329-1248-7, Baden-Baden.

Senge PM. The Fifth Discipline: The Art and Practice of the Learning Organization. New York: Doubleday/Currency. Second Ed. 2006.

Stave SK. Using system dynamics to improve public participation in environmental decisions. System Dynamics Review 18(2), 139-167, 2002.

Sterman John D. Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World, McGraw Hill, 2000.

Studiedienst van de Vlaamse Regering (SVR). Bijdrage Vlaamse administratie aan het regeerprogramma van de aantredende Vlaamse Regering. Deel 1. Algemene omgevingsanalyse voor Vlaanderen. 200 p. April, 2009.

Torfs R., Deutsch, F., Schrooten, L., Broekx, S., Vankerkom, J., Matheeussen, C., Roekens, E., Fierens, F., Dumont, G., Bossuyt, M., MIRA rapport Achtergronddocument Zwevend stof, 2006.

Turc, L. 1955, Le bilan d'eau-sols. Relation entre Les précipitations, l'évaporation et l'écoulement'. Ann. Agro., 5, 491-596 et 6, 5-131.

Turner GM. A comparison of The Limits to Growth with 30 years of reality. Global Environmental Change 18(3), 397-411, 2008.

Uljee I and Engelen G. WadBOS User Manual. WadBOS Version 2.1 International Edition. RIKS bv. Maastricht, the Netherlands. 2002.

- Van Delden H, Luja P, Engelen G. Integration of multi-scale dynamic spatial models of socio-economic and physical processes for river basin management. *Environmental Modelling & Software* 22 (2), 223-238, 2007.
- Van Deursen, W.P.A., 1995. *Geographical Information Systems and Dynamic Models*. Ph.D. thesis, Utrecht University, NGS Publication 190, 198 pp. www.carthago.nl
- Van Steertegem M (Red.). *Milieuverkenning 2030. Milieurapport Vlaanderen*. Vlaamse Milieumaatschappij. November, 2009. www.milieurapport.be
- Van Steertegem M (Red.). *Milieurapport Vlaanderen. MIRA Indicatorrapport 2012*. Vlaamse Milieumaatschappij. 162 p, 2012.
- Vanhulsel M., *Referentietask Kenniscentrum Luchtkwaliteitsmodellering – Emissiefactoren transport*, 2015.
- Vermaat J, Broekx S, Van Eck B, Engelen G, Hellmann F, De Kok JL, Van der Kwast H, Maes J, Salomons W, Van Deursen W. Nitrogen source apportionment for the catchment, estuary and adjacent coastal waters of the river Scheldt. *A Systems Approach for Sustainable Development in Coastal Zones. Ecology and Society* 17(2):30, 2012.
- Vervaet M., Huygh K., Rossi E. en Smeets K. *Bedrijfsafvalstoffen productiejaar 2004-2010. Openbare Vlaamse Afvalstoffen Maatschappij (OVAM)*, November 2012. 31 blz. <http://www.ovam.be/>
- Vlaamse Milieumaatschappij (VMM) , 2012, *Vernieuwde kwantificering van de verliezen van stikstof en fosfor vanuit de landbouw naar oppervlaktewater. Voorlopig eindrapport*. Studieopdracht uitgevoerd door het Departement Aard- en Omgevingswetenschappen van de Katholieke Universiteit Leuven en de Bodemkundige Dienst van België.
- Vlaamse Milieumaatschappij (VMM). *Technische Voorschriften. Modelvereisten voor het waterkwaliteitsmodel*. Ongepubliceerd bestek. 2013.
- Vlaamse Milieumaatschappij (VMM), 2014a. *Megatrends: ingrijpend, maar ook ongrijpbaar? Hoe beïnvloeden ze het milieu in Vlaanderen? MIRA Toekomstverkenning 2014*, Vlaamse Milieumaatschappij, Aalst. www.milieurapport.be
- Vlaamse Milieumaatschappij (VMM) , 2014b. *Drinkwaterbalans voor Vlaanderen 2013*.
- Vlaamse Milieumaatschappij (VMM), 2014c. *Lozingen in de lucht 2000 – 2013*.
- Vlaamse Milieumaatschappij (VMM), 2015, *Fysisch-chemische kwaliteit oppervlaktewater 2014*.
- Vlaamse Milieumaatschappij (VMM), 2015, *dynamische kernset milieudata, te raadplegen op de website* www.milieurapport.be
- Vlaamse Milieumaatschappij (VMM), 2015b, *Emissierapportering updates inventarissen 2015*.
- Voinov A. *Systems Science and Modeling for Ecological Economics*, Academic Press, 2008.

Vries, B. de, J. Bollen, L. Bouwman, M. den Elzen, M. Janssen and E. Kreileman, 2000. Greenhouse-gas emissions in an equity-, environment- and service-oriented world: an IMAGE-based scenario for the next century, *Technological Forecasting and Social Change*, *Technological Forecasting and Social Change* 63(2-3): 137-174.

Vrontisi, Z. et al., (2014), *Impact assessment of European Clean Air policies in a CGE framework*, JRC Technical reports, Spain, EC, JRC, 2014.

WHO (2014), *Burden of disease from ambient air pollution for 2012*, Public health, environmental and social determinants of health (PHE), Geneva, World Health Organisation, 2014.

Winz I, Brierley G and Trowsdale S. *The Use of System Dynamics Simulation in Water Resources Management*. *Water Resources Management* 23, 1301-1323, 2009.

Wolstenholme EF and Coyle RG. *The development of system dynamics as a methodology for system description and qualitative analysis*. *Journal of the Operations Research Society* 34(7), 569-581, 1983.

Wolstenholme EF. *System enquiry; a system dynamics approach*. Wiley, Chichester, 1990.

Wuyts K, Staelens J, De Schrijver A, Verheyen K, Overloop S, Vancraeynest L, Hens M en Wils C. *Overschrijding kritische lasten*. Wetenschappelijk Rapport. MIRA 2009, NARA 2009, VMM. 2009. INBO.R.2009.55.

ONLINE BRONNEN

<http://www.plan.be/databases/databases.php?lang=nl>

<http://www4dar.vlaanderen.be/sites/svr/Cijfers/Pages/Excel.aspx>

<http://www.milieuraapport.be/nl/publicaties/toekomstverkenningen/megatrends>

<http://www.welvaartenleefomgeving.nl>

www.extendsim.com

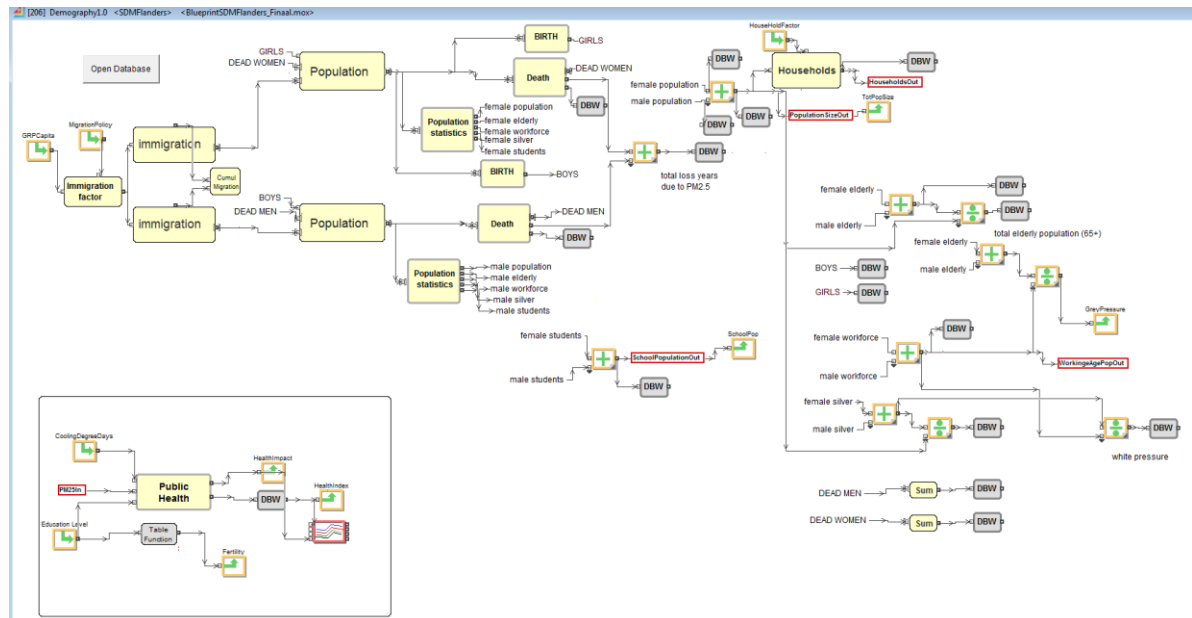
BIJLAGE 1 SNELSTARHANDLEIDING EXTENDSIM® EN MODL

