

Kwalitatieve modellen

voor interactieve milieubeleidsadviesing

Door Frank van Kouwen

Studentnummer: 9709967
Studierichting: Algemene Informatica
Scriptienummer: INF/SCR-03-32
Datum: 30 juli 2003

Voorwoord

Na ruim negen maanden op het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) een plezierige en leerzame tijd te hebben gehad, is het nu dan toch zover: mijn afstudeeronderzoek loopt ten einde. Het is een bijzonder leerzaam onderzoek geweest, dat veel uitdaging bood omdat het zich bevindt op het raakvlak van Informatica en Milieuwetenschappen. Technieken uit de Informatica toepassen voor het ontwikkelen van milieubeleid, dat leek mij wel wat toen ik bij het RIVM begon. Gaandeweg vorderde het onderzoek en kwam ik erachter dat er op dit terrein nog een groot onbegaan gebied te verkennen valt. Interactieve modellen ter ondersteuning van milieubeleid zijn duidelijk “hot”, maar veel onderzoek is er nog niet naar gedaan. Veel technieken uit de Informatica worden in de praktijk al veelvuldig gebruikt voor het domein van de medische wetenschap. Voor het specifieke domein van milieuproblemen gebeurt dit nog nauwelijks. Ik vond het erg interessant om te onderzoeken wat de mogelijkheden zijn van dergelijke technieken voor dit domein.

Tijdens mijn stageperiode heb ik van vele mensen ondersteuning gekregen, die ik bij deze graag wil bedanken. In de eerste plaats mijn dagelijkse begeleiders van het RIVM: Peter Heuberger en Harm van den Heiligenberg. Gedurende het gehele traject hebben zij mij ondersteund. Daarnaast wil ik Aldrik Bakema bedanken dat hij de stageplaats voor mij geregeld heeft. Vanuit de Universiteit Utrecht hebben Eveline Helsper en Silja Renooij dit afstudeeronderzoek mogelijk gemaakt. Als begeleiders hebben ze er beiden zeer veel tijd in gestoken; ze hebben conceptversies van deze scriptie van scherp commentaar voorzien en als ik iets wilde bespreken dan kon dat. Verder wil ik de volgende mensen van het RIVM bedanken: Hans Visser en Arnold Dekkers voor advies op statistisch gebied (en voor de gezelligheid op de kamer) en Peter Janssen voor wiskundig advies. Tevens wil ik bedanken: Arthur Beusen voor informatie over het gebruik van het RAP op het RIVM en Peter Kouwenhoven van Resource Analysis voor zijn uitgebreide technische toelichting op het RAP. Daarnaast hebben vijf experts van het RIVM zich bereid getoond om mee te werken aan elicitation sessies. Bij deze wil ik Rob Alkemade, Hans van Jaarsveld, Rien Pastoors, Jan-Anne Annema en Gert-Jan van den Born daarvoor hartelijk bedanken.

Utrecht, 30 juli 2003,

Frank van Kouwen.

Samenvatting

Beslissingsondersteunende systemen worden tegenwoordig veelvuldig gebruikt voor het domein van de medische wetenschap. Eén van de technieken die daarbij gebruikt worden bestaat uit Bayesian Belief Networks (BBNs). Deze techniek kent ook een kwalitatieve tegenhanger, de zogeheten Qualitative Probabilistic Networks (QPNs). In dit onderzoek wordt bekeken in hoeverre dit laatste formalisme geschikt is voor het ondersteunen van (beleids-) beslissingen voor een geheel ander domein, namelijk milieuproblemen. Bij het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) is er behoefte aan een model dat in staat is complexe systemen vereenvoudigd te modelleren. Het belangrijkste doel van zo'n model is om een snel beeld te kunnen krijgen van mogelijke effecten en/of consequenties die beleidswensen met zich mee kunnen brengen. Voor dit doel beschikt het RIVM reeds over een model; de tool waarin dit model geïmplementeerd is wordt het *Rapid Assessment Program* (RAP) genoemd. In dit onderzoek wordt de geschiktheid van het QPN-formalisme onderzocht voor de genoemde doelstellingen. Daartoe wordt er binnen het brede domein van milieuproblemen een afbakening gemaakt. Er is gekeken welke kennis uit het afgebakende deeldomein het RIVM in een dergelijk model zou willen onderbrengen. Vervolgens is van deze kennis onderzocht in hoeverre deze kan worden vastgelegd in de vorm van een QPN. Daartoe is er een QPN model opgebouwd met deze kennis. Daarbij wordt een uitbreiding van het QPN-formalisme gebruikt dat het mogelijk maakt om onderscheid te maken tussen sterke en niet-sterke invloeden. In de evaluatie is theoretisch onderzocht in hoeverre de kennis uit het deeldomein ook daadwerkelijk gemodelleerd kon worden in het QPN. Daarnaast is het gebruik van het opgebouwde QPN model in de praktijk geëvalueerd. Tenslotte is er een vergelijking gemaakt met de RAP-methode waarbij de voor- en nadelen van beide technieken voor dit domein behandeld worden.

Uit dit onderzoek blijkt dat formeel niet alle kennis is te modelleren in een QPN model. Zuiver kwalitatief (zonder notie van sterkte) zijn de causale relaties uit het domein van milieuproblemen over het algemeen goed te modelleren in een QPN. De enige uitzondering daarop waren enkele wederkerige relaties die in het QPN niet gemodelleerd konden worden omdat een QPN a-cyclisch moet zijn. Veel belangrijker is dat de kennis over *sterktes* van invloeden formeel niet gemodelleerd kon worden. Dit komt doordat bij milieuproblemen sterktes van relaties vooral worden uitgedrukt in termen van bijvoorbeeld "als A met zoveel toeneemt, dan neemt B met zoveel toe als gevolg daarvan". In de in dit onderzoek gebruikte uitbreiding van QPNs bevatten sterktes informatie over verschillen in *kansen*. Dit is een wezenlijk verschil en geeft aan dat domeinkennis met betrekking tot sterktes formeel niet te modelleren is in een dergelijk QPN. Met dit probleem is in dit onderzoek omgegaan door de aanname te doen dat meer kans op toename van een concept samenhangt met naar verwachting *meer* toename van dat concept. Onder deze aanname zijn sterktes voor de relaties in het QPN model afgeleid.

Het opgebouwde QPN model is in de praktijk geëvalueerd. Met het QPN model kan men aanwijzingen opgeven over mogelijk te nemen maatregelen door waarden op te geven voor zogenoemde beleidsvariabelen. Het model kan dan indicaties geven over het effect daarvan op andere variabelen. Het blijkt dat de experts zich goed in deze indicaties kunnen vinden. Daarnaast kan men doelstellingen opgeven in het model door aanwijzingen op te geven voor zogeheten doelvariabelen. In de praktijk blijkt dat het model eveneens goede indicaties geeft over maatregelen die men kan nemen teneinde deze doelstellingen zoveel mogelijk te realiseren. Bijzondere praktische betekenis van het QPN model is dat men zowel (meerdere) beleids- als doelvariabelen op kan geven, zelfs als de aanwijzingen onderling sterk tegenstrijdig zijn. In het netwerk treedt dan ambiguïteit op, hetgeen zich manifesteert in de vorm van vraagtekens bij variabelen. Het blijkt dat de variabelen waar dan geen vraagteken verschijnt nuttige informatie bevatten over wat men kan doen om beide tegenstrijdige belangen zoveel mogelijk tegemoet te komen. Dit maakt een zinvol interactief gebruik van het model mogelijk. Zelfs de sterktes van geïnfereerde uitkomsten bleken zodanig te zijn dat de experts zich daar in kunnen vinden. Dit wil zeggen dat als het model bijvoorbeeld aan gaf dat

variabele A een groter positief verschil in kans op toename had dan variabele B, dat de expert dan in de praktijk ook meer toename verwachtte van het door A gerepresenteerde concept. Voor het onderzochte deeldomein blijkt dus dat de genoemde aanname in de praktijk goede resultaten oplevert.

Uit dit onderzoek blijkt dat de kennis die het RAP kan modelleren in beginsel beter aansluit bij de kennis die men wil modelleren voor milieuproblemen. De QPNs hebben het voordeel dat de correctheid van het formalisme –in tegenstelling tot bij het RAP- wiskundig bewezen is. Uit een beschouwing van het RAP blijkt dat de hoeveelheid informatie in de uitkomsten voor het RAP in principe iets groter is dan bij QPNs (hoewel dat met een aantal uitbreidingen van QPNs wel opgelost kan worden). Uit dezelfde beschouwing blijkt ook dat de betrouwbaarheid en daarmee de waarde van de uitkomsten van het RAP erg gering is. Bij de uitkomsten uit een QPN model kan er precies geformuleerd worden wat de betekenis is van de uitkomsten (en onder welke aannamen); voor uitkomsten uit het RAP is dit onmogelijk vanwege de gebruikte heuristische rekenregels waar geen wiskundige onderbouwing voor is.

Inhoudsopgave

1. INLEIDING	6
2. INFORMEEL MODEL	9
2.1 HET DEELDOMEIN	9
2.2 GEWENSTE KENNIS VOOR MODELLERING	9
2.3 BRONNEN VAN KENNIS VOOR MODELLERING	10
2.3.1 <i>Kennis uit detailmodellen</i>	10
2.3.2 <i>Kennis van domeinexperts</i>	11
2.4 KENNISELICITATIE	11
2.4.1 <i>Kennis eliciteren van domein experts</i>	11
2.4.2 <i>Elicitatiemethoden en -technieken</i>	12
2.5 ELICITATIEPROCEDURE VOOR DIT ONDERZOEK	14
2.5.1 <i>Afweging tussen de verschillende methoden en technieken</i>	14
2.5.2 <i>De gevolgde procedure</i>	14
2.5.3 <i>Eventuele herziening van het conceptuele model</i>	15
2.6 HET INFORMELE MODEL	15
2.6.1 <i>Terrestrische natuurkwaliteit</i>	15
2.6.2 <i>Hydrologie</i>	17
2.6.3 <i>Verkeer</i>	18
2.6.4 <i>Atmosferische verspreiding</i>	20
2.6.5 <i>Landbouw</i>	22
3. EEN FORMEEL MODEL.....	25
3.1 KWALITATIEVE PROBABILISTISCHE NETWERKEN	25
3.1.1 <i>Kansrekening en graaftheorie</i>	25
3.1.2 <i>Definitie van Bayesian Belief Networks</i>	27
3.1.3 <i>Definitie van Kwalitatieve Probabilistische Netwerken</i>	28
3.1.4 <i>Inferentie-algoritme</i>	31
3.1.5 <i>Verfijning van QPNs</i>	32
3.1.6 <i>De in dit onderzoek gebruikte inferentie methode</i>	33
3.2 ALGEMENE ONTWERPBESLISSINGEN BIJ HET FORMALISEREN VAN DE KENNIS	34
3.2.1 <i>Het afleiden van de graaf</i>	34
3.2.2 <i>Het afleiden van de kwalitatieve relaties</i>	35
3.3 SPECIFIEKE ONTWERPBESLISSINGEN BIJ HET FORMALISEREN VAN DE KENNIS	37
3.3.1 <i>Terrestrische natuurkwaliteit</i>	37
3.3.2 <i>Hydrologie</i>	38
3.3.3 <i>Verkeer</i>	38
3.3.4 <i>Atmosferische verspreiding</i>	38
3.3.5 <i>Landbouw</i>	39
3.4 RESULTEREND FORMEEL MODEL	40
4. EVALUATIE	41
4.1 THEORETISCHE BESCHOUWING	41
4.1.1 <i>Kennis die wel gemodelleerd kon worden in het QPN</i>	41
4.1.2 <i>Kennis die niet gemodelleerd is</i>	41
4.1.3 <i>Betekenis van de uitkomsten</i>	42
4.1.4 <i>Correctheid bij veranderingen</i>	43
4.1.5 <i>Nog enkele kritische kanttekeningen</i>	43
4.2 PRAKTISCHE EVALUATIE	43

4.2.1	<i>Invloed van enkele beleidsvariabelen op de doelvariabele</i>	44
4.2.2	<i>Invloed van meerdere beleidsvariabelen op de doelvariabele</i>	44
4.2.3	<i>Invloed van de doelvariabele op beleidsvariabelen</i>	46
4.2.4	<i>Combinaties van observaties voor beleids- en doelvariabelen</i>	46
4.3	VERGELIJKING MET HET RAP	48
4.3.1	<i>Functionaliteit van het RAP</i>	48
4.3.2	<i>De door het RAP gebruikte berekeningsmethode</i>	48
4.3.3	<i>Enkele kritische kanttekeningen bij het RAP</i>	50
4.3.4	<i>Vergelijking met de (Enhanced) QPN-methode</i>	51
5.	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	54
5.1	CONCLUSIES	54
5.2	AANBEVELINGEN	55
	BRONNEN	58

1. Inleiding

Het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) wordt geacht ondersteuning te bieden bij een lastige taak: het ontwikkelen van milieubeleid. Hoe kunnen we zorgen dat Nederland niet volgebouwd wordt? Hoe houden we de steden leefbaar? En hoe zorgen we dat de natuurgebieden die nog over zijn niet nog verder achteruitgaan? Allemaal problemen die de overheid met milieubeleid zo goed en zo kwaad als het gaat probeert op te lossen. Men streeft naar een *integraal* beleid, waarbij alle betrokken aspecten en actoren in de afweging worden meegenomen [8]. Een groot probleem is dat hierbij tegenstrijdige belangen optreden. Zo willen mensen dat Nederland groen blijft. Maar diezelfde mensen willen ook steeds ruimer wonen. Men wil leefbare steden zonder smog, maar ook wil men snel van A naar B kunnen. Het is erg lastig om aan al die wensen tegemoet te komen. De aspecten die bij het milieubeleid betrokken zijn vormen dus een complex geheel. Als men bijvoorbeeld de mobiliteit wil aanpakken om de verkeersemissies te doen verminderen, dan betekent dat niet alleen minder verkeer, maar zal dat ook vergaande gevolgen hebben voor de economie en het bedrijfsleven, die afhankelijk zijn van mobiliteit.

Het nemen van de juiste beslissingen is dus erg moeilijk. Beslissingsondersteunende systemen (*BOS*'en) kunnen in het proces van beleidsvorming en de daarbij behorende besluitvorming een hulpmiddel zijn [1]. *BOS*'en zijn instrumenten die gebruik maken van informatie- en communicatietechnologie ter ondersteuning van informatievoorziening en informatie-uitwisseling. Deze *BOS*'en zijn er in allerlei soorten en maten. Er zijn allerlei rekenmodellen die kunnen berekenen hoe emissies zich verspreiden, hoe verkeersstromen zich ontwikkelen, hoe grondwaterstromen lopen, etc. Ook op het RIVM beschikt men over tientallen van dergelijke rekenmodellen. Deze rekenmodellen werken met invoerparameters die numeriek moeten worden opgegeven, en zullen dan ook numerieke uitkomsten (meestal met onzekerheidsmarges) opleveren. Waar mogelijk worden deze modellen gekoppeld, dat wil zeggen dat de uitvoer van het ene model weer kan worden gebruikt als invoer voor het andere model. De rekenmodellen zijn uitstekend geschikt wanneer men weet welke maatregelen men eventueel zou kunnen nemen. De rekenmodellen kunnen dan worden ingezet om de effecten van deze maatregelen door te rekenen. Maar als men een probleem constateert en dat probleem wil aanpakken met beleid, dan zijn de rekenmodellen minder praktisch. De rekenmodellen hebben immers die numerieke invoerparameters nodig. Deze zullen opgegeven moeten worden door de gebruiker. Als de gebruiker een beleidsmaker is, dan is dit erg vervelend omdat de meeste beleidsmakers zich niet op een dergelijk detailniveau met het domein van milieubeleid bezighouden. Bovendien is de rekentijd van sommige modellen behoorlijk lang. Verder zijn de rekenmodellen vaak op één aspect toegespitst, waardoor zij niet goed in staat zijn om een overzichtelijk beeld te creëren waaruit blijkt wat de effecten en neveneffecten kunnen zijn van te nemen maatregelen. Evenmin zijn zij in staat om een snel beeld te geven van te nemen maatregelen indien men bepaalde doelstellingen voor ogen heeft [9]. Toch willen de beleidsmakers graag de kennis uit deze detailmodellen kunnen gebruiken voor het bepalen van het beleid.

Om de kennis uit alle detailmodellen toegankelijk te maken voor beleidsmakers zou een zogeheten meta-model uitkomst kunnen bieden. Een meta-model is een “overkoepelend” model dat alle relevante informatie uit de detailmodellen combineert. Het meta-model moet de gebruiker een totaaloverzicht geven van de belangrijkste informatie uit alle onderliggende modellen. Daarbij worden alleen de grote lijnen doorgegeven aan het meta-model, en is men dus feitelijk aan het vereenvoudigen. Het voordeel is dat nu wel snel een beeld kan worden verkregen. Om deze reden is er binnen het RIVM een project opgezet dat de mogelijkheden onderzoekt van beleidsondersteuning door eenvoudige modellen [9]. Met eenvoudige modellen worden daarbij vooral *kwalitatieve* modellen bedoeld. Bij kwalitatief modelleren wordt niet zozeer numeriek vastgelegd hoe aspecten elkaar beïnvloeden, maar gebruikt men alleen kwalitatieve informatie over hoe aspecten elkaar beïnvloeden alsmede eventueel een kwalitatieve notie van de relatieve sterkte van de invloeden. In plaats van ingewikkelde differentiaalvergelijkingen voor het berekenen van de bijdrage van het verkeer aan de

verzuring, wordt bijvoorbeeld slechts vastgelegd dat het meer verkeer naar verwachting leidt tot meer verzuring. Dit wordt dan een positieve invloed genoemd.

Een methode die inmiddels toegepast is op het RIVM wordt gevormd door het door Resource Analysis ontworpen *Verkennd Analyse Systeem*, waarvan het computer-programma dat met dit systeem werkt het *Rapid Assessment Program* (RAP) wordt genoemd [9]. Bij het RAP wordt er wel onderscheid gemaakt tussen drie sterktes van invloeden, maar worden er geen exacte getallen vastgelegd. In een RAP-model worden alleen kwalitatieve relaties vastgelegd met plussen en minnen. In de representatie worden daarbij de tekens ---, --, -, 0, +, ++ tot +++ gebruikt om relaties te definiëren, van respectievelijk sterk negatief tot sterk positief. De te modelleren concepten noemt men toestandsvariabelen. Daarbij kunnen toestandsvariabelen dezelfde tekens krijgen, waarbij --- betekent dat er een sterke negatieve verandering wordt verwacht, en +++ een sterke positieve verandering. Met in een eenvoudige tabel vastgelegde rekenregels wordt berekend wat de resulterende invloed is van variabelen met een bepaalde verandering die met een bepaalde sterkte een bepaalde invloed hebben op een andere variabele. Belangrijk hierbij is dat er onder- en bovengrenzen worden bijgehouden; een negatieve en een positieve invloed kunnen elkaar niet compenseren, maar zullen als onder- en bovengrens worden doorgegeven. Zwakke invloeden verzwakken steeds verder over een pad, om uiteindelijk te convergeren naar nul. Dit wordt verder toegelicht in hoofdstuk 4. Deze in het RAP gebruikte rekenregels zijn proefondervindelijk vastgesteld [9]; er is geen formeel bewijs voor de correctheid ervan, maar in de praktijk lijken ze te werken. Zo zijn mede met behulp van het RAP inmiddels scenario's ontwikkeld die gebruikt zijn voor de Milieuverkenning [24]. Bijlage 1 geeft een impressie van het RAP-model dat is ontwikkeld op het RIVM.

Het RAP is echter slechts één kwalitatieve representatie- en redeneermethode. Aangezien men bij het RIVM het niet verstandig vindt om op slechts één paard te wedden bestaat er behoefte aan een onderzoek naar alternatieve kwalitatieve redeneermethoden. Het doel van dit onderzoek is dan ook om de geschiktheid van een alternatief kwalitatief formalisme te vinden, en daarvan de voor- en nadelen te onderzoeken. Het voor dit onderzoek onderzochte formalisme wordt gevormd door zogeheten *kwalitatieve probabilistische netwerken* (QPNs); deze zijn een kwalitatieve abstractie van de veel gebruikte *Bayesian Belief Networks* [18]. Voor dit formalisme is gekozen omdat zij bruikbaar zijn in toepassingsgebieden waar er sprake is van onzekere, onvolledige en eventueel zelfs tegenstrijdige kennis, maar dan zuiver kwalitatief. Een belangrijk verschil met het RAP is dat de correctheid van de gebruikte rekenregels voor dit formalisme wiskundig is bewezen; dit impliceert dat als de kennis in een QPN correct is, dat dan de resultaten van inferentie ook correct zullen zijn.

Bij het construeren van een kwalitatief model kunnen er twee fasen worden onderscheiden [22]. Een eerste fase is het conceptualiseren van het model. In deze fase wordt er een conceptueel model opgebouwd dat los staat van enig redeneer- en/of representatief formalisme. Daartoe wordt er een inventarisatie gemaakt van de kennis die nodig is om de milieuproblemen te proberen op te lossen. Deze kennis wordt in dit onderzoek vastgelegd in een *informeel* model. In de fase van het conceptualiseren van het model is het belangrijk om kennis van experts expliciet op papier te zetten [10]. Het doel van het opbouwen van een informeel model is dan ook om alle relevante kennis die op het RIVM aanwezig expliciet te maken. In de tweede fase wordt dan het model geconstrueerd in het QPN formalisme.

Het domein van de milieuproblematiek is nogal breed en strekt zich uit van allerlei maatschappelijke aspecten tot allerlei processen in het milieu en de natuur. Ook welzijn en gezondheid vallen binnen het domein van milieuproblemen. Alle maatschappelijke aspecten op bijvoorbeeld economisch, demografisch, en technologisch gebied die op de een of andere manier (direct danwel indirect) invloed hebben op natuur, milieu, welzijn en gezondheid vallen binnen dit domein. Het is dus ondoenlijk om alle (relevante) kennis binnen het totale domein van milieuproblemen te verwerven. Om deze reden is er in dit onderzoek voor gekozen om slechts voor een deel van dit domein de kennis te verwerven. Er wordt gekeken waar deze kennis aanwezig is op het RIVM en welke relevante methoden er zijn om de kennis te verwerven en vast te leggen.

Er wordt onderzocht hoe de kennis uit het informele model kan worden “vertaald” naar het QPN-formalisme. Vervolgens wordt er een QPN geconstrueerd, waarvan wordt onderzocht in hoeverre het functioneert zoals gewenst voor beleidsondersteuning. Daarbij is het de bedoeling dat de uitkomsten van het model een goede indicatie geven van mogelijke effecten. Een tweede doelstelling is dat het model de problemen inzichtelijker maakt voor de beleidsmakers. De voors en tegens worden uitvoerig behandeld in de evaluatie. Daarbij gaat het erom wat men er wel/niet mee kan, hoe complex een dergelijk model is (de methodische complexiteit: is het nog begrijpelijk voor een gebruiker die geen Informatica heeft gestudeerd), en hoe robuust de uitkomsten zijn. Tevens wordt gekeken in hoeverre een dergelijk QPN -dat in beginsel gebouwd wordt om voor dit domein kwalitatieve voorspellingen te kunnen doen- voor dit domein geschikt is om andersom te redeneren, dus vanuit doelstellingen naar beleid. Het QPN-formalisme is in staat om ook tegen de pijlen in te redeneren, dus het staat bij voorbaat al vast dat er op deze manier met QPNs kan worden geredeneerd. De vraag is echter of deze vorm van redeneren ook *zinnvolle* uitkomsten oplevert. Ook wordt er een theoretische verkenning gemaakt naar de mogelijkheden van het koppelen van kwantitatieve rekenmodellen aan het kwalitatieve QPN.

Deze scriptie is als volgt opgebouwd. In hoofdstuk 2 wordt het gekozen deeldomein afgebakend, waarna een inventarisatie volgt van waar kennis over dit deeldomein binnen het RIVM te vinden is. Vervolgens wordt in hetzelfde hoofdstuk gekeken welke methoden er zijn om kennis te verwerven, waarna de gekozen methode wordt beschreven. Daarna volgt het informele model dat de kennis bevat die met deze methode is verworven. In hoofdstuk 3 volgt eerst een beschrijving van het formalisme van QPNs en enkele mogelijke uitbreidingen daarvan. Vervolgens wordt er gekeken hoe de kennis uit het informele model kan worden geformaliseerd in een QPN. Het aldus opgebouwde QPN model is eveneens te vinden in hoofdstuk 3. In hoofdstuk 4 wordt geëvalueerd in hoeverre het gelukt is om de kennis uit het informele model onder te brengen in een QPN. Er volgt een theoretische beschouwing alsmede een praktische evaluatie. Tevens wordt er hier een vergelijking gemaakt met het RAP. In hoofdstuk 5 tenslotte volgen de conclusies en aanbevelingen.

2. Informeel model

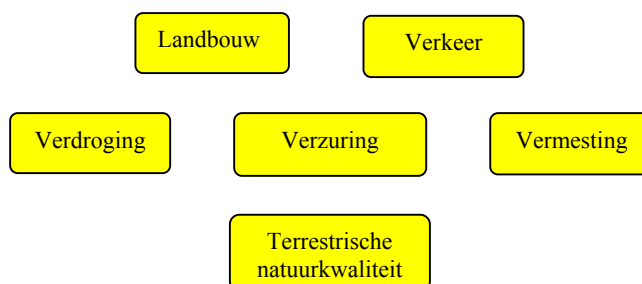
Dit hoofdstuk begint met het maken van een afbakening voor het deeldomein waarvan we de kennis willen modelleren. Vervolgens wordt aangegeven welke kennis uit dat deeldomein gewenst is voor modellering. Daarbij wordt vooral ingegaan op het gewenste detailniveau van deze kennis. Daarna wordt er gekeken waar deze kennis aanwezig is op het RIVM, en wordt er een keuze gemaakt welke kennisbronnen gebruikt zullen worden. In paragraaf 2.4 wordt ingegaan op de methoden die gebruikt zouden kunnen worden voor het verwerven van de kennis, waarna in 2.5 een methode wordt gekozen die in dit onderzoek gebruikt wordt. In de laatste paragraaf volgt tenslotte het informele model zoals dat met deze methode tot stand gekomen is.

2.1 Het deeldomein

Bij de keuze van een afbakening van het totale domein is rekening gehouden met de volgende criteria voor het deel van het domein waarop dit onderzoek betrekking heeft:

- Het deel moet zoveel mogelijk representatief zijn, dat wil zeggen dat een modelleermethode die voor de kennis van dit deel van het totale domein geschikt bevonden wordt ook zoveel mogelijk voor kennis over de rest van het domein toepasbaar moet zijn.
- Het deel mag niet te uitgebreid zijn, we kiezen immers voor een deeldomein omdat het totale domein veel te uitgebreid is.

