

Samenvatting

Grip krijgen op socio-technische systemen met agent-gebaseerd modelleren

Wat is een geschikte modelleeraanpak voor socio-technische systemen? Het antwoord op deze vraag is van groot belang voor strategische beslissers in grootschalige systemen die gekenmerkt worden door technische complexiteit en een multi-actor karakter. Typische voorbeelden zijn de regionale, nationale, continentale en mondiale netwerken die energie, telecommunicatie- en transportdiensten leveren of industriële productieketens en netwerken. Het gedrag van zulke systemen wordt bepaald door vele actoren, waaronder toezicht-houders, eigenaren van fysieke installaties, producenten, dienstverleners en gebruikers. Elke actor opereert in een dynamische omgeving en in interactie met andere actoren die verschillende doelstellingen en waardensystemen kunnen hebben. Hoe verschillend transportinfrastructuren, energie-infrastructuren of industriële netwerken in eerste aanblik ook mogen lijken, op het socio-technische systeemniveau spelen vergelijkbare problemen die voortkomen uit de technische complexiteit van het systeem en de multi-actor complexiteit.

Welke modellen kunnen actoren in dergelijke systemen ondersteunen bij het verkennen van scenario's en hen in staat stellen te experimenteren met alternatieve handelingsstrategieën, door middel van simulaties? Zijn er simulatiemodellen die inzicht geven in de effecten van individuele acties op het geheel? Succesvolle modellen moeten zowel de fysieke als de sociale werkelijkheid van het systeem "vangen". Ze moeten gebruikers ook de mogelijkheid bieden om te experimenteren met *veranderingen* in zowel de fysieke als de sociale configuratie van het netwerk. Met andere woorden, socio-technische systemen stellen modelleurs voor een grote uitdaging.

Er zijn de nodige instrumenten beschikbaar om ofwel het fysieke ofwel het sociale netwerk te modelleren, maar socio-technische systemen vragen om een geïntegreerde modelleeraanpak die beide werelden bijeenbrengt. Dat is de ambitie van dit proefschrift. Een bijkomende uitdaging is om dit doel niet voor slechts een enkel domein, zoals energie of industrie, te bereiken maar om een modelleerinfrastructuur op te zetten die sectoroverschrijdend is en die om kan gaan met onderling verbonden systemen; denk bijvoorbeeld aan de verwevenheid van energie- en transportsystemen, of aan de verwevenheid van de telecommunicatie- en elektriciteitsinfrastructuur. Dit proefschrift biedt een geïntegreerd raamwerk voor het modelleren van socio-technische systemen. Deze aanpak helpt modelleurs bij het ontwikkelen van betere modellen om daarmee het besluitvormingsproces te ondersteunen van actoren die betrokken zijn bij het reguleren, aansturen, of gebruiken

van deze systemen.

Dit proefschrift omvat twee verhaallijnen. De eerste start met een illustratie van de problemen en uitdagingen in het modelleren van socio-technische systemen en de noodzaak van een flexibele, bottom-up wijze van modelleren. Voor dit doel is het *agent-gebaseerde* paradigma het meest veelbelovend. Het resultaat is een modelleer-raamwerk dat aan deze voorwaarden voldoet. De aanpak is toegepast op een aantal cases, waarbij elke volgende casus het generieke raamwerk verrijkt. Deze verhaallijn kan worden aangeduid als het ‘raamwerk voor agent-gebaseerde modellen van socio-technische systemen’.

De tweede verhaallijn wordt ingegeven door de behoefte van modelleers om de keuze voor het gekozen modelleerparadigma te verantwoorden, alsmede door de wetenschappelijke uitdaging om op een objectieve manier het raamwerk ontwikkeld in dit proefschrift te analyseren. Nadat een methode voor het systematisch uitvoeren van zo’n vergelijking is gepresenteerd, wordt de op agenten gebaseerde aanpak vergeleken met andere modelleerparadigma’s. De evaluatie van het raamwerk resulteert in vuistregels voor de toepasbaarheid en de bruikbaarheid. Vervolgens worden twee modellen, ontwikkeld met het raamwerk, ingezet om een probleemeigenaar te ondersteunen bij het oplossen van problemen. Deze tweede verhaallijn kan worden bestempeld als de ‘kritische evaluatie van agent-gebaseerde modellen voor socio-technische systemen’.

Raamwerk voor agent-gebaseerde modellen van socio-technische systemen

Om de socio-technische complexiteit hanteerbaar te maken voor actoren is een generiek agent-gebaseerd raamwerk ontwikkeld (Hoofdstuk 3). Het raamwerk is opgebouwd uit de volgende drie typen onderdelen:

- **Interface** tussen onderdelen van modellen, tussen modellen, tussen ontwikkelaars en tussen ontwikkelaars en probleemeigenaren.
- **Bibliotheek** van broncode die kan worden hergebruikt.
- **Procedures** die beschrijven hoe de bibliotheek en interface gebruikt worden om modellen te bouwen.