De blauwdruk van een systeemdynamisch model voor Vlaanderen is ontwikkeld gebruik makend van ExtendSim (www.extendsim.com). ExtendSim® is een tool geschikt voor het ontwikkelen van dynamische modellen op basis van herbruikbare **modelbouwstenen**. Hiermee kan visueel geprogrammeerd worden door modelbouwstenen te verbinden aan de hand van standaard beschikbare modelbouwstenen en zelf ontworpen modelbouwstenen. Nieuwe modelbouwstenen kunnen ook samengesteld worden door bestaande modelbouwstenen in één nieuw hiërarchisch opgebouwde modelbouwsteen of Hierarchy block (H-Block) samen te voegen, een nieuwe modelbouwsteen te programmeren aan de hand van de geïntegreerde **ModL programmeertaal** (die op de programmeertaal C is gebaseerd), of een combinatie van deze twee opties. Een volledig overzicht van de mogelijkheden wordt besproken in de gebruikershandleiding, die vrij beschikbaar is via de website (www.extendsim.com). Hierin komt eveneens de mogelijkheden van de ModL-programmeertaal aan bod. In de volgende beschrijving wordt beknopt besproken hoe ExtendSim® is toegepast voor de ontwikkeling van dit specifieke model, voor uitgebreide informatie wordt naar de handleiding doorverwezen. Recentelijk werden een aantal generieke richtlijnen geformuleerd voor het ontwerp van herbruikbare modelbouwstenen, wat het ontwerp en onderhoud van systeemmodellen ten goede komt (De Kok et al., 2015).

Eveneens in bijlage worden de verschillende modelbouwstenen waaruit het model is opgebouwd opgelijst en de programmeercode van elke modelbouwsteen opgelijst. In het model worden verschillende modelbouwstenen samengenomen tot **H-blocks**, hiërarchisch samengestelde modelbouwstenen die zelf bestaan uit een combinatie van modelbouwstenen. Op hoofdlijnen wordt het model dus voorgesteld door de interacties van verschillende H-blocks die elk een thematische module van het systeemdynamisch model voorstellen, zoals getoond in Figuur 3-1. Elke thematische module bestaat weer uit verschillende interacties tussen modelbouwstenen (Figuur 8-1), die zelf eventueel weer als H-block zijn opgebouwd. Door verder in te zoomen op de processen in het model komt tenslotte de ModL-code van de individuele modelbouwstenen in beeld.

Individuele modelbouwstenen kunnen door middel van **connectoren** gegevens en variabelen uitwisselen. Invoer-variabelen hebben een naamgeving met als postfix 'In', uitvoer-variabelen eindigen op 'Out'. Naast doorgegeven van variabelen via connectoren die modelbouwstenen verbinden kan er eveneens via **databases** gecommuniceerd worden. Elke database is opgebouwd uit **tabellen** met rijen ("records") en kolommen ("fields") die vanaf 1 genummerd zijn. De ene modelbouwsteen kan resultaten opslaan in een databank die door een andere modelbouwsteen ingelezen worden. Beide methodes zijn gebruikt binnen dit project. Connectoren hebben immers het voordeel van (terug-) koppelingen visueel voor te stellen. Databanken blijven na een simulatie beschikbaar om resultaten te analyseren en gebruik van databanken vermijden dat het model een onoverzichtelijk kluwen van connectoren wordt. Elke modelbouwsteen in het model is gekenmerkt door een uniek 'global block number'. Alle parameter-instellingen en resulterende variabelen die worden opgeslagen in een databank, kunnen opgevraagd worden via het database menu. Verscheidene grafieken van tijdsevolutie van variabelen of variaties van eindresultaten met verschillende startinstellingen worden in het model aangemaakt. Alle resultaten kunnen eveneens geëxporteerd worden voor verdere analyse of grafische voorstelling. Er is gewerkt met een databank per thema waarin alle tabellen van dit thema zijn opgenomen. ExtendSim bewaart elke databank als een afzonderlijk bestand in een **modelbibliotheek** met de extensie ".lix". Een model wordt bewaard als een bestand met de extensie ".mox".

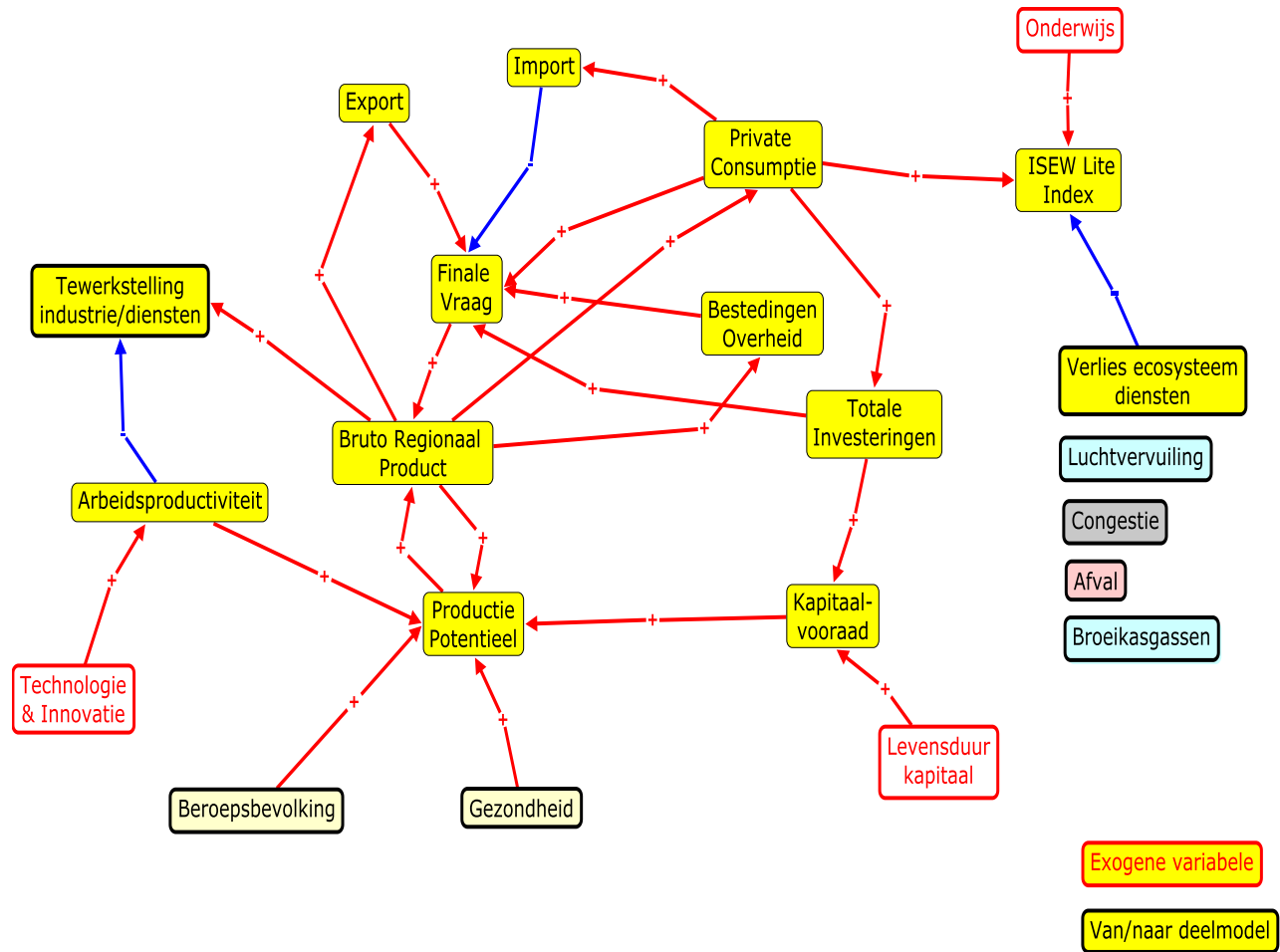
Het systeemmodel is in ExtendSim opgezet voor het doorrekenen van de evolutie doorheen de tijd, aan de hand van discrete tijdstappen. In elke tijdstap wordt de waarde van alle variabelen in het model berekend. Omwille van de vele koppelingen en terugkoppeling is de simulatievolgorde tussen de verschillende modelbouwstenen hierbij van groot belang. De simulatievolgorde kan getoond worden via 'Model – Show Simulation order'. De standaard volgorde van het doorrekenen van de modelbouwstenen is gebaseerd op de wijze waarop gegevens doorgegeven worden ("Flow Order"), maar kan per modelbouwsteen worden ingesteld als dat nodig. Een centrale controle van de simulatievolgorde, waarbij alle modelbouwstenen gelijktijdig worden doorgerekend, valt aan te verkiezen (zie ook HOOFDSTUK 8).