Er is in overleg met het RIVM voor gekozen om het deeldomein op te bouwen rondom de terrestrische natuurkwaliteit. Terrestrisch wil zeggen dat het gaat om de natuurkwaliteit van de natuur op het land, dus de aquatische natuurkwaliteit die betrekking heeft op aquatische ecosystemen als sloten, meren en dergelijke valt hier buiten beschouwing. Er zijn een aantal processen in het milieu die een veelal negatieve invloed hebben op de natuur. Dit zijn bijvoorbeeld verdroging, vermisting, verzuring, verstoring en versnippering. Deze processen worden in het milieubeleid de *ver-thema's* genoemd. Van deze ver-thema's is ervoor gekozen om uitsluitend de verzuring, vermisting en verdroging mee te nemen. Er zijn verschillende sectoren te onderscheiden die op deze drie ver-thema's invloed hebben. Van deze sectoren is ervoor gekozen om uitsluitend de landbouw en het verkeer mee te nemen. Het deeldomein is schematisch weergegeven in figuur 1. Het kan zijn dat er bepaalde invloeden naar voren komen die wel een rol spelen binnen het deeldomein, maar er eigenlijk buiten vallen. In dat geval worden deze invloeden wel genoemd, maar verder niet meegenomen in de modellering. Er is bekend dat ze een rol spelen, maar we doen in dit onderzoek alsof ze geen rol spelen. De achterliggende reden is dat het geheel niet te complex mag worden en er derhalve een afbakening nodig is.



Figuur 1. Het deeldomein waarop dit onderzoek betrekking heeft

2.2 Gewenste kennis voor modellering

Een identificatie van de specifieke concepten binnen het deeldomein van figuur 1 is het startpunt voor de verwerving van de specifieke kennis die we willen modelleren. Voor het informele model willen we kennis over deze specifieke concepten verkrijgen, inclusief de

relaties daartussen. Naar verwachting gaat het vooral om *causale* relaties [9]. Deze relaties dienen informatie te bevatten over hoe die concepten elkaar *beïnvloeden*. Hiermee wordt bedoeld dat er wordt vastgelegd wat er met het ene concept gebeurt als er bij het andere concept iets verandert. We willen een conceptueel model dat de belangrijkste *hoofddlijnen* in beeld brengt. Belangrijk daarbij is dat het conceptuele model geen al te gedetailleerde (numerieke) informatie bevat zoals de rekenmodellen. Dit om het conceptuele model enigszins overzichtelijk te houden. Voor de concepten uit het conceptuele model willen we als mogelijke waarden vooral de *veranderingen* modelleren ten opzichte van de situatie waarbij er geen maatregelen genomen worden, het zogeheten *nul-scenario* [9]. De mogelijke waarden van de concepten zullen dus bestaan uit meer/minder in plaats van veel/weinig of wel/niet.

We willen de relaties tussen de concepten vooral in termen van (eventueel voorwaardelijk) versterkend of verzwakkend, ondersteund door enige indicatie van sterkte hetgeen eventueel kwantitatief kan worden onderbouwd. Onder een versterkende relatie van A op B wordt dan verstaan dat meer van A naar verwachting leidt tot meer van B. Een verzwakkende relatie van A op B betekent dat meer van A naar verwachting leidt tot minder van B. En met sterktes van relaties wordt informatie bedoeld over *hoeveel* verhoging/vermindering van A zal leiden tot hoeveel verhoging/vermindering van B.

Met het RIVM is afgesproken dat we generieke informatie willen over heel Nederland in een vast tijdsbestek. Als bijvoorbeeld bekend is dat bepaalde relaties een bepaald verloop in de tijd hebben of alleen plaatselijk het geval zijn, dan wordt dit gemeld, maar niet in detail uitgeplozen in termen van “waar precies” en “wanneer precies”. Uitzonderingen en voorwaarden met betrekking tot relaties mogen zeker in het conceptuele model opgenomen worden, maar hoeven niet in detail te worden beschreven. Wel belangrijk is dat het conceptuele model *compleet* is, dat wil zeggen dat alle binnen het deeldomein relevante concepten en relaties er ook werkelijk in zitten. Het model hoeft echter niet te gedetailleerd te zijn. Een compleet (overkoepelend) model met een laag detailniveau is immers het doel van kwalitatief modelleren [9].

2.3 Bronnen van kennis voor modellering

Globaal zijn er twee typen kennisbronnen aanwezig bij het RIVM die gebruikt zouden kunnen worden voor de opbouw van een model ten behoeve van milieubeleidsondersteuning. Een eerste soort kennisbron bestaat uit de op het RIVM aanwezige detailmodellen. Daarnaast is er kennis op het RIVM aanwezig in het brein van de domeinexperts. Op beide typen kennis zal hier nader worden ingegaan.

2.3.1 Kennis uit detailmodellen

De kennis uit detailmodellen bestaat uit kwantitatieve informatie over variabelen en relaties daartussen, vaak met een gespecificeerde onzekerheid. Voorbeelden van gebruikte variabelen zijn emissies, deposities en concentraties van stoffen (model OPS), de kans op het voorkomen van een aantal plantensoorten (de *Natuurplanner*), aantallen dieren en bemestingsnormen (model CLEAN). De meeste van deze modellen zijn bedoeld om effecten van maatregelen en/of maatschappelijke ontwikkelingen door te rekenen. Als invoer kan bijvoorbeeld de emissie van een bepaalde stof worden gegeven, waarna deze modellen de effecten op de natuur kunnen bepalen in termen van kansen op het voorkomen van een aantal gegeven plantensoorten. Alleen het model KOBALT is ook in staat om optimale maatregelen te bepalen gegeven een (eveneens numerieke) kostenfunctie. Dit model is echter enigszins verouderd.

De modellen bevatten expliciete kennis en werken met veel numerieke details. De invoer moet bestaan uit kwantitatieve gegevens, en het resultaat zal ook bestaan uit kwantitatieve gegevens. De meeste van de detailmodellen zijn rekenmodellen bestaande uit differentiaalvergelijkingen. Daarbij werken veel modellen met een ruimtelijk aspect en/of een tijdsaspect. Het specifieke karakter van de detailmodellen maakt het moeilijk om generieke informatie over heel Nederland in een vast tijdsbestek uit de modellen af te leiden. Men moet kennis van het domein en van de detailmodellen hebben om de belangrijke kwalitatieve

relaties uit alle kwantitatieve informatie te kunnen halen. Het opbouwen van een overzichtelijk conceptueel model wordt dan wel erg moeilijk. Als kennisbron voor ons model zijn deze detailmodellen dus niet zo geschikt.

2.3.2 Kennis van domeinexperts

Op vrijwel alle delen van het totale domein van milieubeleid zijn er op het RIVM mensen te vinden met specialistische kennis op dat vakgebied. En zeker voor het gekozen deeldomein heeft het RIVM voldoende experts in huis. Rob Alkemade houdt zich onder andere bezig met de *Natuurplanner*, een model waarmee effecten op de natuurkwaliteit kunnen worden doorberekend. Rien Pastoors is hydroloog en is gespecialiseerd grondwaterstromingen. Hij levert met behulp van grondwatermodellen de onderbouwing van de informatie die in de regelmatig door het RIVM gepubliceerde Milieuverkenning komt. Jan-Anne Annema houdt zich bezig met verkeersemisseries en werkt onder andere aan verschillende emissiemodellen. Hans van Jaarsveld is gespecialiseerd in de verspreiding van stoffen door de atmosfeer en de depositie als gevolg daarvan. De relatie tussen emissies en deposities dus. Gert-Jan van den Born tenslotte is bodemkundige. Hij houdt zich enerzijds met de landbouw bezig vanuit landbouwkundig oogpunt, dus vanuit de gebruikskant. Chemische processen van (mest-) stoffen vallen hier ook onder. Anderzijds onderzoekt hij de landbouw ook vanuit landschapsecologisch perspectief. Deze vijf domeinexperts hebben zich bereid getoond om in een gesprek hun kennis over te dragen.

2.4 Kenniselicitatie

Omdat (a) de detailmodellen ons niet (of erg moeilijk) de gewenste kennis kunnen geven en (b) omdat er voldoende domeinexperts die deze kennis wél hebben en willen geven, is ervoor gekozen alleen deze domeinexperts als bron voor de kennis van ons model te benutten. Daarom is het belangrijk om te weten wat de eigenschappen van deze kennis zijn waar men rekening mee moet houden bij het eliciteren van de kennis. Potentiële valkuilen worden hier aan de kaak gesteld. Tevens wordt er gekeken hoe deze kennis vastgelegd kan worden, zonder beperkt te worden door een representatieformalisme. Het doel van het vastleggen van de kennis is immers om deze kennis expliciet te maken [10].

2.4.1 Kennis eliciteren van domein experts

De menselijke kennis ligt niet exact vast zoals bij detailmodellen, maar is wel min of meer gestructureerd. Deze structuur bevat afhankelijkheden tussen concepten [17]. Net als bij kennis uit detailmodellen is er sprake van een zekere mate van onzekerheid, als gevolg van onvolledigheid van de menselijke kennis. De mate van onzekerheid is hier echter niet exact gedefinieerd omdat het hier gaat om impliciete kennis. Menselijke kennis en expertise kunnen bijdragen aan oplossingen voor problemen, ondanks de onvolledigheid van deze kennis. Dit kan (ten dele in ieder geval) worden verklaard door het feit dat mensen bij het oplossen van problemen gebruik kunnen maken van kwalitatieve beschrijvingen van systemen. Deze kwalitatieve beschrijvingen bevatten wel de aspecten die een belangrijk kwalitatief verschil maken voor het betreffende probleem, maar negeren informatie die voor dat probleem geen belangrijke rol speelt [13]. In deze zin is de menselijke kennis dus bij uitstek geschikt voor het eliciteren van de belangrijke kwalitatieve hoofdlijnen.

Er zijn echter wel een aantal kanttekeningen te plaatsen bij de kennis uit het menselijk brein. Ten eerste bestaat de kennis van domeinexperts bestaat deels uit redeneren, hetgeen niet zondermeer in een model kan worden gestopt. Er zijn een aantal verschillen aan te dragen tussen de manier waarop mensen redeneren en de manier waarop modellen redeneren. Zo redeneren veel modellen Bayesiaans, maar mensen niet [15]. De Bayesiaanse filosofie redeneert als volgt: veronderstel dat afhankelijkheden tussen concepten gegeven zijn, dan mag men op grond van de filosofie concluderen dat de verwachtingen van die concepten veranderen als hun condities veranderen. Vaak wordt er met menselijke kennis omgegaan alsof hier ook een Bayesiaanse redenering achter zit [15], maar dit is geenszins het geval. Dit is uit meerdere onderzoeken gebleken. Mensen passen hun verwachtingen vaak niet aan op

grond van nieuwe informatie [12]. Bij het eliciteren zou dit tot afwijkingen kunnen leiden. Ten tweede zijn mensen beperkt in de hoeveelheid informatie die zij kunnen meenemen in een oordeel. Zij kunnen dus niet altijd alles overzien. Dit kan ertoe leiden dat er dingen over het hoofd gezien worden, hetgeen kan leiden tot onjuiste conclusies [15]. Dit brengt bij het eliciteren een risico op onjuiste informatie met zich mee.

Naast redenties en verwachtingen wil men soms ook schattingen van domeinexperts. Daarbij blijkt dat er grote discrepanties kunnen ontstaan; bij het schatten van kansen is de som van alle kansen vaak ongelijk aan 1. Daarnaast zijn mensen vaak niet in staat om de betrouwbaarheid van voorbeelden te beoordelen (is een voorbeeld wel representatief?), de frequenties van zeldzaamheden te schatten, de invloed van toeval mee te nemen, en de effecten van variabiliteit mee te rekenen (bijvoorbeeld het zien van de grote lijn over allemaal kleine schommelingen) [11]. Dit alles maakt duidelijk dat men voorzichtig moet zijn bij het eliciteren indien daar beoordelingen en/of schattingen gemaakt moeten worden.

Bij mogelijke afwijkingen van waarden probeert men in de wetenschap vaak deze waarden te *calibreren*. Onder calibreren wordt verstaan het vergelijken van iets onbekends met een vastgelegde standaard of een correcte procedure en het aanpassen van dat onbekende tot het afgestemd is op de standaard. Een dergelijke standaard is bijvoorbeeld het Nieuw Amsterdams Peil, dat een referentie geeft waardoor het peil van het zeewater wereldwijd kan worden vergeleken. Een tekortkoming van menselijke kennis is dat de kennis van de experts niet volledig kan worden gecalibreerd [15]. Het lukt dus niet om systematische afwijkingen (*biases*) die mensen kunnen hebben in beoordelingen zodanig bij te stellen dat de beoordelingen precies kloppen. Niet alleen de domeinexperts, maar ook kennisingenieurs kunnen bias introduceren. Zij kunnen de gegevens verkeerd interpreteren, maar ook verkeerd representeren.

Er is onderscheid te maken tussen twee vormen van bias [15]. De eerste vorm is *motivatie-bias*. Deze vorm ontstaat door menselijke behoeften, zoals de behoefte aan goedkeuring van hetgeen dat iemand zegt. Experts kunnen soms iets andere dingen zeggen dan wat ze werkelijk denken (bijvoorbeeld omdat ze denken dat dat het beste overkomt), maar ook de interviewer kan de uitspraken van de expert verkeerd interpreteren door motivatie-bias, alsmede verkeerd representeren. Een voorbeeld van motivatie-bias is dat president Bush zegt dat hij het probleem van het broeikas-effect niet groot vindt, terwijl bijvoorbeeld iemand van Greenpeace zegt dat hij dat wel vindt. Een tweede vorm van bias is de *cognitieve bias*. Deze ontstaat door de beperkingen van het menselijk brein als het gaat om informatie-verwerking. Om een complex probleem op te kunnen lossen is men geneigd om via korte stappen tot een oplossing te komen. Deze oplossing staat dan redelijk vast, en zal niet zo heel snel veranderen als er nieuwe informatie komt. Men “ankert” zich vast aan eerder bedachte oplossingen. Beperkingen van het menselijk brein kunnen zo leiden tot inconsistenties. Maar ook verkeerde inschattingen bij het geven van beoordelingen vallen onder cognitieve bias.

In de elicitatieprocedure moet zo goed mogelijk rekening worden gehouden met de hiervoor beschreven gevaren.

2.4.2 Elicitatiemethoden en -technieken

Er worden verschillende elicitatiemethoden en -technieken behandeld. Meyer en Booker [15] onderscheiden een drietal elicitatiemethoden, waarbij zij vooral onderscheid maken tussen de personen die bij de elicitatie betrokken zijn. Schreiber en anderen [21] maken meer onderscheid tussen de hulpmiddelen en de technieken die toegepast kunnen worden. In alle gevallen wordt geadviseerd dat er aantekeningen worden gemaakt door (één van de) kennisingenieur(s); men kan de sessie eventueel met een geluids- of videorecorder opnemen. Hier wordt beschreven wanneer de technieken wel of niet geschikt zijn.

Individuele interviews

De meest gebruikte techniek om kennis van anderen te verwerven is het interview. Een interview kan ongestructureerd plaatsvinden, maar kan ook gestructureerd worden door de interviewer. In dat geval probeert de interviewer het gesprek zodanig te sturen dat hij/zij

zoveel mogelijk de gewenste informatie boven water krijgt [21]. Een ongestructureerd interview kan plaatsvinden wanneer de kennisingenieur het gesprek in het geheel niet wil sturen en de expert wil laten vertellen wat hij/zij belangrijk vindt. Individuele interviews stellen de kennisingenieurs in staat om diepgaande informatie te verkrijgen van één expert, zonder dat deze afgeleid of beïnvloed kan worden door andere experts [15].

Protocol Analyse

Bij protocol analyse wordt geanalyseerd welke stappen en afwegingen een expert maakt als hij/zij een probleem probeert op te lossen. Deze techniek is bij uitstek geschikt voor het eliciteren van procedurele kennis, dat is kennis over te nemen procedurele stappen bij het oplossen van een probleem. Het analyseren van de kennis kan zowel tijdens het oplossen (*online* protocol analyse) als achteraf (*offline* protocol analyse). Bij online protocol analyse denkt de expert bijvoorbeeld hardop tijdens het oplossen van het probleem, en de uitspraken worden vastgelegd. Bij offline protocol analyse kan de expert commentaar geven op het oplossen van een probleem dat getoond wordt met audiovisuele middelen. Voordat het protocol afgenomen wordt, wordt er een codeerschema opgesteld als hypothese. Dit schema kan dan worden getest met het protocol [21]. Protocol analyse is vooral geschikt voor het analyseren van dynamisch redeneergedrag. Een nadeel is dat deze methode veel tijd kost.

Laddering

Bij laddering is het extra belangrijk dat de expert zeer goed uitgelegd krijgt wat de bedoeling is. De expert en de kennisingenieur stellen samen een grafische representatie op van relaties tussen concepten van het domein en probleem-oplossende onderdelen. Het resultaat is een graaf waarbij ook de kanten een naam toegekend krijgen. De kennisingenieur stelt vragen als “kan je een voorbeeld van een zoogdier noemen?”. Vervolgens wordt het door de expert gegeven antwoord op de aangegeven plaats in de graaf getekend door de kennisingenieur. Op deze manier kunnen hiërarchieën in beeld worden gebracht.

Deze techniek is nogal globaal en oriënterend. Begrippen als “concepten” en “attributen” hoeven niet heel nauwkeurig te worden genomen. Laddering levert een globaal model op waaraan later preciezere invulling kan worden gegeven [21].

Concepten sorteren

Een manier om inzicht te krijgen in samenhang tussen reeds eerder vastgestelde concepten is het laten sorteren van kaarten met daarop de concepten door een domeinexpert. De expert wordt gevraagd om herhaaldelijk deze concepten te groeperen. Groepen kunnen weer onderverdeeld worden. De expert wordt gevraagd om labels aan de groepen toe te kennen. Het sorteren van concepten kan worden gezien als een tussenfase, waarin reeds vastgestelde concepten worden geordend. Door deze techniek kunnen de verschillende manieren waarop de expert relaties tussen de concepten ziet duidelijk worden gemaakt [21].

Repertory Grids

Bij deze techniek wordt een domeinexpert gevraagd om steeds uit drie domeinelementen er twee te kiezen, zodanig dat de twee vergelijkbaar zijn en verschillend van de derde. De expert moet daarbij aangeven waarin de twee overeenkomen en waarin de derde verschilt van die twee. Men noemt de beoordelingscriteria die de expert aangeeft *constructen*. De andere domeinelementen worden vervolgens ook ingeschaald op het passende construct. Dit proces wordt herhaald zolang er nieuwe 2-1 combinaties mogelijk zijn. Als een expert bijvoorbeeld gevraagd wordt om een laptop, een computer en een computermuis te onderscheiden, dan kan deze zeggen dat de laptop en de computer beide een processor en een besturingssysteem hebben, en de muis niet.

Deze techniek werkt goed voor het zoeken naar verbanden tussen elementen, zoals verschillende auto's, planeten, etc. Zo komen alle relevante verschillen in beeld [21]. De techniek kost relatief veel tijd.

Voorgaande technieken hadden steeds betrekking op één expert. Bij de volgende twee technieken zijn meerdere domeinexperts betrokken.

Discussies

Bij discussies worden meerdere experts uitgenodigd om te discussiëren over één of meer problemen/aspecten in het domein. Het kan zinvol zijn dat deze discussie wordt gestructureerd; dit kan helpen voorkomen dat de negatieve effecten van interacties (bijv. door elkaar heen praten) zorgen dat het moeilijk wordt om de gewenste kennis te verwerven [15]. De kennisingenieur kan deze taak op zich nemen door een voorzittersrol te vervullen.

Delphi techniek

Rand Corporation ontwikkelde deze elicitatiemethode, waarbij verschillende experts individueel hun kennis en beoordelingen overdragen aan een *moderator* (bemiddelaar). Deze moderator maakt deze beoordelingen anoniem, en speelt ze terug naar alle experts. Deze experts kunnen dan hun eigen beoordelingen herzien. Indien gewenst kan dit net zolang doorgaan tot er consensus bereikt is [15]. Een voordeel van deze methode is dat uiteenlopende beoordelingen van verschillende experts nu niet worden *overruled* (overstemd) door dominante experts in de groep, maar ook dat het probleem van door elkaar heen praten wordt omzeild.

2.5 Elicitatieprocedure voor dit onderzoek

2.5.1 Afweging tussen de verschillende methoden en technieken

In paragraaf 2.4.2 is een aantal elicitatiemethoden en –technieken beschreven. Niet allemaal zijn ze even geschikt voor dit specifieke onderzoek. De methoden met verschillende experts voor eenzelfde domeingebied vallen grotendeels af, vanwege het beperkte aantal mensen bij het RIVM met kennis van één specifiek gebied. Bovendien hebben deze mensen over het algemeen weinig tijd.

Protocol analyse is niet echt bruikbaar omdat het niet zozeer gaat om probleem-analyse, maar om systeemanalyse. Milieuproblemen zijn weliswaar ook problemen, maar protocol analyse is meer geschikt voor problemen waarbij de expert stap voor stap kan redeneren wat de oorzaak van het probleem kan zijn, eventueel ondersteund door observaties of metingen. Bij milieuproblemen is het (helaas) niet zo simpel dat men één of twee oorzaken kan traceren en “verhelpen”, waarna het milieuprobleem opgelost is. Om deze reden is protocol analyse niet erg geschikt. Het principe van “hardop denken” zoals dat bij online protocol analyse gebeurt is daarentegen wel goed bruikbaar.

Laddering en repertory grids zijn niet erg geschikt, omdat het niet zozeer gaat om “is-een”-relaties en hiërarchieën, maar om relaties in termen van beïnvloeding (zie 2.2). Daarom zullen deze tijdrovende technieken naar verwachting weinig opleveren voor dit domein. Wel bruikbaar van laddering is het grafische aspect; het laten tekenen van structuren door experts kan ertoe bijdragen dat de kennis van de expert beter wordt overgedragen aan de kennisingenieur [21].

Ook concepten sorteren levert naar verwachting te weinig op omdat deze methode niet specifiek bedoeld is voor het afleiden van (causale) invloeden. Voor milieuproblemen zijn er altijd bepaalde doelen te formuleren (beleidsdoelstellingen bijvoorbeeld). Vanuit deze doelen (voor ons deeldomein bijvoorbeeld een betere natuurkwaliteit) willen we de problemen verkennen en in kaart brengen. Een directe vraag naar (causale) effecten op bepaalde concepten lijkt daarom de meest directe en beste methode voor dit onderzoek.

2.5.2 De gevolgde procedure

Individuele interviews met de vijf domeinexperts hebben de basis gevormd van het elicitatieproces voor dit onderzoek. De experts hardop laten denken over de systemen in het milieu is een belangrijke methode geweest. Daarbij zijn de experts in staat gesteld om concepten en relaties grafisch weer te geven met behulp van pen en papier.

Een eerste doel van de elicitatieprocedure was om duidelijk te maken welke concepten er zijn. In eerste instantie is dit bepaald door de expert te laten *brainstormen* over het domein. Dit brainstormen werd dan in gang gezet door een open vraag te stellen, bijvoorbeeld “welke aspecten van het milieu zijn van invloed op de terrestrische natuurkwaliteit?”. De experts werd gevraagd om hierover hardop te denken. Er is veel aandacht aan besteed om steeds duidelijk te krijgen wat er met de bepaalde termen bedoeld wordt. Hoe definieert men natuurkwaliteit? Wat voor processen worden hier bedoeld? Het is belangrijk dat dergelijke termen expliciet worden uitgelegd. Daarmee wordt het waarschijnlijker dat de expert en de kennisingenieur hetzelfde bedoelen, en wordt de kans op misinterpretatie geminimaliseerd [15].

Bij het brainstormen is er voortdurend doorgevraagd over concepten die genoemd werden. Als de expert met allerlei zeer gedetailleerde informatie kwam, is getracht om de vragen specifiek te maken en deze vragen zodanig te formuleren dat vooral de hoofdlijnen boven water komen. Het doel van het gesprek was immers om een *compleet* beeld te krijgen van de domeinkennis, zonder al te veel op (numerieke) details in te gaan.

Er is begonnen met het opbouwen van een conceptueel model door relaties grafisch te laten tekenen met pen en papier. Daartoe is aan de expert gevraagd om relaties in te tekenen in een graaf, bestaande uit de knopen die de vastgestelde concepten representeren. Steeds is doorgevraagd naar de getekende relaties tussen de concepten. Wat voor soort relaties zijn het? Zijn het alleen causale relaties? Zoja, hoe beïnvloeden de concepten elkaar? Zijn deze relaties sterk? Gelden ze altijd? Of alleen onder bepaalde voorwaarden? Zijn er ook andere dan causale relaties? Met dit soort vragen kunnen de relaties voor het informele model worden verkregen. Soms kunnen gevalsbeschrijvingen helpen om de juiste informatie te verkrijgen. Alles wat door de experts werd genoemd is genoteerd.

2.5.3 Eventuele herziening van het conceptuele model

In de laatste weken van februari 2003 hebben de gesprekken plaatsgevonden met de genoemde vijf domeinexperts. De interviews duurden ongeveer 90 minuten. Vervolgens zijn de stukjes model vergeleken en aan elkaar gekoppeld. Alle experts is van tevoren verteld dat er mogelijk tweemaal of zelfs vaker een afspraak met hen nodig is, omdat de kans groot is dat er tegenstrijdigheden in het geheel zitten is. In een tweede interview zouden de experts dan gewezen kunnen worden op de oordelen van andere experts, in een poging om deze analyses op elkaar af te stemmen [15]. Voor dit onderzoek bleek dit niet nodig te zijn; de domeinkennis van de vijf experts overlapt enigszins, maar in deze overlappende delen van het domein zijn geen tegenstrijdigheden opgetreden.

2.6 *Het informele model*

De interviews hebben geresulteerd in een informeel model. Dit informele model zal hier worden beschreven. Het bestaat uit een opsomming van concepten, categorieën daarbinnen en attributen daarvan. Tevens worden de relaties tussen de concepten gegeven, soms aangevuld met wat extra achtergrondinformatie en/of informatie over voorwaarden en sterktes van relaties. Belangrijke begrippen worden gedefinieerd. Per expert is er ook een grafische representatie van het betreffende deel van het informele model weergegeven. Als mogelijke waarden voor alle concepten kunnen “wordt meer”, “blijft gelijk” en “wordt minder” worden gehanteerd, tenzij anders aangegeven. Als een relatie van concept A op concept B versterkend is, dan betekent dit dat meer van A naar verwachting van de expert leidt tot meer van B. Evenzo geldt dat als een relatie van concept A op concept B verzwakkend is, dat dit dan betekent dat meer van A naar verwachting van de expert leidt tot minder van B.

2.6.1 Terrestrische natuurkwaliteit

Rob Alkemade is gespecialiseerd in de terrestrische natuurkwaliteit in Nederlandse natuurgebieden.

Concepten

Gedurende de brainstormsessie zijn de volgende concepten genoemd:

1. Terrestrische natuurkwaliteit. Dit begrip wordt als volgt gedefinieerd: “De gemiddelde abundantie (=het aantal planten/dieren) voor alle planten- en diersoorten ten opzichte van wat er van nature voorkomt, in Nederlandse natuurgebieden”. Dit wordt bepaald met tellingen voor een aantal representatieve soorten.
2. Verdroging. Zie paragraaf 2.6.2 voor de definitie.
3. Verzuring. Dit heeft betrekking op de hoeveelheid zuren *in de bodem*. Hier hebben we het dus over de *neergeslagen* hoeveelheid.
4. Vermesting. Dit heeft betrekking op de hoeveelheid nutriënten in de bodem. Ook hier hebben we het dus over de *neergeslagen* hoeveelheid.
5. Verstoring. Heeft vooral betrekking op verstoring van dieren. Dit kan komen door geluid en/of licht.
6. Versnippering. Dit is de fragmentatie van natuurgebieden.
7. Verlies habitat. Dit is de verkleining van het areaal van natuurgebieden.
8. Toxische stoffen. Dit zijn vergiftigende stoffen zoals zware metalen.
9. Klimaatverandering.

