

A satellite image of a hurricane, showing a distinct eye and spiral cloud bands over a dark blue ocean. The hurricane is positioned on the left side of the frame, with its eye clearly visible.

BTO 2020.123 | Januari 2021

**Agentgebaseerde
modellen voor de
watervraag – een
verkenning**

Colofon

Agentgebaseerde modellen voor de watervraag – een verkenning

BTO 2020.123 | Januari 2021

Opdrachtnummer

402045/166

Projectmanager

Nellie Slaats

Opdrachtgever

Verkenkend Onderzoek

Auteur(s)

dr.ir. E.J.M. (Mirjam) Blokker, I. (Ina) Vertommen MSc,
dr. C. (Claudia) Quintiliani, B. (Bram) Hillebrand MSc.

Kwaliteitsborger(s)

dr. P. (Peter) van Thienen

Verzonden naar

Themagroep Waterdistributie

Dit rapport is niet openbaar en slechts verstrekt aan de opdrachtgevers van het adviesproject. Eventuele verspreiding daarbuiten vindt alleen plaats door de opdrachtgever zelf.

Keywords

watervraag, streefstructuren, agent-gebaseerde modellen

Jaar van publicatie
2021

Meer informatie
MSc Ina Vertommen
T 030-6069739
E ina.vertommen@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511
F +31 (0)30 60 61 165
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl

KWR

Januari 2021 ©

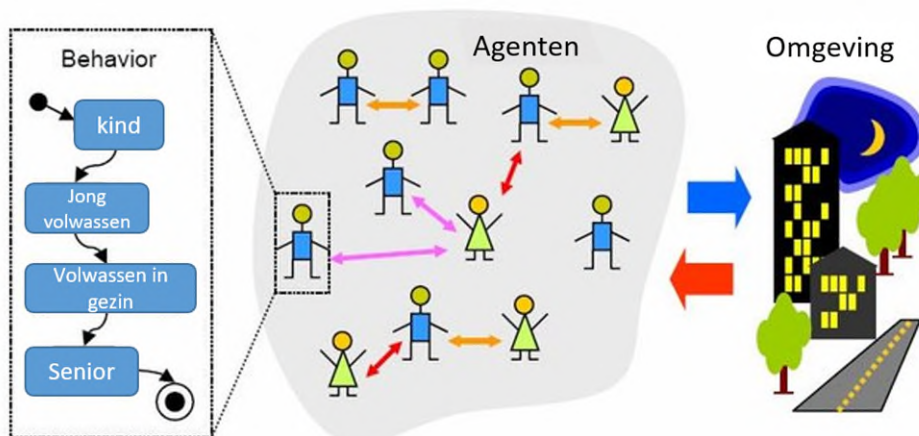
Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden vervaelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevens bestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Managementsamenvatting

Agentgebaseerd model mogelijk toepasbaar om de watervraag onder verschillende omstandigheden door de tijd heen te simuleren

Auteur(s) dr.ir. Mirjam Blokker, Ina Vertommen MSc, dr. Claudia Quintiliani

Er bestaat voldoende toegang tot alle ingrediënten die nodig zijn om een agentgebaseerd model (ABM) te ontwikkelen dat de watervraag door de tijd heen kan simuleren. Dit blijkt uit een verkennend onderzoek, bestaande uit een literatuurstudie en een praktijkcasus. Zo'n ABM is vervolgens inzetbaar voor het ontwerp van de drinkwaterinfrastructuur op basis van de verwachte drinkwatervraag, waarbij effecten van beleid, klimaatverandering en bijvoorbeeld meer thuiswerken in samenhang kunnen worden meegenomen. Voor het ontwerp van een toekomstbestendig leidingnet is zicht nodig op de ontwikkeling van de drinkwatervraag. Er is behoefte aan een methode om scenario's voor de drinkwatervraag door te rekenen, rekening houdend met sociologische, economische, politieke, technologische, ecologische en demografische ontwikkelingen (SEPTED). Agentgebaseerde modellen (ABM) worden typisch voor dit soort vraagstukken ingezet en zouden hier wellicht ook uitkomst kunnen bieden.



*Agentgebaseerde modellen (ABM) beschrijven het gedrag van agenten en de interactie met elkaar en hun omgeving (naar: Metcalf, S., *Simulating the Social Dynamics of Spatial Disparity through Neighborhood Network Evolution*. 2007)*

Belang: toekomstige watervraag grootste onzekerheidsfactor in ontwerp vraagstukken

Aangezien de drinkwaterinfrastructuur voor de lange termijn wordt ontworpen, moet rekening worden gehouden met toekomstige ontwikkelingen. Hierin is de drinkwatervraag de belangrijkste grote onbekende. Behalve de totale drinkwatervraag gaat het ook om variatie door de tijd heen (dag, week, jaar, 10 jaar) en over het voorzieningsgebied. Daarnaast ontwikkelt de drinkwatervraag zich niet autonoom maar wordt deze door allerlei ontwikkelingen beïnvloed. We onderscheiden sociologische, economische, politieke, technologische, ecologische en demografische ontwikkelingen (SEPTED); bijvoorbeeld (S) de trend om dagelijks te douchen,

(E) vaker thuiswerken waardoor het waterverbruik in plaats en tijd verschuift, (P) beleid dat bijvoorbeeld de drinkwatervraag probeert te beperken door het subsidiëren van regentonnen, (T) de ontwikkeling van zuinige wasmachines, (E) klimaatverandering waardoor tuinen vaker worden gespreid en (D) relatieve toename van het aantal senioren. Omdat zo veel factoren van belang zijn, is onderzocht of een agentgebaseerd model geschikt is voor het in beeld brengen van toekomstige drinkwatervraagscenario's. Agentgebaseerde modellen (ABMs, van het Engelse Agent Based Model) werken "bottom-up", dat wil zeggen: aan de hand van het gedrag van en interacties tussen individuele agenten op lokaal niveau (micro) wordt het gedrag op systeemniveau (macro) bestudeerd.

Aanpak: literatuurstudie en studentenopdracht

In een verkennend onderzoek is op basis van de beschikbare literatuur een beeld gevormd van wat een ABM voor de watervraag inhoudt, welke data hiervoor nodig zijn en welke modellen beschikbaar zijn. Het door KWR ontwikkelde waterverbruiksmodel SIMDEUM diende als ankerpunt om veel van de literatuur op waarde te kunnen schatten. Ter illustratie bouwden studenten van de TU Delft een relatief eenvoudig ABM voor het inschatten van de dagelijkse watervraag nu en gedurende de komende 50 jaar, onder invloed van tijdsbestedingspatronen van mensen (thuis, op het werk of school, en vrijetijdsbesteding).

Resultaten: een conceptueel ontwerp voor een ABM voor de watervraag

Dat een ABM voor de watervraag niet eenvoudig is te maken, blijkt zowel uit de literatuur als uit de praktijkcase van de studenten. Ook bestaat er nog geen model dat zo gebruikt kan worden. Wel beschikt KWR over alle benodigde ingrediënten om tot zo'n model te komen: detailkennis van waterverbruik, kennis van effectieve beleidsstrategieën en communicatie met drinkwaterklanten, kennis over het opnemen van deze strategieën in een ABM, en toegang tot geografische data (bijvoorbeeld demografie en mobiliteit). Een conceptueel ontwerp op basis van verschillende submodules is opgesteld, waarbij de details in een vervolgproject moeten worden uitgewerkt.

Toepassing: ABM voor de watervraag is toepasbaar maar moet nog worden uitgebouwd

Een ABM voor de drinkwatervraag met verschillende SEPTED-componenten is geschikt om de drinkwaterinfrastructuur te ontwerpen. Hierin kunnen effecten van beleid, klimaatverandering en bijvoorbeeld meer thuiswerken samenhangend worden meegenomen. SIMDEUM is bijvoorbeeld minder geschikt om beleid en stedelijke veranderingen te vertalen naar veranderingen in de hoogte en de locatie van de drinkwatervraag in een voorzieningsgebied.

Een ABM voor de drinkwatervraag kan veel opleveren maar kost ook veel inspanning om te realiseren. Idealiter zouden elders ontwikkelde submodules worden ingeplugd die buiten de expertise van KWR liggen, zoals een module voor demografische ontwikkelingen. Mogelijke samenwerkingspartners moeten nog gezocht worden.

Het Rapport

Dit onderzoek is beschreven in het rapport Agentgebaseerde modellen voor de watervraag - een verkenning (BTO-2020.123).

Jaar van publicatie
2021

Meer informatie
MSc Ina Vertommen
T 030-6069739
E ina.vertommen@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511
F +31 (0)30 60 61 165
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl

KWR

Januari 2021 ©

Alle rechten voorbehouden aan KWR. Niets uit deze uitgave mag - zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van KWR - worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier.

