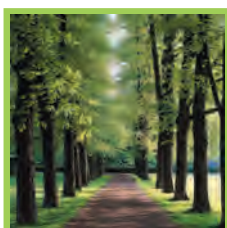


# Haalbaarheidsstudie systeem­dynamische modellering en interactie thematische modellering



Studie uitgevoerd in opdracht van  
MIRA, Milieurapport Vlaanderen

**Onderzoeksrapport**

MIRA/2013/07, september 2013

VITO/2013/RMA/R/153



# Haalbaarheidsstudie systeem­dynamische modellering en interactie thematische modellering

Jean-Luc de Kok, Guy Engelen

Unit Ruimtelijke Milieuaspecten  
VITO

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

MIRA/2013/07  
VITO/2013/RMA/R/153

September 2013

Vlaamse overheid



## **Documentbeschrijving**

### **Titel**

Haalbaarheidsstudie systeemdynamische modellering en interactie thematische modellering

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](http://www.milieurapport.be).

### **Samenstellers**

Jean-Luc de Kok, Guy Engelen  
Unit Ruimtelijke Milieuaspecten, VITO

### **Wijze van refereren**

de Kok J.-L. & Engelen G. (2013), Haalbaarheidsstudie systeemdynamische modellering en interactie thematische modellering, studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, MIRA, MIRA/2013/07, VITO, 2013/RMA/R/153.

### **Vragen in verband met dit rapport**

Vlaamse Milieumaatschappij  
Milieurapportering (MIRA)  
Van Benedenlaan 34  
2800 Mechelen  
tel. 015 45 14 61  
[mira@vmm.be](mailto:mira@vmm.be)

D/2013/6871/035  
ISBN 9789491385254  
NUR 973/943

# INHOUD

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Inhoud</b>   | <b>II</b>   |
| <b>Lijst van figuren</b>  | <b>V</b>    |
| <b>Lijst van tabellen</b>   | <b>VII</b>  |
| <b>Samenvatting</b>   | <b>VIII</b> |
| <b>Summary</b>  | <b>XI</b>   |
| <b>HOOFDSTUK 1. Inleiding</b>   | <b>1</b>    |
| 1.1. Context  | 1           |
| 1.2. Aanleiding voor de opdracht  | 4           |
| 1.3. Doelstellingen van de opdracht   | 5           |
| 1.4. Aanpak van de opdracht   | 5           |
| 1.4.1. Literatuuronderzoek  | 6           |
| 1.4.2. Formulering ontwerpeisen systeemdynamische modellering                   | 6           |
| 1.4.3. Ontwerp kwalitatief systeemdiagram                                       | 7           |
| 1.4.4. Inventarisatie thematische rekenmodellen                                 | 7           |
| 1.4.5. Analyse inpasbaarheid systeemdynamisch model                             | 8           |
| 1.5. Leeswijzer   | 8           |
| <b>HOOFDSTUK 2. Algemeen referentiekader</b>                                    | <b>10</b>   |
| 2.1. Begrippenkader   | 10          |
| 2.2. Systeemdynamische modellering  | 12          |
| 2.3. Systemanalyse op basis van transitiedenken                                 | 13          |
| 2.4. Toekomstverkenningen gebaseerd op een systeemkader                         | 14          |
| 2.4.1. Welvaart en Leefomgeving   | 14          |
| 2.4.2. Vlaamse Ruimte in 4 Wereldbeelden  | 20          |
| 2.4.3. Algemene Omgevingsanalyse voor Vlaanderen                                | 21          |
| 2.4.4. Systemanalyse transitie duurzaam landbouw- en voedingssysteem Vlaanderen | 22          |
| <b>HOOFDSTUK 3. Systeemdynamische modeltoepassingen</b>                         | <b>24</b>   |
| 3.1. Inleiding  | 24          |
| 3.2. WORLD03  | 24          |
| 3.3. IMAGE2.4   | 26          |
| 3.4. Threshold 21   | 30          |
| 3.5. MEDACTION  | 32          |
| 3.6. WadBOS2.1  | 32          |
| 3.7. ELBE DSS   | 35          |
| 3.8. ARDEEM en NZDEEM   | 37          |

|                     |   |           |
|---------------------|---|-----------|
| 3.9.                | SPICOSA   | 38        |
| 3.10.               | Vergelijking modellen   | 40        |
| <b>HOOFDSTUK 4.</b> | <b>Ontwerpcriteria systeemdynamische modellering</b>                  | <b>45</b> |
| 4.1.                | Inleiding   | 45        |
| 4.2.                | Karakteristieken en randvoorwaarden systeemdynamisch model Vlaanderen | 46        |
| 4.2.1.              | Modelbegrenzing en stuurvariabelen                                    | 46        |
| 4.2.2.              | Detailniveau  | 47        |
| 4.2.3.              | Keuze hoofd- en deelthema's   | 48        |
| 4.2.4.              | Exogene invloedsfactoren  | 48        |
| 4.2.5.              | Beleidsindicatoren en beleidsmaatregelen                              | 50        |
| <b>HOOFDSTUK 5.</b> | <b>Kwalitatief systeemdiagram</b>                                     | <b>52</b> |
| 5.1.                | Inleiding   | 52        |
| 5.2.                | Ontwerp systeemdiagram  | 54        |
| 5.3.                | Conclusies technische workshop  | 58        |
| 5.4.                | Technische randvoorwaarden  | 61        |
| <b>HOOFDSTUK 6.</b> | <b>Inventarisatie thematische rekenmodellen</b>                       | <b>62</b> |
| 6.1.                | Inleiding   | 62        |
| 6.2.                | Inventarisatie thematische modellen                                   | 63        |
| 6.2.1.              | Demografie  | 68        |
| 6.2.2.              | Economie  | 68        |
| 6.2.3.              | Energie   | 69        |
| 6.2.4.              | Mobiliteit  | 70        |
| 6.2.5.              | Natuur  | 71        |
| 6.2.6.              | Ruimtegebruik   | 72        |
| 6.2.7.              | Landbouw  | 72        |
| 6.2.8.              | Lucht   | 73        |
| 6.2.9.              | Waterkwaliteit  | 75        |
| 6.2.10.             | Materiaalgebruik en afval   | 75        |
| <b>HOOFDSTUK 7.</b> | <b>Procedure en toetsing inpasbaarheid</b>                            | <b>77</b> |
| 7.1.                | Inleiding   | 77        |
| 7.2.                | Procedure toetsing inpasbaarheid                                      | 77        |
| 7.3.                | Resultaten inpasbaarheid  | 83        |
| 7.4.                | Gedetailleerde analyse inpasbaarheid                                  | 86        |
| 7.4.1.              | Inleiding   | 86        |
| 7.4.2.              | Demografie FPB  | 87        |
| 7.4.3.              | HERMREG   | 89        |
| 7.4.4.              | RuimteModel Vlaanderen  | 91        |
| 7.4.5.              | ATLAS-TRANSPORT   | 92        |
| 7.4.6.              | LARCH   | 93        |
| 7.4.7.              | BELEUROS  | 94        |
| 7.4.8.              | Systeemdynamisch model huishoudelijk afval                            | 95        |

|  |            |
|--|------------|
| <b>HOOFDSTUK 8. Conclusies en aanbevelingen</b>                  | <b>97</b>  |
| <b>LITERATUURLIJST</b>   | <b>101</b> |
| <b>LIJST VAN AFKORTINGEN</b>                                     | <b>111</b> |
| <b>Bijlage A Snelstarthandleiding Cmaps</b>                      | <b>112</b> |
| <b>Bijlage B Discussiepunten systeemdiagrammen</b>               | <b>115</b> |
| <b>Bijlage C Kwalitatieve systeemdiagrammen thema's</b>          | <b>119</b> |
| <b>Bijlage D Scores inpasbaarheidscriteria modellen longlist</b> | <b>130</b> |
| <b>Bijlage E Systeemintegratie thema's shortlist</b>             | <b>147</b> |

## LIJST VAN FIGUREN

|  |     |
|--|-----|
| Figuur 1-1 Thematische verdieping en modellering   | 3   |
| Figuur 1-2 Schematische weergave van de vijf stappen van de gevolgde benadering  | 5   |
| Figuur 2-1 Het assenstelsel van de WLO-studie en de 4 resulterende wereldbeelden<br>( <a href="http://www.welvaartenleefomgeving.nl">www.welvaartenleefomgeving.nl</a> )   | 15  |
| Figuur 2-2 Samenhang voor de thematische integratie in de WLO studie (Janssen et al., 2006)  | 16  |
| Figuur 2-3 Samenhang tussen de deelmodellen en toepassing van de WLO scenario's op de<br>Vlaamse Ruimte op het globale, regionale en lokale niveau van het RuimteModel   | 21  |
| Figuur 2-4 Invloedsdiagram systeem Landbouw en Voeding (Mathijs et al., 2012)  | 23  |
| Figuur 3-1 De structuur van het oorspronkelijke World Dynamics model (Forrester, 1971)   | 25  |
| Figuur 3-2 Modelstructuur IMAGE2.4 model (Bouwman et al., 2006)  | 27  |
| Figuur 3-3 Modulaire opzet van het TARGETS1.0 model (Rotmans et al., 1997)   | 29  |
| Figuur 3-4 Conceptueel model van het Threshold21 raamwerk ( <a href="http://www.millennium-institute.org/">http://www.millennium-institute.org/</a> )  | 30  |
| Figuur 3-5 Structuur T21 model voor Italië (bron <a href="http://www.millennium-institute.org/">http://www.millennium-institute.org/</a> )   | 31  |
| Figuur 3-6 Systeemdiagram en gebruikersinterface MedAction (Van Delden et al., 2007)   | 32  |
| Figuur 3-7 Systeemdiagram voor de Nederlandstalige versie van WadBOS ( <a href="http://www.riks.nl">www.riks.nl</a> )  | 33  |
| Figuur 3-8 Systeemdynamisch model voor de economische sectoren binnen WadBOS - voorbeeld<br>schelpenwinning ( <a href="http://www.riks.nl">www.riks.nl</a> )   | 34  |
| Figuur 3-9 Conceptueel model voor de samenhang van ecologische en fysische toestandsvariabelen<br>en processen binnen WadBoS (Maes, 2008)  | 34  |
| Figuur 3-10 Samenhang van systeemvariabelen, scenario's en beleidsindicatoren in het Elbe DSS<br>(De Kok et al., 2009)   | 36  |
| Figuur 3-11 Structuur en informatiestromen van het NZDEEM model (Montes et al., 2007)  | 37  |
| Figuur 3-12 Schematische voorstelling van de stappen die voor de SAF benadering van het SPICOSA<br>project doorlopen worden ( <a href="http://www.spicosa.eu">www.spicosa.eu</a> )   | 39  |
| Figuur 3-13 Voorbeeld conceptueel model als basis voor systeemdynamische modellering met<br>definitie van toestandsvariabelen, beleidsindicatoren en aangrijpingspunten voor beheer<br>( <a href="http://www.coastal-saf.eu/design-step/3_2.shtml">http://www.coastal-saf.eu/design-step/3_2.shtml</a> ) | 40  |
| Figuur 3-14 Positionering modeltoepassingen in termen van variatie in complexiteit deelmodellen<br>en het aantal terugkoppelingen  | 43  |
| Figuur 5-1 Causaal relatiediagram voor de regio Auckland (Stouten, 2013). B = balancing feedback;<br>R = reenfocing feedback   | 54  |
| Figuur 5-2 Thematische integratie van de deeldomeinen in een systeembeschrijving gericht op<br>duurzaamheid voor de Vlaamse context  | 56  |
| Figuur 5-3 Voorbeeld kwalitatief systeemdiagram voor het thema "Bevolking"   | 57  |
| Figuur 5-4 Kwalitatief systeemdiagram voor het totale systeem nadat alle thema's geïntegreerd zijn   | 60  |
| Figuur 6-1 Verdeling modellen longlist over de thema's   | 66  |
| Figuur 7-1 Vergelijking resultaten inpasbaarheid modellen longlist en onzekerheidsmarge  | 84  |
| Figuur 7-2 Vergelijking resultaten modelinpasbaarheid en onzekerheden ten gevolge van ontbreken<br>van informatie criteria voor een "operationele" gewichtenset  | 85  |
| Figuur 7-3 Gemiddelde score per criterium voor de modellen uit de longlist en onzekerheidsmarges<br>t.g.v. ontbreken scores criteria   | 86  |
| Figuur 8-1 Systeemdiagram thema "Bevolking" (vet omliggende variabelen verwijzen naar koppeling<br>met een ander thema)  | 119 |
| Figuur 8-2 Systeemdiagram thema "Economie" (naar Kopainsky, 2005)  | 120 |
| Figuur 8-3 Systeemdiagram thema "Energie"  | 121 |
| Figuur 8-4 Systeemdiagram voor het thema "Materiaalgebruik", dat later werd toegevoegd   | 122 |



|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| Figuur 8-5  | Systeemdiagram thema "Ruimtegebruik"                           | 123 |
| Figuur 8-6  | Systeemdiagram thema "Landbouw"                                | 124 |
| Figuur 8-7  | Systeemdiagram thema "Mobiliteit"                              | 125 |
| Figuur 8-8  | Systeemdiagram thema "Klimaat"                                 | 126 |
| Figuur 8-9  | Systeemdiagram thema "Natuur" naar ontwerp T. van Daele (INBO) | 127 |
| Figuur 8-10 | Systeemdiagram thema "Luchtkwaliteit"                          | 128 |
| Figuur 8-11 | Systeemdiagram thema "Water"                                   | 129 |
| Figuur 8-12 | Systeemintegratie thema Bevolking met andere thema's           | 147 |
| Figuur 8-13 | Systeemintegratie thema Economie met andere thema's            | 148 |
| Figuur 8-14 | Systeemintegratie thema Ruimtegebruik met andere thema's       | 149 |
| Figuur 8-15 | Systeemintegratie thema Mobiliteit met andere thema's          | 150 |
| Figuur 8-16 | Systeemintegratie thema Natuur met andere thema's              | 151 |
| Figuur 8-17 | Systeemintegratie thema Luchtkwaliteit met andere thema's      | 152 |
| Figuur 8-18 | Systeemintegratie thema Materiaalgebruik met andere thema's    | 153 |

## LIJST VAN TABELLEN

|   |     |
|---|-----|
| Tabel 2-1 De vier scenario's van de WLO studie (www.welvaartenleefomgeving.nl)  | 17  |
| Tabel 3-1 Vergelijkend overzicht hoofdkarakteristieken van een aantal systeemdynamische modeltoepassingen   | 42  |
| Tabel 4-1 Samenvatting WLO wereldbeelden per deelthema voor toepassing op Vlaanderen (Engelen et al., 2011a)  | 49  |
| Tabel 4-2 Selectie indicatoren systeembeschrijving duurzaamheid Vlaanderen  | 51  |
| Tabel 5-1 Voorbeeld typische relaties in het systeemdiagram uit Figuur 5-2  | 57  |
| Tabel 6-1 Model documentatie template zoals voorgesteld door het EEA (EEA, 2008)  | 64  |
| Tabel 6-2 Selectie thematische modellen longlist en thema's   | 67  |
| Tabel 7-1 Aangepaste template met modelkenmerken gericht op inpasbaarheid in een systeemdynamisch model gericht op milieu in Vlaanderen (N = noodzakelijk criterium; P = prioritair criterium; O = optioneel criterium) | 82  |
| Tabel 8-1 Inpasbaarheidsscores demografisch model Federaal Planbureau per criterium   | 131 |
| Tabel 8-2 Inpasbaarheidsscores HERMREG per criterium  | 132 |
| Tabel 8-3 Inpasbaarheidsscores model RuimteModel per criterium  | 133 |
| Tabel 8-4 Inpasbaarheidsscores model LARCH per criterium  | 134 |
| Tabel 8-5 Inpasbaarheidsscores model PATTERN-LITE per criterium   | 135 |
| Tabel 8-6 Inpasbaarheidsscores model Arc-Nemo per criterium   | 136 |
| Tabel 8-7 Inpasbaarheidsscores model TIMES per criterium  | 137 |
| Tabel 8-8 Inpasbaarheidsscores model SAVER-LEAP per criterium   | 138 |
| Tabel 8-9 Inpasbaarheidsscores model SELES per criterium  | 139 |
| Tabel 8-10 Inpasbaarheidsscores model ATLAS-Transport per criterium   | 140 |
| Tabel 8-11 Inpasbaarheidsscores nieuw waterkwaliteitsmodel per criterium  | 141 |
| Tabel 8-12 Inpasbaarheidsscores model VLOPS per criterium   | 142 |
| Tabel 8-13 Inpasbaarheidsscores model BELEUROS per criterium  | 143 |
| Tabel 8-14 Inpasbaarheidsscores model AURORA per criterium  | 144 |
| Tabel 8-15 Inpasbaarheidsscores systeemdynamisch model huishoudelijk afval per criterium  | 145 |
| Tabel 8-16 Inpasbaarheidsscores Milieu Kosten Model Lucht & Klimaat per criterium   | 146 |

## SAMENVATTING

De systeemdynamische modellering vindt haar oorsprong in het Wereld model dat eind jaren 60 voor de Club van Rome werd ontwikkeld (Forrester, 1971). 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 lange-termijn toekomstverkenningen en beleidsanalyses. Eerder dan een nauwkeurige prognose van het systeemgedrag in alle detail is het doel de "tipping points" te identificeren, waarbij het systeemgedrag sterk verandert, bijvoorbeeld van evenwichts- naar een niet-evenwichtstoestand. Tevens vormt een systeemdynamisch model een praktisch analytisch raamwerk om de integratie tussen de relevante thema's zoals mobiliteit, energie, demografie, milieu, landbouw, etc. en de daarvoor beschikbare (reken)modellen te ondersteunen. Indien meer diepgang en detail nodig is kunnen de causale relaties in het systeem door thematische modellen worden beschreven. Het 4-stappen plan (Op 't Eyndt, 2011) 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 stap 3.

Binnen het 4-stappen plan wordt voorgesteld de uitwisseling van gegevens tussen thematische modellen, die zijn ingezet in eerdere toekomstverkenningen, te verbeteren door deze te laten verlopen via een systeemdynamisch model dat het gedrag van het "Systeem Vlaanderen" op hoofdlijnen beschrijft.

Om dit stappenplan te concretiseren, startte de Vlaamse Milieumaatschappij, dienst Milieurapportering, in samenwerking met de Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO) een haalbaarheidsstudie op met als doel de randvoorwaarden voor een dergelijke systeemdynamische modellering te onderzoeken en toe te passen om bestaande thematische modellen te toetsen op inpasbaarheid. De thema's die daarbij in beschouwing genomen werden zijn klimaat(verandering), demografie, economie, landbouw en voeding, energie, mobiliteit, lucht, water, natuur, en het gebruik van materialen en grondstoffen. De ervaring leert dat een directe, "bottom-up" koppeling tussen modellen vaak leidt tot te complexe systemen die moeilijk te onderhouden en weinig flexibel zijn, wat de transparantie en het nut voor eindgebruikers aanzienlijk beperkt. Modellen kunnen sterk verschillen in de mate waarin deze inpasbaar zijn in een systeemdynamisch model, onder meer omdat de detaillering in de procesbeschrijving en keuze van variabelen aansluiting op het systeemniveau bemoeilijkt of de afhankelijkheid van referentiegegevens dynamische toepassing bemoeilijkt. Om tot een generieke procedure te komen waarmee de inpasbaarheid van thematische modellen kon worden getoetst werd eerst een literatuuronderzoek uitgevoerd naar de bestaande systeemdynamische modellen en toekomstverkenningen gericht op duurzaamheid. Op basis hiervan werden de typische kenmerken

van systeemdynamische modellen vertaald in ontwerpcriteria en randvoorwaarden voor systeemdynamische modellering. Criteria die in beschouwing genomen werden zijn:

- het toekomstverkennde doel;
- de deelsystemen, toestandsvariabelen, processen, parameters ..., die in gekende kwalitatieve toekomstverkenningen verwant aan het milieu- en natuurbeleid reeds ingezet werden;
- beleidsindicatoren en beleidsmaatregelen waarmee rekening gehouden moet worden;
- het abstractie- en aggregatieniveau (in termen van toestandsvariabelen en relaties);
- de interne consistentie van het systeem;
- de (milieu)sectoren en te bestuderen (milieu)thema's;
- de tijdhorizon en tijdsresolutie waarmee gerekend wordt;
- de exogene, sturende variabelen;
- kalibratie en validatie (gevoeligheidsanalyse);
- de noodzaak en wijze van ruimtelijke differentiatie.

Vervolgens werden in overleg met thematische experts en de technische begeleidingsgroep voor deze studie causale relatiediagrammen opgesteld voor alle relevant geachte thema's. Daarmee werden de terugkoppelingen en toestandsvariabelen voor alle thema's en het totale systeem vastgelegd. Deze grafische representatie van het "Systeem Vlaanderen" maakt de dynamiek van het systeem expliciet op hoofdlijnen en vergemakkelijkt daarmee de communicatie tussen experts met een verschillende achtergrond, met name op het punt van integratie tussen verschillende domeinen. Daarnaast dienen deze systeemdiagrammen als kwalitatieve beschrijving voor het inhoudelijk ontwerp van een systeemdynamisch model. Hoewel het opstellen van kwalitatieve systeemdiagrammen geen gemakkelijke oefening is, leveren deze wel een nuttige bijdrage aan discussies rond duurzaamheid en vormen een ondersteuning voor het inschatten van de inpasbaarheid van modellen in een systeemdynamisch raamwerk.

Uitgaand van een template voor het catalogiseren van modellen van het Europees Milieuagentschap en de opgestelde ontwerpcriteria voor systeemdynamische modellen, werd vervolgens een generieke fiche opgesteld met 24 criteria voor de toetsing van de inpasbaarheid van thematische modellen. De volgende stap bestond uit een brede inventarisatie van de binnen Vlaanderen en daarbuiten gangbare modellen voor de geselecteerde thema's. De volgende 16 modellen werden geselecteerd: het demografisch model en het macroeconomisch model HERMREG van het Federaal Planbureau, het ecologische model LARCH, het hydro-ecologische procesmodel Pattern-Lite, het RuimteModel Vlaanderen, voor het thema Energie de modellen TIMES en Saver-Leap, voor Landbouw het model SELES en het emissie model Arc-Nemo, voor Mobiliteit het Atlas Transport model, het nieuwe waterkwaliteitsmodel dat voor de Vlaamse Milieumaatschappij ontwikkeld wordt, voor luchtkwaliteit de modellen VLOPS, BELEUROS en AURORA, het Milieukostenmodel Lucht en Klimaat, en tenslotte een systeemdynamisch model voor materiaalgebruik en afvalbeheer in Vlaanderen. Alle geselecteerde modellen werden op inpasbaarheid getoetst op basis van de eerder opgestelde criteria. Hierbij werd per criterium een score toegekend op basis van de beschikbare modeldocumentatie en/of een inschatting door modelgebruikers. Aan de criteria werden gewichten toegekend die in een multi-criteria analyse zijn toegepast om tot een algemene inpasbaarheidswaardering van de modellen te komen. Voor een deel van de geselecteerde modellen wordt in dit rapport meer in detail ingegaan op de inpasbaarheid en noodzakelijke aanpassingen.

Op basis van de resultaten kunnen een aantal voorlopige conclusies getrokken worden ten aanzien van de inpasbaarheid van het binnen Vlaanderen en daarbuiten beschikbare modelinstrumentarium.

- Veel thematische modellen zijn niet zozeer gebaseerd op dynamische modellering van processen, maar maken gebruik van gegevensbestanden voor een referentietoestand waarbij de tijdsafhankelijke ontwikkeling voor scenario's bepaald wordt door exogene, sturende variabelen. Soms wordt vanuit een begintoestand een projectie voor een toekomstig jaar berekend, zonder dat de toestand van het systeem voor de tussenliggende jaren bekend is. Dit is bijvoorbeeld het geval voor de thema's economie en energie. De tussentijdse onderbreking van deze modellen om gegevens met andere typen modellen uit te wisselen vraagt dan om nogal wat modelinhoudelijke en technische aanpassingen. De eerste ervaringen die inmiddels zijn opgedaan met de integratie van modellen met een verschillende thematische achtergrond en modelparadigma's leren dat deze problemen niet onoplosbaar zijn, maar wel een lange-termijn inspanning vereisen.
- De rekentijd en het gebruikte softwareplatform van een aantal van de modellen vormen ook een knelpunt, maar deze problemen zijn minder essentieel en kunnen eventueel door empirische modellering worden omzeild. Hierbij wordt het oorspronkelijke model vervangen door statistische relaties tussen de in- en uitgangsvariabelen, wat wel ten koste van de flexibiliteit en transparantie van het model gaat.
- Een lastiger probleem vormt de afhankelijkheid van sommige modellen van omvangrijke referentiegegevens voor een basisjaar. De validiteit van deze gegevens en bijbehorende parameterinstellingen op de middellange en lange (40 jaar of meer) zou eerst moeten worden onderzocht voordat tot inpassing van een bepaald model besloten kan worden.
- De nu beschikbare kwalitatieve systeembeschrijving, toetsingsprocedure en eerste selectie van rekenmodellen vormen tezamen een goed uitgangspunt voor het ontwerp van een kwantitatief systeemdynamisch model dat het gedrag van het integrale "Systeem Vlaanderen" op hoofdlijnen kan beschrijven (stap 2 uit het 4-stappen plan) met thematische verdieping waar nodig (stap 3).
- De toepassing van generieke toetsingscriteria voor de inpasbaarheid op een representatieve, brede selectie van thematische modellen toont aan dat de geformuleerde criteria voldoende transparant en flexibel zijn om binnen het 4-stappen plan ingezet te worden. Indien nodig kunnen de voor de toetsing gebruikte criteria nog verder worden aangescherpt, en de gewichten voor de criteria aangepast.
- De resultaten van de toetsing hebben sterke en zwakke kenmerken van de modellen, voor wat de inpasbaarheid betreft, aan het licht gebracht. Deze informatie kan worden gebruikt om modellen onderling te vergelijken op inpasbaarheid, om de geschiktheid van een bepaalde combinatie van modellen voor inpassing in het 4-stappen plan in te schatten, en om te bepalen op welke punten de inpassing van een specifiek model tot problemen kan leiden. Dit biedt de mogelijkheid tot noodzakelijke aanpassingen van modellen waar nodig of heroverweging van modelkeuzes.
- Aanpassingen die, afhankelijk van het model, noodzakelijk zijn om inpassing mogelijk te maken omvatten onder meer de (dis)aggregatie van modelresultaten, de toepassing van generieke functies om basisgegevens te extrapoleren, empirische modellering om de rekentijd van modellen te verkorten en het vervangen van interne model parameters door functies die gemakkelijker kunnen worden aangestuurd door andere modellen en andersom.

## SUMMARY

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 captures the dependencies between the state variables which drive the dynamic behavior of a system. This makes it possible to analyze different combinations of scenarios and policy choices in a coherent manner, and 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. The purpose is to identify the “tipping points” which cause the system to change its behavior significantly, for example from an equilibrium to a non-equilibrium state, rather than obtaining an accurate prognosis of a system’s behavior in all detail. At the same time a system dynamics model provides a practical analytical framework to support the integration between relevant themes such as mobility, energy, demography, environment, agriculture etc. and the corresponding computing models. The causalities of the system can be described by means of thematic models in case more profundity and detail are required. The 4-step methodology (Op ‘t Eyndt, 2011), which has been initiated in the meantime, is aimed at supporting the Flemish environmental policy by means of an approach based on four steps:

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 at the main level of analysis.
3. Thematic deepening by modelling the key components of the system dynamics model resulting from step 2.
4. Verification of existing and planned policy options for the given objectives by means of the models resulting from step 3.

The idea is to improve the exchange of data between the thematic models, which have been deployed in earlier prospective exercises, by means of a system dynamics model which describes the “System Flanders” at the main level of analysis.

To put the 4-step methodology into practice the Flemish Environment Agency, department Environmental Reporting, began a feasibility study in collaboration with the Flemish Institute for Technological Research (VITO). The goal was to examine the boundary conditions for such a system dynamics model and apply these to assess the “model fit” or extent to which thematic models could be fitted in a dynamic system model.

The thematic issues considered include climate (change), demography, economy, agriculture and food, energy, mobility, air quality, water, ecology, and the use of material and raw resources. Experience tells us that a direct, “bottom-up” coupling of models often leads to overly complex systems which are difficult to maintain and lack flexibility. This significantly reduces the transparency and usefulness for end users. Models can differ considerably in the extent to which these can be fitted into a systems model, amongst other things because the level of detail in the description of processes and choice of variables complicate the connection at the system level of analysis, or because the dependency on reference data hampers dynamic application. A literature survey of the existing system dynamics models and prospective studies related to sustainability was first conducted to develop a generic procedure for examining the model fit of thematic models. The results were used to translate the typical characteristics of system dynamic models into design criteria and boundary conditions for system dynamics modelling. The criteria which were taken into account include:

- the prospective nature;
- earlier application of the subsystems, state variables, processes, parameters etc. in acknowledged qualitative, prospective studies related to environmental and ecological policy;
- the policy indicators and measures which were to be taken into consideration;
- the level of abstraction and aggregation (in terms of the state variables and causalities);
- the internal consistency of the system;
- the environmental sectors and themes to take into consideration;
- the time horizon and resolution used;
- the exogenous, driving factors;
- calibration and validation (sensitivity analysis);
- the need and way to include spatial differentiation.

Next, causal loop diagrams were designed in collaboration with thematic experts and the technical workgroup for this study for all themes considered relevant. This resulted in a description of the feedback mechanisms and state variables for all themes and the system as a whole. This graphical representation of the “System Flanders” makes the key dynamics of the system explicit, thereby simplifying the communication between experts with a different background, particularly concerning the interdisciplinary integration. In addition, these system diagrams serve as qualitative description for the scientific aspects of the design of a system dynamics model. The design of qualitative system diagrams is not an easy exercise. Nevertheless the diagrams are a useful contribution to the discussions related to sustainable development and support the assessment of the model fit of models in a system dynamics framework.

A generic fiche with 24 criteria to assess thematic models was subsequently developed, using a template for model categorization used by the European Environment Agency and the design criteria for system dynamics models. The next step consisted of a broad inventory of the established models within Flanders and other regions for the selected themes. The following 16 models were selected: the demographic and macroeconomic model HERMES of the Federal Planning Bureau, the LARCH ecological model, the hydro-ecological process model Pattern-Lite, the RuimteModel Flanders, for the theme Energy the models TIMES and Saver-Leap, for Agriculture the models SELES and emission model Arc-Nemo, for Mobility the Atlas-Transport model, the new water quality model which is being developed for the Flemish Environment Agency, for air quality the models VLOPS, BELEUROS and AURORA, the Milieukostenmodel Air and Climate, and finally a system dynamics model for the use of material resources and waste management in Flanders. The model fit of all selected models was assessed by assigning a score for each criterion, based on the available documentation and estimates by model users. Weights were given to all the criteria which were then applied in a multi-criteria analysis to obtain a general model fit evaluation for all models. A more in-depth discussion of the model fit for a selection of the models is included in this report.

A number of provisional conclusions can be drawn from these results with respect to the model instruments available in Flanders and other regions.

- A large number of thematic models are less based on dynamic modelling of processes, but more using databases pertaining to a reference state of the system, using exogenous, driving variables to include dynamics. Sometimes, a projection from the initial state to a future year is calculated without knowledge of the intermediate states of the system. For example, this is the case for the themes economics and energy. As a result intermediate interruption of the model to exchange data with other models requires substantial adaptations to the model itself and model software. Previous experiences with the integration of models with a different thematic focus or modelling paradigm teaches us that these problems can be solved, but require serious effort.

- The computing time and software platform used for a number of models are other obstacles, but these problems are less essential and can be circumvented potentially by means of empirical modelling. This means that the original model is replaced by statistical relationships between the in- and outgoing model variables, being at the cost of the flexibility and transparency of the model.
- The dependency of some models on substantive reference data for a base year is a more difficult problem. The validity of these data and the corresponding parameter settings for the mid- and long-term (40 years or more) should be examined prior to deciding on the application in a particular model.
- Together, the qualitative system description which is now available, the model assessment procedure, and tentative selection of thematic models form a good starting point for the design of a quantitative system dynamics model which can capture the key dynamics of the integrated "System Flanders" (step 2 from the 4-step methodology) accompanied by in-depth thematic analysis where necessary (step 3).
- The application of generic model assessment criteria to a broad, representative selection of thematic models demonstrates that these criteria are sufficiently transparent and flexible to be used in the 4-step methodology. The criteria can be refined when necessary or the weights adapted.
- The evaluation pointed out the weak and strong characteristics of the models in terms of the model fit. This information can be used to compare models or evaluate the usefulness of specific model combinations for application in the 4-step methodology, and to identify the model aspects which can lead to problems. This allows for model redesign or reconsideration of model choices if necessary.
- Depending on the model these adaptations include the (dis)aggregation of model results, the application of generic functions to extrapolate reference data, empirical modelling to reduce the computing time, and the substitution of internal model parameters by functions which can more easily be controlled by other models or vice versa.



## HOOFDSTUK 1. INLEIDING

---

### 1.1. CONTEXT

De dienst MIRA van de VMM heeft de opdracht wetenschappelijk onderbouwde milieurapportages 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. Binnen 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 waarmee de sleutelonzekerheden vertaald kunnen worden naar wereldbeelden, op basis waarvan een aantal verhaallijnen kunnen worden opgesteld voor de toekomstige ontwikkelingen die relevant zijn voor de domeinen natuur en milieu, evenals de duurzame ontwikkeling in brede zin.
2. Een systeemdynamische modellering op hoofdlijnen waarmee de verhaallijnen uit de vorige stap kwantitatief kunnen worden onderbouwd.
3. Een thematische verdieping van de sectorale toekomstprognoses op basis van operationele rekenmodellen in het kader van de toekomstverkenningen.
4. Een toetsing van beleidsopties aan de beleidsdoelstellingen door middel van het binnen de stappen 2 en 3 ontwikkelde modelinstrumentarium.

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? Een voorbeeld is de invloed van de brandstofprijs op de mobiliteit of het gevolg van een teruggang in de veestapelomvang op de waterkwaliteit. 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 sociaal-economische 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):

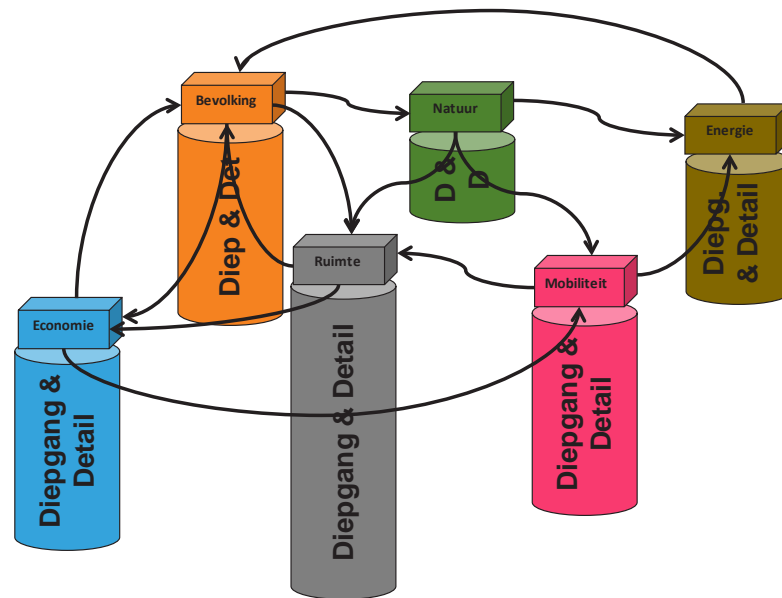
- flexibiliteit m.b.t. de keuze van problemen, variabelen en relaties, alsmede het aantal deelmodellen;
- de bewezen, transparante methodiek waarvoor een groot aantal software producten (o.m. Stella<sup>®</sup>, PowerSim<sup>®</sup>, ExtendSim<sup>®</sup>, Simile<sup>®</sup> ...) beschikbaar is;
- de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

De integratie van thematische rekenmodellen binnen een systeemmodel is een complex thema dat groeiende belangstelling geniet (Argent, 2004; Gregersen et al., 2007; Van Delden et al., 2007). 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. Dit raamwerk dient vervolgens als basis voor een thematische verdieping aan de hand van operationele rekenmodellen. De inzet daarbij is te komen tot een optimale ondersteuning en onderbouwing van toekomstige milieubeleidsrapportages 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 er op af komen? 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.

De diepgang van een systeemdynamisch model blijft beperkt. Men streeft met andere woorden naar een hoge mate van abstractie. Daarbij wordt voorrang gegeven aan beschrijving van de (terug)koppelingen in de breedte tussen sectoren en thema's. Een voldoende volledige weergave van het systeem krijgt voorrang op het detail van elke sector en elk thema die in het model zijn opgenomen. 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 zich herorganiseert om naar een nieuw evenwicht te evolueren. 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 het ene systeemcomponent doorwerken op het andere en dit doorheen het gehele systeem. Dit geldt zowel voor de rechtstreeks als onrechtstreeks gekoppelde onderdelen van het model.

In het 4-stappenplan behelst de derde stap van de toekomstverkenning een thematische verdieping en modellering. Op basis van thematische en sectorale deelmodellen worden de belangrijkste componenten van het systeemmodel verdiept. 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 (zie Figuur 1-1).



Figuur 1-1 Thematische verdieping en modellering

De thematische rekenmodellen zijn vooral domeinspecifiek. Ze hebben de noodzakelijke diepgang om een sector of thema gedetailleerd in beeld te brengen. Ze worden in hun gedrag aangestuurd door randvoorwaarden opgelegd door het systeemdynamische model en zijn ook onderling gekoppeld via een uitwisseling met het systeemdynamische model. Belangrijke ontbrekende modelonderdelen moeten gaandeweg worden aangevuld en het verdient sterke aanbeveling om de modellen ook naar detailniveau en ambitie geleidelijk op gelijke leest te schoeien. Ook hier blijft gelden dat de zwakste schakel in de keten meteen de kwaliteit van de integrale analyse bepaalt. De onderlinge wisselwerking van de modellen is eerder beperkt en verloopt in hoofdzaak 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 teruggekoppeld worden naar andere domeinen, sectoren en thema's.

Methodologisch gesteld is de thematische verdieping in essentie een set van parallel uitgevoerde prognoses. 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 expliciete aandacht. Er wordt rekening gehouden met deze laatste 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 en NARA-S van 2009 zijn van dit type, maar ook

de door verschillende instanties gepubliceerde prognoses betreffende demografische en economische groei, energiegebruik, waterkwaliteit, etc. Het nieuwe in de voorgestelde aanpak behelst dus de verbeterde onderlinge koppeling van de thematische berekeningen door middel van het systeemdynamische model en het parallel doorrekenen in de context van elk wereldbeeld. 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 scenario's aan de thematische modellen, aangevuld met randvoorwaarden voor modelparameters en -variabelen.

## **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:

- 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 handzame 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 dus uit bestaan om de voordelen van beide aanpakken te combineren zonder de nadelen. Dit is wat wordt voorgesteld in de begeleidingsopdracht: maak gebruik van een systeemdynamische modellering om de samenhang en consistentie in het totale systeem te bewaken. Gebruik dit model om op grote lijnen een exploratie te doen van toekomstige ontwikkelingen en maatregelen, en zorg voor verdieping in de thema's die als bijzonder belangrijk worden ervaren door de thematische modellen te draaien binnen de context en randvoorwaarden weergegeven in de toestandsvariabelen van het systeemdynamische model.

Deze opdracht behelst een haalbaarheidsonderzoek van de inpassing van thematische rekenmodellen in een systeemdynamisch model voor Vlaanderen. Deze haalbaarheid zal vooral blijken uit het uittekenen van een noodzakelijk en voldoende representatief systeemmodel en het definiëren en selecteren van thematische modeloplossingen die integreerbaar zijn in de systeemdynamische aanpak. Het systeemdynamische model is een werkinstrument en is niet

bedoeld als definitief, en, de set van thematische modellen die besproken worden is evenmin exhaustief noch compleet. De studie behelst een haalbaarheidsanalyse en is bijgevolg een eerste opstap naar meer definitieve producten.

### 1.3. DOELSTELLINGEN VAN DE OPDRACHT

Het doel van deze haalbaarheidsstudie is tweeledig: eerst de randvoorwaarden voor een systeemdynamisch model voor Vlaanderen in kaart brengen en vervolgens de mogelijkheden voor thematische modellering als onderdeel van de inmiddels gestarte 4-stappen benadering onderzoeken. Dit moet onder meer resulteren in modelfiches waarin de relevante karakteristieken voor inpassing van de onderzochte thematische rekenmodellen in een systeemdynamisch model worden beschreven. Deze haalbaarheid dient vooral te blijken uit het uittekenen van een noodzakelijk en voldoende representatief systeemmodel en het definiëren en selecteren van thematische modeloplossingen die integreerbaar zijn in de systeemdynamische aanpak.

### 1.4. AANPAK VAN DE OPDRACHT

De gevolgde methodologische benadering, bestaande uit vijf deelstappen is in Figuur 1-2 schematisch weergegeven.



Figuur 1-2 Schematische weergave van de vijf stappen van de gevolgde benadering

Hieronder volgt een beknopte beschrijving van elke stap van deze opdracht alvorens in de volgende hoofdstukken dieper in te gaan op de belangrijkste deelaspecten van de studie.

#### **1.4.1. LITERATUURONDERZOEK**

Op basis van een gericht literatuuroverzicht werd gezocht naar de bepalende karakteristieken van een systeemdynamisch model dat voldoende is voor zijn rol in het 4-stappenplan van een toekomstverkenning in het natuur- en milieubeleid van Vlaanderen. Deze eerste stap was erop gericht te komen tot een representatieve selectie van de Vlaamse en internationale vakliteratuur rond systeemdynamische modellering en toepassingen gericht op de thema's natuur, milieu en duurzame ontwikkeling, alsmede de Vlaamse milieurapportages. Tevens diende het concept van de systeemdynamische modellering beter te worden gedefinieerd en in het kader van de opdracht te worden geplaatst. De screening van de literatuur diende ook te leiden tot een beter inzicht in de typische stuur- en toestandsvariabelen die voor een SDM relevant zijn, de verschillende mogelijkheden om deze te vatten in een systeemmodel, alsmede de problemen die zich daarbij kunnen voordoen (sterkte-zwakke analyse). Voorbeelden van toepassingen zijn onder meer modellen zoals World03 (Meadows, 1972), IMAGE (Bouwman et al., 2006; Kram and Stehfest, 2006), WadBOS (Engelen et al., 2003), het Elbe DSS (De Kok et al., 2009) en NZDEEM (Andrews en Lennox, 2006).

De geselecteerde systeemdynamische modellen werden vergeleken op basis van de onderlinge verschillen in abstractieniveau, gekozen benadering voor de integratie van thematische rekenmodellen, gebruiksvriendelijkheid, en consistentie van het gebruikte systeemraamwerk.

#### **1.4.2. FORMULERING ONTWERPEISEN SYSTEEMDYNAMISCHE MODELLERING**

Het doel van deze stap bestond eruit de karakteristieken en randvoorwaarden voor een Vlaams systeemdynamisch model uit te werken. Deze vormen de basis om enerzijds een voldoende representatief systeemdynamisch model te definiëren en anderzijds de thematische rekenmodellen te kunnen toetsen op de inpasbaarheid in het systeemdynamisch model. De karakteristieken en randvoorwaarden voor een Vlaams systeemdynamisch model werden in detail uitgewerkt met als doel:

- (1) de volledigheid en bruikbaarheid van het systeemdynamische model van het 4-stappenplan te garanderen;
- (2) de thematische rekenmodellen te toetsen op de inpasbaarheid in het systeemdynamisch model.

Criteria die daarbij in beschouwing genomen werden zijn:

- het toekomstverkennende doel;
- de deelsystemen, toestandsvariabelen, processen, parameters ..., die in gekende kwalitatieve toekomstverkenningen verwant aan het milieu- en natuurbeleid reeds ingezet werden;
- beleidsindicatoren en beleidsmaatregelen waarmee rekening gehouden moet worden
- het abstractie- en aggregatieniveau (in termen van toestandsvariabelen en relaties);
- de interne consistentie van het systeem;
- de (milieu)sectoren en te bestuderen (milieu)thema's;
- de tijdhorizon en tijdsresolutie waarmee gerekend wordt;
- de exogene, sturende variabelen;
- kalibratie en validatie (gevoeligheidsanalyse);
- de noodzaak en wijze van ruimtelijke differentiatie.

Vooraf het laatste aspect vroeg om een gedegen afweging. Een zekere mate van ruimtelijke differentiatie valt voor de meeste milieustudies niet te vermijden. Dit zal ook van invloed zijn op de thematische verdieping die in het 4-stappenplan is voorzien. Bij eerdere milieurapportages is

veelvuldig gebruik gemaakt van ruimtelijk expliciete modellen voor onder meer het landgebruik, de luchtkwaliteit, geluidoverlast, en waterkwaliteit. Bij het opstellen van de ontwerpbeelden diende dan ook bepaald te worden in welke mate en op welke wijze het ruimtelijk karakter van deze modellen kan worden doorvertaald naar het systeemdynamische model. Bij de definitie van de ontwerpbeelden, zoals in alle overige stappen, moest goed voor ogen gehouden worden dat het doel van het systeemdynamische model de ondersteuning van milieu- en natuurbeleid is, maar, dat de belangrijkste sturende variabelen van de maatschappelijke veranderingen, die aanleiding kunnen zijn tot een evolutie naar erg verschillende wereldbeelden, vooral buiten het milieu- en natuurdomein te vinden zijn. Met name demografische, politieke en economische ontwikkelingen zijn sturend. In het systeemdynamische model en verder ook in de thematische modellen zijn daarom demografische en economische (deel)modellen onontbeerlijk.

#### **1.4.3. ONTWERP KWALITATIEF SYSTEEMDIAGRAM**

Het doel van deze stap was te komen tot een kwalitatief inzicht in de voor het Vlaamse milieu- en natuurbeleid relevante interacties tussen de toestandsvariabelen, exogene sturende grootheden (de 'drivers') en beleidsindicatoren (zie ook 2.1 – Begrippenkader), weergegeven in een systeemdiagram. Dit vormde, tezamen met de ontwerpbeelden uit de vorige stap, de basis voor de screening en analyse van de thematische rekenmodellen in de laatste twee stappen. De onderlinge wisselwerking tussen de sturende en toestandsvariabelen, beleidsindicatoren en beleidsingrepen is van groot belang voor het systeemgedrag en kwantificering van de toekomstverkenningen. De terugkoppelingen tussen deze variabelen kunnen het beste worden weergegeven door middel van een kwalitatief systeemdiagram. Een dergelijk diagram biedt tegelijkertijd een doorkijk naar de gemeenschappelijke structuur die aan de verschillende verhaallijnen uit de toekomstverkenningen ten grondslag ligt. Bij het ontwerp van dit diagram werd teruggegrepen op de resultaten van de tweede stap en de structuur van de verhaallijnen uit de kwalitatieve systeemanalyse (Op 't Eyndt et al., 2012). Het doel was niet zozeer een perfect systeemdiagram, maar een mate van detailniveau en complexiteit die voldoende waren om, tezamen met de voorbeelden uit de literatuurstudie, een doorkijk te bieden naar de vereisten voor de volgende stappen in de haalbaarheidsstudie.

#### **1.4.4. INVENTARISATIE THEMATISCHE REKENMODELLEN**

Een screening op basis van de beschikbaarheid, de ontwerpcriteria uit de tweede stap en eerdere modelinventarisaties moest leiden tot een selectie van een 15-tal rekenmodellen die in aanmerking komen voor toetsing op de inpasbaarheid in een SDM voor toekomstverkenningen in Vlaanderen. Een volledige analyse van alle thematische rekenmodellen die in aanmerking zouden komen op inpasbaarheid binnen een systeemdynamische modellering was niet haalbaar en werd ook niet zinvol geacht. Een screening was daarom noodzakelijk voordat de thematische rekenmodellen grondiger getoetst worden op inpasbaarheid binnen een systeemdynamisch model. Gezien het grote aantal bestaande modeltoepassingen ter ondersteuning van toekomstverkenningen was dan ook een zekere systematiek noodzakelijk om deze modelinventarisatie efficiënt te laten verlopen. Dit heeft bovendien het voordeel dat de selectie van rekenmodellen achteraf beter te verantwoorden is en eenvoudiger te herhalen indien nodig.

Een eerdere modelinventarisatie door het Europees Milieu Agentschap (EEA, 2008) maakte gebruik van een gestandaardiseerde template om 80 milieu-gerelateerde modellen op het gebied van landbouw, klimaat, water e.d. te categoriseren. Daarbij zijn dimensies zoals het thema, de modelstructuur, afhankelijkheid van andere modellen, ruimtelijke differentiatie e.d. gebruikt. De door het EMA gehanteerde aanpak werd verfijnd met het oog op de toekomstverkenningen en vervolgens gebruikt worden om de beschikbare Vlaamse en buitenlandse rekenmodellen

kwalitatief te toetsen op bruikbaarheid. Voor de selectie van de modellen werd in eerste instantie materiaal dat beschikbaar is in Vlaanderen beschouwd. Vervolgens werd het zoekgebied uitgebreid naar de ons omringende landen en regio's om tenslotte bruikbare voorbeelden te weerhouden uit regio's die voldoende gelijkenis met Vlaanderen vertonen naar omvang en (milieu)problematiek. De selectie omvat ecologische, fysische, en sociaal-economische modellen zoals VLOPS, SELES, HERMREG en het RuimteModel, die al ingezet zijn of worden voor Vlaamse milieurapportages. De modellen dienden in ieder geval beschikbaar te zijn voor de voorgestelde toepassing, moesten aansluiten op de voor milieurapportages relevante beleidscontext, en een toepassing op (middel)lange termijn toestaan. De thematische modellen werden niet geselecteerd om als enig alternatief gebruikt te worden in de stap van de thematische verdieping. Ze staan als voorbeeld om de noodzakelijke aspecten van de inpasbaarheid voldoende in beeld te krijgen en daadwerkelijk de toetsing uit te testen.

#### **1.4.5. ANALYSE INPASBAARHEID SYSTEEMDYNAMISCH MODEL**

De laatste stap had tot doel de geselecteerde thematische rekenmodellen uit de vorige stap grondiger te analyseren op inpasbaarheid binnen een SDM. Voor elk van deze modellen moest dit leiden tot een modelfiche, waarin de voor inpassing relevante karakteristieken van het model zijn terug te vinden. Allereerst werden de selectiecriteria geformuleerd (algemene inpasbaarheid systeemmodel, tijdshorizon, relevantie modelvariabelen, mate van aggregeerbaarheid resultaten, wetenschappelijk paradigma: optimalisatie, simulatie, dynamisch, statisch, proces, beschrijvend ...). Ook de volgende modelkarakteristieken werden daarbij meegenomen:

- de afhankelijkheid van grote databases en feitelijk opgemeten gegevens;
- de mogelijkheid om lange termijn berekeningen te ondersteunen;
- de robuustheid bij gebruik van extreem gekozen parameters;
- het voorkomen van relaties, variabelen en parameters die feitelijk toelaten om de context van de wereldbeelden in het model weer te geven;
- het al dan niet modulaire karakter van het model.

Het betreft een verdere verfijning van de selectiecriteria uit de modelinventarisatie waarbij ook rekening gehouden werd met de ontwerpeisen en het kwalitatieve systeemdiagram. Deze criteria werden vervolgens toegepast op de eerste selectie van thematische rekenmodellen uit de vorige stap, waarbij per model een inpasbaarheidsfiche werd opgesteld. Tezamen dienden deze modelfiches een beeld te geven van de leemten op model- en themaniveau, alsmede de rekenmodellen die in het geheel niet inpasbaar waren.

De set van modelfiches omvatte het noodzakelijke materiaal om uitspraken te kunnen doen met betrekking tot thema's die voor een toekomstverkenning volgens het 4-stappenplan in aanmerking kwamen. Aanvullend hierop biedt dit inzicht in de noodzakelijke aanpassingen aan bestaande modellen, het bestaan van lacunes m.b.t. thematische modellen en daarmee de noodzaak voor nieuw onderzoek en ontwikkeling om knelpunten aan te pakken.

### **1.5. LEESWIJZER**

De stappen uit Figuur 1-2 worden in de volgende hoofdstukken achtereenvolgens doorlopen. In Hoofdstuk 2 wordt eerst de historie en het theoretisch kader voor de systeemdynamische modellering op basis van terugkoppelingen tussen toestandsvariabelen uiteengezet, gevolgd door een korte bespreking van enkele toekomstverkenningen met een integraal karakter. In Hoofdstuk 3 wordt een brede selectie van systeemdynamische modellen vergeleken om daaruit de kenmerkende karakteristieken te kunnen afleiden. Deze worden in Hoofdstuk 4 vertaald in



ontwerpcriteria voor een systeemdynamisch model. In Hoofdstuk 5 worden thema-voor-thema de belangrijke toestandsvariabelen en terugkoppelingen bepaald, en met behulp van de software tool Cmaps® vertaald in kwalitatieve systeemdiagrammen voor alle voor duurzaamheid relevant geachte thema's (klimaatverandering, demografie, economie, landbouw en voeding, energie, mobiliteit, lucht, water, natuur, het gebruik van materialen en grondstoffen) en tenslotte het totale "Systeem Vlaanderen". Een samenvatting van de eigenschappen van een brede selectie van thematische en sectorale rekenmodellen welke getoetst zijn op inpasbaarheid in het 4-stappen plan is te vinden in Hoofdstuk 6. Hoofdstuk 7 beschrijft de generieke procedure voor de inpasbaarheidstoetsing in het 4-stappen plan op basis van 25 criteria waaraan deze modellen zijn onderworpen, en de resultaten daarvan. Voor een deel van deze modellen wordt meer in detail ingegaan op de problemen die zich bij de inpassing kunnen voordoen en de mogelijke oplossingen daarvoor. Het afsluitende Hoofdstuk 8 omvat een synthese van de resultaten, beschrijving van het systeemdynamisch raamwerk en de randvoorwaarden voor inpassing van rekenmodellen in het 4-stappenplan. Een literatuuroverzicht, korte handleiding voor het gebruik van Cmaps, de discussiepunten die tijdens de technische workshop voor het opstellen van de systeemdiagrammen naar voren kwamen, de finale versie van alle systeemdiagrammen, gedetailleerde inpasbaarheidsfiches voor alle onderzochte modellen, en diagrammen voor de inbedding van de thema's voor de meer in detail onderzochte modellen zijn te vinden in de bijlagen die achteraan dit rapport zijn toegevoegd.

## HOOFDSTUK 2. ALGEMEEN REFERENTIEKADER

---

### 2.1. BEGRIPPENKADER

Alvorens de achtergrond van systeemdynamische modellering en belangrijkste voorbeelden van systeemdynamische modellen toe te lichten verdient het de aanbeveling een aantal begrippen nog eens kort te definiëren in het kader van deze opdracht. Dit voorkomt begripsverwarring met andere studies en plaatst de gehanteerde begrippen duidelijker 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* en *terugkoppelingen*. De laatste ontstaan wanneer de uitgangsvariabelen van invloed zijn op de stuur- of 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 voor deze studie de volgende, praktische werkdefinities hanteren:

*Systeem* – samenhangend geheel van oorzaak-gevolg relaties en terugkoppelingen tussen sturende variabelen, toestandsvariabelen en beleidsindicatoren.

*Systeemdenken* – analyse van problemen waarbij de nadruk op de samenhang tussen deelaspecten en gevolgen daarvan voor het systeemgedrag ligt, eerder dan de afzonderlijke deelaspecten

*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.

*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 tussenliggende 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).

*Scenario* – een scenario beschrijft op basis van een coherente en consistente set van aannames rond kernrelaties en drijvende krachten mogelijk en/of gewenste toekomstige ontwikkelingen binnen een toekomstverkenning (Op 't Eyndt et al., 2012).

*Systeemmodel* – kwantitatief model dat op systeemdenken gebaseerd is en rekening houdt met terugkoppelmechanismen. Indien noodzakelijk wordt kennis uit verschillende domeinen gecombineerd.

*Systeemdynamisch model* – kwantitatief, mathematisch systeemmodel waarin het temporele aspect is meegenomen, met nadruk op de terugkoppelmechanismen van het systeem. De ontwikkeling in de tijd wordt dynamisch 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](http://www.systemdynamics.org/what_is_system_dynamics.html)).

*Thematisch rekenmodel* – kwantitatief, domein-gerelateerd (bijv. energie) of sectoraal (bijv. landbouw) model gericht op een deelaspect (of milieuthema) van het systeem zoals water- of luchtkwaliteit, ruimtegebruik of energie.

*Exogene variabelen* – deze beschrijven factoren die van buiten het systeem invloed uitoefenen op het systeem, maar niet andersom of in een mate die te verwaarlozen is. Voorbeelden voor Vlaanderen zijn de olieprijs en klimaatverandering. Dit betekent niet dat Vlaanderen geen bijdrage aan de klimaatverandering levert, maar deze is te verwaarlozen ten opzicht van de omgekeerde relatie.

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

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

*Ingangsvariabele*: variabele die het ingangssignaal naar een (deel)systeem beschrijft, vaak een toestandsvariabele waarmee een causale relatie bestaat.

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.

*Stuurvariabelen* – variabelen waarmee beleidsmakers het systeemgedrag kunnen beïnvloeden. Voorbeelden zijn de uitgaven aan sociale zekerheid, belasting op energiegebruik en investering in transportinfrastructuur (wegen, OV ...).

*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 for Sustainable Economic Welfare) index voor duurzame economische welvaart die in 1989 door Herman Daly en John Cobb 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.

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 milieuverkenning, natuurverkenning en de WLO studie ook impliciet gebruik maken van systeemdenken en concepten uit de systeemdynamische modellering. Om deze reden is de literatuurstudie dan ook breder opgevat (zie ook de Literatuurlijst).

## **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 tezamen 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 alsmede 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.

De Systeemdynamische Modellering (SDM) vindt haar oorsprong in de jaren 50 toen Jay W. Forrester van het Massachusetts Institute of Technologie 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 uitgangsvariabelen (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 software 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](http://www.systemdynamics.org)) en voorspelde een wereldcrisis in de 21<sup>e</sup> 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 (Forrester, 2007). 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](http://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, 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](http://www.spicosa.eu)), waarin de koppeling tussen de sociale, ecologische en fysische processen in kustzones centraal stond, en MODULUS, dat zich richt op verdroging in het Middellandse Zee gebied (<http://www.riks.nl/projects/MODULUS>).

### 2.3. SYSTEEMANALYSE OP BASIS VAN TRANSITIEDENKEN

Het doel van een systeemanalyse is, uiteindelijk, om toekomstige veranderingen te kunnen inspelen en deze inzichtelijk te maken. De klassieke beleidsaanpakken zijn te fragmentarisch en op de korte termijn gericht om tot effectieve oplossingen gericht op duurzaamheid te kunnen komen (Rotmans, 2003; Mathijs et al., 2012). Transitie die van invloed zijn op de werking van systemen hebben zich altijd voorgedaan, te denken valt aan de industriële revolutie, het wegvallen van het IJzeren Gordijn, de ICT ontwikkelingen van de laatste decennia etc. Vanuit een transitiecontext (Op' Eyndt et al., 2011) richt een systeemanalyse zich onder meer op:

- het plaatsen van de problemen en processen gekoppeld aan duurzaamheid tegen de achtergrond van de maatschappij;
- het verduidelijken van de samenhang tussen de elementen van het systeem;
- het ondersteunen van netwerken van belanghebbenden bij het vormen van een gedeeld, generiek beeld van het systeem.

Hoewel er overeenkomsten zijn onderscheid de transitietheorie zich duidelijk van de systeemdynamische modellering. Dit heeft te maken met het verschil tussen een harde, positivistische en een zachte, constructivistische benadering om systemen te analyseren (Op 't Eyndt et al., 2011): het uitgangspunt van de positivistische benadering is dat er één (indien nodig

vereenvoudigde) werkelijkheid is, die op basis van wetenschappelijk onderbouwde en kwantitatieve gegevens, statistische relaties en modellen te beschrijven is. Deze laten het toe om verschillende alternatieve oplossingsrichtingen te ontwerpen en rangschikken naar de mate waarin beleidsdoelstellingen bereikt worden (Quade en Miser, 1995). De zachte benadering, daarentegen, hecht veel belang aan het standpunt van de waarnemer en gaat er van uit dat één objectieve visie op de problemen niet mogelijk is. Oplossingsrichtingen worden bekeken vanuit de verschillende wereldbeelden. Beide benaderingen hebben hun sterke en zwakke kanten (Op 't Eyndt, 2011) maar vullen elkaar ook aan. Het is duidelijk dat de systeemdynamische modellering gebaseerd is op een positivistische benadering. Combinaties van een zachte en harde benadering zijn ook mogelijk. Binnen de transitietheorie werd het multi-level perspectief gebruikt om complexe socio-technische systemen te analyseren (Mathijs et al., 2012). Binnen dit denkkader worden transities gezien als interacties tussen drie niveau's: landschap, regime en niches (Mathijs et al., 2012). De niveau's landschap en regime sluiten het beste aan op een systeemkader voor Vlaanderen (Mathijs et al., 2012):

- *Landschap* verwijst naar de grotere ontwikkelingen en sterke invloedsfactoren die moeilijk te beïnvloeden zijn zoals bevolkingsgroei en klimaatverandering.
- *Regime* verwijst naar het dominante raamwerk van sociale systemen, dat vaak rigide is en innovaties belemmert. Voorbeelden zijn regelgeving, infrastructuur en gangbare praktijken.
- *Niche* verwijst naar radicale innovaties die kunnen ontstaan in de periferie van systemen.