Omdat alleen de eerste vier concepten binnen het deeldomein vallen worden alleen deze concepten meegenomen. Er wordt dus ook alleen doorgevraagd naar de relaties tussen deze concepten.

Relaties

In beginsel hebben zowel verdroging, verzuring als vermisting een verzwakkende causale invloed op de natuurkwaliteit. Deze relaties zijn echter vrij complex. Zo hebben vrijwel alle abiotische factoren (alle niet-levende aspecten van de leefomgeving, zoals factoren die betrekking hebben op bodem, water, lucht, etc.) een bepaald *optimum* voor de natuurkwaliteit. Te veel van iets is niet goed, en te weinig ook niet. Dit geldt voor de hoeveelheden van bepaalde stoffen, en ook voor de hoeveelheid water. Van zowel verzuring, vermisting als verdroging is er echter duidelijk teveel, en het is *irreëel* dat er van een of meer van deze drie concepten binnenkort te weinig zou zijn.

Daarom gelden de volgende relaties voor heel Nederland in een vast tijdbestek:

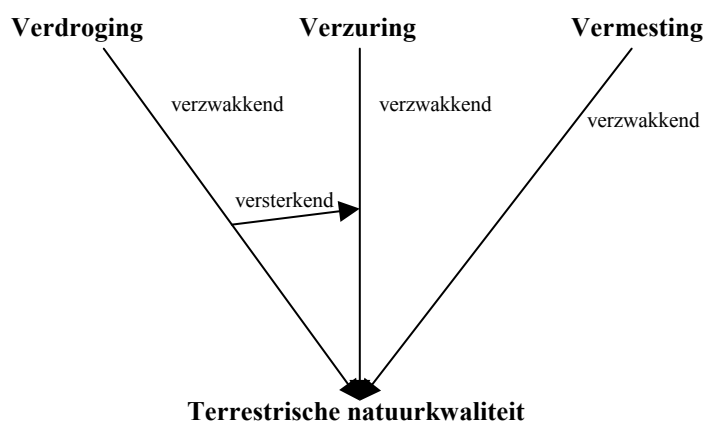
1. Verdroging heeft een verzwakkende (causale) invloed op de terrestrische natuurkwaliteit.
2. Verzuring heeft een verzwakkende (causale) invloed op de terrestrische natuurkwaliteit.
3. Vermesting heeft een verzwakkende (causale) invloed op de terrestrische natuurkwaliteit.

Volgens de expert kan er hier moeilijk iets over sterktes van de invloeden gezegd worden, omdat dat (a) moeilijk meetbaar is en (b) omdat het duidelijk is dat ze alledrie een belangrijke rol spelen. Het is dus niet te zeggen dat de ene relatie veel sterker is dan de andere.

Daarbij kan nog het volgende worden opgemerkt:

- Als het plaatselijke milieu droog is, is het negatieve effect van verzuring op de natuurkwaliteit veel sterker, maar als het verzuurd is, heeft verdroging ongeveer hetzelfde effect als wanneer het niet verzuurd is.
- Verdroging van het plaatselijke milieu werkt vermisting in de hand, maar als het plaatselijke milieu erg vermist is, heeft verdroging minder effect.

Schematisch:



Hoewel er in dit onderzoek voor gekozen is om het systeem van Nederland in zijn geheel in een vast tijdsbestek te modelleren zijn er wel degelijk opmerkingen te plaatsen bij aspecten met betrekking tot tijd en plaats. Zo verschillen de invloeden per natuurgebied, en hangen ze af van de directe omgeving ervan. De grondsoort bijvoorbeeld speelt een grote rol als het gaat om de mate van invloed van verzuring. Kalkhoudende bodems hebben bijvoorbeeld een bufferende werking. Deze en andere buffers in ecosystemen kunnen er voor zorgen dat het effect in eerste instantie lijkt mee te vallen, maar dat pas geruime tijd later toch sprake blijkt te zijn geweest van grote impact. Andere lokale verschillen zijn bijvoorbeeld dat droge gebieden uiteraard minder gevoelig zijn voor verdroging dan natte gebieden, en dat voedselrijke gebieden minder gevoelig zullen zijn voor vermesting dan voedselarme gebieden. Naast buffers spelen ook drempelwaarden een rol; het kan zo zijn dat een invloed als verzuring nog nauwelijks effect heeft, doordat de zuurgraad zich nog boven een drempelwaarde bevindt. Een kleine toename van de verzuring kan dan al snel leiden tot een enorme achteruitgang van de natuurkwaliteit. Daarnaast zijn sommige processen vrijwel onomkeerbaar; als bijvoorbeeld in een soortenrijk blauwgrasland op veenachtige bodem de vermesting en verdroging toenemen, dan zal de kwaliteit daarvan drastisch achteruitgaan. Als na enige jaren deze vermesting en verdroging worden teruggedraaid, dan zal het gedegenerende grasland slechts deels regenereren, omdat er sterke oxidatie van de veenbodem heeft plaatsgevonden. Afgezien daarvan hebben gevoelige ecosystemen als deze blauwgraslanden een hele lange tijd nodig om tot ontwikkeling te komen en het vereiste evenwicht te laten ontstaan. In het algemeen kan gezegd worden dat achteruitgang van de natuurkwaliteit veel sneller te bewerkstelligen is dan vooruitgang.

Vanwege de keuze om een model te maken voor heel Nederland in een vast tijdsbestek, hoeven deze tijdelijke en/of plaatselijke effecten niet in ons model te worden opgenomen. Voor de volledigheid zijn deze effecten hier wel genoemd, mede omdat daar in de aanbevelingen nog op wordt ingegaan.

2.6.2 Hydrologie

Rien Pastoors is hydroloog en is gespecialiseerd in het gebied van grondwater. Hij levert met behulp van modellen de onderbouwing van de informatie die in de Milieuverkenning komt.

Concepten

Gedurende de brainstormsessie zijn de concepten genoemd die te vinden zijn op de volgende pagina.

1. **Verdroging.** Hiermee wordt verdroging van natuurgebieden bedoeld. Verdroging heeft feitelijk twee definities. Een eerste definitie betreft kwantitatieve verdroging: een lagere grondwaterstand dan de natuurbeheerders zouden willen zien. De tweede definitie is kwalitatieve verdroging: een andere mineralensamenstelling van oppervlaktewater als gevolg van het inlaten van gebiedsvreemd water. Aangezien in de praktijk de tweede definitie een direct gevolg is van de eerste en beide een negatief effect hebben op de terrestrische natuurkwaliteit, kunnen deze voor dit model samen worden gehouden in één concept. De eerste definitie kan hierbij worden aangehouden. Meer verdroging betekent dus een lagere waterstand in en om de natuurgebieden.
2. **Drooglegging/peilverlaging.** Dit is vooral ten behoeve van de landbouw.
3. **Landbouw-productie.**
4. **Grondwateronttrekking.** Dit kan zijn
 - ✓ ten behoeve van drinkwaterwinning
 - ✓ voor de industrie
5. **Verstedelijking.** Nederland is voor een steeds groter deel bedekt met asfalt en bebouwing.

Omdat alleen de eerste drie concepten binnen het deeldomein vallen worden alleen deze concepten meegenomen.

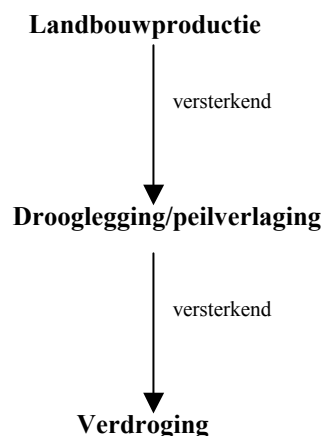
Relaties

Zo'n 60% van het verdrogingsprobleem wordt veroorzaakt door de landbouw. Zo'n 30% komt door de grondwateronttrekkingen, en de overige 10% is het gevolg van de verstedelijking. Aangezien hiervan alleen de invloed van de landbouw binnen ons deeldomein valt, zijn alleen de volgende relaties af te leiden:

1. De landbouw-productie heeft een versterkende (causale) invloed op de drooglegging/peilverlaging.
2. Drooglegging/peilverlaging heeft een versterkende (causale) invloed op de verdroging.

Wat betreft de sterktes van deze relaties kan gezegd worden dat de landbouw en de daarbij behorende drooglegging/peilverlaging dus voor zo'n 60% verantwoordelijk zijn voor de verdroging in natuurgebieden.

Schematisch:



2.6.3 Verkeer

Jan-Anne Annema houdt zich bezig met verkeersemmissies, en werkt onder andere aan verschillende emissiemodellen.

Concepten

Het verkeer draagt door uitstoot bij aan de hoeveelheden NO_x en SO_x in de lucht. Twee factoren van het verkeer bepalen de hoeveelheid uitstoot van deze stoffen: de totale hoeveelheid, en de efficiency.

Er bestaan verschillende vormen van verkeer. Er wordt (globaal) onderscheid gemaakt tussen personenauto's, bestelauto's, vrachtverkeer, binnenlandse scheepvaart, en overige. De volgende concepten kunnen hieruit worden afgeleid.

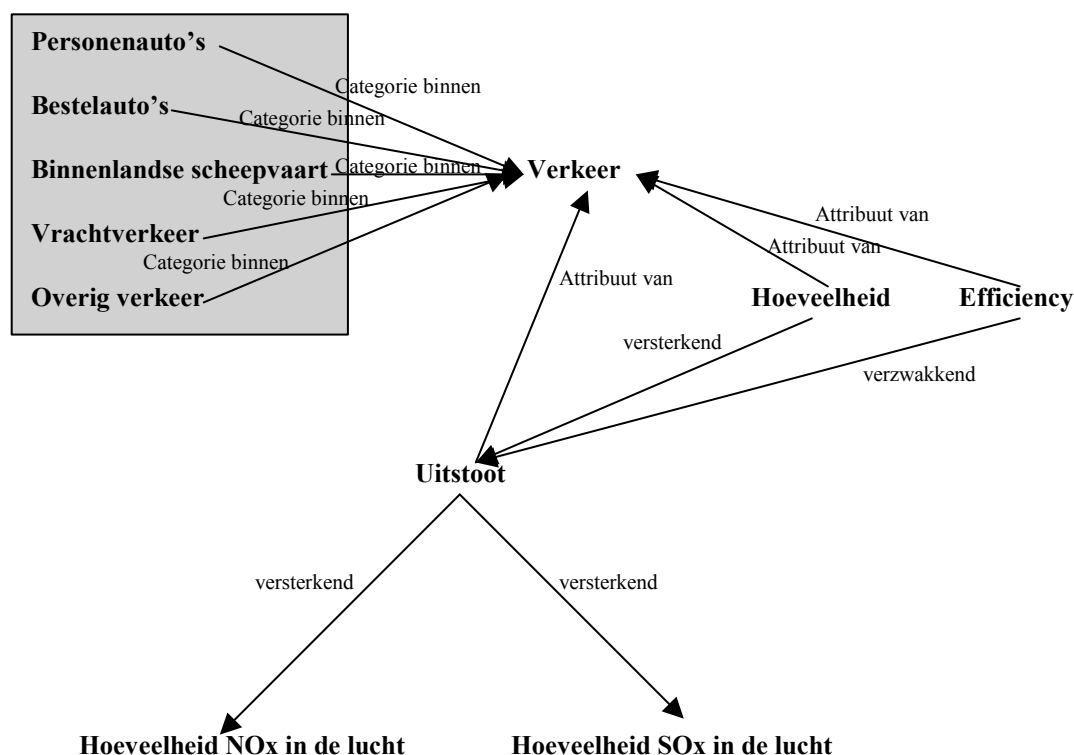
1. Hoeveelheid NO_x .
2. Hoeveelheid SO_x .
3. Verkeer.
4. Efficiency van het verkeer. Voor de uitstoot van SO_x wordt er gekeken naar gram uitstoot per liter brandstof, voor de uitstoot van NO_x wordt er gekeken naar gram uitstoot per gereden kilometer.
5. Hoeveelheid verkeer.
6. Uitstoot door verkeer
7. Personenauto's.
8. Bestelauto's.
9. Vrachtverkeer.
10. Binnenlandse scheepvaart.
11. Overig verkeer.

Relaties

De volgende relaties volgen uit het interview:

1. De personenauto's vormen een categorie binnen het concept verkeer.
2. De bestelauto's vormen een categorie binnen het concept verkeer.
3. Het vrachtverkeer vormt een categorie binnen het concept verkeer.
4. De binnenlandse scheepvaart vormt een categorie binnen het concept verkeer.
5. Het overig verkeer vormt een categorie binnen het concept verkeer.
6. De efficiency van het verkeer is een attribuut van het concept verkeer.
7. De hoeveelheid verkeer is een attribuut van het concept verkeer.
8. De uitstoot door verkeer is een attribuut van het concept verkeer.
9. De hoeveelheid verkeer heeft een versterkende (causale) invloed op de uitstoot door verkeer.
10. De efficiency van het verkeer heeft een verzwakkende (causale) invloed op de uitstoot door verkeer.
11. De uitstoot door verkeer heeft een versterkende (causale) invloed op de hoeveelheid NO_x .
12. De uitstoot door verkeer heeft een versterkende (causale) invloed op de hoeveelheid SO_x .

Schematisch:



Het kader om de verschillende categorieën van het verkeer geeft aan dat deze categorieën wederzijds uitsluitend en uitputtend zijn, dat wil zeggen dat een vervoermiddel altijd in precies één van deze categorieën is onder te brengen.

De meeste NO_x komt van de personenauto's. Binnen het verkeer zorgt de scheepvaart voor de meeste SO_x . Overigens vertraagt het effect van maatregelen met betrekking tot efficiency omdat het wel 15 jaar duurt voordat alle auto's vervangen zijn (na 5 jaar rijden er dus nog heel wat oude inefficiënte auto's). Dit is echter een tijdsaspect dat niet in het model wordt meegenomen.

2.6.4 Atmosferische verspreiding

Hans van Jaarsveld is gespecialiseerd in de verspreiding van stoffen door de atmosfeer, en de depositie als gevolg daarvan. De relatie emissies-deposities dus.

Concepten

Gedurende de brainstormsessie zijn de volgende concepten genoemd:

1. Vermesting.
2. Verzuring.
3. Hoeveelheid NO_x . Dit betreft de hoeveelheid NO_x in de lucht.
4. Hoeveelheid NH_x . Dit betreft de hoeveelheid NH_x in de lucht.
5. Hoeveelheid SO_x . Dit betreft de hoeveelheid SO_x in de lucht.
6. Landbouwproductie.
7. Uitstoot door verkeer.
8. Industrie.
9. Energieopwekking.
10. Buitenlandse emissies

De laatste drie concepten vallen buiten het deeldomein dus worden niet meegenomen.

Relaties

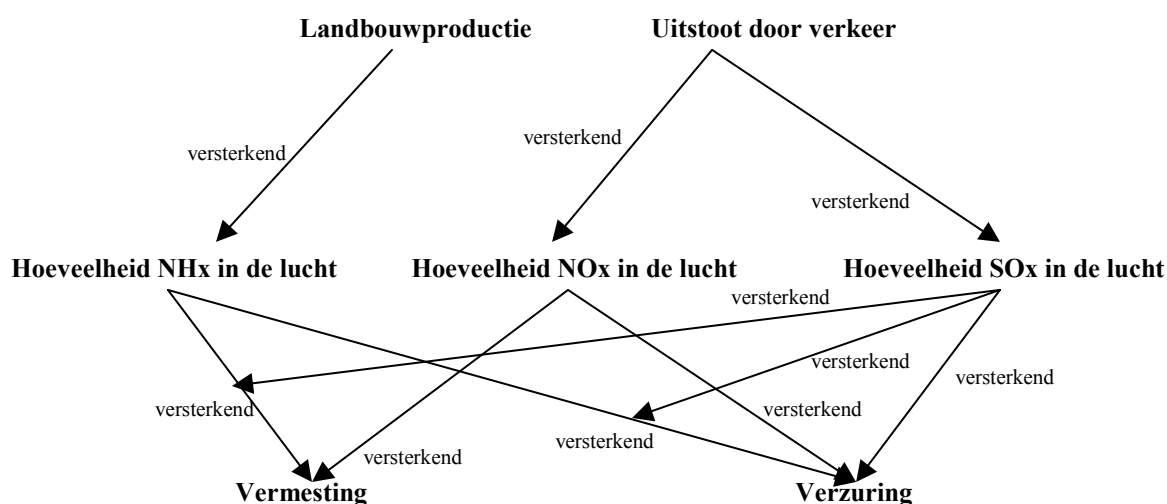
De stoffen NO_x en (vooral) NH_x dragen bij aan de vermisting, en NO_x , NH_x en SO_x hebben een versterkende invloed op de verzuring. Wanneer we kijken naar bronnen van deze stoffen, dan blijkt dat behalve verkeer en landbouw ook het buitenland, de industrie en daarnaast energieopwekking een grote rol spelen. Dit valt echter buiten het deeldomein. De volgende relevante relaties volgen uit het interview:

1. De hoeveelheid NO_x heeft een versterkende (causale) invloed op de vermisting.
2. De hoeveelheid NH_x heeft een versterkende (causale) invloed op de vermisting.
3. De hoeveelheid NO_x heeft een versterkende (causale) invloed op de verzuring.
4. De hoeveelheid NH_x heeft een versterkende (causale) invloed op de verzuring.
5. De hoeveelheid SO_x heeft een versterkende (causale) invloed op de verzuring.
6. De uitstoot door verkeer heeft een versterkende (causale) invloed op de hoeveelheid NO_x .
7. De uitstoot door verkeer heeft een versterkende (causale) invloed op de hoeveelheid SO_x .
8. De landbouwproductie heeft een versterkende (causale) invloed op de hoeveelheid NH_x .

Er is in (zeer) lichte mate sprake van interactie tussen NH_x en SO_x ; NH_x slaat iets sneller neer als er meer SO_x in de lucht zit. Expliciet geformuleerd levert dit de volgende twee extra relaties op:

9. De hoeveelheid SO_x heeft een versterkende (causale) invloed op de relatie tussen de hoeveelheid NH_x en vermisting (relatie 2).
10. De hoeveelheid SO_x heeft een versterkende (causale) invloed op de relatie tussen de hoeveelheid NH_x en verzuring (relatie 4).

Schematisch:



Over de sterktes kan het volgende worden gezegd. Uit de Milieubalans 2000 van het RIVM volgen deze cijfers over zure depositie:

NH_x : 2100 z-eq/ha per jaar

NO_y : 700 z-eq/ha per jaar

SO_x : 740 z-eq/ha per jaar

Daarbij is de eenheid 'z-eq' de hoeveelheid zuurequivalenten. Dit is een maat om de precieze bijdrage aan de verzuring te kunnen vaststellen. Meer dan de helft van de NO_x komt uit het buitenland, ongeveer 1/3 komt van het verkeer. De bijdrage van de landbouw is marginaal. Voor NH_x is zo'n driekwart van de landbouw afkomstig, de rest komt grotendeels uit het buitenland. Van SO_x komt meer dan driekwart uit het buitenland, verder is er een kleine bijdrage van verkeer en industrie in Nederland.

2.6.5 Landbouw

Gert-Jan van den Born is bodemkundige, die zich vanuit twee perspectieven met de landbouw bezighoudt:

- Vanuit landbouwkundig oogpunt, dus vanuit de gebruikskant. Processen van (mest-) stoffen vallen hier ook onder
- Vanuit landschapsecologisch perspectief

Concepten

Het interview heeft de volgende relevante concepten opgeleverd:

1. Vermesting.
2. Verdroging.
3. Landbouw
4. Veeteelt
5. Akkerbouw
6. Aandeel veeteelt
7. Uitspoeling N
8. Uitspoeling P
9. Hoeveelheid NH_x
10. Conventionele landbouw. Dit is de normale gangbare landbouw.
11. Geïntegreerde landbouw. Dit landbouw waarbij er geen andere milieuregels gelden dan voor conventionele landbouw, maar waarbij de milieulast zoveel mogelijk wordt geminimaliseerd door uitdrukkelijk minimale hoeveelheden meststoffen/bestrijdingsmiddelen te gebruiken en deze te gebruiken op momenten waarop ze optimaal benut worden.
12. Biologische landbouw. Bij deze vorm van landbouw mogen er geen kunstmest en synthetische bestrijdingsmiddelen worden gebruikt. Dit levert 20% minder productie.
13. Aandeel biologische/geïntegreerde landbouw
14. Landbouwproductie
15. Landbouw-efficiency. Dit is de verhouding tussen de landbouwproductie en de milieulast (in termen van uitspoeling en emissies).
16. Kunstmestgebruik
17. Drooglegging/peilverlaging

Daarbij zijn de relevante aspecten van de concepten Conventionele landbouw, Geïntegreerde landbouw en Biologische landbouw reeds ondervangen in het concept Aandeel biologische/geïntegreerde landbouw en zijn de relevante aspecten van de concepten Veeteelt en Akkerbouw reeds ondervangen in het concept Aandeel veeteelt. Causale relaties van deze concepten worden daarom in dit informele model gemodelleerd via Aandeel biologische/geïntegreerde landbouw en Aandeel veeteelt.

Relaties

De landbouwgronden in Nederland bestaan voor 50% uit grasland. De landbouw kan worden verdeeld in twee sectoren: de veeteelt en de akkerbouw. Globaal levert de veeteelt de mest voor de akkerbouw. Binnen de veeteelt kan onderscheid worden gemaakt tussen rundvee, varkens en pluimvee. De verhouding veeteelt-akkerbouw is van groot belang voor de vermistingsproblematiek. In verhouding teveel veeteelt leidt tot een mestoverschot. Dit leidt

tot uitspoeling van stikstof (N) en fosfaat (P) naar het grondwater. Ook zorgt overmatige bemesting voor verspreiding van NH_x via lucht (*vervluchting*) én bodem.

Er is regelgeving voor agrariërs: er is een mineralenboekhouding vereist, en daarbij mag de zogeheten verliesnorm niet overschreden worden. Er spoelt door overmatige bemesting stikstof (N) en fosfaat (P) uit naar het grondwater; NH_x verspreidt zich via lucht én bodem. In Nederland is nu zo'n 2% van de landbouw biologisch, en 10% geïntegreerd.

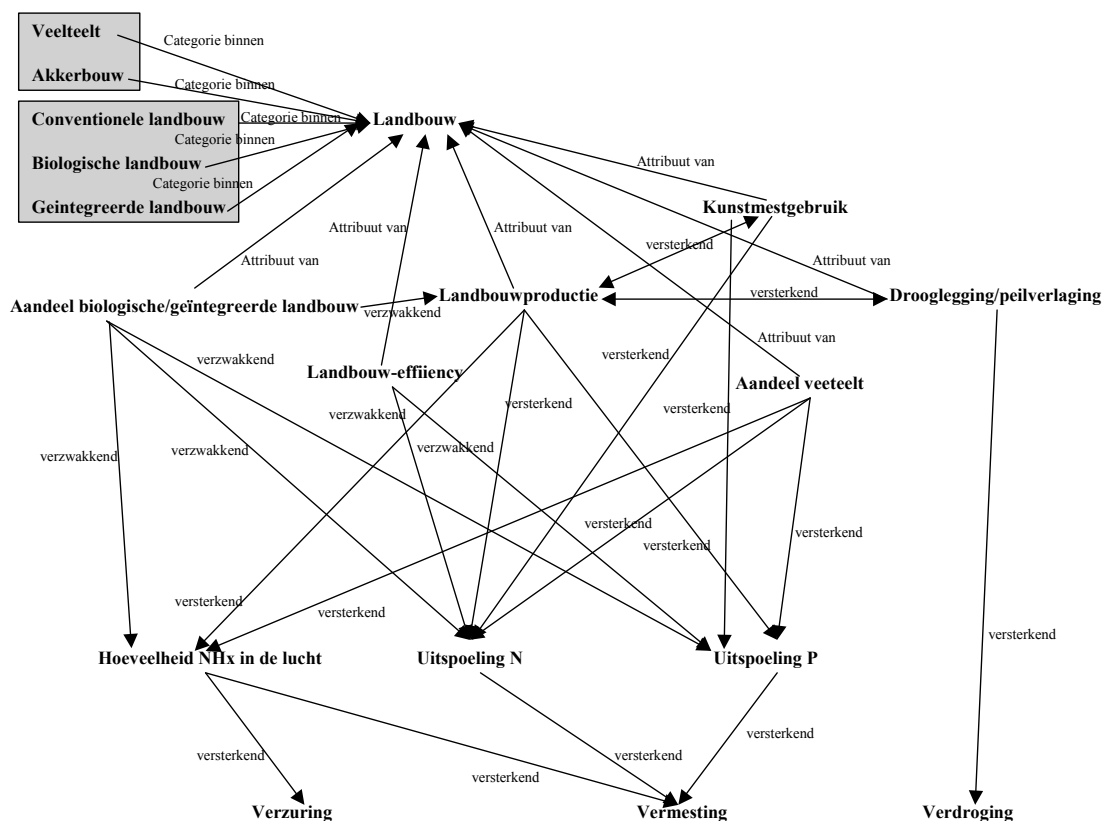
De volgende relaties komen uit het interview naar boven:

1. De akkerbouw vormt een categorie binnen het concept landbouw.
2. De veelteelt vormt een categorie binnen het concept landbouw.
3. De conventionele landbouw vormt een categorie binnen het concept landbouw.
4. De geïntegreerde landbouw vormt een categorie binnen het concept landbouw.
5. De biologische landbouw vormt een categorie binnen het concept landbouw.
6. De landbouwproductie is een attribuut van het concept landbouw.
7. Het aandeel veeteelt is een attribuut van het concept landbouw.
8. De landbouw-efficiency is een attribuut van het concept landbouw.
9. Het aandeel biologische/geïntegreerde landbouw is een attribuut van het concept landbouw.
10. Het kunstmestgebruik is een attribuut van het concept landbouw.
11. De landbouwproductie heeft een versterkende (causale) invloed op de hoeveelheid NH_x .
12. De landbouwproductie heeft een versterkende (causale) invloed op de uitspoeling van N.
13. De landbouwproductie heeft een versterkende (causale) invloed op de uitspoeling van P.
14. Het kunstmestgebruik heeft een versterkende (causale) invloed op de landbouwproductie.
15. De landbouwproductie heeft een versterkende (causale) invloed op het kunstmestgebruik.
16. Het kunstmestgebruik heeft een versterkende (causale) invloed op de uitspoeling van N.
17. Het kunstmestgebruik heeft een versterkende (causale) invloed op de uitspoeling van P.
18. De landbouw-efficiency heeft een verzwakkende (causale) invloed op de uitspoeling van N.
19. De landbouw-efficiency heeft een verzwakkende (causale) invloed op de uitspoeling van P.
20. Het aandeel veelteelt heeft een versterkende (causale) invloed op de uitspoeling van N.
21. Het aandeel veelteelt heeft een versterkende (causale) invloed op de uitspoeling van P.
22. Het aandeel veelteelt heeft een versterkende (causale) invloed op de hoeveelheid NH_x .
23. De drooglegging/peilverlaging heeft een versterkende (causale) invloed op de landbouwproductie.
24. De landbouwproductie heeft een versterkende (causale) invloed op de drooglegging/peilverlaging.
25. De drooglegging/peilverlaging heeft een versterkende (causale) invloed op de verdroging.
26. Het aandeel biologische/geïntegreerde landbouw heeft een verzwakkende (causale) invloed op de uitspoeling van N.
27. Het aandeel biologische/geïntegreerde landbouw heeft een verzwakkende (causale) invloed op de landbouwproductie.