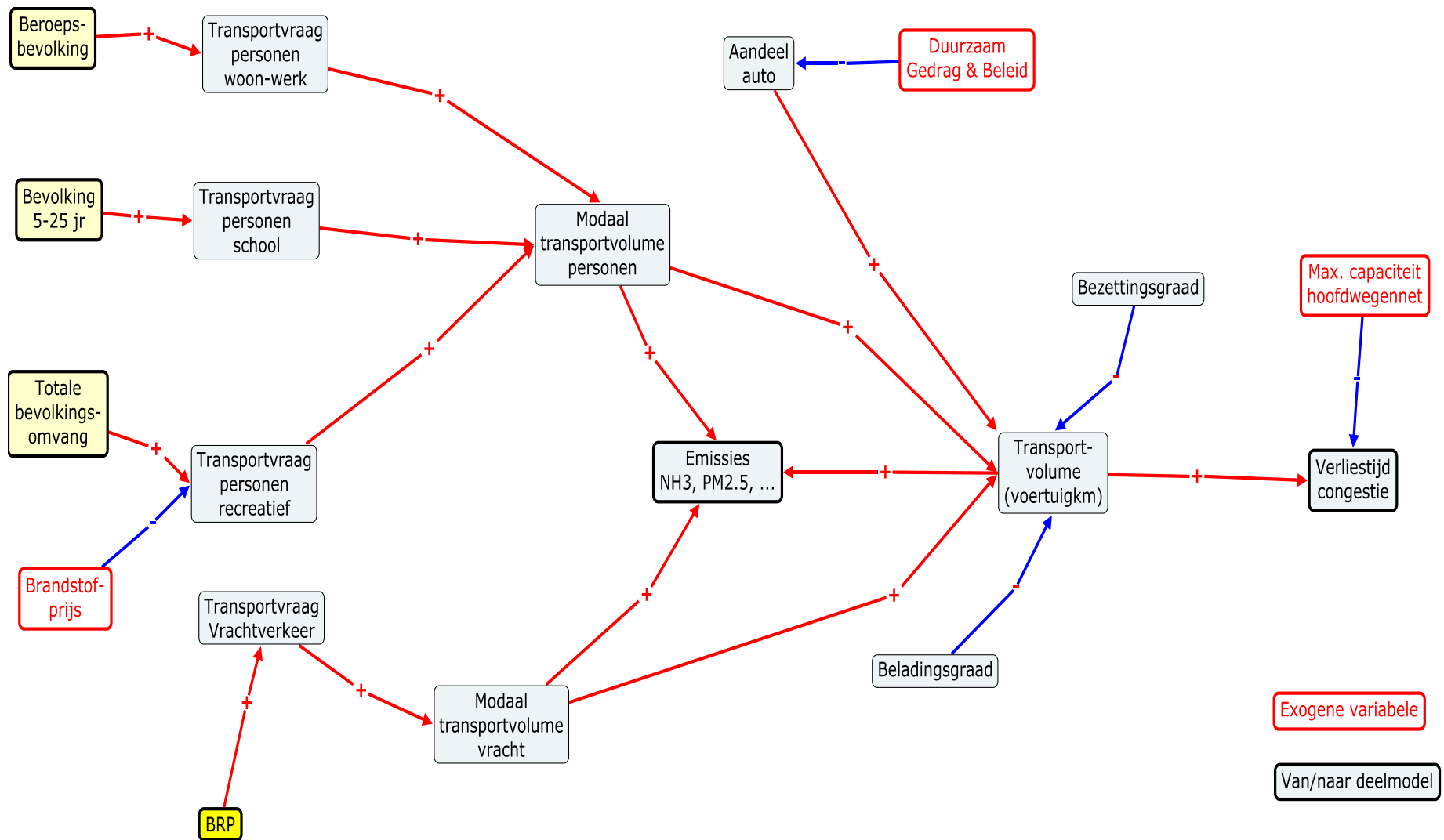
Figuur 8-1 Hergebruik van modelbouwstenen in het deelmodel voor de Demografie.

Om de ModL code van de modelbouwstenen (zie Bijlage 3 voor een overzicht) begrijpelijker te maken, volgt hier een korte bespreking van een aantal belangrijke functies. Algemeen is de code opgezet zoals C code. De geïntegreerde code editor maakt via kleuren de code overzichtelijker, commentaar wordt rood weergegeven, code zwart en standaard functies ExtendSim in blauw. Onderstaande tabel bespreekt de belangrijkste functies die voor dit model zijn toegepast.