Transities ontstaan wanneer processen op de verschillende schaalniveau's elkaar versterken zodat het regime kan veranderen en de niches een kans krijgen (Mathijs et al., 2012; Paredis et al., 2009). De combinatie van de zachte benadering met de positivistische aanpak verloopt voornamelijk via het gebruik van systeemdiagrammen voor de economische aansturing, rol van technologie en ecologische demping.

## **2.4. TOEKOMSTVERKENNINGEN GEBASEERD OP EEN SYSTEEMKADER**

Gezien de doelstelling van deze studie, inpasbaarheid van thematische en sectorale rekenmodellen in een systeemdynamisch model gericht duurzaamheid, is het nuttig het onderliggende systeemkader van enkele toekomstverkenningen te onderzoeken. We beschouwen kort een aantal internationale en Vlaamse toepassingen. Hierbij gaan we in op aspecten van de toekomstverkenning die relevant zijn voor een mogelijke vertaling naar een systeemdynamisch model zoals het gekozen detailniveau, de keuze van thema's, tijdhorizon en ruimtelijke dimensie. Deze toekomstverkenningen lenen voor een vertaling in een systeemdynamisch model; zo worden thema's duidelijk onderscheiden en getracht deze consistent door te rekenen op hoofdlijnen. Toch is geen sprake van systeemmodellen. In het achtergronddocument voor de WLO studie (Janssen et al., 2006), bijvoorbeeld, wordt het begrip "systeem" alleen gehanteerd binnen de thema's (verkeerssysteem, ecosysteem, watersysteem ...).

### **2.4.1. WELVAART EN LEEFOMGEVING**

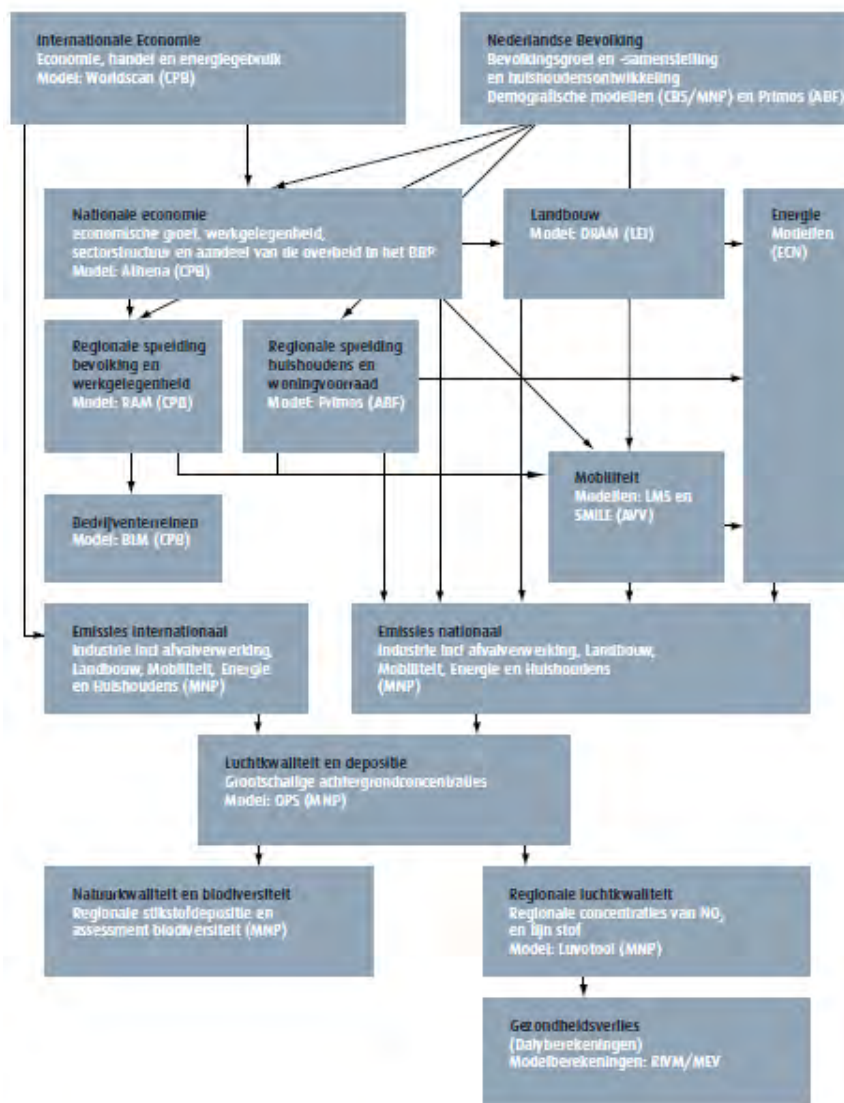
De WLO toekomststudie ([www.welvaartenleefomgeving.nl](http://www.welvaartenleefomgeving.nl)) van het Planbureau voor de Leefomgeving ([www.pbl.nl](http://www.pbl.nl)) is een toekomstverkenning die niet op een systeemdynamisch model is gebaseerd, maar wel op een kwalitatieve analyse van de systeemrelaties en projecties voor de ontwikkeling van sturende variabelen. In deze studie uit 2006 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 (Lejour, 2003). Hetzelfde assenstelsel wordt gekozen (Figuur 2-1).



Figuur 2-1 Het assenstelsel van de WLO-studie en de 4 resulterende wereldbeelden ([www.welvaartenleefomgeving.nl](http://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 modelinstrumentarium (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. 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 (WLO hoofdstudie Figuur 2-2). 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 2-2 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 2-1 vat de verschillen tussen de vier wereldbeelden in termen van de politieke, demografische, sociaal- economische, fysische en ruimtelijke ontwikkelingen samen.

|  |   |  |
|--|---|--|
| <p><b>Strong Europe</b><br/>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</p> | <p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Internationaal</p> | <p><b>Global Economy</b><br/>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</p> |
|--|---|--|



|  |  |
|--|--|
| <p>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>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 om 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><b>Regional Communities</b><br/> 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="text-align: right;"><b>Privaat</b></p> <p><b>Transatlantic market</b><br/> 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 versoerd. Hierdoor neemt de inkomensongelijkheid toe. Doordat de macht van vakbonden afneemt, wordt de arbeidsmarkt flexibeler. Door de versoering 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> |

Nationaal

Tabel 2-1 De vier scenario's van de WLO studie ([www.welvaartenleefomgeving.nl](http://www.welvaartenleefomgeving.nl)).

Samenvattend zijn de vier wereldbeelden als volgt te definiëren (Kuhk et al., 2011; Engelen et al., 2011a):

### 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 subsidieregelingen 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 alsmear 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 duurere 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 stadkernen. 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**

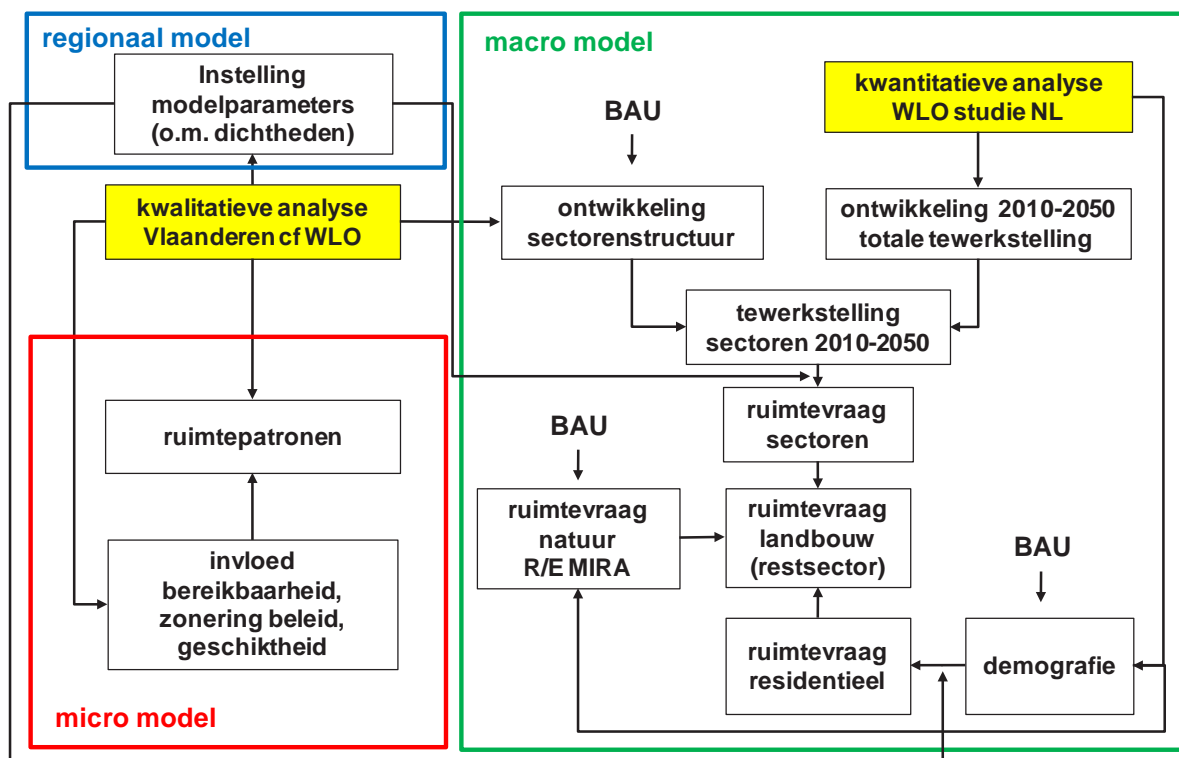
Transatlantic Markets is het wereldbeeld waarin, net als in de Global Economy, het private initiatief en de individuele vrijheid sterk bepalend zijn voor de economische ontwikkeling. Alleen is de schaal waarop dit gebeurt nu niet globaal, maar regionaal. Dit is te verstaan in de zin van een redelijk 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 ongevuld. 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.

De vraag stelt zich nu in welke mate voor deze studie een systeemdynamische benadering gevolgd is. Dit zou met name moeten blijken uit de aandacht die is besteed aan terugkoppelingen, het gebruik van toestandsvariabelen om het systeemgedrag te kunnen beschrijven en het

(middel)lange termijn doel. In de eerste plaats is duidelijk dat hier geen (systeem)model is ontwikkeld. Wel zijn experts en domeinstudies gecombineerd om tot thematische integratie te komen (zie Figuur 2-2). Bovendien zijn de vier scenario's uit Tabel 2-1 intern consistent opgezet, wat betekent dat uitgegaan is van een zelfde samenhang tussen processen hoewel de exogene, sturende factoren tussen de scenario's verschillen. Uitgaand van een gemeenschappelijk en generiek raamwerk voor de werking van het systeem hebben de thematische experts gepoogd de toekomstige ontwikkelingen onder verschillende omstandigheden ("hoeken van de kamer") te beschrijven. Ondanks het feit dat geen systeemmodel gebruikt wordt zijn de scenario's toch op identieke (toestands)variabelen en terugkoppelmechanismen gebaseerd. Een voorbeeld daarvan vormen de relaties tussen het ruimtegebruik, ontsluiting, economische ontwikkeling (terugkoppeling) en aantrekkelijkheid voor residentieel landgebruik, en de rol van het autogebruik daarin (toestandsvariabele).

#### **2.4.2. VLAAMSE RUIMTE IN 4 WERELDBEELDEN**

Als onderdeel van een ruimere praktijkoefening inzake toekomstverkenningen voor de Vlaamse Ruimte werd het Steunpunt Ruimte en Wonen (SRW) in een ad-hoc opdracht gevraagd om een praktijkoefening scenariobouw uit te werken. Het ging om een pilootproject, waarbij de bruikbaarheid van scenario-analyse wordt onderzocht voor het onderbouwen van beleidskeuzes, en meer concreet voor de ontwikkeling van het Beleidsplan Ruimte. In verband met de beperkte beschikbare middelen en kortlopende karakter van de oefening werd in overleg met de administratie RWO en het kabinet RO besloten zoveel mogelijk gebruik te maken van de concepten en resultaten van de WLO studie. Voor de toepassing op de Vlaamse Ruimte werden de trends voor de vier WLO wereldbeelden eerst kwalitatief vertaald op basis van een interactieve workshop met experts en stakeholders (Kuhk et al., 2011), uitgaand van de toestand voor 2010. Bij deze vertaling lag de nadruk op de integrale benadering, de onzekerheden die zich voordoen, en het verkennende karakter van de scenario-oefening, die niet als voorspelling gezien moet worden. Dit rapport beschrijft hoe de kwantitatieve resultaten van de WLO-studie vervolgens werden vertaald naar de Vlaamse context en, anders dan in de WLO-studie, ruimtelijk expliciet doorgerekend voor de periode 2010-2050 met behulp van prototype v.6 van het RuimteModel Vlaanderen (Engelen et al., 2011b). Dit maakte het mogelijk de ontwikkeling van de Vlaamse Ruimte voor de vier wereldbeelden te vergelijken met een ruimtelijke detail van 1 ha en een tijdstap van 1 jaar. Omwille van de consistentie werden de groeicijfers uit de WLO-studie gecombineerd met de kwantitatieve resultaten, sectorale en de regionale verhoudingen van het Business-As-Usual (BAU) scenario van het RuimteModel, waarbij de situatie voor 2010 als uitgangspunt genomen werd. Het BAU-scenario beschrijft de ruimtelijke ontwikkeling van Vlaanderen voor de periode 2010-2050 als gevolg van de bevolkingsgroei, tewerkstelling, allocatie van ruimte voor natuur en landbouw. De proportionele verdeling over de economische sectoren uit het BAU-scenario van het RuimteModel werd per wereldbeeld bijgesteld op basis van de kwalitatieve beschrijvingen voor de sociaal-economische ontwikkelingen voor Vlaanderen. Doorrekening van de 4 scenario's tot 2050 resulteerden in een Vlaanderen dat erg verschillend was (Engelen et al., 2011a). Het betreft een toekomstverkenning in de strikte zin van de definitie, die gebruik maakt van de methodologie van de vier wereldbeelden uit de WLO studie. Figuur 2-3 geeft weer hoe de WLO scenario's zijn toegepast op het Business-As-Usual (BAU) scenario om de vier wereldbeelden uit de WLO studie te kunnen toepassen op de Vlaamse Ruimte.



Figuur 2-3 Samenhang tussen de deelmodellen en toepassing van de WLO scenario's op de Vlaamse Ruimte op het globale, regionale en lokale niveau van het RuimteModel

Voor deze studie zijn de wereldbeelden uit de Nederlandse WLO studie nog eens op samenhangende wijze vertaald naar de Vlaamse Ruimte. De vier (vijf met inbegrip van het BAU scenario) scenario's zijn gebaseerd op een generiek en gemeenschappelijk idee van de werking van het systeem, waarbij ruimschoots aandacht is besteed aan de integratie tussen de thema's.

#### 2.4.3. ALGEMENE OMGEVINGSANALYSE VOOR VLAANDEREN

Eens in de vijf jaar stelt de Studiedienst van de Vlaamse Regering een algemene omgevingsanalyse op om de ontwikkelingen die voor de verschillende beleidsdomeinen (bevolking, economie, ecologie ...) relevant kunnen zijn in kaart te brengen. In de Algemene Omgevingsanalyse voor Vlaanderen uit 2009 (SVR, 2009) werd het jaar 2020 als tijdhorizon gehanteerd. Deze toekomstverkenning is niet op een systeemmodel of systeemdenken gebaseerd, maar de veelheid aan thema's, analyse op hoofdlijnen en toespitsing op de Vlaamse context maken deze studie zeer nuttig voor het identificeren van de belangrijke variabelen en processen voor het ontwerp van een kwalitatief systeemdiagram voor Vlaanderen (zie Hoofdstuk 5). De onderzochte thema's zijn: bevolking, economie en tewerkstelling, innovatie en ontwikkeling, mobiliteit, klimaatverandering, natuur en ruimte, en politiek en bestuur. Voor de ontwikkelingen tot 2050 voor het Vlaams gewest kan het volgende opgemerkt worden (SVR, 2009):

- Vergrijzing is onontkoombaar en zal niet alleen de zorg en woningvraag maar ook de arbeidsmarkt en economische productie beïnvloeden.
- Het aantal geboorten neemt weer toe maar blijft onder het vervangingsniveau.
- Immigratie, vooral via Brussel, neemt in belang toe.
- Voor de grootste van de 13 Vlaamse centrumsteden kan suburbanisatie verwacht worden.

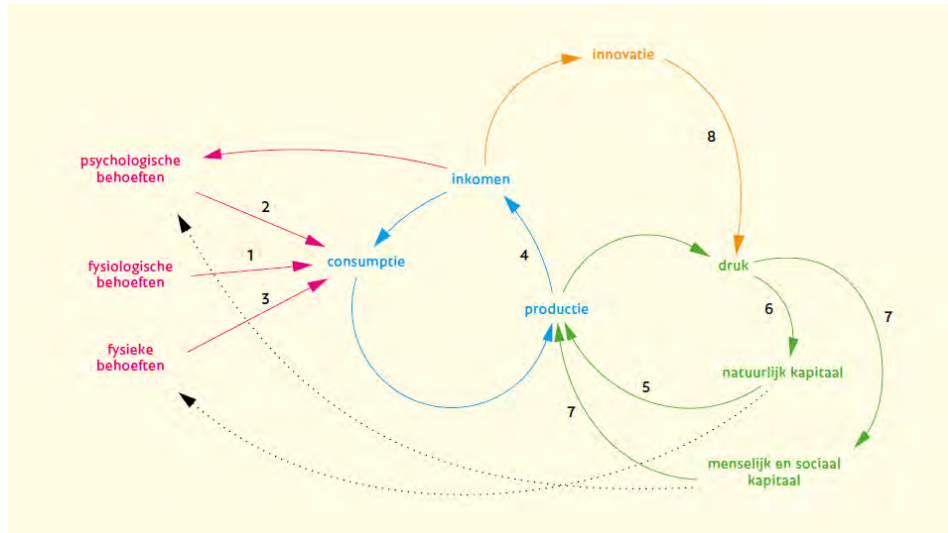
- De huishoudensamenstelling gaat veranderen (gezinsverdunding) met gevolgen voor onder meer de consumptie- en woonpatronen.
- Voorspellingen omtrent de werkgelegenheid zijn moeilijk; op de lange termijn wordt een werkzaamheidsgraad van 70 % mogelijk geacht (mede onder druk van de vergrijzing).
- Aan de aanbodzijde van arbeid wordt ook een krapte verwacht, deels op te lossen door immigratie en meer pendel vanuit Brussel naar Vlaanderen.
- De tertiaïsering zal zich verder doorzetten.
- De export zal zich moeten richten op landen met een sterke economische groei zoals China, Rusland en Brazilië.
- De economische productie zal efficiënter met energie moeten omgaan; Vlaanderen blijft sterk afhankelijk van energie import.
- Innovatie en onderzoek worden steeds belangrijker.
- Het aantal reizigerskilometers neemt substantieel toe tot 2030.
- Een beperkte *modal shift* van wegtransport naar openbaar vervoer en goederentransport per spoor en binnenvaart kan worden verwacht; voor zeehavens wordt een sterke stijging van de overslag verwacht.
- De temperatuur neemt toe, de winters worden zachter en natter, de kans op hittegolven, droogten en overstromingen neemt toe.
- Het milieubewustzijn onder Vlamingen neemt af.
- De druk op open ruimte, vooral landbouwgrond, neemt toe, maar er blijft voldoende ruimte voor bewoning.
- Suburbanisatie en versnippering van ruimtegebruik beperken de bereikbaarheid.

De Algemene Omgevingsanalyse uit 2009 (de volgende verschijnt in 2014) doorloopt achtereenvolgens de toekomstige ontwikkeling voor een groot aantal thema's zoals de demografie, armoede, scholing, mobiliteit, energiegebruik en productie etc. De prognoses zijn ontleend aan diverse bronnen waaronder de Studiedienst voor de Vlaamse Regering (SVR), de Algemene Directie Statistiek en Economische Informatie (ADSEI), FOD Mobiliteit, het Federaal Planbureau (FPB) etc. opgesteld. Vervolgens worden de te verwachten ontwikkelingen nog eens op hoofdlijnen samengevat. Omdat de thematische prognoses aan verschillende, deels onafhankelijke, bronnen zijn ontleend zonder dat expliciet rekening wordt gehouden met terugkoppelingen kan hier niet van een systeemdynamische benadering worden gesproken.

#### **2.4.4. SYSTEEMANALYSE TRANSITIE DUURZAAM LANDBOUW- EN VOEDINGSSYSTEEM VLAANDEREN.**

Een toepassing van systeemdenken gericht op duurzame ontwikkeling van de Landbouw en Voeding in Vlaanderen is te vinden in het MIRA-Topic Rapport uit 2012 (Mathijs et al., 2012). Hierin werd de gehele keten van voedselproductie tot en met de consumptie onderzocht. Een systeembenadering werd nodig geacht vanwege de complexiteit van de samenhang tussen de ontwikkeling van de landbouw, voedselproductie- en consumptie, ecologische, en sociaal-economische aspecten van de veranderingen die in het landbouw- en voedingssysteem te verwachten zijn. Te denken valt aan samenhang tussen veranderingen in consumptiepatronen, de schaalvergroting en specialisatie in de landbouw, het verlies aan landbouwareaal, waterhuishouding, effecten op de gezondheid e.d. Het "landschap" (de omgeving van het systeem) omvat alle sturende factoren waarop geen invloed kan worden uitgeoefend: bevolkingsgroei en welvaart, globalisering, vergrijzing, verstedelijking, klimaatverandering, het schaarser worden van hulpbronnen, waardepatronen, technologische ontwikkelingen ... *Binnen* het landbouwsysteem is in de systeemanalyse sprake van drie zogenaamde "kerndynamieken": de economische aansturing (vraag en aanbod), de ecologische demping (beschikbaarheid hulpbronnen en draagkracht voor

emissies) en technologische smering (potentieel voor innovatie). Aan de productiezijde wordt onderscheid gemaakt tussen de landbouwsector, voedingsindustrie en distributiesector. Water, ruimte, energie, nutriënten e.d. zijn noodzakelijke inputs. De impacts omvatten onder meer de gevolgen voor de water- en bodemkwaliteit, en emissies van broeikasgassen. Figuur 2-4 toont het invloedsdiagram met daarin de “hotspots”, waar het systeem problemen ondervindt. Een voorbeeld daarvan is het conflict tussen voedselzekerheid en grondstoffengebruik.



Figuur 2-4 Invloedsdiagram systeem Landbouw en Voeding (Mathijs et al., 2012)

Het doel van deze systeemanalyse was om vanuit het transitiedenken (zie ook Hoofdstuk 2.3) te komen tot een aantal duurzame oplossingsrichtingen voor de Landbouw en Voeding in Vlaanderen. Het integrale karakter van de problematiek (voeding, milieu, economie, grondstoffen ...) en toekomstverkennde doel leent zich zeker voor systeemdynamische modellering, maar deze stap is voorlopig nog niet gezet. Het invloedsdiagram uit Figuur 2-4 zou daarvoor eerst meer in detail moeten worden uitgewerkt zodat de toestandsvariabelen, beleidsindicatoren en aangrijpingspunten voor duurzame ontwikkeling duidelijk zouden worden. De uitdaging is dan wel hoe het multi-level perspectief (landschap, regime, niche) te vertalen naar een systeemdynamisch model om zaken als dominante praktijken, innovatie e.d. te kwantificeren en modelleren.

## HOOFDSTUK 3. SYSTEEMDYNAMISCHE MODELTOEPASSINGEN

---

### 3.1. INLEIDING

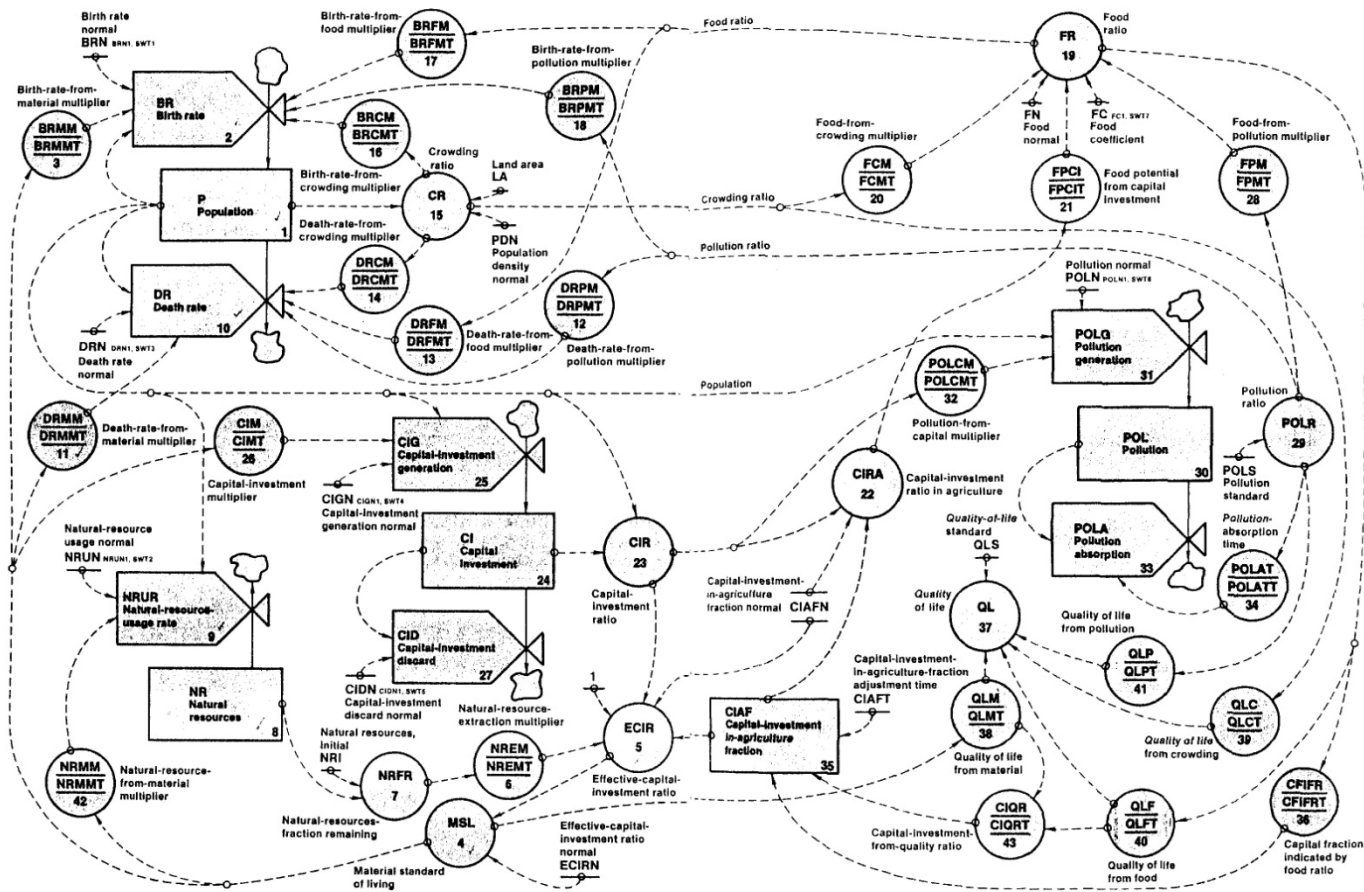
Voor het onderzoek naar de inpasbaarheid van thematische modellen is het noodzakelijk deze te toetsen op de karakteristieken van systeemodynamische modellen, die toepassing in het 4-stappen plan mogelijk maken. De eerste stap daarin is een systematische verkenning van internationale en Vlaamse systeemodynamische modellen gericht op de thema's natuur, milieu en duurzame ontwikkeling, alsmede de Vlaamse milieurapportages. Behalve een betere definitie van het begrip systeemodynamische modellering moet dit leiden tot inzicht in de algemeen gebruikte thema's, noodzakelijke stuur- en toestandsvariabelen, het abstractieniveau en de wijze waarop thematische modellen zijn geïntegreerd of vereenvoudigd weergegeven. Om te komen tot een selectie van Vlaamse en internationale toepassingen van systeemodynamische modellering die voor de haalbaarheidsstudie relevant zijn is een inperking noodzakelijk. We beperken ons tot de thema's natuur, milieu en duurzame ontwikkeling in brede zin dus met inbegrip van water, energie, ruimte en klimaat. Toepassingen die voor de haalbaarheidsstudie minder relevant zijn (bedrijfsprocessen, politiek, gezondheidszorg e.d.) worden hier buiten beschouwing gelaten. De eerste screening van de literatuur richtte zich vervolgens op de volgende kenmerken:

- het doel van het systeemodynamische model;
- het aantal en type gebruikte stuur- en toestandsvariabelen;
- het abstractieniveau;
- mate waarin en wijze waarop thematische modellen geïntegreerd zijn in het systeemmodel;
- de wijze waarop de ruimtelijke aspecten zijn vormgegeven;
- daadwerkelijke toepassing beleid;
- mogelijke beperkingen bij de inpassing van thematische modellen.

### 3.2. WORLD03

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 webgebaseerde 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).





Figuur 3-1 De structuur van het oorspronkelijke World Dynamics model (Forrester, 1971).

Bron: [http://www.friends-partners.org/GLOSAS/Peace%20Gaming/System%20Dynamics/World%20Dynamics-II/WD\\_Model\\_Diagram/WD\\_Diagram.html](http://www.friends-partners.org/GLOSAS/Peace%20Gaming/System%20Dynamics/World%20Dynamics-II/WD_Model_Diagram/WD_Diagram.html)

De modelberekening heeft betrekking op de periode 1970-2100 (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 toestandsvariabelen 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:

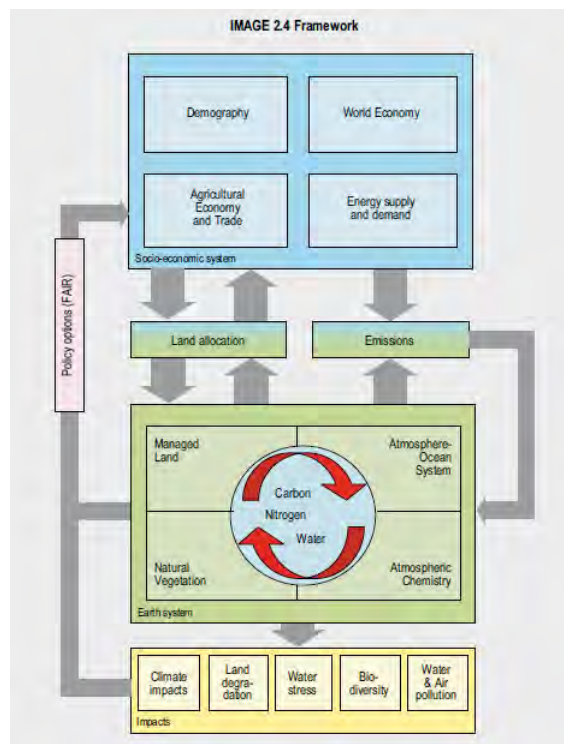
- continuering van de bestaande trends ("business-as-usual");
- geleidelijke groei tot stabiliteit bereikt is;
- oscillatie rond een stabiel niveau;
- ineenstorting door overconsumptie en achteruitgang van hulpbronnen ("overshoot and collapse").

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 (Figuur 3-1). De beschrijving van het systeem op hoofdlijnen met een beperkt aantal toestandsvariabelen vereenvoudigt de inpassing van thematische modellen.

### **3.3. 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 (Integrated Model to Assess the Greenhouse Effect), 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 oceaan-atmosfeer module waarin de opbouw van broeikasgassen wordt berekend. Veranderingen in de patronen voor neerslag en temperatuur worden ontleend aan globale klimaatmodellen, die wordt geschaald tot op het regionale niveau. Een schematische weergave van de structuur van de laatste model versie, IMAGE 2.4 is in Figuur 3-2 te vinden.



Figuur 3-2 Modelstructuur IMAGE2.4 model (Bouwman et al., 2006)

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. Het IMAGE2.4 model kan ook met exogene bevolkingsprojecties werken. Het TIMER model gebruikt een systeemdynamische benadering om de lange- termijnontwikkeling 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

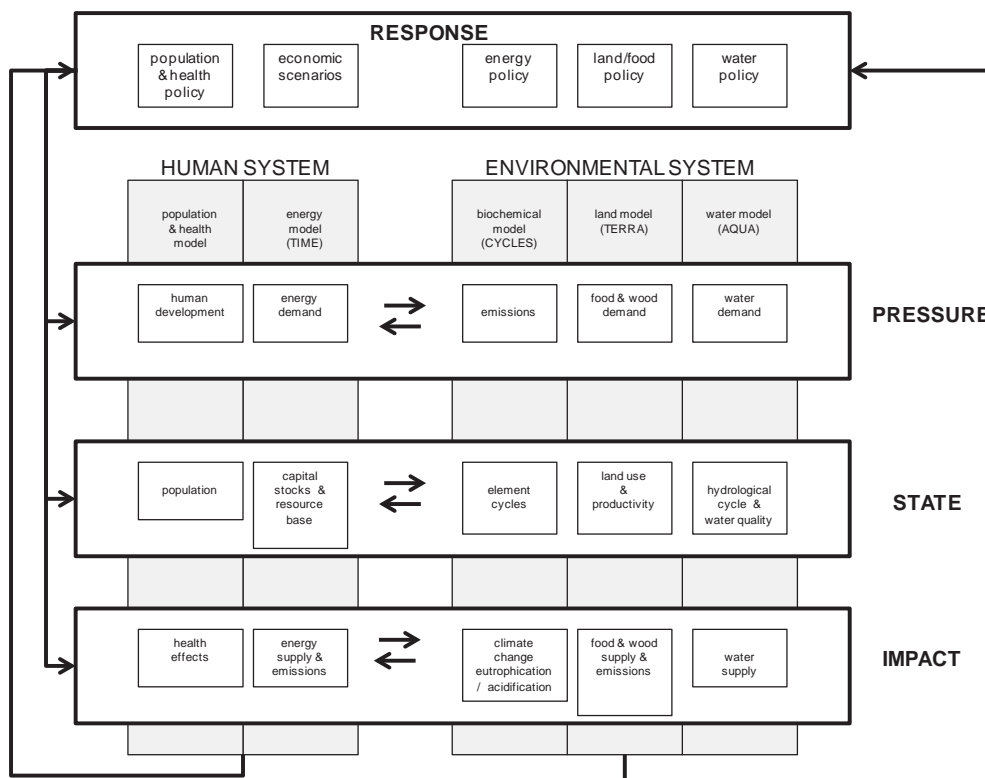
een module voor de productie en handel van voedsel (GTAP), die gebruik maakt van de economische waarde van land, de voedselproductie en vraag worden door biofysische modellering (bodemgeschiktheid e.d.). Deze is ruimtelijk verdeeld met terugkoppeling naar het economische model. Het gecombineerd gebruik 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 CO<sub>2</sub> 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](http://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:

- lange-termijn perspectief, 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.

In het 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 3-2) is er wel sprake van terugkoppelingen.

## **TARGETS1.0**

Het TARGETS (Tool to Assess Regional and Global Environmental and health Target for Sustainability) model werd ontwikkeld om de samenhang tussen de sociale, economische en biofysische processen op wereldschaal te onderzoeken in de context van de Rio Verklaring over de Duurzame Ontwikkeling (Rotmans et al., 1997). Het model is op het PSIR raamwerk van de OECD gebaseerd.

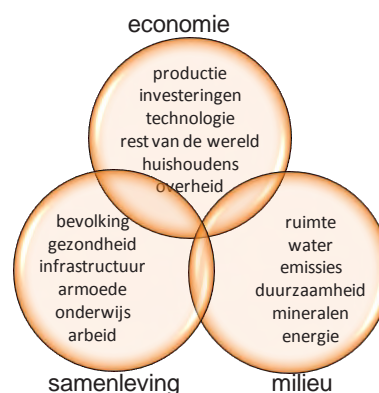


Figuur 3-3. Modulaire opzet van het TARGETS1.0 model (Rotmans et al., 1997)

Net als bij IMAGE gaat het om een Integrated Assessment model dat voortbouwt op de systeemdynamische modellering. De simulatieperiode loopt van 1900 tot 2100. TARGETS1.0 omvat twee gekoppelde deelsystemen. Het menselijk deelsysteem bestaat uit de deelmodellen Bevolking en Gezondheid, en het model voor Energie (TIME model). Het milieusysteem omvat drie deelmodellen voor Water (AQUA), Land en Voedsel (TERRA) en de biogeochemische processen (CYCLES). Zowel de deelsystemen als de deelmodellen zijn op DPSIR (OECD, 2003) modules gebaseerd. Het model werkt in principe met een tijdstap van een jaar, met een tijdshorizon 200 jaar, te beginnen in 1900. De deelmodellen zijn voor de periode 1900-1990 gekalibreerd. Waar nodig worden kleinere tijdstappen gebruikt (o.m. seizoenen, maanden of dagen). De bevolkingsmodule maakt gebruik van vijf leeftijdscohorten, ook voor sommige andere modelvariabelen zoals de waterkwaliteit, en brandstofvoorraden wordt met een beperkt aantal deelklassen gewerkt. De ontwikkelaars van TARGETS1.0 maken onderscheid tussen *verticale* en *horizontale* integratie. De verticale integratie verwijst naar de oorzaak-gevolg keten, de horizontale integratie naar de koppeling tussen de deelmodellen. De ontwikkelaars van het TARGETS model hebben getracht generieke, algemeen toepasbare deelmodellen te ontwikkelen welke op verschillende hiërarchische niveaus konden worden toegepast (Rotmans et al., 1997). Op het hoogste niveau kunnen een 8-tal toestandsvariabelen voor kapitaal, energiegebruik, consumptie e.d. onderscheiden worden (De Vries en Van Den Wijngaart, 1995). De hiërarchische opbouw en het grote aantal modelparameters kunnen een beperking vormen voor de inpassing van thematische modellen die verschillen van de deelmodellen die al zijn toegepast. Het model is niet expliciet ruimtelijk.

### 3.4. THRESHOLD 21

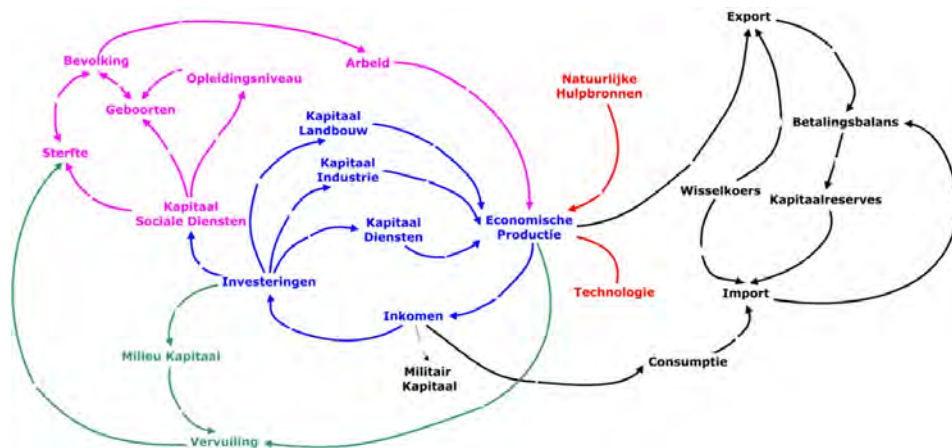
Het Threshold 21 (T21) model (Millenium Institute, 2013a; 2013b) werd de afgelopen 20 jaar ontwikkeld door het Millenium Institute ([www.millennium-institute.org](http://www.millennium-institute.org)) in samenwerking met de Wereldbank, VN en NGOs en is vooral bedoeld om de lang-termijn planning van landen 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](http://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 3-4). 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 3-4 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 lang 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, Italië (reductie broeikasgassen) 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 gegevenstijdreeksen, verschillende scenario's waaronder het basisscenario en de resultaten voor de gekozen beleidsstrategieën. Gebruikers hebben de mogelijkheid 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 met name op de reductie van broeikasgassen, met name CO<sub>2</sub>. Figuur 3-5 toont het kwalitatief systeemdiagram voor de toepassing van het Threshold21 raamwerk op Italië.



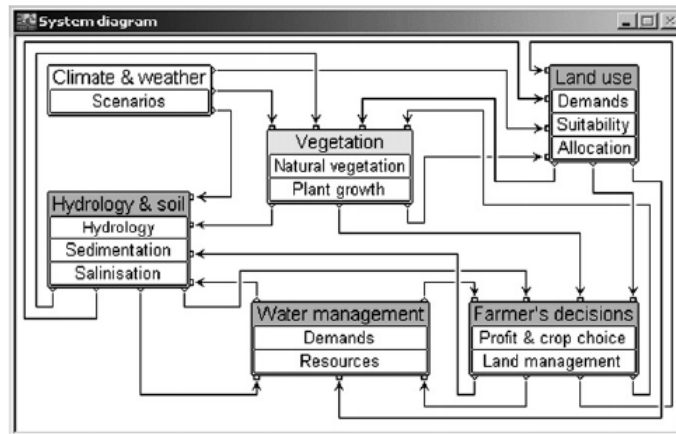
Figuur 3-5 Structuur T21 model voor Italië (bron <http://www.millennium-institute.org>)

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).

De volgende voorbeelden van ruimtelijk-dynamische toepassingen van systeemdynamische modellering maken elk gebruik van hetzelfde onderliggende Geonamica® raamwerk dat door het Research Institute for Knowledge Systems ontwikkeld werd (<http://www.riks.nl/products/Geonamica>).

### 3.5. MEDACTION

Het beleidsondersteunende systeem MedAction (Mulligan, 2000) is gebaseerd op sterke terugkoppelingen tussen de sociaal-economische en fysische processen in stroomgebieden. De toepassingen richten zich op de gevolgen van klimaatverandering voor landdegradatie, verdroging, waterbeheer en duurzame landbouw (Van Delden et al., 2007). Een overzicht van de relaties is in het onderstaande systeemdiagram weergegeven.



Figuur 3-6 Systeemdiagram en gebruikersinterface MedAction (Van Delden et al., 2007)

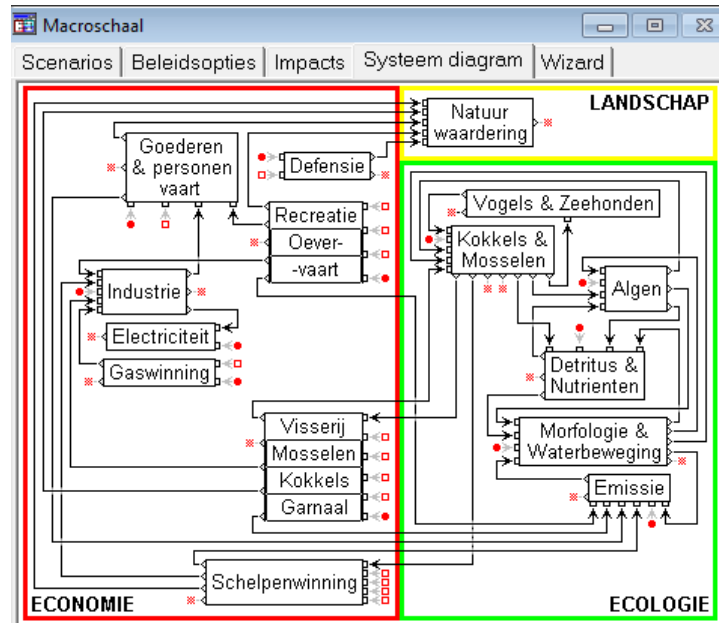
MedAction werd ontwikkeld om beleidsmakers die geconfronteerd werden met land degradatie en verwoestijning rond de Middellandse Zee inzicht te verschaffen in de problemen en te ondersteunen bij het nemen van maatregelen (Van Delden et al., 2007). De gebruikersinterface van het model biedt toegang tot de deelmodellen en parameterinstellingen. De modellen zijn ruimtelijk-dynamisch en houden rekening met complexe terugkoppelingen. Bij de modellering van het landgebruik wordt rekening gehouden met de interacties tussen landgebruiksklassen, nabijheid van infrastructuur, geschiktheid van de ruimte e.d. (Van Delden et al., 2007). Het MedAction systeem maakt gebruik van bestaande, aangepaste en nieuwe modellen die omwille van de integratie in C++ zijn geherimplementeerd. Het ruimtelijk detail is 1 ha. De tijdstap van de modellen varieert van minuten tot jaren, afhankelijk van het doel van de modellen en de processen die beschreven worden. De modelresultaten worden direct vertaald naar kaarten met geaggregeerde indicatoren die eenvoudig door beleidsmakers te interpreteren zijn zoals de inkomsten van landbouwers en het water tekort (Van Delden et al., 2007). In totaal worden meer dan 50 variabelen uitgewisseld tussen de deelmodellen. De hiërarchische opbouw en geslotenheid van de modelplatform vragen om meer inspanning bij de inpassing van thematische modellen die in termen van detailniveau of thema wezenlijk verschillen van de modellen die nu gebruikt zijn. Hoewel eindgebruikers vanaf het begin betrokken werden bij de ontwikkeling van het model is MedAction niet daadwerkelijk ingezet als beleidstoepassing.

### 3.6. WADBOS2.1

Het WadBOS (Engelen et al., 2003) model is een beleidsondersteunend instrument waarmee beleidsmakers, wetenschappers en belanghebbenden de gevolgen van verschillende scenario's en beleidskeuzes kunnen analyseren (Figuur 3-7). Het WadBOS2.1 model is bedoeld voor de integratie van kennis uit verschillende domeinen en de ondersteuning van communicatie. De resultaten zijn ook beschikbaar in de vorm GIS bestanden. De tijdhorizon is 120 maanden, maar kan worden aangepast. De tijdsresolutie van de gemodelleerde processen varieert van dagen tot jaren. Er zijn

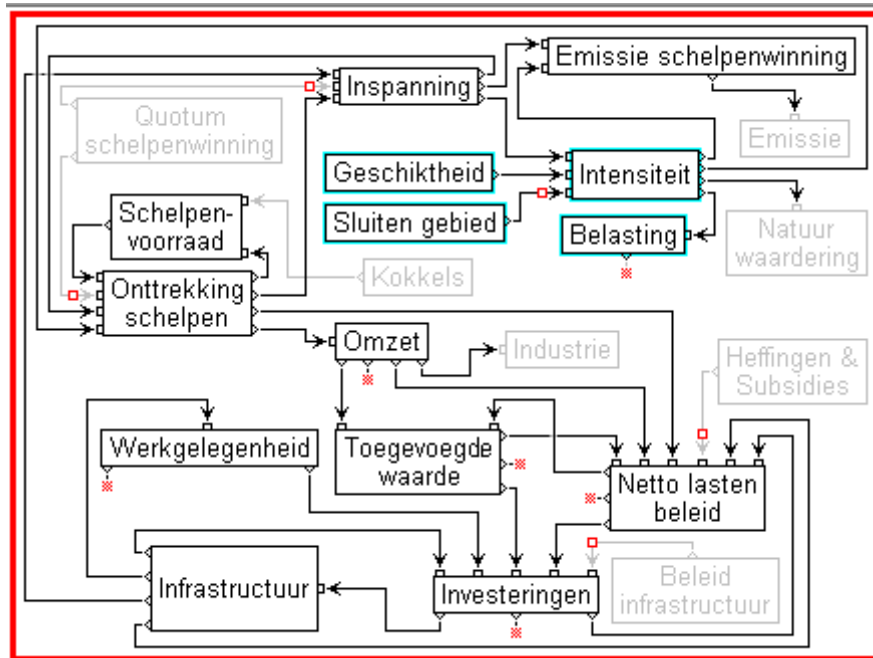


twee geografische niveaus te onderscheiden. Op het macroniveau wordt processen globaal beschreven (gehele Waddenzee of 12 compartimenten), op het microniveau gaat het om cellen van 25 ha. De uitwisseling van informatie tussen beide niveaus is significant. GIS kaartlagen voor de geschiktheid, beleidsstatus, intensiteit van menselijke activiteiten, blootstelling en druk (“pressure”) worden gebruikt om de dynamische verdeling van variabelen op het microniveau te bepalen.



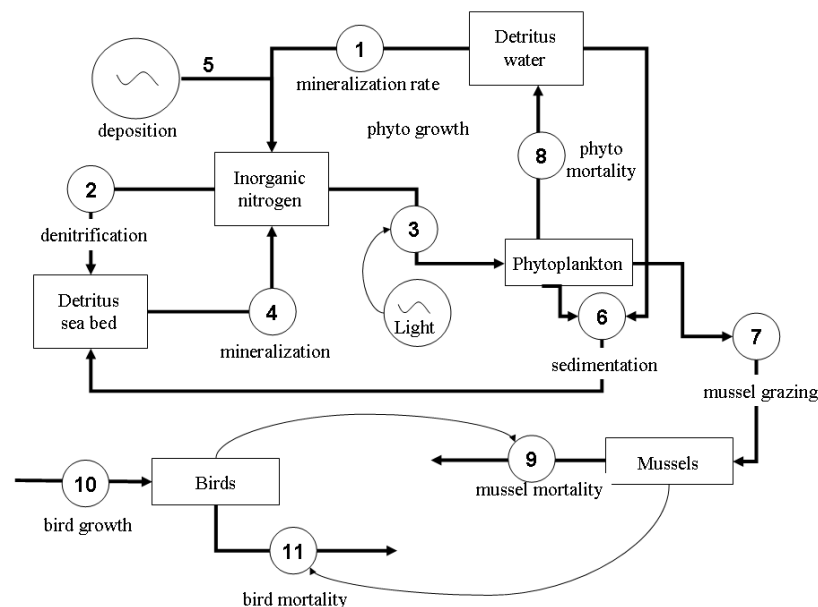
Figuur 3-7 Systeemdiagram voor de Nederlandstalige versie van WadBOS ([www.riks.nl](http://www.riks.nl))

Zoals het systeemdiagram laat zien is sprake van een hoge mate van integratie tussen de ecologische en economische deelmodellen. Sommige economische modules zoals die voor de kokkelvisserij en recreatie zijn in detail uitgewerkt, andere zoals de gaswinning en defensie met minder detail op basis van scenario's en kaartlagen. Voor de uitgewerkte economische deelmodellen wordt een generiek systeemdynamisch model gebruikt met als belangrijkste variabelen: de beschikbare infrastructuur, de inspanning, de werkgelegenheid, de toegevoegde waarde, investeringen en winst (zie Figuur 3-8). Beleidsopties betreffen bijvoorbeeld beperkingen op de infrastructuur en quotamaatregelen.



Figuur 3-8 Systeemdynamisch model voor de economische sectoren binnen WadBOS - voorbeeld schelpenwinning (www.riks.nl)

De ecologisch-fysische modules zijn gebaseerd op het EcoWasp model (Brinkman, 1993) (Figuur 3-9). De binnen WadBOS gebruikte versie van EcoWasp werkt op basis van één enkele verticale laag maar wel met 12 compartimenten.



Figuur 3-9 Conceptueel model voor de samenhang van ecologische en fysieke toestandsvariabelen en processen binnen WadBoS (Maes, 2008)

De primaire productie wordt dynamisch berekend. Vijf invloedsfactoren worden meegenomen: aanwezigheid, verstoring, geluid, ontginning, en emissies. De emissies van olie, PAKs, TBTs, en koper worden dynamisch 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.

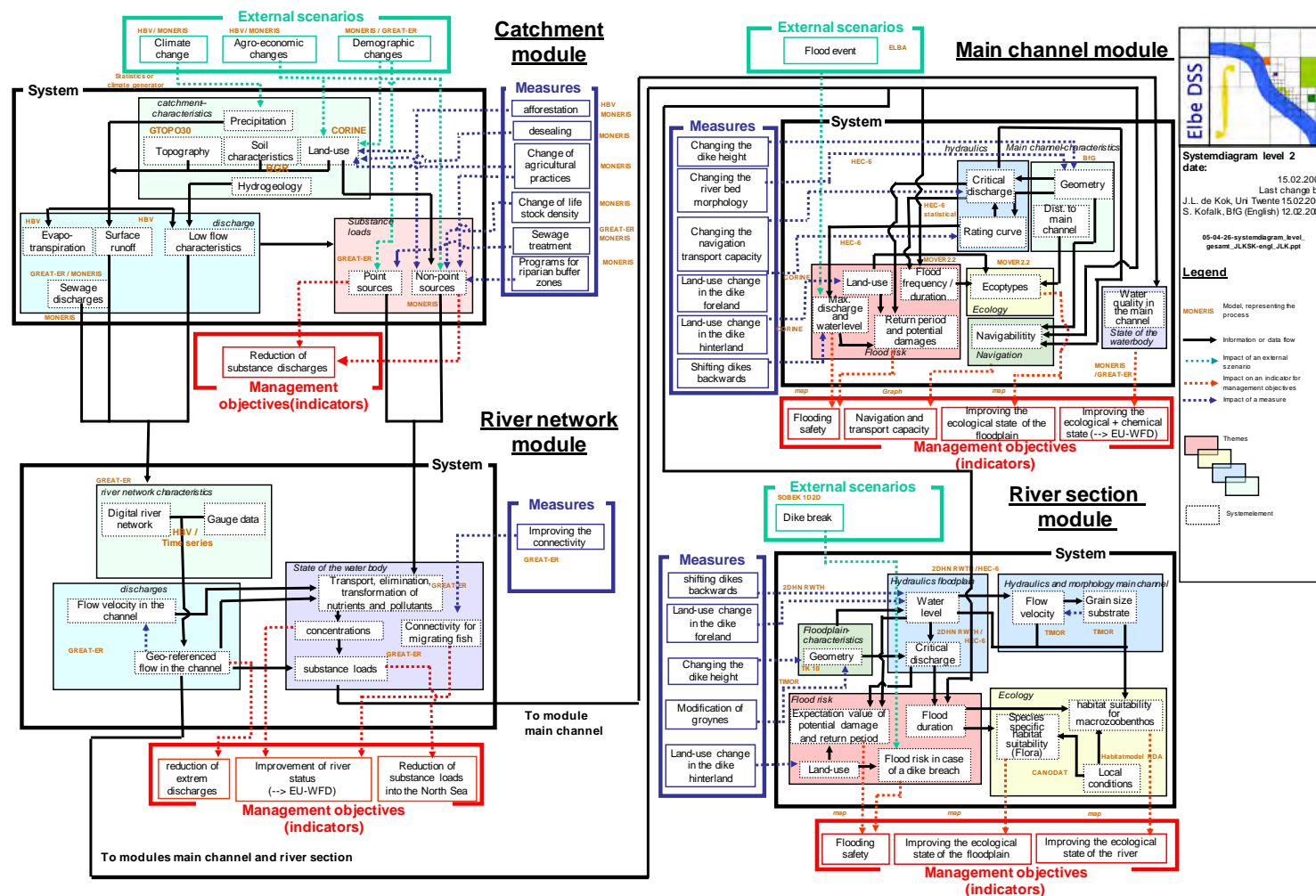
In totaal is het economisch deelmodel voor de activiteiten op een tiental toestandsvariabelen gebaseerd, het ecosysteemmodel werkt met acht toestandsvariabelen.

De belangrijkste kenmerken van WadBOS2.0:

- sterke integratie biofysische en economische deelmodellen;
- ruimtelijke differentiatie op basis kaartlagen;
- beleidstoepassingsdoel maar uiteindelijk geen 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.

### **3.7. ELBE DSS**

Het Elbe DSS (De Kok et al., 2009) is een beleidsondersteunend systeem voor het stroomgebied van de rivier de Elbe, gericht op de functies waterkwaliteit, overstromingsveiligheid, scheepvaart, en de ecologie van de uiterwaarden. Er is geen sprake van echte sociaal-economische modellering (afgezien van kostenfuncties voor bepaalde maatregelencombinaties). De software maakt gebruik van het onderliggende Geonamica® raamwerk. In Figuur 3-10 is de volledige structuur van het onderliggende systeemmodel geschematiseerd. Er wordt gebruik gemaakt van vier hoofdmodules voor het stroomgebied (thema's emissies en waterkwaliteit), het riviernetwerk (thema transport pollutanten), de hoofdgeul (thema overstromingsrisico, scheepvaart en ecologie), en een uitsnede van de uitwaarden voor meer detail (thema overstromingsrisico en ecologie). De laatste twee modules verschillen in de 1D en 2D benadering van de problemen. Het systeem wordt aangestuurd door demografische, klimatologische en landbouweconomische scenario's die door de gebruiker te kiezen zijn. Verder kunnen de gevolgen van verschillende overstromingsgebeurtenissen (hoogwatergolf voor de hoofdgeul module en dijkdoorbraak voor de uitsnede module) worden bestudeerd. Voor het doorrekenen van de dijkdoorbraak is gebruik van Sobek® van Deltares (voorheen het Waterloopkundig Laboratorium). Veel van de gebruikte variabelen, zoals het overstromingsrisico en de geschiktheid voor bepaalde ecotypen, hebben een ruimtelijke dimensie en worden in kaarten opgeslagen. De ruimtelijke resolutie is 100 m. Dynamische modellen met een dagelijkse tijdstap (bijv. neerslag-afvoer) zijn gecombineerd met probabilistische modellen (bijvoorbeeld het aantal bevaarbare dagen per jaar). De in het Elbe DSS gebruikte modellen zijn grotendeels probabilistisch; er wordt dus niet expliciet in de tijd gerekend. Zo wordt onder meer de geschiktheid voor bepaalde ecotypen in de uiterwaarden berekend uit het gemiddeld aantal overstromingsdagen. Het overstromingsmodel voor de hoofdgeul berekent voor een gekozen hoogwatergolf aan het begin van het traject op welke locaties dijkdoorbraken verwacht zouden kunnen worden en wat de schade dan kan zijn (De Kok en Grossmann, 2010).



Figuur 3-10 Samenhang van systeemvariabelen, scenario's en beleidsindicatoren in het Elbe DSS (De Kok et al., 2009)

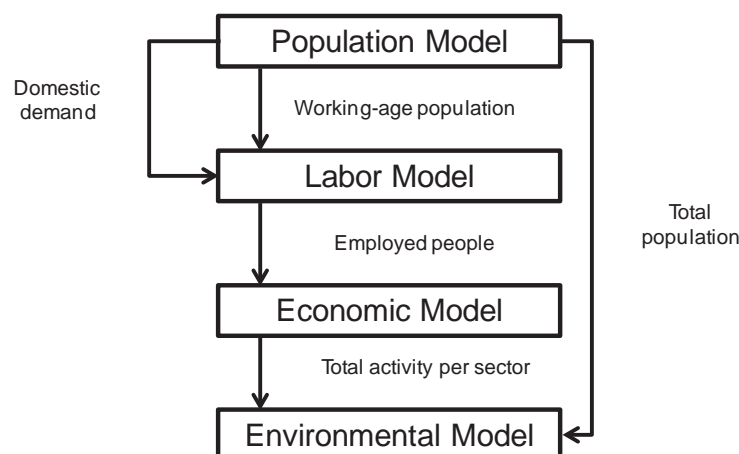
Voor de integratie van thematische modellen (waterkwaliteit, hydraulische modellering, ecotypen ...) in het DSS zijn, afhankelijk van de technische mogelijkheden en complexiteit van het model, verschillende benaderingen zijn overwogen en toegepast (Hahn et al., 2009):

- zogenaamde “sterke” koppeling waarbij de modelcode direct vanuit het DSS wordt aangestuurd (niet toegepast);
- “zwakke” koppeling waarbij de modellen via databestanden worden aangestuurd (bijvoorbeeld voor de neerslag-afvoer modellering);
- herimplementatie van het oorspronkelijke model in C++ code (bijvoorbeeld voor de modellering van ecotypen);
- herimplementatie na vereenvoudiging van het oorspronkelijke model (bijvoorbeeld afvoer-waterhoogte relaties als representatie van het 1D hydraulische model).

Uiteindelijk is het niet tot een concrete beleidstoepassing van het Elbe DSS gekomen. Het model werkt met tientallen toestandsvariabelen en een beperkt aantal stuur- en uitgangsvaariabelen of beleidsindicatoren (zie Figuur 3-10). De ingepaste thematische modellen verschillen sterk in complexiteit waardoor de samenhang op systeemniveau beperkt is. De beschikbaarheid van gegevens en thematische modellen is dus sterk sturend geweest voor het ontwerp van de systeemstructuur van het Elbe DSS, er is dus sprake van een “bottom-up” benadering. Het gevolg daarvan is dat de verschillende modules zwak gekoppeld zijn via enkele variabelen zonder dat sprake is van een groot aantal terugkoppelingen zoals in een echt systeemdynamisch model.