28. Het aandeel biologische/geïntegreerde landbouw heeft een verzwakkende (causale) invloed op de uitspoeling van P.
29. Het aandeel biologische/geïntegreerde landbouw heeft een verzwakkende (causale) invloed op de hoeveelheid NH_x .
30. De uitspoeling van N heeft een versterkende (causale) invloed op de vermesting.
31. De uitspoeling van P heeft een versterkende (causale) invloed op de vermesting.
32. De hoeveelheid NH_x heeft een versterkende (causale) invloed op de vermesting.
33. De hoeveelheid NH_x heeft een versterkende (causale) invloed op de verzuring.

Wat betreft de sterktes kan gezegd worden dat vooral de stoffen N en NH_x belangrijk zijn in de bijdrage aan de vermesting, P is wat minder belangrijk. De landbouwproductie en het aandeel veeveelt hebben ook een belangrijke invloed op de emissie en uitspoeling van deze stoffen, meer dan het kunstmestgebruik en het aandeel biologische/geïntegreerde landbouw. Ook de bijdrage van de landbouw aan de drooglegging/peilverlaging en daarmee de verdroging is een belangrijke.

Tot slot een schematische weergave van het informele model betreffende de landbouw:



De kaders om de verschillende categorieën van de landbouw geven weer aan dat de categorieën binnen de kaders wederzijds uitsluitend en uitputtend zijn.

3. Een formeel model

De in het vorige hoofdstuk beschreven kennis willen we graag modelleren. Om ook daadwerkelijk te kunnen redeneren met de kennis is het nodig om daar een formeel model van te maken. Daartoe dient er een *formalisme* gekozen te worden. Voor dit onderzoek is er gekozen voor *kwalitatieve probabilistische netwerken* (QPNs). Deze techniek, alsmede enkele uitbreidingen daarvan zullen in dit hoofdstuk worden beschreven. Daarna wordt in paragraaf 3.2 beschreven hoe de kennis uit hoofdstuk 2 is geformaliseerd tot een QPN. De keuzes die daarbij gemaakt moesten worden zijn te vinden in paragraaf 3.3. Tenslotte wordt in dit hoofdstuk het resulterende formele model getoond.

3.1 Kwalitatieve Probabilistische Netwerken

Het formalisme van QPNs is afgeleid van *Bayesian Belief Networks* (BBNs). In dit hoofdstuk zullen daarom eerst BBNs worden behandeld. Vervolgens zal de werking en functionaliteit van standaard QPNs worden beschreven. Tenslotte wordt uitgebreid over uitbreidingen van QPNs. Omdat een aantal begrippen herhaaldelijk gebruikt zullen worden volgt eerst een overzicht van relevante definities uit de graaftheorie en de kansrekening.

3.1.1 Kansrekening en graaftheorie

Met zowel BBNs als QPNs kunnen relaties tussen variabelen worden gemodelleerd. Deze variabelen dienen *discrete* variabelen te zijn. Dit wil zeggen dat het aantal waarden dat deze variabelen kunnen hebben eindig is. Het dienen ook statistische variabelen te zijn, d.w.z. dat men een kansverdeling kan definiëren voor de mogelijke waarden van deze variabelen [5]. De variabelen dienen slechts één mogelijke waarde te kunnen hebben (singlevalued). De mogelijke waarden van de variabelen dienen wederzijds uitsluitend en uitputtend te zijn.

Variabelen en hun waarden

In de notatie die we gebruiken beginnen de namen van variabelen met hoofdletters, en de mogelijke waarden daarvan met kleine letters. We zeggen bijvoorbeeld dat de variabele A de waarden $a1$, $a2$, en $a3$ kan hebben, en variabele B de waarden $b1$ en $b2$. Een uitspraak over waardetoekenningen aan variabelen kan uitgedrukt worden in bijvoorbeeld de propositie $B = b1 \wedge A = a2$, ook wel genoteerd als “ $b1 \wedge a2$ ”. Zo’n propositie betekent dus bijvoorbeeld “variabele B heeft waarde $b1$ en variabele A heeft waarde $a2$. Voor binaire variabelen gelden er steeds twee mogelijke waarden: `true` en `false`. In de notatie gebruiken we de notatie a om aan te geven dat de waarde van variabele A `true` is, en we gebruiken $\neg a$ om aan te geven dat de waarde van de variabele A `false` is.

In dit hoofdstuk beperken we ons tot binaire variabelen, omdat enkele van de later te behandelen uitbreidingen voor QPNs (op dit moment) uitsluitend mogelijk zijn voor binaire variabelen.

Kansen

De *kansmaat* Pr is een functie die de *kans* oplevert van een door een propositie beschreven gebeurtenis. Deze kansen bevinden zich in het interval $[0,1]$. De kansmaat Pr is gedefinieerd voor alle proposities die je kan samenstellen uit een combinatie van toekenningen van waarden aan variabelen en de operatoren \wedge , \vee en \neg , `True` en `False`. De propositie `True` is per definitie waar, en `False` is per definitie onwaar. Er geldt $\text{Pr}(\text{True}) = 1$ en $\text{Pr}(\text{False}) = 0$. Tevens geldt $\text{Pr}(a \vee b) = \text{Pr}(a) + \text{Pr}(b)$ mits $a \wedge b \equiv \text{False}$.

Er zijn conditionele en onvoorwaardelijke kansen. Onvoorwaardelijke kansen hebben de volgende betekenis: $\text{Pr}(a)$ geeft ons de kans dat de propositie a waar is, onafhankelijk van andere variabelen. Naast deze onvoorwaardelijke kansen kennen we ook conditionele kansen: $\text{Pr}(a | b)$ betekent de kans op a *gegeven* een propositie b . Dit betekent de kans op a als b met *zekerheid* bekend is.

De volgende wiskundige definitie geldt voor conditionele kansen:

$\Pr(x | y) = \Pr(x \wedge y) / \Pr(y)$, mits $\Pr(y) \neq 0$. $\Pr(x | y)$ is een conditionele kansfunctie voor x gegeven y .

Bayesian Belief Networks danken hun naam aan de regel van Bayes. Deze kan worden gebruikt om de “richting” van conditionele kansen om te keren, en is als volgt:

$$\Pr(b|a) = \frac{\Pr(a|b) \cdot \Pr(b)}{\Pr(a)}$$

In berekeningen met BBNs wordt veelvuldig gebruik gemaakt van deze regel.

(On)afhankelijkheden

Variabelen kunnen afhankelijk of onafhankelijk van elkaar zijn. Wiskundig gezien zijn statistische variabelen X en Y (wederzijds) onafhankelijk in \Pr dan en slechts dan als geldt $\Pr(x \wedge y) = \Pr(x) \cdot \Pr(y)$ voor alle mogelijke waardetoekenningen x aan X en y aan Y .

Twee variabelen X en Y zijn conditioneel onafhankelijk gegeven een variabele Z als geldt : $\Pr(x \wedge y | z) = \Pr(x | z) \cdot \Pr(y | z)$. Geldt dit niet, dan zijn x en y zijn (conditioneel) afhankelijk gegeven z .

Graaf theorie

Een gerichte graaf is een paar $G = (V(G), A(G))$ waarbij $V(G)$ een eindig aantal knopen bevat, en $A(G)$ is een verzameling van geordende paren (V_i, V_j) , waarbij $V_i, V_j \in V(G)$, gerepresenteerd als pijlen. In dit onderzoek worden gerichte grafen gepresenteerd met rondjes die de knopen representeren, onderling verbonden door middel van de pijlen.

Er wordt een functie π gedefinieerd die alle knopen oplevert van waaruit een pijl wijst naar de gegeven knoop, oftewel de *ouders* van die knoop:

$$\begin{aligned} \pi(B) &= \{A \mid (A, B) \in A(G)\} \\ \pi^*(B) &= \bigcup_{C \in \pi(B)} [\{B\} \cup \pi^*(C)] \end{aligned}$$

Dus π levert alleen de directe ouders op, π^* levert ook de knoop zelf op alsmede de ouders van de ouders, de ouders van de ouders van de ouders, etc. op, oftewel alle *voorouders*.

Analoog aan de functie π voor de ouders, is er een functie σ die de alle variabelen oplevert waarnaar de gegeven knoop wijst, oftewel de *kinderen*:

$$\begin{aligned} \sigma(A) &= \{B \mid (A, B) \in A(G)\}, \\ \sigma^*(A) &= \bigcup_{C \in \sigma(A)} [\{A\} \cup \sigma^*(C)] \end{aligned}$$

Hier levert σ^* niet alleen de kinderen op, maar ook de knoop zelf alsmede de alle *afstammelingen*.

Twee knopen zijn *naburig* als er een directe pijl bestaat tussen de twee knopen. De richting van de pijl maakt daarbij niet uit. We spreken van een *keten* in een graaf van knoop V_1 naar knoop V_k wanneer er een reeks knopen $V_1 \dots V_k$ bestaat die opeenvolgend naburig zijn. Intuïtief: je volgt de pijlen in de graaf van A naar B , maar daarbij mag je zowel met de pijlen meegaan als er tegenin.

Een pad dat een gesloten “circuit” vormt noemen we een *cykel*. In dat geval is er dus een pad van een knoop naar de knoop zelf. Indien een graaf minimaal één cykel bevat noemen we de graaf *cyclisch*. Indien de graaf geen enkele cykel bevat, noemen we de graaf *acyclisch*.

Grafische modellen

In grafische modellen wordt graaf theorie gebruikt om informatie uit de kansrekening grafisch weer te geven. De knopen in grafische modellen representeren de variabelen, en het ontbreken van pijlen impliceert (conditionele) onafhankelijkheid van variabelen in de gerepresenteerde kansverdeling. Nu volgt de exacte relatie tussen de graafstructuur en conditionele onafhankelijkheid.

Een keten t van knoop A naar knoop B in graaf G is *geblokkeerd* door een verzameling knopen $X \subseteq V(G)$ indien [6]:

1. $A \in X$ of $B \in X$, of
2. Er bestaan knopen $C, D, E \in V(G)$ zodanig dat $D \in X$ en $D \rightarrow C, D \rightarrow E \in A(t)$ of $C \rightarrow D, D \rightarrow E \in A(t)$
3. Er bestaan knopen $C, D, E \in V(G)$ zodanig dat $C \rightarrow D, E \rightarrow D \in A(t)$ en $\sigma^*(D) \cap X = \emptyset$.

Als aan *geen* van drie voorgenoemde voorwaarden is voldaan spreken we van een *actieve* keten met betrekking tot X van A naar B .

Een verzameling van knopen Z *d-separeert* een verzameling knopen X van een verzameling knopen Y wanneer *elke* keten van een knoop uit X naar een knoop uit Y door een knoop uit Z geblokkeerd wordt. Dit wordt genoteerd als $\langle X | Z | Y \rangle_G^d$.

Wanneer variabelen die behoren bij knopen die ge-d-separeerd zijn in G , conditioneel onafhankelijk zijn, dan wordt de graaf een *I-map* (Independence-map) voor de kansverdeling genoemd. Formeel gezegd, laat G een acyclische gerichte graaf zijn, en \Pr een kansfunctie voor $V(G)$. Wanneer voor alle verzamelingen knopen $X, Y, Z \subseteq V(G)$ geldt:

$\langle X | Z | Y \rangle_G^d \Rightarrow \Pr(x | yz) = \Pr(x | z)$ voor alle waardetoeekenningen x aan X , y aan Y en z aan Z .

dan is G een *I-map* voor \Pr .

3.1.2 Definitie van Bayesian Belief Networks

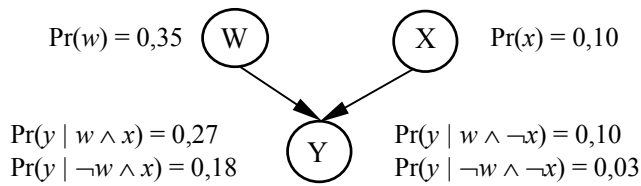
BBNs zijn ontwikkeld om te kunnen redeneren met onzekerheid. Zij zijn bruikbaar in toepassingsgebieden waar er sprake is van onzekere, onvolledige en eventueel zelfs tegenstrijdige kennis [18].

Een BBN bestaat uit een paar $B = (G, P)$, waarin:

- de gerichte acyclische graaf $G = (V(G), A(G))$ modelleert kwalitatieve kennis in termen van onafhankelijkheden tussen variabelen. De knopen representeren de variabelen, de pijlen geven een representatie van de onafhankelijkheden;
- de verzameling $P = \{\Pr_A | A \in V(G)\}$ voor iedere knoop $A \in V(G)$ een functie \Pr_A definieert, die bestaat uit een verzameling van (conditionele) kansverdelingen $\Pr(a | x)$ voor iedere combinatie van waarden a voor A en x voor $\pi(A)$. Dit deel modelleert de kwantitatieve kennis over de kansverdeling over de variabelen in het model.

De graaf G en de kansverdelingen in P leggen samen een unieke kansverdeling \Pr vast over alle variabelen zodanig dat G een I-map is voor \Pr .

Figuur 1 is te vinden op de volgende pagina en bevat een voorbeeld van een eenvoudig BBN.



Figuur 1: een voorbeeld van een Bayesian Belief Network

Er bestaan verschillende efficiënte inferentie-algoritmen voor Bayesiaanse netwerken. Deze worden onder andere beschreven in [14] en [18] en kunnen bijvoorbeeld op grond van een observatie de kansen op waarden van overige variabelen berekenen. Doordat invloeden van variabelen op elkaar steeds *lokaal* kunnen worden berekend, kunnen deze algoritmen redelijk snel het effect van een observatie (dus de toekenning van een waarde aan een variabele) doorberekenen voor alle andere variabelen. Naast deze a-posteriori kansen kunnen ook de a-priori kansen (dus vóór het invoeren van een observatie) met deze algoritmen berekend worden.

3.1.3 Definitie van Kwalitatieve Probabilistische Netwerken

Kwalitatieve probabilistische netwerken (QPNs) vormen een kwalitatieve abstractie van BBNs. Zij zijn ontworpen door M.P. Wellman in 1990 [23]. Net als een BBN bestaat een QPN uit een grafisch deel dat de onafhankelijkheden tussen de variabelen representeert. Het kwantitatieve deel is echter verschillend in de zin dat er geen exacte kansverdelingen worden gerepresenteerd, maar alleen *kwalitatieve* probabilistische relaties die beperkingen op de kansverdeling over de variabelen representeren. De exacte kansverdeling wordt dus niet vastgelegd in een functie \Pr zoals bij BBNs, maar alleen beperkingen daarop; de exacte kansverdeling hoeft dus ook niet bekend te zijn.

Er bestaan twee soorten kwalitatieve probabilistische relaties, namelijk kwalitatieve invloeden en kwalitatieve synergieën. Kwalitatieve invloeden zijn invloeden van een variabele op een andere, kwalitatieve synergieën beschrijven de interacties tussen meerdere variabelen.

Formeel is een QPN een paar (G, Q) , waarin $G = (V(G), A(G))$ weer een acyclische gerichte graaf is en Q een verzameling kwalitatieve relaties. Kwalitatieve *invloeden* van Q worden geassocieerd met de pijlen van G , kwalitatieve *synergieën* worden geassocieerd met hyperarcs. Hyperarcs zijn in de hier gebruikte representatie stippellijntjes tussen variabelen (voor zogenoemde product synergieën) of boogjes tussen pijlen (voor zogeheten additieve synergieën).

Kwalitatieve invloeden

Een positieve kwalitatieve invloed van een variabele A op een variabele B over de pijl (A, B) in een QPN met graaf G , genoteerd als $S^+(A, B)$ is van kracht dan, en alleen dan wanneer voor alle waardetoekeningen x aan $X = (\pi(B) \setminus \{A\})$ geldt dat $\Pr(b | ax) \geq \Pr(b | \neg ax)$. Dit betekent dat ongeacht de waarden van alle andere ouders van B , er altijd geldt dat als A `true` is, dat de kans op $B = \text{true}$ groter is of gelijk is dan wanneer A `false` is. Evenzo kunnen we definiëren:

$S^-(A, B) \equiv$ Voor alle waardetoekeningen x aan $X = (\pi(B) \setminus \{A\})$ geldt $\Pr(b | ax) \leq \Pr(b | \neg ax)$

$S^0(A, B) \equiv$ Voor alle waardetoekeningen x aan $X = (\pi(B) \setminus \{A\})$ geldt $\Pr(b | ax) = \Pr(b | \neg ax)$

$S^?$ $(A, B) \equiv$ géén van de drie voorgenoemde relaties is het geval

In het laatste geval kan bijvoorbeeld de invloed positief zijn voor sommige x en negatief zijn voor andere x (non-monotoniciteit). Het kan ook zijn dat deze invloed onbekend is. We spreken in dergelijke gevallen van *ambiguïteit*. S^0 relaties worden niet getekend. Dit betekent namelijk dat er geen invloed is, dus deze hoeven ook niet te worden weergegeven in de graaf. Voor positieve en negatieve kwalitatieve invloeden van bijvoorbeeld A op B geldt per definitie de eis van *monotoniciteit*: ongeacht de context (de andere variabelen mogen alle

waarden hebben) zal een verhoging van de kans op A *altijd* leiden tot een verhoging resp. verlaging (óf het gelijk blijven) van de kans op B .

Kwalitatieve invloeden worden alleen expliciet gespecificeerd voor pijlen. De verzameling van alle kwalitatieve invloeden bestaat echter uit alle invloeden die met behulp van de volgende eigenschappen afgeleid kunnen worden:

- *Symmetrie*. Dit wil zeggen dat als B een positieve invloed op A heeft, dan heeft A een positieve invloed op B . Formeel: $S^+(A, B) \Leftrightarrow S^+(B, A)$. Dit geldt voor alle vier de tekens, en dit geldt ook indirect, dus als A via andere variabelen een positieve invloed heeft op B (indirecte invloeden worden mogelijk gemaakt door *transitiviteit*, zie het volgende punt), dan heeft B ook via die andere variabelen een positieve invloed op A .
- *Transitiviteit*. Dit betekent dat als A invloed op B heeft, en B heeft invloed op C , dan zal A een invloed op C hebben die gelijk is aan het *teken-product* (gedefinieerd door de operator \otimes uit figuur 2) van de tekens van de eerste en de tweede invloed. Een invloed van A op C via B noemen we een *indirecte* invloed.
- *Compositie*. Dit houdt in dat het netto effect van meerdere invloeden (direct danwel indirect) van een variabele A op een variabele B gelijk is aan de ‘som’ van die invloeden. De som van invloeden is gedefinieerd met een operator \oplus , te vinden in figuur 2.

\otimes	+	0	-	?
+	+	0	-	?
0	0	0	0	0
-	-	0	+	?
?	?	0	?	?

\oplus	+	0	-	?
+	+	+	?	?
0	+	0	-	?
-	?	-	-	?
?	?	?	?	?

Figuur 2: De \otimes en \oplus operatoren

Een bewijs voor deze eigenschappen is te vinden in [23] en [19].

Naast kwalitatieve invloeden kennen QPNs ook synergieën. Deze modelleren het *gezamenlijke* effect van twee of meer variabelen op een andere variabele. Er bestaan twee soorten synergieën: additieve synergieën en product synergieën.

Additieve synergieën

Een additieve synergie geeft aan hoe de waarden van twee variabelen *gezamenlijk* een gemeenschappelijk kind beïnvloeden. Een positieve additieve synergie van de knopen A en B op een gemeenschappelijk kind C geeft aan dat de invloed van A én B op C groter is dan de som van de beide afzonderlijke invloeden, ongeacht andere eventuele invloeden op C . De mogelijke tekens zijn weer +,-,0 en ?.

Formeel worden additieve synergieën als volgt gedefinieerd:

Gegeven een drietal variabelen A , B en C , waarbij zowel A als B ouders zijn van C in G . Laat X de verzameling ouders zijn van C , zonder A en B . Dus $X = \pi(C) \setminus \{A, B\}$. Dan is er sprake van een positieve additieve synergie, genoteerd als $Y^+(\{A, B\}, C)$ dan en alleen dan wanneer voor alle waardetoekenningen x aan X geldt dat $\Pr(c \mid abx) + \Pr(c \mid \neg a \neg bx) \geq \Pr(c \mid a \neg bx) + \Pr(c \mid \neg abx)$.

Analoog hieraan gelden de definities:

$Y^-(\{A, B\}, C) \equiv$ voor alle waardetoekenningen x aan $X = \pi(C) \setminus \{A, B\}$ geldt dat

$$\Pr(c \mid abx) + \Pr(c \mid \neg a \neg bx) \leq \Pr(c \mid a \neg bx) + \Pr(c \mid \neg abx)$$

$Y^0(\{A, B\}, C) \equiv$ voor alle waardetoekenningen x aan $X = \pi(C) \setminus \{A, B\}$ geldt dat

$$\Pr(c \mid abx) + \Pr(c \mid \neg a \neg bx) = \Pr(c \mid a \neg bx) + \Pr(c \mid \neg abx)$$

$Y^2(\{A, B\}, C) \equiv$ géén van de drie voorgenoemde relaties is het geval

Ook voor additieve synergieën gelden er eigenschappen van symmetrie, transitiviteit en compositie.

Product synergieën

Een product synergie geeft aan hoe een variabele A de kansverdeling van een andere variabele B kan beïnvloeden als er een specifieke waarde bekend is van een gemeenschappelijk kind C . Zo heeft een negatieve product synergie voor de variabelen A en B met betrekking tot een waarde c_0 voor hun gemeenschappelijk kind C tot gevolg dat gegeven c_0 de kans op b kleiner wordt bij het toenemen van de kans op a . En andersom ook. De product synergie beschrijft dus de *intercausale* afhankelijkheid tussen de twee oorzaken A en B , als gevolg van het observeren van hun kind C . Ook hier zijn de mogelijke tekens weer $+, -, 0$ en $?$.

Formeel worden product synergieën als volgt gedefinieerd:

Gegeven een drietal variabelen A, B en C , waarbij zowel A als B ouders zijn van C .

Laat X de verzameling ouders zijn van C , met weglating van A en B . Dus $X = \pi(C) \setminus \{A, B\}$.

Laat x een combinatie van daadwerkelijk geobserveerde waarden zijn voor de variabelen in X .

Dan is er sprake van een negatieve product synergie tussen A en B voor de specifieke waarde c_0 van C , genoteerd als $X^-(\{A, B\}, c_0)$ dan en alleen dan wanneer geldt dat $\Pr(c_0 \mid abx) \cdot \Pr(c_0 \mid \neg a \neg bx) \leq \Pr(c_0 \mid a \neg bx) \cdot \Pr(c_0 \mid \neg abx)$ voor alle x .

Analoog hieraan gelden de definities:

$X^+(\{A, B\}, c_0) \equiv$ voor de waardetoekenningen x aan $X = \pi(C) \setminus \{A, B\}$ geldt dat

$$\Pr(c_0 \mid abx) \cdot \Pr(c_0 \mid \neg a \neg bx) \geq \Pr(c_0 \mid a \neg bx) \cdot \Pr(c_0 \mid \neg abx)$$

$X^0(\{A, B\}, c_0) \equiv$ voor de waardetoekenningen x aan $X = \pi(C) \setminus \{A, B\}$ geldt dat

$$\Pr(c_0 \mid abx) \cdot \Pr(c_0 \mid \neg a \neg bx) = \Pr(c_0 \mid a \neg bx) \cdot \Pr(c_0 \mid \neg abx)$$

$X^2(\{A, B\}, c_0) \equiv$ géén van de drie voorgenoemde relaties is het geval

Het verschil met additieve synergieën is ook dat een product synergie gedefinieerd is voor elke afzonderlijke specifieke waarde van het gemeenschappelijke kind, terwijl de additieve synergie gedefinieerd is voor *alle* waarden van het gemeenschappelijke kind.

Voorgaande definitie lijkt redelijk ingewikkeld, maar laat zich intuïtief goed uitleggen: twee variabelen die invloed op een gemeenschappelijk kind hebben, kunnen invloed op *elkaar* krijgen als de waarde van het kind bekend wordt. Deze invloed noemen we een *geïnduceerde* invloed als gevolg van een observatie. Deze geïnduceerde invloed gedraagt zich net zoals een normale kwalitatieve invloed, maar hij is er alleen wanneer het kind een specifieke waarde toegekend krijgt. Het teken van de geïnduceerde invloed is gelijk aan dat van de product synergie die correspondeert met de geobserveerde waarde.

Een praktijkvoorbeeld om de betekenis van product synergieën te illustreren: Bij Jan thuis is de stroom uitgevallen. Jan bedenkt zich dat dit twee oorzaken kan hebben:

- er is (in de hele wijk) sprake van een stroomstoring;
- bij Jan thuis zijn de stoppen doorgeslagen.

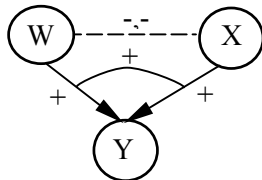
Dit laat zich modelleren als een probabilistisch netwerk met binaire variabelen. Beide voorgenoemde oorzaken hebben een positieve invloed op het uitvallen van de stroom. In principe zijn beide oorzaken ook onafhankelijk; de stroomstoring in de wijk heeft geen invloed op de stoppen, en vice versa. Maar: zodra Jan ziet dat bij de burens de stroom ook is uitgevallen en dus waarschijnlijker wordt dat er in de gehele wijk sprake is van een stroomstoring, dan neemt de kans dat ook nog eens zijn stoppen zijn doorgeslagen af. Omgekeerd, als Jan in de meterkast kijkt en ziet dat zijn stoppen zijn doorgeslagen, dan wordt de kans dat er ook nog eens sprake is van een algehele stroomstoring een stuk kleiner.

Oftewel: door het *observeren* van een gevolg, krijgen twee oorzaken ineens invloed op *elkaar*. Hier was er dus sprake van een negatieve product synergie tussen de twee genoemde oorzaken, voor het geval dat de waarde van de variabele “de stroom bij Jan is uitgevallen” waar is.

De voorgaande definities van kwalitatieve relaties hebben steeds betrekking gehad op binaire variabelen. Deze zijn vrij eenvoudig te herschrijven tot definities voor niet-binaire variabelen [19]. Het komt er dan bijvoorbeeld op neer dat een positieve invloed van A op B betekent dat hogere waarden voor A hogere waarden voor B waarschijnlijker maken. Omdat in deze scriptie uitsluitend gewerkt wordt met binaire variabelen zijn hier slechts de definities gegeven voor binaire variabelen.

Voorbeeld van een QPN

Figuur 3 laat de kwalitatieve abstractie zien van het BBN in figuur 1. Er is sprake van positieve kwalitatieve invloeden van W en X op Y , hetgeen is aangegeven bij de pijlen. Ook is er sprake van een positieve additieve synergie van tussen de invloeden van W en X op Y , aangegeven met een boogje tussen de pijlen. Daarnaast is er voor zowel y als $\neg y$ sprake van een negatieve product synergie tussen de invloeden van W en X op Y , hetgeen is aangegeven met een stippelijntje.