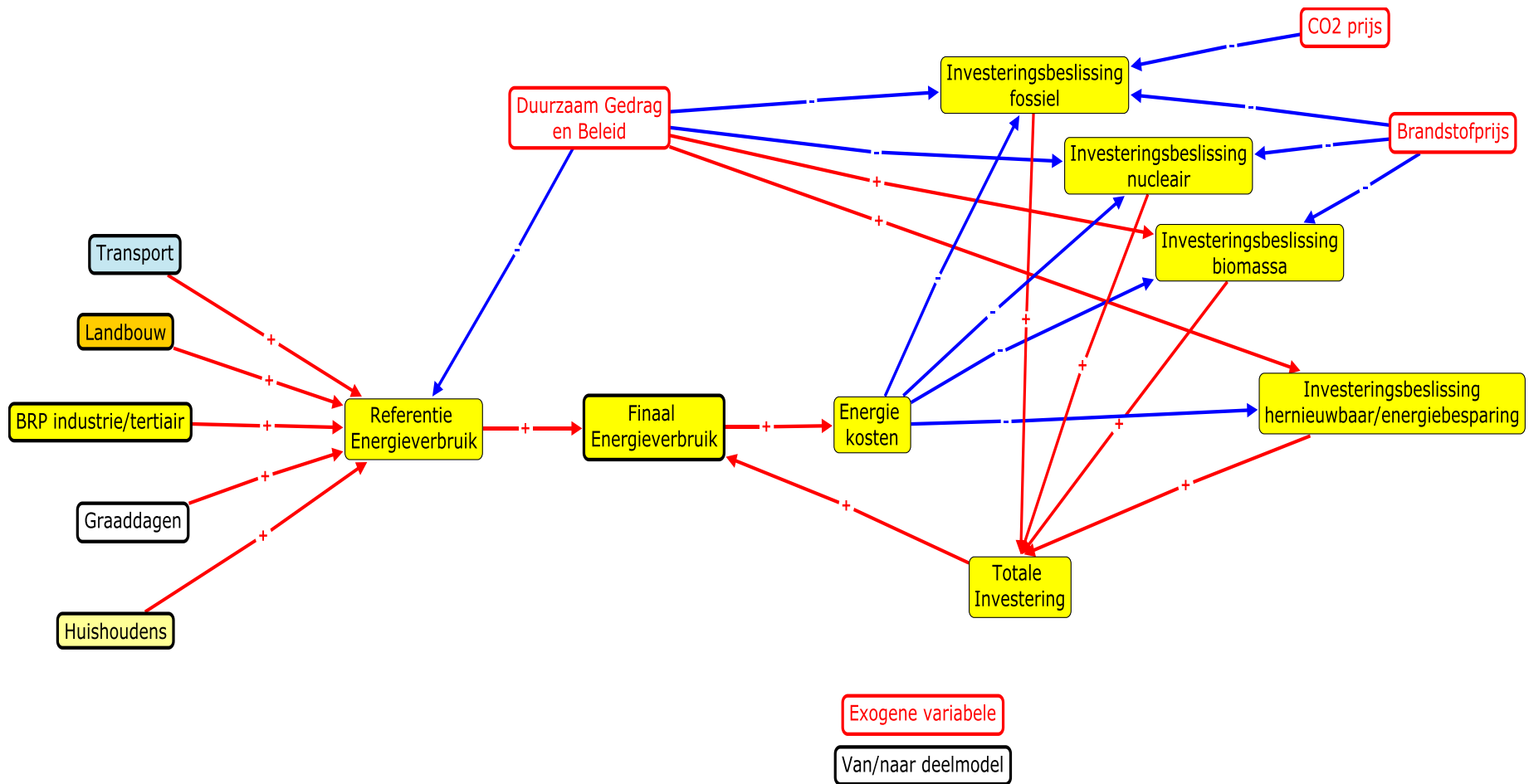
ModL Functie	Toepassing
# include	Verwijzing naar externe code
//	Start van commentaar die geen onderdeel van de uitgevoerde code vormt
{ }	Start en einde van een afzonderlijk onderdeel van de code zoals if-statements en for-loops
abort	Afbreken simulatie
CurrentSim	Index voor simulatie als meerdere simulaties worden uitgevoerd (bijvoorbeeld bij modelkalibratie)
CurrentStep	Step in simulatie
CurrentTime	Simulatietijd (tussen 2010 en 2050 voor dit systeemmodel)
DBDatabaseGetIndex	Opvragen van het index-nummer van een bepaalde databank
DBDataGetAsNumber	Opvragen individuele record uit een tabel binnen een databank
DBDataGetAsString	Opvragen van een string uit een tabel van een databank
DBDataSetAsNumber	Opslaan getal individuele record in een tabel van een databank
DBDataSetAsString	Opslaan string in een tabel van een databank
DBTableGetIndex	Opvragen van het index-nummer van een tabel binnen een databank
Deltatime	Tijdstap
EndTime	Eindtijd simulatie (2050 voor dit systeemmodel)
GetConBlocks	Opvragen van Global block numbers van modelbouwstenen waarmee een connector is verbonden
GetConNumber	Opvragen nummer van één bepaalde connector
GetPassedArray	Inlezen array
MakeArray	Definitie dimensies van een array (matrix die een variabele opslaat)
MyBlockNumber	Opvragen van Global Block Number, een referentie voor elk individueel modelblok, ondermeer toegepast voor foutmeldingen
NoValue	De waarde van een variabele is onbepaald
NumSims	Aantal simulaties
NumSteps	Aantal stappen
on checkdata	Mogelijkheid om in te grijpen in simulatie indien niet alle invoerdata voor handen zijn
on createblock	Geldig indien een modelleur een modelbouwsteen uit de modelbibliotheek in het model plaatst
on endsim	Onderdeel van de code dat na de laatste simulatiestap wordt uitgevoerd
on initsim	Onderdeel van de code dat bij initialisatie van het modelblok wordt uitgevoerd
on simulate	Onderdeel van de code afbakenen dat elke simulatiestap wordt uitgevoerd
PassArray	Doorgeven array
StartTime	Begintijd simulatie (2010 voor dit systeemmodel)
usererror	Schermboodschap voor modelgebruiker
winshellexecute	Aansturing externe software (bijvoorbeeld RuimteModel)



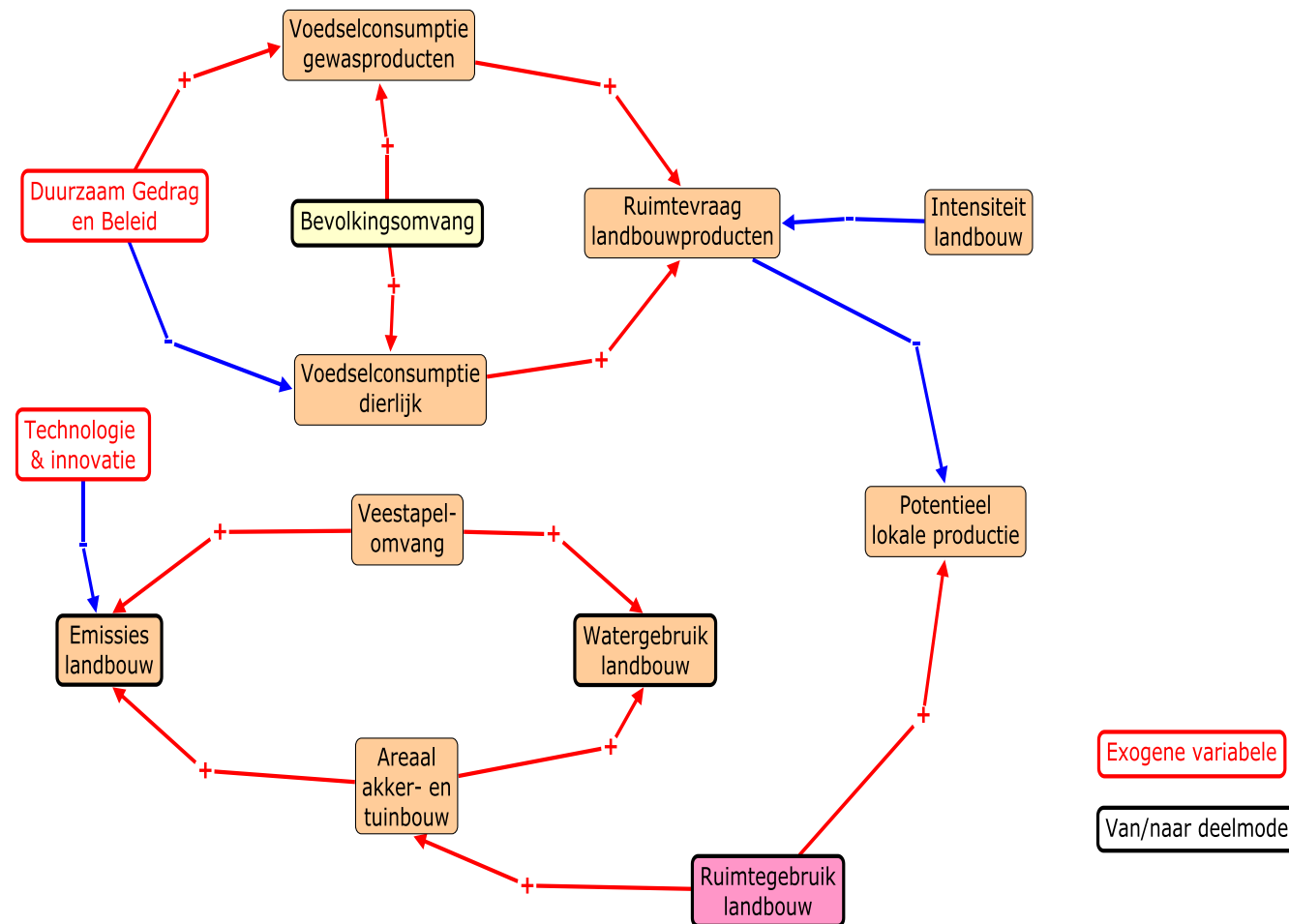
Figuur 8-3 Systeemdiagram voor het deelsysteem "Economie".