### 3.8. ARDEEM EN NZDEEM

Het ARDEEM (McDonald, 2005) of Auckland Regional Dynamic Ecological-Economic Model kan gebruikt worden om verschillende toekomstige ontwikkeling van de regio rond Auckland (Nieuw-Zeeland) te beschrijven. ARDEEM is een systeemdynamisch model dat economische en ecologische veranderingen in de regio tussen 1998 en 2051 simuleert door middel van niet-lineaire feedback mechanismen (McDonald, 2005). De ruimtelijke resolutie is 10-100 m. Het NZDEEM (New Zealand Dynamic Ecological-Economic Model) is op het ARDEEM model gebaseerd en opgebouwd uit vier geïntegreerde modules: een voor de demografie, een module voor de tewerkstelling en een economische en een milieumodule (Montes et al., 2007).



Figuur 3-11 Structuur en informatiestromen van het NZDEEM model (Montes et al., 2007)

De nadruk ligt op transparantie, daarom zijn de informatiestromen tussen de deelmodules gebaseerd op een beperkt aantal variabelen dat te overzien is. De *bevolkingsmodule* houdt rekening met vruchtbaarheid, mortaliteit en migratiestromen (met inbegrip van emigratie). Voor ieder jaar wordt de bevolkingsomvang berekend. Het is niet duidelijk of daarbij ook onderscheid naar geslacht gemaakt wordt. Er wordt met vier cohorten gewerkt (0-14, 15-39, 40-64, 65+ jaar). De *tewerkstellingsmodule* is gebaseerd op arbeidsparticipatie- en werkloosheidsparameters for de werkzame bevolking, eveneens op basis van vier cohorten: 15-24, 25-44, 45-64 en 65+ jaar. De *economische module* maakt gebruik van een vereenvoudigd input-output model voor de uitwisseling van producten en diensten tussen sectoren (“Social Accounting Matrix”). Deze is voor het basisjaar 2001 opgesteld. De *milieumodule* maakt gebruik van een milieuefficiëntiefactor (“Environmental Impact Accounts”) voor iedere economische sector en de huishoudens. Deze factoren beschrijven het gebruik van natuurlijke hulpbronnen en productie van polluenten door de economisch productieve sectoren en huishoudens (Montes et al., 2007).

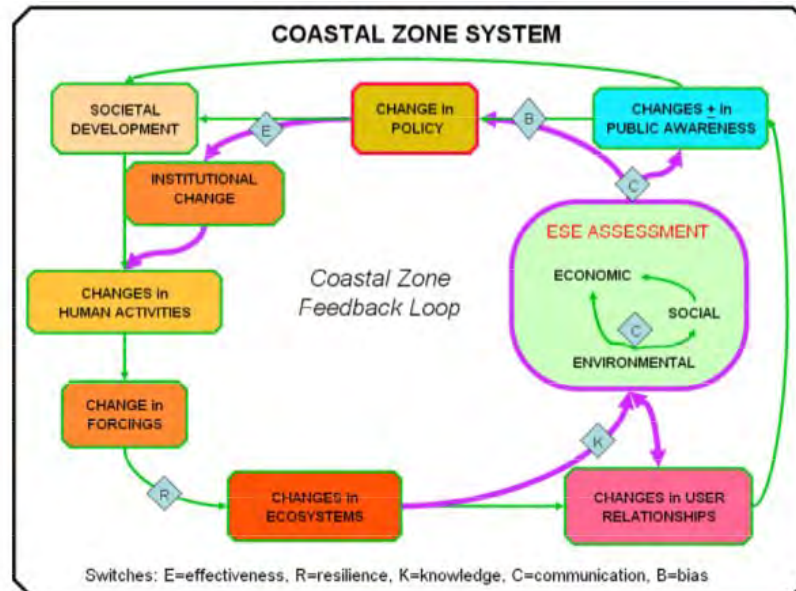
De modules worden sequentieel doorgerekend voor de periode 2000-2050. Het economische model combineert een input-output model met statistische gegevens. De milieu impacts worden uit sector-specifieke coëfficiënten berekend. De statische, boekhoudkundige basis beperkt de mogelijkheden van het model omdat de dynamische respons van actoren niet kan worden meegenomen (Montes et al., 2007). Het model heeft geen voorspellende functie, maar dient ter ondersteuning van narratieve “storylines”.

De belangrijkste kenmerken:

- combinatie van statische en dynamische modules;
- lange-termijn projecties;
- geen ruimtelijke differentiatie;
- geen terugkoppeling milieu naar economie en/of bevolking (NZDEEM).

### **3.9. SPICOSA**

Het Europese FP6 project SPICOSA (Science Policy Interface for COastal System Assessment) had tot doel een methodologie te ontwikkelen om een brug te slaan tussen wetenschap en beleid gericht op duurzaam kustzonebeheer in Europa. Deze methodologie was gebaseerd op een systeembenadering, de Systems Approach Framework of SAF (zie Figuur 3-12). Centraal stond de integratie tussen Ecologische, Sociale en Economische (ESE) processen. Voor het kwalitatief systeemontwerp werd onder meer gebruik gemaakt van Cmaps (zie ook Sectie 5.2), voor de kwantitatieve, systeemdynamische modellering gebruikten alle projectpartners ExtendSim®. Het project was georganiseerd rond case studies in 18 landen, met thema’s zoals overbevissing, eutrofiëring, aquacultuur en toerisme.

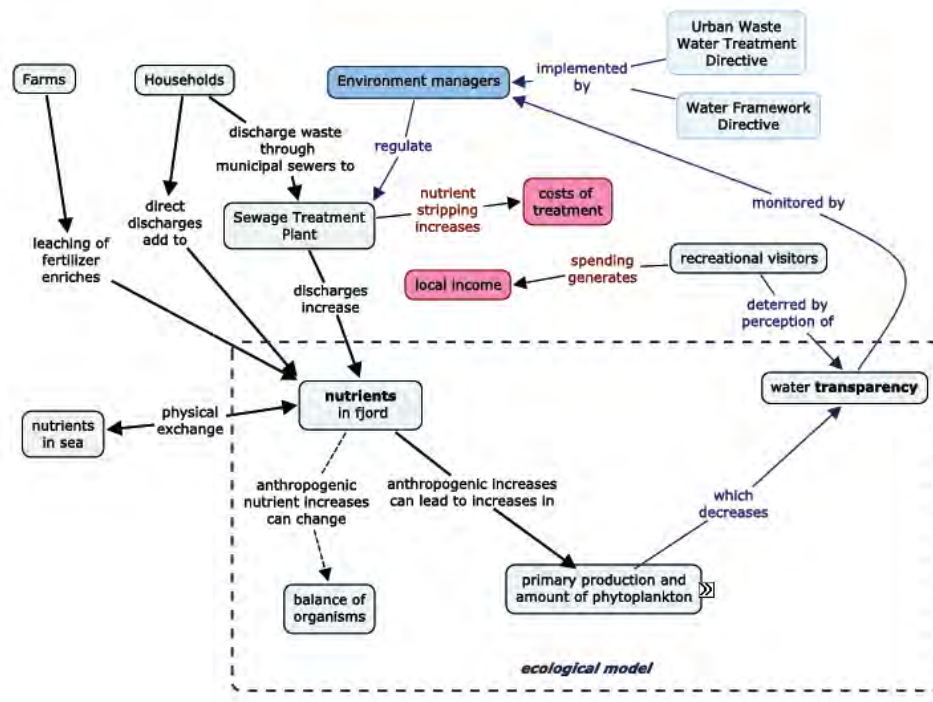


Figuur 3-12 Schematische voorstelling van de stappen die voor de SAF benadering van het SPICOSA project doorlopen worden ([www.spicosa.eu](http://www.spicosa.eu))

De SAF benadering omvat vijf stappen die iteratief doorlopen kunnen worden:

- het identificeren van de relevante problemen met belanghebbenden;
- “Design Step” - een conceptuele, kwalitatieve beschrijving van het systeem op basis van de interacties tussen de fysische, ecologische en sociaal-economische processen;
- “Formulation Step” – ontwikkeling van een kwantitatief systeemmodel;
- “Appraisal Step” – testen van het model en analyse van verschillende scenario’s;
- “Output Step” – voorleggen van de resultaten aan belanghebbenden en verwerken van feedback.

Een typisch voorbeeld van een conceptueel model als resultaat van de Design Step is in Figuur 3-13 te vinden. In het schema is een onderscheid gemaakt tussen oorzaak-gevolg relaties (in zwart) en informatiestromen (in blauw). De variabelen “nutrients” en “transparency” zijn mogelijke kandidaattoestandsvariabelen.



Figuur 3-13 Voorbeeld conceptueel model als basis voor systeemdynamische modellering met definitie van toestandsvariabelen, beleidsindicatoren en aangrijpingspunten voor beheer ([http://www.coastal-saf.eu/design-step/3\\_2.shtml](http://www.coastal-saf.eu/design-step/3_2.shtml))

Voor de implementatie van de modellen voor de case studies werd een modulaire benadering op basis van herbruikbare, generieke modelbouwstenen gevolgd (De Kok et al., 2010). De maakte de uitwisseling van modelconstructies tussen de projectpartners mogelijk. Een van de case studies betrof de stikstofbalans in het Scheldebekken, waarbij rekening gehouden werd de emissies uit diffuse en puntbronnen, de inkomsten van boeren en gevolgen voor bedrijfssluitingen, de waterkwaliteit in de Westerschelde en EU regulering op basis van aanpassing van de stikstof depositienorm (Vermaat et al., 2012). De meeste recente versie van dit model maakt het mogelijk combinaties van SRES klimaatscenario's en maatregelen zoals de bufferzones, veestapelreductie en beperking van het kunstmestgebruik door te rekenen tot 2050. Het model is gebaseerd op een terugkoppeling tussen een systeemdynamisch model voor de temporele dynamiek in ExtendSim® en model voor de fysisch-ruimtelijke processen (runoff, grondwater ...) in PCRaster®.

### 3.10. VERGELIJKING MODELLEN

Doorlopen we nog eens deze toepassingen van systeemmodellering dan kunnen we een aantal karakteristieken voor een typisch systeemdynamisch model identificeren:

- Er wordt rekening gehouden met terugkoppelingen in het systeem.
- 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 lange-termijn tijdhorizon.
- De probleem context is bepalend voor de structuur van het systeem, eerder dan de noodzaak om beschikbare modellen en gegevens te integreren (top-down benadering).



Tabel 3-1 geeft een overzicht van de technische aspecten van de belangrijkste systeemdynamische modellen die besproken zijn. Zo beschouwd zijn het World3 model, WadBOS, IMAGE2.4 en het Threshold21 typische systeemdynamische modellen. Er zijn ook een aantal kenmerken waarin deze systeemdynamische modellen verder kunnen verschillen zoals:

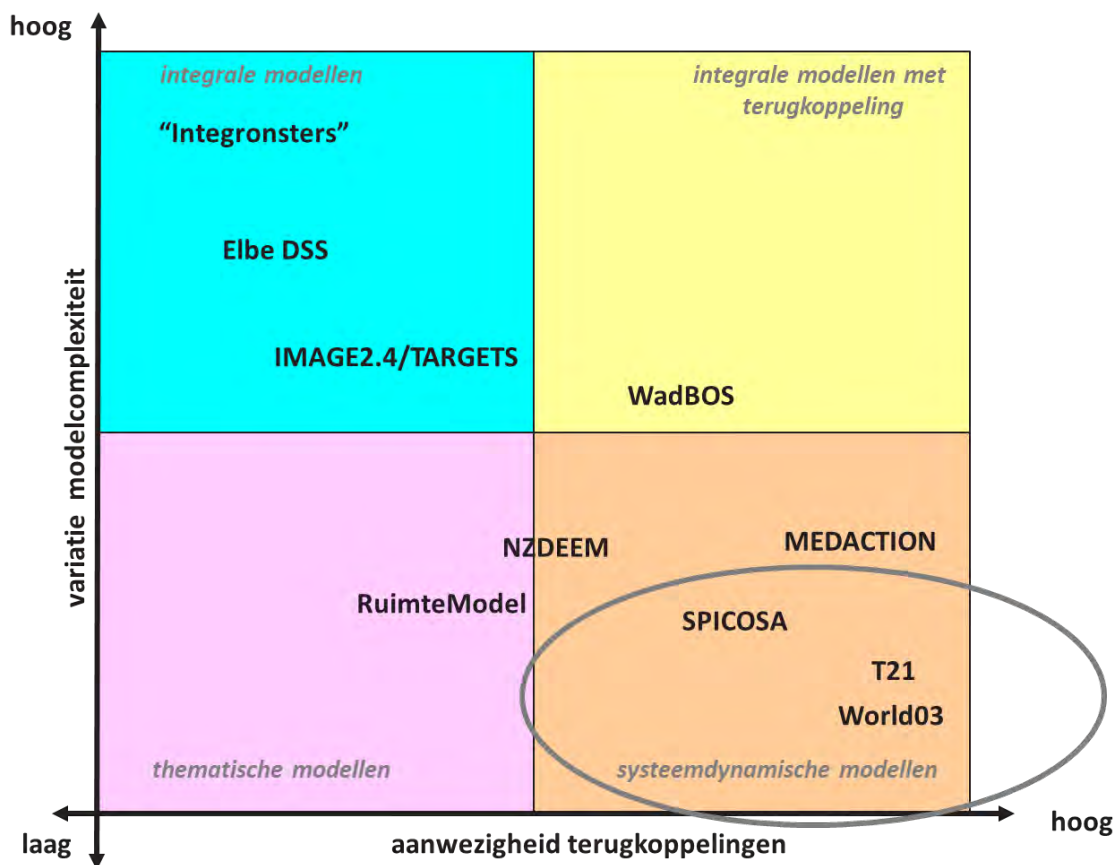
- het aantal gebruikte variabelen en terugkoppelingen;
- ruimtelijke differentiatie en/of resolutie (geen, regio's, raster);
- de tijdsresolutie (tijdstap);
- het aantal hiërarchische lagen waaruit het SDM is opgebouwd;
- de wijze van verticale integratie tussen deze hiërarchische lagen (zie bijvoorbeeld TARGETS);
- de feitelijke inzet voor beleidstoepassing (bijvoorbeeld Threshold21);
- de aandacht die al dan niet aan sociale processen is besteed;
- de terugkoppeling van milieu naar economie en bevolking (milieukosten, gezondheid ...);
- de mate van gebruiksvriendelijkheid voor niet-ontwikkelaars.

Optimalisatiemodellen zoals deze bijvoorbeeld worden toegepast om het energiegebruik te of de keuzes van landbouwers te optimaliseren verschillen wezenlijk van systeemdynamische modellen. De belangrijkste reden daarvoor is het principiële verschil tussen een dynamische systeemmodel waarvan het gedrag vrij gelaten worden en de randvoorwaarden die bij optimalisatie worden toegepast. Een tweede verschil is de performantie van veel optimalisatiemodellen. Intussen wordt wel onderzoek gedaan naar hybride modellen, die beide methoden verenigen. Zo kan SDM iteratief binnen een optimalisatieprocedure worden toegepast, uit een groot aantal simulaties wordt dan de optimale oplossing gekozen (Monte Carlo benadering). De omgekeerde situatie, waarin voor een bepaald deelsysteem een optimalisatiemodel wordt toegepast is vaak lastiger i.v.m. de oplopende rekentijden van het model. Vergelijkbare problemen doen zich voor bij evenwichtsmodellen, zoals gebruikelijk binnen de economische modellering. Dit type model is gericht op berekening van een meest waarschijnlijke eindtoestand, in plaats van de vrije, dynamische ontwikkeling van het systeem van tijdstap tot tijdstap.

|                                     | <b>World03</b> | <b>IMAGE2.4</b> | <b>WadBOS</b> | <b>NZDEEM</b> | <b>T21-Italie</b> | <b>MedAction</b> |
|-------------------------------------|----------------|-----------------|---------------|---------------|-------------------|------------------|
| aggregatieniveau                    | globaal        | globaal         | regionaal     | nationaal     | nationaal         | regionaal        |
| hiërarchische niveaus               | 1              | 4               | 3             | 1             | -                 | 3                |
| verticale integratie                | nee            | ja              | ja            | nee           | ja                | ja               |
| aantal variabelen                   | 40+            | --              | ± 20          | --            | 1000+             | 50+              |
| toepassing thematische modellen     | nee            | ja              | nee           | nee           | ja                | ja               |
| aandacht sociale processen          | ja             | ja              | nee           | ja            | ja                | nee              |
| terugkoppeling milieu naar economie | ja             | ja              | ja            | nee           | ja                | ja               |
| gebruiksvriendelijkheid             | +              | --              | ++            | -             | ++                | +                |
| software platform                   | Dynamo/Stella  |                 | Geonamica     | -             | Vensim            | Geonamica        |
| tijdresolutie                       | 4 jaar         | -               | variabel      | 50            | -                 | minuten – 1 jaar |
| tijdhorizon (jaren)                 | 200            | 200             | 10            | 10-100 m      | 10-50             | 30               |
| ruimtelijke resolutie               | -              | 50 km           | 500 m         | -             | -                 | 1 ha (op raster) |
| terugkoppelingen                    | ja             | ja              | ja            | nee           | ja                | ja               |
| inzet beleid                        | nee            | ja              | uitgesteld    | -             | ja                | -                |
| aantal hoofdthema's                 | 5              | 6               | 3             | 4             | 3                 | 6                |
| open/gesloten systeem               | gesloten       | gesloten        | open          | gesloten      | open              | gesloten         |

Tabel 3-1 Vergelijkend overzicht hoofdkarakteristieken van een aantal systeemodynamische modeltoepassingen

Afhankelijk van de begrenzing van een systeemdynamisch model kunnen de exogene variabelen fysisch (neerslag, zeespiegelstijging ...), economisch (wereldhandel, olieprijs ...) of demografisch (migratie, bevolkingsgroei ...) zijn. Een andere manier om de verschillende systeemmodellen ten opzichte van elkaar te positioneren is in het kruisdiagram van Figuur 3-14 te vinden. De verschillende toepassingen zijn hierin vergeleken op basis van de variatie in de complexiteit van de gebruikte deelmodellen en de aanwezigheid van terugkoppelingen. De achterliggende gedachte is de volgende. Typische systeemdynamische modellen zijn ontworpen met de systeemstructuur als uitgangspunt, eerder dan dat beschikbare rekenmodellen zijn geïntegreerd in een raamwerk (bottom-up benadering), bovendien zijn terugkoppelingen kenmerkend en belangrijk voor het beschrijving van niet-lineair gedrag. Dit type van modellen is in het kwadrant rechtsonder in Figuur 3-14 te vinden. Modelraamwerken waarin in een groot aantal zware rekenmodellen zijn gecombineerd zonder dat rekening is gehouden met de terugkoppelingen die essentieel zijn voor het systeemgedrag, zogenaamde "integronsters" (Voinov and Shuhgart, 2013), kunnen niet als systeemdynamische modellen worden beschouwd.



Figuur 3-14 Positionering modeltoepassingen in termen van variatie in complexiteit deelmodellen en het aantal terugkoppelingen

Voor wat de gehanteerde exogene en toestandsvariabelen, en beleidsindicatoren betreft hebben deze modellen een aantal kenmerken gemeen.

- interactie demografie en economie essentieel, met inbegrip van tewerkstelling;
- samenhang energie, mobiliteit en economie essentieel;
- terugkoppeling milieu op economie en bevolking;
- consistentie van de gebruikte thematische modellen (eventueel na aggregatie);

- middellange (10-50 jaar) tijdhorizon of langer;
- ruimtelijke differentiatie variabel en waar nodig;
- gelaagdheid in hiërarchische niveaus.

In het volgende hoofdstuk zal dieper worden ingegaan op de ontwerpeisen voor een “goed” ontworpen systeemdynamisch model.

## HOOFDSTUK 4. ONTWERPCRITERIA SYSTEEMDYNAMISCHE MODELLERING

---

### 4.1. INLEIDING

Het doel van deze stap is de karakteristieken en randvoorwaarden voor een Vlaams systeemdynamisch model te vertalen in functionele en technische criteria. Deze kunnen gebruikt worden om enerzijds een voldoende representatief systeemdynamisch model te definiëren en anderzijds de thematische rekenmodellen te toetsen op de inpasbaarheid in het systeemdynamisch model. Uit de gemeenschappelijke, karakteristieke kenmerken van systeemdynamische modellering die uit het literatuuronderzoek (zie HOOFDSTUK 3) naar voren zijn gekomen kunnen ontwerpcriteria worden afgeleid. De algemene ontwerpcriteria die voorgesteld worden hebben onder meer betrekking op de volgende modelaspecten:

1. het toekomstverkennende doel, de tijdhorizon en ruimtelijke begrenzing;
2. deelsystemen, toestandsvariabelen, processen, relaties, parameters ..., die in gekende kwalitatieve toekomstverkenningen verwant aan het milieu- en natuurbeleid toegepast worden;
3. beleidsindicatoren en beleidsmaatregelen waarmee rekening gehouden moet worden;
4. het abstractie- en aggregatieniveau (in termen van toestandsvariabelen en relaties);
5. de interne consistentie van het systeem;
6. de (milieu)sectoren en te bestuderen (milieu)thema's;
7. de tijdsresolutie waarmee gerekend wordt;
8. de exogene, sturende variabelen;
9. de noodzaak en wijze van ruimtelijke differentiatie.

De laatste twee aspecten vragen om een gedegen afweging. De belangrijkste sturende variabelen van de maatschappelijke veranderingen, die aanleiding kunnen zijn tot een evolutie naar erg verschillende wereldbeelden, zijn vooral buiten het milieu- en natuurdomein te vinden. Met name klimatologische, demografische, politieke en economische ontwikkelingen zijn bepalend voor het gedrag van het "Systeem Vlaanderen", maar vallen buiten de invloed van het systeem. Daarom moeten deze factoren in het ontwerp van het systeemdynamische model meegenomen worden. Voorbeelden zijn de invloed van de olieprijs op transportkosten en de invloed van globalisering op de instroom van goedkope arbeidskrachten.

Ruimtelijke differentiatie valt voor de meeste milieustudies niet te vermijden. Te denken valt aan bijvoorbeeld de waterkwaliteit, het ruimtegebruik en wateroverlast. Dit zal ook van invloed zijn op de thematische verdieping die in het 4-stappenplan is voorzien. Bij eerdere milieurapportages is veelvuldig gebruik gemaakt van ruimtelijk expliciete modellen voor onder meer het landgebruik, de luchtkwaliteit, geluidsoverlast, en waterkwaliteit. De ontwerpeisen dienen aan te geven in welke mate en op welke wijze het ruimtelijk karakter van dit soort modellen kan worden doorvertaald naar het systeemdynamische model. Hierbij moet het beleidsondersteunende doel van het systeemdynamische model en bijbehorende ruimtelijke detail goed voor ogen gehouden worden. De ruimtelijke entiteiten dienen aan te sluiten op de ruimtelijke differentiatie die gekozen wordt voor de thema's Bevolking, Economie etc. (gemeenten, arrondissementen of provincies).

De randvoorwaarden voor een systeemdynamisch model en daaruit afgeleide karakteristieken zullen worden gebruikt om een werkwijze te formuleren waarmee de thematische modellen kunnen worden gescreend op inpasbaarheid (Hoofdstuk 7).

## **4.2. KARAKTERISTIEKEN EN RANDVOORWAARDEN SYSTEEMDYNAMISCH MODEL VLAANDEREN**

### **4.2.1. MODELBEGRENZING EN STUURVARIABLEN**

Het zal duidelijk zijn dat een systeemdynamisch model voor de duurzaamheid in Vlaanderen in brede zin gebaseerd moet zijn op een open<sup>1</sup> systeem, dat door exogene variabelen wordt beïnvloed. De definitie van deze stuurvariabelen hangt rechtstreeks samen met de fysieke en sociaal-economische begrenzing van het “Systeem Vlaanderen”. Typische voorbeelden zijn het zeespiegelniveau, de olieprijs, immigratie en de globale economische groei. Het SDM dient te kunnen worden doorgerekend op basis van verschillende plausibele ontwikkelingen (de scenario’s) voor deze exogene variabelen, zodat de robuustheid van het milieu- en natuurbeleid kan worden getoetst. Met robuustheid wordt hier bedoeld dat de verschillen tussen de scenario’s in ontwikkeling of eindwaarden van de beleidsindicatoren binnen de onzekerheidsmarges van het systeemdynamische model vallen.

De ontwerpcriteria zijn in de eerste plaats gericht op *consistentie* van het systeemmodel, d.w.z. de terugkoppelingen tussen de thema’s dienen correct te worden beschreven voor alle scenario’s die worden doorgerekend. De thematische verdieping verloopt dan via de rekenmodellen waarbij het vooral belangrijk is om te voorkomen dat sommige thema’s te gedetailleerd worden uitgewerkt. De mate van detaillering voor alle modellen hoort te passen bij het doel van het systeemdynamische model (toekomstverkenning rond duurzaamheid). Combineren we dit uitgangspunt met de algemene karakteristieken van systeemdynamische modellen uit Sectie 3.10 en Tabel 3-1 dan kunnen de volgende concrete ontwerpcriteria worden geformuleerd, die een concretisering zijn van de algemene ontwerpcriteria uit Sectie 4.1:

- De tijdhorizon is 20-50 jaar (zie criterium 1).
- Hiërarchische gelaagdheid wordt gebruikt waar dit noodzakelijk en mogelijk is (zie criterium 2).
- Maximaal 5-10 echte toestandsvariabelen per thema of sector (zie criterium 4).
- Het detailniveau sluit aan op het doel van het systeemmodel (zie criterium 4).
- De nadruk ligt op de interne consistentie van de weergave van het systeem en de terugkoppelingen tussen de thema’s in plaats van de detaillering en volledigheid (zie ook het algemene ontwerp criterium 5 in Sectie 4.1).
- De thematische verdieping verloopt via een selectie van koppelvariabelen die de thema’s verbinden en die in de kwalitatieve systeemdiagrammen voor de deelsystemen zijn terug te vinden (zie criterium 5).
- Voor de “zichtjaren” wordt een tijdstap van 1 jaar gehanteerd; seizoensprocessen zijn ondergeschikt op het niveau van het totale systeem (zie criterium 7).
- De interacties tussen en met de thema’s demografie en economie zijn mee opgenomen in het systeemmodel omwille van het belang in de algehele dynamiek (zie criterium 8).

---

<sup>1</sup> Met ‘open systeem’ wordt hier gerefereerd naar een ‘thermodynamisch open systeem’. Dit is een systeem dat energie en materie uitwisselt met de wereld buiten het systeem. Het gaat typisch om een systeem dat in een ver van het evenwicht situatie verkeert en de kenmerken vertoont van zelf-organisatie.

- De interacties tussen mobiliteit, energie en economie zijn mee opgenomen (zie criterium 8).
- Het systeemdynamische model moet gebiedsdekkend zijn voor het Vlaams gewest (zie criterium 1).
- Rekening houdend met typische simulatie moet praktische vergelijking scenario's toelaten.
- Ruimtelijke differentiatie (100-1000 m resolutie of optimale aansluiting beleidsniveau) (zie criterium 9).

De ruimtelijke differentiatie, vooral op hoge resolutie, wordt in het algemeen niet goed ondersteund door de klassieke ontwikkelomgevingen. Het is bijgevolg aanbevolen om te kiezen voor een ruimtelijk differentiatie op een grovere resolutie, waarbij zo goed mogelijk op het beleidsniveau wordt aangesloten. Voor Vlaanderen zou bijvoorbeeld gedacht kunnen worden aan een opdeling per provincie, hydrologisch deelbekken of landbouwkundige streek (zie ook Sectie 4.1).

Ook het laatste ontwerpcriterium vraagt om nadere toelichting. Een hiërarchische opbouw van een systeemdynamisch model maakt het mogelijk dit transparant te houden en wordt door de meeste simulatiesoftware zoals Stella® en ExtendSim® uitgebreid ondersteund. Voor deze studie wordt één laag voldoende geacht voor het systeemmodel zelf om het systeem op hoofdlijnen te kunnen beschrijven en de uitwisseling van gegevens tussen de thematische modellen mogelijk te maken.

#### **4.2.2. DETAILNIVEAU**

Het detailniveau van een systeemdynamisch model, dat nauw samenhangt met de keuze van toestandsvariabelen en complexiteit van de terugkoppelingen daartussen, is van invloed op de transparantie en inpasbaarheid van thematische modellen. Bij het opstellen van de kwalitatieve systeemdiagrammen is gebleken dat experts snel geneigd zijn om processen zo adequaat mogelijk op te nemen in het systeemdiagram dat daarmee eerder een representatie wordt voor de werking van het thematisch model dan een uitgangspunt voor integratie met andere thema's. Het doel van inpassing in een systeemdynamisch model is echter niet om de thematische modellen te vervangen, met andere woorden: de afbakening tussen deze thematische modellen en het systeemmodel is van belang maar niet gemakkelijk om te maken. Voor het thema luchtkwaliteit is bijvoorbeeld onderscheid te maken tussen verschillende stoffen (NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, fijn stof ...) terwijl de relaties tussen emissies en concentraties ook expliciet kunnen worden beschreven. In principe worden deze verbanden door de gangbare luchtkwaliteitsmodellen afdoende beschreven. Voor een systeemdynamisch model zou een gegeneraliseerde variabele "luchtkwaliteit" kunnen volstaan voor terugkoppeling naar andere toestandsvariabelen voor andere thema's zoals "Gezondheid en Welzijn" of "Biodiversiteit". Voor de demografie zou het systeemmodel beperkt kunnen zijn tot de totale bevolkingsomvang en de beroepsbevolking, waarbij via de gemiddelde arbeidsparticipatie de economische actieve bevolking berekend kan worden. Een indeling naar leeftijdscohorten of jaarklassen past eerder in een onderliggend thematisch model zoals de demografische projecties van het Federaal Planbureau. In sommige gevallen is een dergelijke detaillering wel weer noodzakelijk voor de integratie met andere thema's in het systeemdynamische model (denk bijvoorbeeld aan de specifieke invloed van een bepaalde substantie op de gezondheid). Systeemdiagrammen zoals in Figuur 3-4 en Figuur 3-13 maken het detailniveau expliciet.

#### **4.2.3. KEUZE HOOFD- EN DEELTHEMA'S**

De essentiële hoofdthema's voor beschrijving van de samenhang tussen de exogene, stuur-, toestandsvariabelen en beleidsindicatoren rond duurzaamheid zijn Demografie, Economie en Milieu (zie bijvoorbeeld de opzet van het NZDEEM model). Beschouwen we vervolgens het "Systeem Vlaanderen" op het volgende detailniveau dan kunnen de volgende thema's worden gehanteerd in het systeemdynamische model: Bevolking, Economie, Energie, Mobiliteit, Ruimtegebruik, Landbouw & Voeding, Klimaat, Water, Lucht, Natuur & Milieu en Materiaalgebruik. Deze thema's komen ook terug in de Milieu- en Natuurverkenning.

Zoals zal blijken (zie Hoofdstuk 5) biedt dit een voldoende basis voor de kwalitatieve systeembeschrijving en sluiten deze thema's aan bij de breedte en gehanteerde begrippen in toekomstverkenningen en beleidsstudies voor Vlaanderen zoals de Milieuverkenning (Van Steertegem et al., 2009), Natuurverkenning (Dumortier et al., 2009), Toekomstverkenning van het Vlaams Wonen (Ryckewaert, 2011) en de Algemene Omgevingsanalyse (Studiedienst Vlaamse Regering, 2009). Waar noodzakelijk kan een verdere verfijning worden toegepast op het niveau van de individuele toestandsvariabelen en thematische modellen. Zo past de Vlaamse woningmarkt bijvoorbeeld binnen het thema "Ruimtegebruik" en de modellering van residentieel landgebruik in het RuimteModel (Engelen et al., 2011b).

De voorgestelde deelthema's werden op de technische workshop van 25 april bekrachtigd (zie ook Sectie 5.3).

#### **4.2.4. EXOGENE INVLOEDSFACTOREN**

De exogene invloedsvariabelen houden verband met onzekere, factoren die het Systeem Vlaanderen beïnvloeden zonder dat dat andersom het geval is. 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. Voorbeelden zijn de gemiddelde temperatuur en extreme neerslagwaarden (klimaatverandering), globalisering en de wereldolieprijs. In de WLO studie zijn voor elk wereldbeeld samenhangende combinaties opgesteld voor de ontwikkeling van de sturende politieke, sociaal-economische, fysische en ruimtelijke factoren (Janssen et al., 2006). Uit de beschrijving in Tabel 2-1 is het mogelijk een aantal generieke, exogene variabelen af te leiden waarmee de verschillen tussen de WLO wereldbeelden uit Sectie 2.4.1 kwalitatief kunnen worden gekarakteriseerd (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, terugtredende overheid, technocratisch eerder dan democratisch, econ polarisatie, beperking migratie, mobiliteit privaat geregeld, beperkt natuurbelied                          | solidariteit, overheid alleen lokaal sterk, EU zwak, meer collectieve diensten, sociaal voorz lokaal, alleen asieliimmigr, lokaal mob beleid                         | Privaat-nationaal, overheid zwak, vrije markt dominant, soc voorz beperkt, mobiliteitsbelied 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, orientatie afh soc-econ status  | lokale focus, milieubewust, OV gesteund  | surubaan voor kansrijken, orientatie 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 verlagening 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 milieuplagen | welvaart stijgt, polarisatie, hoge arbeidsparticipatie, rat race, stijgende werkgelegenheid door groei en uitbesteding diensten, langer werken, verdere tertiërisering, weinig milieu oplagen | welvaart daalt, werkloosheid neemt toe, meer thuiswerken en jobs dicht 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 milieuplagen |
| 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 plaats, 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 opeen wonen   | geen prijsdaling, hergebruik woonbestand, gespreide leegstand, dichtheid blijft gelijk   | hoogbouw voor armen, sterke stijging woonprijzen, dichter opeen 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 bedrijfsterrainen 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 natuuraareaal voor verweving   | geen druk open ruimte, Parklandschap, GEEN afname landbouwareaal, nieuwe functie snelwegen (biocorridor)   | druk open ruimte, geen coördinatie waterbeheer, snelle versterking, 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 4-1 Samenvatting WLO wereldbeelden per deelthema voor toepassing op Vlaanderen (Engelen et al., 2011a)

De beschrijvingen uit Tabel 4-1 kunnen worden vertaald naar de volgende processen waarin de wereldbeelden kunnen verschillen:

- mate van EU regulering
- bevolkingsgroei
- immigratie
- economische groei/welvaart
- arbeidsparticipatie beroepsbevolking
- tertiaïrisering
- druk op open ruimte
- mobiliteitsbeleid
- verstedelijking
- energieprijzen
- huishoudenverdunning
- woon-werk verkeer
- concentratie economie
- functieverweving/scheiding
- verdichting
- versnippering
- milieubewustzijn
- extensivering landbouw

#### **4.2.5. BELEIDSINDICATOREN EN BELEIDSMAATREGELEN**

Het eerste doel van het systeemdynamische model is toekomstverkenningen in het kader van het 4-stappen plan te ondersteunen via een raamwerk dat rekening houdt met de terugkoppelingen die het systeemgedrag beïnvloeden. De veranderingen in de toestand van het systeem dienen daartoe uitgedrukt te worden in indicatoren 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](http://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. Zo is de Europese broedvogelindex geen geschikte indicator. Aggregatie tot op het abstractieniveau van het systeemdynamische model zal dus noodzakelijk zijn. De keuze van indicatoren is ook van belang voor het systeemontwerp en indirect de rekenmodellen die binnen het systeemdynamische model worden ingezet omdat deze moeten kunnen worden berekend. Een zelfde aggregatie zal nodig zijn voor de keuze van maatregelen, die moeten kunnen worden uitgedrukt in stuurvariabelen waarmee het systeem kan worden beïnvloed. Voorbeelden daarvan zijn de Pensioenleeftijd voor het thema Demografie en de Belasting op Energie (zie ook Bijlage C). Per thema zullen maximaal één of hooguit enkele goedgekozen beleidsindicatoren en stuurvariabelen kunnen volstaan om de verschillende tussen scenario's te kunnen onderscheiden. Indien mogelijk kan worden aangesloten bij de literatuur. Het is dus wel de bedoeling dat met deze indicatoren toekomstverkenningen en daarmee beleid kan worden ondersteund. Tabel 4-2 toont een voorstel voor een selectie van beleidsrelevante indicatoren, die de toestand van het systeem op (middel)lange termijn kunnen beschrijven. Andere selecties zijn ook denkbaar en kunnen uit de systeemdiagrammen van hoofdstuk 5 afgeleid worden. De selectie in Tabel 4-2 is gemaakt om tot een minimale 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 tijdsstap van 1 jaar kunnen gepresenteerd worden. Zie daarvoor de hoger vermelde ontwerpcriteria.

| Thema               | Systeemoutput -indicatoren (eenheid)  |
|---------------------|---|
| Bevolking & Welzijn | Totale Bevolkingsomvang (aantal)<br>Omvang Beroepsbevolking (aantal)  |
| Economie            | Bruto Regionaal Product (BRP in Euro per jaar)<br>ISEW indicator voor duurzame welvaart                         |
| Energie             | aandeel lokale energieproductie (%)<br>aandeel hernieuwbare energie (%)<br>totale BKG emissies (ton/jaar)       |
| Mobiliteit          | Intensiteit Wegverkeer ( $10^9$ pkm/jaar)<br>BKG emissies (aandeel)   |
| Ruimtegebruik       | Landbouwruimte<br>Open Ruimte<br>Bebouwde Ruimte  |
| Natuur & Milieu     | oppervlak effectief onder natuurbeheer (ha)<br>oppervlakte (toegankelijk) bos (ha)                              |
| Landbouw            | dierlijke productie<br>plantaardige productie<br>kunstmestgebruik<br>pesticidegebruik<br>BKG emissies (aandeel) |
| Materiaalgebruik    | Materiaalverbruik Industrie<br>Materiaalverbruik Huishoudens<br>Afvalproductie                                  |
| Lucht               | emissies fijn stof  |
| Water               | Kwaliteit oppervlaktewater<br>Emissies polluenten   |
| Materiaalgebruik    | Productie afval<br>Hergebruik afval   |

Tabel 4-2 Selectie indicatoren systeembeschrijving duurzaamheid Vlaanderen

In het volgende Hoofdstuk beschouwen we de samenhang tussen de thema's en de rol van de exogene sturende factoren, de beleidsindicatoren en het beleid zelf op hoofdlijnen. Dit doen we door kwalitatieve systeemdiagrammen op stellen voor de werking van het totale systeem en de afzonderlijke thema's. Deze systeemdiagrammen beschrijven de architectuur van een systeemdynamisch model voor duurzaamheid in Vlaanderen.

## HOOFDSTUK 5. KWALITATIEF SYSTEEMDIAGRAM

---

### 5.1. INLEIDING

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 nog wel eens verschillende termen gebruikt voor kwalitatieve systeemdiagrammen: mind maps, concept networks, causal loop diagrams, invloedsdiagram, system maps, etc. Bij mind maps 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 mind maps en concept netwerken blijven die vaak beperkt tot het faciliteren van brainstorming sessies 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 duurzame ontwikkeling in beschouwing genomen worden: demografie, economie, mobiliteit, energie, ruimte, landbouw, natuur en water. Deze inperking is gebaseerd op de aspecten die in eerdere toekomstverkenningen en systeemmodellen gericht op duurzame ontwikkeling zijn meegenomen. De thema's zijn vanuit de vorige studies gekend en gedefinieerd. Ze zijn bovendien voldoende breed geïnterpreteerd en ingezet om samen tot een voldoende integrale aanpak te ondersteunen.

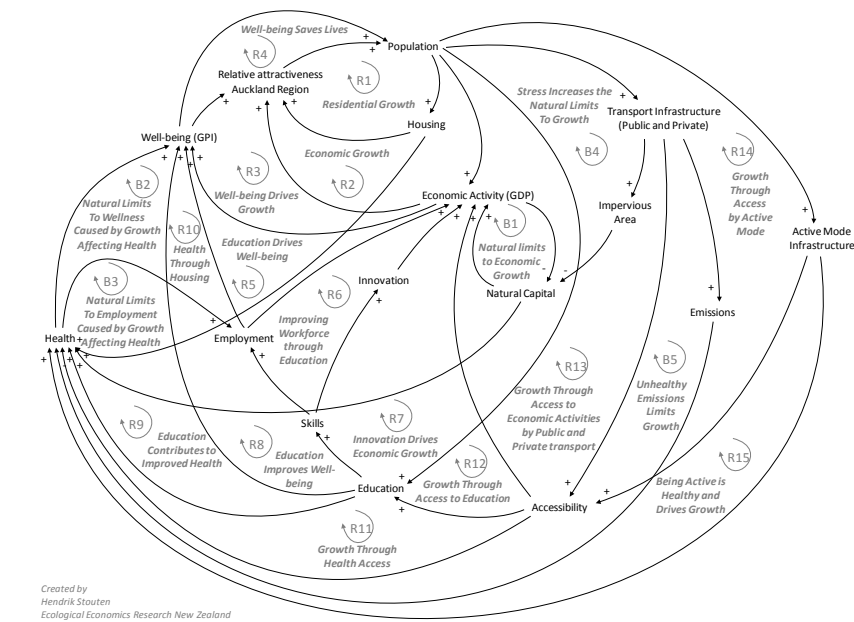
Zoals bij de analyse van systeemdynamische modellen bleek worden veel van deze modellen extern aangestuurd door variabelen gerelateerd aan klimaatverandering, demografische en economische ontwikkeling. Deze informatie is zowel nuttig voor de afbakening van het systeemmodel als voor de keuze van het aggregatieniveau. 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 systeemmodelleerders 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 ...).

Een goed voorbeeld van een kwalitatief systeemdiagram vinden we in het onderstaande causale relatiediagram voor de regio Auckland (Nieuw Zeeland) dat gebruikt is ter ondersteuning van participatieve processen.



Figuur 5-1 Causaal relatiediagram voor de regio Auckland (Stouten, 2013). B = balancing feedback; R = reenforcing feedback

## 5.2. ONTWERP SYSTEEMDIAGRAM

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 korte gebruikshandleiding is in Bijlage A te vinden. 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.

Om tot een consistent, representatief en gevalideerd systeemdiagram te komen werden een aantal stappen doorlopen:

a. Identificatie en benoeming van de belangrijke toestandsvariabelen. Voor elk van de gekozen thema’s afzonderlijk (klimaat, demografie, water, economie, energie, natuur & milieu, mobiliteit, landbouw & voeding en ruimtegebruik) werden bestaande toekomstverkenningen voor Vlaanderen zoals de Milieuverkenning (Van Steertegem, 2030), de Natuurverkenning (Dumortier, 2009) en de Algemene Omgevingsanalyse (SVR, 2009) doorlopen om de belangrijkste variabelen te identificeren. Voorbeelden zijn de variabelen “bevolkingsomvang” voor het thema “Demografie” en “Suburbanisatie” voor het thema “Ruimtegebruik”. In het bijzonder werd aandacht besteed aan

thema overschrijdende variabelen die van belang zijn voor de systeemintegratie. Een voorbeeld daarvan is de variabele “Bio-energie” die de thema’s Energie en Landbouw kan verbinden. Toestandsvariabelen dienen de toestand van het systeem op een deelaspect te beschrijven, en moeten in de mate van het mogelijke meetbaar zijn. Daarom is “Zure depositie” een betere toestandsvariabele dan “Verzuring”, waarmee een proces gekoppeld aan meerdere variabelen (emissies, depositie, zuurtegraad etc.) wordt bedoeld. Een ander voorbeeld is “Gedrag” dat van invloed is op de keuze van vervoersmodus (fiets, openbaar vervoer, auto, ..). Een dergelijke variabele kan beter vervangen worden door “Duurzaamheid Gedrag”, of “Duurzaamheid Transportkeuze”, variabelen die tenminste meetbaar zijn op een ordinale schaal van discrete klassen zoals {zeer laag, laag, gemiddeld, hoog, zeer hoog}.

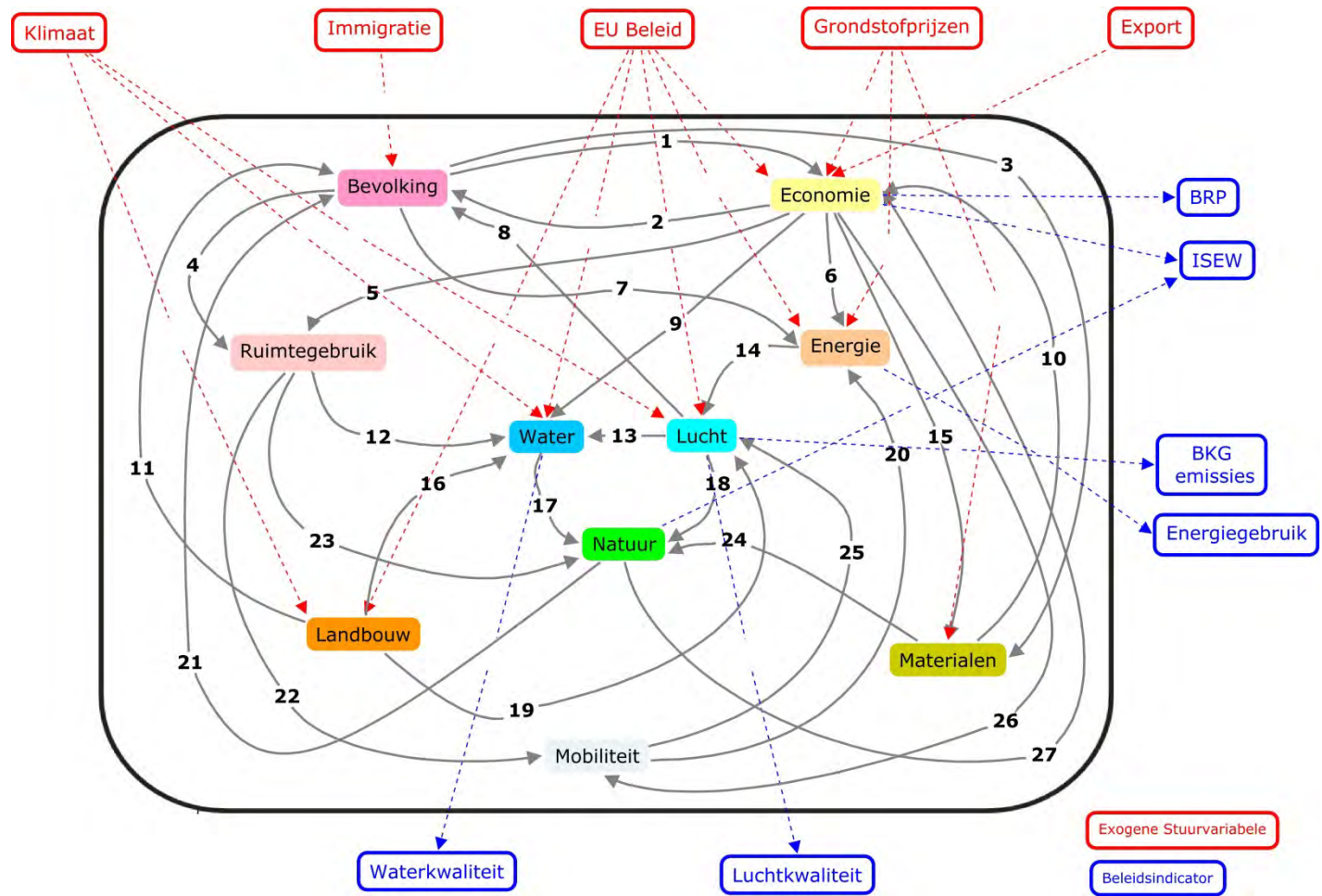
b. Schematisatie van de causale relaties en terugkoppelingen. Vervolgens werden binnen elk thema de causale verbanden tussen de weerhouden variabelen aangeduid en kwalitatief gekarakteriseerd (“+” voor een positieve, versterkende invloed, “-” voor een negatieve, dempende invloed). Van belang daarbij zijn vooral de terugkoppelmechanismen, die van invloed zijn op het tijdsafhankelijke systeemgedrag (bijvoorbeeld exponentiële bevolkingsgroei). Deze causaliteit houdt in dat de relatie tussen twee verbonden variabelen op kwantitatieve wijze kan uitgedrukt worden. Deze kwantificatie wordt nog niet opgesteld, maar wel verondersteld.

c. Eerste thematische validatie. Zowel de variabelen als de causale relaties daartussen werden per thema aan experts binnen VITO en op de domeinen Demografie, Klimaat, Energie, Economie, Ruimtegebruik, Landbouw, Lucht, Water, Mobiliteit, Natuur voorgelegd met het verzoek deze te vervolledigen en verbeteren indien nodig.

d. Integratie op systeemniveau. De volgende stap bestond eruit de 10 thema’s op systeemniveau te integreren. Daarna werd hetzelfde gedaan op het niveau van de variabelen met de thematische systeemdiagrammen uit stap c. Cmaps biedt de mogelijkheid van automatische koppeling van systeemdiagrammen door herkenning van gelijke variabelen (“merging”), maar omwille van de overzichtelijkheid werd deze integratie handmatig uitgevoerd.

e. Tweede thematische ronde en systeemvalidatie. Tijdens de technische workshop met MIRA experts op de deeldomeinen Demografie, Landbouw, Economie, Klimaat, Mobiliteit, Ruimtegebruik, Energie, Lucht en Water werden de systeemdiagrammen thema per thema voorgesteld en bediscussieerd. Nadien werd het thema Natuur en een nieuw thema Materiaalgebruik nog voorgelegd ter validatie en aanvulling aan experts van INBO en OVAM. Na aanpassingen werd het systeemdiagram voor het totale systeemdiagram opgesteld.

Figuur 5-2 is een weergave van de thematische integratie voor de deeldomeinen voor het totale systeem op het niveau van de thema’s. Voor de overzichtelijkheid is het thema Klimaat als exogene invloedsfactor opgenomen.



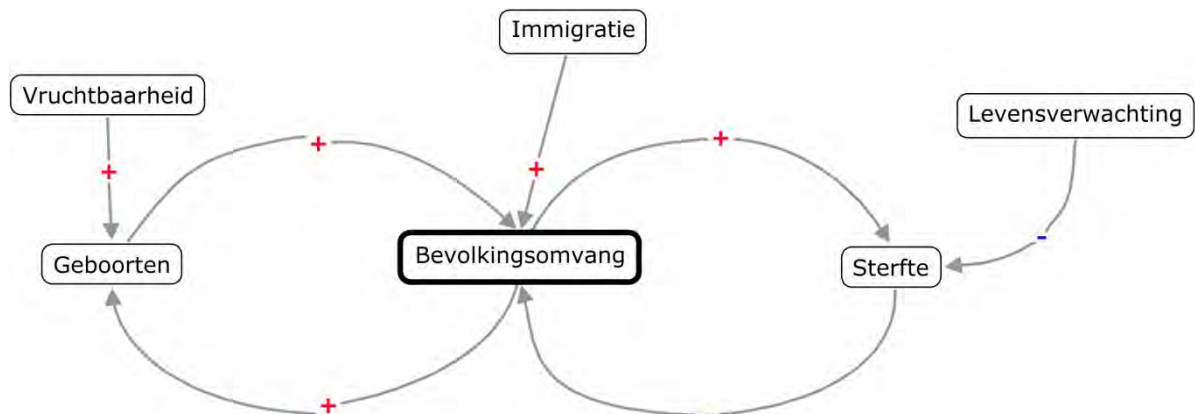
Figuur 5-2 Thematische integratie van de deeldomeinen in een systeembeschrijving gericht op duurzaamheid voor de Vlaamse context



1. Beschikbaarheid arbeid, consumptie
2. Tewerkstelling, inkomen,
3. Materiaalgebruik bevolking
4. Residentiele ruimte vraag
5. Ruimte vraag activiteiten
6. Energie vraag sectoren
7. Energie vraag 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. Materiaal vraag industrie
16. Diffuse bronnen
17. Invloed waterkwaliteit op natuur, versnippering
18. Invloed luchtkwaliteit
19. Invloed landbouw op luchtkwaliteit (NH<sub>3</sub>, ...)
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 5-1 Voorbeeld typische relaties in het systeemdiagram uit Figuur 5-2

Het kwalitatieve systeemdiagram voor het totale systeem uit Figuur 5-2 is bijzonder nuttig omdat het inzicht biedt in de samenhang tussen de verschillende domeinen en als leidraad gebruikt kan worden voor de keuze van het juiste detailniveau waarop de thematische modellen geïntegreerd zouden moeten worden. De systeemdiagrammen voor de deelsystemen (zie ook Bijlage C) geven de processen meer in detail weer. Op dit volgende hiërarchische niveau vinden we de toestandsvariabelen. Een voorbeeld voor het thema Bevolking is in Figuur 5-3 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 5-3 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 op de structuur en werking kwalitatief weer te geven. Transparantie en consistentie zijn belangrijker dan een volledige representatie van het systeem op alle detailniveau's (dit is minder zinvol en past eerder binnen de thematische modellering).
- Aggregatieniveau: met het oog op de inpasbaarheidstoets volstaat het de systeemdiagrammen enigszins abstract te houden met een beperkt (10-15) aantal toestandsvariabelen.
- Nomenclatuur: het is van belang geschikte, ondubbelzinnige benamingen voor de variabelen te kiezen zodat geen begripsverwarring ontstaat en tevens zoveel mogelijk wordt aangesloten bij de binnen de bestaande toekomstverkenningen gehanteerde begrippen (indien mogelijk). Het verdient aanbeveling om een glossary op te stellen en bij te houden waarin een korte beschrijving wordt gegeven van alle gebruikte begrippen.
- Afbakening: in verband met de gehanteerde tijdhorizon en toepassing op het Vlaams Gewest kunnen grenzen gesteld worden aan de systemen voor de deeldomeinen. Dit betekent bijvoorbeeld dat 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.

### 5.3. CONCLUSIES TECHNISCHE WORKSHOP

Op 25 april 2013 werd een technische workshop georganiseerd om een eerste opzet voor de systeemdiagrammen voor te leggen aan domeinexperts uit het MIRA team. De discussie werd voorafgegaan door een inleiding op het doel van de studie en de toepassing van systeemdynamische modellen. Het doel van de workshop was de keuze en benaming van toestandsvariabelen en de keuze van terugkoppelingen. Het belang van consistentie tussen de thema's werd benadrukt. Met betrekking tot het diagram voor het totale systeem werd het volgende opgemerkt:

*Totale systeem (zie Figuur 5-2):*

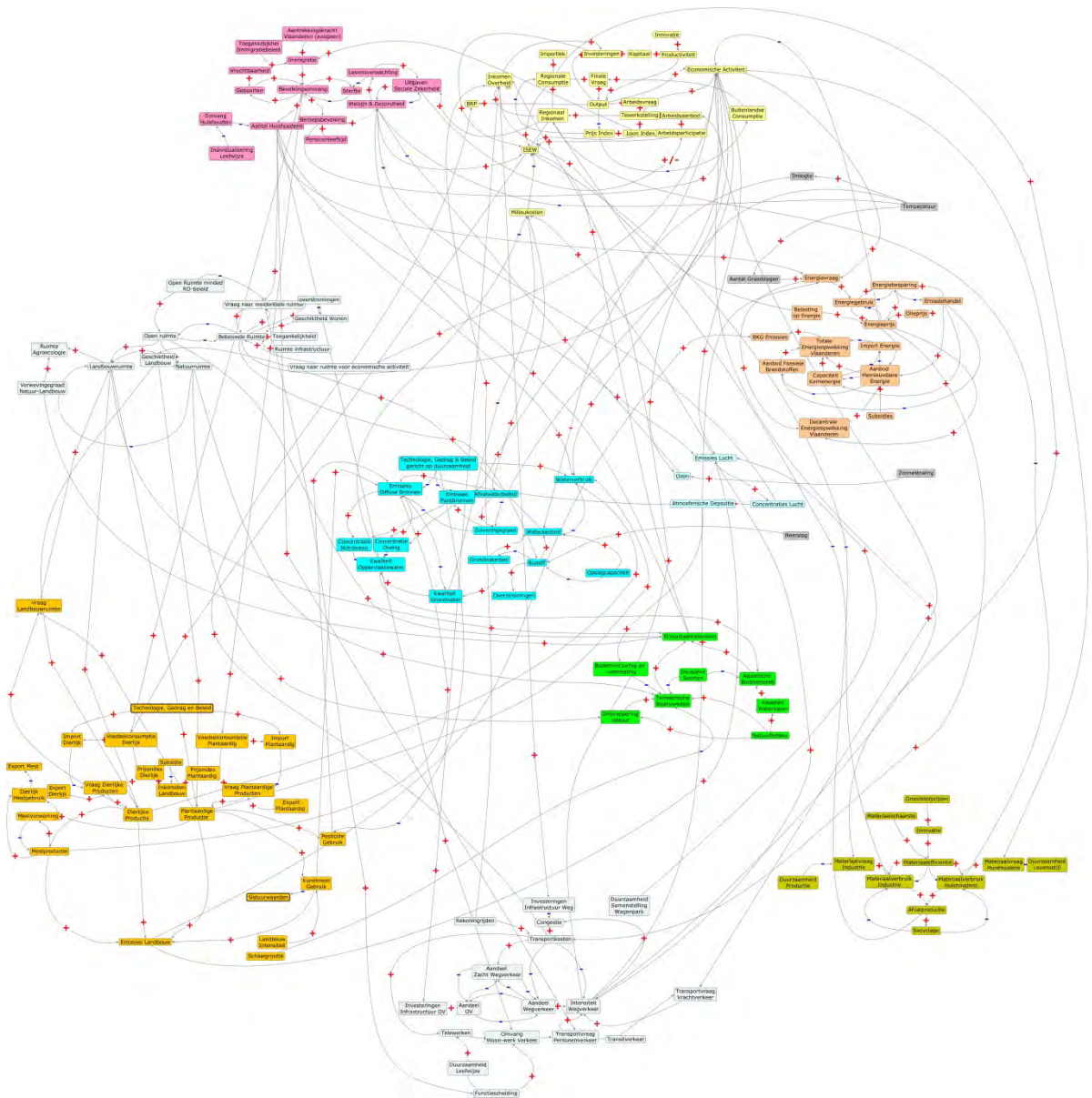
- Dit schema beschrijft de samenhang tussen de thema's op een hoog niveau van abstractie en is niet bedoeld om direct te worden toegepast.
- De invloed van Luchtkwaliteit op Natuur ontbreekt.
- Het gebruik van materialen en/of grondstoffen, relevant voor verschillende thema's, zou als apart thema kunnen worden toegevoegd, analoog aan o.a. energie. Het gaat niet enkel over grondstofprijzen, maar ook over fysische stromen van grondstoffen en materialen, materiaalefficiëntie, recyclage, het sluiten van kringlopen.
- Voor het accentueren van het gebruik van het systeem diagram voor natuur- en milieubeleid, moeten de deelsystemen natuur, lucht en water liefst centraal staan, met meer perifeer dan energie en ruimtegebruik en nog meer perifeer bevolking, economie, mobiliteit en tot slot de stuurvariabelen.
- Het systeemmodel wordt begrensd tot waar thematisch modellen verder gaan. Dus in die zin treedt het systeemmodel niet in de plaats van emissiemodellen en lucht-

waterkwaliteitsmodellen. Wel zijn emissies en concentraties meegenomen omdat er terugkoppelingen zijn hoger in de milieuverstoringketen.

- Het systeemmodel is begrensd tot Vlaanderen. Tegelijk is het een open systeem. Dus immigratie, externe vraag, export, EU-beleid zijn stuurvariabelen, extern aan het systeem. Bij de uitwerking van een kwantitatief model zullen voor bepaalde scenario's gelijkaardige aannames voor de buitenlandse emissies die inwerken op Vlaanderen moeten gemaakt worden. Dus is er nood aan een samenhangende set van stuurvariabelen.
- Elke toestandsvariabele is een meetbare grootte. Processen zoals vermesting, verspreiding zijn geen toestandsvariabelen, maar wel pijlen. Dit is nodig om later tot een kwantitatief model te komen.

Het gedetailleerde commentaar met betrekking tot de diagrammen voor de deelsystemen is in Bijlage B te vinden.

De meest recente versies van de systeemdiagrammen, waarin het commentaar uit de workshop en latere suggesties zijn verwerkt, zijn in Bijlage C (Figuur 8-1 tot Figuur 8-11) te vinden. Voor het thema Economie is een kwalitatief systeemdiagram voor een systeemdynamisch model van de economische ontwikkeling van Zwitserse achterstandsregio's (Kopainsky, 2005) als uitgangspunt genomen. Figuur 5-4, tenslotte, toont het kwalitatief systeemdiagram voor het totale systeem op het niveau van de terugkoppelingen en toestandsvariabelen, nadat alle thema's zijn geïntegreerd. De positionering van de thema's ten opzichte van elkaar is dezelfde als die voor het systeemdiagram op hoofdlijnen (Figuur 5-2). Ondanks de complexiteit van het systeemdiagram is in één oogopslag duidelijk waar de meeste causale relaties te vinden zijn. Elk thema is via zogenaamde "koppelvariabelen" verbonden met de andere thema's. Voor het thema Demografie is de variabele "Aantal Huishoudens" een belangrijke koppelvariabele, voor de Economie de variabele "Economische Activiteit", en voor het thema Mobiliteit de variabele "Intensiteit Wegverkeer". Omwille van de transparantie zijn enkele vereenvoudigingen aangebracht door parallelle terugkoppelingen samen te nemen. Dit geldt voor de landbouwemissies, en emissies en concentraties voor de luchtkwaliteit. Zo is geen onderscheid gemaakt tussen fijn stof, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> etc. zoals in de diagrammen voor de thema's Landbouw en Voeding, en Luchtkwaliteit. De toestandsvariabelen voor het thema Klimaat zijn rondom het thema Energie gegroepeerd.