Figuur 3: het QPN afgeleid van het BBN van figuur 1

3.1.4 Inferentie-algoritme

Voor het berekenen van het effect van een observatie voor een variabele op andere variabelen (inferentie) is door M.J. Druzdzel en M. Henrion een efficiënt algoritme ontworpen [3]. Dit *teken-propagatie* algoritme berekent het teken van invloed langs de relevante ketens in de graaf tussen de geobserveerde variabele en alle andere variabelen. De eigenschappen van symmetrie, transitiviteit en compositie zijn hierbij cruciaal.

Het algoritme laat knopen boodschappen sturen naar alle *actieve burens*. De verzameling actieve burens van knoop A die een bericht ontvangt van knoop B bestaat uit de ouders en kinderen van A behalve knoop B , alsmede ouders van kinderen van A die een geïnduceerde intercausale invloed op A hebben. Daarbij moeten alle actieve burens ongeobserveerd zijn.

In pseudo-code ziet het *teken-propagatie* algoritme er als volgt uit:

```

procedure PropageerObservatie( $Q, O, teken, OudeObservaties$ )
  for elke  $V_i \in V(G)$ 
  do teken[ $V_i$ ]  $\leftarrow$  '0';
  PropageerTeken( $\emptyset, O, O, teken$ )
procedure PropageerTeken( $keten, van, naar, berichtteken$ )
  teken[ $naar$ ]  $\leftarrow$  teken[ $naar$ ]  $\oplus$  berichtteken
   $keten \leftarrow keten \cup \{naar\}$ 
  for iedere actieve buur  $V_i$  van  $naar$ 
  do  $pijlteken \leftarrow$  teken van invloed tussen  $naar$  en  $V_i$ 
   $berichtteken \leftarrow$  teken[ $naar$ ]  $\otimes$   $pijlteken$ 
  if  $V_i \notin keten$  and teken[ $V_i$ ]  $\neq$  sign[ $V_i$ ]  $\oplus$  berichtteken
  then PropageerTeken( $keten, naar, V_i, berichtteken$ )
  
```


Het algoritme neemt als input een QPN Q , een verzameling *OudeObservaties* van reeds eerder geobserveerde variabelen, een knoop O die nieuw is geobserveerd, en het teken *teken* dat die knoop blijkt te hebben (dit is een '+' als de variabele `true` blijkt te zijn, een '-' als de variabele `false` blijkt te zijn). Het resultaat is een QPN waarin de knopen een teken krijgen dat aangeeft in welke richting de kansverdeling over hun waarden veranderd is na het invoeren van de observatie O .

3.1.5 Verfijning van QPNs

Bij standaard QPNs kunnen variabelen enkel een positieve, een negatieve, een ambigue of geen invloed hebben op andere variabelen. Er is geen enkele notie van sterkte. Vaak hebben heel veel knopen na inferentie een ambigu teken. Dit komt doordat als er érgens op een keten een ambigu teken in een knoop ontstaat (twee tegenstrijdige invloeden is voldoende om die te laten ontstaan), dan krijgen alle knopen die niet ge-d-separeerd zijn van die knoop ook een ambigu teken. Een gedetailleerder model met nog meer variabelen en kwalitatieve relaties leidt vaak alleen maar tot nog meer ambigue tekens.

Er zijn verschillende manieren om QPNs te verfijnen. Een daarvan is informatie toevoegen aan het netwerk over de sterkte van invloeden. Ook kan er worden gewerkt aan het minimaliseren van ambigüiteit bij het tegelijkertijd invoeren van meerdere observaties. De hier beschreven verfijningen zijn te vinden in [19].

Enhanced QPNs

Op het moment dat twee verschillende ketens in G naar een variabele tegenstrijdige invloeden hebben, wordt als resulterende invloed '?' berekend. Dit komt veelvuldig voor, waardoor na inferentie veel berekende invloeden ambigu zijn. Enhanced QPNs proberen hier wat aan te doen door een sterkte toe te kennen aan kwalitatieve relaties. Op het moment dat bijvoorbeeld één keten leidt tot een zwakke negatieve invloed en een andere keten tot een sterke positieve invloed, dan wint de positieve invloed. Hiertoe worden de tekens ++ en -- toegevoegd aan de QPNs.

Voor het combineren van twee enhanced tekens worden de operatoren \otimes en \oplus als volgt hergedefinieerd:

\otimes	++ ^j	+ ^j	0	- ^j	-- ^j	?
++ ⁱ	++ ^{i+j}	+ ^j	0	- ^j	-- ^{i+j}	?
+ ⁱ	+ ⁱ	+ ^{i+j}	0	- ^{i+j}	- ⁱ	?
0	0	0	0	0	0	0
- ⁱ	- ⁱ	- ^{i+j}	0	+ ^{i+j}	+ ⁱ	?
-- ⁱ	-- ^{i+j}	- ^j	0	+ ^j	++ ^{i+j}	?
?	?	?	0	?	?	?
\oplus	++ ^j	+ ^j	0	- ^j	-- ^j	?
++ ⁱ	++ ^{i,j}	++ ⁱ	++ ⁱ	a)	?	?
+ ⁱ	++ ^j	+ ^{i,j}	+ ⁱ	?	d)	?
0	++ ^j	+ ^j	0	- ^j	-- ^j	?
- ⁱ	b)	?	- ⁱ	- ^{i,j}	-- ^j	?
-- ⁱ	?	c)	-- ⁱ	-- ⁱ	-- ^{i,j}	?
?	?	?	?	?	?	?

- a) ++^{i,j} als $i \leq j$, anders '?'
- b) ++^{-i,j} als $j \leq i$, anders '?'
- c) --^{i,j} als $i \leq j$, anders '?'
- d) --^{-i,j} als $j \leq i$, anders '?'

Hierbij staan de letters i en j voor de zogeheten *vermenigvuldigingsindex*. Deze is nodig om een vergelijking te kunnen maken tussen indirecte kwalitatieve invloeden via verschillende ketens. De indices worden overigens uitsluitend gebruikt voor de interne berekening, en worden niet aan de gebruiker getoond. Voor een bewijs van de correctheid van deze enhanced operatoren wordt weer verwezen naar [19].

De eigenschappen van compositie en transitiviteit blijven van kracht bij Enhanced QPNs. De eigenschap van symmetrie echter niet; de richting van invloed (d.w.z. is de invloed positief of negatief, zonder notie van sterkte) is symmetrisch, maar voor de sterkte hoeft dit niet te gelden. Voor iedere pijl moeten dus in principe twee tekens gespecificeerd worden.

Het tegelijkertijd invoeren van meerdere observaties

Het teken-propagatie algoritme is ontworpen om slechts één observatie in het netwerk in te voeren en door te berekenen. Het invoeren van meerdere observaties kan op twee manieren [2]:

- De observaties worden één voor één ingevoerd en de verschillende resultaten worden gecombineerd met de \oplus -operator.
- Er wordt een *dummy* knoop D toegevoegd, en er worden pijlen toegevoegd vanuit alle knopen waarvan de observaties ingevoerd moeten worden naar D . Voor het teken bij de pijlen wordt dan een '+' voor het geval de observatie `true` is, en een '-' indien de observatie `false` is. Door nu een + waarde te geven aan de dummy knoop, en het teken-propagatie algoritme zijn werk te laten doen zal het gecombineerde effect resulteren

De eerste methode is niet zo sterk omdat de volgorde waarin de observaties zijn toegevoegd van invloed kan zijn op het eindresultaat. Het kan onnodige ambiguïteit het gevolg hebben. De tweede methode heeft als nadeel dat de waarden van de geobserveerde knopen niet vastliggen; deze kunnen veranderen gedurende de inferentie. Ook hierdoor kan inferentie leiden tot onnodige ambiguïteit.

Het teken-propagatie algoritme kan worden aangepast voor meerdere observaties door de intercausale invloeden die ontstaan gedurende de inferentie van één van deze observaties niet mee te nemen in de verdere inferentie van deze verzameling observaties. Deze worden namelijk uiteindelijk overruled door de directe invloeden, maar kunnen toch voor tussentijdse ambiguïteit zorgen die daarna niet meer zal verdwijnen [19]. Ook is het niet nodig dat er gepropageerd wordt naar knopen die ge-d-separeerd zullen zijn van een van de volgende observaties.

Het nieuwe algoritme garandeert het sterkste resultaat op te leveren, dus met de minst mogelijke ambiguïteit. Voor pseudocode van dit algoritme alsmede voor een bewijs voor de correctheid ervan wordt weer verwezen naar [19].

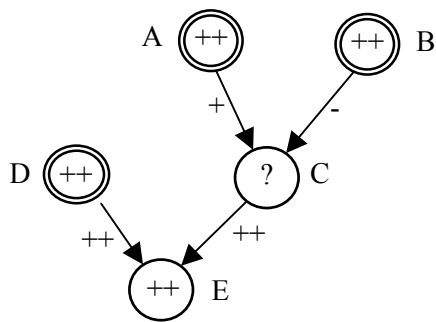
Context-specifieke informatie voor tekens

Een QPN modelleert (on)afhankelijkheden tussen variabelen, ongeacht waarden daarvan. Soms kunnen specifieke combinaties van waarden wel degelijk invloed hebben. Voor invloeden is het daarom nuttig om extra informatie op te kunnen slaan waarin staat wat de (on)afhankelijkheden zijn bij specifieke waarden van knopen. Deze specifieke waarden van variabelen wordt de *context* genoemd.

Voor een beschrijving hoe context-specifieke informatie kan worden toegevoegd aan (Enhanced) QPNs wordt verwezen naar [19].

3.1.6 De in dit onderzoek gebruikte inferentie methode

Voor losse observaties is in dit onderzoek het teken-propagatie algoritme gebruikt zoals beschreven in paragraaf 3.1.4. Voor meerdere observaties is in dit onderzoek de volgende methode gebruikt: deze zijn *afzonderlijk* berekend. Dit wil zeggen dat het effect van iedere observatie is berekend uitgaande van het netwerk waarbij *geen* andere observatie is ingevoerd. Daarbij moet wel rekening worden gehouden met d-separatie door de andere observaties. De vermenigvuldigingsindices worden onthouden. Deze afzonderlijke resultaten zijn vervolgens per variabele gecombineerd met de enhanced \oplus -operator. Het eindresultaat komt dan overeen met dat van het algoritme voor meerdere observaties zoals beschreven in [19], met het verschil dat bij de hier gehanteerde methode pas op het eind alle invloeden op één variabele worden gecombineerd met de \oplus -operator. Daarbij kan dan de gunstigste combinatie worden gekozen die de minste ambiguïteit oplevert. Op de volgende pagina is figuur 4 te vinden welke laat zien hoe meerdere observaties in deze methode zijn berekend.



Figuur 4: Voorbeeld van een Enhanced QPN met drie observaties

De knopen weergegeven met een dubbele rand representeren variabelen waarvoor een observatie is opgegeven. Voor alle observaties wordt de vermenigvuldigingsindex 0 meegegeven. De observatie ‘++’ voor variabele D resulteert dan in een ‘++’ voor variabele E met vermenigvuldigingsindex 1. De observatie ‘++’ voor variabele A resulteert in een ‘+’ voor variabele C met index 1 en een ‘+’ voor variabele E met index 2. De observatie ‘++’ voor variabele B tenslotte resulteert in een ‘-’ voor variabele C met index 1 en een ‘-’ voor variabele E met index 2.

De resultaten kunnen nu als volgt worden gecombineerd met de enhanced \oplus -operator: voor variabele C krijgen we een ‘+’ met index 1 gecombineerd met een ‘-’ met index 1, geformuleerd als $+^1 \oplus -^1$, hetgeen een ‘?’ oplevert. Voor variabele E krijgen we $++^1 \oplus -^2 \oplus +^2$ hetgeen voor de meest gunstige combinatie een ‘++’ oplevert. Hiermee wordt geïllustreerd dat het mogelijk is dat knopen waarbij een ‘?’ is berekend in de graaf kunnen wijzen naar een knoop waar geen vraagteken voor berekend is.

Implementatie

Bij aanvang van dit onderzoek werd het voor mogelijk gehouden dat er een tool zou kunnen worden uitgeprogrammeerd welke in staat is om Enhanced QPNs te implementeren. Helaas bleek dit toch niet haalbaar. Daarom zijn alle in deze scriptie te vinden resultaten van het Enhanced QPN model van dit onderzoek met de hand berekend met de hiervoor beschreven methode.

3.2 Algemene ontwerpbeslissingen bij het formaliseren van de kennis

De in hoofdstuk 2 beschreven kennis uit het informele model willen we formaliseren in een QPN. In deze paragraaf wordt beschreven hoe dat in dit onderzoek is gebeurd. Soms zijn er nog extra vragen aan de experts gesteld die specifiek bedoeld zijn voor het boven water krijgen van de juiste informatie voor het opbouwen van een QPN.

3.2.1 Het afleiden van de graaf

Het bepalen van de knopen

De knopen zijn in beginsel de concepten die in het informele model een relevante rol spelen. Voor ons model zijn dat concepten die een verzwakkende of versterkende causale invloed krijgen van of hebben op een of meer andere concepten. In een aantal gevallen waren er binnen concepten een aantal categorieën te onderscheiden (bij verkeer en landbouw). In dat geval is gecontroleerd of alle attributen van dat concept ook werkelijk van toepassing zijn op de mogelijke categorieën. Voor zover dit het geval bleek is er voor gekozen om voor iedere categorie voor ieder attribuut een knoop te maken. Dit geheel is vervolgens herzien en waar nodig gereduceerd. Uitgangspunt was dat er zo min mogelijk knopen in het QPN moeten komen, maar dat wel alle relevante concepten en relaties uit het informele model aanwezig moeten zijn. Hoe dit voor de verschillende delen van het model in zijn werk is gegaan kan men lezen in paragraaf 3.3.

Afleiden van de pijlen

De pijlen zijn afgeleid uit het informele model door in beginsel alle pijlen mee te nemen die in het informele model zijn geassocieerd met een versterkende of verzwakkende causale invloed van concepten op elkaar.

Belangrijk daarbij is dat alleen de *directe* causale relaties met een pijl mogen worden gerepresenteerd. Of deze causale relaties direct zijn of niet, kan worden gecontroleerd met de betrokken expert door gebruik te maken van specifieke gevalsbeschrijvingen [7]. Daar waar nodig is dit gecontroleerd.

Ook belangrijk is dat cykels in QPNs niet zijn toegestaan. In twee gevallen was er sprake van wederkerige relaties tussen twee concepten. In deze gevallen is er in overleg met experts één richting voor de pijl gekozen.

Een laatste stap voor het grafisch deel bestond uit het controleren van onafhankelijkheden op grond van het d-separatie criterium.

3.2.2 Het afleiden van de kwalitatieve relaties

De mogelijke waarden van de variabelen

Elk van de vastgestelde knopen is geassocieerd met een gelijknamige variabele. Aangezien er een Enhanced QPN-model is opgebouwd waren er uitsluitend binaire variabelen mogelijk. Concepten als “landbouwproductie”, “verzuring” en “natuurkwaliteit” moesten dus worden gemodelleerd als binaire variabele. In het informele model hadden alle concepten als mogelijke waarden “wordt meer”, “blijft gelijk” en “wordt minder”. Deze relatieve vergelijking met het nulscenario is gehandhaafd voor de variabelen. De waarden zijn in dit onderzoek als volgt gedefinieerd: de waarde `true` betekent voor iedere variabele toename van het door de variabele gerepresenteerde concept ten opzichte van het nul-scenario (zie paragraaf 2.2). De waarde `false` betekent dan dat het door de variabele gerepresenteerde concept gelijk blijft of afneemt. Deze twee mogelijke waarden zijn dan wederzijds uitsluitend en uitputtend, zoals vereist is voor QPNs.

Het bepalen van de kwalitatieve invloeden

In dit onderzoek zijn versterkende invloeden uit het informele model vertaald naar positieve kwalitatieve invloeden bijhorend bij de pijlen in het QPN. Evenzo zijn verzwakkende invloeden vertaald naar negatieve kwalitatieve invloeden. Dat dit kan wordt geïllustreerd met de volgende voorbeelden:

- In het informele model heeft het verkeer een versterkende invloed op de verzuring. Dit betekent dat als het verkeer toeneemt, dat men dan mag verwachten dat de verzuring toeneemt als gevolg daarvan. De kans op toename van de verzuring wordt dan dus groter. Dit laat zich nu vertalen naar een QPN met twee binaire variabelen Verkeer en Verzuring, waarbij Verkeer een positieve invloed heeft op Verzuring. Als we nu weten dat het verkeer toeneemt, en we voeren in het QPN in dat de waarde `true` is geobserveerd voor Verkeer, dan geeft het QPN aan dat de kans op `true` voor de variabele Verzuring groter wordt, oftewel de kans op toename van de verzuring wordt groter. Dit komt overeen met de kennis in het informele model.
- Voor een verzwakkende invloed van bijvoorbeeld de verzuring op de natuurkwaliteit kunnen we in het QPN een negatieve invloed van de variabele Verzuring op de variabele Natuurkwaliteit modelleren. Als we nu de waarde `true` invoeren voor Verzuring, dan geeft het QPN aan dat de kans op `true` voor de variabele Natuurkwaliteit kleiner wordt, oftewel de kans op toename van de natuurkwaliteit wordt kleiner als gevolg van de ingevoerde observatie. Ook dit komt overeen met de kennis in het informele model.

Het afleiden van synergieën

Naast kwalitatieve invloeden kunnen QPNs ook synergieën modelleren. De additieve synergieën laten zich intuïtief goed vertalen naar het *elkaar* versterken danwel verzwakken

van twee of meer invloeden. In het domein is dit bijvoorbeeld het geval bij “meervoudige stress” van de natuurkwaliteit. Dit geeft aan dat de combinatie van bijvoorbeeld verdroging en verzuring meer schade voor de natuur oplevert dan de schadelijke effecten van verdroging en verzuring afzonderlijk bij elkaar opgeteld. Dergelijke effecten zijn in het QPN gemodelleerd als een additieve synergie, althans wanneer het effect een niet-verwaarloosbare sterkte heeft (naar het oordeel van de expert). Deze synergieën worden in dit onderzoek als niet-sterk gemodelleerd, waardoor dit voor de uitkomsten van het QPN geen verschil zal maken. Een positieve invloed blijft positief, een negatieve invloed blijft negatief.

Product synergieën zijn van belang wanneer er een knoop in het netwerk wordt geobserveerd met minstens twee ouders, of wanneer de knoop een voorouder heeft met minstens twee inkomende pijlen. Een voorbeeld: zowel verkeer als landbouw hebben een positieve invloed op de hoeveelheid NO_x in de lucht. Stel nu dat opgegeven wordt dat de hoeveelheid NO_x afneemt. Als daarna ook wordt opgegeven of uit inferentie volgt dat de kans op toename van de hoeveelheid verkeer groter wordt, dan wordt de verklaring dat toename van landbouw de oorzaak van NO_x -afname is waarschijnlijker. Omdat de kans op toename van de landbouw volgens het QPN-model toch al kleiner werd wegens de observatie dat de hoeveelheid NO_x afneemt, zal een negatieve product synergie kwalitatief gezien geen verschil maken indien we deze meerdere observaties *tegelijktijd* invoeren zoals beschreven op pagina 33. Bij tegenstrijdige invloeden zou een positieve product synergie van toepassing kunnen zijn, maar deze zou evenmin een verschil maken, in kwalitatieve zin althans. Dit komt doordat bij het simultaan invoeren van observaties de intercausale invloeden worden overruled door de directe invloeden [19]. Deze synergieën hebben alleen zin als er meerdere observaties ná elkaar worden uitgevoerd, en men het effect van een observatie wil weten *ten opzichte van* een eerdere observatie. In dit onderzoek is ervoor gekozen om deze product synergieën niet te modelleren omdat men kwalitatieve indicaties van effecten wil over een *totale* set aan beleidsmaatregelen en -doelstellingen.

Het afleiden van sterktes van invloeden

Het bepalen van de relatieve sterktes van invloeden is tot dusverre nauwelijks onderzocht [19]. De sterkte van een (probabilistische) invloed kan worden gezien als de mate waarin een expert *gelooft* dat deze invloed een rol speelt [16]. Dit is uiteraard een zeer subjectief oordeel. Het zou daarom goed zijn om het inschatten van sterktes door meerdere experts te laten uitvoeren. Om de in paragraaf 2.5.1 genoemde redenen wordt er in dit onderzoek toch meestal slechts één expert gevraagd om sterktes te bepalen van een deel van het model.

Belangrijk bij het bepalen van de sterktes is dat daarbij consistentie gewaarborgd wordt. Dit wil zeggen dat er aan de eis van Enhanced QPNs dat een sterke invloed altijd minstens even sterk is als een niet-sterke invloed moeten worden voldaan. Om deze reden ontstond er in dit onderzoek behoefte aan een methode waarmee sterktes van invloeden op concepten onderling kunnen worden vergeleken. Het enige vergelijkingsmateriaal waarvan men mag verwachten dat de expert daartussen een vergelijking kan maken, bestaat uit alle relaties die van invloed zijn op *hetzelfde* concept. Een vergelijking tussen twee relaties die invloed hebben op verschillende concepten is immers erg moeilijk; als een expert zou worden gevraagd “wat is sterker, de invloed van de verzuring op de natuurkwaliteit, of de invloed van het kunstmestgebruik op de landbouwproductie?”, dan is dat voor de expert erg moeilijk te vergelijken omdat er verschillende grootheden vergeleken moeten worden.

Een ander probleem is dat de expert bij het beoordelen van sterktes van invloeden in dit domein vaak wel een vergelijking kan maken in termen van (relatieve) hoeveelheden, maar moeilijk in termen van kansen zoals vereist voor QPNs. Op dit punt ontstaat dus discrepantie tussen de kennis zoals experts deze hebben binnen dit domein en de kennis die het Enhanced QPN formalisme kan modelleren. Om hier een vertaalslag te kunnen maken zijn de volgende aannamen gedaan:

- Een naar verwachting grotere toename impliceert meer kans op toename
- Op grond van meer kans op toename mag men een grotere toename verwachten

Overeenkomstig worden dezelfde aannamen gedaan voor minder kans op toename en een naar verwachting kleinere toename. Deze aannamen maken het mogelijk om de experts vergelijkingen te laten maken van relatieve hoeveelheden en deze te vertalen naar relatieve verschillen in kansen op toename.

De sterktes zijn in dit onderzoek bepaald door de experts een ordening aan te laten brengen in de relaties die van invloed zijn op iedere variabele. Stel dat de variabelen B, C en D invloed hebben op variabele A, dan is de vraag bijvoorbeeld als volgt geformuleerd: “Als B, C, en D nu elk met hetzelfde percentage zouden toenemen, welke heeft dan het meeste effect? Bepaal de volgorde van B, C en D dusdanig dat sterkte van de invloed toeneemt”. Vervolgens is geïnformeerd of die verschillen in sterkte erg groot zijn. Als één invloed veel sterker bleek dan de andere, dan is deze als sterk (twee plussen of minnen) gemodelleerd en de andere als niet-sterk (één plus of min). In de gevallen dat er volgens de expert geen grote verschillen in sterkte zijn, zijn alle relaties in beginsel als sterke kwalitatieve invloeden gedefinieerd. Het idee hierachter is dat zij zodoende sterke ketens niet zullen verzwakken.

Zoals in paragraaf 4.1 beschreven hoeven de sterktes van kwalitatieve invloeden in een Enhanced QPN niet symmetrisch te zijn. Daarom is altijd gecontroleerd of de sterktes in de tegengestelde richting gelijk zijn. Zoniet, dan is er een aparte sterkte gespecificeerd voor de tegengestelde richting.

Bij de hiervoor beschreven methode worden de sterktes feitelijk alleen *lokaal* vergeleken met elkaar, en zou er in het totale model nog wel degelijk inconsistentie kunnen zijn in de zin dat een niet-sterke invloed ergens in het netwerk sterker is dan een sterke invloed elders in het netwerk. Er is getracht om dergelijke inconsistenties te traceren door het gehele model terug te koppelen aan de experts, en te onderzoeken of er vreemde uitkomsten uit komen. Daarbij is vooral gekeken welke ketens “van boven tot beneden” geheel of bijna geheel uit sterke invloeden bestaan. Er is aan de experts gevraagd of dat reëel is. Zoniet, dan zijn deze ketens herzien. Er is alleen gekeken naar de gehele ketens van onder tot boven omdat er in het model van dit onderzoek alleen onderaan en bovenaan waarden worden opgegeven.

3.3 Specifieke ontwerpbeslissingen bij het formaliseren van de kennis

3.3.1 Terrestrische natuurkwaliteit

Variabelen

De concepten Terrestrische natuurkwaliteit, Verdroging, Verzuring en Vermesting modelleren we als variabele zoals beschreven in 3.2.1.

Pijlen en (sterktes van) directe kwalitatieve invloeden

We leiden af dat Verdroging, Verzuring en Vermesting een negatieve invloed hebben op Terrestrische natuurkwaliteit. Omdat volgens de expert moeilijk iets over sterktes gezegd kan worden, modelleren we in beginsel alle relaties als sterke negatieve invloeden in de richting van de pijlen zoals deze in het informele model te vinden zijn.

Synergieën

In het informele model is te vinden dat verdroging een versterkend effect heeft op de invloed die verzuring heeft op de natuurkwaliteit. Hieruit kan worden afgeleid dat verzuring en verdroging gezamenlijk meer effect hebben dan afzonderlijk bij elkaar opgeteld. Om deze reden modelleren we een positieve additieve synergie tussen de twee negatieve invloeden van Verdroging en Verzuring op Terrestrische natuurkwaliteit.

3.3.2 Hydrologie

Variabelen

De concepten Verdroging, Drooglegging/peilverlaging en Landbouw-productie modelleren we als variabele.

Pijlen en (sterktes van) directe kwalitatieve invloeden

We leiden af dat Landbouw-productie een positieve invloed heeft op Drooglegging/peilverlaging. Tevens leiden we af dat er een positieve invloed is van Drooglegging/peilverlaging op Verdroging. Omdat de landbouw de grootste oorzaak is van het verdrogingsprobleem, modelleren we beide relaties als sterke positieve invloeden.

3.3.3 Verkeer

Variabelen

Omdat volgens de expert van de verschillende categorieën alleen de personenauto's en de binnenlandse scheepvaart een bijzondere (dat wil zeggen belangrijk anders dan de andere categorieën) invloed hebben, beperken we de categorieën tot personenauto's, binnenlandse scheepvaart en overig verkeer. Daarbij worden de bestelauto's en het vrachtverkeer nu ondergebracht bij het overig verkeer. De relevante attributen van het verkeer zijn de uitstoot, hoeveelheid en de efficiency, en wel *per* categorie. We kiezen er dus voor om Hoeveelheid NO_x , Hoeveelheid SO_x , Uitstoot door personenauto's, Efficiency van personenauto's, Hoeveelheid personenauto's, Uitstoot door scheepvaart, Efficiency van de scheepvaart, Hoeveelheid scheepvaart, Uitstoot door overig verkeer, Efficiency van overig verkeer en Hoeveelheid overig verkeer te modelleren als variabele.