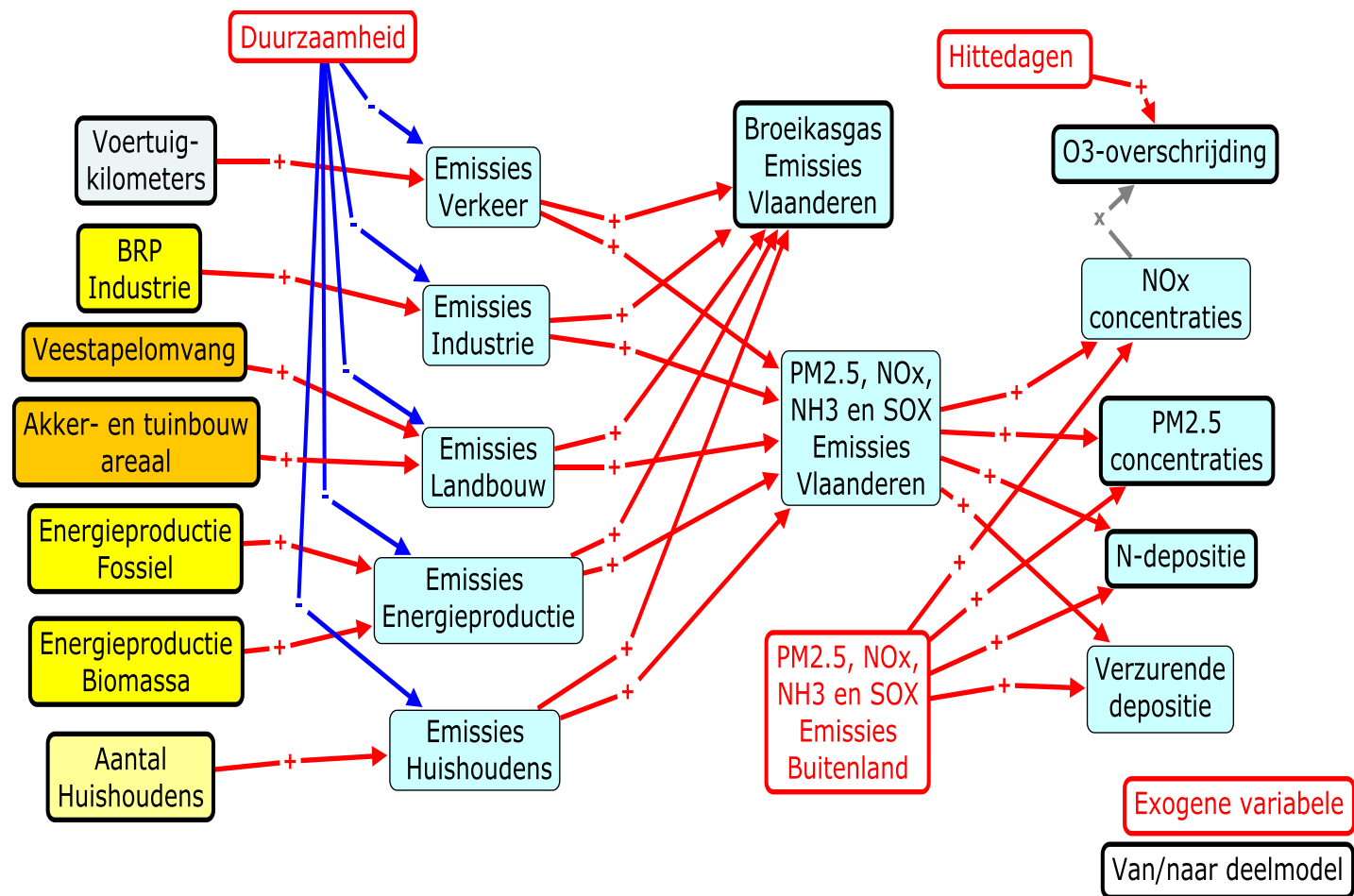
Figuur 8-4 Systeemdiagram voor het deelsysteem "Mobiliteit".



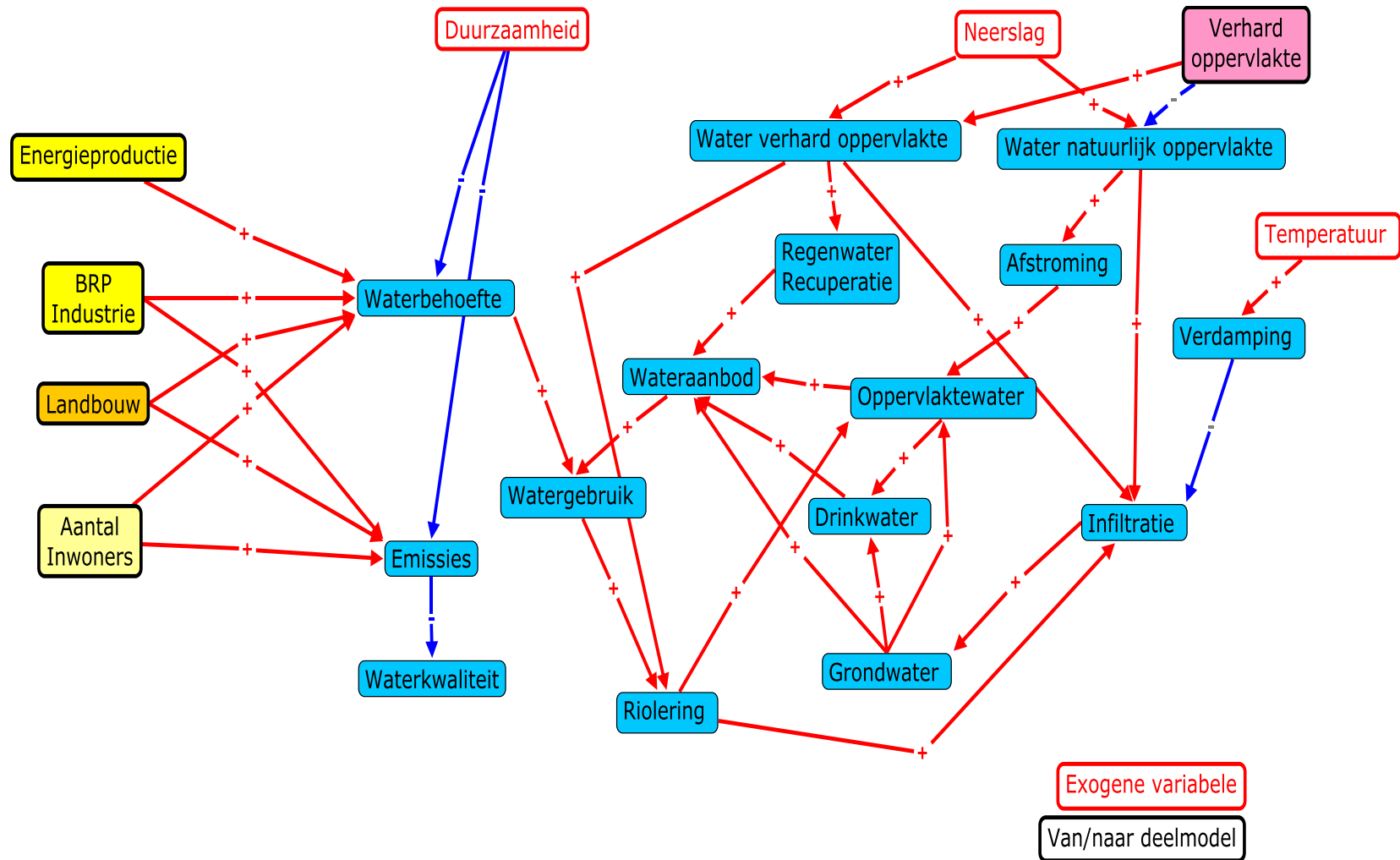
Figuur 8-5 Systeemdiagram thema "Energie".