Figuur 5-4 Kwalitatief systeemdiagram voor het totale systeem nadat alle thema's geïntegreerd zijn

#### 5.4. TECHNISCHE RANDVOORWAARDEN

De technische implementatie van een systeemdynamisch model zoals hier bedoeld dient de aansturing van de thematische modellen via enkele in- en uitgangsvARIABLEN, die in sommige gevallen ook ruimtelijk gedifferentieerd zullen zijn, zo efficiënt mogelijk te ondersteunen. Bij integrale modellering zijn in principe drie benaderingen mogelijk om modellen in een modelsysteem te koppelen (Hahn en Engelen, 2000; Hahn et al., 2009): directe modelkoppeling waarbij modellen direct onderling gegevens uitwisselen, indirecte modelkoppeling waarbij gegevens via gemeenschappelijke bestanden worden uitgewisseld, en herimplementatie van modellen om de integratie te vereenvoudigen (deze laatste benadering is softwaretechnisch wel de meest bewerkelijke). Typische ontwikkelomgevingen voor systeemdynamische modellering zoals ExtendSim® of VenSim®, dat voor het Threshold 21 model (zie Sectie 3.4) gebruikt is, zijn gericht op beschrijving van dynamische systemen op hoofdlijnen, weliswaar zonder de thematische verdieping die hier beoogd wordt. Het gebruik van een dergelijk modelleerplatform om modellen aan te sturen lijkt het eerst aangewezen. Hiermee is niet alleen automatisch de consistentie bewaakt, maar worden ook typische software-technische knelpunten vermeden die zich vaak voordoen bij de implementatie van complexe, integrale modelsystemen. De performantie van het totale systeem (in termen van rekentijd) zal vooral gedomineerd worden door de thematische berekeningen, omdat het systeemmodel, ondanks de ogenschijnlijke complexiteit van terugkoppelingen in de systeemdiagrammen, rekenkundig eenvoudig is en op hoofdlijnen werkt. Programmeertalen waarmee met inter-thematische modelintegratie al eerder ervaring is opgedaan zijn bijvoorbeeld C++ en Python. In ieder geval zal voor de software implementatie van het systeemmodel rekening gehouden moeten worden met de flexibiliteit voor aanpassingen en de technische performantie. Dit laatste kan gebeuren door de uitwisseling van gegevens tussen de modellen te doen zonder dat die gegevens gekopiëerd of geconverteerd hoeven te worden. Ook zal aandacht besteed moeten worden aan de wijze waarop bij de uitwisseling van gegevens tussen de modellen met tijd wordt omgegaan. Een robuuste benadering is de toepassing van een afzonderlijke module die de schematisatie van modellen met verschillende tijdstappen regelt (Schmitz et al., 2013).

## HOOFDSTUK 6. INVENTARISATIE THEMATISCHE REKENMODELLEN

---

### 6.1. INLEIDING

Men kan onderscheid maken tussen dynamische procesmodellen, evenwichts- of optimalisatiemodellen, statische modellen en modellen gericht op “real-time forecasting” onderscheiden worden. 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. De interne structuur van deze tabellen vormt de basis voor de wisselwerking tussen sectoren en garandeert daarmee de economische consistentie van het model. De inpasbaarheid van dergelijke modellen in een systeemmodel voor de ondersteuning van toekomstverkenningen is afhankelijk van de mate waarin de coëfficiënten in de matrix tijdsafhankelijk te maken zijn. 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 met gebruikmaking van referentiegegevens, de systeemtoestand op een specifiek tijdstip wordt berekend. 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 berekenen, en passen daarom niet in een toekomstverkenning met een lange tijdhorizon. Optimalisatie modellen berekenen bij elke tijdstap een tussentijdse optimale oplossing, wat in strijd is met de vrijheidsgraden van een dynamisch systeemmodel. Wel kan een systeemdynamisch model stochastisch worden ingezet om een groot aantal scenario’s door te rekenen, waaruit achteraf de meest optimale oplossing kan worden bepaald. Uiteraard zijn ook combinaties van verschillende typen modellen mogelijk.

Een analyse van alle mogelijke thematische rekenmodellen die in aanmerking komen voor inpassing binnen een systeemdynamisch model is niet haalbaar en ook niet zinvol. Een eerste, globale screening is daarom noodzakelijk voordat een aantal thematische rekenmodellen grondiger getoetst worden op inpasbaarheid binnen een beleidsanalyse zoals bedoeld in het 4-stappen plan (Op ’t Eyndt, 2011). De keuze van thematische modellen die in deze “longlist” zijn opgenomen moet niet gezien worden als enig alternatief voor de thematische verdieping. Het is een kwalitatieve inventarisatie van modellen die als voorbeeld kunnen dienen voor een inpasbaarheidsanalyse, de formulering van de selectiecriteria en basis voor de ontwikkeling van de methodiek. Een systematische benadering maakt toekomstige herhaling van de inpasbaarheidsanalyse met andere modellen mogelijk. De eerste selectie van modellen voor deze longlist richt zich op de meest relevante thema’s voor duurzaamheid in Vlaanderen, waarbij rekening is gehouden met bestaande toekomstverkenningen (MIRA, NARA en Omgevingsanalyse) en de ontwerpcriteria uit Hoofdstuk 4. De weerhouden thema’s omvatten dan water- en luchtkwaliteit, ruimtegebruik, mobiliteit, landbouw, natuur, afval en energie. De thema’s Economie en Demografie kunnen hieraan als “aanjagers” worden toegevoegd. Deze longlist omvat onder

meer modellen welke zijn ingezet voor Vlaamse milieuraapportages zoals de het model dat door het Federaal Planbureau wordt gebruikt voor de demografische projecties en het HERMREG economisch model van het Federaal Planbureau, het nieuwe Arc-Nemo model voor de landbouwemissies naar oppervlaktewater en een waterkwaliteitsmodel (VMM, 2013), welke in ontwikkeling zijn. Doel van de modelinventarisatie is deze modellen op relevante kenmerken te analyseren, zodat er een eerste basis is voor de inpasbaarheidstoetsing.

## **6.2. INVENTARISATIE THEMATISCHE MODELLEN**

De drie belangrijkste selectiecriteria voor de samenstelling van de long list zijn de beschikbaarheid en operationele inzet voor de Vlaamse overheid, het detailniveau, en thematische focus, uitgaande van de kwalitatieve systeembeschrijving uit Hoofdstuk 5 (met name Figuur 5-2). Een eerdere modelinventarisatie door het Europees Milieuagentschap (EEA, 2008) biedt een goed uitgangspunt om geschikte selectiecriteria te identificeren. In totaal zijn hierin ca. 100 milieugerelateerde modelinstrumenten geïnventariseerd waarbij onderscheid is gemaakt tussen de categorieën Landbouw, Luchtkwaliteit, Biodiversiteit, Klimaat, Energie, Bos, Landgebruik, Transport, Afval & Materiaaltransport, Water, Demografie, Economie en Integrale Modellen (EEA, 2008). Daarbinnen zijn 25 interactieve modellen gericht op de ondersteuning van beleid en educatieve of participatieve processen in beschouwing genomen. De modelinventarisatie is gebaseerd op de milieuthema's, geografische afbakening en de analytische opzet (het paradigma) van de onderzochte modellen. De nadruk lag daarbij op modellen welke expliciet ruimtelijk rekenen en werken op het globale of Europese schaalniveau. Een van de conclusies van de studie van het Europees Milieuagentschap was dat voor bepaalde relevante thema's of geschikte toepassingen zoals biodiversiteit de modellen ontbraken of nog niet eenvoudig toegankelijk waren (EEA, 2008). Het voorstel was om tot een web-gebaseerde model-encyclopedie te komen. Een dergelijk informatiesysteem is uiteraard gebaat bij een systematische beschrijving van de modelkarakteristieken. Voorbeelden zijn de tijdhorizon, geografische schaal, stuurvariabelen en indicatoren, mate van kwaliteitscontrole en de analytische benadering. Voor wat dit laatste modelaspect betreft werd daarbij onderscheid gemaakt tussen vier typen van modellen: evenwichtsmodellen (o.m. economische modellen), empirisch-statistische modellen (bijvoorbeeld agent-based modellen), dynamische systeemmodellen zoals IMAGE en andere simulatiemodellen en tenslotte interactieve modellen en beslissingsondersteunende systemen zoals WadBOS (Engelen et al., 2003). Modellen kunnen verschillen in de mate van ruimtelijk detail (globaal, Europees, nationaal of regionaal) en bovendien ruimtelijk expliciet zijn, waarbij al dan niet op een raster gerekend kan worden. Verder kan onderscheid gemaakt worden tussen dynamische modellen welke de verandering van de toestand van het systeem als functie van de tijd beschrijven, en "statische" modellen die de toestand op een zeker tijdstip berekenen en de tijd geen factor is. Evenwichtsmodellen zijn zulke statische modellen. Deze modellen hebben geen "geheugen", wat wil zeggen dat de toestand in voorgaande tijdstippen onbekend is. Dit kan ook de integratie met dynamische modellen bemoeilijken. Evenwichtsmodellen zijn modellen waarmee een optimale toestand wordt berekend. Real-time forecasting modellen zijn empirisch en maken sterk gebruik van gegevens om de verandering van de systeemtoestand over een zeer kort tijdsbestek (bijvoorbeeld enkele uren of dagen) door te rekenen. De flexibiliteit van dit soort modellen is beperkt omdat de procesmodellering deels door statistische verbanden is vervangen. Tabel 6-1 toont de template die door het EEA voorgesteld werd om de belangrijkste modelkarakteristieken kwalitatief te documenteren.

In de context van deze studie is het modellenoverzicht van het EEA een eerste aanwijzing voor de keuze van kandidaatmodellen waaruit Vlaanderen zou kunnen putten voor de ontwikkeling of vervollediging van zijn modelleninstrumentarium. Verder is het vaststellen van de inpasbaarheid op

basis van de door het EEA gehanteerde criteria nuttig in die zin dat het meteen toelaat om snel door de lijst te zoeken naar die modellen die het best voldoen aan de gestelde eisen. Daarmee is niet gesteld dat het doel van de EEA om een overzicht te produceren van bestaande modellen, en, het doel van deze studie om inpasbaarheid in een systeemmodel te toetsen hetzelfde zijn.

| Model aspect             | Toelichting  |
|--------------------------|--|
| Thematische focus        | Thematisch onderwerp van het model (economie, energie ...)                   |
| Invoer                   | Invoergegevens en parameters   |
| Uitvoer                  | Sleutelindicatoren, belangrijkste berekende uitvoervariabelen                |
| Geografische dekking     | Geografische eenheid, detail (bijv. NUTS3) en ruimtelijke resolutie          |
| Temporele dekking        | Tijdhorizon en tijdstap  |
| Analytische benadering   | Type model (dynamische systeemmodel, evenwichtsmodel ...)                    |
| Modelstructuur           | Bij voorkeur een diagram dat de werking van het model beschrijft             |
| Modelontwikkelaars       | Ontwikkelaars en subsidiegevers  |
| Modelgeschiedenis        | Begin van de modelontwikkeling, status, versienummer etc.                    |
| Doelgroep/gebruikers     | Gebruikers, indicatie toepassing beleid                                      |
| Kalibratie               | Gegevens gebruikt voor kalibratie, goodness-of-fit                           |
| Validatie                | Gebruikte validatiegegevens en resultaten                                    |
| Onzekerheidsanalyse      | Modelonzekerheid, geschiktheid voor onzekerheidsanalyses                     |
| Bronnen                  | Bij voorkeur peer-reviewed   |
| Integratie               | Geschiktheid inter-thematische integratie, aanwezigheid terugkoppelingen     |
| Modelkoppeling           | Voorbeelden koppeling met andere modellen                                    |
| Gebbruiksvriendelijkheid | Geschiktheid toepassing niet-ontwikkelaars, beperkingen, gebruikshandleiding |
| Participatief gebruik    | Toepassing participatief gebruik met voorbeelden                             |

Tabel 6-1 Model documentatie template zoals voorgesteld door het EEA (EEA, 2008)



Voor sommige thema's zoals Natuur en Materiaalgebruik is er wel inzicht in de samenhang van systeemrelaties, maar ontbreken rekenmodellen of is de keuze van modellen welke gebiedsdekkend operationeel te maken zijn beperkt. Dit is op zich en in de context van deze studie een interessante vaststelling. Ze wijst er in zekere mate op dat het beleid eerder gedefinieerd wordt op basis van beschrijvende informatie van het systeem op het ogenblik zelf en/of toekomstvisies die niet modelmatig getoetst worden. In het geval van ontbrekende thematische modellen kan de koppeling met andere thema's en uit te wisselen systeemvariabelen een leidraad bieden voor de opzet van een eerder eenvoudig maar voldoende thematisch model op basis van metarelaties. Hiermee wordt voorkomen dat essentiële thema's geen plaats krijgen binnen het SDM.

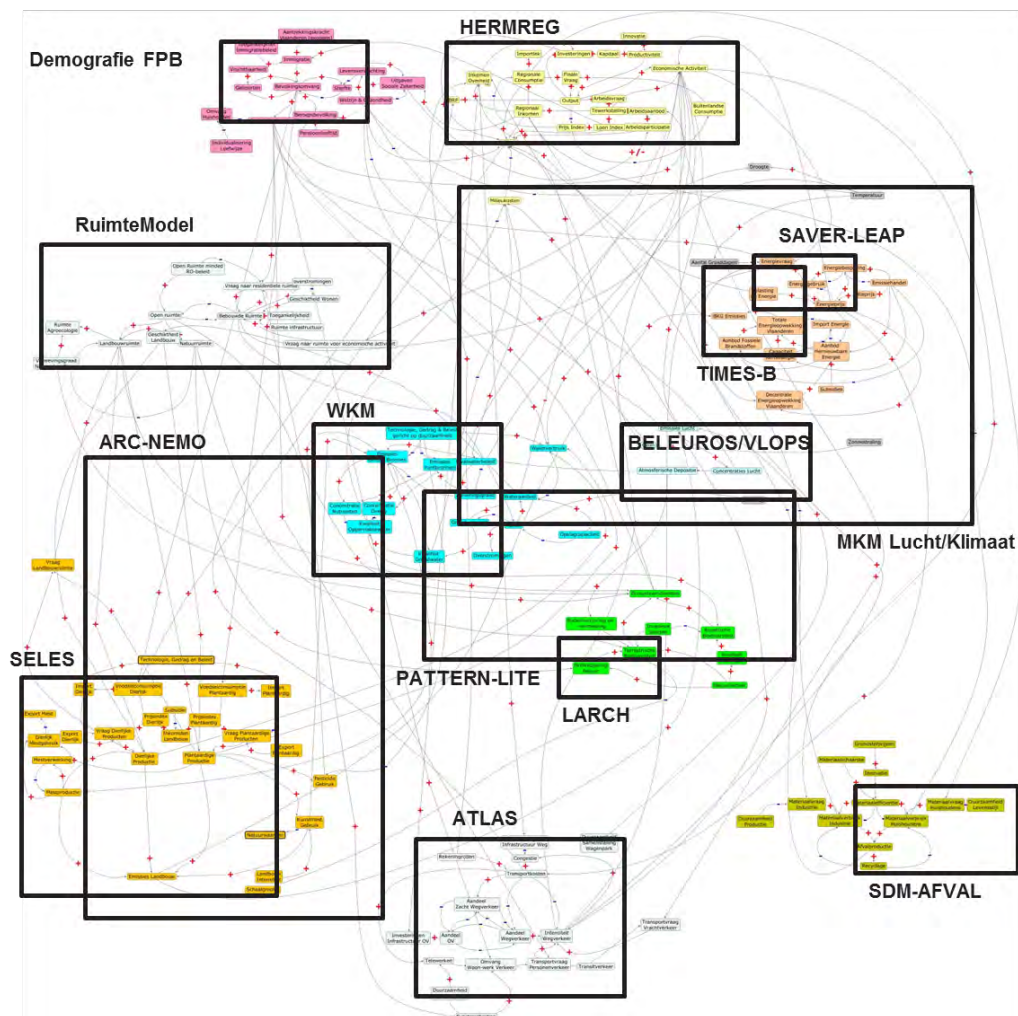
Bij de eerste selectie van thematische modellen voor de "longlist" zijn een beperkt aantal criteria als positief kenmerk meegenomen (zie ook Hoofdstuk 4):

- gebiedsdekkend inzetbaar of reeds ingezet;
- (naar verwachting) operationeel en niet binnenkort buiten gebruik te stellen;
- ook inzetbaar voor een lange termijn horizon;
- al ingezet in toekomstverkenningen rond duurzaamheid in Vlaanderen;
- relevantie thema vanuit systeemoogpunt;
- beleidsrelevantie (heeft parameters en/of variabelen die voldoende aansluiten bij beleidsinstrumenten).

Het laatste criterium kan worden gerelateerd aan de processen die terugkomen in de meeste beleidsanalyses en toekomstverkenningen zoals de Algemene Omgevingsanalyse uit 2009 (SVR, 2009) en de WLO studie (Janssen et al., 2006) en daarin als problematisch worden opgevat of typerend voor de ontwikkelingen op (middel)lange termijn:

- toenemende verkeerscongestie;
- onvoldoende lucht- en waterkwaliteit en de gezondheids/milieu effecten daarvan;
- afname ruimte voor landbouw;
- toename kans op overstromingen;
- lagere bevolkingsgroei, meer immigratie;
- toename afhankelijkheid energie buitenland;
- toenemende verstedelijking met mogelijke afname van ruimtevrage na 2020;
- vergrijzing.

Figuur 6-1 toont hoe de 15 geselecteerde modellen voor de longlist zijn verdeeld over de thema's rond leefmilieu en het totale systeem uit Figuur 5-4.



Figuur 6-1 Verdeling modellen longlist over de thema's

Duidelijk is dat de keuze van thema's zo breed mogelijk is gehouden en zich niet beperkt tot bepaalde delen van het systeemmodel. Tabel 6-2 vat de belangrijkste modelkenmerken samen.

| Thematisch model  | Thema's                                  | Model type             |
|-------------------|--|------------------------|
| Demografie FPB    | Bevolking                                | Procesmodel            |
| HERMREG           | Economie                                 | Evenwichtsmodel        |
| Ruimtemodel       | Ruimtegebruik                            | Procesmodel            |
| SAVER-LEAP        | Energiegebruik (deel huishoudens)        | Statisch model         |
| TIMES-B           | Energiegebruik (deel productie)          | Evenwichtsmodel        |
| BELEUROS          | Lucht                                    | Procesmodel            |
| VLOPS             | Lucht                                    | Real-time forecasting  |
| MKM Lucht Klimaat | Lucht, Economie, Energie                 | Statisch model         |
| AURORA            | Lucht                                    | Procesmodel            |
| WKM               | Water (deel waterkwaliteit)              | Procesmodel            |
| Arc-Nemo          | Water (deel emissies landbouw), Landbouw | Procesmodel            |
| SELES             | Landbouw, Lucht, Water                   | Evenwichtsmodel        |
| ATLAS             | Mobiliteit                               | Procesmodel            |
| Pattern-Lite      | Natuur, Water                            | Procesmodel            |
| Larch             | Natuur - Ruimtegebruik                   | Statisch model         |
| SDM-Afval         | Materiaalgebruik (deel afval)            | Systeemdynamisch model |

Tabel 6-2 Selectie thematische modellen longlist en thema's

Hierna volgt een kwalitatieve beschrijving van de geselecteerde modellen voor de longlist. Ieder model leent zich potentieel voor de modellering van de dynamiek van een deelsysteem (bijvoorbeeld bevolkingsgroei) of beschrijving van een essentiële systeemrelatie die uit de kwalitatieve systeembeschrijving naar voren is gekomen (bijvoorbeeld de relatie tussen de intensiteit van het wegverkeer en emissies).

### **6.2.1. DEMOGRAFIE**

Samen met het thema economie heeft het thema demografie een belangrijke drijvende invloed op het totale systeem. Dit blijkt ook uit het grote aantal directe en indirecte interacties met alle andere thema's. Voor de demografische projecties in Vlaamse milieurapportages en toekomstverkenningen (MIRA en NARA) wordt uitgegaan van het demografisch model van het Federaal Planbureau en de Algemene Directie Statistiek en Economische Informatie (ADSEI). Deze projecties zijn dus in algemeen gebruik en bovendien vrij toegankelijk. De meest recente bevolkingsprojectie omvat de bevolkingsomvang op arrondissementsniveau (NUTS3 niveau) per leeftijdsjaar en geslacht voor de periode 2007-2060 (FPB/ADSEI, 2008). Er is zowel sprake van vergrijzing (meer 60-plussers) als ontgroening (dalend aandeel jongeren), bovendien vindt een verschuiving plaats naar kleinere huishoudens (MIRA, 2009). In 2011 werden deze prognoses vergeleken met die van de Studiedienst van de Vlaamse Regering (Maene, 2011). Hieruit bleek dat de prognoses van het FPB een sterkere stijging van de bevolkingsgroei vertonen, voornamelijk door hogere immigratiecijfers. Echter, in de meeste recente bevolkingsvooruitzichten van het FPB (Duyck et al., 2013) zijn de omvang van de heropleving van de vruchtbaarheid en immigratiecijfers naar beneden bijgesteld. Dit laatste heeft te maken met de restrictievere wetgeving en het verkleinen van de verschillen in de levensstandaard binnen de EU ([www.plan.be](http://www.plan.be)). Op het systeemniveau is er in deze studie voor gekozen de immigratie als exogene invloedsfactor mee te nemen die van invloed is op het thema demografie (zie ook Figuur 5-2). Hiervoor zal dus gecorrigeerd moeten worden. Voor de toepassing in het RuimteModel (Engelen et al., 2011b) zijn deze bevolkingsaantallen door middel van een dichtheidsmodel vertaald naar een ruimtevraag, om vervolgens te worden toegewezen aan individuele cellen van 1 ha (disaggregatie).

### **6.2.2. ECONOMIE**

Voor de Milieuverkenning 2030 (Van Steertegem, 2009) zijn de sociaal-economische ontwikkelingen sturend verondersteld voor de milieudruk vanuit de verschillende sectoren (Huishoudens, handel en diensten; Industrie en Transport). De belangrijkste variabelen voor de scenarioberekeningen zijn het Bruto Binnenlands Product (BBP), de arbeidsproductiviteit per hoofd van de bevolking, de werkgelegenheid en de bevolking op arbeidsleeftijd. Voor de milieuverkenning werd gebruik gemaakt van het HERMES en MALTESE (Model for Analysis of Long Term Evolution of Social Expenditure) model van het Federaal Planbureau. Het HERMES model (Bossier, 2004) is een macro-sectoraal economisch model voor nationale projecties op korte en middellange termijn. Voor de lange-termijn projecties (na 2020) is het MALTESE model geschikter, zie ook De Smet, 2008). Eind 2005 werd gestart met de ontwikkeling van het multi-sectorale, multi-regionale macro-econometrische model HERMREG dat kan worden ingezet voor middellange termijn prognoses (Bassilière et al., 2008) op de regionale (NUTS1) niveaus. Het model sluit aan bij het nationale model HERMES, dat eerder ingezet werd voor het PLANET model van het Federaal Planbureau (Desmet et al., 2008) dat de relatie tussen economie en transport beschrijft. Met de eerste versie van HERMREG werden regionale (NUTS1) vooruitzichten opgesteld voor de periode 2006-2012 voor het bruto binnenlands product, de werkgelegenheid, loonmassa, investeringen en

productiviteit. Het model gebruikt 13 bedrijfstakken (Bassilière et al., 2008) en volgt een top-down benadering. Dit houdt in dat projecties eerst op het nationale niveau worden gemodelleerd met het HERMES model (inkomen, productie, consumptie, ...), om vervolgens naar het regionale niveau te worden vertaald. Voor de interacties tussen en binnen de bedrijfstakken gebruikt het HERMES model een input-output matrix, die in 2000 is vastgesteld. Het model is gebaseerd op 600 econometrische vergelijkingen. De vertaling naar het regionale niveau vindt plaats op basis van endogene verdeelsleutels (Bassilière et al., 2008). Het HERMREG model is nog volop in ontwikkeling.

### 6.2.3. ENERGIE

Het Belgische TIMES model (Van Wortswinkel en Lodewijks, 2012) is een toepassing van het generieke TIMES model (The Integrated Markal-Efom System), dat in het Europese 6<sup>e</sup> en 7<sup>e</sup> Kaderprogramma werd ontwikkeld voor lange-termijn verkenningen van energiegebruik en daaraan gekoppelde broeikasgasemissies in de EU lidstaten (<http://energy.jrc.ec.europa.eu/>). Het gaat om een technisch-economisch optimalisatiemodel dat de optimale combinatie van technologieën bepaalt om aan de energievraag van verschillende sectoren te voldoen. De meerkosten van niet-optimale keuzes kunnen echter ook worden berekend. De energievraag zelf is modelinvoer. Het TIMES model werkt met zeven sectoren (Andere, Energie, Handel en Diensten, Huishoudens, Industrie, Landbouw en Transport) en twaalf energiedragers: Afval, Biomassa, Elektriciteit, Gas, Hernieuwbare energie, Kolen, Koude, Nucleaire brandstof, Petroproducten, Warmte, Waterstof, en een restcategorie. Intussen wordt het model aangepast om ingezet te kunnen worden binnen MIRA toekomstverkenningen, wat onder meer uitbreiding omvat van de broeikasgasemissies met andere gassen dan CO<sub>2</sub> (Van Wortswinkel en Lodewijks, 2012). Verder wordt de energierapportering aangepast aan de MIRA indeling in (deel)sectoren en (deel)activiteiten. Via een nacalculatie kunnen de resultaten voor België naar het Vlaams gewest vertaald worden. Het model werd eerder al gebruikt voor een scenario analyse om de CO<sub>2</sub> emissies in 2050 te berekenen (Benoot et al., 2011).

SAVER-LEAP is een energiebalans model dat in het kader van de Milieuverkenning werd toegepast om het toekomstig energiegebruik van huishoudens en bijbehorende emissies in te schatten (Couder en Verbruggen, 2008; Couder et al., 2009). Daarbij werd onderscheid gemaakt naar de energiedragers (gas, kolen, hout, ...), het motief voor energiegebruik (verwarming, verlichting, koeling, ...) en een aantal andere criteria zoals de gebouwkenmerken. Het model is gebaseerd op een bottom-up benadering (het SAVER deel van het model), waarbij voor 216 bouwtypen waarvoor bijvoorbeeld de maandelijkse en jaarlijkse energiebehoefte en het gebruik kan worden berekend. Voor 2005 vormden verwarming en warm tapwater de belangrijkste bijdragen aan het totale energiegebruik door Vlaamse huishoudens, voor het elektriciteitsverbruik reinigen, koelen en verlichting (Couder en Verbruggen, 2008). De vertaling naar scenario's vindt plaats in de module LEAP (Long-range Energy Alternatives Planning system) dat door het Stockholm Environment Institute is ontwikkeld (LEAP, 2006). Het SAVER model is een meer gedetailleerd rekenmodel waarmee de details van combinaties van maatregelen en gevolgen voor de factoren in het LEAP model kunnen worden doorgerekend (Couder et al., 2009). De door LEAP gebruikte gegevens zijn in een databank opgeslagen waarin relevante factoren zoals de energietechnologie en het gedrag zijn opgeslagen. Via een boomstructuur kan het LEAP model het energiegebruik van huishoudens, diensten en andere sectoren vertalen naar emissies van broeikasgassen. De scenario's bestaan uit consistente verhaallijnen waarin bijvoorbeeld subsidies van spaarlampen en andere energiebeleidsmaatregelen kunnen worden meegenomen (Couder et al., 2009). De voor de Milieuverkenning gebruikte tijdhorizon is 2030, met 2006 als referentiejaar. Ook wordt rekening gehouden met het "rebound" effect (een vermindering van de energiebesparing door verhoging

van de energie-efficiëntie door gedragswijziging). Twee belangrijke uitgangspunten voor de toepassing in de Milieuverkenning zijn een correcte toepassing van energietechnologie en te verwachten evolutie van technieken.

#### 6.2.4. MOBILITEIT

Transportmodellering richt zich op korte- en langetermijnprognoses van het transport, waarbij verschillende transportmodi (openbaar vervoer, auto, fiets etc.) kunnen worden onderscheiden. Een klassiek 4-traps transport model is gebaseerd op 4 stappen:

- het bepalen van de transportvraag naar motief (woon-werk verkeer, school etc.);
- bepalen van de oorsprong en bestemming van alle verplaatsingen (de oorsprong-bestemmingsmatrix);
- verdeling over de transportmodi en tijd van de dag;
- toewijzing aan het transportnetwerk.

Een dergelijk model maakt het mogelijk de verkeersintensiteit in detail te verdelen over de segmenten van het transportnetwerk en transportmodi en de effectiviteit van beleidsmaatregelen zoals rekeningrijden te onderzoeken. Momenteel ontwikkelt VITO het geïntegreerde ruimte-transport model ATLAS (Assessing Transport and Land Use Scenarios). Het model is gebaseerd op tweezijdige koppeling van het RuimteModel Vlaanderen met een geaggregeerd transportmodel voor het personenvervoer in Vlaanderen (Franckx et al., 2013). Het model houdt rekening met de verschillende transportmodi (OV, zacht wegverkeer, auto, ...). Doel is de ondersteuning van langetermijn verkenningen om het landgebruik, personenvervoer, emissies en energiegebruik in te schatten. Maatregelen gericht op autobezit en –gebruik, en veranderingen in het wagenpark kunnen worden doorgerekend. Het transportmodel berekent ook de transportkosten en emissiegegevens, en houdt rekening met congestie. Het RuimteModel levert voor elk jaar de ruimtelijke verdeling van de bevolking en tewerkstelling over de verkeerszones die het transportmodel gebruikt. Omgekeerd berekent het transportmodel bereikbaarheidsindicatoren. Deze kunnen worden gebruikt om de bevolking en economische activiteiten aan locaties in het RuimteModel toe te wijzen (deze terugkoppeling is nog niet geïmplementeerd). Dit betekent dat ATLAS een zwak geïntegreerd model is (Franckx et al., 2013). Beide modellen kunnen ook onafhankelijk gebruikt worden. We beschouwen hier apart het transportmodel, voor het gemak ATLAS-TRANSPORT te noemen, dat gebruik maakt van gegevens van het Vlaams Verkeerscentrum en wel gebaseerd is op het 4-traps principe. Het model werkt op het niveau van de 6744 verkeerszones in Vlaanderen en Brussel. De invoer bestaat uit de ruimtelijke verdeling van de bevolking (huishoudens) en werkgelegenheid, alsmede het wagenpark. De transportmotieven zijn woon-werk, woon-school en overig verkeer, en het model gebruikt drie leeftijdsklassen, 0-17 jaar, 18-64 jaar, en 65+ en maakt onderscheid tussen werkenden, studenten en overigen (Franckx et al., 2013). Voor de toekomstverkenningen wordt gebruik gemaakt van de projecties van het Federaal Planbureau: de bevolking in jaarklassen per arrondissement en het aantal werkenden per gewest. De modelcode maakt gebruik van R, C++ en bash. Uitgaande van het basisjaar worden langetermijn prognoses doorgerekend door de oorsprong-bestemmingsmatrix voor het basisjaar en daarmee het aantal verplaatsingen aan te passen aan de veranderingen in de bevolkingsomvang en samenstelling, de economische groei en veranderingen in de transportkosten. Het model is gebiedsdekkend, en wordt voor een toekomstig jaar doorgerekend (tot nu toe 2010, 2020 en 2030), uitgaand van gegevens voor het basisjaar 2008. Vervolgens wordt de oorsprong-bestemmingsmatrix op basis van sociaal-economische en demografische prognoses aangepast voor een toekomstig jaar. Voor een eerste modeltest werden scenario's voor de jaren 2010, 2020 en 2030 doorgerekend, met als resultaat onder meer het jaarlijkse aantal verplaatsingen per motief,

het aantal reizigerskilometers per motief en vervoermiddel (voet, fiets, trein, OV, auto) en het aantal reizigerskilometers tijdens de spitsuren per vervoermiddel. Het model kan ook worden gebruikt om de bereikbaarheid van verkeerszones, belastinginkomsten en gevolgen van rekeningrijden e.d. te berekenen. Het doorrekenen van een basisjaar en toekomstig jaar tezamen vergt een aantal uren, voor een substantieel deel toe te rekenen aan geheugengebruik dat kan oplopen tot 60 GB (Franckx et al., 2013).

#### 6.2.5. NATUUR

Een gebiedsdekkend model dat de kwaliteit van terrestrische en aquatische natuur in Vlaanderen kan beschrijven en inzetbaar is voor lange-termijn verkenning waarin de sturende factoren zoals landschapsfragmentatie, waterkwaliteit en neerslag kunnen veranderen is niet eenvoudig te vinden. Veel modelstudies gericht op biodiversiteit zijn gedetailleerde gevalsstudies zoals het deelproject 'Case Kleine Nete' uit de Natuurverkenning 2030, waarin de invloed van klimaat- en landgebruiksverandering op de potentie voor moerasvegetatie werd onderzocht (Van Daele, 2009). Er zijn enkele uitzonderingen die mogelijk breder en gebiedsdekkend inzetbaar zijn in een systeemdynamisch model.

Modellen van het type SVAT (soil-vegetation-atmosphere-transfer) zoals PATTERN (Mulligan, 1996; Mulligan, 2000), waarin de complexe relatie tussen klimaat, weer, fysische toestand van de bodem en ontwikkeling van biomassa doorgerekend worden op hoge geografische resolutie, zijn beschikbaar in Europa, maar zijn veeleer bedoeld voor onderzoeksdoeleinden, en minder voor praktische beleidsondersteuning. Voor het MODULUS project werd een vereenvoudigde versie van het model, PATTERN-Lite, ontwikkeld (priv. comm. M. van der Meulen). Het model bestaat uit een hydrologische en vegetatiemodule. Met behulp van een weergenerator kunnen individuele regenbuien worden genereerd. Afhankelijk van de bodemgesteldheid kan het deel dat niet infiltreert tot runoff naar naburige cellen leiden. De vegetatiegroei is afhankelijk van factoren zoals de beschikbaarheid van water, zonlicht, voedingsstoffen e.d. De hoeveelheid zonlicht is afhankelijk van bewolking, en wordt dus deels door de weergenerator bepaald.

LARCH (Landscape Ecological Analysis and Rules for the Configuration of Habitat) is een kennissysteem dat door Alterra in Nederland werd ontwikkeld om de relatie tussen landschapskenmerken en biodiversiteit voor diersoorten te beschrijven (Pouwels et al., 2002; Adriaens et al., 2007; Pouwels et al., 2008). Het model is in Nederland ingezet om het effect van de Ecologische Hoofdstructuur (EHS) te onderzoeken. Binnen de natuurverkenning werden vijf habitat-ecoprofielen onderzocht: voor akker, grasland, bos, heide en moeras. Het resultaat van het model is een schatting van het totale geschikte oppervlak voor een representatief ecotype (bijvoorbeeld de boommarter) binnen een bepaalde biotoop (bijvoorbeeld bos). Het model kan worden ingezet voor de toetsing van ruimtelijke inrichtingsplannen waarbij de resultaten onder meer de potentiële duurzaamheid van habitatnetwerken omvatten. Het landschap wordt daarbij beschouwd als een systeem van ecologische netwerken welke onderling verbonden zijn. Geselecteerde diersoorten wordt als indicatorsoort voor de soortgroep gebruikt. De geschiktheid van een leefgebied is afhankelijk van de oppervlaktebehoefte en dispersiecapaciteit van de soort. De netwerkafstand is de afstand die overbrugd moet worden om zich te verplaatsen tussen twee leefgebieden. Met barrières zoals wegen en kanalen kan ook rekening gehouden worden. Samengevat leent het LARCH model zich dus voor een beschrijving van de negatieve invloed van versnippering op de biodiversiteit (zie ook systeemdiagram Figuur 8-9). Binnen de Natuurverkenning (Dumortier et al., 2009) is het LARCH model gebruikt om biotoopkaarten om te zetten in habitatkaarten, vervolgens de ruimtelijke samenhang van de ecologische netwerken te bepalen en ten slotte de duurzaamheid daarvan. In plaats van op het niveau van specifieke soorten

gebeurt dit met ecoprofielen. Voor elk biotooptype (bos, moeras, heide, grasland en akkers) kan zo de oppervlakte beschikbare habitat voor elk ecoprofiel bepaald worden. Hierbij is ook rekening gehouden met barrières zoals sporen en snelwegen. Het LARCH systeem is gebaseerd op verschillende componenten die een database met soortspecifieke gegevens gebruiken, de aansturing van deze componenten gebeurt niet via een grafische interface, maar door een scripting taal zoals iMODS (Pouwels et al., 2008). Voor de visualisatie is een GIS pakket noodzakelijk.

#### **6.2.6. RUIMTEGEBRUIK**

Het ruimtelijk-dynamische RuimteModel voor Vlaanderen (Engelen et al., 2011b) werd reeds ingezet in de Milieuverkenning 2030 om de ruimtelijke consequenties te onderzoeken voor de scenario's "Referentie" en "Europa". Het model heeft een hiërarchische structuur en is opgebouwd in drie lagen. Op het globale niveau wordt het RuimteModel aangestuurd door scenario's voor de groei van de totale bevolkingsomvang en sectorale werkgelegenheid, ontleend aan respectievelijk de prognoses van het Federaal Planbureau (FPB/ADSEI, 2008) en het PLANET model (De Smet, 2008). De bevolking wordt als een leeftijdscohort opgevat, terwijl 12 economische sectoren worden onderscheiden. Het regionale model verdeelt de bevolking en economische activiteiten over de arrondissementen, waarbij een dichtheidsmodel de ruimtevrage berekent. Het lokale model bestaat uit een raster van Constrained Cellulaire Automaten (CCA), waarbij transitieregels samen met de geografische geschiktheid, beleidstoewijzing en toegankelijkheid de interacties tussen cellen binnen een afgebakende omgeving bepalen. Voor de milieuverkenning werd een resolutie van 150 m gebruikt, inmiddels werkt het model met een celgrootte van 100 m en 37 landgebruiken. Intussen werd het model ook ingezet voor een overstromingsrisicoanalyse voor het jaar 2050 (De Kok et al., 2011) en de eerder genoemde toepassing van de vier WLO wereldbeelden op de Vlaamse Ruimte voor de periode 2010-2050 (Engelen et al., 2011a). Een typische simulatie voor Vlaanderen vergde 20-30 minuten. Momenteel wordt aan de verbetering van de performantie gewerkt. Het model rekent met een tijdstap van een jaar.

#### **6.2.7. LANDBOUW**

SELES (Socio-Economisch Landbouweffecten Evaluatie Systeem) is een evenwichtsmodel dat kan worden gebruikt om de milieubelasting van oppervlaktewater door de landbouwsector in Vlaanderen te berekenen (Overloop et al., 2001; Gavilan et al., 2006; Overloop et al., 2009). SELES heeft betrekking op de samenhang tussen de inputs en outputs op het niveau van de gehele landbouwsector. Behalve economische kenmerken zoals productie, opbrengst en kosten wordt ook het grondgebruik, de omvang en samenstelling van de veestapel en milieudruk bepaald. Deze laatste omvat de ammoniakemissies, bodembalans van stikstof en fosfor, het watergebruik en gebruik aan pesticiden. Deze gegevens kunnen worden doorgegeven aan emissiemodellen zoals Sentwa of Arc-Nemo en dan weer als invoer gebruikt worden voor waterkwaliteitsmodellen zoals PEGASES. Het model onderscheidt 15 typen akker- en tuinbouw en 9 veeteeltbedrijven (Gavilan et al., 2006). Het model is in GAMS (General Algebraic Modeling System) geprogrammeerd en gaat uit van winstmaximalisatie van bedrijven door optimaal gebruik van ruimte, mest e.d. In principe geldt een tijdhorizon van 3 tot 4 jaar, voor lange-termijn voorspellingen tot 2020 werd met een referentiescenario gewerkt. Beleidsscenario's kunnen relatief ten opzichte van dit scenario worden uitgewerkt. Deze scenario's verschillen bijvoorbeeld in de groei van de productiviteit en toepassing van quota. Het model is statisch, d.w.z. maakt een projectie naar de toekomst zonder dat de tussenliggende jaren expliciet worden berekend. Wel kunnen dus verschillende projecties worden doorgerekend. Het model onderscheidt acht regio's. Voor atmosferische deposities wordt een



gemiddelde gebruikt. Het model is niet expliciet ruimtelijk, binnen het model worden 8 regio's onderscheiden.

Het nieuwe, rastergebaseerde emissie model Arc-NEMO (Nutrient Emission Model) wordt door het Departement Aard- en Omgevingswetenschappen van de Katholieke Universiteit Leuven en de Bodemkundige Dienst van België in opdracht van de VMM ontwikkeld om de bijdrage van de landbouw aan de verliezen van nutriënten naar het oppervlaktewater en de effecten van beleid op korte- en middellange termijn te bepalen (VMM, 2012). Processen waarmee rekening wordt gehouden zijn de mineralisatie en immobilisatie van nutriënten, opname van stikstof en fosfor door planten, de waterbalans in de onverzadigde zone, grondwaterstroming, en bodemerosie. Het model is grotendeels in de programmeertaal Python ontwikkeld en geïntegreerd in ArcGIS (v 10). Het model wordt gebiedsdekkend opgezet. De modelresultaten bestaan uit de maandelijkse stikstof- en fosfor verliezen van de rastercellen naar het oppervlaktewater en zijn naar diverse geografische niveaus te aggregeren (Vlaamse en lokale waterlichamen, hydrografische zones, bekkens, stroomgebieden, ...). Pre-processing tools binnen ArcGIS maken de voorbereiding van invoerbestanden in rasterformaat mogelijk. De gebruikte tijdstap is hoofdzakelijk een maand. Voor snellere processen zoals het nitraattransport in de onverzadigde zone wordt een tijdstap van een dag gebruikt. De berekening daarvan is vervat in een lus voor de trage processen. Het ruimtelijk oplossend vermogen is 50x50 m. De gebruikte gegevens omvatten vector- en rasterdata als wellen tijdsreeksen. Een deel van de gegevens voor onder meer het bodembalansmodel is statisch, een deel dynamisch en tijdgebonden. Het volledige model wordt gekalibreerd en gevalideerd aan de hand van maandelijkse concentratiemetingen en debietmetingen. Verder zijn gevoeligheidsanalyses uitgevoerd op verschillende afvoercomponenten en de totale afvoer.

#### **6.2.8. LUCHT**

De toepassing van luchtkwaliteitsmodellen binnen Vlaanderen richt zich met name op de verspreiding van fijn stof, ozon en verzurende stoffen, zowel de emissies als deposities (MIRA, 2009). De negatieve gezondheidseffecten van fijn stof en impact op de biodiversiteit zijn ook terug te vinden in de kwalitatieve systeendiagrammen (zie ook Bijlage C). Luchtkwaliteitsmodellering is een complexe zaak waarbij rekening gehouden moet worden met de weersomstandigheden (temperatuur en neerslag), emissies van verschillende bronnen zoals industrie, landbouw en transport, alsook het transport van emissies in het buitenland om concentraties van fijn stof, NO<sub>x</sub> ... te berekenen. Recentelijk werden een aantal modellen en technieken voor het bepalen van grootschalige, jaargemiddelde concentratieverdelingen vergeleken (Maiheu et al., 2012). Het RIO model is vooral gericht op real-time forecasting, en maakt gebruik van interpolatie van meetgegevens. De ruimtelijke resolutie is 3-4 km. Het model is wel minder rekenintensief (enkele uren om een jaar door te rekenen). We beschouwen kort de luchtkwaliteitsmodellen VLOPS en BELEUROS.

Duidelijk is dat geen van deze modellen direct inpasbaar zijn in een systeemdynamisch model, alleen op basis van de rekentijd. Een oplossing voor dit probleem, die vaker overwogen wordt is te werken met metamodellen die de belangrijkste verbanden tussen in- en uitgangsvaariabelen beschrijven zonder dat de complexiteit van alle processen hoeft te worden meegenomen. Een dergelijke vereenvoudiging heeft ook nadelen; wanneer scenario's of beleidskeuzes ingrijpen op deze processen kan het model daar alleen mee omgaan als vooraf met deze mogelijkheid rekening is gehouden.

VLOPS (Van Avermaet et al., 2009; Janssen et al., 2011; Maiheu et al., 2013; Deutsch et al., 2013b) is de toepassing op Vlaanderen van het model OPS, dat door het Rijksinstituut voor

Volksgezondheid en Milieuhygiëne werd ontwikkeld (Van Jaarsveld, 1989; Van Jaarsveld, 2004). Het model wordt beheerd en gebruikt door de VMM. Het Lagrangiaanse OPS-model berekent transport, verspreiding en depositie van verzurende stoffen ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_3$ , sulfaten, nitraten, ammonium) en niet-reagerende stoffen zoals dioxines en zware metalen (Van Avermaet et al., 2009). In opdracht van de VMM werd het OPS model door VITO geïmplementeerd om de actuele en toekomstige luchtkwaliteit in Vlaanderen te simuleren. De modelinvoer omvat de receptoren (punten waarop gerekend wordt) en andere gegevens zoals het landgebruik, achtergrondconcentraties e.d. De emissies worden eveneens in E-map (Maes, 2009), een pre-processor voor luchtkwaliteitsmodellen, omgezet en maken gebruik van emissiegegevens van de Emissie Inventaris Lucht (EIL) voor Vlaanderen en van CORINAIR/EMEP buiten Vlaanderen. Het model berekent de maand-, seizoen-, of jaargemiddelde concentraties en deposities met een geografische resolutie van 1 x 1 km en 5 x 5 km (Van Avermaet et al., 2009). Het model gebruikt een statistische benadering en is daardoor sterk afhankelijk van statische referentiegegevens en rekt met een tijdstap van een jaar. Een ruimtelijke resolutie van 1 km is de gebruikte resolutie door VMM.. De meteorologische waarnemingen en voorkomende verspreidingsituaties worden vooraf in een preprocessor verdeeld over een aantal klassen zoals transportrichting, atmosferische stabiliteit, transportschaal (Maiheu et al., 2012). Het VLOPS model is binnen de Natuurverkenning 2030 ook toegepast om de overschrijding van kritische lasten voor verzuring en vermesting te bepalen (Wuyts, 2009).

Binnen de Milieuverkenning 2030 (Van Steertegem, 2009) werd het BELEUROS model ingezet voor de berekening van de verspreiding van ozon en fijn stof, en het OPS (Operationele Prioritaire Stoffen) model voor de verzurende pollutanten ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{SO}_2$  en  $\text{NO}_x$ ). Het BELEUROS model (Deutsch et al. 2008a; Deutsch et al. 2008b; Deutsch et al., 2009; Deutsch et al., 2013b) is een driedimensionaal Euleriaans verspreidingsmodel op een raster dat weerkundige en emissiegegevens gebruikt in combinatie met o.m. het landgebruik om chemische processen in de atmosfeer door te rekenen. Voor de Milieuverkenning zijn emissiegegevens in het juiste formaat voorberekend voor toepassing in het BELEUROS model met de E-MAP tool (Maes, 2009), en bestaan uit sector- en pollutant specifieke emissies van puntbronnen op een rooster van 7.5 x 7.5 km en oppervlaktebronnen op een rooster van 60x60 km (Maes et al., 2009; Deutsch et al., 2009). Het basisrooster van het BELEUROS model is 60x60 km, omwille van de modelperformantie (de kwaliteit van de resultaten) werd met een fijner rooster 15x15 km gerekend. Voor fijn stof bestaat het resultaat uit uurlijkse concentraties  $\text{PM}_{2.5}$  en  $\text{PM}_{10}$ , en dag- en jaargemiddelden. Het model rekt met een tijdstap van uren.

De toestandsvariabele Milieukosten verbindt de thema's Natuur en Economie (zie ook de systeemdiagrammen in Figuur 5 2, Figuur 8 2 en Figuur 8 9). Onder milieukosten worden de kosten verstaan die gemaakt moeten worden om aan milieubeleid te voldoen, zonder dat direct rekening gehouden wordt met de effecten op het milieu. Op initiatief van het Departement Leefmilieu, Natuur en Energie (LNE) werd in 2001 gestart met de ontwikkeling van het Milieukostenmodel (MKM) voor Vlaanderen door VITO (Meynaerts et al., 2003). Het MKM is bedoeld als instrument waarmee de kosteneffectiviteit van milieubeleid kan worden onderzocht in het kader van de Vlaamse en Europese milieudoelstellingen zoals EU Kaderrichtlijn Water. Er zijn verschillende modules gericht op de deeldomeinen klimaat (bijvoorbeeld emissies broeikasgassen), water, lucht en natuur. De kosteneffectiviteitsanalyse is gebaseerd op een benadering die het mogelijk maakt verschillende maatregelen te rangordenen op kosten. Omdat verschillende, soms conflicterende, doelstellingen een rol spelen worden optimalisatietechnieken op basis van lineaire programmering toegepast. We beschouwen in deze studie het MKM Klimaat, dat sinds begin 2010 operationeel is en gebruikt werd voor de onderbouwing van de Hoofdstukken Energie en Industrie van de Milieuverkenning 2030 (Lodewijks et al., 2009). Het MKM Klimaat maakt gebruik van een uitgebreide databank in MSAccess® voor de emissiebronnen en reductiemaatregelen en een

optimalisatiealgoritme in de numerieke software MARKAL. Voor de periode 2010-2035 kan het lucht-, energie- en klimaatbeleid geïntegreerd worden doorgerekend met een tijdstap van 5 jaar. Bij de kostenberekening wordt rekening gehouden met de kosten van energieproductie, investeringskosten, operationele kosten e.d. De modelresultaten voor het MKM Klimaat bestaan uit het energiegebruik, de broeikasgasemissies en kostprijzen. Op basis daarvan wordt berekend welke maatregelen in welke sectoren genomen. Uitgangspunt daarbij is dat investeerders in het basisjaar over volledige informatie beschikken over de energiekosten in toekomstige jaren. Met het MKM Lucht (Lodewijks et al., 2007) werden eerder al emissieprognoses tot 2020 afgeleid voor pollutanten zoals NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> en NMVOS.

#### **6.2.9. WATERKWALITEIT**

Voor de modellering van de kwaliteit van oppervlaktewater ter ondersteuning van de Milieuverkenning 2030 werd gebruik gemaakt van het PEGASE model. Dit waterkwaliteitsmodel kan worden ingezet om emissies van diffuse en puntbronnen (zie ook Figuur 8-11) om te rekenen naar concentraties (Peeters et al., 2009). Het model, dat werd ontwikkeld door de Universiteit van Luik, is een deterministisch, hydrodynamisch model en opgezet rond drie deelmodules (Ronse en d'Heygere, 2007; Peeters et al., 2009): een hydrodynamisch/hydrologische module, een thermische en een biologische module. PEGASE gebruikt een groot aantal invoergegevens (debiet, ruwheid, landhoogte, bodemgebruik etc.), waarvan de emissiegegevens de belangrijkste zijn. In het kader van de Milieuverkenning 2030 en de stroomgebiedsbeheersplannen voor de Schelde en Maas zijn de effecten van reducties van de stikstof- en fosforvrachten voor de periode 2006-2027 doorgerekend voor verschillende scenario's (Peeters et al., 2009). Inmiddels wordt een nieuwe, gebiedsdekkende versie van het model ontwikkeld, voorlopig Waterkwaliteitsmodel, hier WKM genaamd (VMM, 2013). WKM wordt ontwikkeld in opdracht van VMM door Antea België, in samenwerking met het Waterbouwkundig Laboratorium. Het model is deterministisch en 1-dimensionaal en wordt gebiedsdekkend opgezet om parameters zoals O<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, BZV, totaal stikstof en fosfor etc. te beschrijven. Hierbij wordt, behalve met transport, rekening gehouden met processen zoals verdunning, denitrificatie, sedimentatie en de productie en afbraak van biomassa. De basis voor WKM wordt gevormd door waterkwaliteitsmodellen die door het Waterbouwkundig Laboratorium en de VMM worden ingezet in het kader van hoogwaterbeheer om de waterstanden te berekenen in de onbevaarbare (InfoWorks RS van Innovyze Ltd.) en bevaarbare (Mike11 van Danish Hydraulics Institute) waterlopen. Het uitgangspunt daarbij is een juiste modellering van het debiet, waarvoor InfoWorks ICM (Integrated Catchment Modelling) 2.5 wordt voorgesteld. Voordelen daarvan zijn: de ondersteuning van simulaties over langere periodes met droogtes en piekafvoeren, modellering van punt- en diffuse bronnen en multicore processing. Het model zal gevoed worden met emissies uit puntbronnen (RWZIs, industrie ...) en diffuse bronnen (niet-aangesloten huishoudens, landbouw). De landbouw emissies komen uit het Arc-NEMO model (zie ook Sectie 6.2.7). Het model moet lang-termijn en historische simulaties ondersteunen met 2012 als referentiejaar. Voorbeelden van toepassingen zijn de effecten van bufferstroken, aansluiting van huishoudens op RWZIs, demografische verandering, veranderingen in landgebruik en klimaat.

#### **6.2.10. MATERIAALGEBRUIK EN AFVAL**

Recentelijk verscheen een studie naar 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 recyclage en het

wegwerpen van afval te beschrijven voor een periode van 25 jaar met 2016 als tijdhorizon en een tijdstap van 1 jaar. Belangrijke toestandsvariabelen in het model zijn de totale bevolkingsomvang, het bruto regionaal product, de reductie van de productie van afval (preventie), het gedrag m.b.t. de scheiding van afval en het hergebruik. In termen van het detailniveau sluit dit model daarmee uitstekend op het kwalitatief systeem zoals dat door de systeemdiagrammen uit Hoofdstuk wordt gerepresenteerd. Het model is goed gedocumenteerd en gevalideerd en gebaseerd op ca. 80 parameters en afgeleide variabelen. Met het model kunnen de effecten van afvalbeleid in Vlaanderen op de productie van afval en hernieuwbare energie en compost door verbranding e.d. worden geanalyseerd. De gebruikte simulatiesoftware is Vensim ([www.vensim.com](http://www.vensim.com)). Het model wordt door de ontwikkelaars als generiek beschouwd en toepasbaar op andere EU landen en regio's.

De hier opgesomde modellen verschillen sterk in voor de inpasbaarheid relevante kenmerken zoals de gebiedsdekkendheid, de mate en wijze van ruimtelijke detaillering, de afhankelijkheid van basisgegevens, rekentijd e.d. In het volgende Hoofdstuk worden de modellen onderworpen aan een procedure waarmee de inpasbaarheid kwalitatief kan worden vergeleken. Voor een kleinere selectie van de modellen zullen de problemen en mogelijke oplossingen meer in detail worden uitgewerkt.

## HOOFDSTUK 7. PROCEDURE EN TOETSING INPASBAARHEID

---

### 7.1. INLEIDING

Alvorens de inpasbaarheid van de geselecteerde modellen meer in detail te toetsen is het van belang het doel van deze inpassing nog eens duidelijk te definiëren. Zoals in HOOFDSTUK 1 werd beschreven is de inpassing gericht op ondersteuning van toekomstverkenningen in het kader van het 4-stappen plan (Op 't Eyndt et al., 2011). Daarbij krijgt het in te passen thematische rekenmodel zijn invoergegevens uit het systeemdynamische model. Tegelijkertijd kan thematische modeluitvoer worden teruggegeven aan het systeemmodel, waarmee andere thematische rekenmodellen op hun beurt gevoed kunnen worden. De inpassing zelf beperkt zich dus tot de in- en uitgaande variabelen die tussen de rekenmodellen via het systeemmodel worden uitgewisseld (zie ook Figuur 1-2 en Figuur 5-2). Zonder hun inpassing in een systeemraamwerk zouden modellen, al dan niet met veel moeite, technisch te koppelen zijn tot een integraal model, maar de complexiteit en onderhoudsgevoeligheid van het laatste, zou, gegeven dat de modellen en invoergegevens ook nog regelmatig moeten kunnen worden aangepast, praktische toepassing in de weg staan en tot zogenaamde “integronsters” leiden (Voinov en Shuhgart, 2013). De laatste type integrale modellen verschillen wezenlijk van systeemdynamische modellen (zie ook Figuur 3-14).

Het resultaat van de toetsing bestaat uit een overzicht van alle kenmerken van een model die voor de inpassing van belang zijn in de vorm van een inpasbaarheidsfiche. Deze geeft een overzicht van de problemen die zich voor kunnen doen, terwijl een totaalscore een algemeen beeld geeft van de inpasbaarheid en snelle vergelijking met andere modellen mogelijk maakt. Vervolgens is het mogelijk om eventuele leemten in de modellen in te vullen, of, indien nodig, een ander model voor te stellen. Voor een “short list” van een kleiner aantal geselecteerde modellen wordt meer in detail nagegaan welke de sterke en zwakke kanten van het model (in termen van inpasbaarheid) zijn, en welke aanpassingen nodig zouden zijn (zie Sectie 7.4). De inpasbaarheid van de thematische modellen garandeert dat het model uit Stap 3 van het 4-stappen plannen inzetbaar is om processen met meer diepgang te beschrijven indien dat nodig is (zie ook Figuur 1-2). We geven nu eerst een toelichting op de gevolgde procedure voordat de modellen op inpasbaarheid worden vergeleken.

### 7.2. PROCEDURE TOETSING INPASBAARHEID

Met de inpassing van thematische modellen in een systeemdynamisch raamwerk, zoals bedoeld in Figuur 1-2, is onder meer ervaring opgedaan in het Europese MODULUS project (Engelen et al., 2000; Oxley et al., 2004). Het project had tot doel de bestaande biofysische, ecologische en sociaal-economische modellen en gegevens zodanig te integreren dat deze voor beleidsondersteuning op middellange termijn zouden kunnen worden ingezet. Oxley et al. maken onderscheid tussen beleids- en onderzoeksgerichte modellen die typisch verschillen in het doel van de modellen, nadruk op in- en uitgaande modelvariabelen, proces- versus toepassingsgerichtheid e.d. Bij de ontwikkeling van het beslissingsondersteunende systeem werden modellen op basis van algemene selectiecriteria geselecteerd (Engelen et al., 2000). Een aantal daarvan zijn ook geschikt voor deze inpasbaarheidsanalyse:

- *Procesbeschrijving*: de processen dienen adequaat door het model beschreven te worden zodat beleidsrelevante indicatoren kunnen worden bepaald.
- *Aansluiting systeemniveau*: de model in- en uitvoer dient aan te sluiten bij de uitwisseling van toestandsvariabelen uit het kwalitatieve systeemdiagram (zie Figuur 5-2 en Bijlage C).
- *Schaalniveau*: regionale schaal Vlaanderen met een voldoende mate van ruimtelijk detail om aan te sluiten bij de beleidscontext.
- *Tijdhorizon en tijdstap*: het model zou processen moeten kunnen beschrijven op een (middel)lange termijn van 20-50 jaar, aansluitend bij de tijdhorizon voor de toekomstverkenningen op basis van het 4-stappen plan. Als tijdstap voor het berekenen van beleidsindicatoren kan van een zichtjaar uitgegaan worden. Aangezien er sprake is van een integraal model moet de tijdstap voldoen aan de behoeften van alle modelonderdelen.
- *Invoer gegevens*: deze dienen beschikbaar te zijn met de mogelijkheid van aanpassing of uitbreiding van de gegevensbank indien dit nodig is.
- *Modeloutput*: deze primeert in principe boven de wetenschappelijke details van het model, zolang de resultaten gevalideerd zijn.

Aan deze lijst van criteria kunnen in dit verband in ieder geval nog worden toegevoegd:

- aansluiting bij de Vlaamse toekomstverkenningen gericht op duurzaamheid en milieu (MIRA, NARA ...) – zie ook tijdhorizon;
- de robuustheid voor variatie in de invoer vanuit het systeemmodel binnen het bereik van de scenario's voor de toekomstverkenningen;
- het voorkomen van relaties, variabelen en parameters die toestaan om de verschillen tussen de scenario's weer te geven;
- het al dan niet modulaire karakter van het model zodat componenten van een model afzonderlijk kunnen worden toegepast indien nodig.

Twee bijzondere aandachtspunten bij de inpasbaarheid zijn het schaalniveau en meer bepaald de ruimtelijke differentiatie en het detailniveau (zie ook HOOFDSTUK 4). Een aantal van de gangbare modellen gericht op duurzaamheid en milieu zijn ruimtelijk expliciet om de processen op de juiste wijze te kunnen beschrijven. Te denken valt aan thema's zoals lucht- en waterkwaliteit of het ruimtegebruik. De systeemdynamische modellering daarentegen is in de eerste plaats gericht op de temporele ontwikkeling van systemen en niet ruimtelijk gedifferentieerd. Om terugkoppelingen van andere naar ruimtelijke gedifferentieerde rekenmodellen mogelijk te maken zou gebruik gemaakt kunnen worden van dasyymetrische kartering of geografisch gewogen regressie, andersom kunnen resultaten ruimtelijke geaggregeerd worden. Een tweede aandachtspunt betreft het juiste detailniveau in de keuze van toestandsvariabelen en terugkoppelingen (zie ook Sectie 4.2.2.).