Keywords

drinkwatervraag, agentgebaseerd model, scenariostudie

Inhoud

1	Aanleiding en doel	3
1.1	Inzicht in toekomstig waterverbruik	3
1.2	Kennismaking met agentgebaseerde modellen	3
1.3	Doel	4
1.4	Aanpak en leeswijzer	5
2	Overzicht ABM – literatuuronderzoek	6
2.1	Definitie	6
2.2	Toepassingen	7
2.3	Nederlandse toepassingen en data	13
2.4	ABM platforms	13
2.5	Agentgebaseerde modellen	15
3	SIMDEUM – een model voor de voorspelling van de watervraag	16
3.1	Voorspellen toekomstige watervraag	16
3.2	Introductie SIMDEUM	16
3.3	Toepassingen en beperkingen van SIMDEUM	19
3.4	SIMDEUM in relatie tot ABM	22
4	ABM voor toekomstige watervraag t.b.v. ontwerp robuuste streefstructuur	26
4.1	De beoogde toepassing	26
4.2	TUD aanpak als illustratie	27
4.3	Benodigde modellen	31
4.4	Benodigde data	33
4.5	Onzekerheden	34
4.6	Voor- en nadelen ABM in de beoogde toepassing	35
5	Discussie	37
6	Conceptueel ontwerp	39
6.1	Inleiding	39
6.2	Agenten	39
6.3	Structuur: XLMR-kader	40
7	Conclusies en aanbevelingen	45
8	Referentielijst	46
I	Opdracht TU Delft	54
II	Submodellen voor externe factoren	56

1 Aanleiding en doel

1.1 Inzicht in toekomstig waterverbruik

Een van de grootste en invloedrijkste onzekerheden bij het ontwerp van streefstructuren is de toekomstige watervraag over de loop van de levensduur van de te ontwerpen structuur. In het huidige ontwerpproces (zowel in de praktijk als in onderzoek) wordt beperkt, of met onvoldoende detail, aandacht gegeven aan de onzekerheid rondom de toekomstige watervraag.

In het BTO-project “Toekomstbestendig ontwerp van streefstructuren” (Vertommen et al. 2020) is een benadering uitgewerkt voor het robuust en toekomstbestendig optimaal ontwerp van streefstructuren, d.w.z. waarin de onzekerheid rondom de watervraag expliciet wordt meegenomen in het ontwerpproces. Er is een methodiek ontwikkeld om een streefstructuur te ontwerpen die verschillende watervraagscenario's expliciet in aanmerking neemt en goed presteert voor al deze scenario's. In het onderzoek zijn deze watervraagscenario's gebaseerd op metingen van waterverbruik van de afgelopen jaren. Echter is het van belang om in het ontwerpproces goed onderbouwde en concrete scenario's voor de toekomst in aanmerking te nemen. Dit vereist kennis over de ontwikkeling van de watervraag per persoon, maar ook over de ontwikkeling van steden en gebieden in zijn geheel (bijv. waar mensen gaan werken en wonen, waar bedrijven zich gaan vestigen). Op voorhand is niet altijd duidelijk of de maatgevende situatie voor het ontwerp zich aan het begin of aan het einde van de levensduur van een leidingnet zal voordoen. Het is dan verstandig om scenario's over de tijd door te rekenen.

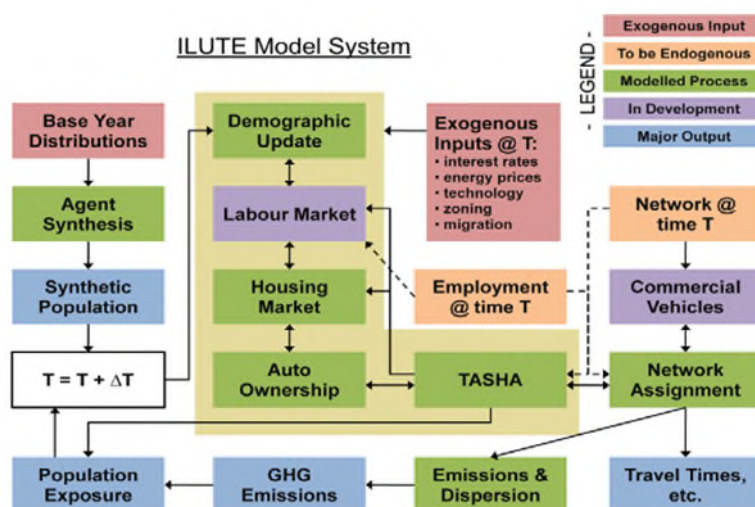
1.2 Kennismaking met agentgebaseerde modellen

In september 2019 heeft professor Eric Miller (universiteit van Toronto) een bezoek gebracht aan KWR. Hij heeft (met studenten en medewerkers) het model ILUTE ontwikkeld (Salvini en Miller 2005; Miller et al. 2011). ILUTE (Integrated Land Use, Transportation, Environment) kan de evolutie van een geïntegreerd stedelijk systeem over een langere periode simuleren. Dit model is bedoeld als vervanging van conventionele modellen voor de analyse van een breed scala aan transport-, huisvestings- en ander stedelijk beleid. Het model is eenvoudig gestart, waarna in 20 jaar ontwikkeltijd steeds meer is toegevoegd. ILUTE heeft met 20 jaar historische data en validatieruns een behoorlijk volwassenheidsniveau bereikt. De validatie was tot nu toe gericht op ILUTE's simulatie van de regionale huizenmarkt en demografische ontwikkeling. De validatie laat ook zien dat ILUTE zich in een zodanig ver gevorderd stadium bevindt dat het kan dienen als basis voor de simulatie van veel meer verschillende soorten stedelijke processen.

Zij kunnen bijvoorbeeld verkeersstromen en de capaciteit van het wegennet over de tijd modelleren. ILUTE is een agentgebaseerd model (ABM, agent based model), waarin de “agenten” virtuele mensen zijn die worden geboren, naar school gaan, werken (en van werkgever wisselen), boodschappen doen, familie bezoeken, trouwen / samenwonen, verhuizen en dood gaan. Iedere dag besluiten ze ook of ze de auto, trein, bus, fiets of een ander vervoermiddel gebruiken voor hun verplaatsingen. Dit doen ze “in overleg” met hun gezinsleden: bijvoorbeeld degene die het meeste wint in reistijd door de auto te nemen mag de auto vandaag gebruiken; de overige gezinsleden moeten een ander vervoermiddel kiezen. ILUTE modelleert op verschillende tijdschalen, namelijk over een dag waarbij de dagelijkse verplaatsingen worden gesimuleerd, maar ook over jaren waarin gesimuleerd wordt dat mensen verhuizen of kinderen krijgen. Iedere agent is een individu met ouders, en als het model lang genoeg draait weet het model dus ook waar de ouders wonen als er familiebezoek wordt gesimuleerd. Op deze manier kan de filevorming of overvol openbaar vervoer voor het komende jaar en over 20 jaar in kaart worden gebracht, en kunnen oplossingsrichtingen en investeringsplannen voor vervoer worden getoetst op effectiviteit. Figuur 1 toont

de verschillende modules en processen. De module “commercial vehicles” moet nog worden ontwikkeld; deze module gaat bijv. over de Uber taxi’s, die vooral in Noord America een belangrijk aandeel hebben in transport van mensen.

ABM kent zo zijn eigen terminologie. In het volgende hoofdstuk wordt daar dieper op ingegaan, maar hier wordt als voorbeeld ILUTE ook in deze termen geïntroduceerd. ILUTE is een object- en agentgebaseerd microsimulatiemodelleringsysteem, waarbij de systeemstatus per tijdstap evolueert van een initieel basisscenario naar een toekomstige eindtoestand. In ILUTE wordt de systeemtoestand gedefinieerd in termen van individuele personen, huishoudens, wooneenheden, bedrijven, enz. (de agenten) die gezamenlijk de stedelijke regio definiëren. ILUTE ontwikkelt de eigenschappen van deze agenten door hun gedrag (veranderingen in woonlocatie, arbeidsparticipatie, activiteit / reizen, enz.) in de tijd te simuleren.



Figuur 1. High-level flowchart van de ILUTE processen (Chingcuanco en Miller 2012)

Wij waren zeer onder de indruk van de mogelijkheden, en wilden graag onderzoeken of een dergelijke aanpak ook interessant zou zijn voor toepassingen in drinkwaterdistributie. Wij hebben daarom een verkennend onderzoek uitgevoerd.

1.3 Doel

Om recht te doen aan de aard van een verkennend onderzoek is besloten op de mogelijke toepassing van ABM in drinkwaterdistributie toe te spitsen op robuust ontwerpen van streefstructuren m.b.t. de toekomstige watervraag. Naar verwachting kan een dergelijke model inzicht leveren in de richting en grootte van de verandering van de drinkwatervraag over de tijd, de onzekerheid in deze waarden, en/of dat de grootse verandering aan het begin of aan het eind van de levensduur van een leidingnet te verwachten is. Dergelijk gedrag kan regio- (en/of wijk)-afhankelijk zijn. Een agent-gebaseerd model kan zowel deze verschillen als de samenhang tussen regio's en wijken tegelijk modelleren: bijvoorbeeld waar de watervraag in regio A toeneemt, kan dat in regio B afnemen (als een persoon in A woont, kan die niet in B wonen), of in wijk C zijn early-adopters terwijl dat in wijk D anders is.