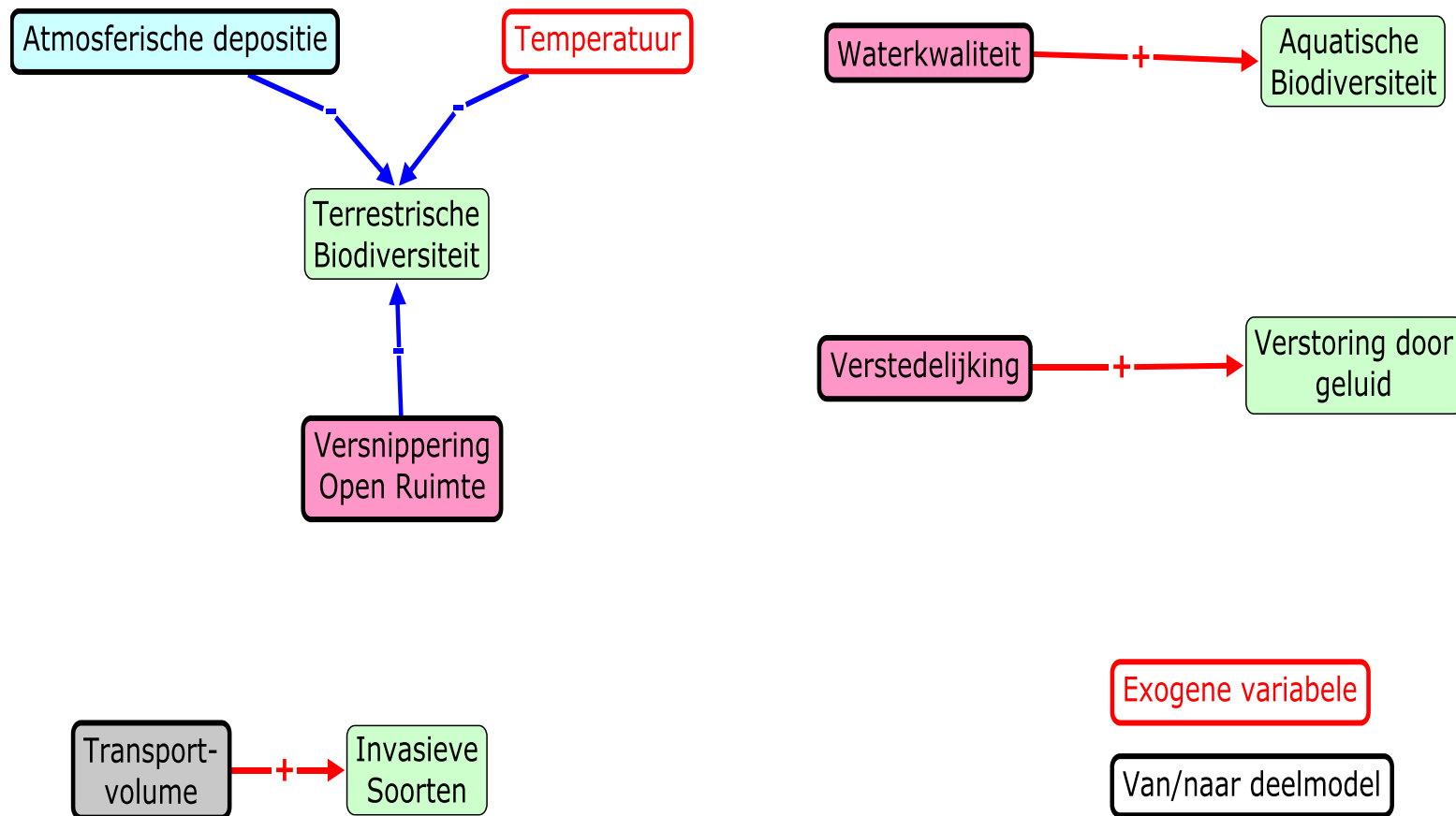
Figuur 8-6 Systeendiagram deelsysteem "Landbouw & Voeding".



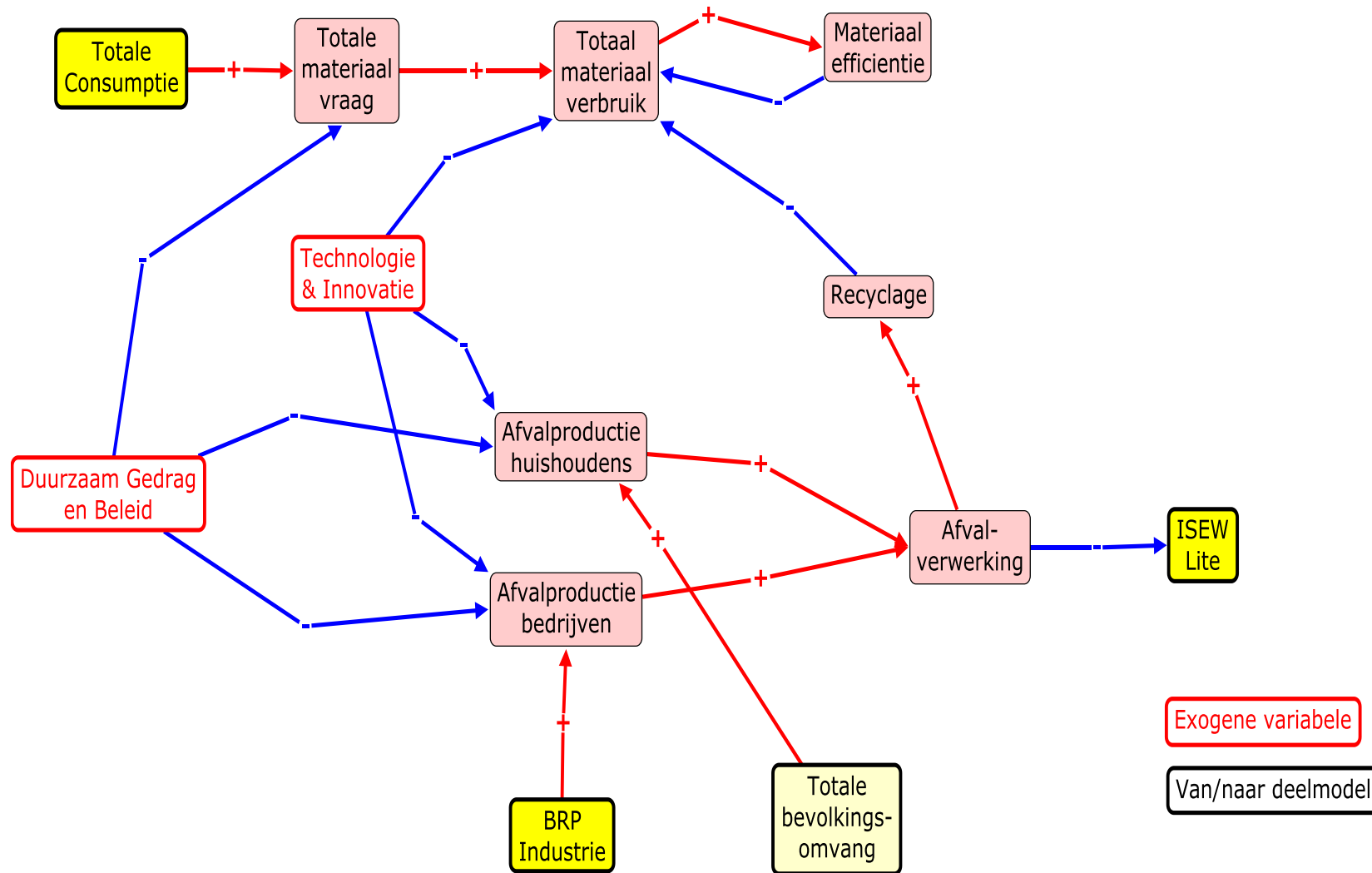
Figuur 8-8 Systeendiagram thema "Luchtkwaliteit".