Pijlen en (sterktes van) directe kwalitatieve invloeden

Omdat de meeste NO_x van de personenauto's komt modelleren we de invloed van Uitstoot door personenauto's op Hoeveelheid NO_x als sterk positief. Omdat binnen het verkeer de meeste SO_x uitstoot wordt veroorzaakt door de scheepvaart, maar SO_x niet voor het grootste deel van de scheepvaart komt, modelleren we de invloed van Uitstoot door scheepvaart op Hoeveelheid SO_x als niet-sterk positief met de pijl mee, maar sterk tegen de pijl in. De overige pijlen en de bijbehorende directe kwalitatieve invloeden zijn voor ieder van de verkeerscategorieën gelijk aan die in het informele model (dat wil zeggen dat versterkende invloeden als positief worden gemodelleerd en verzwakkende als negatief) en modelleren we als niet-sterk.

3.3.4 Atmosferische verspreiding

Variabelen

De concepten Vermesting, Verzuring, Hoeveelheid NO_x , Hoeveelheid NH_x , Hoeveelheid SO_x en Landbouwproductie modelleren we als variabele. Het concept Uitstoot door verkeer wordt opgesplitst zoals in paragraaf 3.3.3 beschreven.

Pijlen en (sterktes van) directe kwalitatieve invloeden

Omdat uit de milieubalans blijkt dat NH_x de sterkste oorzaak is van verzuring, modelleren we de invloed van Hoeveelheid NH_x op Verzuring als sterk positief. Omdat van de NH_x in de lucht het overgrote deel van de landbouw afkomstig is, modelleren we de invloed van Landbouwproductie op Hoeveelheid NH_x ook als sterk positief. De pijlen vanuit de drie Uitstoot-variabelen volgen uit paragraaf 3.3.3. De overige pijlen en de bijbehorende directe kwalitatieve invloeden volgen uit het informele model en modelleren we als niet-sterk.

Synergieën

Omdat er in lichte mate sprake is van interactie tussen de invloed van NH_x en SO_x op de verzuring en vermisting, zouden we een additieve synergie kunnen modelleren. De expert heeft echter benadrukt dat het effect daarvan verwaarloosbaar is, dus nemen we dit effect niet op in ons model.

3.3.5 Landbouw

Variabelen

De concepten Vermesting, Verzuring, Verdroging, Aandeel veeteelt, Aandeel biologische/geïntegreerde landbouw, Hoeveelheid NH_x , Uitspoeling N, Uitspoeling P, Landbouwproductie, Landbouw-efficiency, Kunstmestgebruik en Drooglegging/peilverlaging volgen direct uit het informele model en modelleren we als variabele. Het concept “landbouw” met zijn verschillende categorieën is immers in het informele model al uitgesplitst in concepten die de relevante aspecten hiervan bevatten.

Pijlen en (sterktes van) directe kwalitatieve invloeden

Bij de behandeling van de atmosferische verspreiding is al naar voren gekomen dat de bijdrage van de landbouw aan de hoeveelheid NH_x erg groot is. Dit wordt bevestigd door de landbouw-expert en we modelleren dan ook de positieve invloed van Landbouwproductie op Hoeveelheid NH_x als sterk positief. Ook de bijdrage van de landbouw aan de uitspoeling van N en P is de belangrijkste. Daarbij is de uitspoeling van N belangrijker dan die van P. Daarom modelleren we de positieve invloed van Landbouwproductie op Uitspoeling N als sterk positief, en de positieve invloed van Landbouwproductie op Uitspoeling P als niet-sterk positief. Omdat het aandeel veeteelt een belangrijke factor is voor de emissies van NH_x en de uitspoeling van N en (in mindere mate) P, modelleren we de relaties van het aandeel veeteelt evenzo: we modelleren de positieve invloed van Aandeel veeteelt op Hoeveelheid NH_x als sterk positief, de positieve invloed van Aandeel veeteelt op Uitspoeling N als sterk positief en de positieve invloed van Aandeel veeteelt op Uitspoeling P als niet-sterk positief.

Er bestaat volgens de landbouw-expert een wederkerige relatie tussen de drooglegging/peilverlaging en de landbouwproductie: meer drooglegging/peilverlaging leidt tot meer landbouwproductie, en meer landbouwproductie zal als er geen extra maatregelen genomen worden leiden tot meer drooglegging/peilverlaging. We kiezen er op grond van de kennis van de hydroloog voor om de pijl te laten wijzen van landbouwproductie naar drooglegging/peilverlaging. Deze invloed is sterk, want drooglegging/peilverlaging vindt primair plaats voor de landbouw. We modelleren dit dan ook als een sterke positieve invloed van Landbouwproductie op Drooglegging/peilverlaging.

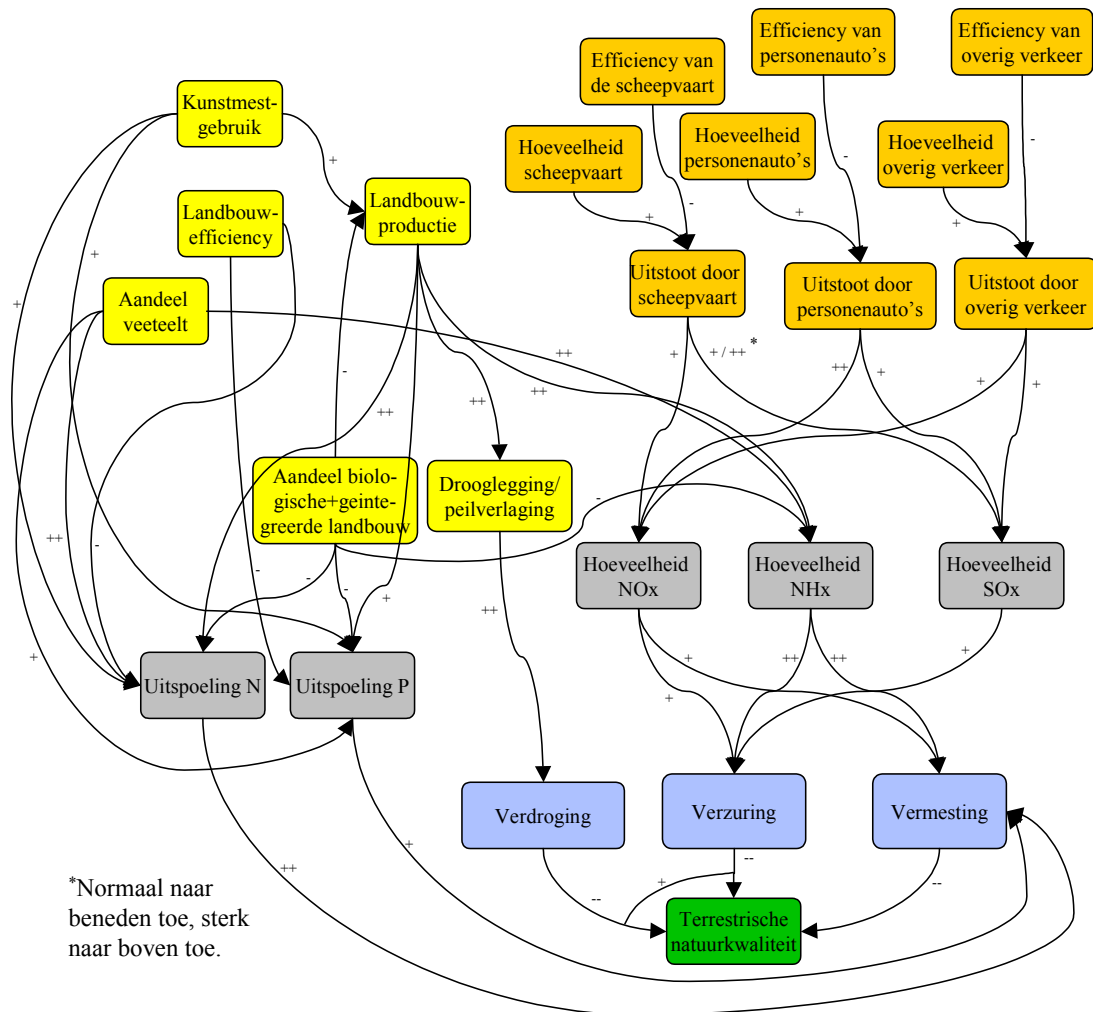
Iets vergelijkbaars zien we bij de relatie tussen het kunstmestgebruik en de landbouwproductie. Hier kiezen we ervoor om dit te modelleren zoals het intuïtief het beste lijkt: meer kunstmest leidt tot meer landbouwproductie. Deze invloed modelleren we als niet-sterk, omdat kunstmest volgens de expert geen al te groot probleem is voor de verzuring- en vermistingsproblematiek. We modelleren dit dus als een niet-sterke positieve invloed van Kunstmestgebruik op Landbouwproductie. Dit klopt ook als we de onafhankelijkheden controleren, want als een toename van de Landbouwproductie vastligt, dan zal een toename van het Kunstmestgebruik niet leiden tot een toename van de Drooglegging/peilverlaging, en andersom evenmin.

De invloed van de uitspoeling van NH_x en de uitspoeling van N op de vermisting is groter dan de invloed van de uitspoeling van P. We modelleren dus de positieve invloed van Uitspoeling N op Vermesting als sterk positief, de positieve invloed van Hoeveelheid NH_x op Vermesting als sterk positief en de positieve invloed van Uitspoeling P op Vermesting als niet-sterk positief. Dat de bijdrage van de hoeveelheid NH_x aan de verzuring ook sterk is, wordt bevestigd door de landbouwexpert. We modelleren dus ook de invloeden van Hoeveelheid NH_x op Verzuring als sterk positief.

De overige pijlen en de bijbehorende directe kwalitatieve invloeden volgen direct uit het informele model en modelleren we als niet-sterk.

3.4 Resultierend formeel model

Met de kennis uit hoofdstuk 2 gecombineerd met de formaliseringmethode zoals hiervoor beschreven, hebben we een formeel model in de vorm van een Enhanced QPN opgebouwd. Er zijn geen tegenstrijdigheden opgetreden in de soms enigszins overlappende deelmodellen. Het resultaat van het combineren van deze deelmodellen is hieronder grafisch weergegeven in figuur 5:



Figuur 5: het QPN zoals dat in dit onderzoek tot stand gekomen is

4. Evaluatie

Het opgebouwde QPN-model zal in dit hoofdstuk worden geëvalueerd. Eerst wordt er een theoretische verkenning gemaakt van welke kennis er niet en welke kennis er wel gemodelleerd kon worden, vervolgens wordt meer praktisch onderzocht in hoeverre het model functioneert zoals gewenst en wordt een vergelijking gemaakt met het RAP.

4.1 Theoretische beschouwing

Doordat het informele en het formele model apart zijn beschreven, kan eenvoudig een vergelijking worden gemaakt tussen de kennis in deze twee modellen. Zowel het vastleggen van de expertkennis in het informele model als de vertaalslag van het informele naar het formele model worden hier geëvalueerd.

4.1.1 Kennis die wel gemodelleerd kon worden in het QPN

In de eerste plaats zijn causale relaties goed te modelleren in een QPN. De beperking van Enhanced QPNs dat er uitsluitend binaire variabelen gemodelleerd kunnen worden is niet echt een beperking, aangezien men kwalitatief effecten van veranderingen wilde modelleren; kansen op toename en afname geven voldoende informatie over wat men in dit domein kan verwachten op grond van bepaalde observaties. Er geldt echter wel de eis van monotoniciteit zoals beschreven op pagina 28. Resumerend kan gezegd worden dat monotone causale relaties goed te modelleren zijn in (Enhanced) QPNs.

Tevens biedt het QPN-formalisme de mogelijkheid om interacties tussen invloeden te definiëren. Dit kan wellicht soms nuttig zijn, voor het gemodelleerde deeldomein van het onderzoek heeft dit niet zo heel veel toegevoegd. De additieve synergieën zijn vooral nuttig voor de grafische representatie (men *ziet* dat invloeden elkaar versterken/verzwakken), maar voor de kwalitatieve uitkomsten van de inferentie maken deze geen verschil. Hetzelfde geldt voor product synergieën, op voorwaarde dat bij de inferentie steeds alle observaties simultaan worden opgegeven. Deze product synergieën zouden zinvol kunnen zijn indien men het effect van een observatie wil weten ten opzichte van eerdere observaties, maar zoals in hoofdstuk 3 reeds behandeld is dit niet relevant omdat het in dit onderzoek gaat om de *totale* verzameling van effecten en/of maatregelen die men kan nemen.

Daarnaast heeft het Enhanced QPN formalisme de mogelijkheid om sterktes te definiëren voor invloeden. Dit is theoretisch vooral bedoeld voor het beperken van ambiguïteit. Aan de sterkte van de uitkomsten mag niet zomaar waarde worden gehecht; als de vermenigvuldigingsindex wordt weggelaten kan niet zondermeer geconcludeerd worden dat een ‘++’ een sterkere resulterende invloed is dan een ‘+’ [19]. In paragraaf 4.1.3 wordt ingegaan op de betekenis van de sterktes van geïnferreerde invloeden.

4.1.2 Kennis die niet gemodelleerd is

Een QPN model kan slechts kennis modelleren over kansen. Als in het informele model is opgenomen dat een toename van variabele A met 50% zal leiden tot 5% toename van variabele C terwijl een toename van variabele B met 50% zal leiden tot 20% van variabele C, is dit kennis over *hoeveelheden* die we willen modelleren. Dergelijke kwantitatieve vergelijkingen met betrekking tot deze hoeveelheden komen veelvuldig voor in het informele model. Dergelijke kennis over hoeveelheden is structureel iets anders dan de kansen zoals QPNs die kunnen modelleren. In dit onderzoek zijn grotere verwachte veranderingen met betrekking tot hoeveelheden in het formele QPN model gemodelleerd als grotere verschillen in kansen zoals beschreven in paragraaf 3.2.2. Het formaliseren van het model bevatte dus een vertaalslag van hoeveelheden naar kansen. Dit was dus een vertaalslag van de ene soort kennis naar de andere. De kennis over hoeveelheden kon dus formeel niet gemodelleerd worden.

Ook voor de uitkomsten van het QPN model heeft dit gevolgen. Als het in dit onderzoek opgebouwde QPN model een ‘++’ oplevert voor variabele A en een ‘+’ voor variabele B, dan zal (op voorwaarde dat de vermenigvuldigingsindices dit niet weerleggen, zie

[19]) volgens het model de *kans* op toename van het door variabele *A* gerepresenteerde concept minstens even groot zijn als de kans op toename van het door variabele *B* gerepresenteerde concept. Men zou hieruit graag afleiden dat men op grond hiervan mag verwachten dat het door variabele *A* gerepresenteerde concept *minstens* zoveel toeneemt als het door variabele *B* gerepresenteerde concept, maar strikt genomen mag dit niet. De kennis die het QPN model oplevert is dus ook anders dan de kennis die men graag zou zien voor dit domein.

Bij het construeren van het model is er bewust voor gekozen om een model te maken dat betrekking heeft op heel Nederland in een vast tijdsbestek. Daardoor zijn alle in 2.6.1 genoemde aspecten met betrekking tot tijd en plaats, alsmede het tijdsaspect genoemd bij 2.6.3 (de vervangingstijd van auto's) niet opgenomen in het model. Dit wil echter niet zeggen dat dit geheel onmogelijk is. In de aanbevelingen wordt ingegaan op mogelijke methoden om deze kennis ook in het QPN-model onder te kunnen brengen. Overigens betekent het ontbreken van deze informatie niet dat het model niet volledig is, het geeft alleen aan dat het *detaïlniveau* van het model niet al te hoog is. Dit is typerend voor kwalitatieve modellen [9].

In het informele model is de aanname gedaan dat causale invloeden in dat model *altijd* en onvoorwaardelijk versterkend of verzwakkend zijn. In theorie is dit echter lang niet altijd het geval. Zo is in paragraaf 2.6.1 is naar voren gekomen dat de invloeden van vermessing, verzuring en verdroging op de natuurkwaliteit een bepaald optimum hebben. Er is nu teveel van, maar te weinig is ook weer niet goed. Deze relaties laten zich grafisch uittekenen met een optimumcurve. Deze kennis is zowel in het informele als in het QPN model niet meegenomen; voor alle in het informele model opgenomen invloeden die in beginsel zowel versterkend als verzwakkend kunnen zijn, wordt aangenomen dat het *irreëel* is dat de toestand van het betreffende concept aan de andere kant van het optimum zou komen. Onder deze aanname kunnen deze invloeden in dit onderzoek als onvoorwaardelijk versterkend of verzwakkend worden beschouwd. Zonder de aanname waren deze invloeden niet onvoorwaardelijk versterkend of verzwakkend geweest, en hadden deze in het QPN als een ambigue invloed gemodelleerd moeten worden.

4.1.3 Betekenis van de uitkomsten

Zoals in de vorige paragraaf beschreven zijn de volgende aannamen gedaan voor de causale invloeden die in dit onderzoek zijn ingevoerd in het informele model:

- Van de invloeden die een optimum hebben bevindt de waarde van de betreffende variabele zich duidelijk aan één kant van dat optimum, en het is *irreëel* dat de waarde aan de andere kant van het optimum zou komen. Voorbeelden zijn de verdroging, de verzuring en de vermessing. Een scenario met te *weinig* verdroging, verzuring of vermessing kan gerust irreëel worden genoemd.
- De ingevoerde relaties gelden *gemiddeld* gezien voor heel Nederland in een vast tijdsbestek. Dat een relatie in Lutjebroek toevallig niet van toepassing is, weerlegt de relatie dus niet.

Dit is teruggekoppeld naar de experts en door hen is bevestigd dat alle in het informele model opgenomen relaties voldoen aan deze eisen. Daarmee konden de relaties uit het informele model vrij snel worden vertaald naar een QPN zoals beschreven in paragraaf 3.3. Onder de op pagina 36 genoemde aannamen kunnen de uitkomsten uit het QPN-model nu als volgt worden geïnterpreteerd:

- Een '+' of '-' uitkomst betekent dat de kans op toename groter resp. kleiner is geworden of gelijk is gebleven.
- Bij gelijke of lagere vermenigvuldigingsindex is de kans op toename bij een '++' cq. '--' uitkomst *minstens* zoveel toegenomen resp. afgenomen als bij een '+' resp. '-' uitkomst. Zie [19] voor de precieze interpretatie van de vermenigvuldigingsindices.

- Bij een ‘?’ uitkomst heeft het QPN onvoldoende informatie om te bepalen of de resulterende invloed positief of negatief is. Dit kan veroorzaakt zijn door het ontbreken van kwantitatieve informatie, maar ook door een onbekende invloed.

4.1.4 Correctheid bij veranderingen

Voor de correctheid van het model is het ook belangrijk om te kijken in hoeverre het model correct blijft (ervan uitgaande dat het correct is) indien in Nederland aspecten veranderen. Aangezien er een model is opgebouwd dat de huidige situatie modelleert, is dit model niet noodzakelijk correct meer als de situatie verandert. Een voorbeeld om dit te illustreren:

Stel, het verzurende gas NO_x is zowel van de landbouw afkomstig als van het verkeer. De landbouw levert echter slechts een bijdrage van 10 kiloton per jaar, terwijl het verkeer wel 1000 kiloton per jaar uitstoot. Als de expert nu gevraagd wordt wat het effect is van zowel 20% meer verkeer als van 20% meer landbouw, dan zal deze zeggen dat het effect van 20% meer verkeer vele malen groter is dan van 20% meer landbouw. Immers, bij het verkeer resulteert dit in 200 kiloton meer NO_x per jaar, voor de landbouw is dit slechts 2 kiloton per jaar. Uit een elicatiesessie zou in deze situatie dus geconcludeerd worden dat de invloed van het verkeer op dit punt sterk is, en de invloed van de landbouw niet.

Maar stel nu dat deze situatie verandert. Het verkeer stoot door technologische ontwikkelingen nog maar 8 kiloton per jaar uit, en de landbouw groeit waardoor deze nu 15 kiloton per jaar uitstoot. De verhoudingen van de sterktes van de invloeden zien er nu opeens geheel anders uit. Het is in deze situatie reëel om de invloed van de landbouw als sterk te modelleren in een Enhanced QPN, en die van het verkeer als niet-sterk. Het model is dus veranderd door veranderingen in de gemodelleerde situatie.

Merk op dat (uitgaande van onvoorwaardelijk versterkende of verzwakkende invloeden) veranderingen in het model als gevolg van veranderde situaties alleen invloed kunnen hebben op de sterktes van invloeden. De richting van invloeden (en daarmee de tekens in het QPN, afgezien van de sterkte) zullen niet veranderen. Een positieve invloed blijft positief, een negatieve invloed blijft negatief. Voor een “update” van het model volstaat dus het herzien van de sterktes.

4.1.5 Nog enkele kritische kanttekeningen

Het netwerk van het onderzochte QPN-model is relatief klein van omvang; het geselecteerde deeldomein is maar een klein deel van het totale domein zoals dat in het RAP gemodelleerd is. Een uitgebreid meta-model brengt mogelijk extra moeilijkheden met zich mee. Er bestaat dan bijvoorbeeld de kans dat ambiguïteit veel vaker op gaat treden. Ook zijn de meeste relaties in het deeldomein tamelijk simpel (behalve de invloeden op de natuurkwaliteit), en zou het best kunnen dat relaties in de meer maatschappelijke laag veel ingewikkelder zijn. Kortom, het is zeer wel mogelijk dat men op veel meer problemen stuit op het moment dat het netwerk fors uitgebreid wordt.

Een tweede kanttekening moet geplaatst worden bij de procedure voor het bepalen van de sterktes. Daarbij wordt geïnformeerd naar de effecten van procentuele toenames van variabelen die van invloed zijn. Formeel mag dit alleen indien de relaties *lineair* zijn. In de praktijk zal dit echter niet snel tot incorrecte relaties leiden, omdat relaties alleen als sterk worden gemodelleerd indien de relaties *duidelijk* sterker zijn dan de andere. Relaties worden dus alleen als sterk gemodelleerd indien zij *onvoorwaardelijk* sterker zijn dan de andere relaties. Bovendien worden de ketens die van onder tot boven geheel uit sterke invloeden bestaan achteraf gecontroleerd, waardoor de kans op onterechte sterke invloeden zo klein mogelijk wordt.

4.2 Praktische evaluatie

Naast het theoretisch beschouwen van het opgebouwde QPN-model is het zinvol om te kijken hoe dit model nu in de praktijk werkt. Daartoe is er geëxperimenteerd met het model. Bij het

praktisch gebruik van het model wordt onderscheid gemaakt tussen beleids- en doelvariabelen. Beleidsvariabelen zijn de variabelen die betrekking hebben op de concepten waar men direct iets aan kan doen met beleid. De landbouwproductie is zo'n beleidsvariabele. De doelvariabelen hebben betrekking op de concepten waar men doelstellingen mee voor ogen heeft, met betrekking tot natuur, milieu en gezondheid. Omdat in ons model de natuurkwaliteit de enige doelvariabele is, is gekeken van iedere beleidsvariabele wat de invloed is van die variabele op de natuurkwaliteit.

4.2.1 Invloed van enkele beleidsvariabelen op de doelvariabele

De volgende variabelen blijken in het model een niet-sterke positieve invloed op de natuurkwaliteit te hebben:

- Landbouw-efficiency
- Aandeel biologische + geïntegreerde landbouw
- Efficiency van scheepvaart
- Efficiency van personenauto's
- Efficiency van overig verkeer

De volgende variabelen hebben een niet-sterke negatieve invloed op de natuurkwaliteit:

- Kunstmestgebruik
- Hoeveelheid scheepvaart
- Hoeveelheid personenauto's
- Hoeveelheid overig verkeer

En de volgende variabelen hebben een sterke negatieve invloed op de natuurkwaliteit:

- Landbouwproductie
- Aandeel veeteelt
- Drooglegging/peilverlaging

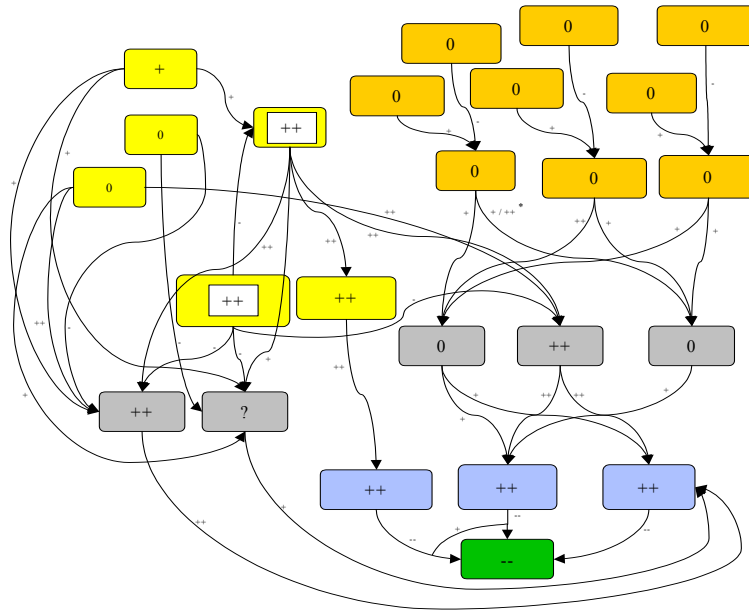
Er zijn geen sterke positieve of ambigue invloeden. Deze resultaten komen overeen met het RAP, en de experts kunnen zich in deze uitkomst vinden. Gezien hetgeen er bij de theoretische beschouwing in paragraaf 4.1 gezegd is over de berekende sterktes, moet men wel rekening houden met de vermenigvuldigingsindices. Hier blijkt dat zelfs zonder het meenemen van de vermenigvuldigingsindex de resultaten reëel zijn, in de zin dat de landbouwproductie, het aandeel veeteelt en de drooglegging ook volgens de experts de sterkste negatieve invloed hebben op de natuurkwaliteit. Dit komt door het feit dat het verschil in lengte van de verschillende ketens van de doelvariabele naar de beleidsvariabelen niet zo groot is. Daardoor zijn bijna alle vermenigvuldigingsindices gelijk, en zal een '--' invloed meestal daadwerkelijk sterker zijn dan een '-' invloed.

4.2.2 Invloed van meerdere beleidsvariabelen op de doelvariabele

We gaan nu combinaties bekijken van meerdere maatregelen die tegenstrijdige effecten hebben. Deze maatregelen worden simultaan opgegeven in het netwerk. We gaan maatregelen die bevorderlijk zijn voor de natuurkwaliteit combineren met maatregelen die juist een negatieve invloed hebben daarop. Er wordt bekeken in hoeverre het model in dergelijke situaties uitsluitend kan geven over het netto effect op de natuurkwaliteit. Wat geeft het model bijvoorbeeld als we een toename van de biologische/geïntegreerde landbouw combineren met een toename van de totale landbouwproductie?