Agent-gebaseerde modellen zijn een nieuwe methode voor KWR (specifiek op het vlak distributie). Er leven nog heel veel vragen m.b.t. de toepassingsmogelijkheden voor drinkwaterdistributie, en of deze methode geschikt is voor het voorspellen en modelleren van de toekomstige watervraag. Bijvoorbeeld, welke data is nodig en staat die ons ter beschikking, is het mogelijk om de onzekerheden in het model acceptabel te houden (of blijven de

onzekerheden zo groot dat er geen bruikbaar model uitkomt), welk detailniveau is nodig en zijn daar modellen voor beschikbaar, verhoudt de benodigde inspanning zich tot de opbrengsten.

1.4 Aanpak en leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt toegelicht wat een ABM is en wordt een overzicht gegeven op basis van de literatuur van toepassingen. Gekeken wordt naar werkvelden, soorten modellen en soorten data, en naar (software) platforms die beschikbaar zijn.

Hoofdstuk 3 beschrijft in hoeverre SIMDEUM (als ons huidige model voor de voorspelling van de watervraag) eigenlijk een ABM is, of in hoeverre onze kennis van SIMDEUM kan bijdragen aan het opzetten van ABM voor de drinkwatervraag.

In hoofdstuk 4 zoomen we in op een ABM voor de toekomstige drinkwatervraag. Op basis van de literatuur, en de eisen die de toepassing stelt wordt toegewerkt naar een conclusie en een conceptueel ontwerp voor een dergelijk model. Daarnaast zijn twee studenten van de TU Delft aan de slag gegaan om een eenvoudige versie van een dergelijk ABM vorm te geven. Ook daarvan is al veel geleerd.

Het rapport eindigt met een discussie m.b.t. verdere toepassingen, een conceptueel ontwerp en conclusies en aanbevelingen.

2 Overzicht ABM – literatuuronderzoek

2.1 Definitie

Microsimulatie, of agent-gebaseerde modellen, modelleren het gedrag op het niveau van de individuen die beslissingen nemen (een persoon, een gezin, een bedrijf, enz.); het niveau waarop allerlei factoren die de beslissingen beïnvloeden het beste kunnen worden ingebouwd (bijv. persoon A maakt een bepaalde keuze gezien de randvoorwaarden en mogelijkheden die zich voordoen). Uit de wisselwerking tussen alle individuen resulteert het gedrag op macroniveau, d.w.z. van het systeem als een geheel (gebied/stad). Agent-gebaseerde modellen kennen reeds meerdere toepassingen (zie verderop in dit hoofdstuk). In deze paragraaf wordt een ABM toegelicht aan de hand van ILUTE.

Agent-gebaseerde modellen (ABMs, van het Engelse *Agent Based Model*) zijn “bottom-up” modellen waarin het gedrag op systeemniveau (macro) wordt bestudeerd aan de hand van het gedrag van en interacties tussen individuele agenten op lokaalniveau (micro). ABM combineert elementen van speltheorie, complexe systemen, computationele (numerieke) sociologie, multi-agent systemen en evolutionaire algoritmes. Het modelleren gebeurt door middel van computersimulaties, waarin aan de hand van specifieke regels, een aantal ‘agenten’ beslissingen nemen en op elkaar reageren (Ferber 1999). Uit deze interacties resulteert het gedrag van het systeem als geheel. Agenten kunnen indirect op elkaar reageren via een gedeelde omgeving en/of direct via markten, sociale netwerken en/of instellingen. Daarnaast reageren agenten niet enkel op elkaar, maar zijn ze ook in staat tot interactie met de omgeving, d.w.z., met de virtuele wereld die wordt weergegeven door een of andere wiskundige structuur. Omdat het gedrag van het systeem in het geheel afhankelijk is van het gedrag en interactie tussen agenten en de omgeving, is het mogelijk om de invloed van individuele keuzes en acties op het systeem, op een expliciete manier te verwerken.

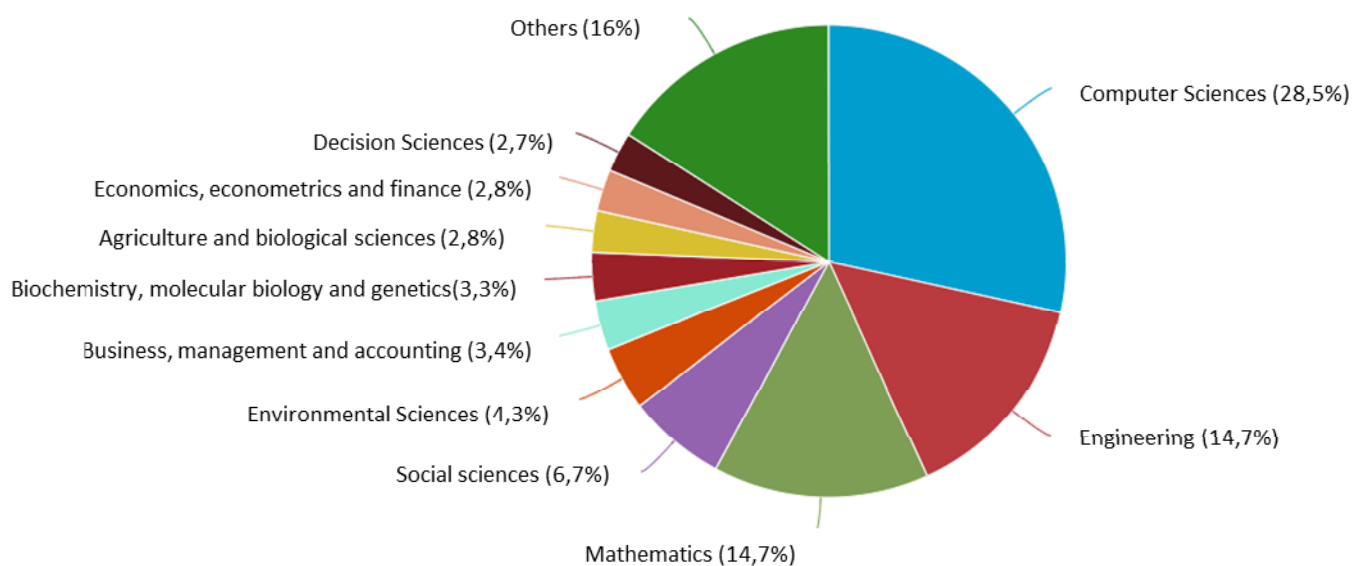
Een ABM wordt gekenmerkt door drie belangrijke bouwstenen: een set van agenten, een interactiemodule en een omgeving. Uit deze bouwstenen wordt duidelijk dat het gedrag van agenten wordt beïnvloed door eigen (persoonlijke) kenmerken, andere agenten, de omgeving en voorkomende situaties. Tabel 1 licht deze toe aan de hand van een model voor verkeersstromen.

Tabel 1. Bouwstenen van een ABM.

Bouwstenen	Toelichting
Agenten	Uit een analogie met speltheorie, kunnen agenten gezien worden als spelers in een meerpersoonsspel. Een agent kan zowel een individu (bijv. een scholier of een aannemer die aan de weg werkt) als collectieve entiteiten (bijv. een overheid die oproept tot zoveel mogelijk thuis werken i.v.m. Corona) vertegenwoordigen, en wordt gespecificeerd door een vector van attributen en gedrag. Om een model te kunnen initiëren, wordt (per agent) aan elk attribuut een waarde toegekend (bijv. de leeftijd van een persoon, en zijn woonadres en werkadres). Deze waardes kunnen in de loop van de tijd veranderen. De attribuutwaarden van een agent op een bepaald moment worden beschouwd als de agentstatus op dat moment (bijv. zijn locatie). Het gedrag van de agenten wordt gedefinieerd door gedragsregels, die afhankelijk zijn van de momentane status en geschiedenis van de agent (bijv. iemand verplaatst zich van woning naar werk totdat de pensioengerechtigde leeftijd is bereikt). Gedragsregels kunnen ook rekening houden met het potentieel gedrag van andere agenten (bijv. als alle jonge kinderen van een agent niet naar school gaan zal de agent zelf of zijn partner ook thuis moeten blijven).
Interactie-module	In de interactiemodule wordt beschreven welke agenten in relatie staan met elkaar en hoe deze relatie(s) vorm worden gegeven. Deze aspecten worden vastgelegd door het specificeren van een 'verbondenheid' (bijv. een huishouden, familie of collega). Verbondenheid kan op verschillende manieren worden gedefinieerd. Zo is het mogelijk om een netwerkstructuur te specificeren, waarbij knooppunten agenten zijn en links relaties, of om agenten te lokaliseren in een omgeving, zoals een ruimtelijk raster of een GIS-kaart, en vervolgens te definiëren op welke afstand van elkaar agenten met elkaar zijn verbonden.
Omgeving	De specificatie van een omgeving onderstreept het feit dat in een ABM meestal een van de attributen van een agent de locatie is. De locatie kan een dynamisch attribuut zijn dat in de loop van de tijd verandert. Hierdoor kunnen agenten niet alleen binnen een omgeving, maar ook met de omgeving interacteren. Om bijv. de aanpassing van een agent na een verstoring in de omgeving te voorspellen (bijv. een evacuatie bij een crisisscenario, of een verkeersomleiding tijdens werkzaamheden) is de interactie tussen agenten (in dit geval mensen) met de omgeving essentieel. De omgevingscomponent in ABM, maakt een nauwkeurigere simulatie van dit complexe systeem mogelijk.