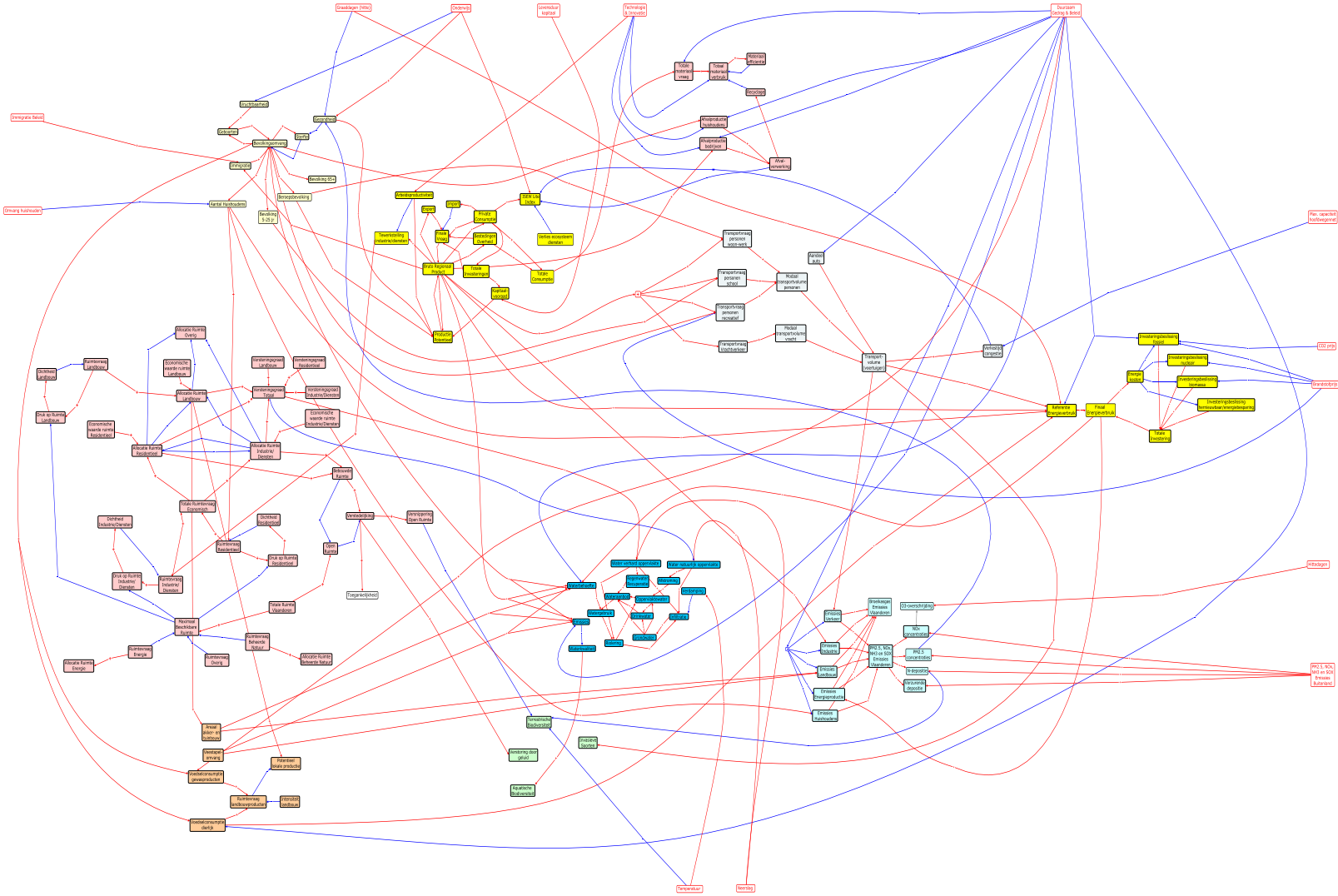
Figuur 8-9 Systeemdiagram thema "Water".



Figuur 8-10 Systeemdiagram deelsysteem "Natuur en Milieu".



Figuur 8-11 Systeemdiagram voor het deelsysteem "Afval en Materialen".



Figuur 8-12 Systemdiagram totale systeem

BIJLAGE 3: MODELBOUWSTENEN MODL

Thema	Modelbouwsteen	Functie	Invoer
Demografie	Population	Bevolkingsomvang Vlaanderen naar leeftijdsjaar (0-120) en geslacht	Geboorten Sterften Immigratie
	Birth3.2	Geboorten	Bevolkingsopbouw
	Death2.4	Sterfte	Bevolkingsopbouw
	Immigration	Total immigratie naar geslacht	BRP per hoofd en factor MigrationPolicy
	PublicHealth*	Index gezondheid t.o.v. 2010	Graaddagen zomer, PM2.5 en Onderwijsniveau
	Households	Aantal huishoudens	Totale bevolkingsomvang HouseholdFactor
Economie	Gross Regional Product	Bruto regionaal product	Finale vraag, productiepotentieel
	Potential Output	Productiepotentieel (kapitaal en arbeid)	Kapitaal, arbeid, technologie, gezondheid
	Final Demand	Finale vraag	Export, import, investeringen, totale consumptie (privaat en overheid)
	Export & Import	Export en import volume	Bruto regionaal product, totale consumptie,
	Private Consumption	Consumptie huishoudens en bedrijven	Bruto regionaal product
	Govt Spending	Overheidsuitgaven	Bruto regionaal product
	Total Investment	Totale investeringen	Totale consumptie
	Capital Stock	Kapitaalvoorraad	Investeringen
	ISEW Lite	Aangepaste duurzaamheidsindicator ISEW Lite	Private consumptie, milieukosten
	Mobiliteit	Transport Demand	Transportvraag personen- en vrachtverkeer
Modal Split		Transportvolume personen- en vrachtverkeer naar transportmodus Verliestijd congestie	Transportvraag, weggcapaciteit
Landbouw	Food Consumption	Ruimtevrraag voedselvoorziening (food footprint)	Bevolkingsomvang, duurzaam gedrag & beleid, technologie
	Agriculture Impacts	Emissies en watergebruik	Areaal landbouw
Natuur	Noise	Geluidsverstoring	Verstedelijking
	Invasive species	Invasieve soorten	Verkeersvolume
	MSA Terrestrial	Biodiversiteit terrestrische soorten (index)	Temperatuur, afstand wegennet, versnippering open ruimte, overschrijding kritieke last N
	Aquatic Biodiversity*	Biodiversiteit aquatische soorten (index)	Verstedelijking
Afval & Materialen	Material Demand	Materiaalvraag huishoudens en bedrijven (Mton)	Totale consumptie, duurzaamheid
	Material Use	Totaal materiaalgebruik huishoudens en bedrijven	Materiaalvraag, technologie en recycling
	Waste Production	Afvalproductie huishoudens en industrie	Bevolkingsomvang, BRP industrie
	Waste Processing	Verbranding en recycling van afval	Afvalproductie
Ruimtegebruik	Land Pressure	Ruimtevrraag en druk op ruimte voor bevolking, industrie, diensten, landbouw, natuur en overige sectoren	Bevolkingsomvang, tewerkstelling industrie en diensten
	Land Allocation	Ruimtegebruik bevolking, industrie, diensten, landbouw, natuur en overige sectoren	Ruimtevrraag
Lucht	Emissions	Emissies bevolking, landbouw, industrie, diensten en transport	Bevolkingsomvang, BRP industrie, diensten, areaal landbouw en transportvolume, duurzaamheid
	Emissions Total	Totale emissies CO2, NOx, PM2.5, SOx en NH3	Emissies bronnen
	Foreign Emissions	Emissies buitenland	
	Concentration	Concentratie CO2, NOx, PM2.5, SOx en NH3	Totale emissies
	N-Deposition	Atmosferische stikstof depositie	Emissies NOx en NH3
	O3	Overschrijdingsdagen O3	Graaddagen, concentratie NOx
	Acid Deposition	Zure depositie	Concentratie SOx, NOx, NH3