In een op agenten gebaseerd model wordt het systeem beschreven door het uit te drukken in agenten en hun gedrag, waarbij een agent een model is van een beslissing-nemende entiteit op verschillende niveaus van aggregatie, van een individu tot een collectief. Agenten worden beschouwd als software-entiteiten die autonoom zijn, kunnen reageren op de omgeving, pro-actief gedrag en sociaal gedrag kunnen vertonen. Het op agenten gebaseerde paradigma is geschikt om het sociale gedrag van entiteiten te beschrijven. Bovendien biedt het een flexibele bottom-up aanpak die nodig is om experimenten uit te voeren met veranderingen in elementen (die weer leiden tot een veranderende configuratie van het systeem) om de effecten op het globale systeemgedrag te bestuderen.

De hoeksteen van het raamwerk is een gedeelde taal die geformaliseerd is in een ontologie, hetgeen een formele specificatie van concepten is. De ontologie vormt de interface die nodig is om verschillende elementen van het systeem (zowel sociale als fysieke) samen te brengen en om verschillende modellen aan elkaar te koppelen. Naast interconnectiviteit, biedt de ontologie *interoperability*, wat betekent dat verschillende onderdelen van een systeem samen kunnen werken. De ontologie voorziet in een verzameling van

(abstracte) categorieën en eigenschappen waarmee (concrete) instanties kunnen worden gedefinieerd. De instanties zijn de systeemelementen — of de feiten — die in het model zijn opgenomen en worden opgeslagen in een gedeelde kennisbank. Bovendien worden de concepten uit de ontologie (dat wil zeggen, de woorden in de gedeelde taal) ook gebruikt om het gedrag van agenten te definiëren. Tenslotte is een gemeenschappelijke taal onontbeerlijk voor betekenisvolle communicatie tussen inhoudsdeskundigen uit verschillende disciplines.

Het raamwerk kan helpen bij het opzetten van nieuwe modellen van socio-technische systemen door het volgen van een aantal modelleerstappen en, waar mogelijk, hergebruik van reeds bestaande bouwstenen (bv. feiten, procedures, agenten of technologieën) uit modellen die eerder zijn ontwikkeld. Als nieuwe elementen zijn gemaakt voor een specifieke studie kunnen ze vervolgens worden teruggevoerd in het gedeelde raamwerk, met als resultaat dat ze beschikbaar komen voor hergebruik. Een basisverzameling met definities van categorieën is ontwikkeld voor een aantal initiële cases en verfijnd door verdere toepassingen.

De aanpak die in dit proefschrift wordt gepresenteerd is toegepast op een aantal case-study's van socio-technische systemen (Hoofdstuk 4). Toepassingen zijn onder andere een multi-modale hub voor vrachttransport, een productieketen van een olieraffinaderij en van een chocoladeproducent. Met een beschrijving van de ontwikkeling van die modellen worden de modelbouwprocedures gedemonstreerd en wordt getoond hoe het raamwerk modelleers ondersteunt. Deze procedures behelzen de conceptualisatie van het systeem door agenten en fysieke entiteiten te definiëren, het verfijnen van de generieke ontologie met probleem-specifieke concepten, het toevoegen van concrete instanties en het implementeren van het gedrag van de agenten. Vervolgens is aangetoond dat deze procedures door andere modelleers toepasbaar zijn in een verscheidenheid aan problemen in diverse infrastructuurdomeinen.

De ontwikkeling van het raamwerk over de tijd, door cycli van toepassing en verfijning alsmede door bijdragen van vele gebruikers, is goed gedocumenteerd en het ontwerptraject zelf is bestudeerd en geanalyseerd (Hoofdstuk 5). De compleetheid, correctheid en toepasbaarheid van het raamwerk zijn getest. De conclusie is dat de ontologie compleet is voor het bestek waarvoor zij is gedefinieerd en eenvoudig kan worden uitgebreid voor nieuwe problemen. Na de initiële ontwikkelingsfase zijn geen van de voornaamste concepten veranderd of vervangen hetgeen, samen met een wijdverspreid gebruik door meerdere modelleers, aangeeft dat de ontologie adequaat is. Tenslotte is aangetoond dat door hergebruik van instanties in de gedeelde kennisbank, alsmede de broncode van modellen, het oplossen van nieuwe problemen gebruikmakend van het raamwerk minder tijdrovend is. Na de aanloopkosten van het ontwikkelen van de eerste generaties modellen voor de initiële cases, kunnen toepassingen voor nieuwe cases steeds efficiënter worden gerealiseerd.