2.2 Toepassingen

Een ABM biedt de mogelijkheid om te simuleren en begrijpen wat er in een systeem gebeurt onder verschillende scenario's. Bovendien representeert het als model vaak een reëel bestaand fenomeen (natuurlijk, fysiek of sociaal). Om die redenen heeft deze benadering tal van toepassingen gevonden in een brede waaier van domeinen. Vooral op onderzoeksgebieden waar menselijk gedrag en besluitvorming belangrijk zijn en significante verschillen in het functioneren van het systeem kunnen veroorzaken, biedt ABM een interessante modelleringstechniek. Figuur 2 geeft een overzicht van vakgebieden waarin ABM wordt toegepast (beoordeeld aan de hand van publicaties over ABM per vakgebied, waarin de term agent based model ook is gebruikt). Tabel 2 bevat enkele voorbeelden van deze toepassingen plus bijhorende referenties. Voor een gedetailleerd overzicht van toepassingsmogelijkheden van ABM's wordt de lezer verwezen naar Gilbert (2008) en Baliotti en Helbing (2011).



Figuur 2. Percentage publicaties over ABM voor verschillende vakgebieden. Bron: Scopus, zoekterm: “agent based models”.

De publicaties in informatica (“computer sciences”) en wiskunde (“mathematics”) zijn vooral gericht op de ontwikkeling van ABM en computerspellen. Tabel 2 focust op andersoortige toepassingen, zoals bijv. in de sociale wetenschappen (“social sciences”).

Tabel 2 Voorbeelden van toepassingen en bijhorende referenties.

Toepassing	Referenties
Agent-based land-use models (ABLUMs)	De invloed van menselijke besluitvorming op landgebruik wordt in beeld gebracht door rekening te houden met sociale interactie, aanpassing en besluitvorming op verschillende niveaus. Matthews et al. (2007) geven een overzicht. Stephen Lansing en N. Kremer (1993) waren een van de eersten toen ze irrigatiesystemen in Indonesië modelleerden. Recenter zijn er meer modellen ontwikkeld (Parker et al. 2003; Bousquet en Le Page 2004; Brown et al. 2004; Hare en Deadman 2004; Monticino et al. 2007)
Adoptie van (duurzame) innovaties:	
Energiezuinig gedrag en technologieën	Faber et al. (2010) onderzochten ABM voor de verspreiding van het gebruik van binnenlandse microwarmtekrachtkoppeling (micro-WKK) in Nederland, waarbij ook het gebruik van verschillende subsidieregelingen is onderzocht. Andere referenties zijn: (Ernst en Briegel 2017; Krebs en Ernst 2017).
Water-besparende technologieën	House-Peters en Chang (2011) geven een overzicht van het modelleren van de drinkwatervraag tussen 1980 en 2010, inclusief geïntegreerde dynamische modellen zoals ABM's. In tegenstelling tot conventionele statische tijdreeksen en econometrische modellen, modelleren ABM's beslissingen en gedragingen m.b.t. waterverbruik, onder invloed van stedelijkheid en type woning (Galán et al. 2009), prijsveranderingen (Athanasiadis et al. 2005; Chu et al. 2009), beleid op waterbesparing (Chu et al. 2009; Ahmad en Prashar 2010) en klimaatverandering (Downing et al. 2003).
	Athanasiadis et al. (2005) ontwikkelden DAWN, een hybride model voor het schatten van de totale huishoudelijke watervraag, afhankelijk van de (veranderingen in de) waterprijs en de sociale respons op waterbesparingsbeleid en voorlichting.

Toepassing

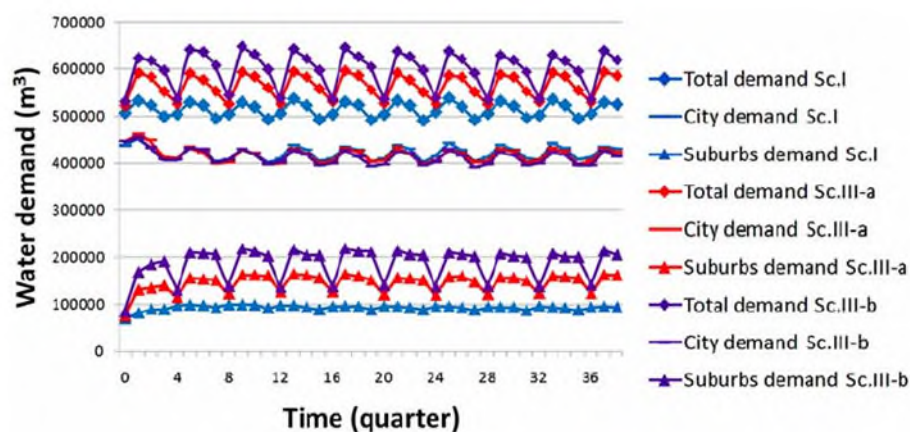
Referenties

Chu et al. (2009) ontwikkelden een residentieel watergebruiksmodel (RWUM) waarin de totale watervraag wordt bepaald door de som van alle eindgebruiken. RWUM evalueert heterogene keuzes van consumenten m.b.t. drinkwater, rekening houdend met de marktpenetratie van waterbesparingstechnologieën, regelgeving en beleid, economische ontwikkeling, sociaal- en milieubewustzijn en persoonlijke voorkeuren.

Koutiva en Makropoulos (2016) hebben UWAB ontwikkeld (Urban Water Agents 'Behaviour), om de reactie van huishoudelijke watergebruikers te simuleren op maatregelen voor watervraagreductie en deze wordt vervolgens gekoppeld aan de Urban Water Optioneering Tool (UWOT, Makropoulos et al. 2008) om daarmee het effect op de totale huishoudelijke watervraag middels waterverbruikende apparatuur per huishouden te simuleren. UWAB bevat geen statistisch of econometrisch consumptiemodel. Rozos et al. (2015) hebben UWOT gekoppeld aan een landgebruiksmodel dat de stedelijke groei simuleert waarmee schattingen van specifieke eisen per stedelijke regio over de tijd worden gemodelleerd. Recenter hebben Koutiva en Makropoulos (2019) UWAB toegepast om de invloed van specifieke strategieën voor de watervraag van droogte op de totale watervraag te bepalen.

Schwarz en Ernst (2009) modelleren de verbreiding van watergerelateerde technologieën onder huishoudens in Zuid-Duitsland. Elke agent vertegenwoordigt een huishouden van een van de vijf "leefstijlgroepen". Agenten beslissen over het wel of niet installeren van (zuinige) douchekoppen, toiletten en een regenopvangsysteem. Per innovatiecategorie en leefstijlgroep, wordt een van twee beslissingsregels gebruikt: (1) een cognitief veeleisende bewuste beslissing of (2) een eenvoudige regel gebaseerd op heuristiek en imitatie. De empirische data komt uit een vragenlijstonderzoek het model is gevalideerd met historische marktgegevens over adoptie van zuinige toiletten.

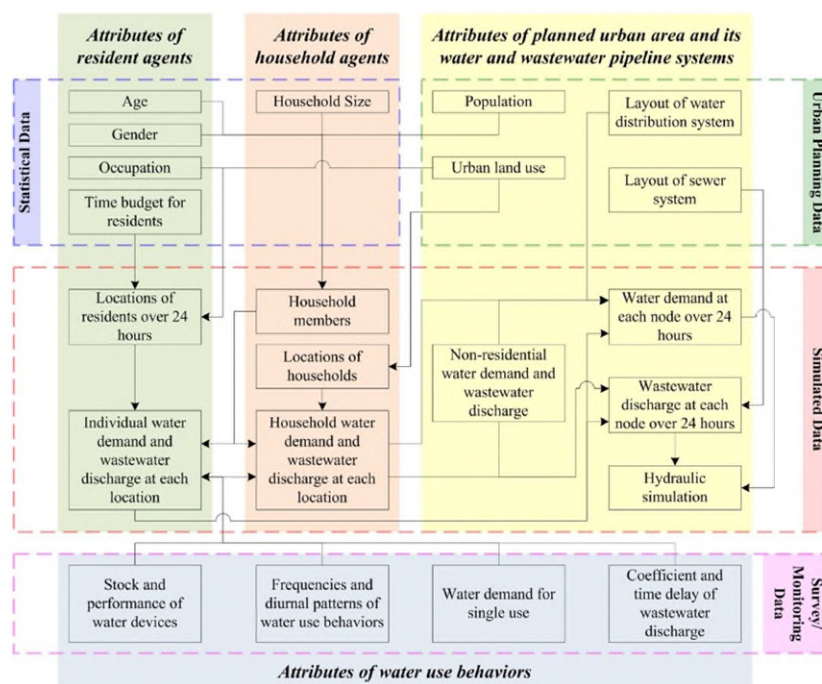
Galán et al. (2009) integreerden een gedetailleerd GIS en sociaaleconomische informatiedatabases (in Valladolid, Spanje) met een algemeen ABM om de verandering in waterverbruik te beschrijven onder invloed van stedelijke dynamiek, en aanpassingen van gedrag en introductie van nieuwe (milieuvriendelijke) technologie (zoals zuinige douchekoppen). De bestudeerde scenario's gingen uit van verschillende snelheid van invoering van de zuinige apparaten. De figuur hieronder (Galán et al. 2009) toont de watervraag over de tijd voor de verschillende scenario's. De resultaten tonen dat de toepassing van waterbesparende technologie tijd kost en afhangt van interacties tussen agenten (o.a. van bewegingen tussen populaties, woningtypes en veranderingen in het GIS model) en andere sociaalgeografische effecten (technologische en dynamiek in opinies).