Voor het opstellen van een generieke modelfiche waarmee de inpasbaarheid van thematische modellen in een SDM kan worden samengevat verfijnen we de template van EEA. Veel van de deze modelkarakteristieken, zoals de geografische en temporele dekking, in- en uitvoer en eerdere koppeling met andere modellen zijn relevant. Een belangrijk hulpmiddel bij het toetsen van de inpasbaarheid zijn de kwalitatieve systeemdiagrammen (zie Bijlage C). Immers, deze beschrijven op hoofdlijnen de kwalitatieve samenhang tussen de thema's en leggen daarmee in principe de variabelen en het detailniveau vast waarmee gegevens tussen de verschillende modellen kunnen worden uitgewisseld, rekening houdend met de terugkoppelingen die van belang zijn voor de dynamiek van het systeem. Met de systeemdiagrammen kan de positie en rol van elk thematisch of sectoraal model in samenhang met andere te selecteren modellen beter worden ingeschat. Een model kan de processen binnen één of meerdere thema's representeren, of slechts een deel van

de processen binnen een thema. De afwegingen die op het niveau van het totale systeem gemaakt worden hebben ook gevolgen voor de inpasbaarheid van de modellen. Naarmate meer modellen ingezet moeten worden om de processen met voldoende diepgang te beschrijven neemt de technische complexiteit van de ontwikkeling van het SDM toe. Dit betekent mogelijk dat een thematisch model dat de belangrijkste relaties binnen een thema grotendeels kan beschrijven de voorkeur verdient boven een model dat beperkt is tot slechts enkele of één van deze relaties. Uiteraard zijn ook andere criteria zoals de performantie, de toegang tot het model zelf, de afhankelijkheid van uitgebreide gegevensbanken en de mogelijkheid om met extreme invoer te kunnen functioneren, relevant. Dit laatste aspect is met name van belang voor brede toekomstverkenningen, waarin de “hoeken van de kamer” worden onderzocht.

De toegepaste generieke fiche gericht op de inpasbaarheid binnen een systeemdynamisch model ter ondersteuning van toekomstverkenningen rond duurzaamheid in Vlaanderen is in Tabel 7-1 te vinden. De criteria en het aanvaardbare bereik per criterium (onder kolom ‘toelichting’) die hierin zijn opgenomen zijn zo gekozen dat de inpasbaarheid in een systeemdynamisch model zo goed mogelijk gewaarborgd is en aansluit op het doel van de studie (ondersteuning lang-termijn toekomstverkenningen op regionale schaal). De inpasbaarheid van een model is gebaseerd op de combinatie van scores op deze kwalitatieve en kwantitatieve criteria, voor zover de informatie beschikbaar is of score op het criterium kan worden ingeschat. Uiteraard zijn niet alle criteria in dit “lastenboek” even belangrijk terwijl sommige criteria doorslaggevend zijn voor de inpasbaarheid of juist optioneel. We kunnen onderscheid maken tussen noodzakelijke criteria waarop het model zeker voldoende zou moeten scoren, prioritaire criteria waarbij dit bij voorkeur het geval is, en optionele criteria waarvoor het wenselijk is dat het model voldoende scoort. Een eenvoudig benadering voor het bepalen van de inpasbaarheid van modellen kan zijn de noodzakelijke criteria volledig mee te wegen (score 0 of 1) terwijl de prioritaire criteria voor 50 % meegewogen worden. De optionele criteria kunnen in beschouwing genomen worden als de toetsing problematisch is of het onderscheid in inpasbaarheid van twee modellen lastig is in te schatten. Alle meetbare criteria dienen als positief voor de inpasbaarheid geïnterpreteerd te worden. Voor criteria waarvoor de informatie ontbreekt of een inschatting van de score lastig is wordt het effect van een minimale en maximale score onderzocht om de onzekerheden in de totale inpasbaarheidsscore te bepalen. We geven voor de belangrijkste criteria die hoger nog niet aan bod kwamen een nadere toelichting om de betekenis van de inpasbaarheidsfiche te verduidelijken:

- *Afdekking Thema*: dit criterium verwijst naar de mate waarin een model in staat is om de relevante processen binnen het thema af te dekken. Indien modellen slechts een beperkt deel van de processen kunnen beschrijven zijn meer modellen nodig voor dit thema, wat de opbouw van een systeemmodel complexer maakt. Indien een model een zeer relevante relatie beschrijft (bijvoorbeeld de invloed van ontsnippering op terrestrische biodiversiteit zoals in Figuur 8-9 kan overwogen worden toch een positieve score op dit criterium te geven.
- *Model in- en uitvoer*: dit is een belangrijk criterium dat verband houdt met de rol van het model in het totale systeem. De thematische systeemdiagrammen uit Hoofdstuk 5 zijn een waardevolle visualisatie van de werking van het systeem binnen de thema’s en processen die daarbij een rol spelen. De koppelvariabelen uit de thematische systeemdiagrammen (zie Bijlage C) en algemene relatiediagram uit Figuur 5-2 kunnen het beste als leidraad gebruikt worden om te bepalen op welk niveau variabelen tussen de thema’s moeten worden uitgewisseld. Anderzijds bestaan er thematische modellen waarin verschillende thema’s al zijn geïntegreerd (bijvoorbeeld Economie & Transport of Water & Natuur). Hier doet zich de vraag voor of dit soort modellen in het geheel moeten worden ingepast, of slechts deelmodules daarvan. Ook deze vraag kan het beste beantwoord worden vanuit

het algemene systeemdiagram en de koppelvariabelen voor integratie tussen de thema's. Het vereiste detailniveau is ook afhankelijk van de rol van het model binnen het systeem. Een demografisch model dat wordt gebruikt om de omvang van de actieve bevolking te schatten zal bijvoorbeeld onderscheid moeten maken tussen de actieve (18-64 jaar) en niet-actieve bevolking, en waarschijnlijk rekening moeten houden met het geslacht omdat dit de arbeidsparticipatie kan beïnvloeden. Voor de modellen uit de shortlist wordt de rol van de koppelvariabelen meer in detail in beschouwing genomen (zie ook Bijlage E).

- *De ruimtelijke resolutie:* niet alle modellen zijn ruimtelijk gedifferentieerd maar als dit wel het geval is zal het ruimtelijk detail moeten volstaan voor een toekomstverkenning op het schaalniveau van het Vlaamse Gewest, de te beschrijven relaties binnen het systeem, en het door de te koppelen modellen vereiste ruimtelijk detail. Nemen we de modellering van het ruimtegebruik als voorbeeld. Het verlies aan open ruimte aan de rand van bebouwd gebied (zie Figuur 8-5) leent zich niet voor modellering op een 5x5 km raster.
- *Analytische benadering:* hiermee wordt verwezen naar de mate waarin het modeltype geen beperking vormt voor inpassing in een systeemdynamisch model. Procesmodellen scoren in dit opzicht beter dan typische evenwichtsmodellen of statische modellen (zie ook Sectie 6.1).
- *Endogeniteit model:* hiermee wordt bedoeld dat modellen soms complex zijn van opzet, met veel endogene parameters die ingesteld moeten worden. Endogene parameters geven vaak ook de (statische) relatie met de modelexterne omgeving weer. In dat geval zijn ze dus een onzichtbare bypass voor de rechtstreekse invoer vanuit het systeemmodel. Hoe complexer een model hoe lastiger delen van de processen kunnen worden overgedragen naar andere modellen (met tussenkomst van het systeemmodel). Zogenaamde "Black box" modellen zijn vaak moeilijk in te zetten of aan te passen voor een andere toepassing.
- *Modelbeheer:* modellen in eigen beheer kunnen gemakkelijker worden aangepast indien de inpassing daarom vraagt.
- *Doelgroep en gebruikers:* modellen waarvoor al een duidelijke doelgroep en gebruikers bestaat zullen eerder inzetbaar zijn in het kader van het 4-stappen plan, hiermee wordt dus ook verwezen naar de beleidsrelevantie en/of eerdere operationele inzet.
- *Kalibratie en validatie:* gekalibreerde en gevalideerde modellen verdienen de voorkeur boven modellen welke nog in ontwikkeling zijn. Dit is des te meer het gevallen wanneer deze modellen in een systeemmodel moeten worden ingepast. Afwijkingen in resultaten worden dan aan andere modellen doorgegeven.
- *Onzekerheidsanalyse:* inzicht in de onzekerheden in modeluitkomsten kan interessant zijn voor gebruikers. Wel dient voor een juiste inschatting van de onzekerheden in het totale systeem deze informatie voor alle modellen beschikbaar te zijn.
- *Modelkoppeling:* ervaring met de integratie met andere modellen kan een voordeel zijn.
- *Modelcontrole:* hiermee wordt de mate bedoeld waarin een model kan worden aangestuurd en indien nodig onderbroken en weer opgestart. Dit is soms nodig om twee modellen gegevens te laten uitwisselen binnen een gegeven tijdstap. Zo werd voor het stikstofbalansmodel voor het Schelde stroomgebied dat in het kader van EU project SPICOSA werd ontwikkeld (Vermaat et al., 2012) een dynamisch simulatiemodel in



ExtendSim® voor het gedrag van landbouwers gekoppeld met een ruimtelijk model voor de fysische processen in PCRaster®. Het dynamische simulatiemodel gebruikte een tijdstap van enkele uren, het model in PCRaster® een tijdstap van een jaar waarna een totale stikstofvracht werd doorgegeven. De modellen werden beurtelings aangezet, d.m.v. een zogenaamde “lock file”. In dit soort gevallen is één van de modellen sturend (in dit geval het simulatiemodel in ExtendSim®), zoniet bestaat er een controle mechanisme in het model dat de werking van alle modellen aanstuurt, zoals bijvoorbeeld in MODULUS. Ook is het soms noodzakelijk om de tussentijdse toestand van het systeem op te slaan omdat deze historie gebruikt wordt door andere thematische modellen. Bij voorkeur worden alle gegevens opgeslagen in een centrale geografische database die strikt aan het model gekoppeld is.

- *Afhankelijkheid gegevensbanken:* een aantal van de onderzocht modellen uit de longlist, zoals bijvoorbeeld de modellen voor de relatie tussen energievraag en gebruik, is sterk afhankelijk van gedetailleerde gegevensbanken waarin parameterwaarden zijn opgeslagen. Indien deze voor een referentiejaar zijn ingewonnen stelt zich de vraag in hoeverre een dergelijk model in een dynamisch systeemmodel kan worden ingezet, met name wanneer de parameterwaarden beïnvloed worden door factoren vanuit andere thema's. Zo kan bijvoorbeeld een vloot van vracht- en personenwagens behoorlijk veranderen op de middellange termijn in de context van verschillende scenario's.
- *Rekentijd:* de rekestijd van rekenmodellen is altijd een probleem wanneer meerdere modellen worden gekoppeld en ingezet voor simulaties met een lange tijdshorizon. Zo kost het doorrekenen van de luchtkwaliteit op regionale schaal voor een enkel simulatiejaar 5-25 uur met de gangbare deterministische modellen. De rekestijd van een dergelijk model zou de performantie van het totale systeem aanzienlijk beperken, wat het doorrekenen van een groot aantal combinaties van scenario's en beleidsopties onmogelijk maakt, zeker bij interactief gebruik (Stap 4 uit het 4-stappen plan). Een lange rekestijd is ook een indicatie dat het model niet voor dit soort doeleinden ontwikkeld is maar veeleer voor andere gedetailleerde procesonderzoeken.
- *Modelperformantie:* hiermee wordt verwezen naar de mate waarin een model in staat is processen juist te beschrijven en gemeten waarden te reproduceren (modelkwaliteit). Dit begrip is niet te verwarren met de rekestijd (technische performantie).
- *Software platform:* modellen welke in een algemeen gebruikte software omgeving draaien of in dit opzicht flexibel zijn verdienen de voorkeur boven modellen waarvoor dat niet het geval is.

In principe is het mogelijk om voor de meeste van deze problemen model- en software-technische oplossingen te ontwikkelen. Zo kunnen de resultaten van een model met te weinig ruimtelijk detail door bijvoorbeeld assymetrische kartering worden verfijnd en kan de performantie worden verbeterd door een model te vervangen door een metamodel, waarin de relaties tussen in- en uitvoer zijn vastgelegd in empirische verbanden. Nadelen daarvan zijn dat meer ontwikkelingspanning en aanvullende inzichten of gegevens nodig zijn, en dat de flexibiliteit en aansturingmogelijkheden van de oorspronkelijke modellen mogelijk verloren gaan. Een model dat goed scoort op deze punten verdient daarom de voorkeur boven een model waarvoor dat niet het geval is.

| Criterion                          | Korte toelichting   | Gewicht |
|------------------------------------|---|---------|
| Afdekking relaties thema (O)       | Thema voor verdieping wordt grotendeels (> 50 %) afgedekt tenzij relevantie systeemrelatie zeer hoog is;              | 1       |
| Modelinvoer (P)                    | Kan werken met invoer variabelen te koppelen thema's op systeemniveau   | 5       |
| Modeluitvoer (P)                   | Uitvoer naar variabelen en detailniveau systeemmodel (al dan niet na aggregatie)                                      | 5       |
| Geografische dekking (N)           | Gebiedsdekkend Vlaanderen   | 10      |
| Ruimtelijke differentiatie (P)     | Ondersteuning ruimtelijke differentiatie vereist voor beleidsverkenningen   | 5       |
| Ruimtelijke resolutie (P)          | Indien ruimtelijk gedifferentieerd op raster 100-1000 m   | 5       |
| Tijdhorizon (N)                    | Ondersteuning toekomstverkenningen met tijdhorizon 20-50 jaar   | 10      |
| Tijdresolutie (N)                  | Ondersteuning toekomstverkenningen met tijdstap 1 maand – 1 jaar  | 10      |
| Analytische benadering (P)         | Dynamisch procesmodel of dynamisch inzetbaar indien statisch, evenwichtsmodel of optimalisatiemodel                   | 5       |
| Endogeniteit model (P)             | Minimaal gebruik endogene modelparameters   | 5       |
| Modelbeheer (P)                    | Model in eigen beheer; toegang code   | 5       |
| Doelgroep/gebruikers (P)           | Beleidsrelevantie; eerdere of bestaande inzet in toekomstverkenningen   | 5       |
| Kalibratie (P)                     | Kalibratie voor toepassing Vlaanderen   | 5       |
| Validatie (P)                      | Gevalideerd   | 5       |
| Onzekerheidsanalyse (O)            | Inzicht modelonzekerheid  | 1       |
| Bronnen/publicaties (O)            | Peer-reviewed publicaties, rapportages beleids- en lang-termijn toekomstverkenningen                                  | 1       |
| Modelkoppeling (O)                 | Eerdere koppeling andere thematische modellen is voordeel; thematische modules dienen wel ontkoppeld te kunnen worden | 1       |
| Gebruiksvriendelijkheid (P)        | Relatief eenvoudig zelf te installeren en toe te passen   | 5       |
| Robuustheid (P)                    | Robuust voor bereik invoer vanuit systeemmodel of ontbreken van invoer (afhankelijk van functie in systeem)           | 5       |
| Modelcontrole (P)                  | Mogelijkheid model te onderbreken voor communicatie naar systeemmodel ; mogelijkheid systeemhistorie op te slaan      | 5       |
| Rekentijd (NP)                     | Volledige modelcyclus tot tijdhorizon in orde minuten   | 10      |
| Modelperformantie (P)              | Overeenstemming waargenomen ruimtelijk-dynamische patronen  | 5       |
| Afhankelijkheid gegevensbanken (N) | Omvang database niet van invloed op inpasbaarheid; kalibratie gegevens laat dynamische toepassing toe                 | 10      |
| Software platform (O)              | Staat inpassing SDM niet in de weg  | 1       |

Tabel 7-1 Aangepaste template met modelkenmerken gericht op inpasbaarheid in een systeemdynamisch model gericht op milieu in Vlaanderen (N = noodzakelijk criterium; P = prioritair criterium; O = optioneel criterium)

### 7.3. RESULTATEN INPASBAARHEID

Bij de inpasbaarheidstoetsing kunnen zich nu drie situaties voordoen:

- Het model is direct in de bestaande vorm of met beperkte aanpassingen inpasbaar in het systeemdynamische model.
- Het model is alleen met substantiële aanpassingen of grote technische inspanning inpasbaar.
- Het model is niet of zeer moeilijk inpasbaar (bijvoorbeeld ten gevolge van een gebrek aan rekenperformantie).

Van de meeste modellen kan verwacht worden dat deze in de eerste of tweede categorie vallen, m.a.w. dat aanpassingen noodzakelijk zijn voordat het model inpasbaar is. Scoort een model slecht op criteria waaraan noodzakelijk voldaan moet zijn dan moet een oplossing gezocht worden. Betreft het wenselijke criteria, dan kan aanpassing overwogen worden of kan de score een rol spelen bij vergelijking met andere modellen.

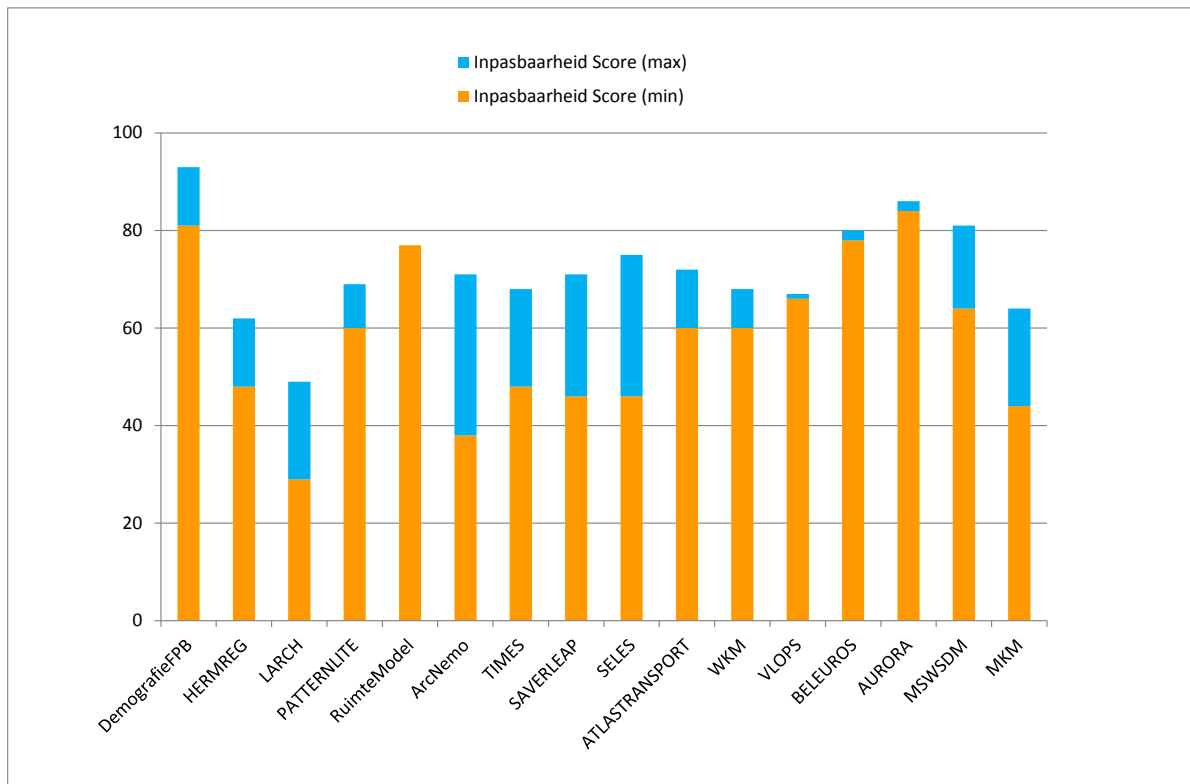
Op basis van de beschikbare documentatie werd per criterium een kwalitatieve inschatting gemaakt van de mate waarin bij de inpassing van het model in het systeemraamwerk uit Figuur 5-2 problemen te verwachten zijn. De generieke fiches, die in MsExcel® zijn geïmplementeerd, kunnen snel worden aangepast zodra betere of andere informatie beschikbaar komt. De toegepaste criteria en gewichten die daaraan zijn toegekend zijn in aparte werkbladen in te stellen en worden automatisch gebruikt door de werkbladen met de inpasbaarheidsscores voor de afzonderlijke modellen. De toetsing van de modellen is kwalitatief en gebeurt op basis van de beschikbare documentatie over, en kennis van, de onderzochte modellen. Alle scores zijn positief te interpreteren voor wat de inpasbaarheid betreft: een hogere score op een criterium duidt er op dat het model in dit opzicht beter inpasbaar is. Op elk criterium kan een model een score 0 ("zwak"), 1 ("redelijk"), ofwel 2 ("goed") behalen. Eventueel kan deze opdeling worden verfijnd. Voor criteria die niet relevant zijn voor het model of waarvoor de informatie (nog) ontbrak werd geen score toegekend. De totale score is gebaseerd op de combinaties van scores en gewichten. Dit totaal wordt geschaald in het bereik 0-100. Voor criteria waaraan geen score kon worden toegekend omdat de informatie ontbrak of moeilijk een score bepaald kon worden werd de berekening tweemaal, met een minimale score 0 en maximale score 2 uitgevoerd. Op deze wijze kon het effect hiervan op de onzekerheid in de totale inpasbaarheidsscore van het model bepaald worden. Een overzicht van de scores voor alle modellen is te vinden in Figuur 7-1. In Bijlage D zijn de scores voor de individuele criteria voor de modellen uit de longlist weergegeven, waarbij bij het ontbreken van informatie een score 0 is toegekend. De resultaten per criterium zijn ook belangrijk en geven een eerste indicatie van de modelaspecten die aanleiding kunnen zijn tot problemen bij de inpassing en eventueel om aanpassingen aan het model vragen. Om het kwalitatieve karakter van de analyse nog eens te benadrukken zijn de scores per criterium weergegeven als "\*", "\*\*" of "\*\*\*".

Enkele algemene vaststellingen:

- Typische procesmodellen zoals gebruikt voor de lucht- en waterkwaliteit scoren beter op de aansluiting op het systeemmodel en ruimtelijke differentiatie, maar minder in termen van de rekentijd.
- Typische "statische" modellen zoals voor economie, de landbouw en energiegebruik zijn

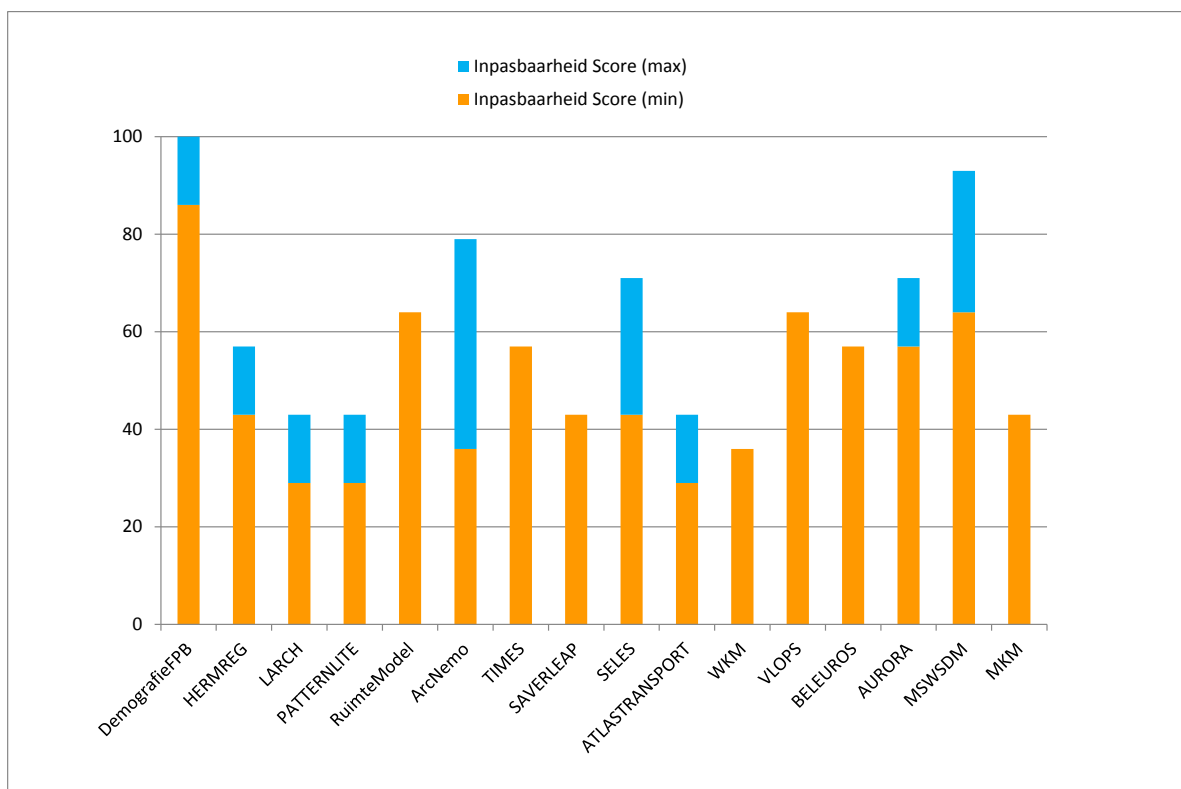
sterk afhankelijk van referentiegegevens en berekenen vaak alleen eind- of tussenpunten. Ze kunnen iteratief ingezet worden, maar het gevaar bestaat dat ze geen consistent gedrag in de tijd vertonen, omdat deze modellen geen “geheugen” hebben.

- De toegang tot de eigenlijke modellen is voor de ontwikkeling van een systeemdynamisch model noodzakelijk om de scenario’s vanuit het systeemniveau te kunnen aansturen.
- De beschikbare documentatie en rapportages volstaan niet altijd om de scores op de inpasbaarheidscriteria goed te kunnen schatten, overleg met de ontwikkelaars of gebruikers of, nog beter, ervaring met de koppeling met andere modellen kunnen zeer waardevol zijn. Een schatting in de onzekerheden, die tot gevolg heeft in de totale inpasbaarheidsscores van de modellen is wel mogelijk (zie Figuur 7-1).
- Sommige modellen scoren matig op het criterium rekentijd. Hoewel een lange rekentijd niet de meest beperkende factor hoeft te zijn, is deze bovendien gecorreleerd met de mate van detaillering van een model die de toepassing voor een toekomstverkenning te boven kan gaan. Een oplossing is metamodelering. Dit betekent dat de relaties tussen de in- en uitgangsvARIABLEN voor een groot aantal combinaties offline wordt doorgerekend. Nieuwe combinaties van ingangsvARIABLEN vanuit het systeemniveau kunnen dan door interpolatie worden doorgerekend zonder dat het oorspronkelijke zware rekenmodel nog hoeft te worden ingezet.



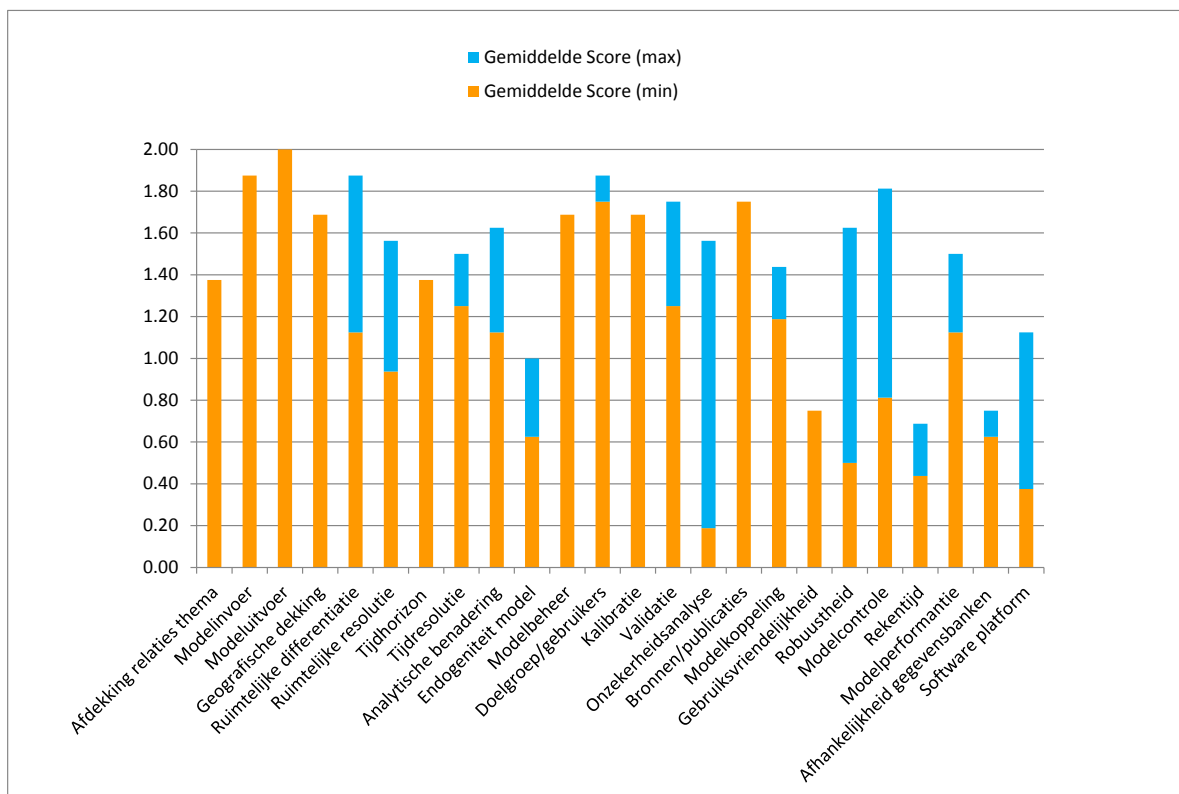
Figuur 7-1 Vergelijking resultaten inpasbaarheid modellen longlist en onzekerheden ten gevolge van het ontbreken van informatie m.b.t. de criteria voor de standaard gewichtenset

Onderzocht werd ook in hoeverre de gekozen gewichten uit Tabel 7-1 de resultaten kunnen beïnvloeden. Een alternatieve gewichtenset zou zich kunnen richten op een “operationele toepassing” van de modellen op korte termijn, waarbij de voorkeur wordt gegeven aan modellen die direct inzetbaar zijn en in voldoende getest. Een hierbij passende, alternatieve gewichtenset zou alleen rekening kunnen houden met de criteria geografische dekking, kalibratie, validatie, gebruiksvriendelijkheid, rekestijd, afhankelijkheid gegevensbanken en softwareplatform welke alle het gewicht 1 krijgen. De gewichten voor de resterende criteria krijgen de waarde 0. Vergelijken we nog eens de modellen uit de longlist op basis van deze gewichtenset (zie Figuur 7-2) dan zien we duidelijk verschillen met de “standaard” gewichtenset uit Figuur 7-1.



Figuur 7-2 Vergelijking resultaten modelinpasbaarheid en onzekerheden ten gevolge van het ontbreken van informatie m.b.t. de criteria voor een “operationele” gewichtenset

De resultaten van de toetsing bieden ook een mogelijkheid om na te gaan op welke criteria een combinatie van modellen slecht of juist goed scoort. Beschouwen we als voorbeeld de set van modellen uit de longlist, dan kunnen de gemiddelde scores voor de criteria uit Tabel 7-1 vergeleken worden (zie Figuur 7-3), evenals de onzekerheid die het gevolg is van het ontbreken van informatie voor een aantal modellen. Hieruit blijkt dat de meeste onderzochte modellen goed scoren op de afdekking binnen het thema, de mate waarin de relevante koppelvariabelen kunnen worden beschreven (modelin- en uitvoer), gebiedsdekkendheid, beschikbaarheid van publicaties en de toegang tot het model. Minder goed wordt gescoord op de modelendogeniteit, gebruiksvriendelijkheid, rekestijd en afhankelijkheid van gegevensbanken. Onduidelijk is of modellen voldoende aan onzekerheidsanalyses zijn onderworpen, robuust zijn voor (extreme) invoerwaarden vanuit het systeemmodel die passen bij toekomstverkenningen en tot slot of het gebruikte softwareplatform geschikt is of niet.



Figuur 7-3 Gemiddelde score per criterium voor de modellen uit de longlist en onzekerheidsmarges t.g.v. ontbreken scores criteria

## 7.4. GEDETAILEERDE ANALYSE INPASBAARHEID

### 7.4.1. INLEIDING

Voor een representatieve selectie van de modellen uit de 'longlist' onderzoeken we de aanpassingen die nodig zijn om de inpasbaarheid te verbeteren. Bij de selectie van deze 'short list' is rekening gehouden met de volgende criteria:

- de relevantie van het model voor beschikbare en toekomstige beleidsstudies;
- de mate waarin het model scoort op de inpasbaarheid bij de screening van de 'longlist' (enige variatie is hier zinvol);
- de verdeling over verschillende thema's;
- een plaats voor typische procesmodellen (lucht- en waterkwaliteit);
- de beschikbaarheid van voldoende informatie voor een meer gedetailleerde analyse.

De voor de shortlist geselecteerde modellen zijn:

- het demografisch model dat aan de prognoses van het Federaal Planbureau ([www.plan.be](http://www.plan.be)) ten grondslag ligt (Duyck et al., 2013);
- het regionaal-economisch model HERMREG voor Vlaanderen dat door het Federaal Planbureau ontwikkeld is (Bassilière et al., 2008);
- het RuimteModel Vlaanderen (Engelen et al., 2011a);
- het transportmodel uit het gekoppelde ruimte-transport model ATLAS voor Vlaanderen,

dat momenteel in ontwikkeling is (Franckx et al., 2013);

- het model LARCH voor de relatie tussen biodiversiteit en landschapskwaliteit (Pouwels et al., 2002);
- het luchtkwaliteitsmodel BELEUROS (Deutsch et al., 2008b; Deutsch et al., 2013b);
- het systeemdynamische model voor het beheer van huishoudelijk afval in Vlaanderen (Inghels en Dullaert, 2010).

Een eerste aanwijzing voor mogelijke problemen met de inpasbaarheid is uiteraard te vinden in de gedetailleerde modelfiches uit Bijlage D. Criteria waarop een model slecht scoort vragen om meer aandacht. We gaan nu meer in detail in op de inpasbaarheid van deze modellen. De toestandsvariabelen en terugkoppelingen uit de kwalitatieve systeemdiagrammen, en met name de koppelvariabelen, die voor de integratie tussen de thema's zorgen, vormen een goed uitgangspunt. In Bijlage E is voor zeven thema's die relevant zijn voor de modellen uit de short list (Bevolking, Economie, Ruimtegebruik, Mobiliteit, Natuur & Milieu, Luchtkwaliteit en Materiaalgebruik) weergegeven hoe en via welke koppelvariabelen het thema samenhangt met de andere thema's uit het totale systeem van Figuur 5-4. In Figuur 8-12 tot Figuur 8-18 zijn de in- en uitgaande toestandsvariabelen voor het thema van het model, de koppelvariabelen, benadrukt, evenals de terugkoppelingen die de thema's integreren. De koppelvariabelen zijn van belang voor de uitwisseling van gegevens tussen de modellen bij inpassing in een systeemdynamisch model.

Voor elk model worden vervolgens aanbevelingen gedaan voor de inpassing in een systeemdynamisch model. Geen enkel model, ook niet uit de shortlist, is direct inpasbaar in een systeemdynamisch raamwerk, ook al scoort het over de hele lijn goed op de inpasbaarheidscriteria. Voor enkele modellen vormt de rekentijd een probleem. Wel dient opgemerkt te worden dat de rekentijd een minder stringent probleem wordt indien modellen geïmplementeerd worden op een rekencluster en de verschillende thematische modellen in parallel worden doorgerekend. Het voordeel van een rekencluster is sowieso de stabiliteit van het Linux besturingsprogramma t.o.v. Windows. Een tweede probleem dat zich een aantal keren voordoet is het gebruik van soms zeer gedetailleerde, "statische" invoergegevens voor een referentiejaar. Voor de inpassing is het noodzakelijk deze invoergegevens tijdsafhankelijk te maken, en bovendien het effect van veranderingen in de toestandsvariabelen die relevant zijn voor de koppeling met andere thema's (bijvoorbeeld een veranderende samenstelling van de bevolking of omvang van huishoudens zijn van invloed op het energiegebruik, waarvoor de invoergegevens mogelijk gecorrigeerd moeten worden). Een gedetailleerde analyse van deze gegevens is dan noodzakelijk. We bespreken hier kort de belangrijkste aanpassingen die aan inpassing van de modellen uit de shortlist vooraf zouden moeten gaan.

#### **7.4.2. DEMOGRAFIE FPB**

Het demografisch leeftijds-cohort model dat door het Federaal Planbureau (Duyck et al., 2013) wordt gebruikt voor de lange-termijn prognoses is gebaseerd op een boekhoudkundige berekening van de bevolkingsomvang, waarbij onderscheid gemaakt wordt naar leeftijd, geslacht, arrondissement en nationaliteitsgroep (Federaal Planbureau, 2006). Een groot deel van het werk bestaat uit het verzamelen van de statistische gegevens. Het model is in APL (A Programming Language) geschreven, een programmeertaal die van matrices gebruik maakt. De bevolkingsvooruitzichten omvatten een basisscenario, en twee alternatieve scenario's die ontstaan door een lagere en hogere waarde van de basisparameters: de vruchtbaarheid, mortaliteit en migraties (Federaal Planbureau, 2006). Uitgaand van de bevolkingsomvang op 1 januari van het basisjaar wordt de bevolking aan het eind van dat jaar berekend. Door iteraties wordt vervolgens de bevolkingsomvang voor de opeenvolgende jaren berekend. Conceptueel is een dergelijke

berekening relatief eenvoudig te implementeren. De resultaten zijn sterk afhankelijk van de gebruikte parameters voor de vruchtbaarheid, mortaliteit en met name de immigratie zoals de verschillen met andere demografische prognoses ook laten zien. Binnen het model worden alle belangrijke toestandsvariabelen en terugkoppelingen rond het thema Bevolking (zie Figuur 8-1) beschreven.

De koppelvariabelen die dit thema met bijna alle thema's verbinden zijn (zie Figuur 8-12):

- naar Economie: Beroepsbevolking op Arbeidsaanbod; Uitgaven sociale zekerheid op Arbeidsparticipatie; Welzijn en gezondheid op ISEW indicator (zie Sectie 2.1);
  - naar Ruimtegebruik: Aantal huishoudens op Vraag residentiële ruimte;
  - naar Energie: Aantal huishoudens op Energievraag;
  - naar Luchtkwaliteit: Aantal huishoudens op Emissies;
  - naar Water: Aantal huishoudens op Watergebruik;
  - naar Landbouw en Voeding: Bevolkingsomvang op Voedselconsumptie dierlijk/plantaardig;
  - naar Mobiliteit: Aantal huishoudens op Omvang woon-werk verkeer en Transportvraag personenverkeer;
- 
- vanuit Economie: Loonindex op Immigratie; Regionaal inkomen op Uitgaven sociale zekerheid;
  - vanuit Klimaat: Temperatuur op Welzijn en gezondheid;
  - vanuit Luchtkwaliteit: Ozon en Concentraties op Welzijn en gezondheid;
  - vanuit Natuur: Ecosysteemdiensten op Welzijn en gezondheid.

Voor de interactie van het demografische model met het systeemmodel zijn dus de volgende toestandsvariabelen van belang: de totale bevolkingsomvang, de omvang van de beroepsbevolking, de immigratie, en het aantal huishoudens. De resultaten van de FPB prognoses omvatten de leeftijdsklassen per geslacht en immigratiecijfers. Daarmee kunnen deze in principe op eenvoudige wijze geaggregeerd worden tot op het niveau van de totale bevolkingsomvang en het werkzame deel daarvan, en leent het model zich in dit opzicht voor inpassing in een systeemdynamisch model. Beschouwen we de ontwerpcriteria uit Sectie 4.2, dan zien we dat het model beantwoordt aan de belangrijkste randvoorwaarden: de bevolkingsgroei, rol van immigratie en fractie actieve bevolking kunnen met een tijdstap van een jaar en tijdhorizon van jaar worden berekend. Het ruimtelijk detail beperkt zich echter tot het arrondissement (NUTS3) niveau. Om het aantal huishoudens te bepalen dient de lang-termijn ontwikkeling van de gezinsverdunning, zoals gerapporteerd in het Milieurapport en door het ADSEI, beschreven te kunnen worden. De toestandsvariabelen welzijn en gezondheid en uitgaven sociale zekerheid vallen buiten de demografie en zouden op andere wijze moeten worden gemodelleerd. Wel moet de levensverwachting afhankelijk gesteld kunnen worden van de variabele welzijn en gezondheid. De immigratie zou als functie van de loonindex moeten kunnen worden beschreven. Binnen het thema Bevolking zelf zou ook de invloed van de toegankelijkheid van het immigratiebeleid op de immigratie en verandering van de leefwijze op de omvang van de huishoudens beschreven moeten kunnen worden. Twee aandachtspunten die uit de inpasbaarheidsscores op de individuele criteria (Tabel 8-1) naar voren komen zijn de modelonzekerheid en robuustheid van het model voor (extreme) invoerwaarden vanuit het systeemmodel. De recente bijstelling van de FPB prognoses en verschillen met andere demografische prognoses zoals die van de Studiedienst van de Vlaamse Regering (Pelfrene, 2009) laten zien dat onzekerheden een rol spelen. Ondanks de beschikbare documentatie van de prognoses ([www.plan.be](http://www.plan.be)) is het onderliggende model niet (direct) beschikbaar of duidelijk beschreven, wat voor inpassing in een systeemdynamisch kader noodzakelijk is. Het



demografisch model van het FPB heeft verder een aantal sterke kenmerken. De tijdhorizon van de prognoses en het detailniveau (arrondissementen) lenen zich uitstekend voor de ondersteuning van lange-termijn toekomstverkenningen met een beleidstoepassing. Ook is al ervaring opgedaan met de koppeling met andere modellen zoals het HERMREG model (Bassilière et al., 2008) of het RuimteModel (Engelen et al., 2011b).

Het demografisch model van het Federaal Planbureau scoort goed op bijna alle inpasbaarheidscriteria (Tabel 8-1). Zo is de rekentijd beperkt, zijn variabelen op het juiste detailniveau berekend, en sluit de tijdhorizon aan bij lange-termijn toekomstverkenningen. Toch is inzicht in het model zelf noodzakelijk, of tenminste de medewerking van het FPB om enkele aanpassingen door te voeren die voor inpassing nodig zijn. De integratie met de andere thema's verloopt via enkele koppelvariabelen, die deel uitmaken van de modelberekeningen zodat de prognoses moeten kunnen worden herberekend met andere aannames. Dit betreft de invloed van de Loonindex uit het economische model op de Immigratie en de invloed van de toestandsvariabele "Welzijn en Gezondheid" op de Levensverwachting. Het model dient dynamisch aangestuurd te kunnen worden met verschillende tijdreeksen voor deze variabelen (i.e. de loonindex en gezondheidstoestand van de bevolking). Inzicht in het bereik voor deze parameterinstellingen en gevoeligheidsanalyses om realistische resultaten te verkrijgen zullen noodzakelijk zijn. Verder zal de afgeleide toestandsvariabele "Aantal huishoudens" berekend moeten kunnen worden uit de Bevolkingsomvang en Omvang van huishoudens (zie ook Figuur 8-1) en in samenhang met sociaal-maatschappelijke veranderingen en individualisering. Voor de toekomstige veranderingen in de samenstelling van huishoudens heeft de Studiedienst van de Vlaamse Regering (Maene, 2011) en ook het ADSEI prognoses opgesteld. De consistentie daarvan met de demografische prognoses zou moeten worden onderzocht. Tenslotte vraagt ook de ruimtelijke differentiatie om aandacht. In het bestaande RuimteModel (Engelen et al., 2011b) wordt een dichtheidsmodel toegepast om de residentiële ruimtevrage op het niveau van cellen van 1 ha te bepalen. Voor scenario-oefeningen zoals de toepassing van de WLO wereldbeelden op Vlaanderen (Engelen et al., 2011a) zal het noodzakelijk zijn deze dichtheden te variëren. Dit kan gebeuren door de dichtheden die corresponderen met de demografische projecties als referentie te gebruiken.

### 7.4.3. HERMREG

Het macro-economisch model HERMREG (Bassilière et al., 2008), dat nog verder in ontwikkeling is, is inzetbaar om de middellange termijn prognoses (tot 2030) voor de economische ontwikkeling te ondersteunen. Het model is ook in beheer bij het Federaal Planbureau. De belangrijkste uitvoervariabelen van het model, die aansluiten op de economie zijn de tewerkstelling, het BRP en de productie voor 13 bedrijfstakken op het NUTS1 (gewestelijk) niveau. De regionale projecties worden afgeleid uit de nationale projecties van inkomen, consumptie, etc. van het HERMES model (Bossier, 2004), dat een input-output matrix met een groot aantal (> 500) vergelijkingen gebruikt. De aansturing van het model verloopt via de groeicijfers voor de eindvraag (final demand) (zie ook Figuur 8-2). Voor de inpasbaarheidsanalyse beschouwen we eerst weer de integratie van het thema Economie in het totale systeem (Figuur 8-2). We zien dan dat het systeem voor dit thema redelijk endogeen functioneert, m.a.w. er zijn weinig toestandsvariabelen uit andere thema's die de basisprocessen binnen de economie beïnvloeden (vnl. de beschikbare arbeidspopulatie). De export, EU-beleid en grondstofprijzen (zie Figuur 5-2) zijn wel van belang. Het thema Economie hangt wel met alle andere thema's samen (zie Figuur 8-13). Veel van de in- en uitgaande causale relaties lopen via de hulpvariabele "Economische Activiteit":

- naar Bevolking: invloed Regionaal inkomen op de Uitgaven sociale zekerheid; invloed

Loonindex op Immigratie;

- naar Landbouw en Voeding: invloed Regionaal inkomen op de Voedselconsumptie dierlijk;
  - naar Ruimte: invloed Economische activiteit op Bebouwde ruimte, de Vraag naar ruimte voor Economische activiteit;
  - naar Mobiliteit: invloed Economische activiteit op de Transportvraag vrachtverkeer, de Intensiteit van het wegverkeer; invloed Regionaal inkomen op Intensiteit wegverkeer; invloed Inkomen overheid op Investerings infrastructuur weg/OV;
  - naar Water: invloed Economische activiteit op de Zuiveringsgraad, het Waterverbruik, en het Afvalwaterbeleid;
  - naar Lucht: invloed Economische activiteit op Emissies;
  - naar Energie: invloed Economische activiteit op de Energievraag;
  - naar Materiaalgebruik: invloed Regionale consumptie op de Materiaalvraag van huishoudens;
- 
- vanuit Bevolking: invloed Omvang beroepsbevolking op Arbeidsaanbod; invloed Uitgaven sociale zekerheid op Arbeidsparticipatie;
  - vanuit Energie: invloed Energieprijs op Economische activiteit;
  - vanuit Materiaalgebruik: invloed Materiaalvraag industrie op het Regionaal inkomen;
  - vanuit Mobiliteit: invloed Transportkosten op het BRP; invloed Intensiteit wegverkeer en Rekeningrijden op Inkomen overheid;
  - vanuit Water: invloed Kwaliteit grond- en oppervlaktewater, en Emissies lucht op de Milieukosten;
  - vanuit Lucht: invloed Emissies op de Milieukosten;
  - vanuit Natuur: invloed Milieukosten op Afvalwaterbeleid; invloed Ecosysteemdiensten op de ISEW indicator (zie Sectie 2.1).

De resultaten kunnen geaggregeerd worden tot het niveau van de toestandsvariabelen voor dit thema in het systeemmodel (zie Figuur 8-2) en het model is al ingezet voor beleidsverkenningen zoals de Milieuverkenning 2030. Behalve mogelijk de rekentijd, is het gebruik van een groot aantal gedetailleerde gegevens voor een referentiejaar problematisch voor toepassing in een dynamisch systeemmodel. Voor projecties op middellange tot lange-termijn kunnen wijzigingen in de structuur van de economie verwacht, met name als van verschillende wereldbeelden wordt uitgegaan (bijvoorbeeld verdwijnen zware industrie, aanhoudende economische crisis, etc.). Er bestaan weliswaar ook dynamische input-output modellen, maar de vraag is hoe deze wijzigingen in de coëfficiënten op consistente wijze kunnen worden meegenomen. Het ruimtelijke detail (NUTS1) van het model sluit niet aan op de randvoorwaarden voor ontwerp (zie Sectie 4.2) en vraagt om desaggregatie. Voor de toepassing in het RuimteModel (Engelen et al., 2011b) en het PLANET model (Desmet et al., 2008) werden de macro-economische prognoses, waaronder de tewerkstelling, eerder al gedessaggregeerd tot op het NUTS3 (arrondissements) niveau.

Het model HERMREG ondervangt, afgezien van de milieugerelateerde aspecten, grotendeels de terugkoppelingen en toestandsvariabelen zoals opgenomen in het kwalitatief systeemdiagram (zie Figuur 8-2). De toepassing van het model tot 2030 voor de Milieuverkenning 2030 en zelfs tot 2050 (Engelen et al., 2011a), eerdere koppeling met demografische, en toepassing van resultaten in transport- en ruimtemodellering, gebiedsdekkende inzetbaarheid en beleidsrelevantie zijn enkele sterke punten voor wat de inpasbaarheid in een systeemdynamisch model betreft (Tabel 8-2). In het algemeen scoort het model iets onder het gemiddelde qua inpasbaarheid (zie Tabel 7-1). Wel is het model inzetbaar voor macro-economische middellange-termijn projecties (tot 2020) op het NUTS1 (gewestelijke) niveau. Maar het model is complex; de kern wordt gevormd door een input-output matrix voor de interacties tussen de sectoren die onderscheiden worden, uitgaand van

lineaire verbanden. De geldigheid daarvan voor lange-termijn verkenningen (zeg tot 2050) is niet bewezen. Zo kan de productiviteit van bepaalde sectoren sterk veranderen door innovatie. Onderzocht zal moeten worden of met dit soort mechanismen rekeningen gehouden kan worden door een generieke functie (bijvoorbeeld een tijdsafhankelijke vermenigvuldigingsfactor) toe te passen op de input-output matrix. Verder blijkt dat de invloed van de andere thema's (zie Figuur 8-13) voornamelijk verloopt via het aanbod aan arbeidskrachten, materiaalverbruik, transportkosten en de energieprijzen. Indien deze variabelen impliciet in het model zijn opgenomen is het niet eenvoudig het model te corrigeren om, bijvoorbeeld, tegelijkertijd met stijgende energieprijzen of transportkosten om te gaan.

#### **7.4.4. RUIMTEMODEL VLAANDEREN**

Het RuimteModel Vlaanderen (Engelen et al., 2011a; 2011b) is ruimtelijk-dynamisch, en ondersteunt gebiedsdekkend lange-termijn verkenningen met een ruimtelijk detail van 100x100 m en tijdstap van een jaar. Het model is in de Milieuverkenning 2030 ingezet en maakt al gebruik van de resultaten van andere modellen zoals de demografische en macro-economische prognoses van het Federaal Planbureau. Momenteel wordt het model geïntegreerd met een 4-traps transportmodel (Franckx et al., 2013). De dynamiek van het areaal bebouwde en open ruimte, landbouw en natuur wordt beschreven op basis van 37 landgebruiksklassen. Hiermee wordt aan de belangrijkste ontwerpcriteria voldaan. Beschouwen we de integratie van het thema Ruimtegebruik in het totale systeem (Figuur 8-14) dan verloopt de interactie met de thema's Bevolking, Economie, Landbouw en Voeding, Water, Mobiliteit en Natuur en Milieu als volgt:

- naar Economie: invloed Vraag naar ruimte economische activiteit op Economische activiteit;
- naar Landbouw: invloed Landbouwruimte en Geschiktheid landbouw op Dierlijke en Plantaardige productie;
- naar Natuur: invloed Verwevingsgraad Natuur-Landbouw naar Ontsnippering natuur; invloed Natuurruimte op Terrestrische biodiversiteit; invloed Landbouwruimte en Open ruimte op Ecosysteemdiensten;
- naar Water: invloed Bebouwde ruimte op Runoff;
- naar Mobiliteit: invloed Vraag naar residentiële ruimte op Functiescheiding;
  
- vanuit Bevolking: invloed Aantal huishoudens op Vraag naar residentiële ruimte;
- vanuit Economie: invloed Economische activiteit op Vraag naar ruimte economische activiteit;
- vanuit Natuur: invloed Ecosysteemdiensten op Open Ruimte.

De integratie verloopt dus via de ruimtevraag voor economische activiteiten en bevolking, het areaal bebouwde ruimte, natuur, landbouw en open ruimte. Het RuimteModel houdt daar al rekening mee. De rekentijd van het model (ca. 20 minuten) is wel een beperking voor inpassing in een systeemdynamisch model. Momenteel wordt onderzocht hoe deze kan worden verkleind. Verder gebruikt het RuimteModel een groot aantal parameterinstellingen (bijvoorbeeld voor het dichtheidsmodel en de afstandsfuncties op het lokale niveau), die om een nauwkeurige, scenario specifieke instelling van parameters vragen, bijvoorbeeld om de ruimtelijke patronen voor bebouwd gebied te genereren die passen bij het wereldbeeld Regional Communities (Engelen et al., 2011a). De modelendogeniteit die hiermee gepaard gaat kan een belemmering zijn voor inpassing in een systeemmodel.

Het RuimteModel scoort goed op de meeste inpasbaarheidscriteria (Tabel 8-3). Aandachtspunten zijn vooral het gebruik van endogene modelparameters, die bepaalde terugkoppelingen op het systeemniveau vervangen, en de gebruiksvriendelijkheid voor eindgebruikers. Voordeel is wel dat het model in eigen beheer ontwikkeld is en eerder ingezet werd voor eerdere toekomstverkenningen zoals de toepassing van de WLO wereldbeelden op Vlaanderen (Engelen et al., 2011a). Beperking van de rekentijd tot enkele minuten is wenselijk (hieraan wordt momenteel gewerkt). Het macroniveau van de huidige versie van het RuimteModel (Engelen et al., 2011b) gebruikt de projecties van het Federaal Planbureau voor de bevolkingsomvang en de sectorale tewerkstelling. Het zou een kleine aanpassing zijn om de vraag naar residentiële ruimte te koppelen aan het aantal huishoudens i.p.v. de bevolkingsomvang. Een grotere software-technische aanpassing is nodig om het model jaarlijks te onderbreken om gegevens uit te wisselen met de ander modellen (met name voor de thema's Demografie, Economie, Mobiliteit en Natuur). Dit verschilt wezenlijk van het doorrekenen van vooraf aangeleverde tijdreeksen voor bijvoorbeeld de tewerkstelling of oppervlakte beheerde natuur. De tot nu toe opgedane ervaring met de integratie met een transportmodel (Franckx et al., 2013) leert dat hiervoor wel oplossingen te vinden zijn. De rekentijd, die voor meer modellen een belemmerende factor vormt, kan verder gereduceerd worden door technische verbeteringen. De endogeniteit van het RuimteModel vraagt om nogal wat inspanning bij de koppeling met andere modellen, maar de ervaring met bijvoorbeeld de koppeling het transportmodel is nuttig en toont aan dat zich hierbij geen wezenlijke problemen voor doen omdat het grootste deel van de gebruikte parameters een fysische betekenis hebben en vertaald kunnen worden naar parameters die in andere modellen gebruikt worden.

#### 7.4.5. ATLAS-TRANSPORT

In het verkeersmodel dat momenteel geïntegreerd wordt met het RuimteModel Vlaanderen (zie Sectie 6.2.6) kan rekening houden met exogene factoren (subsidies, EU en Vlaamse regelgeving etc.), evenals veranderingen in het wagenpark. De berekende indicatoren omvatten onder meer de intensiteit van het wegverkeer en de emissies van broeikasgassen. Aan een aantal belangrijke ontwerpcriteria wordt voldaan, wel is het model geen echt procesmodel, een toekomstige toestand wordt berekend. De ruimtelijke differentiatie is in (7000) verkeerszones en het fijnmazig wegennet. Beide modelkenmerken beïnvloeden de rekentijd (momenteel ca. 6 uur voor het doorrekenen van één jaar) in hoge mate. Beschouwen we de inbedding van het thema Mobiliteit in het systeem (Figuur 8-15) dan zijn de relaties met de andere thema's de volgende:

- naar Economie: invloed Rekeningrijden en Intensiteit wegverkeer op Inkomen overheid; invloed Transportkosten op BRP;
- naar Energie: invloed Intensiteit wegverkeer op Energievraag;
- naar Lucht: invloed Intensiteit op Emissies;
  
- vanuit Bevolking: invloed Aantal huishoudens op Omvang woon-werkverkeer en Transportvraag personenverkeer;
- vanuit Economie: invloed Inkomen overheid op Investerings Infrastructuur OV en Weg; invloed Economische activiteit op Intensiteit wegverkeer en Transportvraag vrachtverkeer;
- vanuit Energie: invloed Energieprijs op Transportkosten.

De integratie verloopt dus met name via de toestandsvariabelen Transportvraag personen- en vrachtverkeer, Intensiteit wegverkeer en Woon-werkverkeer. Voor het personenverkeer beschrijft het model deze variabelen, voor vrachtverkeer (nog) niet. Het model dekt ook een groot deel van de systeemrelaties af binnen het thema Mobiliteit. De omvang en gedetailleerdheid van het transportnetwerk in het model heeft dus wel een lange rekentijd (enkele uren per simulatiejaar)

tot gevolg. Bovendien is het model software-technisch complex, met toepassing van drie programmeertalen en zware belasting van het werkgeheugen. Het model is wel in eigen beheer. Momenteel wordt gewerkt aan een verbeterde software-implementatie van het model om aan de gestelde problemen te verhelpen. Bovendien staat een ATLAS-Light in de steigers, dat beter inpasbaar is in het systeemmodel.

Voor de transportmodule van het ATLAS model (zie Franckx et al., 2013) vormt de rekentijd zeker een probleem (zie Tabel 8-10). Een "Light" versie van het model, waarin met een sterk gereduceerd aantal verkeerszones en een vereenvoudigd transportnetwerk gerekend zou worden, zou wellicht voor een deel aan dit probleem tegemoet kunnen komen. Een ander aandachtspunt is de afhankelijkheid van gedetailleerde gegevens voor een referentiejaar (2008), die met veel inspanning verzameld zijn. De vraag is in hoeverre de oorsprong-bestemmingsmatrix voor de toewijzing van transport aan verkeerszones bruikbaar is tot 2050. Mocht zich hier een probleem voordoen, dan kan deze matrix wellicht door een projectiemodel aangepast worden (bijvoorbeeld op basis van de bevolkingsdichtheid en/of groei in economische productie per verkeerszone). Software-technisch blijft de integratie met andere modellen een uitdaging. Twee uitbreidingen die voor inpassing noodzakelijk zijn betreffen de invloed van functiescheiding op de omvang van het woon-werkverkeer en de bijdrage van het vracht- en transitverkeer aan het totale weggebruik. Met beleidsrelevante factoren zoals rekeningrijden, veranderingen in het wagenpark, congestie e.d. kan het model al rekening houden. Op robuustheid, validatie en (inzicht in) modelonzekerheden scoort het model ook matig, omdat het nog in ontwikkeling is. Naar verwachting kan een goed geteste "Light" versie van het model, waarmee ook gemakkelijker onzekerheidsanalyses kunnen worden uitgevoerd, hiervoor deels een oplossing bieden.

#### **7.4.6. LARCH**

Het LARCH model (Pouwels et al., 2002; Adriaens et al., 2007) kan worden gebruikt om de relatie tussen landschapskwaliteit en de biodiversiteit van diersoorten te onderzoeken. Daarbij wordt rekening gehouden met de connectiviteit van ecologische netwerken. Hiermee kan ook rekening gehouden worden met de gevolgen van versnippering. De soorten worden niet op individueel niveau, maar door representatieve ecotypen beschreven. Binnen het domein Natuur en Milieu (Figuur 8-9) staan de terrestrische en aquatische biodiversiteit centraal. De integratie met de andere thema's verloopt via de volgende relaties (Figuur 8-16):

- naar Bevolking: invloed Ecosysteemdiensten op Welzijn en Gezondheid;
- naar Economie: invloed Ecosysteemdiensten op ISEW indicator;
- vanuit Ruimtegebruik: invloed Open Ruimte, Natuurruimte en Landbouwruimte op Ecosysteemdiensten; invloed Verwevingsgraad Natuur-Landbouw op Ontsnippering Natuur; invloed Natuurruimte op Terrestrische biodiversiteit;
- vanuit Landbouw: invloed Schaalgrootte op Terrestrische biodiversiteit;
- vanuit Water: invloed Kwaliteit oppervlaktewater op Aquatische biodiversiteit;
- vanuit Lucht: invloed Atmosferische depositie op Bodemverzuring en vermisting.