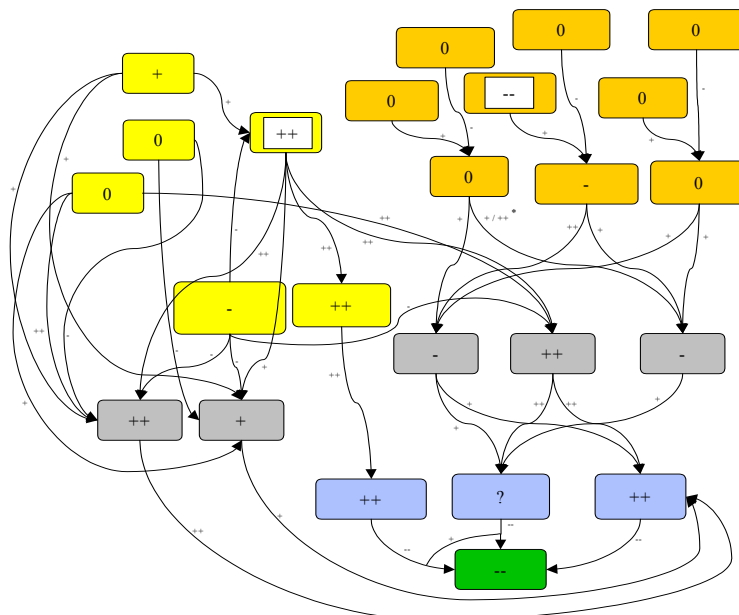
De resultaten worden hier grafisch weergegeven, waarbij de namen uit de knopen zijn weggelaten. In plaats daarvan is het resulterende teken van invloed ingetekend in de graaf. Voor de knopen waarvan het teken is *opgegeven* heeft het vakje met het teken een witte achtergrond, terwijl dit vakje transparant is bij een berekende uitkomst. Om te kunnen zien welke knoop welke variabele representeert wordt de lezer aangeraden om het model op pagina 40 erop na te slaan.

Het resultaat van het combineren van een ‘++’ voor de landbouw met een ‘++’ voor het aandeel biologische/geïntegreerde landbouw is hier te vinden:



We zien dat een ‘++’ voor de landbouwproductie gecombineerd met een ‘++’ voor het aandeel biologische landbouw resulteert in een ‘--’ voor de natuurkwaliteit. Dit komt doordat een aantal invloeden van de landbouwproductie als sterk zijn gemodelleerd, en die van het aandeel biologische landbouw als niet-sterk. De sterke invloeden winnen het van de niet-sterke, dus is de negatieve invloed van een toename van de landbouwproductie doorslaggevend. De landbouw-expert kan zich in deze uitkomst vinden omdat volgens hem een toename van het aandeel biologische landbouw minder effect zal hebben dan een gelijke toename van de totale landbouw. Het vraagteken bij de uitspoeling van P ontstaat omdat er zowel niet-sterke positieve invloed als niet-sterke negatieve invloeden binnen komen. Dit vraagteken is bij de vermessing niet meer te vinden omdat daar wél sterke positieve invloeden binnenkomen welke sterker zijn dan de zwakke negatieve invloeden afkomstig van het aandeel biologische landbouw.

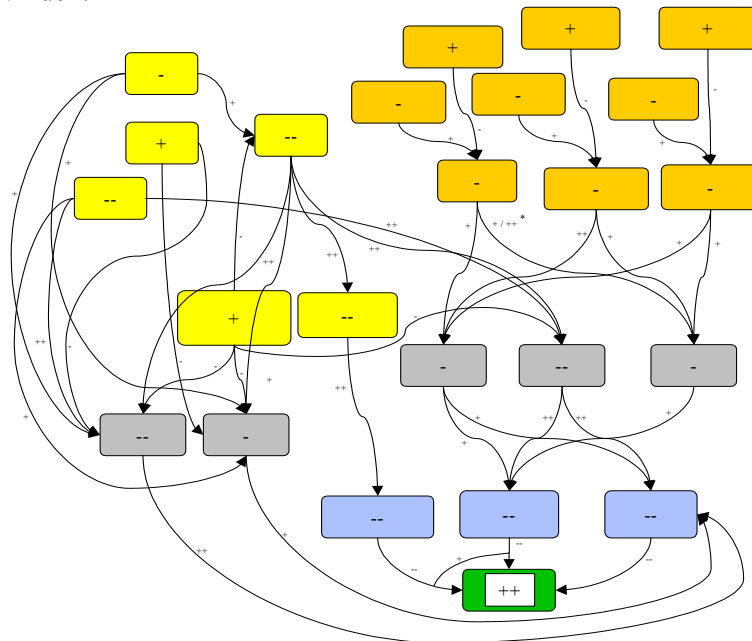
Ook interessant is een combinatie van een sterke afname van het personenverkeer met een sterke toename van de landbouwproductie. Het resultaat is hieronder te vinden:



We zien dat een ‘++’ voor de landbouw gecombineerd met een ‘--’ voor de hoeveelheid personenauto’s resulteert in een negatief effect op de natuurkwaliteit. De totale invloed van de landbouw is dus sterker dan de invloed van het personenverkeer. Het vraagteken bij de verzuring komt doordat de personenauto’s via meerdere ketens bijdragen aan de verzuring, terwijl de invloed van de landbouw op de verzuring slechts via één keten loopt. De invloed van de landbouw (via NH_x) op de verzuring weliswaar sterker is, maar meerdere niet-sterke invloeden kunnen nog altijd sterker zijn dan één enkele sterke invloed. De domeinexperts kunnen zich hierin vinden omdat volgens hen de landbouwproductie een sterkere negatieve invloed op de natuurkwaliteit heeft dan de hoeveelheid personenauto’s.

4.2.3 Invloed van de doelvariabele op beleidsvariabelen

Nu gaan we kijken wat het effect is indien we een observatie invoeren voor de enige doelvariabele. We voeren een ‘++’ in voor de natuurkwaliteit. Het resultaat is hieronder te vinden:

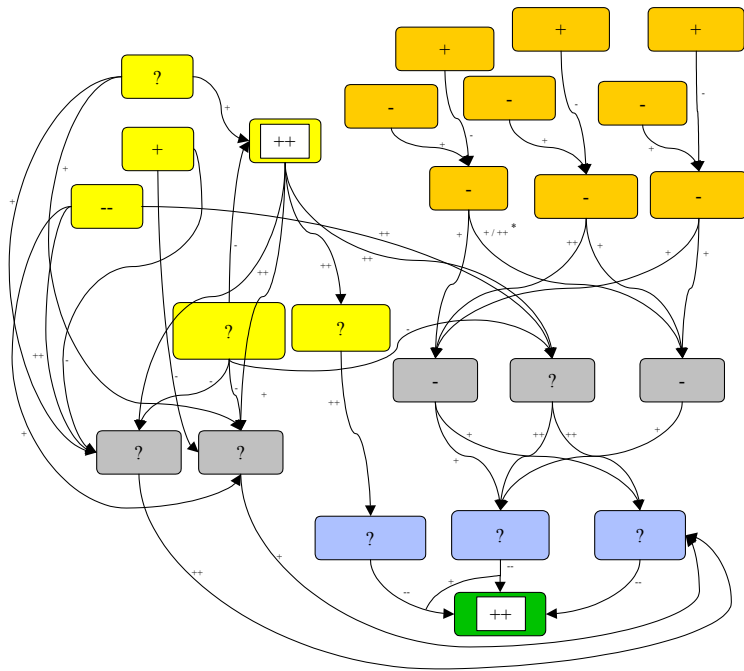


De resulterende tekens van invloed voor de beleidsvariabelen zijn dezelfde als toen we keken naar het effect van beleidsvariabelen op de natuurkwaliteit. Erg verwonderlijk is dit niet, want de kwalitatieve relaties zijn in ons model symmetrisch (op één na). De experts kunnen zich in de uitkomsten vinden: om de natuurkwaliteit te verbeteren moet er vooral iets gebeuren aan de landbouwproductie, het aandeel veeteelt, en de drooglegging als gevolg van de landbouw. Daarnaast kan minder verkeer en minder kunstmest een bijdrage leveren alsmede een verhoogde efficiency van de landbouw en het verkeer. Tenslotte kan meer biologische landbouw bevorderlijk zijn voor een betere natuurkwaliteit.

4.2.4 Combinaties van observaties voor beleids- en doelvariabelen

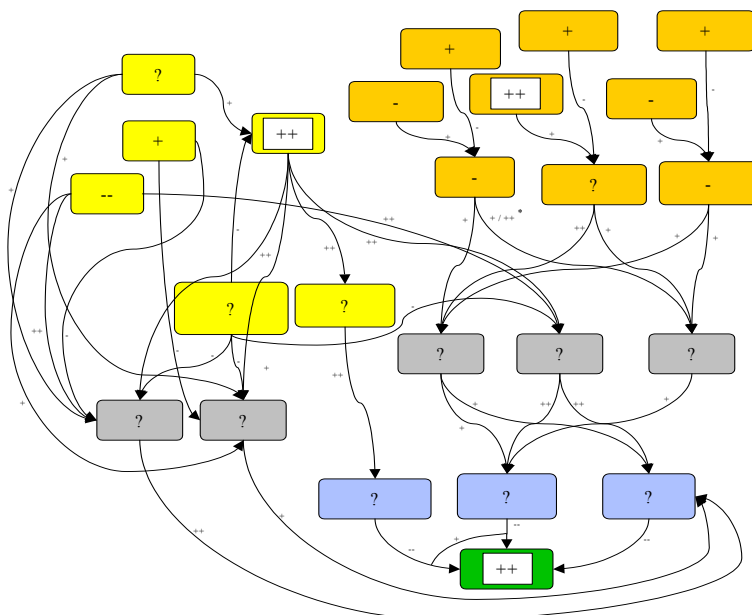
Het voordeel van QPNs is dat ze niet alleen “van boven naar beneden” en ook andersom kunnen redeneren, we kunnen ook *simultaan* observaties bovenaan én onderaan opgeven. We kijken hier wat het effect is indien we zowel een observatie opgeven voor onze doelvariabele, en tevens voor een beleidsvariabele.

Stel dat de landbouw om wat voor reden dan ook moet blijven groeien, en men wil toch dat de natuurkwaliteit vooruit gaat, wat geeft het model dan? We geven een ++ voor de natuurkwaliteit én voor de landbouwproductie. Het resultaat is te vinden op de volgende pagina.



Het model geeft nu een aantal vraagtekens, maar geeft nog steeds een beeld van wat men kan doen om deze twee wensen zoveel mogelijk te realiseren: een kleiner aandeel veeteelt is een belangrijke maatregel die niet zorgt voor minder landbouwproductie en tevens goed is voor de natuurkwaliteit. Daarnaast zou een betere landbouwefficiëncy kunnen helpen, een betere efficiëncy van het verkeer en minder verkeer. De vraagtekens geven aan waar er tegenstrijdige invloeden binnenkomen. Voor een betere natuurkwaliteit zou de hoeveelheid NH_x omlaag mogen, maar meer landbouwproductie leidt juist tot meer NH_x. Een kwalitatief model als dit levert daarom terecht een vraagteken op voor dergelijke variabelen met tegenstrijdige invloeden.

Bij de hoeveelheid personenauto's staat nu een '-'. Stel dat dit onmogelijk is, bijvoorbeeld omdat er sprake is van een autonome groei van het verkeer die de politiek niet aan banden wil leggen met bijvoorbeeld rekeningrijden. Wat geeft het model dan? We geven een '++' voor de natuurkwaliteit, voor de landbouw en voor de hoeveelheid personenauto's. Het resultaat is hieronder te vinden:



We zien dat er nu nog meer vraagtekens zijn, bijvoorbeeld ook voor de hoeveelheden NO_x en SO_x. Toch geeft het model nog steeds aan dat er winst valt te behalen in een afname van het aandeel veeveelt en een hogere efficiency van zowel de landbouw als het verkeer. Tenslotte zou minder scheepvaart en minder overig verkeer nog steeds een bijdrage kunnen leveren.

4.3 Vergelijking met het RAP

4.3.1 Functionaliteit van het RAP

Het door het bedrijf Resource Analysis ontworpen RAP (voorheen het Verkennend Analyse Systeem genoemd) is een tool waarmee op basis van een probleembeschrijving snel een verzameling variabelen kan worden gedefinieerd, waarna de variabelen kunnen worden gecategoriseerd in componenten. Vervolgens kunnen er de relaties tussen deze variabelen worden bepaald, waarna het geheel kwalitatief kan worden doorgerekend op effecten van ingegeven veranderingen [24].

De variabelen zijn toestandsvariabelen die aangeven hoe de toestand verandert van hetgeen de variabele representeert. De variabelen kunnen de waarden -, --, ---, 0, +, ++ en +++ hebben. Een +++ betekent een sterke positieve verandering, een ++ een normale positieve verandering, een + lichte positieve verandering, een - een lichte negatieve verandering, een -- een normale negatieve verandering, een --- een sterke negatieve verandering en een 0 betekent geen verandering. Als het model bijvoorbeeld voor de variabele “verzuring” de waarde +++ oplevert, dan kan er een sterke positieve verandering van de verzuring verwacht worden, oftewel de verzuring neemt dan naar verwachting sterk toe.

De variabelen zijn gecategoriseerd in componenten. Componenten kunnen worden gezien als een deel van het “totale systeem” zoals dat gemodelleerd wordt. Zo’n deel kan bestaan uit een fysiek element, een actor, een functie etc. [9]. Daarnaast zijn er relaties die beschrijven welke toestandsvariabelen veranderen als gevolg van het veranderen van een andere variabele. Deze relaties kunnen dezelfde tekens hebben als de toestandsvariabelen. Hier betekent een --- dat een variabele een sterke negatieve invloed heeft op een andere, en een +++ betekent een sterke positieve invloed. De tekens bestaande uit één of twee symbolen representeren invloeden van lichte respectievelijke normale sterkte.

Men kan een aantal variabelen opgeven als criterium. Deze variabelen kunnen worden gezien als de doelvariabelen. Nadat de componenten, variabelen en relaties zijn vastgelegd kunnen er beleidsmaatregelen worden ingevoerd en scenario’s worden doorberekend. Effecten van verzamelingen van maatregelen en ontwikkelingen (scenario’s dus) kunnen met elkaar vergeleken worden op de opgegeven criteria. Bij het selecteren van maatregelen kan men snel een beeld krijgen van welk teken men voor deze variabele zou moeten opgeven om een gewenst teken voor een bepaald criterium te bewerkstelligen.

Voor de door het RIVM regelmatig uitgegeven Milieuverkenning heeft men bovenaan de maatschappelijke (al dan niet autonome) ontwikkelingen geplaatst, en onderaan de doelvariabelen met betrekking tot duurzaamheid, natuur en gezondheid. De pijlen zijn daarbij voornamelijk naar beneden gericht. Bijlage 1 geeft een screenshot van het RAP met dit model.

Het RAP levert voor de doelvariabelen een bereik op dat aangeeft wat er met die variabele zou kunnen gebeuren in dat scenario. Voor de natuurkwaliteit zou de uitkomst bijvoorbeeld ---...+ kunnen zijn, hetgeen betekent dat verandering van de natuurkwaliteit ergens ligt tussen sterke achteruitgang en lichte vooruitgang. Kortom, er zou van alles kunnen gebeuren, behalve een hele sterke vooruitgang.

4.3.2 De door het RAP gebruikte berekeningsmethode

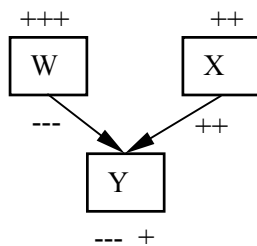
Voor het berekenen van de resulterende verandering als gevolg van een variabele die invloed heeft worden de rekenregels gebruikt die te vinden zijn op de volgende pagina [9].

Verandering in B	Relatie met B					
Verandering in A	+++	++	+	-	--	---
+++	+++	++	+	-	--	---
++	++	+	0	0	-	--
+	+	0	0	0	0	-
-	-	0	0	0	0	+
--	--	-	0	0	+	++
---	---	--	-	+	++	+++
0	0	0	0	0	0	0

In deze tabel staat de resulterende verandering in toestandsvariabele B, als gevolg van een verandering in toestandsvariabele A, via de werking van de relatie bovenaan in de tabel. Voor meerdere inkomende invloeden op één variabele houdt het RAP een boven- en een ondergrens bij. Dit wordt gedaan omdat veranderingen langs verschillende paden kunnen plaatsvinden, waardoor de mate van veranderingen langs die paden verschillend kan uitpakken. Eerdere concept-modellen van het RAP werkten nog met optellingen, maar dit heeft een aantal nadelen zoals het divergeren van de waarden, doordat de waarden geen bovengrenzen kenden.

Van iedere variabele wordt gekeken naar alle *inkomende* relaties. Op grond van bovenstaande tabel worden alle mogelijke invloeden uitgerekend, waarvan een minimum en een maximum (onder- en bovengrens) wordt bijgehouden. Grenzen van onderliggende variabelen worden bepaald door de minima en maxima te bepalen van alle "bovenliggende" knopen, deze door te berekenen volgens de tabel en daar de minima en maxima van vast te stellen. Zo worden de waarden tot aan de eindvariabelen berekend. Deze eindvariabelen zijn tevens de doelvariabelen. De uiteindelijke onder- en bovengrenzen worden weergegeven voor de doelvariabelen (criteria).

Een klein voorbeeld om de functionaliteit van het RAP te illustreren:



Variabele W heeft een sterke negatieve invloed op Y, en variabele X heeft een normale positieve invloed op Y. We geven aan dat Y een criterium is. Als nu wordt opgegeven dat W sterk vooruit gaat (+++), en dat X normaal vooruit gaat (++) , dan berekent het RAP het volgende: in de tabel zien we dat een sterke positieve verandering van W gecombineerd met een sterke negatieve relatie van W met Y resulteert in een sterke negatieve verandering van Y. Een normale positieve verandering van X gecombineerd met een normale positieve relatie van X met Y resulteert in een lichte positieve verandering van Y. De ondergrens wordt dus vast gesteld op een sterke negatieve verandering (---), de bovengrens wordt vastgesteld op een lichte positieve verandering (+).

De gebruiker kan aangeven hoeveel redeneerstappen het model achter elkaar mag maken; de grootste orde van effecten kan dus worden opgegeven. Dit heeft niets te maken met een dynamisch aspect (bijvoorbeeld een tijdsfactor), het is alleen bedoeld om de gebruiker

stap voor stap te kunnen laten zien hoe de effecten doorwerken en hoe de berekening plaatsvindt [bron: Peter Kouwenhoven, Resource Analysis].

Documentatie over de precieze wijze waarop het RAP is geïmplementeerd is helaas niet beschikbaar. Alles wat hier beschreven is, is gebaseerd op de literatuurbronnen [9] en [24], alsmede op een gesprek met Peter Kouwenhoven van Resource Analysis.

4.3.3 Enkele kritische kanttekeningen bij het RAP

De berekeningsmethode van het RAP is heuristisch, dat wil zeggen dat de gebruikte rekenregels proefondervindelijk zijn bepaald, en dat het *lijkt* dat deze rekenregels het beste werken. Een bewijs is echter niet gegeven. Er is rekening mee gehouden dat er geen versterking op mag treden (dat wil zeggen dat de som van invloeden nooit sterker mag zijn dan de sterkste van die invloeden) omdat dat zou leiden tot divergentie [9]. Er is echter geen wiskundige onderbouwing voor de gebruikte rekenregels. Hier volgen enkele kritische kanttekeningen die te plaatsen zijn bij de gebruikte rekenregels.

Onder- en bovengrenzen

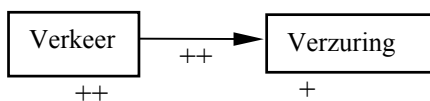
Voor het berekenen van het gezamenlijke effect van twee of meer invloeden op één variabele, worden er onder- en bovengrenzen bijgehouden. Dit is volgens Peter Kouwenhoven een bewuste keuze, omdat er onvoldoende informatie is om twee tegenstrijdige invloeden tegen elkaar “weg te strepen”.

Hieraan kleven echter ook nadelen. In het in paragraaf 4.3.2 gebruikte voorbeeld zou het bijvoorbeeld best zo kunnen zijn dat de invloed van W het altijd wint van de invloed van X. Toch wordt die onder- en bovengrens bijgehouden, waardoor in het eindresultaat toch nog altijd een positieve verandering van Y voor mogelijk wordt gehouden, ook al kan men eigenlijk weten dat het netto effect altijd negatief zal zijn.

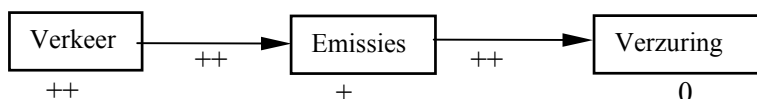
Verzwakkende invloeden over paden

Een ander nadeel schuilt in de manier waarop men omgaat met het verzwakken van invloeden over paden. Het volgende voorbeeld illustreert dat:

Persoon A modelleert de invloed van de hoeveelheid verkeer op de verzuring als volgt: de hoeveelheid verkeer heeft een normale positieve invloed op de verzuring. Als dit in het RAP wordt gemodelleerd, en men opgeeft dat de verandering van hoeveelheid verkeer als normaal positief wordt gewaardeerd, dan zou het RAP berekenen dat de verandering van de verzuring als licht positief wordt gewaardeerd:



Persoon B is iets preciezer en modelleert als volgt: de hoeveelheid verkeer heeft een normale positieve invloed op de emissies, en de emissies hebben een normale positieve invloed op de deposities (de verzuring dus). In dit geval zou het RAP bij een normale positieve verandering van de hoeveelheid verkeer berekenen dat het effect op de verzuring *nul* is.



Het invoeren van een extra stap levert dus voor niet-sterke invloeden verlies van informatie op. Men kan hier redeneren dat er hier blijkbaar een ‘+++’ moet komen bij één van de twee pijlen, maar uitgangspunt zou moeten zijn dat het bepalen van de afzonderlijke relaties op een pad automatisch zou moeten resulteren in een netto effect dat klopt voor het pad als geheel. En gezien de enigszins vage omschrijvingen voor sterktes zou het zeer goed kunnen dat de

gebruiker zowel de invloed van het verkeer op de emissies als de invloed van de emissies op de verzuring als normaal positief zou waarderen.

Het idee dat invloeden bij een extra stap verzwakken is juist, maar daarbij moet erg voorzichtig worden omgegaan met conclusies dat de resulterende invloed nul is. Nul is namelijk een precies getal, en er is onvoldoende informatie om deze harde conclusie te kunnen trekken.

De invloeden divergeren dus inderdaad niet, maar convergeren naar nul. In sommige gevallen zal dit leiden tot het wegebben van invloeden die toch niet zo belangrijk zijn, maar in andere gevallen kan dit leiden tot het verlies van belangrijke informatie.

Semi-kwantitatief

Met het RAP probeert men feitelijk semi-kwantitatief te redeneren. Men probeert een uitkomst als “++” echt te zien als een absolute toename die in een vaste range van de grootheid ligt. Dit blijkt ook uit de manier waarop men kan terugredeneren met het RAP. Daarbij kan men per criterium opgeven welke *specifieke* waarde (variërend van --- tot +++) men een variabele moet geven om een specifieke waarde daarvoor te krijgen. Het programma suggereert daarmee dat het RAP-model in staat zou zijn om te beoordelen of het *voldoende* is om een bepaalde set van maatregelen te nemen om een bepaalde doelstelling te verwezenlijken. De aanwezige kwalitatieve informatie gecombineerd met de niet wiskundig onderbouwde rekenmethode maken dat dergelijke conclusies geheel ongefundeerd zijn.

Er is niet duidelijk vastgelegd wanneer relaties als licht, normaal of sterk positief/negatief moeten worden gemodelleerd. Er is een beschrijving in natuurlijke taal, maar de interpretatie daarvan is zeer subjectief. Veranderingen in variabele A moeten worden vergeleken met veranderingen in variabele B, maar in veel gevallen zal dat neer komen op het vergelijken van appels met peren. Er is niets vastgelegd over hoe men het beste te werk kan gaan bij het vergelijken van verschillende vruchtsoorten.

Het roept de vraag op wat de zin is van het toekennen van sterktes, als er geen duidelijke richtlijn is die aangeeft wanneer men welke sterkte moet toekennen. Als de ingevoerde sterktes niet doordacht zijn, zullen de berekende sterktes ook weinig betekenen, zelfs al zou de berekeningsmethode wél wiskundig onderbouwd zijn.

De technische kant van het RAP is natuurlijk maar één aspect. Het programma heeft een overzichtelijke user-interface en laat mensen via een stappenplan systematisch problemen en systemen analyseren, waaruit tenslotte relaties tussen concepten worden afgeleid. Deze concepten worden dan de toestandsvariabelen, die bovendien overzichtelijk in componenten zijn ondergebracht. Dit is iets waar mensen van het RIVM die het RAP gebruiken erg tevreden over zijn.

4.3.4 Vergelijking met de (Enhanced) QPN-methode

De hoeveelheid informatie in de uitkomsten van het RAP is in beginsel groter dan bij de QPNs. Dit komt in de eerste plaats doordat men bij het RAP werkt met drie gradaties van sterkte, hetgeen iets preciezer is (maar ook iets lastiger bij het verzamelen van de kennis). Daarnaast levert ambiguïteit geen vraagteken op, maar een onder- en bovengrens. In principe zou dit meer informatie moeten geven dan een vraagteken, maar gezien de eerder geplaatste kanttekeningen bij de sterktes in het RAP valt dit te bezien. De betrouwbaarheid van de uitkomsten is immers discutabel omdat er geen wiskundige onderbouwing is voor de gebruikte rekenregels. Bovendien zijn deze beperkingen van de in dit onderzoek toegepast QPN-methode op te lossen met uitbreidingen van de techniek (zie de aanbevelingen).

Wat betreft de methodische complexiteit kan gezegd worden dat het RAP op dit punt een streepje voor heeft, juist vanwege het ontbreken van wiskundige onderbouwing; de wiskundige correctheid van QPNs heeft alleen betekenis wanneer de ingevoerde relaties en hun sterktes ook correct zijn. Het achteraf controleren van de sterktes van QPN-modellen om deze correctheid zoveel mogelijk te waarborgen is een stap die mogelijk voor gebruikers enigszins ingewikkeld is.

Wat betreft het terugredeneren zoals genoemd in de inleiding biedt het RAP deze functionaliteit in beginsel wel, maar dit werkt geheel anders dan bij QPNs. Bij het RAP is de gebruiker in staat om bij het selecteren van maatregelen te kijken welk specifiek teken men moet opgeven om een specifiek teken voor een bepaald criterium te krijgen. Men kan dus bij één doelstelling zoeken naar één maatregel. Indien men meerdere van de in beeld gebrachte maatregelen zou nemen dan zou het effect op het criterium alweer anders kunnen zijn. Bovendien kan men geen beeld krijgen van maatregelen die men kan nemen indien men *meerdere* doelstellingen voor ogen heeft. Het model is daar simpelweg niet voor bedoeld. In dit onderzoek is duidelijk naar voren gekomen dat QPNs deze functionaliteit wel bieden; hoewel het in dit onderzoek opgebouwde model maar één doelvariabele had, zou het opgeven van meerdere doelvariabelen zeer wel mogelijk zijn geweest als die in het model zaten.

Het interactieve gebruik van het QPN is veelbelovend omdat de gebruiker alle vrijheid heeft om aanwijzingen over zowel beleids- als doelstellingsvariabelen op te geven. Er kunnen zelfs meerdere van beide typen variabelen worden opgegeven. Deze functionaliteit maakt een zinvol interactief gebruik mogelijk. Bij het RAP kan men alleen maatregelen selecteren en aflezen wat het effect is. Men wordt bij het RAP dus veel meer gedwongen om een trial-and-error aanpak te hanteren. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat er op dit moment al een complete implementatie van de RAP-methode ontwikkeld is, inclusief een gebruikersvriendelijke user interface. Dit is iets wat simpelweg (nog) niet bestaat voor de Enhanced QPN methode zoals gebruikt in dit onderzoek.