Toepassing

Referenties

Liu et al. (2016) hebben een ABM ontwikkeld om de prestaties van water- en afvalwaterleidingnetten te evalueren waarin de huishoudelijk drinkwatervraag in de stad (Beijing) afhangt van het gedrag van de bewoners en de locatie van de vraag afhangt van de mobiliteit van de bewoners. Het model kent twee soorten agenten, namelijk bewoners en huishoudens (zie figuur hieronder). Voor bewoners komen de belangrijkste invloedfactoren op het waterverbruikend gedrag (geslacht, leeftijd en beroep) uit officiële (bevolkings)statistieken; voor huishoudens zijn de gegevens (voor bijv. penetratiegraad en specificaties van waterverbruikende apparatuur) afgeleid uit statistieken en enquêtes. Ook zijn statistieken uit het tijdsbestedingsonderzoek en stedelijke ontwikkelingsplannen gebruikt. Op basis van tijdsbestedingsonderzoek wordt voor elke bewoner een willekeurige tijdreeks (24 uur) van activiteiten gegenereerd, en vervolgens wordt bepaald waar (landperceel) de bewoners zich bevinden. De watervraag van elke bewoner wordt opgeteld bij die van het perceel waar hij / zij zich op dat moment bevindt (bijv. in de middag is een scholier op een onderwijsinstelling); de watervraag van elk huishouden wordt altijd opgeteld bij die van het perceel waar het is gehuisvest. Voor een nieuw te ontwikkelen gebied in Beijing leidde het model tot een lagere voorspelde watervraag en afvalwaterlozing dan volgens de traditionele aanpak, en een aanbeveling om de leidingnetten kleiner te ontwerpen.

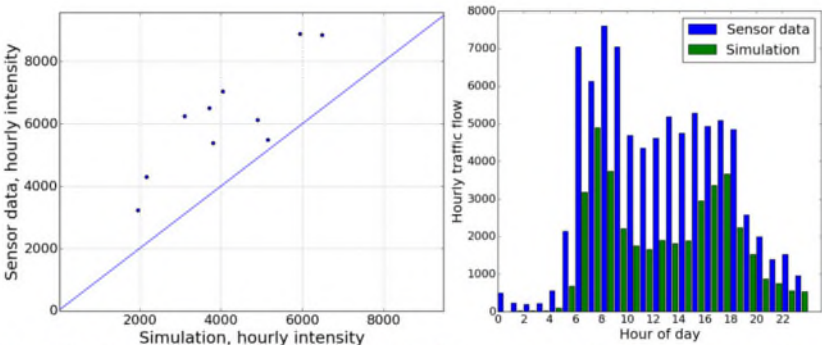


Waterbesparend
gedrag

In de bestudering van gedrag wordt veel gebruik gemaakt van de Theory of Planned Behaviour (TPB) en het Belief-Desire-Intention (BDI) model (Linkola et al. 2013). Deze twee modellen gaan vooral uit van reflectieve beslissingen. Factoren die wat meer gedachteloze beslissingen beïnvloeden (zoals sociale normen, nudges, etc.) ontbreken. Specifieke modellen m.b.t. huishoudelijk waterverbruik zijn vooral gericht op reacties in gedrag op zorgen over het milieu, toepassing van watermeters, bewustwordingscampagnes en gewoonten m.b.t. hygiëne, wassen, etc. (Linkola et al. 2013), waterbesparende campagnes, de introductie van waterrestricties en langere perioden van waterschaarste (Boerema et al.) en sociale interactie (Rixon et al. 2006).

Overig

Huishoudelijke zonnepanelen (Palmer et al. 2015; Rai en Robinson 2015; Robinson en Rai 2015); gedrag m.b.t. recycling (Scalco et al. 2017); autodelen en auto's zonder verbrandingsmotor (McCoy en Lyons 2014; Eppstein et al. 2015; Sopha et al. 2017); systemen voor ruimteverwarming (Chingcuanco en Miller 2012; Sopha et al. 2013; Jensen en Chappin 2017).

Toepassing	Referenties
Reisgedrag / verkeersstromen	Hager et al. (2015) richten zich op de verandering van het stedelijke mobiliteitssysteem als gevolg van bevolkingsgroei en daarbij behorende toename in verkeersdeelnemers. Zhang en Levinson (2004) ontwikkelden een op activiteiten gebaseerde benadering voor reisvoorspellingen. ALBATROSS (Arentze et al. 2000), A Learning-Based, Transportation-Oriented Simulation System. Dit model voor reisgedrag is gebaseerd op theorieën over keuzeheuristicen die mensen toepassen bij het nemen van beslissingen in complexe omgevingen. Het model, een van de meest uitgebreide in zijn soort, voorspelt welke activiteiten wanneer, waar, voor hoelang en met wie worden uitgevoerd en met welke transportwijze. In het model zijn verschillende logische, temporele, ruimtelijke, ruimtelijk-temporele en institutionele beperkingen opgenomen. De input van ALBATROSS zijn activiteitendagboeken, die ze zelf verzameld hebben. Mogelijk kan ook data uit het tijdsbestedingsonderzoek van het SCP worden gebruikt. Melnikov et al. (2016) ontwikkelden een ABM van de reisvraag en verkeerssimulatie in Amsterdam. De figuur toont een voorbeeld van de resultaten.
 Figure 12. Sensor and simulation intensities for 10 sensors from 5 points on major roads around Amsterdam during morning rush hour from 7 till 8 AM (left), within day hourly intensity rates from sensor and simulation data of road heading from Muiden to Amsterdam (right).	
	de Bok en Tavasszy (2018) presenteren een werkend prototype van een ABM dat is uitgewerkt voor al het vrachtverkeer van en naar Rotterdam.
Ontwikkeling van stedelijke systemen	Fontaine en Rounsevell (2009) ontwikkelden HI-LIFE (Household Interactions through LIFE cycle stages). Het ABM in HI-LIFE is ruimtelijk georiënteerd en beschouwt twee hoofdklassen van objecten: huishoudens en landeenheden (waar de huishoudens wonen). Huishoudens zijn mobiele agenten die kunnen beslissen om van locatie te veranderen (verplaatsing van de een naar de andere landeenheid); landeenheden zijn immobiele agenten en hebben attributen zoals bereikbaarheid en aantal woningen. Miller e.a. (Salvini en Miller 2005; Miller et al. 2011) hebben ILUTE (Integrated Land Use, Transportation, Environment) ontwikkeld om een geïntegreerd stedelijk systeem over een langere periode te simuleren. Dit model is geschikt voor analyse van een breed scala aan transport-, huisvestings- en ander stedelijk beleid.
Stedelijke afwaterings-systemen	Sanchez et al. (2014); en Sanchez Torres et al. (2014) ontwikkelden een ABM met als doel de evaluatie van toekomstscenario's, waaronder de uitbreiding van stedelijke afwateringssystemen.
Duurzaam beheer watervoorraden	Voor waterbeheervraagstukken is ABM toegepast om de prestaties van infrastructuurontwerp en beleidsbeslissingen te onderzoeken, simuleren en voorspellen, aangezien deze worden beïnvloed door menselijke besluitvorming, gedragingen en aanpassingen. Berglund (2015) geeft een overzicht. In deze modellen zijn de agenten waterverbruikers (bijv. (Athanasiadis et al. 2005; Koutiva en Makropoulos 2016)) of besluitvormers die strategieën kiezen voor watertoewijzing en -beheer (bijv. (Ng et al. 2011;