Vanuit het thema Mobiliteit wordt geen invloed uitgeoefend, hoewel mobiliteitsinfrastructuur sterk versnipperend werkt (samen met bebouwing). Dat komt omdat de toestandsvariabele "Infrastructuur" voor het thema Mobiliteit (zie ook Figuur 8-7) in eerste instantie in de context van de kwaliteit van de infrastructuur (ter ondersteuning van transport) is opgevat. Uiteraard zou deze terugkoppeling nog toegevoegd kunnen worden.

Het model dekt een kleiner deel van het thema Natuur en Milieu af, de invloed van bodemverzuring, verdroging, invasieve soorten e.d. moet met andere modellen worden beschreven, voor zover deze beschikbaar zijn. Met het LARCH model kan wel, op geaggregeerde wijze, de positieve invloed van ontsnippering op de terrestrische biodiversiteit worden beschreven, zoals in de Natuurverkenning 2030 (Dumortier et al., 2009) gebeurd is. Het model is gebiedsdekkend inzetbaar, ruimtelijk en reeds eerder geïntegreerd met de landgebruiksmodellering op basis van het RuimteModel. Hiermee werd onderzocht welke effecten veranderingen in landgebruik op de biodiversiteit in 2030 hadden. Met milieukwaliteit e.d. werd geen rekening gehouden. De architectuur op basis van componenten die aan de toepassing kunnen worden aangepast is flexibel, maar de aansturing via een scripting taal leent zich wellicht minder voor inpassing in een systeemdynamisch model. Het model leent zich niet voor toepassing op aquatische biodiversiteit en houdt (nog) geen rekening met bijvoorbeeld de invloed van waterkwaliteit. Door deze beperkingen en het software architectuur scoort dit model minder goed. De inpasbaarheidsscore van het biodiversiteitsmodel LARCH blijkt de laagste van de onderzochte modellen. Hierbij moet gesteld worden dat een aantal (5) criteria niet ingevuld konden worden, waardoor dit model de hoogste relatieve onzekerheid in de inpasbaarheidsscore kent. LARCH is een evenwichtsmodel dat sterk afhankelijk is van een uitgebreide gegevensbank, en slechts een deel van het thema Natuur en Milieu afdekt (de aquatische biodiversiteit wordt buiten beschouwing gelaten). Toch heeft het model al zijn nut bewezen; het is ingezet binnen de Natuurverkenning 2030 (Dumortier, 2009) om de gevolgen van veranderingen in het landgebruik (bepaald met het RuimteModel) op de biodiversiteit door te rekenen. De beleidsrelevantie is hoog en het model is gebiedsdekkend inzetbaar. Bovendien zijn biodiversiteitsmodellen schaars. Op zich genomen is het model al een vereenvoudiging van de werkelijkheid: de invloed van landschapsfragmentatie wordt doorgerekend voor een aantal biotopen en ecotypen, in plaats van individuele soorten. Uitbreiding tot de aquatische biodiversiteit en invloed van processen zoals verdroging en verzuring zijn wenselijk. In tweede instantie zouden aanpassingen aan het model zich kunnen richten op de ontwikkeling van een afgeleide, technisch vereenvoudigde versie van het model waarvan de modelrelaties zijn ingesteld op basis van het oorspronkelijke LARCH model (dus zonder de gebruikersinterface). Hiermee zouden de scores op inpasbaarheidscriteria zoals Afdekking thema's en Gebruiksvriendelijkheid verbeterd kunnen worden met behoud van de functionaliteit, maar voor de Modelendogeniteit biedt dit geen oplossing.

#### **7.4.7. BELEUROS**

Het luchtkwaliteitsmodel BELEUROS is een breder inzetbaar model dat reeds is ingezet voor de modellering van fijn stof en ozon, en in gebiedsdekkende beleidsverkenningen zoals voor de Milieuverkenning 2030. De gebruikte emissiegegevens worden door de E-Map (Maes et al., 2009) voorbereid in het juiste formaat. Dit betekent dat emissies die vanuit een andere model zouden worden berekend ook in dit formaat moeten worden aangeleverd. De standaardresolutie van het model is 60x60km, na gridverfijning kan met 15x15 km gerekend worden. Via de bevolkingsdichtheid kan de NO<sub>2</sub> concentratie verfijnd worden tot 5x5 km. Daarmee is het ruimtelijk detail een stuk lager dan dat voor VLOPS (1x1 km). BELEUROS is een procesmodel dat rekent met een tijdstap van uren en heeft een betere performantie. Wel is de rekentijd langer dan voor VLOPS, dat met een tijdstap van 1 jaar en statistische benadering werkt. Beschouwen we de integratie van het thema Lucht in het totale systeem, welke verloopt via de volgende relaties (Figuur 8-17):

- naar Bevolking: invloed Ozon en concentraties overige stoffen op Welzijn en Gezondheid;
- naar Economie: invloed Concentraties op Milieukosten;
- naar Natuur en Milieu: invloed Atmosferische depositie op Bodemverzuring en vermesting;

- naar Water: invloed Atmosferische depositie op Emissies diffuse bronnen;
- vanuit Bevolking: invloed Aantal huishoudens op Emissies Lucht;
- vanuit Economie: invloed Economische activiteit op emissies;
- vanuit Landbouw: bijdrage Emissies landbouw aan Emissies Lucht;
- vanuit Mobiliteit: invloed Samenstelling wagenpark en Intensiteit wegverkeer op Emissies;
- vanuit Klimaat: invloed Temperatuur en Zonnestraling op Ozon.

De belangrijkste koppelvariabelen zijn dus de concentraties van ozon en andere pollutanten, met inbegrip van fijn stof, en de atmosferische depositie. Deze kunnen allen met BELEUROS beschreven worden. De modelperformantie is goed, en het model is in eigen beheer. Wat de inpassing in een systeemdynamisch model nog in de weg staat is de noodzakelijke voorbewerking van emissiegegevens, het beperkte ruimtelijk detail (max. 5 km) en vooral ook de rekentijd. Ook gebruiksvriendelijkheid scoort laag en hangt samen met de focus op het procesmatige van het model.

Het luchtkwaliteitsmodel BELEUROS is gebiedsdekkend, gevalideerd, en scoort goed op de performantie (zie ook Tabel 8-13). Alle voor integratie met de andere thema's belangrijke variabelen worden beschreven (zie ook Figuur 8-17). Zowel fijn stof als ozon concentraties kunnen worden gemodelleerd, welke beide van invloed zijn op de toestandsvariabele Welzijn en Gezondheid (zie Figuur 8-10). Aandachtspunten zijn de lange rekentijd (in de orde van uren voor de gemodelleerde periode) en het beperkte ruimtelijke detail (7x7 km). Voor dit laatste probleem zou een combinatie van 2D-interpolatie en dassymetrische kartering gedeeltelijk een oplossing kunnen bieden. De rekentijd van dit type luchtkwaliteitsmodellen is een algemeen onderkend probleem, dat het gevolg is van de complexiteit van de stromingsberekeningen waarin weerkundige en fysische processen dienen te worden doorgerekend. Een mogelijk oplossing, die reeds buiten het kader van deze studie wordt onderzocht, is metamodellering (zie ook Sectie 7.3). Dit beperkt wel de flexibiliteit van het model, d.w.z. de toegang tot essentiële modelparameters die het modelgedrag beïnvloeden (bijvoorbeeld de congestiefunctie in een transportmodel) en verhoogt de mate van modelendogeniteit. De gebruiksvriendelijkheid verbetert wel, en onzekerheidsanalyses kunnen door beperking van de rekentijd praktisch uitvoerbaar worden. Ook de koppeling met andere modellen kan eenvoudiger worden door de beperking van de empirische relaties tot enkele relevante in- en uitgangsvariabelen van het modellen.

#### **7.4.8. SYSTEEMDYNAMISCH MODEL HUISHOUELIJK AFVAL**

Het systeemdynamische model van Inghels en Dullaert (Inghels en Dullaert, 2010) beschrijft de dynamiek van het huishoudelijk afvalbeheer tot 2016 met een jaarlijkse tijdstap, gebruik makend van referentiegegevens voor de periode 1991-2006 en literatuuronderzoek. Belangrijke toestandsvariabelen zijn de bevolkingsomvang, het BRP, en productie, scheiding en hergebruik van huishoudelijk afval. Het model is gevalideerd en gedocumenteerd, en gaat uit van ca. 80 variabelen en afgeleide parameters en enkele tientallen vergelijkingen.

De rekentijd is voor dit type van model in het algemeen geen beperkende factor, bovendien laten de transparantie van het model en toepassing van eenvoudige differentiaalvergelijkingen toe dat het model met relatief weinig inspanning kan worden omgezet naar een andere modelleeromgeving indien nodig. De modelontwikkelaars beschouwen het model als generiek, en toepasbaar op andere regio's. Hoewel het model op het Vlaamse Gewest is toegepast is het niet ruimtelijk gedifferentieerd, daarvoor is een of andere vorm van ruimtelijke desaggregatie noodzakelijk. Het probleem daarbij is dat sommige modelparameters ook gedifferentieerd zouden

moeten worden (bijvoorbeeld tot op NUTS3 niveau) om aan te sluiten bij de toestandsvariabelen voor de andere thema's (bijvoorbeeld het aantal huishoudens). Thematisch past het model het beste binnen het thema Materiaalgebruik en het daarbijhorende systeemdiagram (zie Figuur 8-18), waarin ook de afvalproductie als toestandsvariabele is opgenomen maar tevens rekening gehouden wordt met het materiaalverbruik door huishoudens en recyclage van afval. Op systeemniveau is er alleen integratie met het thema Economie via de volgende vijf causale relaties:

- naar Economie: invloed *Materiaalverbruik* huishoudens (en industrie) naar Regionaal inkomen; invloed Afvalproductie op ISEW indicator waarde;
- vanuit Economie: invloed Regionaal inkomen op *Materiaalvraag* huishoudens; invloed Economische activiteit op *Materiaalvraag* industrie.

Het materiaalgebruik door huishoudens en daarmee de afvalproductie wordt in het systeemdiagram van Figuur 8-18 dus afgeleid van het totale regionaal inkomen, en niet zozeer de bevolkingsomvang, zoals in het systeemmodel van Inghels en Dullaert. Met het model kan de afvalproductie door huishoudens worden berekend, maar niet die door de industrie. Het detailniveau van het model komt wel min of meer overeen met dat van het systeemmodel met toestandsvariabelen zoals de recyclage en de afvalproductie. Wel wordt de bevolkingsomvang i.p.v. het aantal huishoudens als toestandsvariabele gebruikt. Conceptueel zou de inpassing geen probleem moeten geven. Het gebruik van historische gegevens en de beperkte tijdhorizon (2016), roepen wel de vraag op in hoeverre het model inzetbaar is voor lange-termijn prognoses tot, bijvoorbeeld, 2050.

Het systeemdynamische model voor huishoudelijk afval in Vlaanderen (Inghels en Dullaert, 2010) heeft een goede inpasbaarheidsscore in vergelijking met de meeste andere onderzochte modellen. Het detailniveau, de selectie van toestandsvariabelen en terugkoppelingen sluiten grotendeels aan bij dat van het systeemdiagram uit Figuur 5-4, de rekentijd is beperkt en het model goed gedocumenteerd. Het model zou ook snel kunnen worden geïmplementeerd in een andere modelleringsomgeving indien nodig. Toch zijn er enkele aandachtspunten: het model is niet ruimtelijk gedifferentieerd, gaat uit van de bevolkingsomvang i.p.v. het aantal huishoudens, en maakt gebruik van een groot aantal referentiegegevens welke met veel inspanning verzameld zijn. Om het laatste punt toe te lichten: de simulatieperiode van het model loopt van 2006 tot 2016, terwijl het model is ingesteld op gegevens voor de periode 1991-2006. Extrapolatie tot 2050 vraagt om een nauwkeurige herziening van de gemaakte aannames en parameterinstellingen. Voor een lange-termijn verkenning en inpassing in een systeemdynamisch model zullen sommige parameterwaarden dynamisch gemaakt moeten worden en afhankelijk gesteld van de invoer vanuit andere modellen. Een voorbeeld is de toename ratio van afvalhergebruik, deze zou technologie afhankelijk kunnen zijn, en bovendien kunnen verminderen bij het bereiken van een zeker maximum. Binnen deze studie werd de productie van huishoudelijk afval eerder als functie van het aantal huishoudens dan de bevolkingsomvang gezien. Op dit punt is het model met relatief weinig inspanning aan te passen. Verder beperkt het model zich tot de rol van huishoudelijk afval, het gebruik van materialen door de industrie (zie ook Figuur 8-4) blijft buiten beschouwing. Aanpassing van het model voor industrieel afval en hergebruik van materialen zou wenselijk zijn, maar om aanvullende gegevens vragen. Een breder inzetbaar model zou dan een alternatief kunnen zijn.



## HOOFDSTUK 8. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

---

De resultaten van de kwalitatieve systeembeschrijving vormen samen met de ontwerpcriteria (tijdhorizon, ruimtelijk detail en tijdstap afgestemd op toekomstverkenning doel, consistentie op systeemniveau, beperking rekentijd en nadruk op terugkoppelingen in plaats van detail) de randvoorwaarden voor een systeemdynamische modellering rond duurzaamheid en uitgangspunt voor de toetsing van inpasbaarheid van thematische modellen.

Een systeemdynamisch model is een abstractie van het systeem op hoofdlijnen. De consequentie daarvan is dat de uitkomsten van de in te passen rekenmodellen toepasbaar moeten zijn op een (middel)lange termijn, met een zekere mate van aggregeerbaarheid in termen van detail, ruimte en tijd indien nodig. De beleidsrelevante indicatoren die door het systeemmodel beschreven worden zullen in eerste instantie gericht zijn op de transparantie voor beleidsmakers en het toetsen van de robuustheid van beleidskeuzes onder uiteenlopende sociaal-maatschappelijke, klimatologische, en economische condities. Met de kwalitatieve beschrijving van het “Systeem Vlaanderen” die nu beschikbaar is, is vastgelegd welke de koppelvariabelen tussen de modellen zouden moeten worden uitgewisseld. Systeemdiagrammen (zie Bijlage C) waarmee de terugkoppelingen tussen de toestands-, stuur- en exogene invloedsvariabelen enerzijds en de beleidsindicatoren anderzijds kwalitatief zijn weergegeven kunnen worden ingezet om de consistentie van toekomstverkenningen te verbeteren. Met het ontwerp van kwalitatieve systeemdiagrammen voor milieutoepassingen is eerder ook ervaring opgedaan binnen 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. Vanuit verschillende thema’s en gezichtspunten is getracht de werking van deelsystemen en het totale systeem op zo’n wijze te abstraheren dat het resultaat kon worden gebruikt om de inpasbaarheid van bestaande thematische modellen binnen een toekomstverkenning in de geest van het 4-stappenplan te toetsen. De gerealiseerde systeemdiagrammen kunnen dus niet als eindproduct, zijnde hét systeemdiagram ‘Vlaanderen’, gezien worden. Anderzijds bestaat het perfecte systeemdiagram niet en is het 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 thematische modellen te kunnen vergelijken op inpasbaarheid, 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, ...). De auteurs zijn er zich van bewust dat de transparantie van de diagrammen nog verbeterd kan worden door variabelen te combineren en na te gaan of het detailniveau doorheen het gehele diagram vergelijkbaar is (interne consistentie). Te gedetailleerde variabelen die nu in de diagrammen zijn opgenomen (zoals rekeningrijden e.d.) kunnen wellicht gegroepeerd worden tot variabelen die in algemene zin naar beleidsinterventie en –sturing verwijzen.

Met een systeemdynamische analyse op hoofdlijnen kunnen de verhaallijnen uit een kwalitatieve systeemanalyse zoals bedoeld in het 4-stappen plan (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 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 zijn op de structuur van het systeem. Bij het ontwerp van het systeemmodel zal dus rekening gehouden moeten worden met dit soort verschijnselen door bepaalde transitievariabelen in het diagram op te nemen. Is dat niet het geval 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 correct moeten worden beschreven.

Met de procedure die in deze studie is ontwikkeld kunnen thematische en sectorale modellen snel geanalyseerd en vergeleken worden op de inpasbaarheid in een systeemmodel waarbij de sterke en zwakke kenmerken duidelijk worden. Bij de toetsing op inpasbaarheid is in de eerste plaats aandacht besteed aan de wijze waarop modellen in staat zijn om via een systeemdynamisch model gegevens uit te wisselen en te gebruiken. Modellen onderscheiden zich sterk door het gebruik van gegevens, de manier waarop met temporeel en ruimtelijk detail wordt omgegaan, en de gebruikte methodologie. Ook kunnen modellen zich onderscheiden in de mate waarin gebruik gemaakt wordt van referentiegegevens die betrekking hebben op een bepaald tijdvak of impliciet gebruik maken van veronderstellingen over de werking van het systeem die in tegenspraak zouden kunnen zijn met procesbeschrijvingen van andere modellen waarmee gecommuniceerd wordt. Dit soort kenmerken kunnen ook van invloed zijn op de inpasbaarheid en doelmatigheid voor inzet in een toekomstverkenning zoals bedoeld in het 4-stappen plan. Op basis van de workshop met de technische begeleidingsgroep (zie HOOFDSTUK 5) en resultaten van de inpasbaarheidsanalyse uit HOOFDSTUK 7 kunnen enkele kanttekeningen geplaatst worden bij de inpassing van thematische modellen :

- a. De afbakening tussen het systeemmodel en de voor thematische verdieping gebruikte modellen is belangrijk. Het systeemmodel dient niet de rekenmodellen volledig te vervangen of andersom. Een voorbeeld vormt de luchtkwaliteitsmodellering. Bij het ontwerp van het systeemdiagram voor het thema lucht zijn in eerste instantie alle belangrijke processen en variabelen in beschouwing genomen, mede na suggesties van modelexperts. De rol van het luchtkwaliteitsmodel is dat vanuit de emissies de concentraties en depositie berekend wordt, terwijl het systeemmodel variabelen doorgeeft tussen de rekenmodellen en zo als raamwerk voor modelintegratie te dient.
- b. Ruimtelijke differentiatie van sommige modellen en dus het systeemmodel valt niet te omzeilen als het gaat om duurzaamheid (denk aan waterkwaliteit, overstromingsrisico, ruimtegebruik); meer gedetailleerde terugvoer naar het niveau van het systeemdynamische model kan bijvoorbeeld via dasyymetrische kartering. Dat is te vermijden omdat er in elke tijdstap informatie verloren gaat.
- c. De rekentijd van sommige thematische modellen kan een struikelblok zijn, maar is eventueel te omzeilen via metamodellering. Dit vermindert wel de transparantie van het model en beperkt de mogelijkheid om modelparameters aan te sturen vanuit andere modellen.
- d. Beleidsindicatoren (zie Sectie 2.1 voor een definitie in het kader van deze studie) dienen bij voorkeur zinvol te zijn en meer geaggregeerd dan modeltechnische indicatoren, die vooral zinvol zijn voor wetenschappers. Een overmaat aan indicatoren en toestandsvariabelen

bemoeilijkt het bepalen van de terugkoppelingen en de leesbaarheid van de systeemdiagrammen. Een zekere mate van abstractie richting beleidsmakers is dus gewenst. Hiermee dient bij de selectie en inpassing van thematische modellen rekening gehouden te worden.

De resultaten van de inpasbaarheidsanalyse laten zien dat typische procesmodellen zoals het demografisch model van het FPB, het RuimteModel en het BELEUROS luchtkwaliteitsmodel gemiddeld beter inpasbaar zijn dan evenwichtsmodellen zoals het macro-economisch model energiemodel TIMES. Hoewel de thema's sterk verschillen staat de methodologie toch toe om een 1-op-1 vergelijking te maken voor de inpasbaarheid van bijvoorbeeld de modellen TIMES en BELEUROS. De hogere score van het model BELEUROS valt dan terug te voeren op inpasbaarheidscriteria zoals de toegelaten tijdhorizon (de geldigheidsduur van de gebruikte parameters), de modelendogeniteit (de mate waarin binnen het model gebruikte parameterinstellingen en aannames zijn aan te sturen door andere modellen) en de modelcontrole (de mogelijkheid het model te onderbreken). Het ecologisch model LARCH komt matig uit de inpasbaarheidsanalyse, onder meer ten gevolge van het specifieke karakter van het model en de beperkte gebruiksvriendelijkheid, performantie van het model en modelcontrole.

In het algemeen blijkt de gevolgde procedure om de modellen op inpasbaarheid te vergelijken in hoge mate robuust te zijn voor beperkte wijzigingen in de scores op de criteria en weging. Voor de toetsing en vergelijking van modellen op inpasbaarheid zijn de typische kenmerken van systeemdynamische modellen vertaald in ontwerpcriteria, die in een multi-criteria analyse zijn gecombineerd. De keuze van generieke criteria en gewichten, en toekenning van scores per model zijn tot op zekere hoogte een subjectieve kwestie. De criteria zijn binnen het studieteam besproken en heroverwogen indien de transparantie, eenduidigheid of relevantie daarom vroegen. Ook bleken de criteria na enige toelichting zonder problemen te interpreteren zijn door modelexperts. Zoals de variatie in de gewichten voor de toetsingsprocedure laat zien (zie Tabel 7-1) zijn niet alle criteria even belangrijk voor het inschatten van de inpasbaarheid van een model en de mogelijke problemen die zich daarbij voor kunnen doen. De aandacht zou vooral uit moeten gaan naar de mate waarin een model afhankelijk is van omvangrijke gegevensbanken met een beperkte geldigheidsduur, gebruik maakt van een groot aantal interne modelparameters en aannames die in conflict zouden kunnen zijn met de beschrijving van het systeem op het hoogste niveau, en de operationele inzetbaarheid. Zoals bij het vergelijken van de modellen naar voren kwam kan ook de rekentijd een beperkende factor zijn, maar dit aspect is van minder wezenlijk belang, vaak reeds onderkend door de modelontwikkelaars, en gedeeltelijk technisch te omzeilen. De gevoeligheid van de resultaten voor de keuze van gewichten werd onderzocht door de standaard gewichten set uit Tabel 7-1 te vervangen door gewichten die beter pasten bij een directe, "operationele" inzetbaarheid van modellen. Voor sommige combinaties van modellen en criteria bleek de informatie voor het toekennen van een score te ontbreken. Het effect daarvan op de onzekerheid in de totaalscores werd onderzocht door voor deze model-criteria combinaties een minimale en maximale score toe te kennen en daaruit een onzekerheidsmarge te bepalen. In het algemeen moet benadrukt worden dat de toetsingsprocedure een kwalitatief karakter heeft. Om deze reden is ook met een beperkt aantal scoringswaarden (0-2) gewerkt. Met de implementatie in MsExcel® is een flexibel instrument beschikbaar om nieuwe of andere modellen te toetsen en onderling te vergelijken, de gewichten anders in te stellen of criteria aan te passen indien dit zinvol geacht wordt. Het paarsgewijs vergelijken van modellen is vooral zinvol binnen één thema, bijvoorbeeld om de inpasbaarheid van verschillende water- of luchtkwaliteitsmodellen te vergelijken. De basisprincipes van de hier ontwikkelde procedure laten nog ruimte voor eventuele aanpassingen. Mogelijke toekomstige verbeteringen omvatten het toekennen van scores in het bereik 0-5 en het betrekken van modelontwikkelaars of liever nog modelgebruikers bij het bepalen van de scores, eventueel tijdens workshops of via 'crowdsourcing'.

Ter ondersteuning van de Milieuverkenning 2030 en Natuurverkenning 2030 zijn thematische en sectorale modellen ingezet om de relevante thema's zoals bevolkingsgroei, ruimtegebruik, energiegebruik en natuurontwikkeling voor verschillende wereldbeelden door te rekenen. Hierbij was sprake van een zwakke koppeling van de verschillende modelinstrumenten onderling. Dit houdt bijvoorbeeld in dat eerst het landgebruik wordt doorgerekend voor de gehele simulatieperiode, waarna vervolgens de effecten voor natuurontwikkeling berekend worden zonder dat rekening gehouden wordt met de tussentijdse gevolgen voor het ruimtegebruik. Systeemdynamische modellering biedt een raamwerk waarmee de consistentie van de scenario's verzekerd is zodat de analyse daarvan gebaseerd is op een uniform denkkader (zie ook Figuur 1-1 en Figuur 5-2). Om in systeemdynamische termen te spreken: de wereldbeelden verschillen in de parameterinstellingen en ontwikkeling van de sturende en exogene variabelen, terwijl met dezelfde toestandsvariabelen en terugkoppelingen wordt gerekend. Hoewel de diepgang van het systeemdynamische model beperkt kan zijn, is dat niet vanzelfsprekend voor de complexiteit van de terugkoppelingen, zoals het grote aantal terugkoppelingen in het systeemdiagram van Figuur 5-4 laat zien. Het systeemdynamische model maakt een verbeterde en meer directe uitwisseling van resultaten en gegevens tussen de modellen mogelijk, waarmee de consistentie van de prognoses toeneemt. De kwalitatieve systeembeschrijving en resultaten van de inpasbaarheidsanalyses van de geselecteerde rekenmodellen vormen samen een goed uitgangspunt voor thematische integratie. Omwille van de transparantie en consistentie zouden alle toestandsvariabelen en terugkoppelingen uit de systeemdiagrammen nog eens kunnen worden heroverwogen. De volgende stap zou er uit kunnen bestaan een systeemdynamisch model op hoofdlijnen te ontwikkelen, voorafgegaan door een meer gedetailleerde analyse van de modelspecifieke problemen met de betrekking tot de inpassing en mogelijke oplossingen zoals al aangedragen voor de modellen uit de shortlist (demografisch model FPB, HERMREG, ATLAS-Transport, LARCH, BELEUROS, het RuimteModel Vlaanderen, en het systeemdynamische model voor afvalbeheer). Dit is een iteratief proces waarbij de combinatie van modellen ook in samenhang bekeken moet worden. De koppelvariabelen uit Figuur 8-12 tot Figuur 8-18 kunnen als leidraad dienen bij de integratie tussen de thema's. Verder zouden technieken zoals Fuzzy Cognitive Maps (Kosko, 1986; Özesmi en Özesmi, 2004) nuttig kunnen zijn als tussentijdse opstap naar een echt systeemdynamisch model en om de gevoeligheid voor aanpassingen in de systeemstructuur te onderzoeken. Indien bij de toekomstverkenning de nadruk op één bepaald thema ligt, zoals bijvoorbeeld Energie of Landbouw, kan hiermee bij het instellen van de gewichten voor de inpasbaarheidstoetsing rekening gehouden worden. Het systeemdynamische model wordt dan vooral ingezet om de invloedsfactoren op het thema te analyseren, zonder dat alle terugkoppelingen naar de andere thema's hoeven te worden meegenomen. Een dergelijke monothematische toekomstverkenning ligt in eerste instantie meer voor de hand.

## LITERATUURLIJST

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

Adriaens T, Peymen J en Decler K. Natuurverbindingsgebieden in Vlaanderen: achtergronden, afbakening en mogelijke inrichting. Instituut voor Natuur en Bos Onderzoek. INBO. R.2007.14, 2007.

Andrews R and Lennox J. New Zealand Dynamic Economic-Ecological Model (NZDEEM). Programmed in MatLab, 2006.

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

Armstrong HW and Taylor J. Regional Economics and Policy. Macmillan, 2000.

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.

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

Bassilière D, Bossier F, Caruso F, Hendickx K, Hoorelbeke D en Lohest O. Uitwerking van een regionaal projectiemodel. Een eerste toepassing van het HERMREG model op de nationale economische vooruitzichten 2007-2012. Federaal Planbureau, Brussels Instituut voor Statistiek en Analyse, Studiedienst van de Vlaamse Regering en Institut Wallon de l'Evaluation, de la Prospective et de la Statistique. Januari 2008.

Benoot W et al. Treating uncertainty and risk in energy systems with MARKAL/TIMES, Eindrapport Belgisch Federal Wetenschapsbeleid 2011, 2011.

Bossier F, Bracke I, Gillis S en Vanhorebeek F. Een nieuwe versie van het HERMES model. Working paper 5-04. Federaal Planbureau. Februari, 2004.

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.

Cellier, FR 2008. World3 in Modelica: Creating System Dynamics Models in the Modelica Framework. ETH Zürich, March, 2008.

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

Couder J en Verbruggen A. Uitbreiding van de Tool SAVER-LEAP voor scenario analyses voor de huishoudens. Studie uitgevoerd in opdracht van MIRA. Milieurapport Vlaanderen. Faculteit TEW, departement MTT, onderzoeksgroep Studiecentrum Technologie, Energie en Milieu. Universiteit Antwerpen. MIRA/2008/001, 2008.

Couder J, Verbruggen A en Maene S. Huishoudens en handel & diensten. Wetenschappelijk rapport, MIRA, VMM, 2009. [www.milieurapport.be](http://www.milieurapport.be).

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

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

De Kok JL, Poelmans L, Engelen G, Uljee I and Van Esch L. Spatial-dynamic visualization of long-term scenarios for demographic, social-economic and environmental change in Flanders. In: R. Seppelt, A.A. Voinov, S. Lange, D. Bankamp (Eds.) (2012): International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs) 2012 International Congress on Environmental Modelling and Software Managing Resources of a Limited Planet: Pathways and Visions under Uncertainty, Sixth Biennial Meeting, Leipzig, Germany, page 1984-1991. <http://www.iemss.org/society/index.php/iemss-2012-proceedings>.

De Kok JL, Titus M and Wind HG. Application of fuzzy sets and cognitive maps to incorporate social science scenarios in integrated assessment models, A case study of urbanization in Ujung Pandang, Indonesia, *Integrated Assessment* 1(3), 177-188, Baltzer Science Publishers, 2000.

De Kok JL, Engelen G, White R and Wind HG. Modeling land-use change in a decision-support system for coastal-zone management, *Environmental Modelling & Assessment* 6: 123-132, 2001.

De Kok JL and Wind HG. Designing rapid assessment models of water systems based on internal consistency, *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 128(4), 240-247, 2002.

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 and Grossmann M. Large-scale assessment of flood risk and the effects of mitigation measures along the Elbe River, *Natural Hazards* 52(1), 143-166, 2010.

De Kok JL, Poelmans L, Uljee I en Engelen G. Landgebruiksveranderingen voor de kostenraming van overstromingen. Eindrapport. Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek. Ref 2011/RMA/R/269. September, 2011.

De Kok JL, Engelen G and Maes J. Towards model component reuse for the design of simulation models – a case study for ICZM, Proc. 5th Biennial Meeting: International Congress on Environmental Modelling and Software. Swayne DA, Wanhong Yang W, Voinov AA, Rizzoli A and Filatova T. (Eds.) International Environmental Modelling and Software Society, Ottawa, Canada, July 2010, 1215-1222. 2010.

De Nijs T, Crommentuijn L, Farjon JMJ, Leneman H, Ligtvoet W, De Niet R, Schotten K en Schilderman C. Vier scenario's van het landgebruik in 2030. Achtergrondrapport bij de Nationale Natuurverkenning 2, 2000-2030. RIVM rapport 408764003/2002, RIVM, Bilthoven, 2002.

Desmet R, Hertveldt B, Mayeres I, Mistiaen P and Sissoko S. The PLANET Model: Methodological Report, PLANET 1.0, Study financed by the framework convention "Activities to support the federal policy on mobility and transport, 2004-2007" between the FPS Mobility and Transport and the Federal Planning Bureau, Working Paper 10-08, Federal Planning Bureau, Brussels, 2008.

Deutsch F, Mensink C, Vankerkom J, Janssen L. Application and validation of a comprehensive model for PM10 and PM2,5 concentrations in Belgium and Europe, Applied Mathematical Modelling 32, 1501-1510, 2008a.

Deutsch F, Vankerkom J, Janssen L, Janssen S, Bencs L, Van Grieken R, Fierens F, Dumont G, Mensink C. Modelling concentrations of airborne primary and secondary PM10 and PM2,5 with the BelEUROS-model in Belgium, Ecological Modelling 217, 230-239, 2008b.

Deutsch F, Buekers J, Janssen S, Torfs R, Veldeman N, Fierens F, Trimpeneers E en Bossuyt M. Zwevend stof. Wetenschappelijk rapport, MIRA, VMM, 2009. [www.milieurapport.be](http://www.milieurapport.be).

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, 2013a.

Deutsch F, Vankerkom J, Vercauteren J, Bossuyt M en Fierens F. Modeloptimalisatie voor chemische subcomponenten van het BelEUROS-model, MIRA 2013, 2013b. [www.milieurapport.be](http://www.milieurapport.be).

De Vries B and Van Den Wijngaart R. The Targets/IMage (TIME) 1.0 Model. National Institute of Public Health and the Environment (RIVM). 103 pp. 1995.

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](http://www.nara.be).

Duyck J, Englert M, Masure L en Paul JM. Bevolkingsvooruitzichten 2012-2060. Federaal Planbureau en Algemene Directie Statistiek. In samenwerking met FOD Dienst Binnenlandse Zaken, Dienst Vreemdelingenzaken. 31 pp. Mei, 2013.

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.

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.

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. Werkinstrumenten en methodes van het Federaal Planbureau. Working Paper 7-06. September, 2006.

Federaal Planbureau en Algemene Directie Statistiek en Economische Informatie (FPB & ADSEI). Planning Paper 105. Bevolkingsvooruitzichten 2007-2060. Mei, 2008. [www.plan.be](http://www.plan.be).

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.

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.

Gavilan J, Overloop S, Carels K, d'Heygere T, Van Hoof K, Helming J en Vangijseghem D. Toekomstverkenning Landbouw en Milieu – Het SELES Model. Vlaamse Milieumaatschappij. Departement Landbouw en Visserij, Afdeling Monitoring en Studie. 115 p. 2006.

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

Grossmann WD and Bellot J. Systems Analysis As a Tool for Rural Planning. In: Golley FB and Bellot J (Eds.). Rural Planning from and Environmental Systems Perspective, page 315-343. Springer Series on Environmental Management. 1999.

Guo HC, Liu L, Huang GH, Fuller GA, Zou R and Yin YY. A system dynamics approach for regional environmental planning and management: A study for the Lake Erhai Basin. Journal of Environmental Management 61, 93-111, 2001.

Hahn B and Engelen G. Concepts of DSS systems. In: Decision Support Systems (DSS) for river basin management, International workshop 6 April 2000. Federal Institute of Hydrology, Koblenz-Berlin, pp 9–44, 2000.

Hahn BM, Kofalk S, De Kok JL, Berlekamp J and Evers M. Elbe DSS: A Planning Support System for



Strategic River Basin Management. In: Geertman S and Stillwell J (Eds.). Planning Support Systems Best Practice and New Methods, Springer Science, 2009.

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

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.

Janssen L, Viaene P, Deutsch F, Maiheu B. Update luchtkwaliteitsmodel VLOPS, VITO Eindrapport 2011/RMA/R/185, Studie voor VMM, 2011.

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

Kopainsky BU. A system dynamics analysis of socio-economic development in lagging Swiss regions. Doctoral thesis ETH 15843. Zürich, 2005.

Kosko B. Fuzzy Cognitive Maps. International Journal of Man-Machine Studies, 24, 65-75, 1986.

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 Moulaert 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.

LEAP (2006): *Long-range Energy Alternatives Planning System User Guide*, Stockholm Environment Institute (SEI), Boston, USA., March 2006.

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.

Lodewijks P, Meynaerts E en Beheydt D. Prognoses en scenario's voor luchtverontreinigende stoffen, 2010-2015-2020, VITO, 90 pp, 2007.

Lodewijks P, Brouwers J, Van Hooste H en Meynaerts E. Energie en Klimaatscenario's voor de sectoren Energie en Industrie. MIRA 2009 Wetenschappelijk Rapport. MIRA, Afdeling Lucht, Milieu en Communicatie. Vlaamse Milieumaatschappij en Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek, 2009 (bijgewerkt 2010).

Ludwig R, Mauser W, Niemeyer S, Colgan A, Stolz R, Escher-Vetter H, Kuhn M, Reichstein M, Tenhunen J, Kraus A, Ludwig M, Barth M and Hennicker R. Web-based modelling of energy, water and matter fluxes to support decision making in mesoscale catchments – the integrative perspective of GLOWA-Danube. *Physics and Chemistry of the Earth* 28, 621-634, 2003.

Maene S. Nieuwe Bevolkingsprojecties en huishoudensprojecties 2009-2030 Studiedienst Vlaamse Regering – Een vergelijking met projecties Federaal Planbureau 2007-2060 gebruikt in Milieuverkenning 2030, 2011.

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.

Maes J, Vliegen J, Van de Vel K, Janssen S, Deutsch F, De Ridder K and Mensink C. Spatial surrogates for the disaggregation of CORINAIR emission inventories, *Atmos. Environ.* 43, 1246–1254, 2009.

Maiheu B, Veldeman N, Viaene P, De Ridder K, Lauwaet D, Smeets N, Deutsch F en Janssen S. Bepaling van de best beschikbare grootschalige concentratiekaarten luchtkwaliteit voor België, studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, MIRA, MIRA/2013/01, Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO), 2013.

Mathijs E, Nevens F en Vandenbroeck P. Transitie naar een duurzaam landbouw- en voedingssysteem in Vlaanderen: een systeemanalyse. MIRA-AMS 2012 Topic Rapport. Vlaamse Milieumaatschappij en Departement Landbouw en Visserij. 2012.

McDonald, G.W. Integrating economics and ecology: a system approach tot sustainability in the Auckland region. Massey University, Palmerston North (NZ), 2005.

McIntosh BS, Ascough II JC, Twery M, Chew J, Elmahdi A, Haase D, Harou JJ, Hepting D, Cuddy S, Jakeman AJ, Chen S, Kassahun A, Lautenbach S, Matthews K, Merritt W, Quinn NWT, Rodriguez-Roda I, Sieber S, Stavenga M, Sulis A, Ticehurst J, Volk M, Wrobel M, Van Delden H, El-Sawah S, Rizzoli A and Voinov A. Environmental decision support systems (EDSS) development – Challenges and best practices. *Environmental Modelling and Software* 26, 1389-1402, 2011.

Meadows, DH. *Limits to Growth*. New York: 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 – Achtergronddocument. 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](http://www.millenium-institute.org).

Millenium Institute. A Technical Introduction to the Threshold21 Integrated Development Model. Arlington, Va. 2013b. [www.millenium-institute.org](http://www.millenium-institute.org).

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.

Mulligan M. Modelling the complexity of landscape response to climatic variability in semi- arid environments, in M.G.A. Anderson & S.M. Brooks (eds.) *Advances in Hillslope Processes*, Wiley, Chichester, 1099-1149, 1996.

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.

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.

Overloop S, Van Gijsegem D and Helming J. Environmental Scenarios for the Future Nitrogen Policy in Flanders, Belgium. Optimizing Nitrogen Management in Food and Energy Production and Environmental Protection: Proceedings of the 2nd International Nitrogen Conference on Science and Policy. *TheScientificWorld* 1(S2), 873–879, 2001.

Overloop S, Gavilan J, Carels K, Van Gijsegem D, Hens M en Helming J. Wetenschappelijk Rapport MIRA 2009 en NARA 2009 – Landbouw. Vlaamse Milieumaatschappij en Instituut voor Natuur en Bosonderzoek. 115 pp. INBO R. 2009.30, 2009.

Oxley T, McIntosh BS, Winder N, Mulligan M and Engelen G. Integrated modelling and decision-support tools: a Mediterranean example. *Environmental Modelling and Software* 19, 999-1010, 2004.

Özesmi U and Özesmi SL. Ecological models based on people's knowledge: a multi-step fuzzy cognitive mapping approach. *Ecological modeling* 176, 43-64. 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](http://www.milieurapport.be).

Peeters B, D'heygere T, Huysmans T, Ronse Y en Dieltjens I. Toekomstverkenning Stroomgebiedbeheerplan/Milieuverkenning 2030: Modellerings waterkwaliteitsscenario's. Wetenschappelijk rapport, MIRA 2009, VMM. 2009. [www.milieurapport.be](http://www.milieurapport.be).

Pelfrene E. De nieuwe bevolkingsvooruitzichten 2007-2060. Een vergelijking met vorige prognoses.

SVR-Rapport 2009/03. Studiedienst Vlaamse Regering. Brussel, 2009.

Pouwels R, Jochem R, Reijnen MJSM, Hensen SR en Van der Gref JGM. LARCH voor ruimtelijke ecologische beoordelingen van landschappen. Alterra-rapport 492. Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte, Wageningen, 2002.

Pouwels R, van der Gref JGM, van Andrichem MHC, Kuipers H, Jochem R, Reijnen MJSM. LARCH status A. Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, Werkdocument 107, Alterra, Wageningen, 2008.

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

Quade ES and Miser HJ. Handbook of Systems Analysis. Volume Three. Cases. 384 pp. John Wiley and Sons Ltd, 1995.

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

Ronse Y en d'Heygere T. Het waterkwaliteitsmodel PEGASE als beleidsondersteunend instrument bij de opmaak van het stroomgebiedbeheerplan van de Schelde. Congres watersysteemkennis 2006-2007. Water, nr 32, p 1-6, 2007.

Rotmans J, Van Asselt MBA, De Vries BJM, Beusen AHW, Den Elzen MGJ, Hilderink HBM, Hoekstra AY, Janssen MA, Köster HW, Niessen LW and Strengers BJ. The TARGETS Model. In: Rotmans J and De Vries B (Eds). Perspectives on Global Change. The TARGETS Approach, page 35-54. National Institute of Public Health and the Environment (RIVM). The Netherlands. Cambridge University Press (UK). 1997.

Rotmans J. Transitie management: Sleutel voor een duurzame samenleving, Koninklijke Van Gorcum, Assen. 2003.

Rotmans J and Loorbach D. Part II: Towards a better Understanding of Transitions and Their Governance: A Systemic and Reflexive Approach. In: Transitions to Sustainable Development. New Directions in the Study of Long Term Transformative Change. Grin J., Rotmans J. and Schot J., in collaboration with Geels F. and Loorbach D. Routledge. 2011.

Ryckewaert M, De Decker P, Winters S, Vandenkerckhove B, Vastmans F, Elsinga M en Heylen K. Een woonmodel in transitie. Toekomstverkenning van het Vlaams wonen. 109 p. 2011.

Schmitz O, Karsenberg D, De Jong K, De Kok JL and De Jong SM. Map algebra and model algebra for integrated model building. Environmental Modelling and Software 48, 113-128, 2013.

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

Smeets E and Wetering R. European Environment Indicators: Typology and Indicators. Typology and Technical Report 25. Prepared by TNO Centre for Strategy, Technology and Policy for the European Environment Agency, 1999.

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.

Stouten H. Integrated Causal Loop Diagram of the Auckland Region. Ecological Economics Research New Zealand. 2013. <http://www.sp2.org.nz/assets/Uploads/CLD-Auckland.pps>.

Stover JG. Including future events in system dynamics models, in: System Dynamics, TIMS Studies in Management Sciences, Vol. 14, 189 – 208, A.A. Legasto, JR, J.W. Forrester, J.M. Lyneis eds., North Holland, 1980.

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.

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

Uljee I, Engelen G and White R. Integral Assessment Module for Coastal Zone Management: RaMCo 2.0 User Guide, RIKS bv. Maastricht, the Netherlands, 1999.

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

Van Avermaet P, Celis D, Fierens F, Deutsch F, Janssen L, Veldeman N, Viaene P, Wuyts K, Staelens J, De Schrijver A, Verheyen K, Vancraeynest L en Overloop S. Verzuring. Wetenschappelijk rapport. MIRA 2009, VMM, 2009. [www.milieurapport.be](http://www.milieurapport.be).

Van Daele T. Case Kleine Nete: moerasvegetaties. Wetenschappelijk rapport, NARA 2009. INBO.R.2009.25, 2009. [www.nara.be](http://www.nara.be).

Van Delden H, Luja P and 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 Jaarsveld JA. Een operationeel atmosferisch transportmodel voor prioritaire stoffen; specificatie en aanwijzingen voor gebruik, RIVM-rapport nr. 228603008, 1989.

Van Jaarsveld. Description and validation of OPS-Pro 4.1. Rijks Instituut Voor Milieuvraagstukken. RIVM report 500045001, Nederland. 2004.

Van Steertegem M (Red.). Milieuverkenning 2030. Milieurapport Vlaanderen. Vlaamse Milieumaatschappij. November, 2009. [www.milieurapport.be](http://www.milieurapport.be).

Van Steertegem M (Red.). Milieurapport Vlaanderen. MIRA Indicatorrapport 2012. Vlaamse Milieumaatschappij. 162 p, 2013.

Van Wortswinkel L en Lodewijks P. Regionalisatie van Belgisch TIMES model ter uitvoering van langetermijnverkenningen voor energie en broeikasgasemissies in Vlaanderen. Studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij. MIRA Onderzoeksrapport MIRA/2012/08. Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO), 2012.

Verheye T. EU Air Quality and the Review of the Thematic Strategy on Air Pollution. Antwerp, 21 November 2012. Klimaat- en luchtkwaliteitsmodellering in Vlaanderen. Overzicht van resultaten CLIMAQS project, 2012.

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.

Vlaams Economisch Sociaal Overlegcomité (VESO). Pact2020. Een nieuw toekomstpact voor Vlaanderen – 20 doelstellingen. 32 p. 19 januari, 2009.

Vlaamse Milieumaatschappij (VMM). Technische Voorschriften. Modelvereisten voor het waterkwaliteitsmodel. Ongepubliceerd bestek. 2013.

Vlaamse Milieumaatschappij (VMM). 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, 2012.

Voinov A, Costanza R, Wainger L, Boumans R, Villa F, Maxwell T and Voinov H. Patuxent landscape model: integrated ecological economic modeling of a watershed. *Environmental Modelling and Software* 14, 473-491, 1999.

Voinov A. *Systems Science and Modeling for Ecological Economics*, Academic Press, 2008.

Voinov A and Shuhgart HH. “Integronsters”, integral and integrated modeling. *Environmental Modelling and Software* 39, 149-158. 2013.

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.

## LIJST VAN AFKORTINGEN

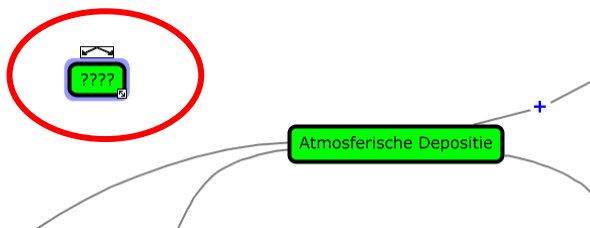
|         |   |
|---------|---|
| ADSEI   | Algemene Directie Statistiek en Economische Informatie                                |
| ARDEEM  | Auckland Regional Dynamic Ecological Economic Model                                   |
| BRP     | Bruto Regionaal Product   |
| CA      | Cellular Automata   |
| 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   |
| ESE     | Ecological-Social-Economic  |
| FCM     | Fuzzy Cognitive Map   |
| FPB     | Federaal Plan Bureau  |
| GAMS    | General Algebraic Modeling System   |
| IMAGE   | Integrated Model to Assess the Global Environment                                     |
| INBO    | Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek  |
| IPCC    | International Panel for Climate Change  |
| ISEW    | Indicator for Sustainable Economic Welfare  |
| LARCH   | Landscape Ecological Analysis and Rules for the Configuration of Habitat              |
| LNE     | Leefmilieu, Natuur en Energie   |
| MALTESE | Model for Analysis of Long Term Evolution of Social Expenditure                       |
| MIRA    | Milieurapport   |
| MKM     | Milieu Kosten Model   |
| NARA    | Natuurrapport   |
| NZDEEM  | New Zealand Dynamic Economic Ecological Model   |
| 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   |
| SAF     | Systems Approach Framework  |
| SRES    | Special Report on Emission Scenarios  |
| SVR     | Studiedienst van de Vlaamse Regering  |
| TARGETS | Tool to Assess Regional and Global Environmental and health Target for Sustainability |
| TIMES   | The Integrated Markal-Efom System   |
| T21     | Threshold21   |
| VITO    | Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek                                       |
| VMM     | Vlaamse Milieumaatschappij  |
| WadBOS  | Waddenzee Beslissings Ondersteund Systeem   |
| WLO     | Welvaart en Leefomgeving  |

## BIJLAGE A SNELSTARHANDLEIDING CMAPS

CMaps is ontwikkeld door de Florida Institute for Human and Machine Cognition (IHMC). Er zijn drie versies 5.05.01 voor Windows beschikbaar: een 32-bits, 64-bits en een "lite versie". Downloaden kan na registratie via: <http://cmap.ihmc.us/download> of direct via: [http://cmap.ihmc.us/download/dlp\\_CmapTools.php?myPlat=Win](http://cmap.ihmc.us/download/dlp_CmapTools.php?myPlat=Win). Na installatie is het verstandig een vaste folder te gebruiken voor het plaatsen van de systeemdiagrammen, bijvoorbeeld D:\Systeemdiagrammen Vlaanderen\All Cmaps. Als het programma eenmaal is geïnstalleerd kan de locatie van de systeemdiagrammen via het menu Bewerken --> Voorkeuren worden ingesteld. Hier kan ook de taal op Nederlands worden ingesteld als dat nog niet het geval is. De help functie is goed en geeft een aantal voorbeelden. Er zijn drie belangrijke bewerkingen:

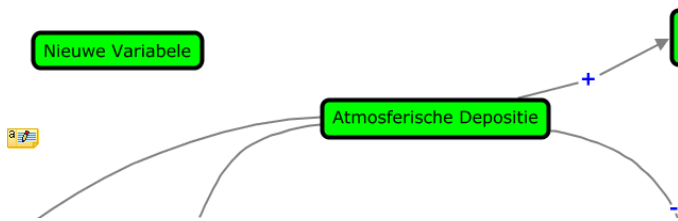
- het toevoegen van nieuwe variabelen of concepten (objects als de engelstalige versie is geïnstalleerd);
- het aanmaken van een nieuwe verbinding ;
- het aanpassen van de tekst in de verbinding (+ of – teken , kleur daarvan e.d.).

Na aanklikken van een Cmap (extensie .cmap) uit een folder verschijnt een nieuw scherm met menu opties. Er is ook een menu optie om een stap terug te gaan (menu Bewerken --> Ongedaan maken) en verbindingen en variabelen kunnen altijd aangeklikt en verwijderd worden m.b.v. Delete. Als de Cmap klaar is kan deze worden opgeslagen onder een andere naam, ik zou een versie nr + extensie \_MIRA voorstellen daarvoor. Een Cmap kan ook als Jpeg figuur worden opgeslagen via menu Bestand --> Exporteer Cmap als --> Afbeeldingsbestand. De diagrammen hebben de extensie .cmap en kunnen ook los worden verstuurd naar anderen en geopend. Een samenvatting van de belangrijkste handelingen bij het gebruik van Cmaps is hier te vinden:

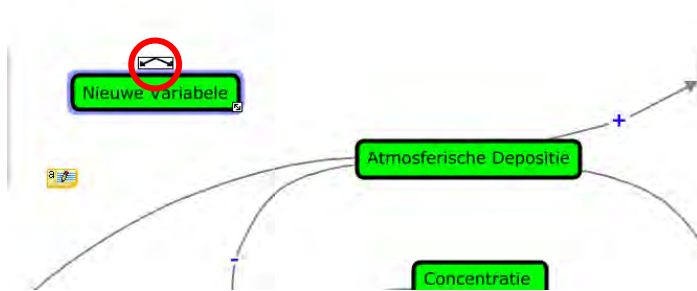


1. Plaats een nieuwe variable door dubbelklikken op leeg deel van het scherm





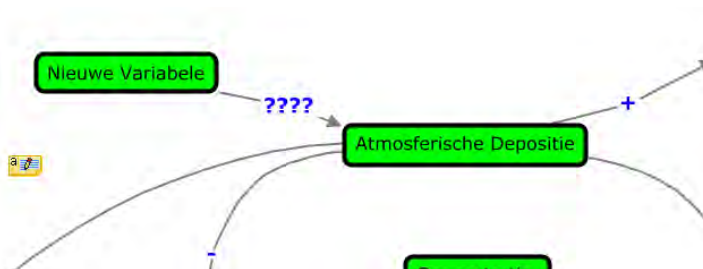
2. naam aan variabele geven



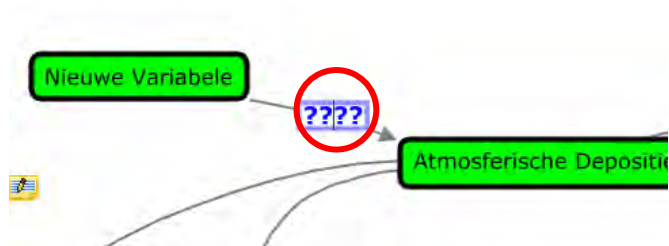
3. variabele aanklikken geeft aanknopingspunt om verbinding te maken



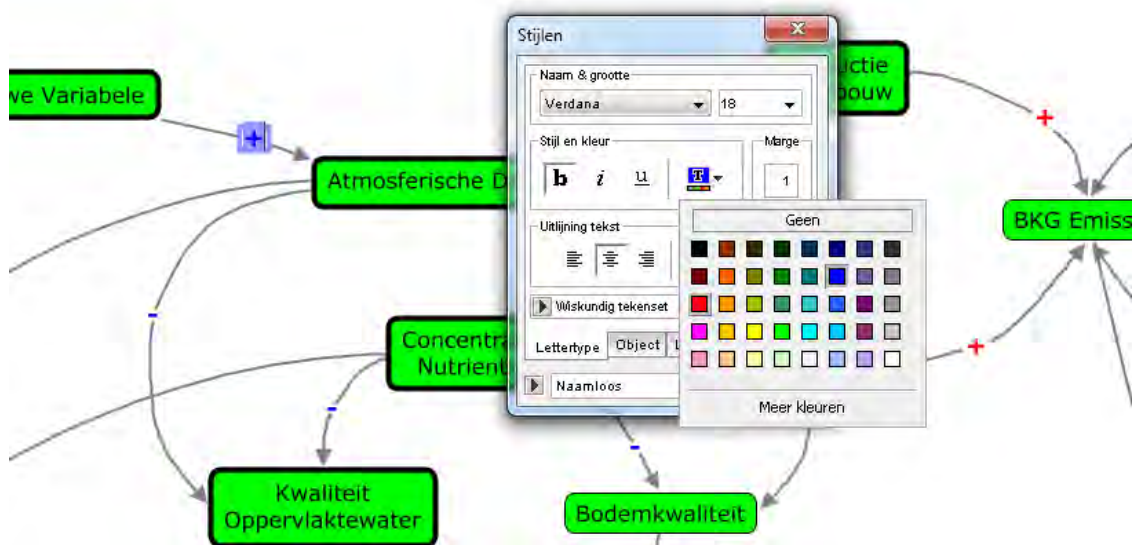
4. verbinding maken door met muis te slepen



5. nieuwe verbinding verschijnt



6. teken verbinding op + of – instellen



7. aanpassen kleur, font en stijl van kan via menu Venster → Toon stijlpalet

## BIJLAGE B DISCUSSIEPUNTEN SYSTEEMDIAGRAMMEN

### Bevolking:

- De concepten dienen duidelijk gedefinieerd te zijn. Zo kan een verband tussen vruchtbaarheid en de omvang van huishoudens gelegd worden maar hiermee wordt de biologische vruchtbaarheid bedoeld.
- De immigratie kan grotendeels als exogeen bepaalde factor worden verondersteld.
- Immigratie wordt netto-migratie als verschil van immigratie en emigratie en omvat niet alleen vluchtelingen maar ook de mobiliteit binnen EU-27.
- Vruchtbaarheid is in principe de fysieke vruchtbaarheid, maar wordt op zich bepaald door emancipatie, anticonceptie, welvaart, educatie. Dat is de verdieping die in een demografisch model aan bod kan komen, maar niet in een systeemmodel op deze schaal.
- Er is gekozen voor uitsplitsing luchtconcentraties in NO<sub>2</sub>, stof en o<sub>3</sub>, maar kan net zo goed gevat worden als concentratie luchtverontreiniging. De detaillering naar de 3 stoffen volgt dan in de kwantificering.
- Leefwijze omvat zaken als co-housing, eenoudergezinnen, kangoeroe-wonen, cultuur en gedrag, normen en waarden, stedelijke of landelijke attitudes ...

### Economie:

- De import van producten dient te worden toegevoegd in het schema.
- Het gebruik van materialen en grondstoffen kan worden toegevoegd.
- Naast het BRP (Bruto Regionaal Product) kan ook de ISEW (Indicator for Sustainable Economic Welfare) zie <http://www.milieurapport.be/nl/nieuws/24-mei-2012-nieuw-mira-onderzoeksrapport-de-index-voor-duurzame-economische-welvaart-voor-vlaanderen> en zie rapport p. 15 voor definitie ISEW.
- Externe consumptie is de buitenlandse consumptie (export).

### Energie:

- Het onderscheid tussen centrale en decentrale opwekking van energie is zeer belangrijk: uitsplitsen in regionale energieproductie (gecentraliseerd binnen Vlaanderen, bv. steenkoolcentrale, offshore windpark, stadsverwarming) en decentrale (lokale) energieproductie (dit is bij de eindgebruiker zelf).
- De energieprijzen zijn vooral exogeen bepaald en niet door de productie in Vlaanderen. Import energie is niet sturend op de energieprijzen, want Vlaanderen is een heel kleine afnemer op de wereldmarkt.
- De variabele vriesdagen, die van invloed zou zijn op het energiegebruik door huishoudens, kan beter vervangen worden door het aantal graaddagen.
- De variabele energiebesparing kan beter vervangen worden door de energie-efficiëntie.
- Lokale energieopwekking: Intensiteit verkeer ipv wegverkeer.
- Verkeer wordt niet enkel beïnvloed door economische activiteit maar ook door groei van de bevolking.
- Rebound voorzien als er voldoende goedkope hernieuwbare of andere energie is: volstaat de loop tussen prijs en gebruik?
- De energieprijzen (vooral van fossiele dragers) bepaalt de decentrale energieproductie.

### Mobiliteit:

- De modal split (onderscheid transport over de weg, via het openbaar vervoer en langzaam verkeer) zou in het diagram moeten worden meegenomen. Nu ligt de nadruk sterk op het wegverkeer. Dit is ook van belang i.v.m. de Pact2020 (VESO, 2009) doelstelling (40 % woon-werk verplaatsingen door collectief vervoer). Ook zwakke modi (fiets, te voet).

- De invloed van de samenstelling van het wagenpark (benzine, diesel, elektrisch ...), rekeningrijden en transitverkeer zouden moeten worden toegevoegd.
- De binnenscheepvaart en luchtverkeer zouden eveneens moeten worden toegevoegd.
- De invloed van de leefwijze van de Vlaming op de functiescheiding (relatief veel woon-werk verkeer door honkvastheid) is belangrijk.
- Het lijkt er op dat de rebound effecten van maatregelen gericht op het verminderen van congestie niet zijn meegenomen (versterkte toename verkeer op middellange en lange termijn).
- Kwaliteit infrastructuur : dient ook kwantiteit infrastructuur: hoe meer wegen hoe meer verkeer. Daarmee samenhangend ook bewust zijn van aanzuigeffect: hoe meer weg er wordt vrijgemaakt (door bv. telewerken), hoe meer je terug auto's aanzuigt op die vrijgekomen weg (maar zit wel vervat in prijzen als je ook tijdskosten meeneemt in transportkosten).
- Internationaal verkeer (vliegtuig, trein, scheepvaart): heeft effect op emissies. Cijfers beschikbaar. Vraag is of dat al dan niet moet meegenomen worden?
- Schrap 'aantal vriesdagen': beïnvloedt de toegankelijkheid van wegen en zo dus intensiteit wegverkeer maar in kleine tijdstap van dagen, terwijl tijdstap systeemmodel eerder in orde van 1 jaar is.
- Aantal huishoudens/inwoners werkt rechtstreeks in op intensiteit verkeer: hoe meer volk, hoe meer mobiliteit, los van functiescheiding of woon-werkafstand. Is zo'n rechtstreeks pijl nodig, of is die link al voorzien via de tussenliggende variabelen? Huishoudens en inwoners: Beiden hebben invloed. Impact van groei van aantal inwoners wordt nog versterkt door de kleinere huishoudens (meer wagens).
- Transportkosten worden ook bepaald door kosten rekeningrijden, naast andere kosten zoals verzekering, BIV, jaarlijkse verkeersbelasting ... Externe milieukosten zit daar niet in.
- Zacht weggebruik is ook functie van de transportkosten en is gelieerd aan wegverkeer zoals nu openbaar vervoer.
- Pijl tussen 'inkomen overheid' en 'investering infrastructuur': of die relatie positief is hangt toch af van de keuzes die de overheid maakt? Overheid kan ook kiezen om niet in infrastructuur te investeren.
- Pijl tussen functiescheiding en autobezit: moet die niet omgekeerd getekend worden?