Het belangrijkste voordeel van het RAP is dat de domeinkennis in beginsel beter aansluit bij het RAP dan bij QPNs, omdat men voor milieuproblemen vooral kennis wil modelleren over *hoeveelheden*. Het RAP is hier ook expliciet voor bedoeld, omdat men met de tekens ‘---’ tot ‘+++’ bedoelt dat men verwacht dat de grootte die de betreffende variabele representeert verandert binnen een bepaalde range. Als men de manier waarop deze informatie berekend wordt buiten beschouwing laat, is dit precies de informatie die men wil bij het oplossen van milieuproblemen; men wil bijvoorbeeld indicaties van hoeveel men moet doen aan de landbouw om bijvoorbeeld te zorgen dat de natuurkwaliteit in ieder geval niet nog verder achteruit gaat. Het RAP geeft dergelijke indicaties. Zoals in paragraaf 4.1.2 beschreven geeft een QPN model slechts informatie over (veranderingen van) kansen op toename van concepten uit het domein van milieuproblemen. Het moge duidelijk zijn dat de kennis die het RAP kan modelleren beter aansluit bij dit domein.

Een tweede pluspunt van het RAP kan zijn dat hier wel cycli toegestaan zijn. Voor de in het informele model voorkomende wederkerige relaties zou dit een uitkomst zijn. Bij de QPN methode wordt men gedwongen om één richting voor een pijl te kiezen. Daarnaast is het mogelijk dat men invloeden wil modelleren die zichzelf versterken via andere invloeden [bron: Peter Kouwenhoven]. In het RAP zou men dit kunnen modelleren met cycli. In QPNs zou men dit met additieve synergieën moeten oplossen. Voor de kwalitatieve uitkomst maakt dit echter geen verschil bij de in dit onderzoek gebruikte QPN methode.

Een ander voordeel van het RAP is dat er ook voor relaties onder- en bovengrenzen van toepassing zijn. De mate waarin een relatie onzeker is kan dus worden vastgelegd. Dit is in de in dit onderzoek gebruikte QPN methode niet mogelijk. Er zijn echter wel uitbreidingen denkbaar die dit mogelijk maken (zie de aanbevelingen).

Resumerend is het een en ander hier in een tabel weergegeven.

Criterium	RAP	QPNs
Hoeveelheid informatie in de uitkomsten	++	+
Betrouwbaarheid uitkomsten	-	++
Beperkte methodische complexiteit	++	+
Mogelijkheid tot terugredeneren	+	++
Interactief gebruik	+	++

Criterium	RAP	QPNs
Modelleert kennis met betrekking tot	Hoeveelheden	Kansen
Cykels toegestaan?	Ja	Nee, maar wel synergieën
Mogelijkheid om de mate van onzekerheid te modelleren	Ja	Nog niet, maar is theoretisch wel mogelijk

De gebruikte tekens geven indicaties over hoe de twee technieken zich tot elkaar verhouden met betrekking tot een aantal criteria. Deze vergelijking heeft uitsluitend betrekking op het gebruik van QPNs voor de kennis uit het in dit onderzoek afgebakende deeldomein, en zegt dus niet alles over het gebruik van QPNs voor het gehele domein zoals dat gemodelleerd is in het RAP. Verder moet nog worden opgemerkt dat een aantal minder sterke punten van de QPNs met uitbreidingen op te lossen zijn. Het grootste minpunt van QPNs voor dit domein, namelijk dat er uitsluitend kennis over kansen wordt gemodelleerd in plaats van kennis over hoeveelheden, daar is geen oplossing voor; QPNs modelleren nu eenmaal per definitie kansen. Uit dit onderzoek blijkt dat er goede mogelijkheden zijn om met dit minpunt om te gaan. Daarbij brengt het feit dat de correctheid van het QPN formalisme wiskundig bewezen is nog een voordeel met zich mee; dit maakt het mogelijk om de betekenis van de uitkomsten exact te formuleren in termen van “onder die en die aanname betekenen de uitkomsten dit en dat”. Dit is niet mogelijk met het RAP waarvan de rekenregels heuristisch zijn en waarvoor geen wiskundige onderbouwing bestaat.

5. Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

Uit dit onderzoek blijkt dat formeel de kennis uit het domein van milieuproblemen niet volledig kan worden ondergebracht in een QPN model. Zuiver kwalitatief (alleen in termen van verwachte toename/afname op grond van een observatie) konden wel bijna alle causale relaties uit het domein worden gemodelleerd; alleen een tweetal wederkerige relaties (waarbij twee concepten invloed op elkaar hebben) waren niet te modelleren in een QPN. Maar zodra er *sterktes* worden gedefinieerd voor relaties ontstaat er discrepantie tussen de kennis die men zou willen modelleren en de kennis die het QPN-formalisme kan modelleren. Dit komt doordat bij milieuproblemen sterktes van relaties vooral worden uitgedrukt in termen van bijvoorbeeld “als A met zoveel toeneemt, dan neemt B met zoveel toe als gevolg daarvan”. In de in dit onderzoek gebruikte uitbreiding van QPNs bevatten sterktes informatie over verschillen in *kansen*. Dit is een wezenlijk verschil en geeft aan dat domeinkennis met betrekking tot sterktes formeel niet te modelleren is in een dergelijk QPN.

Met dit probleem is in dit onderzoek omgegaan door grotere verwachte verschillen in absolute toename -van bijvoorbeeld van concept A als gevolg van informatie over concept B- in het QPN te modelleren als grotere verschillen in kansen op toename als gevolg van die observatie. Er wordt dus de aanname gedaan dat meer kans op toename van een concept samenhangt met naar verwachting *meer* toename van dat concept. Onder deze aanname zijn sterktes voor het QPN model afgeleid. Het blijkt dat het op deze wijze opgebouwde QPN-model in de praktijk een goede indicatie over het domein geeft van het effect van opgegeven observaties. Zo geeft het een goede kwalitatieve indicatie van effecten van maatregelen. Daarnaast geeft het ook een indicatie van welke maatregelen men kan nemen indien men bepaalde doelstellingen voor ogen heeft. En zelfs het opgeven van zowel maatregelen als doelstellingen leidt tot zinvolle uitkomsten in termen van wat men dan nog zo goed en zo kwaad als het gaat kan proberen om dat zoveel mogelijk voor elkaar te krijgen. Voor het onderzochte deeldomein kan dus geconcludeerd worden dat zowel het doorberekenen van effecten als het “terugredeneren” naar behoren functioneert. De combinatie van deze twee functies maakt een zinvol interactief gebruik van het kwalitatieve model mogelijk, en geeft het meer functionaliteit dan het eenzijdig redenerende RAP. Zelfs de sterktes van de uitkomsten blijken zodanig te zijn dat de experts -met hulp waarvan het informele model is opgebouwd- zich daar in kunnen vinden.

Wat betreft de methodische complexiteit kan geconcludeerd worden dat een QPN model goed bij de menselijke perceptie aansluit. Dit zorgt ervoor dat het QPN model de milieuproblemen inzichtelijker maakt. Het afleiden van de variabelen en relaties van het model brengt geen grote moeilijkheden met zich mee. Het moeilijkst daarbij zijn de sterktes, maar het vergelijken van sterktes in termen van procentuele toename of afname van een concept maakt dat dit in de meeste gevallen goed te doen is. Alleen bij concepten waarbij dit moeilijk op deze manier is uit te drukken (bijvoorbeeld “sterkte rijksoverheid”) wordt enig inzicht gevraagd van de kennisingenieur. Voor alle in het deeldomein gebruikte concepten was het echter mogelijk om verandering daarvan uit te drukken in termen van procentuele toename of afname.

Tot slot zou er een theoretische verkenning worden gemaakt naar de mogelijkheden van het koppelen van een kwalitatief (QPN-) model aan (kwantitatieve) detailmodellen op het RIVM. Uit dit onderzoek bleek dat detailmodellen niet zo geschikt zijn voor het verzamelen van de kennis. In de aanbevelingen wordt een methode beschreven voor het verbinden van de detailmodellen aan kwalitatieve modellen.

5.2 Aanbevelingen

Een belangrijke kanttekening die bij dit onderzoek geplaatst moet worden, is het feit dat het gemodelleerde deeldomein beperkt is. Er is maar één doelvariabele, de meeste relaties zijn relatief eenvoudig, en aspecten uit de maatschappelijke laag zoals die ook in het RAP gemodelleerd zijn ontbreken geheel. In een vervolgonderzoek zou daar meer mee gedaan kunnen worden.

Voor de QPN methode zoals gebruikt in dit onderzoek bestaat geen enkele tool die deze methode implementeert. Om deze methode daadwerkelijk te kunnen gebruiken is het uiteraard nodig dat een dergelijke tool ontwikkeld wordt, inclusief een user interface die de gebruiker in staat stelt om variabelen en relaties te definiëren, aanwijzigen in te voeren en geïnfereerde uitkomsten in beeld te krijgen. In de verdere aanbevelingen wordt regelmatig ingegaan op aspecten van deze user interface.

In het milieubeleid wil men graag vragen beantwoord krijgen als “als we dit en dat voor elkaar willen krijgen, is het dan voldoende om?”. Dit soort vragen kunnen onmogelijk met een louter kwalitatief model beantwoord worden, ook al is er onderscheid in sterktes (of het er nou twee of drie of nog meer zijn). Het kan namelijk zo zijn dat men kwantitatieve informatie nodig heeft om te kunnen weten of invloeden tegen elkaar opwegen. Dit is heel duidelijk de beperking van kwalitatief modelleren. Desalniettemin kan een kwalitatief model (en een kwalitatieve discussie) duidelijk in beeld brengen aan welke kwantitatieve informatie behoefte is om dergelijke vragen wél te kunnen beantwoorden. En op dit punt zijn QPNs zeer nuttig, want bij een interactief gebruik van een QPN-model ontstaan bij het invullen van observaties vroeg of laat vraagtekens. Op dat moment kan men zien waar deze ontstaan, en wordt duidelijk welke informatie men nodig heeft om te kunnen weten hoe de balans zou doorslaan. Het in de user interface kunnen “doorklikken” op vraagtekens is daarom een belangrijke aanbeveling. Men zou onderscheid kunnen maken tussen vraagtekens die ontstaan doordat er een ambigue invloed op die variabele van invloed is, en de vraagtekens die ontstaan als er sprake is van tegenstrijdige invloeden. Er bestaan specifiek voor QPNs reeds technieken om de knopen te vinden waar vraagtekens ontstaan door tegenstrijdige invloeden [19]. In dat geval is er kwantitatieve informatie nodig om uitsluitsel te kunnen geven. Men kan dan met kwantitatieve gegevens de resulterende invloed berekenen, vervolgens deze opgeven, waarna men weer verder kan kijken welke kwantitatieve informatie nog meer nodig is. Dit lijkt ook de meest zinvolle manier van koppeling aan detailmodellen, want de detailmodellen zijn als kennisbron voor het kwalitatieve QPN-model niet erg praktisch (zie hoofdstuk 2). Met het doorklikken wordt dus bedoeld dat men kan klikken op de vraagtekens, waarna de tool aangeeft over welke variabelen kwantitatieve informatie nodig is om dat vraagteken weg te werken.

Een andere mogelijk nuttige toevoeging aan een QPN model kan zijn het lokaal kwantificeren van het model. Het is mogelijk om een in beginsel kwalitatief probabilistisch netwerk plaatselijk te kwantificeren [20]. Bij dergelijke semi-kwalitatieve probabilistische netwerken kunnen de inkomende pijlen bij de ene knoop geassocieerd zijn met kwalitatieve invloeden, terwijl bij een andere knoop de inkomende pijlen geassocieerd kunnen zijn met (kwantitatieve) kansverdelingen. Dit maakt het theoretisch mogelijk om daar waar de kwantitatieve informatie er is deze ook in het model te stoppen. In de praktijk zal dat voor dit domein vermoedelijk niet meevallen, omdat lang niet alle relaties kwantitatief goed zijn uit te drukken in kansen. De vraag wat er kwantitatief gebeurt met de *kans* op bijvoorbeeld vooruitgang van de natuurkwaliteit is een andere dan de vraag *hoeveel* de natuurkwaliteit vooruit zal gaan. Om deze reden zijn QPNs wel geschikt voor dit domein, en BBNs veel minder. Desalniettemin is het wellicht de moeite om de mogelijkheden van lokaal kwantificeren te onderzoeken.

Een belangrijke aanbeveling is het toevoegen van meer ruimtelijke informatie. Men zou de relaties in het model context-specifiek kunnen maken, in de zin van dat in het ene ruimtelijke deel van Nederland relaties anders kunnen zijn dan elders. Dus: daar waar er behoefte is aan ruimtelijk onderscheid, zou dit kunnen worden ingevoerd, en daar waar dit

niet van belang is hoeft dit ook niet. Dit zou veel kunnen toevoegen, en zou in een uitgebreider model heel wat niet-monotone invloeden monotoon kunnen maken. Bovendien worden dan ook de uitkomsten veelzeggender, omdat er dan uitspraken kunnen worden gedaan over specifieke delen van Nederland waar specifieke relaties een rol kunnen spelen. Overigens hebben oorzaken op de ene plek hebben vaak gevolgen elders [5]. Er zou onderzocht moeten worden hoe hier het beste mee kan worden omgegaan.

Het tijdaspect bleek ook een rol te spelen bij het eliciteren van de kennis. Deze kennis is eveneens te ondervangen met context-specifieke informatie. Bijvoorbeeld voor situaties met buffers en vertragingsmechanismen (zoals de vervangingstijd van auto's) zou men kunnen denken aan context-specifieke invloeden. Men kan een invloed afhankelijk maken van een variabele "Tijd". Gezien het feit dat we bij EQPNs beperkt zijn tot binaire variabelen, zou men ook kunnen denken aan tabellen van relaties uitgezet tegen de tijd. Dat geeft veel meer mogelijkheden.

Kwalitatief gezien zal het tijdsaspect overigens niet zo'n groot verschil maken. Belangrijker is het om consequent te zijn in de tijdsschaal die men hanteert bij het opbouwen van het model, omdat hier invloeden vergeleken moeten worden. Daarbij zou het best zo kunnen zijn dat invloed A na 1 jaar zwakker is dan invloed B na 3 jaar, maar dat na 3 jaar invloed A toch veel sterker is. Voor de correctheid van (de sterktes van) de relaties is het dus essentieel om consequent te zijn in de tijdsschaal die men hanteert. In eerste instantie is hiermee in het onderzoek geen rekening gehouden, pas later zijn relaties gecheckt op afhankelijkheid van tijd. Het is uiteraard verstandiger om dit meteen vanaf het begin te doen.

De Enhanced QPN methode kent twee gradaties van sterkte. Er zou onderzocht kunnen worden wat de toegevoegde waarde is van het uitbreiden naar drie gradaties. Als dit zinvol blijkt dan zou onderzocht kunnen worden hoe de \oplus en \otimes operatoren uitgebreid zouden kunnen worden om hiermee om te gaan. Bovendien zou men onderzoek kunnen doen naar mogelijkheden om de mate van onzekerheid expliciet op te kunnen geven in een relatie. Men zou net als bij het RAP kunnen denken aan kwalitatieve invloeden die een onder- en bovengrens (bijvoorbeeld uiteenlopend van '0' tot '++') hebben. Er zou onderzocht kunnen worden wat de toegevoegde waarde hiervan zou zijn voor dit domein. Als deze uitbreiding zinvol zou zijn, dan zou onderzocht kunnen worden hoe men hier in de inferentie mee om zou moeten gaan. De user interface zou de gebruiker in staat moeten stellen om deze informatie eenvoudig in te voeren.

In de in dit onderzoek gebruikte QPN methode wordt veel informatie na inferentie "weggegooid". Men zou bijvoorbeeld net als bij het RAP geen vraagtekens kunnen opleveren, maar alle inkomende invloeden die dit vraagteken tot gevolg hebben. Dit geeft immer meer informatie aan de gebruiker. Het wordt echter naar verwachting ook onoverzichtelijker. Er zou onderzocht kunnen worden hoe deze informatie toch op een zo overzichtelijk mogelijke manier zou kunnen worden getoond aan de gebruiker. Hetzelfde geldt voor de vermenigvuldigingsindices. Men heeft deze nodig om een vergelijking te kunnen maken tussen bijvoorbeeld een '+' en een '++' na inferentie. De user interface zou de gebruiker in staat moeten stellen om uitkomsten van twee variabelen eenvoudig te vergelijken, waarbij er voor het bepalen van deze uitkomsten rekening wordt gehouden met de vermenigvuldigingsindex.

Voor het terugredeneren wil men niet alleen een beeld krijgen van welke maatregelen men kan nemen, maar liefst ook van welke maatregelen men het beste kan nemen, oftewel welke maatregelen het meest kosteneffectief zijn. Om hier enigszins (maar zeker niet sluitend) een indicatie van te krijgen zou men aan iedere beleidsvariabele een kostenfactor kunnen "hangen" welke een indicatie geeft van wat het kost om het door de variabele gepresenteerde concept met 1% te verminderen/verbeteren. Als dan met terugredeneren blijkt dat er meerdere maatregelen genomen kunnen worden die in het kwalitatieve model ongeveer dezelfde sterkte hebben, dan kan men op grond van deze kostenfactor een beter beeld krijgen van welke maatregelen het meest effectief lijken. Maar om dit zeker te kunnen weten moet alles kwantitatief worden doorgerekend, dat is onvermijdelijk.

Een laatste aanbeveling specifiek voor het RIVM is om de kennis van vakspecialisten op een overzichtelijke wijze te representeren. Deels is dit reeds het geval in de *Hello*-database, maar wat hier bedoeld wordt is een grafische representatie van concepten en relaties

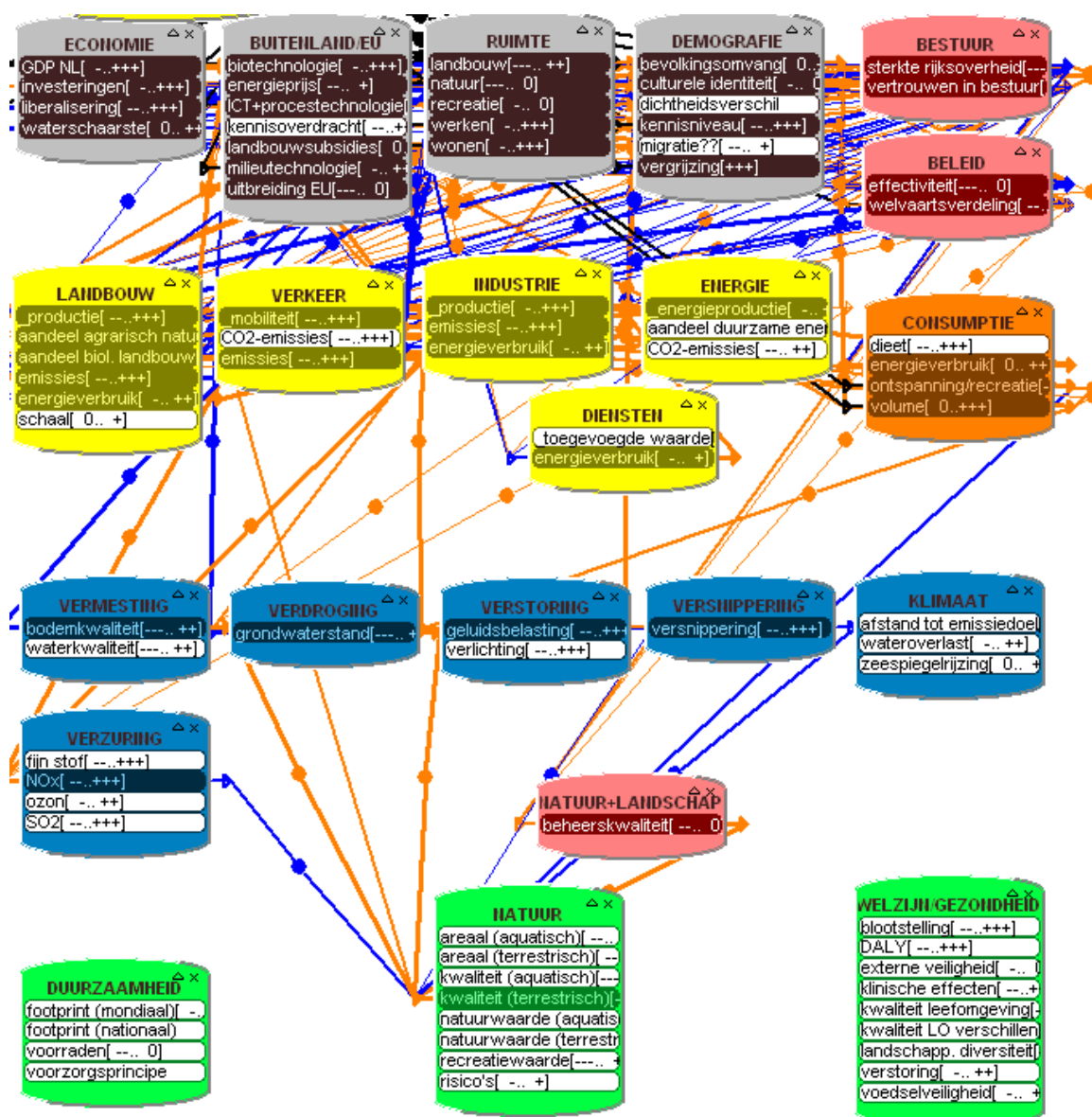
met daarbij aangetekend welke experts kennis hebben van welke concepten en welke relaties. De lezer begrijpt uiteraard al waar ik op aan stuur: dat is inderdaad het maken van één kwalitatief model met concepten en relaties (of dat nou een QPN of iets anders is laat ik in het midden) en de mogelijkheid om op die concepten en relaties te kunnen doorklikken om te kunnen zien wie daar mee bezig zijn, en eventueel welke detailmodellen daar gebruikt kunnen worden. Zodoende heeft men één allesomvattend model, waar nieuwe inzichten en relaties aan kunnen worden toegevoegd. In het geval van een QPN-model zou men dan bijvoorbeeld ook bij het doorklikken op vraagtekens kunnen zien welke mensen en/of detailmodellen men nodig heeft om het een en ander kwantitatief door te rekenen. Een dergelijke vorm van kennismanagement zou wellicht nuttig kunnen zijn voor een organisatie als het RIVM.

Bronnen

- [1] Aquest, *Informatief Interacteren door Interactief Informeren*, Aquest-rapport, 1998.
- [2] Druzdzel, M.J. *Probabilistic Reasoning in Decision Support Systems: From Computation to Common Sense*, PhD thesis, Department of Engineering and Public Policy, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, United States of America, 1993.
- [3] Druzdzel, M.J. & M. Henrion. Efficient reasoning in qualitative probabilistic networks. In: *Proceedings of the Eleventh National Conference on Artificial Intelligence*, AAAI press, Menlo Park, Californië, United States of America, 1993.
- [4] Funtowicz, S.O. & J.R. Ravetz. *Uncertainty and Quality in Science for Policy*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1990.
- [5] Gaag, L.C. van der. *Probabilistic Reasoning*, Syllabus, Instituut voor Informatica en Informatiekunde, Universiteit Utrecht, 2002.
- [6] Gaag, L.C. van der & J.-J.Ch. Meyer. Informational independence: models and normal forms. In: *International Journal of Intelligent Systems*, nr. 13, pp. 83 -109, 1998.
- [7] Gaag, L.C. van der & E.M. Helsper. Experiences with modelling issues in building probabilistic networks. In: A. Gómez-Pérez & V.R. Benjamins (eds.). *Knowledge Engineering and Knowledge Management: Ontologies and the Semantic Web. Proceedings of EKAW 2002*. Lecture Notes in Artificial Intelligence, vol. 2473, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 21 – 26, 2002.
- [8] Glasbergen, P. *Milieubeleid – een beleidswetenschappelijke inleiding*, VUGA uitgeverij B.V., Den Haag, 1994.
- [9] Heiligenberg, H. van den e.a. *Interactieve beleidsadvisering met eenvoudige modellen*, Intern rapport van het Centrum voor Informatie-infrastructuur Milieu, rapport nr. M007/01, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven, april 2001.
- [10] Helsper, E.M. & L.C. van der Gaag. Building Bayesian networks through ontologies. In: F. van Hamelen (ed.). *Proceedings of the 15th European Conference on Artificial Intelligence*, IOS Press, Amsterdam, The Netherlands, pp. 680-684, 2002.
- [11] Hogarth, R. Cognitive processes and the assessment of subjective probability distributions. In: *Journal of the American Statistical Association*, vol. 70, pp. 271-291, 1975.
- [12] Kahneman, D. & A. Tversky. *Judgment Under Uncertainty: Heuristics and Biases*, Cambridge University Press, Cambridge, Massachusetts, pp. 32-470, 1982.
- [13] Kuipers, B. *Qualitative Reasoning: Modeling and Simulation with Incomplete Knowledge*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, pp. 1-2, 56-62, 1994.
- [14] Lauritzen, S.L. & D.J. Spiegelhalter. Local computations with probabilities on graphical structures and their application to expert systems. In: *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, vol. 50, pp. 157-224, 1988.
- [15] Meyer, M.A. & J.M. Booker. *Eliciting and Analyzing Expert Judgment – A Practical Guide*, Statistical Sciences Group, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, 2001.
- [16] Neapolitan, R.E. *Probabilistic Reasoning in Expert Systems - Theory and Algorithms*, John Wiley Inc., Chicago, Illinois, United States of America, pp. 64-75, 1990.
- [17] Pearl, J. Fusion, propagation and structuring in belief networks. In: *Artificial Intelligence*, vol. 29, 1986.
- [18] Pearl, J. *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference*, Morgan Kaufmann Publishers, Palo Alto, 1988.
- [19] Renooij, S. *Qualitative Approaches to Quantifying Probabilistic Networks*, PhD thesis, Institute of Information and Computing Sciences, Universiteit Utrecht, The Netherlands, 2001.
- [20] Renooij, S. & L.C. van der Gaag. From qualitative to quantitative probabilistic networks. In: *Proceedings of the Eighteenth Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*, Morgan Kaufmann, San Francisco, pp. 422-429, 2002.

- [21] Schreiber, G., H. Akkermans, A. Anjewierden, R. de Hoog, N. Shadbolt, W. Van de Velde & B. Wielinga *Knowledge Engineering and Management – The CommonKADS Methodology*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2000.
- [22] Schut, C. & B. Bredeweg. An overview of approaches to qualitative model construction. In: *The Knowledge Engineering Review*, vol. 11:1, pp. 1-25, 1996.
- [23] Wellman, M.P. Fundamental concepts of qualitative probabilistic networks. In: *Artificial Intelligence*, vol. 44, pp. 257-303, 1990.
- [24] Werff ten Bosch, J. van der & P. Kouwenhoven. *Gebruik van RAP in MV6-traject*, Resource Analysis, juli 2002.

Bijlage 1: Screenshot van het Rapid Assessment Program



In dit screenshot van het RAP is de variabele “kwaliteit (terrestrisch)” van de component “NATUUR” aangeklikt. In beeld komen nu alle pijlen, die direct dan wel indirect invloed uitoefenen op deze variabele. Alle variabelen die via deze pijlen op enigerlei wijze invloed hebben op deze variabele zijn weergegeven in witte letters met een donkere achtergrond.