Toepassing	Referenties
	Giuliani en Castelletti 2013)). Ali et al. (2017) modelleren de dynamiek van de stedelijke watervoorziening waarbij ze rekening houden met klimaatveranderingen, bevolkingsgroei en watertekorten.
Incidenten tijdens waterdistributie	Shafiee en Zechman (2013) beschrijven een integratie van een ABM met verbruikers en een hydraulisch netwerkmodel. Hiermee kan consumentengedrag in geval van een noodsituatie (vervuiling drinkwater) worden meegenomen in de voorspelling van een verontreiniging in het drinkwaterdistributiesysteem en de blootstelling daaraan. Consumenten zijn agenten die zich verplaatsen, drinkwater consumeren en ander water verbruiken, en communiceren met andere agenten (waterbedrijven, publieksvoorlichters, massamedia en volksgezondheidsinstanties om informatie te delen wanneer een verontreinigende stof in een waterdistributienet is aangetroffen), zie figuur. Wanneer consumenten hun waterverbruik beperken, wordt de verontreinigingspluim bijgewerkt en wordt de hoeveelheid verontreinigende stof die door elke agent wordt verbruikt berekend. Het ABM is nog uitgebreid met een optimalisatiemodule voor het selecteren en manipuleren van brandkranen die moeten worden gebruikt om de concentratie van verontreinigende stoffen te verminderen (Zechman 2013) en voor het routeren van hulpverlening om consumenten te waarschuwen (Shafiee en Zechman 2011).
Waterhergebruik	Kandiah et al. (2019) modelleren infrastructuurontwikkeling onder invloed van de mening van de maatschappij over waterhergebruik. Een simulatie is gedaan voor de stad Cary, North Carolina (USA), om de besparingen op drinkwater en de toepassing van grijs water te evalueren op basis van acceptatieprognoses waarbij gebruik is gemaakt van verscheidene alternatieven voor waterwinning en uitbreidingsplannen voor de infrastructuur.
Overig	Sociale wetenschappen (Smit et al. 2013); Internet of Things (IoT) (Kaminski et al. 2016); klimaatbeleid (Gerst et al. 2013); vliegveld (Janssen et al. 2019); overstromingsrisico (Dubbelboer et al. 2017); evacuatie bij orkanen (Lämmel en Klüpfel 2012; Yin et al. 2014); elektra: slimme meters (Vasiljevskaa et al. 2017); geohydrologische modellen (Jaxa-Rozen et al. 2019); toegang tot belangrijke voorzieningen zoals scholen en medische diensten (Mayaud et al. 2018; Mayaud et al. 2019).

2.3 Nederlandse toepassingen en data

Omdat de data die beschikbaar is en de vorm waarin per land verschilt, hebben we ingezoomd op een aantal toepassingen in Nederland. Daarmee krijgen we inzicht in de data die voor onze toepassing geschikt zou kunnen zijn.

Voorbeelden van modellen en data in Nederland:

- Faber et al. (2010) onderzochten ABM voor de verspreiding van het gebruik van microwarmtekrachtkoppeling (micro-WKK) in Nederland, waarbij ook het gebruik van verschillende subsidieregelingen is onderzocht.
- Melnikov et al. (2016) ontwikkelden een ABM van de reisvraag en verkeerssituatie in Amsterdam. Gebruikte data:
 - OpenStreetMap (OSM) voor het wegennet;
 - Buurткаartgegevens (2014), bevatten o.a. het aantal geregistreerde personenauto's;
 - jaarlijks reisonderzoek (OVIN-2014 (Bureau voor de Statistiek (CBS))) met dagelijkse reisdagboeken van meer dan 42 duizend willekeurig geselecteerde burgers, met daarin de reisroute en persoonlijke informatie zoals leeftijd, geslacht, postcode van locatie van vertrek en bestemming);
 - NDW gegevens van de verkeersintensiteit (Nationaal Dataportaal Wegverkeer).
 - Twee gegevensbronnen werden gecombineerd om tot een ruimtelijke spreiding van werklocaties te komen: (1) gegevens over speciale industrie- en kantoorzones (locatie, vorm, type (industrie of kantoren) en aantal werkplekken) en (2) gegevens over landgebruik (Gemeente Amsterdam).
- de Bok en Tavasszy (2018) gebruikten voor een ABM voor het vrachtverkeer van en naar Rotterdam de volgende data. De gegevens zijn samengevat in Tabel 3.
 - Transportstatistieken: het CBS voert een enquête uit onder een steekproef van alle geregistreerde vrachtwagens in Nederland (Basisdossiers Goederenvervoer).
 - Algemeen Bedrijvenregister (ABR): informatie over welke bedrijven op de laad- en loslocaties van de vrachtwagenritten gevestigd zijn.
 - Verder worden infrastructuurnetwerken en gebiedskenmerken uit bestaande verkeersmodellen (NRM-West) gebruikt.

Tabel 3. Databronnen gebruikt bij het prototype van hun ABM voor vrachtverkeer naar Rotterdam (de Bok en Tavasszy 2018).

Data	Statistiek	Bron:
<i>Zendingen</i>	Zendinggrootte: beschrijvende statistiek	Basisbestand goederenvervoer (CBS)
<i>Vrachtwagentour</i>	Inzet voertuigtype, Samenstelling rondritten (1,2,3,4+ stops)	Basisbestand goederenvervoer (CBS)
<i>Rondritpatronen</i>	Nauwkeurig vertrek- en stoptijdstip, exacte laad- en loslocaties	XML-data verzameling binnen BGGV (CBS)
<i>Bedrijfspopulatie</i>	Location, size and sector of firms	Algemeen Bedrijven Register (ABR) (CBS)
<i>Goederenvervoermatrix</i>	Totale volume goederenvervoer tussen geaggregeerde zones	Aggregatie uit Basisbestand goederenvervoer of prognosebestand uit goederenvervoermodel Basgoed

2.4 ABM platforms

Er zijn verschillende softwareplatforms beschikbaar waarmee een ABM (relatief eenvoudig) kan worden opgesteld. Wikipedia geeft een lijst van verschillende softwareplatforms om een ABM in te bouwen

(https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_agent-based_modeling_software). De software wordt geclassificeerd middels de volgende karakteristieken: 1) belangrijkste domein van toepassing, 2) de ontwikkelaar, 3) licentievorm, 4) programmeertaal, 5) besturingssysteem, 6) gebruiksvriendelijkheid / documentatie, 7) GIS en 3D mogelijkheden, 8) datum laatste update. Robertson (2017) heeft een review uitgevoerd, zie ook Tabel 4. Een uitgebreidere lijst is te vinden in Abar et al. (2017).

Specifiek noemen we hier:

- NetLogo is een open source programmeertaal en geïntegreerde ontwikkelomgeving voor ABM. NetLogo is gebruikt door de TUD studenten in het kader van dit project (§ 4.2) en in de eerder beschreven toepassingen (Koutiva en Makropoulos 2016; Huber et al. 2019).
- Dinamica EGO is zeer flexibele software die de constructie van veel verschillende soorten omgevingssimulatiemodellen mogelijk maakt, inclusief complexe ruimtelijke dynamische modellen. Door een intuïtieve, vriendelijke en toch krachtige grafische gebruikersinterface kunnen modelleurs vrijelijk een combinatie van kaartalgebra¹, cellulaire automaattechnieken² en tabelgegevensmanipulatie gebruiken om complexe sociaaleconomische en milieusystemen weer te geven, niet beperkt tot het gebruik van alleen vooraf gedefinieerde modellen.

Tabel 4. Overzicht ABM software (Robertson 2017)..

	NetLogo	RePast	Swarm
Ontwikkeld door	Northwestern University (Center for Connected Learning and Computer Based-Modelling)	Repast Organization for Architecture and Development (originally University of Chicago Social Science Research Computing)	Swarm Development Group (originally Santa Fe Institute)
Voordelen	Gebruiksvriendelijk en eenvoudig problemen op te zetten en door te rekenen	Groot aantal gebruikers en goede ondersteuning door de Repast gemeenschap; erg veelzijdig en eenvoudig om modellen uit te breiden	Voorloper van Repast en NetLogo
Nadelen	Gecomplieerde (en abstractere) modellen vallen buiten de mogelijkheden van NetLogo	Vereist kennis van een programmeertaal (bv. Java)	Zeer moeilijk te installeren en draaien op een Windows systeem
Voorbeelden van modellen	Veel voorbeelden beschikbaar	Veel voorbeelden beschikbaar	Beperkt aantal voorbeelden beschikbaar
Nodige tijd om modellen te leren programmeren	Enkele uren	Enkele dagen	Enkele weken
Beperkingen	Modellen kunnen niet makkelijk worden uitgebreid	Uitbreiden van modellen vereist programmeerkennis	Moeilijk te installeren en geen goede ondersteuning
Ondersteuning	Goed	Goed, vooral van de academische wereld	Erg beperkt
Software onderhoud	Goed	Goed	Matig
Extra's	3D visualisatie van modellen; modellen kunnen worden ingebed op webpagina's	GIS implementatie	Geen

¹ een aantal simpele bewerkingen in een GIS om twee of meer rasterlagen van vergelijkbare omvang via algebraïsche bewerkingen zoals optellen, aftrekken etc. te combineren tot een nieuwe laag

² een cellulaire automaat bestaat uit een regelmatig raster van cellen, elk in een eindig aantal toestanden, zoals aan en uit. Elke cel krijgt een begintoestand (tijd $t = 0$). Vervolgens wordt de nieuwe toestand ($t = t+1$) van elke cel bepaald op basis van een (wiskundige) functie en de huidige toestand van de cel en de omliggende cellen

2.5 Agentgebaseerde modellen

In de referenties die in § 2.2 zijn verscheidene ABM beschreven. Een aantal zijn concrete modellen, niet alleen concepten, en sluiten aan bij onze onderzoeksvraag naar ABM voor de watervraag over een voorzieningsgebied en een tijdspanne van decennia. Dit zijn de ABM waar in een vervolgonderzoek mogelijk gebruik van kan worden gemaakt:

- ALBATROSS (Arentze et al. 2000);
- ILUTE (Salvini en Miller 2005; Miller et al. 2011; Chingcuanco en Miller 2012);
- VISSIM microscopic simulation package (Fellendorf en Vortisch 2010) ;
- HI-LIFE (Fontaine en Rounsevell 2009).