Kritische evaluatie van agent-gebaseerde modellen voor socio-technische systemen

Er is behoefte aan een kritische evaluatie van de voor- en nadelen van het raamwerk en een gedetailleerde vergelijking met andere modelleerparadigma's. Het vergelijken van modelleerparadigma's op basis van slechts de conceptuele modelspecificaties is niet voldoende; in plaats daarvan zijn een goed-gedefinieerd proces voor benchmarken alsook het

uitvoeren van experimenten noodzakelijk. Door het bouwen van verschillende modellen en te analyseren hoe ze zijn ontwikkeld en hoe ze kunnen worden uitgebreid, kan een goed-gefundeerde verantwoording van de keuze voor een modelleerparadigma gemaakt worden, en kunnen aanbevelingen en vuistregels worden opgesteld over welk paradigma geschikter is voor welk probleem.

Een van de grootste uitdagingen in het vergelijken van modelleerparadigma's ligt in de definitie van wat elk van de paradigma's in de studie omvat (Hoofdstuk 2). Een onderscheid tussen agent-gebaseerde modellen en op stelsels vergelijkingen gebaseerde modellen, zoals gevonden in de literatuur, gaat voorbij aan het feit dat beide *labels* op verschillende manieren kunnen worden geïnterpreteerd. Het onderscheid is niet zwart-wit; veeleer is er sprake van een continu spectrum in de modelleerruimte. Er zijn twee assen waarop modellen kunnen verschillen: de *modelementen* as en de *systeembeschrijvings-elementen* as. De eerste specificiert *wat* is gemodelleerd en wat de bestanddelen van het model zijn, terwijl de tweede specificiert *hoe* de structuur en het gedrag formeel zijn beschreven. De bestanddelen variëren van individuen (dat wil zeggen, beslissende entiteiten) tot op systeemniveau waarneembare zaken. De elementen die het systeem beschrijven bevinden zich ergens op de as tussen puur gebruik van wiskundige vergelijkingen en het uitdrukken van gedrag in algoritmes. Deze nuance maakt het mogelijk dat de conclusies van het benchmarken kunnen worden gegeneraliseerd van de specifieke modellen die worden vergeleken tot de voor- en nadelen van modelleerparadigma's.

Een algemeen schema om modelleerparadigma's te vergelijken wordt in dit proefschrift voorgesteld (Hoofdstuk 6), met speciale nadruk op het identificeren van wat er wordt vergeleken, de evaluatie van vergelijkbaarheid van studieobjecten en het beschrijven van goed-gestructureerde experimenten. Op deze manier kunnen eerlijke en gebalanceerde conclusies worden getrokken. De aanpak is daarna gebruikt om verschillende modellen van de productieketen van een olieraffinaderij te vergelijken. Elk model is ontwikkeld gebruikmakend van een ander modelleerparadigma: het ene model gebruikt een numeriek softwarepakket en het andere een agent-gebaseerd platform. Aangetoond wordt dat de beide modelleerparadigma's en hun — zeer verschillende — modelleergereedschap succesvol gebruikt kunnen worden om een model van hetzelfde systeem te maken met vergelijkbare resultaten. Door het analyseren van de inspanning benodigd voor het uitbreiden van de modellen om nieuwe scenario's te kunnen uitproberen worden de sterke en zwakke punten van beide paradigma's geïdentificeerd binnen de context van het modelleren van productieketens. Het gemak van het uitdrukken van het probleem, de uitbreidbaarheid en de herbruikbaarheid van (onderdelen van) het simulatiemodel zijn daarbij de prestatie-indicatoren.

De resultaten van het benchmarken kunnen, binnen de context waarin de vergelijking is uitgevoerd, worden uitgebreid van de specifieke modellen tot de paradigma's. Productieprocessen en de technologische aspecten worden goed gekarakteriseerd door wiskundige vergelijkingen, terwijl de besluitvorming door actoren slechts met algoritmes kan worden gevat. Het complete systeem kan echter volledig worden uitgedrukt door middel van beide paradigma's die werden vergeleken. Gesteld kan worden dat modellen gebaseerd op stelsels van vergelijkingen, in het algemeen, meer geschikt zijn om de fysieke elementen in het systeem te beschrijven terwijl de (dynamische) interactie tussen de actoren het beste kan worden gerepresenteerd door agent-gebaseerde modellen. Voor het uitbreiden of aanpassen van modellen geldt de algemene regel dat het veranderen van indirecte eigenschappen in het model meer moeite kost. Dit betekent dat voor het agent-