#### Landbouw:

- Er moet onderscheid gemaakt worden tussen de dierlijke en plantaardige productie.
- De prijs van voedselproducten is vooral exogeen bepaald, de prijs inelasticiteit is dus hoog.
- Benaming bioenergie vervangen door biomassa.
- De invloed van consumentengedrag kan worden toegevoegd (bijvoorbeeld keuze voor lokale producten).
- Voedselprijs staat in relatie met energieprijs (biomassa voor energie, biomassa voor bio-economie). En toenemende vraag op de mondiale markt: verhoging vleesconsumptie in BRIC landen leidt tot hogere sojaprijzen. Die de binnenlandse grondloze veeteelt in de problemen brengt. Voedselprijs kan ook gezien worden als stuurvariabele maar dan wordt ook buitenlandse consumptie een stuurvariabele. Lijkt me zinvol in de mondiale orde waarin we nu zitten, maar is niet zinvol voor een regionaal handelsmodel.
- Binnenlandse consumptie wordt mee bepaald door import voedsel (of zit dat al in economisch activiteit?).
- Intensiteit of productiviteit wordt bepaald door productie gedeeld door ruimte.
- Dierlijke productie in grondgebonden of grondloos. Grondgebonden heeft relaties met plantaardige productie. Grondloos heeft sterkere relaties met import van veevoeder. Zelfvoorziening in eigen diervoeder bepaald evenwicht tussen grondloos en grondgebonden.

- Dierlijke productie leidt tot dierlijke mest die leidt tot emissies. Mestverwerking dempt emissies.
- Emissies komt uit dierlijke mest ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$ ), kunstmest ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ ), rechtstreeks uit dierlijke productie ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , stof), plantaardige productie ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ , stof).
- Kunstmest, pesticiden, energie zijn input voor plantaardige productie. Voeder is input voor dierlijke productie. Voeder komt uit plantaardige en import. Verhouding wordt bepaald door zelfvoorziening diervoeder.
- Subsidie stuurt inkomsten landbouw (tot 50 % voor dikbil runderen).
- Landbouwers kunnen alleen overleven door innovatie en/of schaalvergroting om prijsschommelingen op te vangen, ze zijn gevangen in een “tredmolen”. Innovatie tredmolen zie <http://wervel.be/boekbesprekingen/1378-landbouw-en-voedsel-verrassend-actueel>: daaruit volgt dat de schaalgrootte wel de productie op een bedrijf vergroot, maar niet op niveau Vlaanderen, doordat vele bedrijven stoppen: jaarlijks 3 % minder bedrijven, en dit al decennia lang. Dus schaalgrootte stuurt niet de productie aan, maar wel ecosysteemdiensten, net zoals intensiteit van de productie.
- Zure depositie volgt uit concentraties en concentraties uit emissies. Emissies BKG volgen uit productie net zoals emissies  $\text{NO}_2$  en stof.

Opmerking: in de meest recente versie voor het diagram zijn een aantal toestandsvariabelen die in relatie staan tot het domein “Natuur en Milieu”, maar daar niet in zijn opgenomen, zoals de intensiteit van de landbouw. Deze wordt door de dierlijke en plantaardige productie en de ruimte voor landbouw beïnvloed. Dit heeft weer gevolgen voor het gebruik van kunstmest en pesticiden (priv. comm. S. Overloop, 30.05.13). Deze aanpassing zal in een toekomstige versie van het diagram plaatsvinden.

#### Luchtkwaliteit:

- De bijdrage van buitenlandse emissies kan worden toegevoegd.
- De productie van methaan en lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) uit dierlijke productie kan worden toegevoegd.
- De invloed van ozon concentratie op fijn stof concentraties ontbreekt.
- De invloed van pollutanten op het klimaat ontbreekt, maar dit heeft te maken met de afbakening van het systeem (invloed klimaat op duurzaamheid in Vlaanderen maar niet omgekeerd). Bovendien is de bijdrage van Vlaanderen op mondiale schaal zeer beperkt. Wel worden de emissies van broeikasgassen meegenomen.
- De bijdragen aan de zure depositie lopen via de concentraties i.p.v. via de emissies.
- Technologische ingrepen en gedrag en beleid werken in tussen economische activiteiten en emissies. Bij uitbreiding kan voor heel het model nagegaan worden waar beleidsingrepen bestaan of mogelijk zijn.
- Volle lijnen tussen emissie  $\text{NO}_x$  en concentratie  $\text{NO}_2$  en welzijn en gezondheid.
- Pijl van landbouw naar emissie  $\text{NO}_x$ . 6 % van de Vlaamse  $\text{NO}_x$ -emissies zijn afkomstig van mestgebruik in de landbouw. Pijl van verkeer naar emissie  $\text{NH}_3$  (door katalysator gebruik).

#### Water:

- Het detailniveau van het diagram is geschikt.
- Het watergebruik (omvat bijvoorbeeld ook de scheepvaart) kan worden vervangen door het waterverbruik; de aansluitingsgraad door de zuiveringsgraad (= aantal huishoudens aangesloten op RWZI via riolering).
- I.p.v. de waterbeschikbaarheid kan beter gesproken worden van het wateraanbod. Dit is het effectieve aanbod, waarmee deze verschilt van de in het MIRA rapport gehanteerde definitie voor de waterbeschikbaarheid.
- De invloed van emissies op de grondwaterkwaliteit ontbreekt.

- Er is geen directe relatie tussen de zure depositie en oppervlaktewaterkwaliteit.
- De invloed van technologie, beleid en gedrag op het waterverbruik dienen te worden toegevoegd.
- Vooruitlopend op de inventarisatie van thematische modellen stelt zich de vraag of een waterbalansmodel voor laag- en hoogwater condities (tekort landbouw, overstromingen ...) beschikbaar is.
- De invloed van de afvoer via het oppervlaktewater op grondwaterpeil is negatief i.p.v. positief.
- Grondwaterpeil beïnvloedt kwaliteit oppervlaktewater.
- Onder afvoer wordt run-off verstaan.

#### Natuur en milieu:

- De afbakening van het diagram maakt niet duidelijk waardoor de zure depositie wordt beïnvloed (de luchtkwaliteit). Dit maakt de interpretatie lastig.
- Het thema Natuur & Milieu bevindt zich aan het einde van de keten. In het overzichtsdiagram zou de centrale positie beter aan invloedsfactoren zoals de lucht- en waterkwaliteit gegeven kunnen worden.

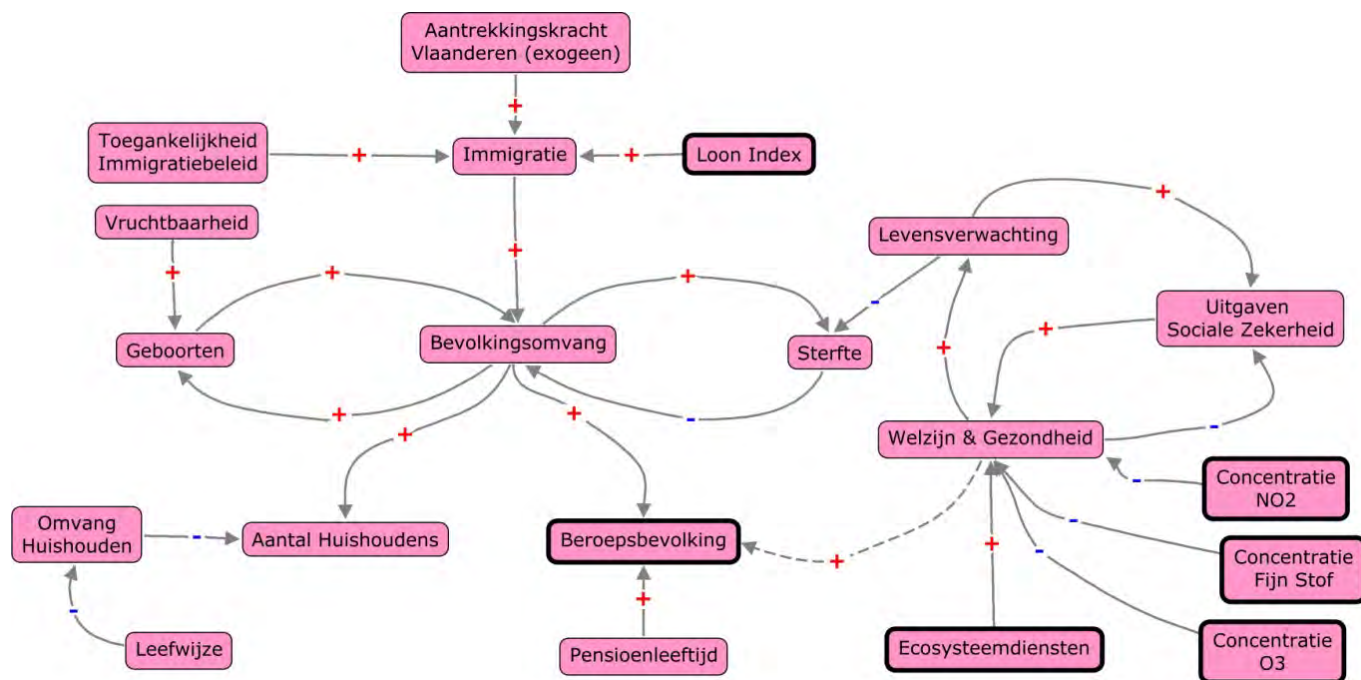
#### Ruimtegebruik:

- De terugkoppeling die de verstedelijking beschrijft lijkt te ontbreken, het diagram moet op dit punt worden aangepast.
- De variabelen natuur en landbouwruimte kunnen geaggregeerd worden tot open ruimte; hetzelfde geldt voor de verstedelijkte ruimte.
- De ruimte die voor infrastructuur wordt gereserveerd kan worden toegevoegd (koppeling thema Mobiliteit).
- Naast BRP is het ook wenselijk om de ISEW op te nemen.
- In plaats van verstedelijkte ruimte zou beter bebouwde ruimte gekozen worden. Want in Vlaanderen beperkt de bebouwing zich niet tot steden en peri-urbane zones, denk maar aan de 100-en km lintbebouwing.  
Tussen landbouwruimte en ecosysteemdiensten is er ook nog invloed van landbouwintensiteit of productiviteit : dient ingevoegd in landbouw deelsysteem: is productie/ruimte.

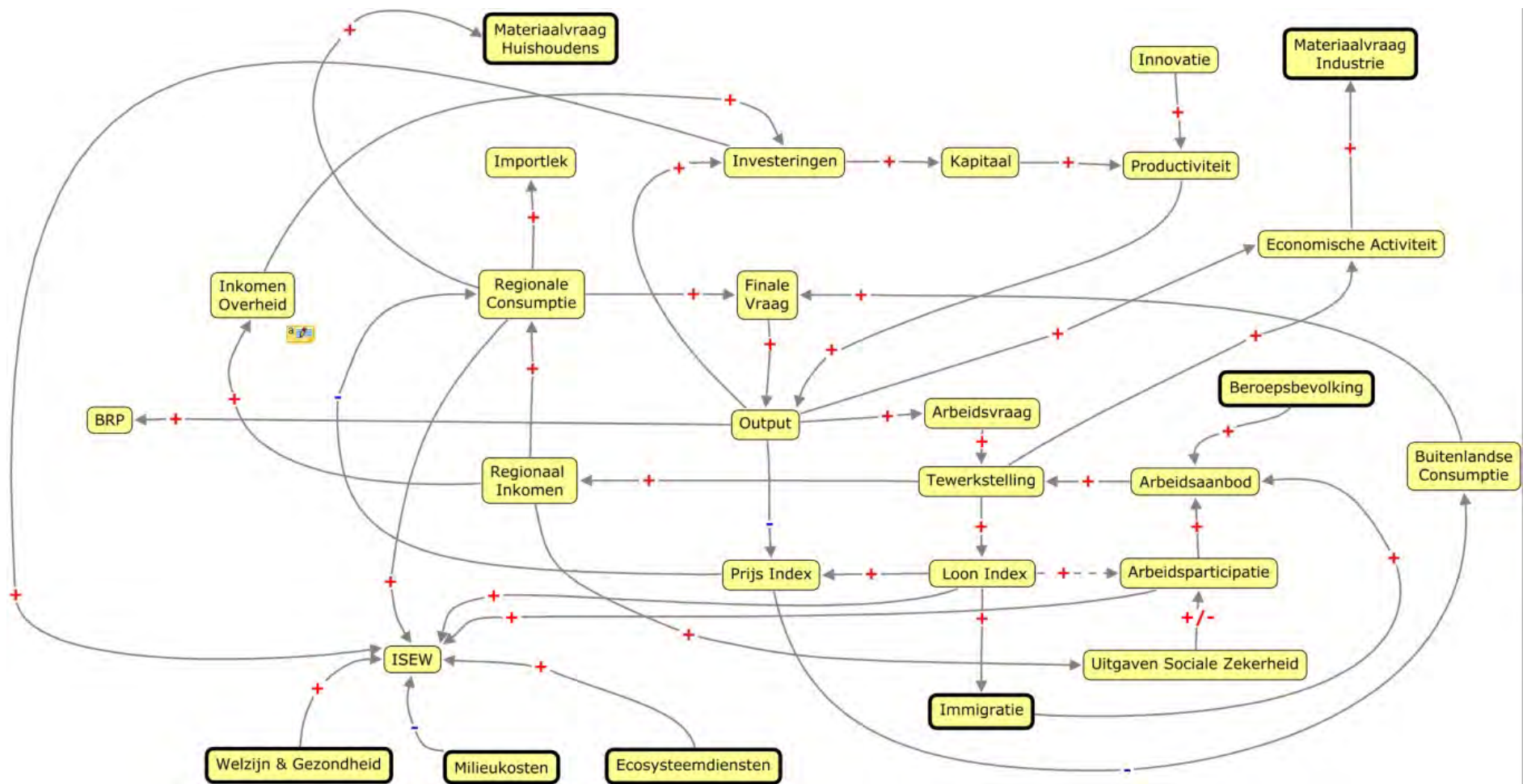
#### Algemene opmerkingen:

- Alle toestands- en hulpvariabelen en dienen gedefinieerd te zijn om misverstanden te voorkomen; zie het voorbeeld van de vruchtbaarheid.
- De meeste thematische systeemdiagrammen zijn ingeperkt tot het domein en enkele "koppelvariabelen" voor de integratie met andere thema's. Dit bemoeilijkt de interpretatie van de diagrammen. Een goed diagram voor het totale systeem op het niveau van de toestandsvariabelen zou ook zeer nuttig zijn.

## BIJLAGE C KWALITATIEVE SYSTEEMDIAGRAMMEN THEMA'S

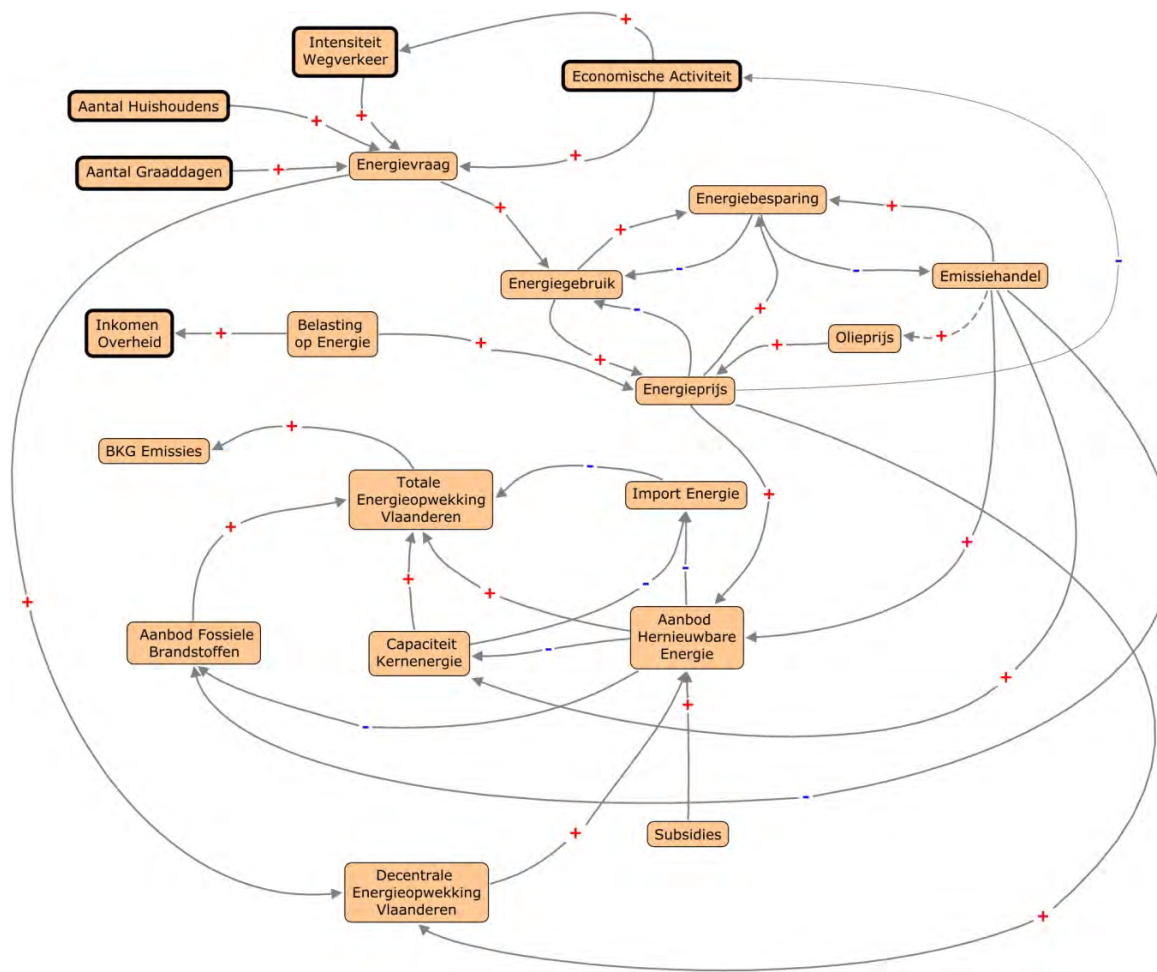


Figuur 8-1 Systemediagram thema "Bevolking" (vet omljnde variabelen verwijzen naar koppeling met een ander thema)

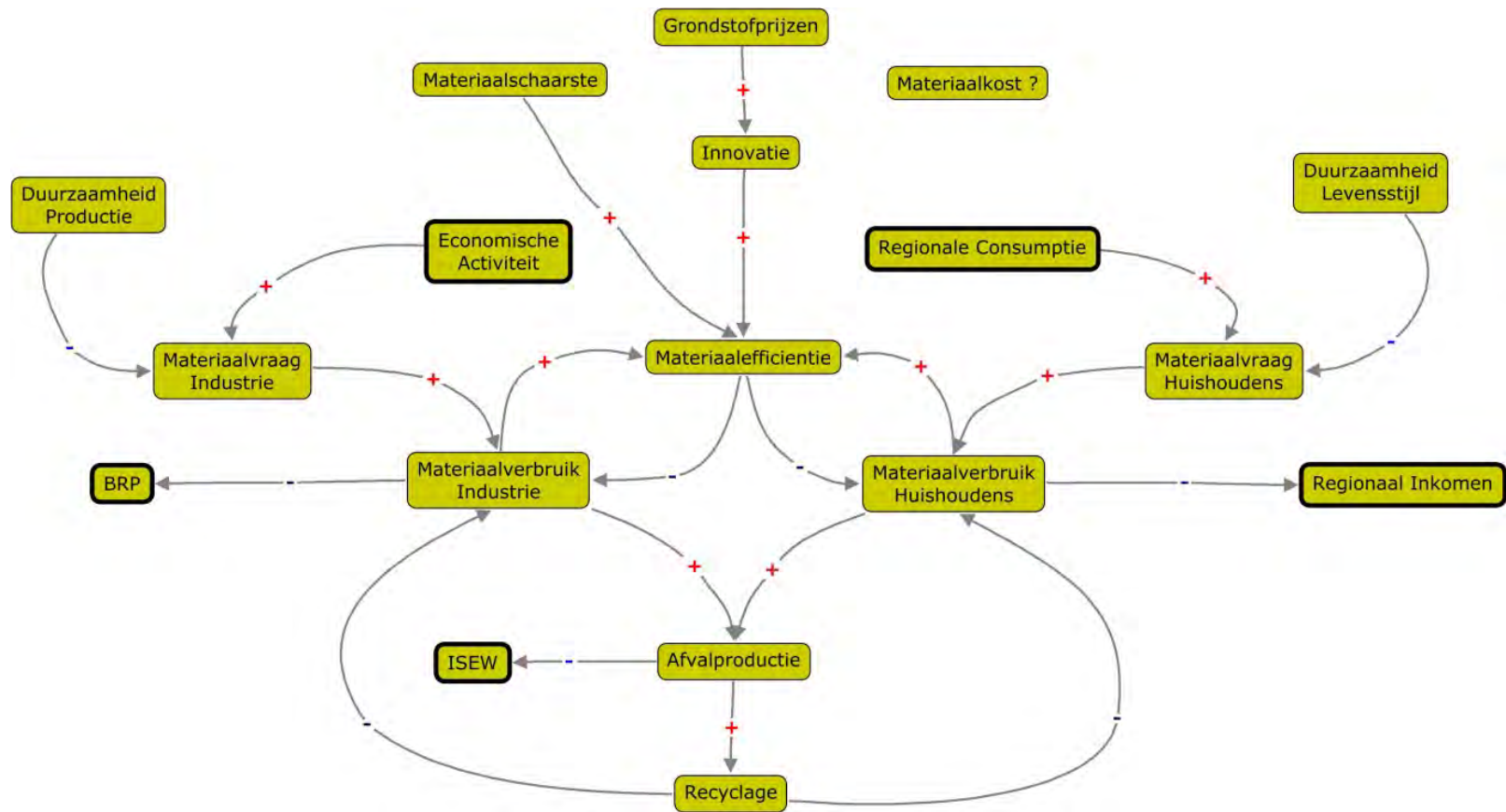


Figuur 8-2 Systemdiagram thema "Economie" (naar Kopainsky, 2005)

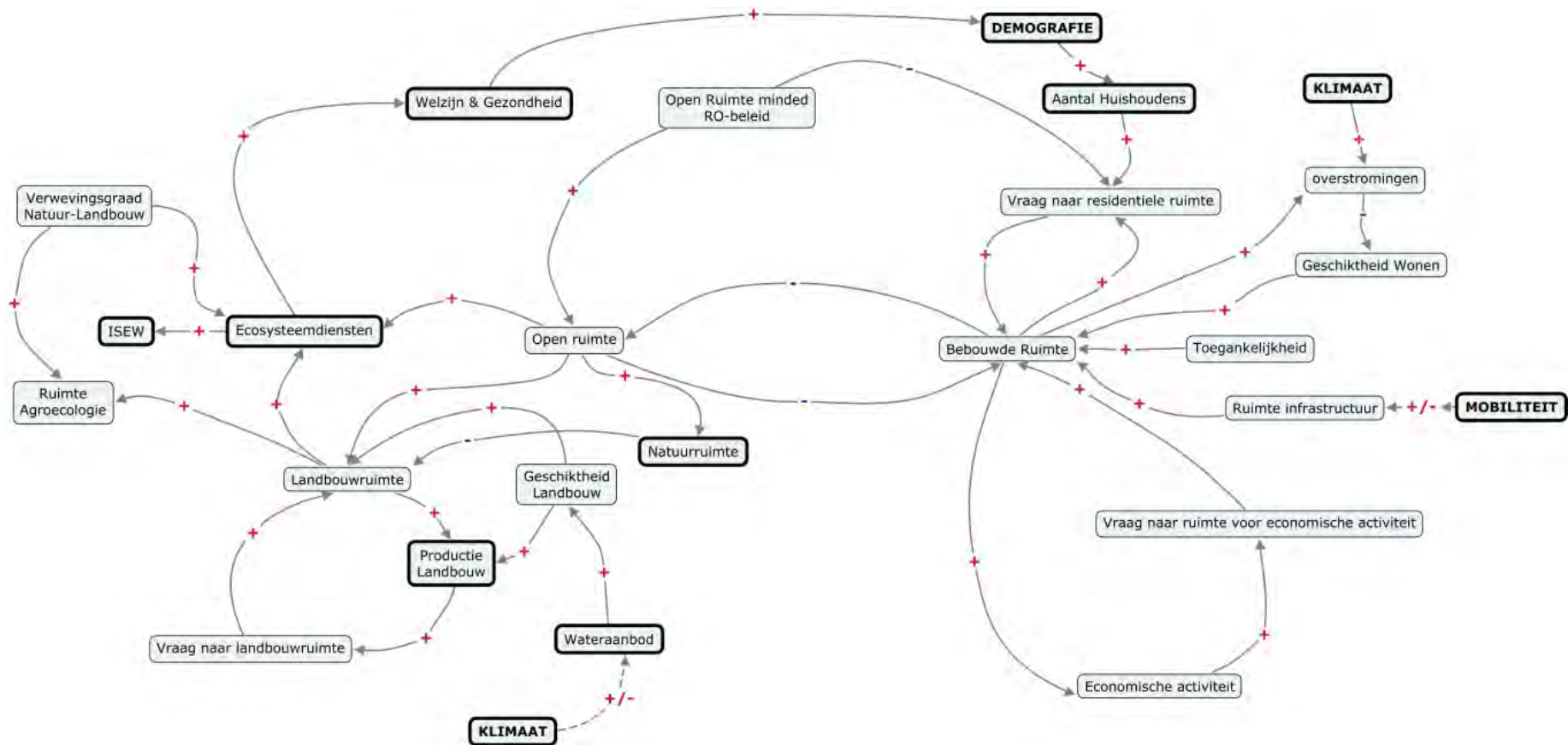




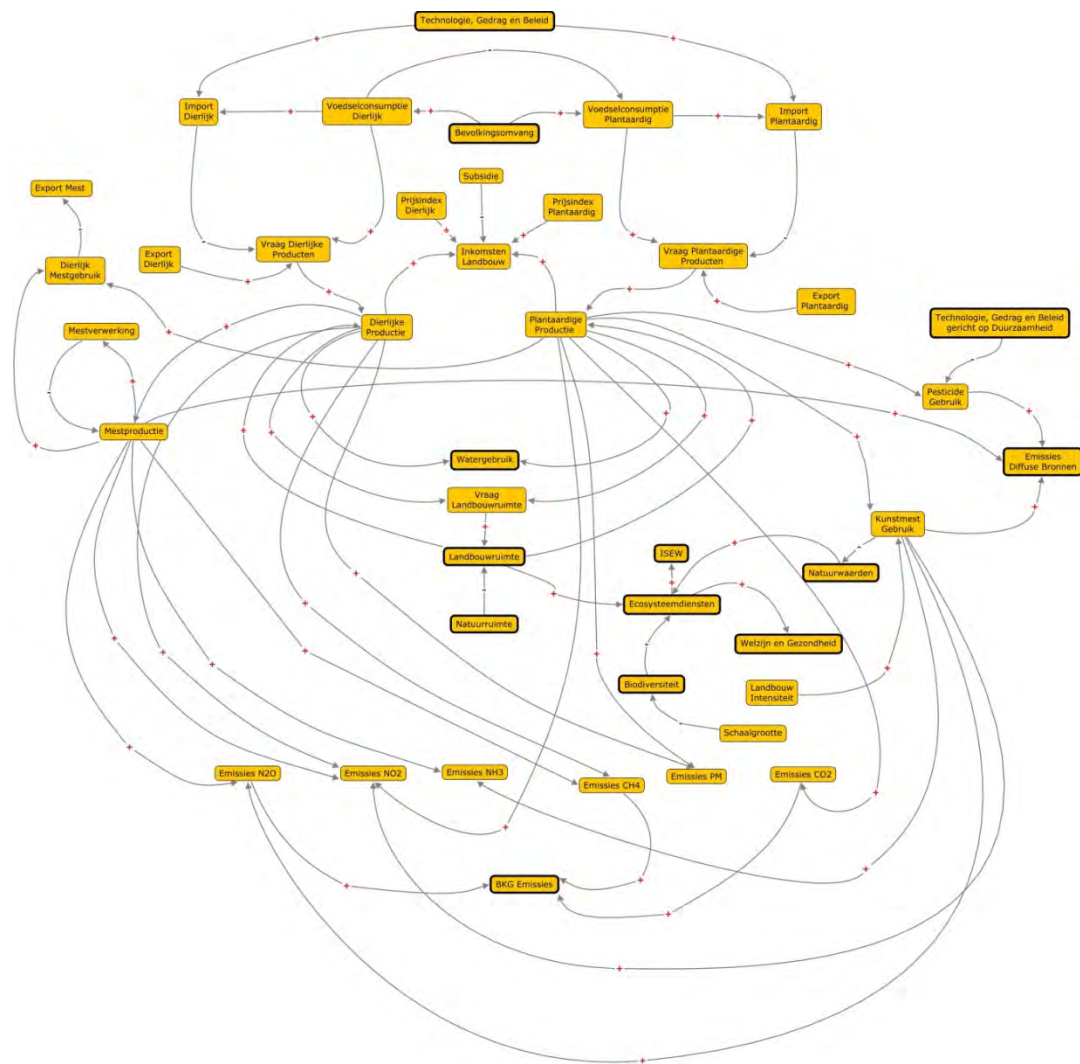
Figuur 8-3 Systemdiagram thema "Energie"



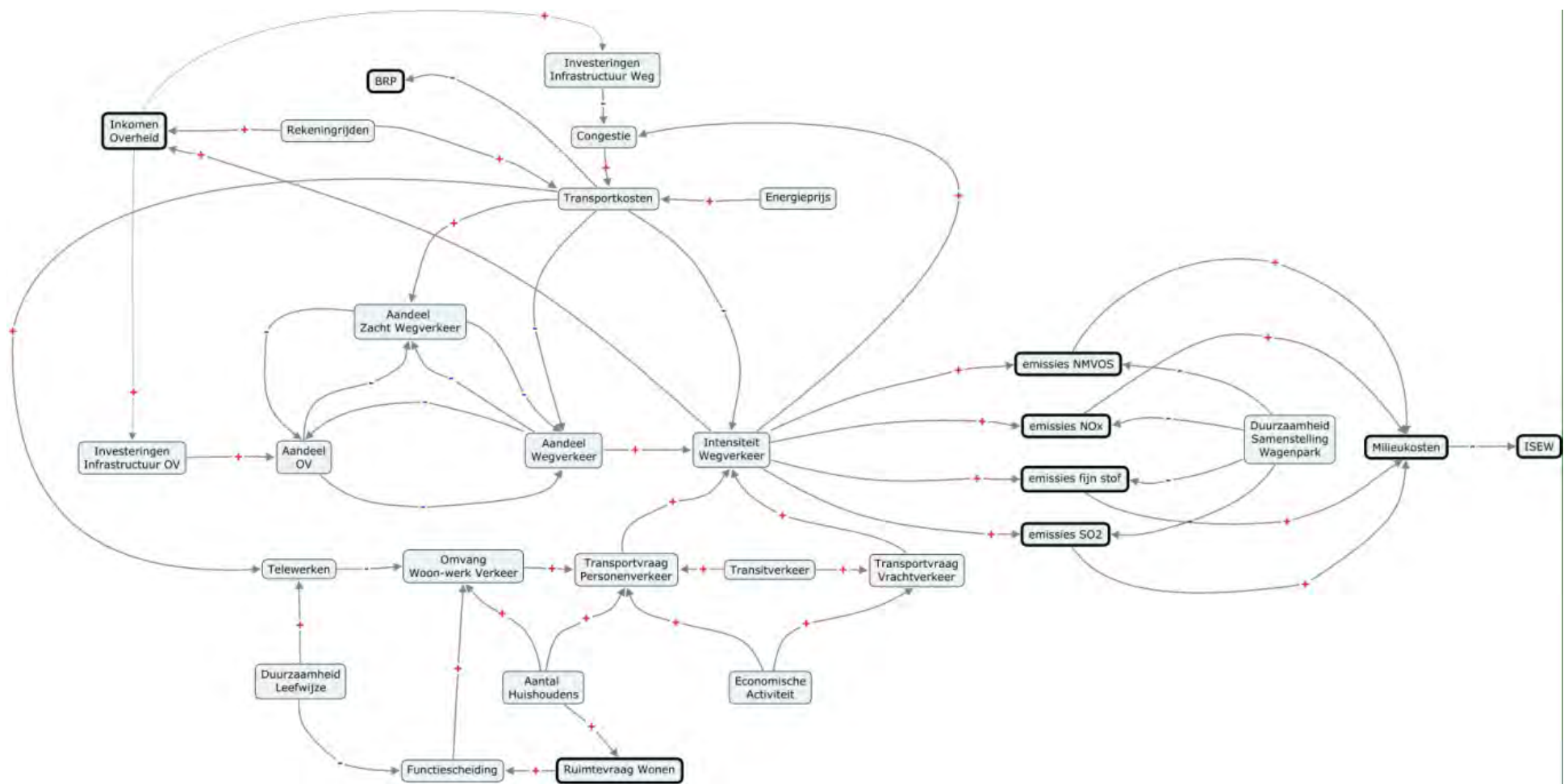
Figuur 8-4 Systemdiagram voor het thema “Materiaalgebruik”, dat later werd toegevoegd



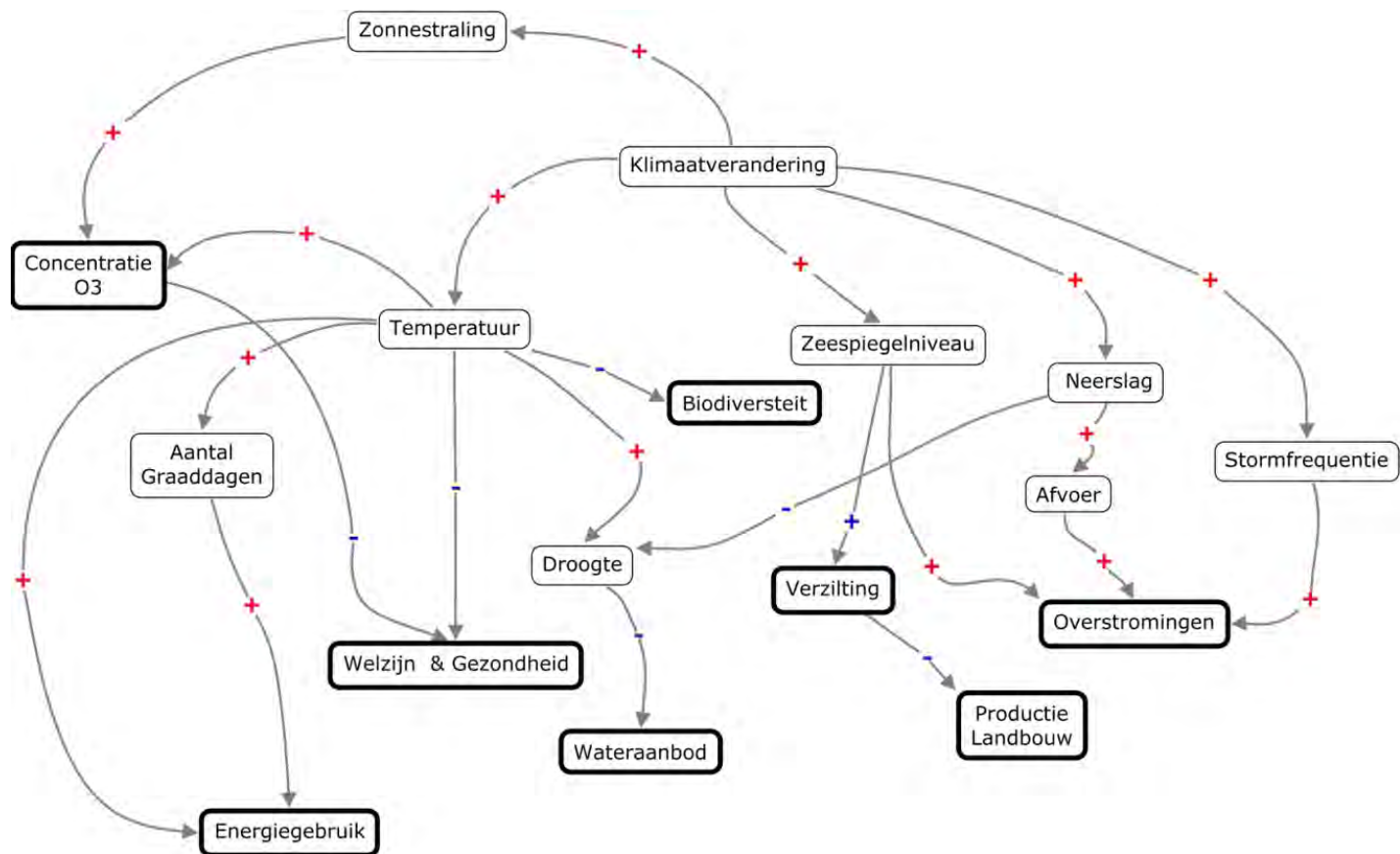
Figuur 8-5 Systemdiagram thema "Ruimtegebruik"



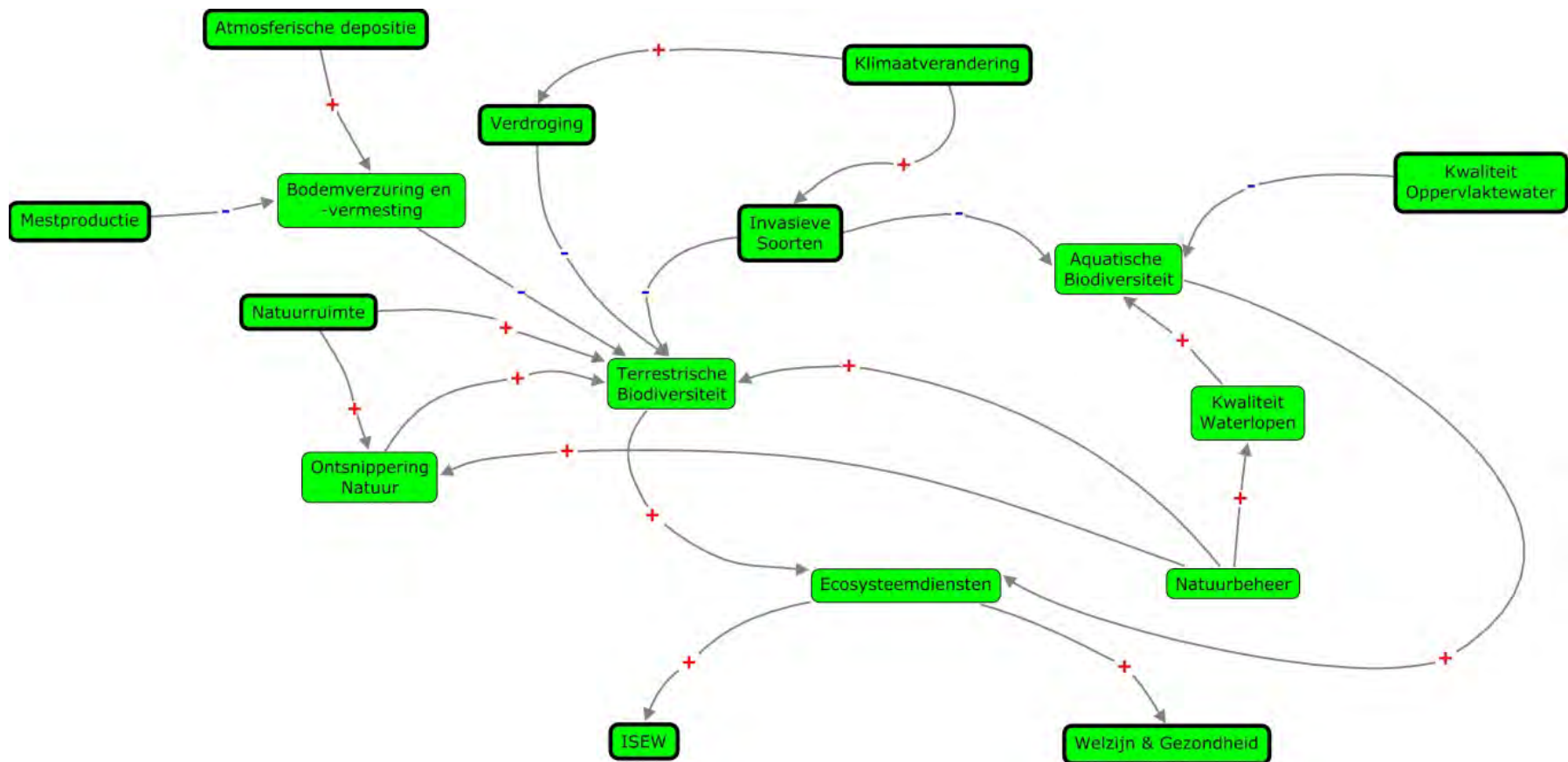
Figuur 8-6 Systemdiagram thema “Landbouw”



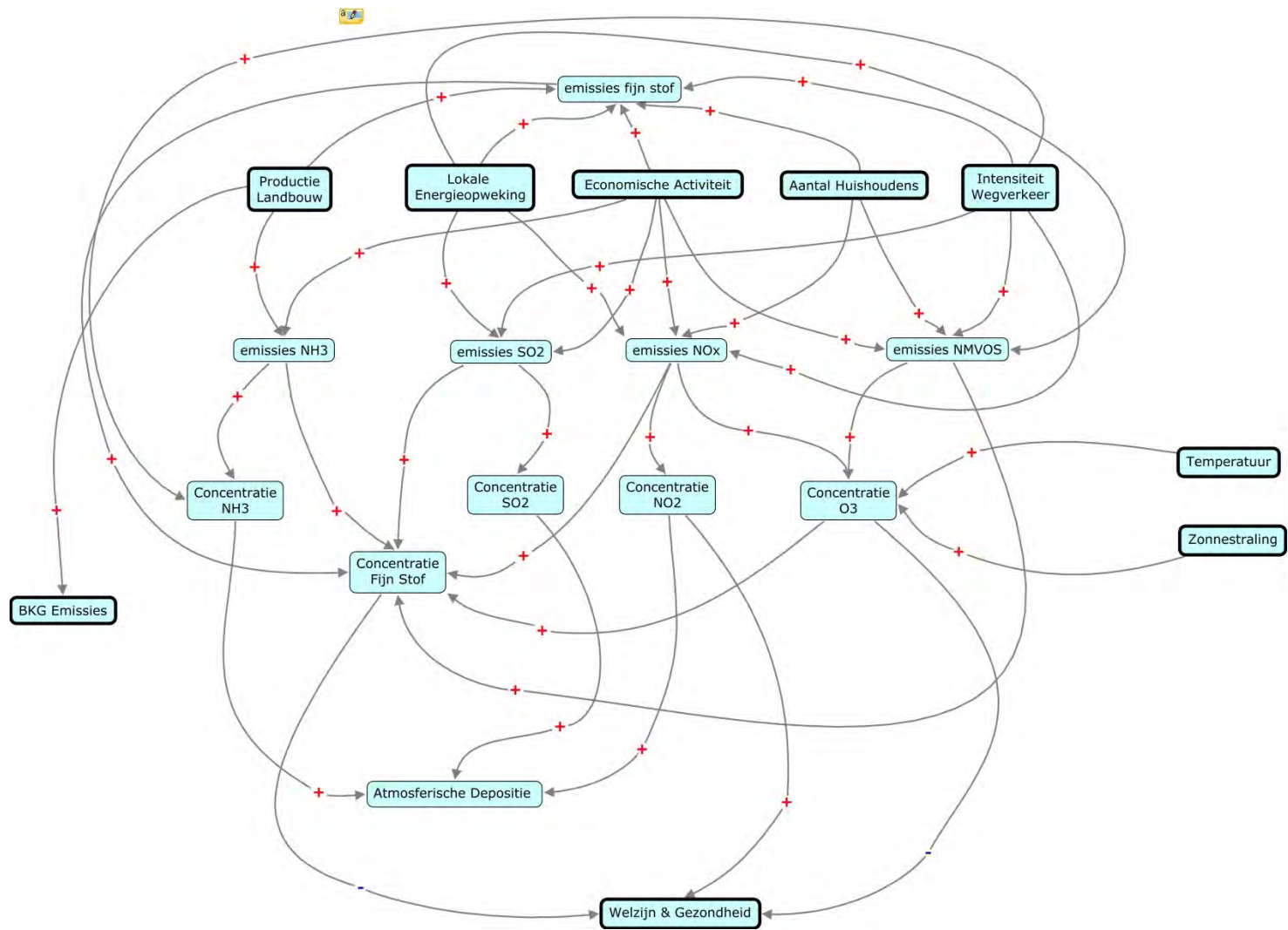
Figuur 8-7 Systemdiagram thema "Mobiliteit"



Figuur 8-8 Systemdiagram thema "Klimaat"

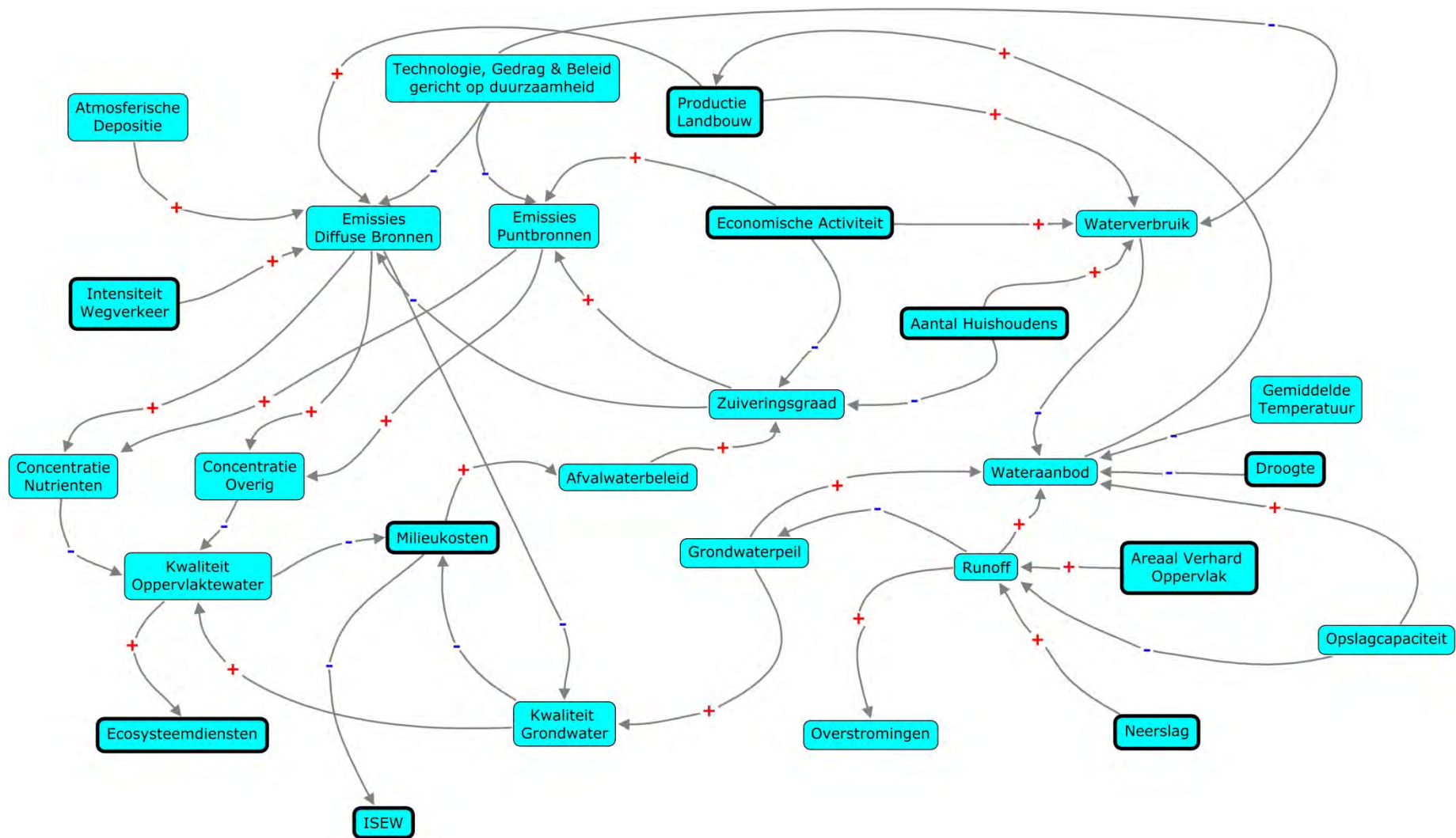


Figuur 8-9 Systeemdiagram thema "Natuur" naar ontwerp T. van Daele (INBO)



Figuur 8-10 Systeendiagram thema “Luchtkwaliteit”





Figuur 8-11 Systeemdiagram thema "Water"

## BIJLAGE D SCORES INPASBAARHEIDSCRITERIA MODELLEN LONGLIST

De volgende criteriaspecifieke inpasbaarheidsscores vormen een kwalitatieve representatie van de drie numerieke scores in het bereik 0-2, waarmee bij de toetsing in HOOFDSTUK 7 is gewerkt. De scores zijn gebaseerd op een kwalitatieve waardering door de ontwikkelaars of gebruikers van modellen of inschatting op basis van de beschikbare documentatie. Bij het ontbreken van voldoende informatie is hier de laagste waarde “\*” gebruikt. De toekenning van de modelscores voor enkele criteria vraagt om enige toelichting. Alle scores zijn positief te interpreteren voor wat de inpasbaarheid betreft: een hogere score (2) op een criterium duidt er op dat het model in dit opzicht beter inpasbaar is. Het criterium *analytische benadering* verwijst naar het type model. Typische evenwichts- en statische modellen passen minder goed in een dynamisch systeemmodellen en scoren op dit criterium laag (score 0) t.o.v. dynamische procesmodellen zoals Pattern-Lite. Het criterium *modelendogeniteit* verwijst naar de mate waarin een model met interne parameters en aannames werkt die de integratie met andere modellen zouden kunnen bemoeilijken of om meer inspanning vragen in vergelijking met modellen waarbij dat niet het geval is. In het geval de modelendogeniteit hoog is, zoals voor het model HERMREG, is de score laag op dit criterium. Het criterium *afhankelijkheid gegevensbanken* verwijst naar de mate waarin een model afhankelijk is van met (veel) inspanning verzamelde gegevens, die zouden moeten worden aangepast voor inpassing in een systeemmodel met een lange tijdhorizon. Een model waarbij deze afhankelijkheid hoog is, zoals SELES, scoort laag op dit criterium. Voor een meer gedetailleerde beschrijving van de toetsingscriteria wordt verwezen naar Sectie 7.2.

| Criterion                      | Toelichting   | Score |
|--------------------------------|---|-------|
| Afdekking relaties thema       | Thema voor verdieping wordt grotendeels (> 50 %) afgedekt tenzij relevantie systeemrelatie zeer hoog is;              | ***   |
| Modelinvoer                    | Kan werken met invoer variabelen te koppelen thema's op systeemniveau   | ***   |
| Modeluitvoer                   | Uitvoer naar variabelen op niveau systeemmodel (evt. na aggregatie, bijv. voorkeur zonder disaggregatie)              | ***   |
| Geografische dekking           | Gebiedsdekkend Vlaanderen   | ***   |
| Ruimtelijke differentiatie     | Ondersteuning ruimtelijke differentiatie vereist voor beleidsverkenningen   | *     |
| Ruimtelijke resolutie          | Indien ruimtelijk gedifferentieerd op raster 100-1000 m   | ***   |
| Tijdhorizon                    | Ondersteuning toekomstverkenningen met tijdhorizon 20-50 jaar   | ***   |
| Tijdresolutie                  | Ondersteuning toekomstverkenningen met tijdstap 1 maand – 1 jaar  | ***   |
| Analytische benadering         | Dynamisch procesmodel of dynamisch inzetbaar indien statisch, evenwichtsmodel of optimalisatiemodel                   | ***   |
| Endogeniteit model             | Minimaal gebruik endogene modelparameters   | ***   |
| Modelbeheer                    | Model in eigen beheer; toegang code   | **    |
| Doelgroep/gebruikers           | Beleidsrelevantie; eerdere of bestaande inzet in toekomstverkenningen   | ***   |
| Kalibratie                     | Kalibratie voor toepassing Vlaanderen   | ***   |
| Validatie                      | Gevalideerd   | ***   |
| Onzekerheidsanalyse            | Inzicht modelonzekerheid  | *     |
| Bronnen/publicaties            | Peer-reviewed publicaties, rapportages beleids- en lang-termijn toekomstverkenningen                                  | ***   |
| Modelkoppeling                 | Eerdere koppeling andere thematische modellen is voordeel; thematische modules dienen wel ontkoppeld te kunnen worden | ***   |
| Gebruiksvriendelijkheid        | Relatief eenvoudig zelf te installeren en toe te passen   | ***   |
| Robuustheid                    | Robuust voor bereik invoer vanuit systeemmodel of ontbreken van invoer (afhankelijk van functie in systeem)           | *     |
| Modelcontrole                  | Mogelijkheid model te onderbreken voor communicatie naar systeemmodel ; mogelijkheid systeemhistorie op te slaan      | ***   |
| Rekentijd                      | Volledige modelcyclus tot tijdhorizon in orde minuten   | *     |
| Modelperformantie              | Overeenstemming waargenomen ruimtelijk-dynamische patronen  | ***   |
| Afhankelijkheid gegevensbanken | Omvang database niet van invloed op inpasbaarheid; kalibratie gegevens laat dynamische toepassing toe                 | ***   |
| Software platform              | Staat inpassing SDM niet in de weg; voorkeur Windows  | ***   |

Tabel 8-1 Inpasbaarheidsscores demografisch model Federaal Planbureau per criterium

| Criterion                      | Toelichting   | Score |
|--------------------------------|---|-------|
| Afdekking relaties thema       | Thema voor verdieping wordt grotendeels (> 50 %) afgedekt tenzij relevantie systeemrelatie zeer hoog is;              | ***   |
| Modelinvoer                    | Kan werken met invoer variabelen te koppelen thema's op systeemniveau   | ***   |
| Modeluitvoer                   | Uitvoer naar variabelen op niveau systeemmodel (evt. na aggregatie, bijv. voorkeur zonder disaggregatie)              | ***   |
| Geografische dekking           | Gebiedsdekkend Vlaanderen   | ***   |
| Ruimtelijke differentiatie     | Ondersteuning ruimtelijke differentiatie vereist voor beleidsverkenningen   | *     |
| Ruimtelijke resolutie          | Indien ruimtelijk gedifferentieerd op raster 100-1000 m   | *     |
| Tijdhorizon                    | Ondersteuning toekomstverkenningen met tijdhorizon 20-50 jaar   | **    |
| Tijdresolutie                  | Ondersteuning toekomstverkenningen met tijdstap 1 maand – 1 jaar  | ***   |
| Analytische benadering         | Dynamisch procesmodel of dynamisch inzetbaar indien statisch, evenwichtsmodel of optimalisatiemodel                   | *     |
| Endogeniteit model             | Minimaal gebruik endogene modelparameters   | *     |
| Modelbeheer                    | Model in eigen beheer; toegang code   | ***   |
| Doelgroep/gebruikers           | Beleidsrelevantie; eerdere of bestaande inzet in toekomstverkenningen   | ***   |
| Kalibratie                     | Kalibratie voor toepassing Vlaanderen   | ***   |
| Validatie                      | Gevalideerd   | ***   |
| Onzekerheidsanalyse            | Inzicht modelonzekerheid  | *     |
| Bronnen/publicaties            | Peer-reviewed publicaties, rapportages beleids- en lang-termijn toekomstverkenningen                                  | ***   |
| Modelkoppeling                 | Eerdere koppeling andere thematische modellen is voordeel; thematische modules dienen wel ontkoppeld te kunnen worden | ***   |
| Gebruiksvriendelijkheid        | Relatief eenvoudig zelf te installeren en toe te passen   | *     |
| Robuustheid                    | Robuust voor bereik invoer vanuit systeemmodel of ontbreken van invoer (afhankelijk van functie in systeem)           | *     |
| Modelcontrole                  | Mogelijkheid model te onderbreken voor communicatie naar systeemmodel ; mogelijkheid systeemhistorie op te slaan      | *     |
| Rekentijd                      | Volledige modelcyclus tot tijdhorizon in orde minuten   | *     |
| Modelperformantie              | Overeenstemming waargenomen ruimtelijk-dynamische patronen  | **    |
| Afhankelijkheid gegevensbanken | Omvang database niet van invloed op inpasbaarheid; kalibratie gegevens laat dynamische toepassing toe                 | *     |
| Software platform              | Staat inpassing SDM niet in de weg; voorkeur Windows  | *     |

Tabel 8-2 Inpasbaarheidsscores HERMREG per criterium

| Criterion                      | Toelichting   | Score |
|--------------------------------|---|-------|
| Afdekking relaties thema       | Thema voor verdieping wordt grotendeels (> 50 %) afgedekt tenzij relevantie systeemrelatie zeer hoog is;              | ***   |
| Modelinvoer                    | Kan werken met invoer variabelen te koppelen thema's op systeemniveau   | ***   |
| Modeluitvoer                   | Uitvoer naar variabelen op niveau systeemmodel (evt. na aggregatie, bijv. voorkeur zonder disaggregatie)              | ***   |
| Geografische dekking           | Gebiedsdekkend Vlaanderen   | ***   |
| Ruimtelijke differentiatie     | Ondersteuning ruimtelijke differentiatie vereist voor beleidsverkenningen   | ***   |
| Ruimtelijke resolutie          | Indien ruimtelijk gedifferentieerd op raster 100-1000 m   | ***   |
| Tijdhorizon                    | Ondersteuning toekomstverkenningen met tijdhorizon 20-50 jaar   | ***   |
| Tijdresolutie                  | Ondersteuning toekomstverkenningen met tijdstap 1 maand – 1 jaar  | ***   |
| Analytische benadering         | Dynamisch procesmodel of dynamisch inzetbaar indien statisch, evenwichtsmodel of optimalisatiemodel                   | ***   |
| Endogeniteit model             | Minimaal gebruik endogene modelparameters   | *     |
| Modelbeheer                    | Model in eigen beheer; toegang code   | ***   |
| Doelgroep/gebruikers           | Beleidsrelevantie; eerdere of bestaande inzet in toekomstverkenningen   | ***   |
| Kalibratie                     | Kalibratie voor toepassing Vlaanderen   | ***   |
| Validatie                      | Gevalideerd   | **    |
| Onzekerheidsanalyse            | Inzicht modelonzekerheid  | **    |
| Bronnen/publicaties            | Peer-reviewed publicaties, rapportages beleids- en lang-termijn toekomstverkenningen                                  | ***   |
| Modelkoppeling                 | Eerdere koppeling andere thematische modellen is voordeel; thematische modules dienen wel ontkoppeld te kunnen worden | **    |
| Gebruiksvriendelijkheid        | Relatief eenvoudig zelf te installeren en toe te passen   | *     |
| Robuustheid                    | Robuust voor bereik invoer vanuit systeemmodel of ontbreken van invoer (afhankelijk van functie in systeem)           | **    |
| Modelcontrole                  | Mogelijkheid model te onderbreken voor communicatie naar systeemmodel ; mogelijkheid systeemhistorie op te slaan      | **    |
| Rekentijd                      | Volledige modelcyclus tot tijdhorizon in orde minuten   | **    |
| Modelperformantie              | Overeenstemming waargenomen ruimtelijk-dynamische patronen  | ***   |
| Afhankelijkheid gegevensbanken | Omvang database niet van invloed op inpasbaarheid; kalibratie gegevens laat dynamische toepassing toe                 | **    |
| Software platform              | Staat inpassing SDM niet in de weg; voorkeur Windows  | ***   |

Tabel 8-3 Inpasbaarheidsscores model RuimteModel per criterium

| Criterion                      | Toelichting   | Score |
|--------------------------------|---|-------|
| Afdekking relaties thema       | Thema voor verdieping wordt grotendeels (> 50 %) afgedekt tenzij relevantie systeemrelatie zeer hoog is;              | *     |
| Modelinvoer                    | Kan werken met invoer variabelen te koppelen thema's op systeemniveau   | **    |
| Modeluitvoer                   | Uitvoer naar variabelen op niveau systeemmodel (evt. na aggregatie, bijv. voorkeur zonder disaggregatie)              | ***   |
| Geografische dekking           | Gebiedsdekkend Vlaanderen   | ***   |
| Ruimtelijke differentiatie     | Ondersteuning ruimtelijke differentiatie vereist voor beleidsverkenningen   | **    |
| Ruimtelijke resolutie          | Indien ruimtelijk gedifferentieerd op raster 100-1000 m   | *     |
| Tijdhorizon                    | Ondersteuning toekomstverkenningen met tijdhorizon 20-50 jaar   | *     |
| Tijdresolutie                  | Ondersteuning toekomstverkenningen met tijdstap 1 maand – 1 jaar  | *     |
| Analytische benadering         | Dynamisch procesmodel of dynamisch inzetbaar indien statisch, evenwichtsmodel of optimalisatiemodel                   | *     |
| Endogeniteit model             | Minimaal gebruik endogene modelparameters   | *     |
| Modelbeheer                    | Model in eigen beheer; toegang code   | **    |
| Doelgroep/gebruikers           | Beleidsrelevantie; eerdere of bestaande inzet in toekomstverkenningen   | ***   |
| Kalibratie                     | Kalibratie voor toepassing Vlaanderen   | *     |
| Validatie                      | Gevalideerd   | *     |
| Onzekerheidsanalyse            | Inzicht modelonzekerheid  | *     |
| Bronnen/publicaties            | Peer-reviewed publicaties, rapportages beleids- en lang-termijn toekomstverkenningen                                  | ***   |
| Modelkoppeling                 | Eerdere koppeling andere thematische modellen is voordeel; thematische modules dienen wel ontkoppeld te kunnen worden | *     |
| Gebbruiksvriendelijkheid       | Relatief eenvoudig zelf te installeren en toe te passen   | **    |
| Robuustheid                    | Robuust voor bereik invoer vanuit systeemmodel of ontbreken van invoer (afhankelijk van functie in systeem)           | *     |
| Modelcontrole                  | Mogelijkheid model te onderbreken voor communicatie naar systeemmodel ; mogelijkheid systeemhistorie op te slaan      | *     |
| Rekentijd                      | Volledige modelcyclus tot tijdhorizon in orde minuten   | **    |
| Modelperformantie              | Overeenstemming waargenomen ruimtelijk-dynamische patronen  | *     |
| Afhankelijkheid gegevensbanken | Omvang database niet van invloed op inpasbaarheid; kalibratie gegevens laat dynamische toepassing toe                 | *     |
| Software platform              | Staat inpassing SDM niet in de weg; voorkeur Windows  | *     |