Het gebruik van een ABM als ILUTE maakt het, mits voorzien van een watervraagmodule, mogelijk om de verschillende infrastructuren in hun onderlinge samenhang te beschouwen, dimensioneren, plannen en vervangen.

3 SIMDEUM – een model voor de voorspelling van de watervraag

3.1 Voorspellen toekomstige watervraag

De toekomstige watervraag kan op verschillende manieren worden voorspeld, bijvoorbeeld op basis van historische tijdreeksen en regressiemodellen, of op basis van scenario's (Billings en Jones 2008). Afhankelijk van de ruimtelijke schaal en de tijdshorizon die wordt beoogd heeft de ene aanpak een voorkeur boven de andere. Voor een grote ruimtelijke schaal (bijv. de hoeveelheid die een pompstation moet leveren), een niet al te grote tijdstap (bijvoorbeeld een kwartier) en een korte tijdshorizon (bijvoorbeeld een dag tot een week vooruit) een lineaire regressie op basis van historische watervraag en weergegevens een zeer geschikte methode (Bakker et al. 2013). Voor een kleinere ruimtelijke schaal (niveau van een straat, of een huishouden) of een kleinere tijdstap (5 minuten of korter) is deze aanpak veel minder geschikt doordat de variantie rond het gemiddelde steeds groter wordt. Voor een langere tijdshorizon zijn dit soort modellen ook veel minder geschikt vooral omdat de onzekerheid steeds groter wordt doordat allerlei onderliggende invloedsfactoren kunnen veranderen die in een regressiemodel niet expliciet worden gemodelleerd, zoals bijv. de introductie van nieuwe technologie (waterloze toiletten) of culturele veranderingen (vaker douchen).

SIMDEUM (Blokker 2006) is ontwikkeld om in het bijzonder het eerste punt (grote variantie bij kleinere ruimtelijke schaal en kleinere tijdstap) op te lossen. De aanpak van SIMDEUM is dat de watervraag wordt gesimuleerd per type eindverbruik (wc doorspoelen, douchen etc.) op basis van gegevens over verbruiksfrequentie, volumestroom en duur van een tapping, en op basis van gedrag van gebruikers (bijv. opstaan en naar bed gaan, vertrek en thuiskomst van bewoners). Hiermee is het ook goed mogelijk om scenario's door te rekenen, bijv. de introductie van nieuwe technologie (Agudelo-Vera en Blokker 2017a). De vraag die in dit hoofdstuk voorligt, is of SIMDEUM ook geschikt is om het tweede punt (grotere onzekerheid over langere tijdshorizon) op te lossen. Omdat voor lange tijdshorizonten met veel verschillende scenario's vaak ABM worden ingezet (zie ook het vorige hoofdstuk), wordt SIMDEUM ook beoordeeld op kenmerken van ABM. Dit is een manier van kijken, waarbij in het oog moet worden gehouden dat de vraag niet is of SIMDEUM een ABM is maar of SIMDEUM geschikt zou zijn om de toekomstige watervraag over lange termijn en verdeeld over een voorzieningsgebied te voorspellen.

Een ABM voor de watervraag kan ook zonder SIMDEUM worden opgezet door de watervraag op een andere/nieuwe manier de modelleren. Wij hebben ervoor gekozen om SIMDEUM met ABM te combineren, om de kennis die in SIMDEUM al zit maximaal te benutten.

3.2 Introductie SIMDEUM

Met SIMDEUM kun je het effect van (verandering in) gedrag en technische installatie op de totale watervraag, en de verdeling van de watervraag over de dag in beeld brengen. Door de koppeling met een hydraulisch netwerkmodel kun je ook het effect op druk, verblijftijd, zelfreinigend vermogen van een leidingnet, etc. inschatten (Agudelo-Vera en Blokker 2016a). Technologie is samen met de mate waarin verantwoordelijkheid voor het milieu gevoeld wordt – de belangrijkste invloedfactor voor het verbruik (Sikirica et al. 2009). Tabel 5 laat zien op welke manier dat voor de huishoudelijke drinkwatervraag geldt; er is niet expliciet gekeken naar de ruimtelijke verdeling van de watervraag over bijv. een hele stad.

In SIMDEUM zijn veel verschillende factoren als parameter opgenomen (blauwe tekst in Tabel 5) die de watervraag beïnvloeden. Dit is gedaan m.b.v. statistische verdelingen op basis van antwoorden uit de enquête “waterverbruik thuis”. Hoe de parameters worden beïnvloed door campagnes, subsidies, het weer, etc. is niet in SIMDEUM opgenomen. De invloedfactoren zijn zeer verschillend van aard (SEPTED): Sociaal-cultureel (bijv. ideeën over hygiëne die invloed hebben op hoe vaak men zich wast), Economisch (bijv. de prijs van water), Politiek (bijv. het verlenen van onttrekkingsvergunningen), Technologisch (bijv. de ontwikkeling van waterbesparende apparatuur), Ecologisch (bijv. het klimaat en de invloed op de tuin), Demografisch (bijv. de groei van het aantal eenpersoonshuishoudens).

Tabel 5. Invloedfactoren op huishoudelijk waterverbruik, over de tijd. Bron is (Blokker en Vloerbergh 2011) tenzij anders vermeld. De blauwe tekst geeft aan dat dit invoerparameters zijn die expliciet in SIMDEUM zijn opgenomen. In de toelichting zijn de aspecten onderstreept die de parameters beïnvloeden. In de 3^e kolom is aangegeven SEPTED: S = Sociaal-cultureel, E1 = Economisch, P = Politiek, T = Technologisch, E2 = Ecologisch, D = Demografisch.

Parameters m.b.t. waterverbruik		Toelichting en invloedfactoren	
Huishouden	Grootte van huishouden	D	Gezamenlijke toepassingen (zoals voor schoonmaak huis en tuin sproeien) wordt over totale huishouden verdeeld, waardoor eenpersoonshuishoudens relatief veel water verbruiken per persoon.
	Samenstelling huishoudens	D	Samenstelling van huishoudens is van invloed op het waterverbruik. Dit komt doordat er verschillen zijn in het waterverbruik van verschillende <u>leeftijdsgroepen</u> , en in beperkte maten ook tussen <u>mannen en vrouwen</u> . Pubers douchen bijv. langer dan oudere leeftijdsgroepen. En mensen tussen 21 en 64 jaar oud (de beroepsbevolking) douchen vaker dan senioren.
	Culturele gewoontes of etniciteit	D	Inwoners met een niet-westerse migratieachtergrond, vaker geconcentreerd in de steden, blijken gemiddeld meer water te verbruiken dan mensen met een Nederlandse achtergrond. Omdat 1) de steekproef voor de enquête “waterverbruik thuis” mogelijk niet voldoende groot is om dit significant te noemen en 2) de verwachting is dat het waterverbruik van mensen met een migratieachtergrond in de toekomst meer gaat lijken op dat van mensen met een Nederlandse achtergrond is in SIMDEUM dit aspect niet expliciet meegenomen als parameter. Via aanpassingen in de invoerparameters kan er wel mee worden gerekend.
	Inkomen	E1	In de enquête “waterverbruik thuis” is geen significante invloed gevonden van de sociale klasse (bepaald door opleidingsniveau en inkomen) op het waterverbruik.
	Milieubewustzijn	S	In de enquête “waterverbruik thuis” is geen significante invloed gevonden van de milieubewustzijn op het waterverbruik.
Gedrag	Tijdsbesteding	S	Het tijdstip van waterverbruik hangt sterk samen met de tijdstippen waarop mensen thuis zijn en wakker zijn, en ook met de overgangsmomenten (<u>ontwaken, naar bed gaan, vertrekken en thuis komen</u>). <u>Leeftijd</u> is een belangrijke invloedfactor op de tijdsbesteding, en de <u>werkstatus</u> van de beroepsbevolking, en uiteraard <u>de dag van de week</u> . <u>Werktijden</u> (of schooltijden) en <u>locatie</u> van de woning t.o.v. de werklocatie (of school, winkels, sportvereniging) zijn van invloed op hoe laat mensen opstaan, van huis vertrekken en weer thuis komen. In een landelijke omgeving staat men bijv. gemiddeld later op dan in een stedelijke omgeving. Ook <u>vakantie</u> heeft invloed op het waterverbruik in een woning en in een voorzieningsgebied. Een verandering van de vakantiespreiding kan dus ook een invloed hebben (Vonk et al. 2017). Een verandering in tijdsbesteding heeft dus ook een invloed op het waterverbruikspatroon, bijv. wanneer mensen hun <u>baan</u>