Water	ET Pot	Potentiële evapotranspiratie	temperatuur
	ET Actual	Actuële evapotranspiratie	ETpot en neerslag
	Surface Water	Waterbalans voor de niet verharde oppervlakte	Neerslag, fractie verhard, ETact
	Rainwater Household, Industry, Agriculture	Regenwater recuperatie door huishoudens, industrie en landbouw	Neerslag, verharde oppervlakte, Fracties recuperatie in referentiejaar en toename van de recuperatie
	Demand Household, Industry, Agriculture	Waterbehoefte huishoudens, industrie en landbouw voor drink-, regen-, grond- en oppervlaktewater	BRP, bevolking, oppervlakte landbouw en aantal dieren, neerslag, regenwaterrecuperatie
	Cooling Water Demand Energy	Hoeveelheid water die voor koeling wordt gebruikt en nadien niet terug in de cyclus wordt gebracht	Hoeveelheid energie geproduceerd door nucleaire en fossiele centrales
	Emissions Households, Industry, Agriculture	Emissies van nitraat, fosfaat en zuurstofbindende stoffen door de huishoudens, de industrie en de landbouw	BRP, bevolking, oppervlakte landbouw en aantal dieren
	Tap Water	Hoeveelheid beschikbaar drinkwater	Drinkwater vraag, beschikbaar grond- en oppervlaktewater
	Sewage	Hoeveelheid water dat door de riolering in het oppervlaktewater wordt geloosd en de verliezen (lek) naar het grondwater	Water van de huishoudens, industrie en landbouw naar de riolering
	Concentration	Jaargemiddelde concentratie van nitraat, fosfaat en zuurstofbindende stoffen in het oppervlaktewater	Emissies van nitraat, fosfaat en zuurstofbindende stoffen
	Groundwater	Hoeveelheid beschikbaar grondwater en basisflux naar het oppervlaktewater	Infiltratie en vraag naar grondwater
	Riverwater	Hoeveelheid beschikbaar rivierwater	Oppervlakkige afstroming, lozing uit riolering, basisflux van het grondwater en vraag naar rivierwater
	Water Use Index	Relatieve wijziging in het gebruik van grond-, oppervlakte- en drinkwater	gebruik van grond-, oppervlakte- en drinkwater
	N Stations OK	Gemiddeld aantal stations dat voldoet aan de nitraat, fosfaat en zuurstof norm	Jaarlijkse gemiddelde oppervlaktewaterconcentraties voor nitraat, fosfaat en zuurstof
Energie	Final Consumption	Finaal energieverbruik	Initieel verbruik, afschrijving en investering
	Output Final Consumption	Opdelen finaal verbruik array in gebruik van fossiele, nucleaire, biomassa en hernieuwbare bronnen en energiebesparing voor het bewaren en uitwisselen van resultaten	Array met finale verbruik van fossiele, nucleaire, biomassa en hernieuwbare bronnen en de energiebesparing
	Reference Consumption Households, Agriculture, Industry, Services, Transport	Referentieverbruik voor huishoudens, industrie, landbouw, tertiare sector en transport	Aantal huishoudens, BRP industrie en tertiaire sector, landbouwproductie-index (via consumptie dierlijke producten), transport volume
	Total Investment	Investeringsbehoefte in energie rekening houdend met vervanging van de bestaande capaciteit en bijkomende vraag	Finaalverbruik, afschrijvingsduur, wijziging in referentieverbruik, investeringsbeslissing
	Levelised Costs	Kosten voor fossiele, nucleaire, biomassa, hernieuwbare energieproductie en energiebesparingen	Finale vraag, brandstofprijs, duurzaamheid
	Actual Investment	Investeringsbeslissing in fossiele, nucleaire, biomassa, hernieuwbare energieproductie en energiebesparingen	Levelised costs voor fossiele, nucleaire, biomassa, hernieuwbare energieproductie en energiebesparingen, totale investeringsbehoefte in energie
	Output Investment Decision	Investeringsbeslissing in fossiele, nucleaire, biomassa, hernieuwbare energieproductie en energiebesparingen voor het bewaren en uitwisselen van resultaten	Array met investeringsbeslissing in fossiele, nucleaire, biomassa, hernieuwbare energieproductie en energiebesparingen
Overige	Set Parameter	Instellen te kalibreren parameters	
	Optimization	Kalibratietool voor optimalisatie parameterwaarden	
	Delay	Met vertraging doorgeven variabele	
	Save History	Opslaan achtereenvolgende simulaties	
	Table Functions	Tabel functie voor grafische koppeling variabelen (zie Figuur 4-4)	
	Climate Change	Selectie RCP-klimaatscenario	

BIJLAGE 4: GENERIEKE TABELLEN

Database	Tabel	Functie
DataGeneral	DriverSettings	Opslaan instelling exogene variabelen voor vergelijken simulaties
	LookUpFunctions	Definitie tabelfuncties (zie ook Figuur 4-4)
	TabSetDrivers	Instelling exogene variabelen voor simulatie, kalibratie en gevoeligheidsanalyses
DataCalibration	BestFit	Optimale waarden parameters / exogene variabelen na kalibratie voor meerdere scenario's
	IndicatorCalibrationSettings	Instellen doelwaarden indicatoren voor kalibratie model voor verschillende scenario's, voor eindjaar 2050 en tussenjaar (optioneel)
	IndicatorSensitivitySettings	Instellen indicatoren voor gevoeligheidsanalyses (doelwaarden worden niet gebruikt)
	IndicatorCalibrationResults	Opslaan indicatoren waarden voor alle simulaties in kalibratie of gevoeligheidsanalyse
	ParCalibrationResults	Opslaan te kalibreren parameters/exogene variabelen voor kalibratie of gevoeligheidsanalyse
	ParSetup	Instellen keuze en bereik te kalibreren parameters/exogene variabelen
	Sensitivity	Resultaat gevoeligheidsanalyse
History	EndStates	Vergelijken resultaat selectie indicatoren voor meerdere simulaties voor eindjaar 2050
	RunNumber	Referentie index lopende simulatie