Tabel 8-4 Inpasbaarheidsscores model LARCH per criterium

| Criterion                      | Toelichting   | Score |
|--------------------------------|---|-------|
| Afdekking relaties thema       | Thema voor verdieping wordt grotendeels (> 50 %) afgedekt tenzij relevantie systeemrelatie zeer hoog is;              | *     |
| Modelinvoer                    | Kan werken met invoer variabelen te koppelen thema's op systeemniveau   | **    |
| Modeluitvoer                   | Uitvoer naar variabelen op niveau systeemmodel (evt. na aggregatie, bijv. voorkeur zonder disaggregatie)              | ***   |
| Geografische dekking           | Gebiedsdekkend Vlaanderen   | *     |
| Ruimtelijke differentiatie     | Ondersteuning ruimtelijke differentiatie vereist voor beleidsverkenningen   | ***   |
| Ruimtelijke resolutie          | Indien ruimtelijk gedifferentieerd op raster 100-1000 m   | ***   |
| Tijdhorizon                    | Ondersteuning toekomstverkenningen met tijdhorizon 20-50 jaar   | ***   |
| Tijdresolutie                  | Ondersteuning toekomstverkenningen met tijdstap 1 maand – 1 jaar  | ***   |
| Analytische benadering         | Dynamisch procesmodel of dynamisch inzetbaar indien statisch, evenwichtsmodel of optimalisatiemodel                   | ***   |
| Endogeniteit model             | Minimaal gebruik endogene modelparameters   | *     |
| Modelbeheer                    | Model in eigen beheer; toegang code   | ***   |
| Doelgroep/gebruikers           | Beleidsrelevantie; eerdere of bestaande inzet in toekomstverkenningen   | ***   |
| Kalibratie                     | Kalibratie voor toepassing Vlaanderen   | *     |
| Validatie                      | Gevalideerd   | ***   |
| Onzekerheidsanalyse            | Inzicht modelonzekerheid  | **    |
| Bronnen/publicaties            | Peer-reviewed publicaties, rapportages beleids- en lang-termijn toekomstverkenningen                                  | ***   |
| Modelkoppeling                 | Eerdere koppeling andere thematische modellen is voordeel; thematische modules dienen wel ontkoppeld te kunnen worden | ***   |
| Gebbruiksvriendelijkheid       | Relatief eenvoudig zelf te installeren en toe te passen   | **    |
| Robuustheid                    | Robuust voor bereik invoer vanuit systeemmodel of ontbreken van invoer (afhankelijk van functie in systeem)           | **    |
| Modelcontrole                  | Mogelijkheid model te onderbreken voor communicatie naar systeemmodel ; mogelijkheid systeemhistorie op te slaan      | *     |
| Rekentijd                      | Volledige modelcyclus tot tijdhorizon in orde minuten   | **    |
| Modelperformantie              | Overeenstemming waargenomen ruimtelijk-dynamische patronen  | ***   |
| Afhankelijkheid gegevensbanken | Omvang database niet van invloed op inpasbaarheid; kalibratie gegevens laat dynamische toepassing toe                 | *     |
| Software platform              | Staat inpassing SDM niet in de weg; voorkeur Windows  | *     |

Tabel 8-5 Inpasbaarheidsscores model PATTERN-LITE per criterium

| Criterion                      | Toelichting   | Score |
|--------------------------------|---|-------|
| Afdekking relaties thema       | Thema voor verdieping wordt grotendeels (> 50 %) afgedekt tenzij relevantie systeemrelatie zeer hoog is;              | **    |
| Modelinvoer                    | Kan werken met invoer variabelen te koppelen thema's op systeemniveau   | ***   |
| Modeluitvoer                   | Uitvoer naar variabelen op niveau systeemmodel (evt. na aggregatie, bijv. voorkeur zonder disaggregatie)              | ***   |
| Geografische dekking           | Gebiedsdekkend Vlaanderen   | **    |
| Ruimtelijke differentiatie     | Ondersteuning ruimtelijke differentiatie vereist voor beleidsverkenningen   | ***   |
| Ruimtelijke resolutie          | Indien ruimtelijk gedifferentieerd op raster 100-1000 m   | **    |
| Tijdhorizon                    | Ondersteuning toekomstverkenningen met tijdhorizon 20-50 jaar   | *     |
| Tijdresolutie                  | Ondersteuning toekomstverkenningen met tijdstap 1 maand – 1 jaar  | *     |
| Analytische benadering         | Dynamisch procesmodel of dynamisch inzetbaar indien statisch, evenwichtsmodel of optimalisatiemodel                   | **    |
| Endogeniteit model             | Minimaal gebruik endogene modelparameters   | *     |
| Modelbeheer                    | Model in eigen beheer; toegang code   | ***   |
| Doelgroep/gebruikers           | Beleidsrelevantie; eerdere of bestaande inzet in toekomstverkenningen   | ***   |
| Kalibratie                     | Kalibratie voor toepassing Vlaanderen   | ***   |
| Validatie                      | Gevalideerd   | *     |
| Onzekerheidsanalyse            | Inzicht modelonzekerheid  | *     |
| Bronnen/publicaties            | Peer-reviewed publicaties, rapportages beleids- en lang-termijn toekomstverkenningen                                  | **    |
| Modelkoppeling                 | Eerdere koppeling andere thematische modellen is voordeel; thematische modules dienen wel ontkoppeld te kunnen worden | ***   |
| Gebruiksvriendelijkheid        | Relatief eenvoudig zelf te installeren en toe te passen   | ***   |
| Robuustheid                    | Robuust voor bereik invoer vanuit systeemmodel of ontbreken van invoer (afhankelijk van functie in systeem)           | *     |
| Modelcontrole                  | Mogelijkheid model te onderbreken voor communicatie naar systeemmodel ; mogelijkheid systeemhistorie op te slaan      | *     |
| Rekentijd                      | Volledige modelcyclus tot tijdhorizon in orde minuten   | *     |
| Modelperformantie              | Overeenstemming waargenomen ruimtelijk-dynamische patronen  | *     |
| Afhankelijkheid gegevensbanken | Omvang database niet van invloed op inpasbaarheid; kalibratie gegevens laat dynamische toepassing toe                 | *     |
| Software platform              | Staat inpassing SDM niet in de weg; voorkeur Windows  | *     |

Tabel 8-6 Inpasbaarheidsscores model Arc-Nemo per criterium



| Criterion                      | Toelichting   | Score |
|--------------------------------|---|-------|
| Afdekking relaties thema       | Thema voor verdieping wordt grotendeels (> 50 %) afgedekt tenzij relevantie systeemrelatie zeer hoog is;              | **    |
| Modelinvoer                    | Kan werken met invoer variabelen te koppelen thema's op systeemniveau   | ***   |
| Modeluitvoer                   | Uitvoer naar variabelen op niveau systeemmodel (evt. na aggregatie, bijv. voorkeur zonder disaggregatie)              | ***   |
| Geografische dekking           | Gebiedsdekkend Vlaanderen   | ***   |
| Ruimtelijke differentiatie     | Ondersteuning ruimtelijke differentiatie vereist voor beleidsverkenningen   | *     |
| Ruimtelijke resolutie          | Indien ruimtelijk gedifferentieerd op raster 100-1000 m   | *     |
| Tijdhorizon                    | Ondersteuning toekomstverkenningen met tijdhorizon 20-50 jaar   | **    |
| Tijdresolutie                  | Ondersteuning toekomstverkenningen met tijdstap 1 maand – 1 jaar  | *     |
| Analytische benadering         | Dynamisch procesmodel of dynamisch inzetbaar indien statisch, evenwichtsmodel of optimalisatiemodel                   | *     |
| Endogeniteit model             | Minimaal gebruik endogene modelparameters   | *     |
| Modelbeheer                    | Model in eigen beheer; toegang code   | ***   |
| Doelgroep/gebruikers           | Beleidsrelevantie; eerdere of bestaande inzet in toekomstverkenningen   | ***   |
| Kalibratie                     | Kalibratie voor toepassing Vlaanderen   | ***   |
| Validatie                      | Gevalideerd   | ***   |
| Onzekerheidsanalyse            | Inzicht modelonzekerheid  | *     |
| Bronnen/publicaties            | Peer-reviewed publicaties, rapportages beleids- en lang-termijn toekomstverkenningen                                  | ***   |
| Modelkoppeling                 | Eerdere koppeling andere thematische modellen is voordeel; thematische modules dienen wel ontkoppeld te kunnen worden | **    |
| Gebbruiksvriendelijkheid       | Relatief eenvoudig zelf te installeren en toe te passen   | *     |
| Robuustheid                    | Robuust voor bereik invoer vanuit systeemmodel of ontbreken van invoer (afhankelijk van functie in systeem)           | *     |
| Modelcontrole                  | Mogelijkheid model te onderbreken voor communicatie naar systeemmodel ; mogelijkheid systeemhistorie op te slaan      | *     |
| Rekentijd                      | Volledige modelcyclus tot tijdhorizon in orde minuten   | *     |
| Modelperformantie              | Overeenstemming waargenomen ruimtelijk-dynamische patronen  | **    |
| Afhankelijkheid gegevensbanken | Omvang database niet van invloed op inpasbaarheid; kalibratie gegevens laat dynamische toepassing toe                 | ***   |
| Software platform              | Staat inpassing SDM niet in de weg; voorkeur Windows  | *     |

Tabel 8-7 Inpasbaarheidsscores model TIMES per criterium

| Criterion                      | Toelichting   | Score |
|--------------------------------|---|-------|
| Afdekking relaties thema       | Thema voor verdieping wordt grotendeels (> 50 %) afgedekt tenzij relevantie systeemrelatie zeer hoog is;              | **    |
| Modelinvoer                    | Kan werken met invoer variabelen te koppelen thema's op systeemniveau   | ***   |
| Modeluitvoer                   | Uitvoer naar variabelen op niveau systeemmodel (evt. na aggregatie, bijv. voorkeur zonder disaggregatie)              | ***   |
| Geografische dekking           | Gebiedsdekkend Vlaanderen   | ***   |
| Ruimtelijke differentiatie     | Ondersteuning ruimtelijke differentiatie vereist voor beleidsverkenningen   | *     |
| Ruimtelijke resolutie          | Indien ruimtelijk gedifferentieerd op raster 100-1000 m   | *     |
| Tijdhorizon                    | Ondersteuning toekomstverkenningen met tijdhorizon 20-50 jaar   | ***   |
| Tijdresolutie                  | Ondersteuning toekomstverkenningen met tijdstap 1 maand – 1 jaar  | **    |
| Analytische benadering         | Dynamisch procesmodel of dynamisch inzetbaar indien statisch, evenwichtsmodel of optimalisatiemodel                   | *     |
| Endogeniteit model             | Minimaal gebruik endogene modelparameters   | **    |
| Modelbeheer                    | Model in eigen beheer; toegang code   | **    |
| Doelgroep/gebruikers           | Beleidsrelevantie; eerdere of bestaande inzet in toekomstverkenningen   | ***   |
| Kalibratie                     | Kalibratie voor toepassing Vlaanderen   | ***   |
| Validatie                      | Gevalideerd   | ***   |
| Onzekerheidsanalyse            | Inzicht modelonzekerheid  | *     |
| Bronnen/publicaties            | Peer-reviewed publicaties, rapportages beleids- en lang-termijn toekomstverkenningen                                  | ***   |
| Modelkoppeling                 | Eerdere koppeling andere thematische modellen is voordeel; thematische modules dienen wel ontkoppeld te kunnen worden | ***   |
| Gebbruiksvriendelijkheid       | Relatief eenvoudig zelf te installeren en toe te passen   | *     |
| Robuustheid                    | Robuust voor bereik invoer vanuit systeemmodel of ontbreken van invoer (afhankelijk van functie in systeem)           | *     |
| Modelcontrole                  | Mogelijkheid model te onderbreken voor communicatie naar systeemmodel ; mogelijkheid systeemhistorie op te slaan      | *     |
| Rekentijd                      | Volledige modelcyclus tot tijdhorizon in orde minuten   | *     |
| Modelperformantie              | Overeenstemming waargenomen ruimtelijk-dynamische patronen  | *     |
| Afhankelijkheid gegevensbanken | Omvang database niet van invloed op inpasbaarheid; kalibratie gegevens laat dynamische toepassing toe                 | *     |
| Software platform              | Staat inpassing SDM niet in de weg; voorkeur Windows  | *     |

Tabel 8-8 Inpasbaarheidsscores model SAVER-LEAP per criterium

| Criterion                      | Toelichting   | Score |
|--------------------------------|---|-------|
| Afdekking relaties thema       | Thema voor verdieping wordt grotendeels (> 50 %) afgedekt tenzij relevantie systeemrelatie zeer hoog is;              | **    |
| Modelinvoer                    | Kan werken met invoer variabelen te koppelen thema's op systeemniveau   | ***   |
| Modeluitvoer                   | Uitvoer naar variabelen op niveau systeemmodel (evt. na aggregatie, bijv. voorkeur zonder disaggregatie)              | ***   |
| Geografische dekking           | Gebiedsdekkend Vlaanderen   | **    |
| Ruimtelijke differentiatie     | Ondersteuning ruimtelijke differentiatie vereist voor beleidsverkenningen   | ***   |
| Ruimtelijke resolutie          | Indien ruimtelijk gedifferentieerd op raster 100-1000 m   | **    |
| Tijdhorizon                    | Ondersteuning toekomstverkenningen met tijdhorizon 20-50 jaar   | **    |
| Tijdresolutie                  | Ondersteuning toekomstverkenningen met tijdstap 1 maand – 1 jaar  | *     |
| Analytische benadering         | Dynamisch procesmodel of dynamisch inzetbaar indien statisch, evenwichtsmodel of optimalisatiemodel                   | **    |
| Endogeniteit model             | Minimaal gebruik endogene modelparameters   | *     |
| Modelbeheer                    | Model in eigen beheer; toegang code   | ***   |
| Doelgroep/gebruikers           | Beleidsrelevantie; eerdere of bestaande inzet in toekomstverkenningen   | ***   |
| Kalibratie                     | Kalibratie voor toepassing Vlaanderen   | ***   |
| Validatie                      | Gevalideerd   | *     |
| Onzekerheidsanalyse            | Inzicht modelonzekerheid  | *     |
| Bronnen/publicaties            | Peer-reviewed publicaties, rapportages beleids- en lang-termijn toekomstverkenningen                                  | **    |
| Modelkoppeling                 | Eerdere koppeling andere thematische modellen is voordeel; thematische modules dienen wel ontkoppeld te kunnen worden | ***   |
| Gebbruiksvriendelijkheid       | Relatief eenvoudig zelf te installeren en toe te passen   | ***   |
| Robuustheid                    | Robuust voor bereik invoer vanuit systeemmodel of ontbreken van invoer (afhankelijk van functie in systeem)           | *     |
| Modelcontrole                  | Mogelijkheid model te onderbreken voor communicatie naar systeemmodel ; mogelijkheid systeemhistorie op te slaan      | *     |
| Rekentijd                      | Volledige modelcyclus tot tijdhorizon in orde minuten   | **    |
| Modelperformantie              | Overeenstemming waargenomen ruimtelijk-dynamische patronen  | *     |
| Afhankelijkheid gegevensbanken | Omvang database niet van invloed op inpasbaarheid; kalibratie gegevens laat dynamische toepassing toe                 | *     |
| Software platform              | Staat inpassing SDM niet in de weg; voorkeur Windows  | *     |

Tabel 8-9 Inpasbaarheidsscores model SELES per criterium

| Criterion                      | Toelichting   | Score |
|--------------------------------|---|-------|
| Afdekking relaties thema       | Thema voor verdieping wordt grotendeels (> 50 %) afgedekt tenzij relevantie systeemrelatie zeer hoog is;              | **    |
| Modelinvoer                    | Kan werken met invoer variabelen te koppelen thema's op systeemniveau   | ***   |
| Modeluitvoer                   | Uitvoer naar variabelen op niveau systeemmodel (evt. na aggregatie, bijv.voorkeur zonder disaggregatie)               | ***   |
| Geografische dekking           | Gebiedsdekkend Vlaanderen   | ***   |
| Ruimtelijke differentiatie     | Ondersteuning ruimtelijke differentiatie vereist voor beleidsverkenningen   | ***   |
| Ruimtelijke resolutie          | Indien ruimtelijk gedifferentieerd op raster 100-1000 m   | ***   |
| Tijdhorizon                    | Ondersteuning toekomstverkenningen met tijdhorizon 20-50 jaar   | ***   |
| Tijdresolutie                  | Ondersteuning toekomstverkenningen met tijdstap 1 maand – 1 jaar  | ***   |
| Analytische benadering         | Dynamisch procesmodel of dynamisch inzetbaar indien statisch, evenwichtsmodel of optimalisatiemodel                   | ***   |
| Endogeniteit model             | Minimaal gebruik endogene modelparameters   | **    |
| Modelbeheer                    | Model in eigen beheer; toegang code   | ***   |
| Doelgroep/gebruikers           | Beleidsrelevantie; eerdere of bestaande inzet in toekomstverkenningen   | *     |
| Kalibratie                     | Kalibratie voor toepassing Vlaanderen   | **    |
| Validatie                      | Gevalideerd   | *     |
| Onzekerheidsanalyse            | Inzicht modelonzekerheid  | *     |
| Bronnen/publicaties            | Peer-reviewed publicaties, rapportages beleids- en lang-termijn toekomstverkenningen                                  | **    |
| Modelkoppeling                 | Eerdere koppeling andere thematische modellen is voordeel; thematische modules dienen wel ontkoppeld te kunnen worden | **    |
| Gebruiksvriendelijkheid        | Relatief eenvoudig zelf te installeren en toe te passen   | *     |
| Robuustheid                    | Robuust voor bereik invoer vanuit systeemmodel of ontbreken van invoer (afhankelijk van functie in systeem)           | *     |
| Modelcontrole                  | Mogelijkheid model te onderbreken voor communicatie naar systeemmodel ; mogelijkheid systeemhistorie op te slaan      | ***   |
| Rekentijd                      | Volledige modelcyclus tot tijdhorizon in orde minuten   | *     |
| Modelperformantie              | Overeenstemming waargenomen ruimtelijk-dynamische patronen  | **    |
| Afhankelijkheid gegevensbanken | Omvang database niet van invloed op inpasbaarheid; kalibratie gegevens laat dynamische toepassing toe                 | *     |
| Software platform              | Staat inpassing SDM niet in de weg; voorkeur Windows  | **    |

Tabel 8-10 Inpasbaarheidsscores model ATLAS-Transport per criterium

| Criterion                      | Toelichting   | Score |
|--------------------------------|---|-------|
| Afdekking relaties thema       | Thema voor verdieping wordt grotendeels (> 50 %) afgedekt tenzij relevantie systeemrelatie zeer hoog is;              | ***   |
| Modelinvoer                    | Kan werken met invoer variabelen te koppelen thema's op systeemniveau   | ***   |
| Modeluitvoer                   | Uitvoer naar variabelen op niveau systeemmodel (evt. na aggregatie, bijv. voorkeur zonder disaggregatie)              | ***   |
| Geografische dekking           | Gebiedsdekkend Vlaanderen   | ***   |
| Ruimtelijke differentiatie     | Ondersteuning ruimtelijke differentiatie vereist voor beleidsverkenningen   | ***   |
| Ruimtelijke resolutie          | Indien ruimtelijk gedifferentieerd op raster 100-1000 m   | ***   |
| Tijdhorizon                    | Ondersteuning toekomstverkenningen met tijdhorizon 20-50 jaar   | **    |
| Tijdresolutie                  | Ondersteuning toekomstverkenningen met tijdstap 1 maand – 1 jaar  | ***   |
| Analytische benadering         | Dynamisch procesmodel of dynamisch inzetbaar indien statisch, evenwichtsmodel of optimalisatiemodel                   | ***   |
| Endogeniteit model             | Minimaal gebruik endogene modelparameters   | *     |
| Modelbeheer                    | Model in eigen beheer; toegang code   | ***   |
| Doelgroep/gebruikers           | Beleidsrelevantie; eerdere of bestaande inzet in toekomstverkenningen   | ***   |
| Kalibratie                     | Kalibratie voor toepassing Vlaanderen   | ***   |
| Validatie                      | Gevalideerd   | **    |
| Onzekerheidsanalyse            | Inzicht modelonzekerheid  | **    |
| Bronnen/publicaties            | Peer-reviewed publicaties, rapportages beleids- en lang-termijn toekomstverkenningen                                  | **    |
| Modelkoppeling                 | Eerdere koppeling andere thematische modellen is voordeel; thematische modules dienen wel ontkoppeld te kunnen worden | ***   |
| Gebbruiksvriendelijkheid       | Relatief eenvoudig zelf te installeren en toe te passen   | *     |
| Robuustheid                    | Robuust voor bereik invoer vanuit systeemmodel of ontbreken van invoer (afhankelijk van functie in systeem)           | *     |
| Modelcontrole                  | Mogelijkheid model te onderbreken voor communicatie naar systeemmodel ; mogelijkheid systeemhistorie op te slaan      | *     |
| Rekentijd                      | Volledige modelcyclus tot tijdhorizon in orde minuten   | *     |
| Modelperformantie              | Overeenstemming waargenomen ruimtelijk-dynamische patronen  | ***   |
| Afhankelijkheid gegevensbanken | Omvang database niet van invloed op inpasbaarheid; kalibratie gegevens laat dynamische toepassing toe                 | *     |
| Software platform              | Staat inpassing SDM niet in de weg; voorkeur Windows  | *     |

Tabel 8-11 Inpasbaarheidsscores nieuw waterkwaliteitsmodel per criterium

| Criterion                      | Toelichting   | Score |
|--------------------------------|---|-------|
| Afdekking relaties thema       | Thema voor verdieping wordt grotendeels (> 50 %) afgedekt tenzij relevantie systeemrelatie zeer hoog is;              | ***   |
| Modelinvoer                    | Kan werken met invoer variabelen te koppelen thema's op systeemniveau   | ***   |
| Modeluitvoer                   | Uitvoer naar variabelen op niveau systeemmodel (evt. na aggregatie, bijv. voorkeur zonder disaggregatie)              | ***   |
| Geografische dekking           | Gebiedsdekkend Vlaanderen   | ***   |
| Ruimtelijke differentiatie     | Ondersteuning ruimtelijke differentiatie vereist voor beleidsverkenningen   | ***   |
| Ruimtelijke resolutie          | Indien ruimtelijk gedifferentieerd op raster 100-1000 m   | **    |
| Tijdhorizon                    | Ondersteuning toekomstverkenningen met tijdhorizon 20-50 jaar   | **    |
| Tijdresolutie                  | Ondersteuning toekomstverkenningen met tijdstap 1 maand – 1 jaar  | **    |
| Analytische benadering         | Dynamisch procesmodel of dynamisch inzetbaar indien statisch, evenwichtsmodel of optimalisatiemodel                   | *     |
| Endogeniteit model             | Minimaal gebruik endogene modelparameters   | **    |
| Modelbeheer                    | Model in eigen beheer; toegang code   | **    |
| Doelgroep/gebruikers           | Beleidsrelevantie; eerdere of bestaande inzet in toekomstverkenningen   | ***   |
| Kalibratie                     | Kalibratie voor toepassing Vlaanderen   | ***   |
| Validatie                      | Gevalideerd   | ***   |
| Onzekerheidsanalyse            | Inzicht modelonzekerheid  | *     |
| Bronnen/publicaties            | Peer-reviewed publicaties, rapportages beleids- en lang-termijn toekomstverkenningen                                  | ***   |
| Modelkoppeling                 | Eerdere koppeling andere thematische modellen is voordeel; thematische modules dienen wel ontkoppeld te kunnen worden | **    |
| Gebbruiksvriendelijkheid       | Relatief eenvoudig zelf te installeren en toe te passen   | ***   |
| Robuustheid                    | Robuust voor bereik invoer vanuit systeemmodel of ontbreken van invoer (afhankelijk van functie in systeem)           | ***   |
| Modelcontrole                  | Mogelijkheid model te onderbreken voor communicatie naar systeemmodel ; mogelijkheid systeemhistorie op te slaan      | ***   |
| Rekentijd                      | Volledige modelcyclus tot tijdhorizon in orde minuten   | **    |
| Modelperformantie              | Overeenstemming waargenomen ruimtelijk-dynamische patronen  | **    |
| Afhankelijkheid gegevensbanken | Omvang database niet van invloed op inpasbaarheid; kalibratie gegevens laat dynamische toepassing toe                 | *     |
| Software platform              | Staat inpassing SDM niet in de weg; voorkeur Windows  | *     |

Tabel 8-12 Inpasbaarheidsscores model VLOPS per criterium

| Criterion                      | Toelichting   | Score |
|--------------------------------|---|-------|
| Afdekking relaties thema       | Thema voor verdieping wordt grotendeels (> 50 %) afgedekt tenzij relevantie systeemrelatie zeer hoog is;              | ***   |
| Modelinvoer                    | Kan werken met invoer variabelen te koppelen thema's op systeemniveau   | ***   |
| Modeluitvoer                   | Uitvoer naar variabelen op niveau systeemmodel (evt. na aggregatie, bijv.voorkeur zonder disaggregatie)               | ***   |
| Geografische dekking           | Gebiedsdekkend Vlaanderen   | **    |
| Ruimtelijke differentiatie     | Ondersteuning ruimtelijke differentiatie vereist voor beleidsverkenningen   | **    |
| Ruimtelijke resolutie          | Indien ruimtelijk gedifferentieerd op raster 100-1000 m   | **    |
| Tijdhorizon                    | Ondersteuning toekomstverkenningen met tijdhorizon 20-50 jaar   | ***   |
| Tijdresolutie                  | Ondersteuning toekomstverkenningen met tijdstap 1 maand – 1 jaar  | ***   |
| Analytische benadering         | Dynamisch procesmodel of dynamisch inzetbaar indien statisch, evenwichtsmodel of optimalisatiemodel                   | ***   |
| Endogeniteit model             | Minimaal gebruik endogene modelparameters   | ***   |
| Modelbeheer                    | Model in eigen beheer; toegang code   | ***   |
| Doelgroep/gebruikers           | Beleidsrelevantie; eerdere of bestaande inzet in toekomstverkenningen   | ***   |
| Kalibratie                     | Kalibratie voor toepassing Vlaanderen   | ***   |
| Validatie                      | Gevalideerd   | ***   |
| Onzekerheidsanalyse            | Inzicht modelonzekerheid  | *     |
| Bronnen/publicaties            | Peer-reviewed publicaties, rapportages beleids- en lang-termijn toekomstverkenningen                                  | ***   |
| Modelkoppeling                 | Eerdere koppeling andere thematische modellen is voordeel; thematische modules dienen wel ontkoppeld te kunnen worden | *     |
| Gebbruiksvriendelijkheid       | Relatief eenvoudig zelf te installeren en toe te passen   | *     |
| Robuustheid                    | Robuust voor bereik invoer vanuit systeemmodel of ontbreken van invoer (afhankelijk van functie in systeem)           | ***   |
| Modelcontrole                  | Mogelijkheid model te onderbreken voor communicatie naar systeemmodel ; mogelijkheid systeemhistorie op te slaan      | ***   |
| Rekentijd                      | Volledige modelcyclus tot tijdhorizon in orde minuten   | *     |
| Modelperformantie              | Overeenstemming waargenomen ruimtelijk-dynamische patronen  | ***   |
| Afhankelijkheid gegevensbanken | Omvang database niet van invloed op inpasbaarheid; kalibratie gegevens laat dynamische toepassing toe                 | ***   |
| Software platform              | Staat inpassing SDM niet in de weg; voorkeur Windows  | **    |

Tabel 8-13 Inpasbaarheidsscores model BELEUROS per criterium

| Criterion                      | Toelichting   | Score |
|--------------------------------|---|-------|
| Afdekking relaties thema       | Thema voor verdieping wordt grotendeels (> 50 %) afgedekt tenzij relevantie systeemrelatie zeer hoog is;              | ***   |
| Modelinvoer                    | Kan werken met invoer variabelen te koppelen thema's op systeemniveau   | ***   |
| Modeluitvoer                   | Uitvoer naar variabelen op niveau systeemmodel (evt. na aggregatie, bijv. voorkeur zonder disaggregatie)              | ***   |
| Geografische dekking           | Gebiedsdekkend Vlaanderen   | ***   |
| Ruimtelijke differentiatie     | Ondersteuning ruimtelijke differentiatie vereist voor beleidsverkenningen   | ***   |
| Ruimtelijke resolutie          | Indien ruimtelijk gedifferentieerd op raster 100-1000 m   | **    |
| Tijdhorizon                    | Ondersteuning toekomstverkenningen met tijdhorizon 20-50 jaar   | ***   |
| Tijdresolutie                  | Ondersteuning toekomstverkenningen met tijdstap 1 maand – 1 jaar  | ***   |
| Analytische benadering         | Dynamisch procesmodel of dynamisch inzetbaar indien statisch, evenwichtsmodel of optimalisatiemodel                   | ***   |
| Endogeniteit model             | Minimaal gebruik endogene modelparameters   | ***   |
| Modelbeheer                    | Model in eigen beheer; toegang code   | ***   |
| Doelgroep/gebruikers           | Beleidsrelevantie; eerdere of bestaande inzet in toekomstverkenningen   | ***   |
| Kalibratie                     | Kalibratie voor toepassing Vlaanderen   | ***   |
| Validatie                      | Gevalideerd   | ***   |
| Onzekerheidsanalyse            | Inzicht modelonzekerheid  | *     |
| Bronnen/publicaties            | Peer-reviewed publicaties, rapportages beleids- en lang-termijn toekomstverkenningen                                  | ***   |
| Modelkoppeling                 | Eerdere koppeling andere thematische modellen is voordeel; thematische modules dienen wel ontkoppeld te kunnen worden | *     |
| Gebruiksvriendelijkheid        | Relatief eenvoudig zelf te installeren en toe te passen   | *     |
| Robuustheid                    | Robuust voor bereik invoer vanuit systeemmodel of ontbreken van invoer (afhankelijk van functie in systeem)           | ***   |
| Modelcontrole                  | Mogelijkheid model te onderbreken voor communicatie naar systeemmodel ; mogelijkheid systeemhistorie op te slaan      | ***   |
| Rekentijd                      | Volledige modelcyclus tot tijdhorizon in orde minuten   | *     |
| Modelperformantie              | Overeenstemming waargenomen ruimtelijk-dynamische patronen  | ***   |
| Afhankelijkheid gegevensbanken | Omvang database niet van invloed op inpasbaarheid; kalibratie gegevens laat dynamische toepassing toe                 | ***   |
| Software platform              | Staat inpassing SDM niet in de weg; voorkeur Windows  | *     |

Tabel 8-14 Inpasbaarheidsscores model AURORA per criterium



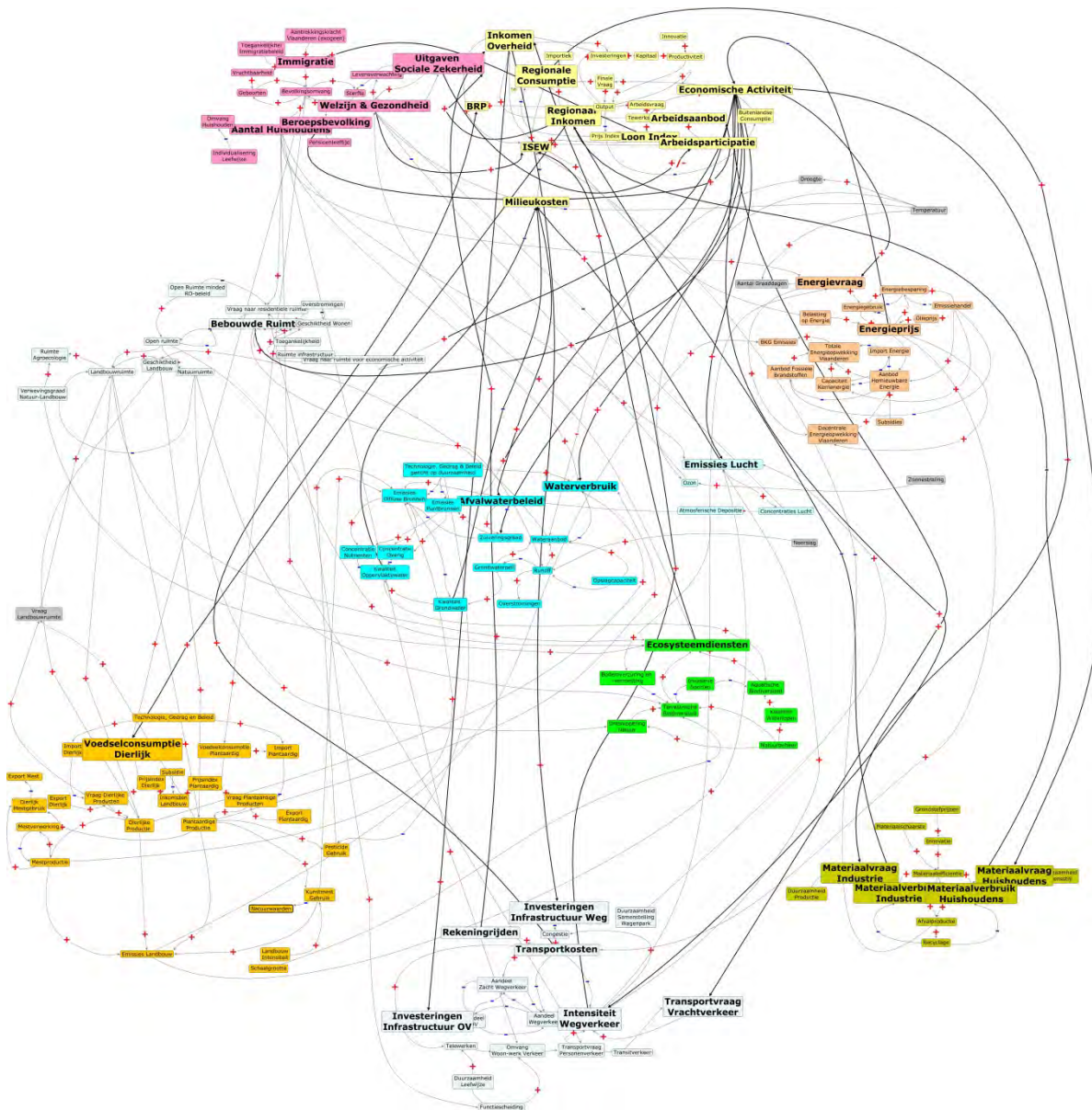
| Criterion                      | Toelichting   | Score |
|--------------------------------|---|-------|
| Afdekking relaties thema       | Thema voor verdieping wordt grotendeels (> 50 %) afgedekt tenzij relevantie systeemrelatie zeer hoog is;              | ***   |
| Modelinvoer                    | Kan werken met invoer variabelen te koppelen thema's op systeemniveau   | ***   |
| Modeluitvoer                   | Uitvoer naar variabelen op niveau systeemmodel (evt. na aggregatie, bijv. voorkeur zonder disaggregatie)              | ***   |
| Geografische dekking           | Gebiedsdekkend Vlaanderen   | ***   |
| Ruimtelijke differentiatie     | Ondersteuning ruimtelijke differentiatie vereist voor beleidsverkenningen   | *     |
| Ruimtelijke resolutie          | Indien ruimtelijk gedifferentieerd op raster 100-1000 m   | *     |
| Tijdhorizon                    | Ondersteuning toekomstverkenningen met tijdhorizon 20-50 jaar   | **    |
| Tijdresolutie                  | Ondersteuning toekomstverkenningen met tijdstap 1 maand – 1 jaar  | ***   |
| Analytische benadering         | Dynamisch procesmodel of dynamisch inzetbaar indien statisch, evenwichtsmodel of optimalisatiemodel                   | ***   |
| Endogeniteit model             | Minimaal gebruik endogene modelparameters   | **    |
| Modelbeheer                    | Model in eigen beheer; toegang code   | **    |
| Doelgroep/gebruikers           | Beleidsrelevantie; eerdere of bestaande inzet in toekomstverkenningen   | *     |
| Kalibratie                     | Kalibratie voor toepassing Vlaanderen   | ***   |
| Validatie                      | Gevalideerd   | *     |
| Onzekerheidsanalyse            | Inzicht modelonzekerheid  | *     |
| Bronnen/publicaties            | Peer-reviewed publicaties, rapportages beleids- en lang-termijn toekomstverkenningen                                  | ***   |
| Modelkoppeling                 | Eerdere koppeling andere thematische modellen is voordeel; thematische modules dienen wel ontkoppeld te kunnen worden | *     |
| Gebruiksvriendelijkheid        | Relatief eenvoudig zelf te installeren en toe te passen   | ***   |
| Robuustheid                    | Robuust voor bereik invoer vanuit systeemmodel of ontbreken van invoer (afhankelijk van functie in systeem)           | *     |
| Modelcontrole                  | Mogelijkheid model te onderbreken voor communicatie naar systeemmodel ; mogelijkheid systeemhistorie op te slaan      | ***   |
| Rekentijd                      | Volledige modelcyclus tot tijdhorizon in orde minuten   | ***   |
| Modelperformantie              | Overeenstemming waargenomen ruimtelijk-dynamische patronen  | **    |
| Afhankelijkheid gegevensbanken | Omvang database niet van invloed op inpasbaarheid; kalibratie gegevens laat dynamische toepassing toe                 | **    |
| Software platform              | Staat inpassing SDM niet in de weg; voorkeur Windows  | *     |

Tabel 8-15 Inpasbaarheidsscores systeemdynamisch model huishoudelijk afval per criterium

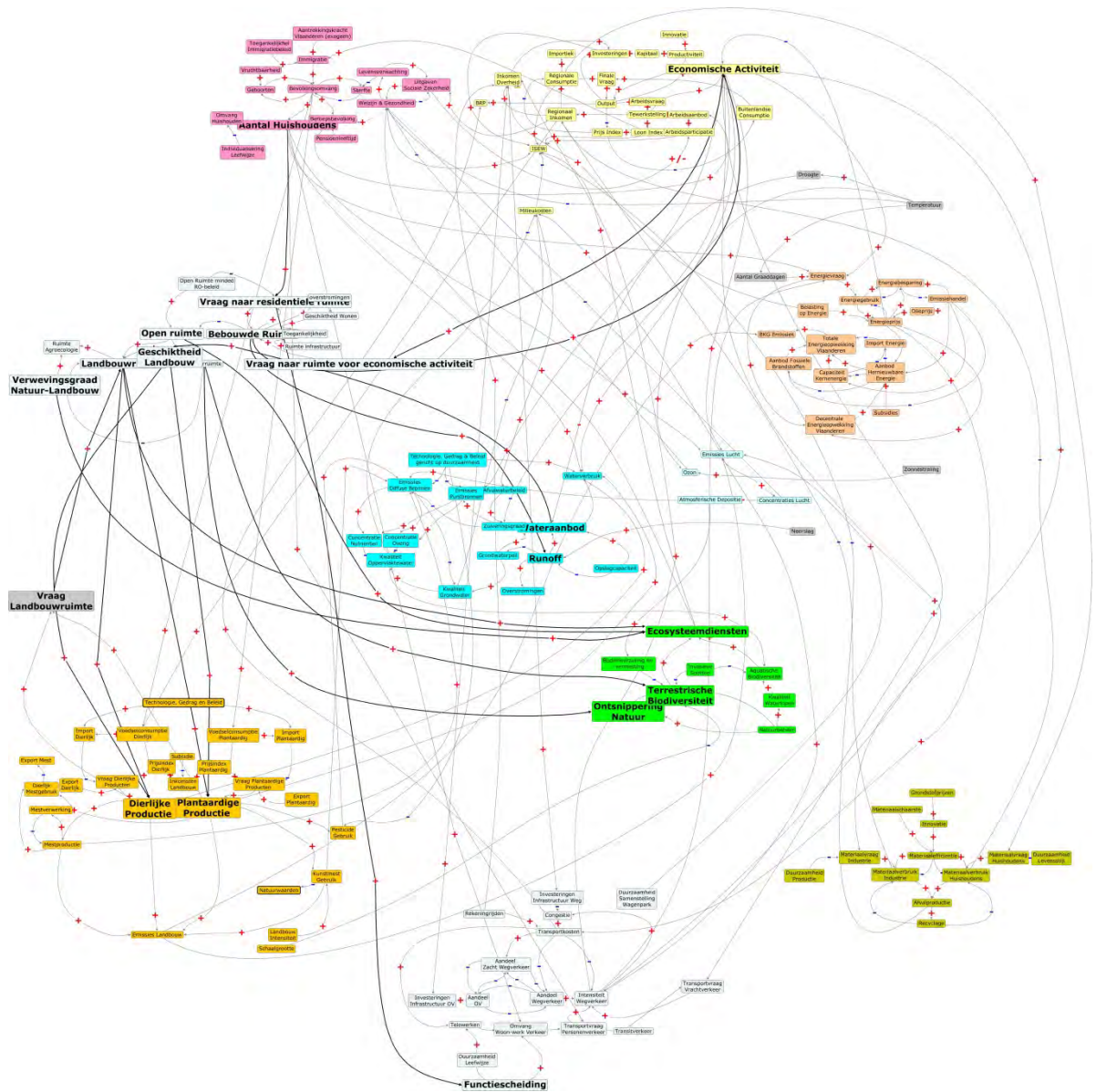
| Criterion                      | Toelichting   | Score |
|--------------------------------|---|-------|
| Afdekking relaties thema       | Thema voor verdieping wordt grotendeels (> 50 %) afgedekt tenzij relevantie systeemrelatie zeer hoog is;              | **    |
| Modelinvoer                    | Kan werken met invoer variabelen te koppelen thema's op systeemniveau   | ***   |
| Modeluitvoer                   | Uitvoer naar variabelen op niveau systeemmodel (evt. na aggregatie, bijv. voorkeur zonder disaggregatie)              | ***   |
| Geografische dekking           | Gebiedsdekkend Vlaanderen   | ***   |
| Ruimtelijke differentiatie     | Ondersteuning ruimtelijke differentiatie vereist voor beleidsverkenningen   | *     |
| Ruimtelijke resolutie          | Indien ruimtelijk gedifferentieerd op raster 100-1000 m   | *     |
| Tijdhorizon                    | Ondersteuning toekomstverkenningen met tijdhorizon 20-50 jaar   | ***   |
| Tijdresolutie                  | Ondersteuning toekomstverkenningen met tijdstap 1 maand – 1 jaar  | *     |
| Analytische benadering         | Dynamisch procesmodel of dynamisch inzetbaar indien statisch, evenwichtsmodel of optimalisatiemodel                   | *     |
| Endogeniteit model             | Minimaal gebruik endogene modelparameters   | *     |
| Modelbeheer                    | Model in eigen beheer; toegang code   | ***   |
| Doelgroep/gebruikers           | Beleidsrelevantie; eerdere of bestaande inzet in toekomstverkenningen   | ***   |
| Kalibratie                     | Kalibratie voor toepassing Vlaanderen   | ***   |
| Validatie                      | Gevalideerd   | ***   |
| Onzekerheidsanalyse            | Inzicht modelonzekerheid  | *     |
| Bronnen/publicaties            | Peer-reviewed publicaties, rapportages beleids- en lang-termijn toekomstverkenningen                                  | ***   |
| Modelkoppeling                 | Eerdere koppeling andere thematische modellen is voordeel; thematische modules dienen wel ontkoppeld te kunnen worden | **    |
| Gebruiksvriendelijkheid        | Relatief eenvoudig zelf te installeren en toe te passen   | *     |
| Robuustheid                    | Robuust voor bereik invoer vanuit systeemmodel of ontbreken van invoer (afhankelijk van functie in systeem)           | *     |
| Modelcontrole                  | Mogelijkheid model te onderbreken voor communicatie naar systeemmodel ; mogelijkheid systeemhistorie op te slaan      | *     |
| Rekentijd                      | Volledige modelcyclus tot tijdhorizon in orde minuten   | *     |
| Modelperformantie              | Overeenstemming waargenomen ruimtelijk-dynamische patronen  | **    |
| Afhankelijkheid gegevensbanken | Omvang database niet van invloed op inpasbaarheid; kalibratie gegevens laat dynamische toepassing toe                 | *     |
| Software platform              | Staat inpassing SDM niet in de weg; voorkeur Windows  | *     |

Tabel 8-16 Inpasbaarheidsscores Milieu Kosten Model Lucht & Klimaat per criterium

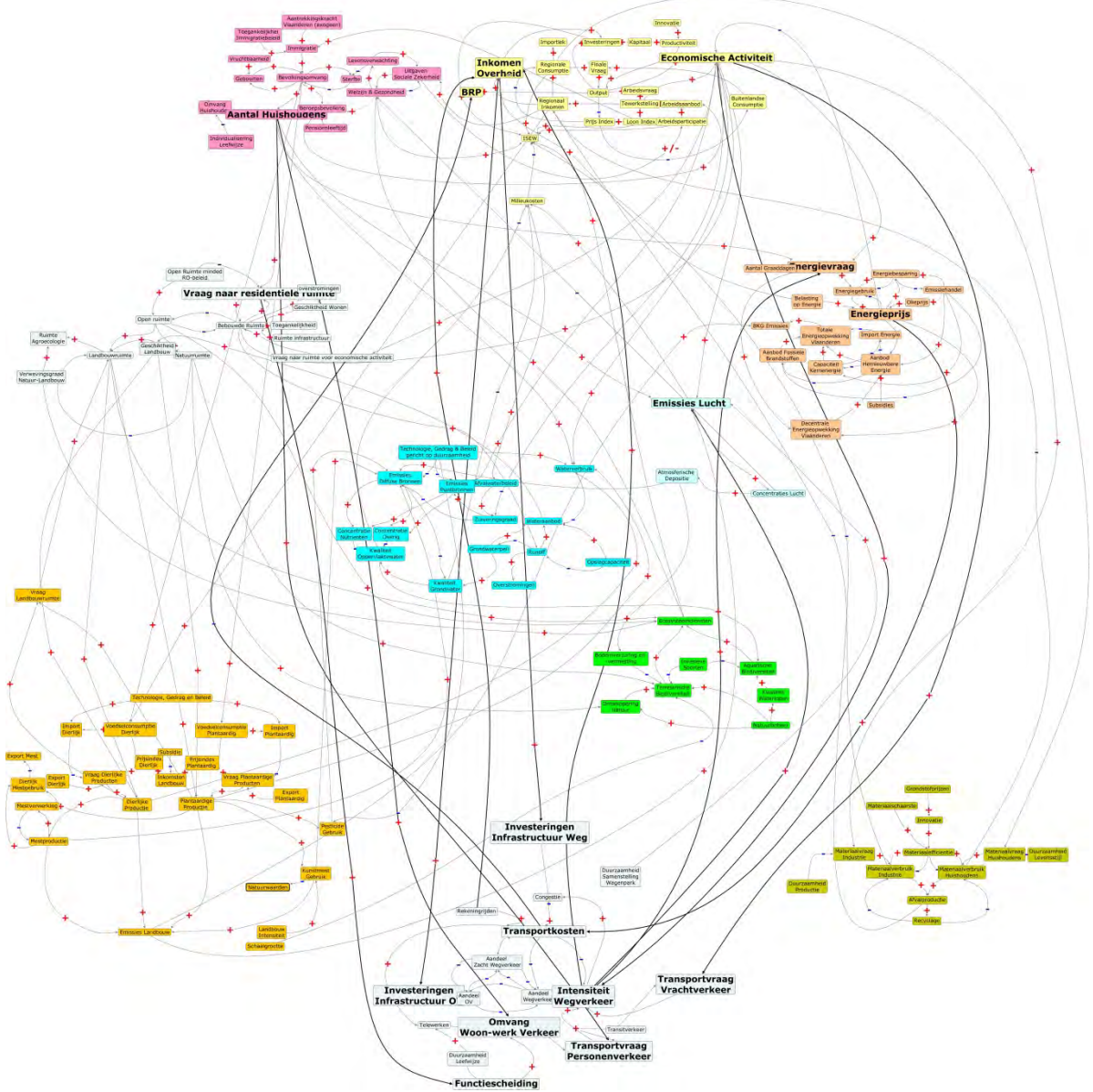




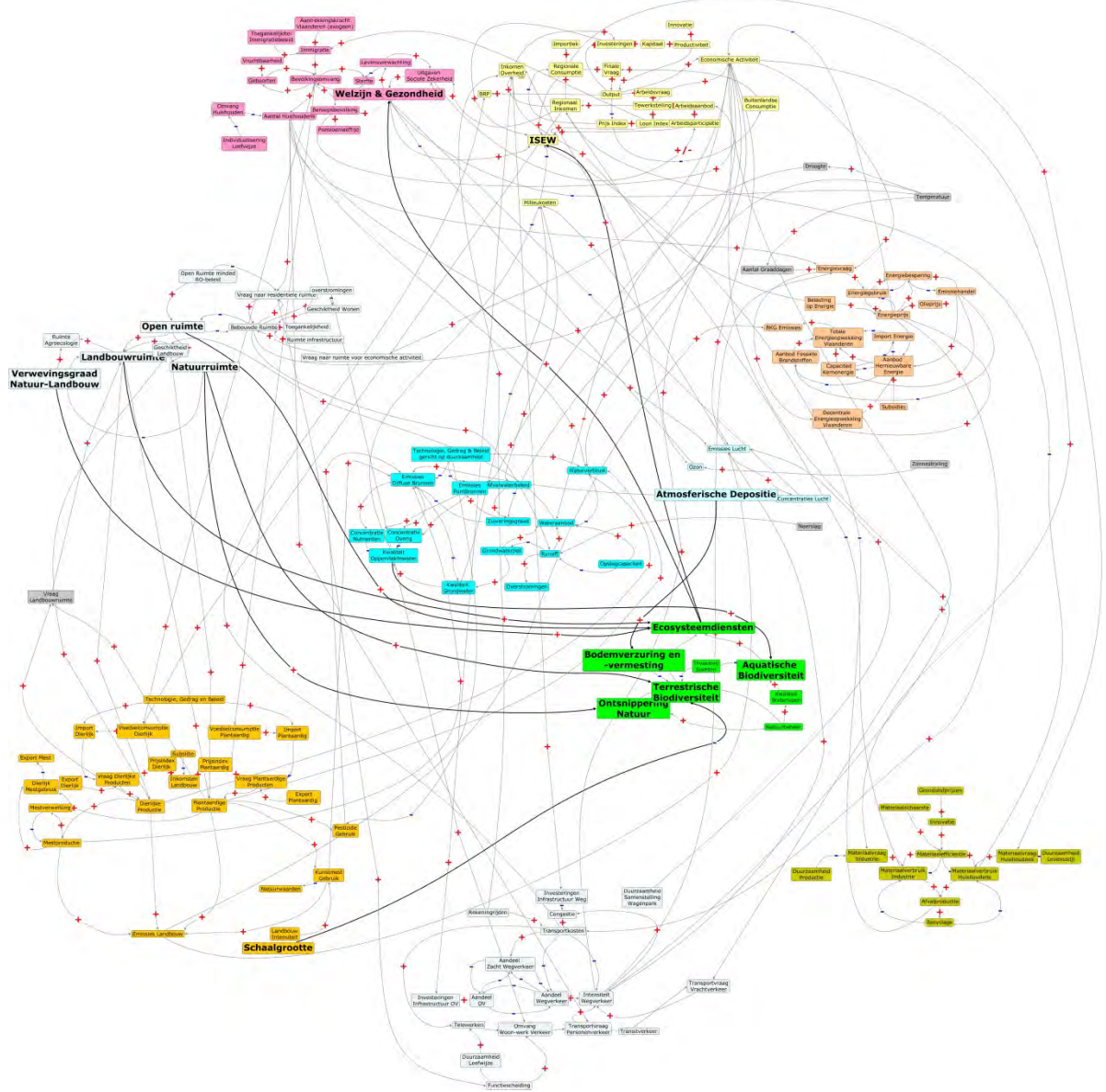
Figuur 8-13 Systemintegratie thema Economie met andere thema's



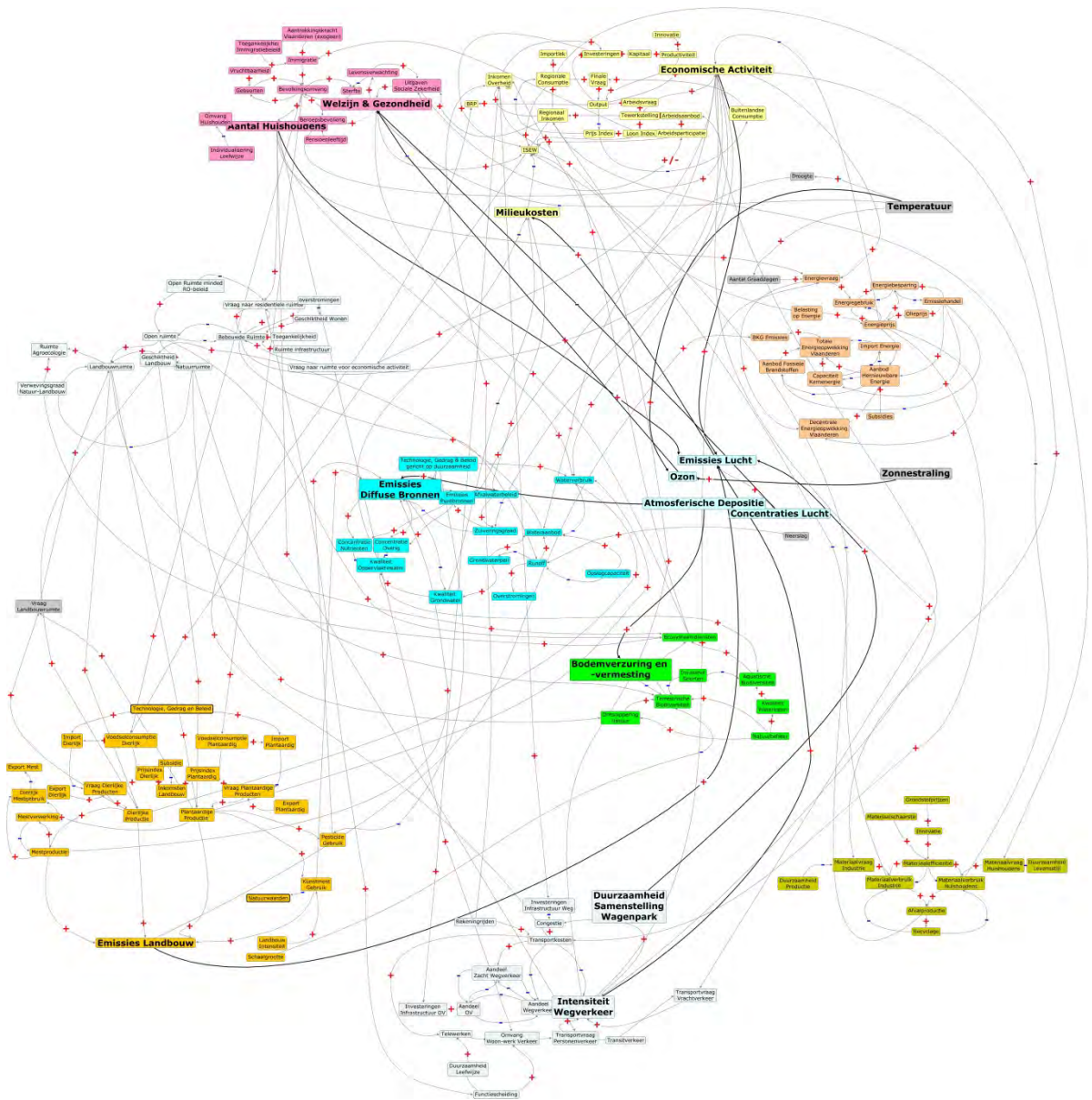
Figuur 8-14 Systemintegratie thema Ruimtegebruik met andere thema's



Figuur 8-15 Systemintegratie thema Mobiliteit met andere thema's

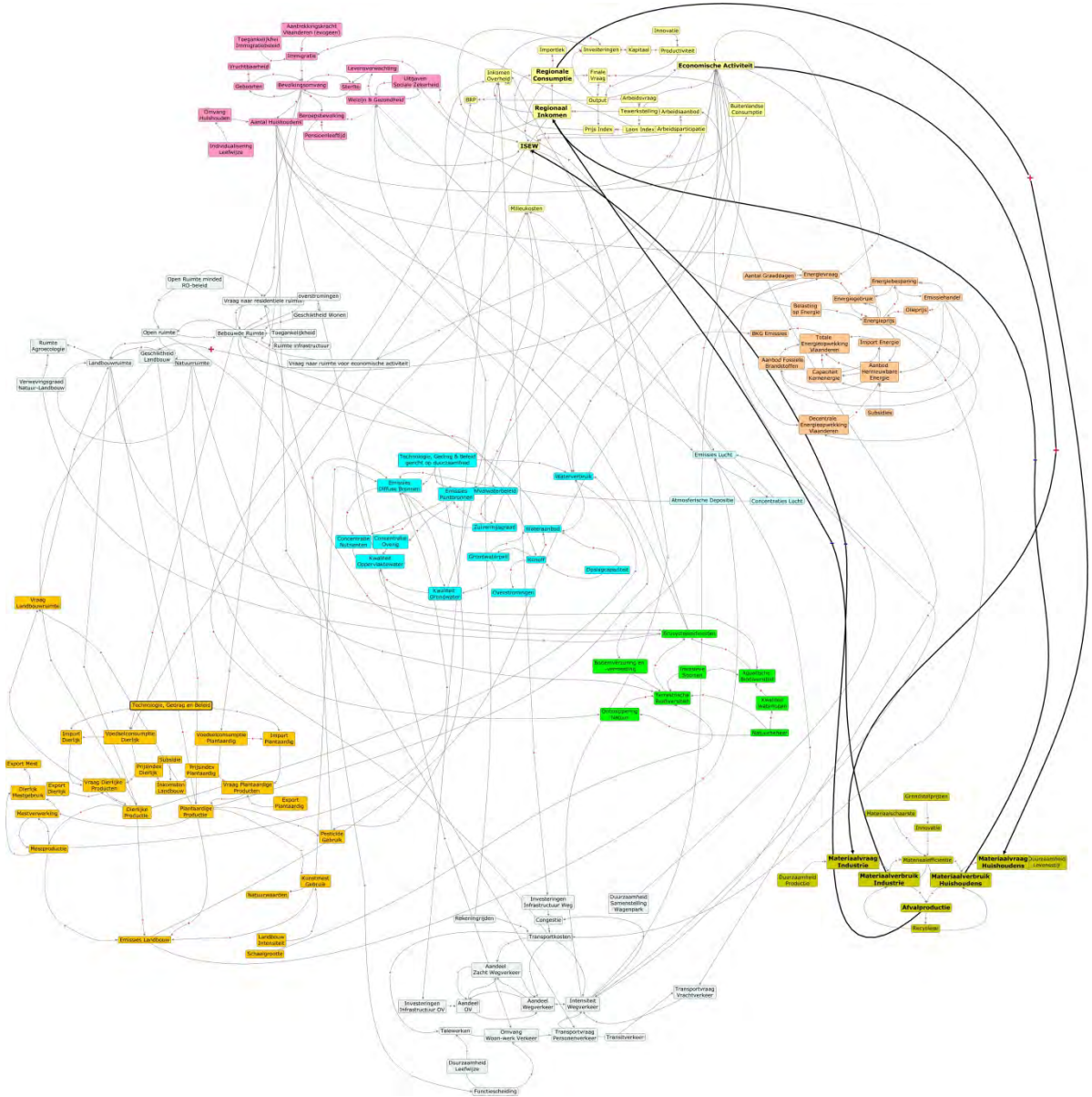


Figuur 8-16 Systemintegratie thema Natuur met andere thema's



Figuur 8-17 Systemintegratie thema Luchtkwaliteit met andere thema's





Figuur 8-18 Systemintegratie thema Materiaalgebruik met andere thema's