gebaseerde model, waarin de inrichting van het systeem dynamisch is en niet vastligt in de structuur van het model, het gemakkelijk is om nieuwe actoren, nieuwe fysieke elementen en als consequentie nieuwe mogelijke relaties toe te voegen. Echter, veranderingen in de manier waarop het technische systeem zelf werkt worden gemakkelijker doorgevoerd door aanpassing van wiskundige vergelijkingen. Als een nieuw model wordt gebouwd gebaseerd op eerder werk, kan voor het wiskundige model de conceptualisatie worden hergebruikt maar geen enkele van de vergelijkingen zelf. In het geval van het bottom-up agent-gebaseerde model kunnen ook specifieke bouwstenen worden hergebruikt of uitgebreid. Ten slotte, bij het uitleggen van het model en de modelresultaten aan belanghebbenden biedt het agent-paradigma een natuurlijke representatie van het besluitvormingsproces alsook van de interacties tussen de entiteiten in het systeem. Een model op basis van wiskundige vergelijkingen biedt inzicht in de technische processen en heeft daarmee een voorsprong voor een technisch deskundig publiek.

Na de benchmarking en de daaruit volgende lessen over de voordelen en gebreken van agent-gebaseerd modelleren is gedemonstreerd hoe simulatiemodellen ontwikkeld met het raamwerk uit dit proefschrift een probleemeigenaar kunnen ondersteunen door het oplossen van een specifiek multi-actor, multi-criteria en multi-level beslissingsprobleem (Hoofdstuk 7). Met een beslismodel, geformuleerd voor een specifiek doel en een specifieke vraag, kan een probleem worden opgelost door middel van verschillende zoekstrategieën en gebruikmakend van een simulatiemodel van het systeem.

Om te laten zien hoe agent-gebaseerde modellen kunnen worden toegepast als beslissingsondersteunend systeem worden twee illustratieve toepassingen gepresenteerd, beiden door echte problemen geïnspireerd. De eerste gebruikt het agent-gebaseerde model van een productieketen van een olieraffinaderij en de tweede het model van de multi-modale hub voor vrachtransport. Er is aangetoond hoe een zoekstrategie uit de beslis-kunde, zoals de Nelder-Mead optimalisatiemethode, kan worden toegepast op een beslissingsprobleem betreffende verstoringen in de productieketen van een olieraffinaderij. In een andere studie wordt getoond hoe verschillende belastingmaatregelen kunnen helpen om actoren met verschillende belangen te bewegen tot instemming met een bepaalde locatie voor een nieuwe multi-modale transporthub. Zodoende is aangetoond dat agent-gebaseerde modellen ontwikkeld met behulp van het in dit proefschrift beschreven raamwerk gebruikt kunnen worden om beslissers te ondersteunen.

Conclusies

Het raamwerk gepresenteerd in dit proefschrift is een adequate generieke modelleeraanpak voor socio-technische systemen. Agent-gebaseerde modellen zijn in het bijzonder geschikt om te experimenteren met verschillende scenario's en om *wat als* vragen aan te pakken. Dit biedt waardevolle ondersteuning aan beslissers om adequaat te reageren op bijvoorbeeld verstoringen in het fysieke systeem, nieuwe wetgeving of nieuwe regulering.

De modellen die in het kader van dit proefschrift gebouwd en beproefd zijn, zijn ontwikkeld op een bottom-up wijze, wat het relatief gemakkelijk maakt om sociale of de fysieke configuratie van het gemodelleerde systeem te veranderen. Zo kunnen er nieuwe actoren aan het systeem worden toegevoegd (bv. andere gebruikers van de transporthub of nieuwe leveranciers met andere prijzen en levertijden voor de olieraffinaderij) of kan de fysieke inrichting worden aangepast (bv. nieuwe transportverbindingen in een vrachtsysteem of extra opslagtanks voor de raffinaderij). Het raamwerk is vanaf het begin generiek

opgezet. Dat maakt het mogelijk om een verscheidenheid aan infrastructuren en andere socio-technische systemen te modelleren, en lessen uit het ene domein te vertalen naar andere domeinen. Bij het analyseren van over sectorgrenzen heen verbonden netwerken kunnen (delen van) modellen van verschillende infrastructuursystemen aan elkaar worden gekoppeld.

Het doorontwikkelen van het raamwerk is een iteratief proces door voortdurend (her)gebruik; nieuwe modellers passen de aanpak toe op nieuwe cases en problemen en dragen op die manier bij aan het gedeelde raamwerk. Dit is een van de belangrijkste winstpunten van de agent-gebaseerde aanpak: hoe meer het raamwerk wordt gebruikt, hoe meer er kan worden hergebruikt. Bij deze is de lezer uitgenodigd om de uitdagingen voor de infrastructuursystemen van de toekomst in een socio-technisch en agent-gebaseerd perspectief te plaatsen en om de systeemelementen te representeren in de hier gepresenteerde ontologie. De modelleeraanpak van dit proefschrift kan zo worden gebruikt om effectief betere modellen te maken en om het modellerproces efficiënter te maken.

Koen Haziël van Dam