Parameters m.b.t. waterverbruik		Toelichting en invloedfactoren	
			<u>verliezen</u>, of veel <u>thuis gaan werken</u> (zoals tijdens de intelligente lockdown in de Corona-crisis), of tijdens <u>feestdagen</u> (Vertommen en Blokker 2016).
	Gebruiksfrequentie	S	Hoe vaak een kraan wordt geopend, de wasmachine draait, etc. wordt volledig bepaald door de gebruikers. Gedrag kan beïnvloed worden door <u>bewustwording</u> (bijv. met hulpmiddelen als de installatie van een watermeter of het gedetailleerd specificeren van de waterrekening, of door de klant te laten schatten hoeveel water deze verbruikt), door <u>oproepen tot beperken van waterverbruik</u> (bijv. water buitenshuis tijdens droogte), etc. Veel van de oproepen om zuinig met water om te gaan zijn gericht op de gebruiksfrequentie: alleen wassen met een volle trommel, en draag kleding wat langer (was alleen als dat echt nodig is), geef het gras niet elke dag water (want anders krijg je lui gras), spoel de wc alleen door bij de grote boodschap, etc. Gedrag kan ook worden beïnvloed door <u>weersomstandigheden</u>. Tijdens langere periodes van droogte en hoge temperaturen sproeien mensen vaker de tuin, en douchen ze mogelijk vaker (Vertommen et al. 2018). Een <u>subsidie</u> voor een regenton t.b.v. het ontlasten van de regenwaterafvoer heeft als bijeffect dat het tuinsproeien niet (altijd) met drinkwater hoeft te worden gedaan, zodat ook drinkwater wordt bespaard. De gebruiksfrequentie hangt waarschijnlijk ook samen met de <u>locatie van de gebruiker</u>. Wanneer deze veel uren thuis doorbrengt, zal mogelijk thuis vaker worden afgewassen en schoongemaakt, terwijl wanneer iemand langer op het werk vertoeft schoonmaak en afwas thuis kunnen afnemen, en op het werk kunnen toenemen.
Water-verbruikende apparatuur	Verbruik per keer	T	A) Voor sommige typen waterverbruik wordt het verbruik per keer bepaald door een combinatie van technische specificatie die de volumestroom bepaald en de gebruiksduur die door de gebruiker wordt bepaald (douche, kranen). B) Voor andere typen waterverbruik wordt het verbruik per keer volledig bepaald door de technische specificaties (wasmachine, vaatwasser, wc).
	Gedrag (type A)	E2	Door een zuinige douchekop, door de kraan niet volledig open te draaien of door de gebruiksduur te beperken kan een gebruiker water besparen. Bij de wc kan de gebruiker tegenwoordig vaak kiezen voor een hele of halve spoeling, waarmee water kan worden bespaard. Ook hier worden <u>bewustwordingscampagnes</u> wel op gericht, bijv. de kraan dicht draaien tijdens het tandenpoetsen, of minder lang douchen. <u>Locatie</u> beïnvloedt mogelijk het gedrag, dat buitenshuis kan anders zijn dan thuis. Iemand zal op de sportschool mogelijk korter douchen, op het werk vaker een hele toiletspoeling gebruiken en vaker de handen wassen dan thuis.
	Penetratiegraad van apparatuur	T S E1 E2	Een gebruiker kan het verbruik per keer beïnvloeden door een zuiniger apparaat aan te schaffen. De penetratie van nieuwe technologie volgt een S-curve; verspreiding gaat langzaam in het begin, dan versnelt het en dan vlakt de invoer weer af tot een stabiel eindniveau (niet noodzakelijkerwijs 100%). Zaken die vast in huis worden gemonteerd (toilet) worden minder snel vervangen (>20 jaar levensduur) dan losse apparatuur (wasmachine) (Billings en Jones 2008; Sikirica et al. 2009; Agudelo-Vera en Blokker 2017a). In

Parameters m.b.t. waterverbruik		Toelichting en invloedfactoren	
		nieuwbouwwijken kunnen nieuwe technologieën relatief snel en op grotere schaal ingang vinden. Soms wordt er <u>subsidie</u> verstrekt om zuinigere kranen, wc's en douchekoppen aan te schaffen of worden zelfs klusbedrijven aangeboden om ze te installeren. Er is ook een invloed van <u>reclame</u>, die vaker gericht is op de aanschaf van luxeartikelen waarmee het waterverbruik toeneemt, bijv. airconditioning (op basis van verdamping), een power-shower of een jacuzzi (die tijdens de Corona-lockdown veel zijn verkocht), of mogelijk ook op innovatieve waterbesparende apparatuur (ultrasone wasmachines die nauwelijks water verbruiken, recirculatiedouche). Het <u>bestedingspatroon</u> van mensen beïnvloedt ook de aanschaf van de apparaten.	
Maatschappij	BBP	E1	Op wereldschaal is een correlatie tussen BBP en waterverbruik gevonden. Op Europees niveau is daar geen sprake van. Werkgelegenheid zal wel invloed hebben op de ruimtelijke spreiding van waterverbruik (thuis of op bedrijfsterreinen).
	Prijselasticiteit	E1	De prijselasticiteit van drinkwater is zeer beperkt. In Nederland is deze vrijwel 0 doordat er voldoende welvaart is. Een kleine invloed kan wellicht teweeg gebracht worden door bijvoorbeeld de prijs te koppelen aan het verbruik in combinatie met campagnes gericht op bewustzijn, of door de prijs tijdens daluren te verlagen.

3.3 Toepassingen en beperkingen van SIMDEUM

Zoals in § 3.1 al is aangegeven is SIMDEUM voornamelijk ontwikkeld om meer zicht te krijgen op de variatie van de drinkwatervraag van dag tot dag of van huis tot huis (of straat / appartementengebouw tot straat) op ieder moment (of per minuut) van de dag. Daarmee is het mogelijk om iets te zeggen over overschrijdingskansen van volumestromen, waarmee leidingnetten (Blokker 2012) en installaties (Pieterse-Quirijns en Blokker 2012; Pieterse-Quirijns et al. 2012; Agudelo-Vera en Blokker 2017b) kunnen worden ontworpen. Door de koppeling met een hydraulisch leidingnetmodel kan bovendien een realistischer beeld worden verkregen van de stroompaden (Blokker 2010, hoofdstuk 8) en verblijftijden (Blokker et al. 2010; Blokker et al. 2011), en daarmee van de waterkwaliteit (Blokker et al. 2014) en interpretatie van sensordata (van Thienen et al. 2013), ook in riolering (Bailey et al. 2020a; Bailey et al. 2020b). In de rest van deze paragraaf wordt meer gekeken naar toepassing van SIMDEUM in scenariostudies en de voorspelling van de watervraag in de verdere toekomst.

Veel methodieken om de toekomstige watervraag te voorspellen zijn gebaseerd op een extrapolatie van historisch waterverbruik per huishouden. Dit leidt mogelijk tot fouten. Ten eerste doordat trendbreuken, bijvoorbeeld de introductie van een geheel nieuw type waterverbruik, nooit kunnen worden meegenomen. Ten tweede doordat onderliggende factoren niet goed begrepen worden. Een analyse van de historisch watervraag in Nederland toont hoe het waterverbruik verandert in de tijd onder invloed van maatschappelijke, technologische en demografische ontwikkelingen. In het verleden zijn drinkwatersystemen ontworpen met de verwachting van een sterke groei in de drinkwatervraag; die echter is uitgebleven. Behalve verschuivingen in gedrag zijn ook technologische ontwikkelingen (waterbesparende toestellen) hier debet aan. Zo lijkt het doucheverbruik al jaren stabiel, maar er is een trend tot vaker douchen, terwijl de volumestroom van de douche beperkt wordt. In de toekomst zal de douchefrequentie nog verder kunnen groeien, terwijl de volumestroom niet verder afneemt. Het waterverbruik van de douche zal dus waarschijnlijk niet stabiel blijven, maar toenemen (Agudelo-Vera en Blokker 2017a). Met SIMDEUM is het goed mogelijk om die onderliggende factoren mee te nemen, en kan ook het effect van te

voorzien ontwikkelingen worden bepaald. Denk aan grootschalige invoer van grijswatersystemen of vacuümtoiletten (Agudelo-Vera en Blokker 2017a).

Met SIMDEUM kan worden onderzocht wat het effect is (op de totale watervraag, de piekvraag, het zelfreinigend vermogen, de druk, de verblijftijd, etc.) van een verandering in de watervraag. Die verandering kan komen door een verandering in gedrag, bijv. indien het mogelijk is consumenten te beïnvloeden om minder water te verbruiken, water te verbruiken op een ander moment van de dag of alleen voor bepaalde toepassingen water te gebruiken; of door een verandering in apparaten (zoals nieuwe sanitatie, regendouches, of sterk waterbesparende closets, en (vaat)wasmachines). Om een gefundeerde inschatting van het toekomstige piekverbruik te kunnen maken, is kennis van dagpatronen van mensen en het bijhorende waterverbruik vereist. Daarom zijn tools waarmee de toekomstige drinkwatervraag kan worden voorspeld nodig (Agudelo-Vera en Blokker 2017a).

SIMDEUM is ook toegepast om rekenregels te genereren voor ontwerp van drinkwaterinstallaties (en zijn opgenomen in de ISSO-55) en zelfreinigende netten (o.a. in DiVerDi). Omdat SIMDEUM gevoed kan worden met nieuwe waarden voor technische specificaties en gedrag, is ook in de toekomst SIMDEUM een prima model om aangepaste rekenregels te genereren.

SIMDEUM kan helpen om te bepalen welke maatregelen al dan niet effectief zijn om het waterverbruik (tijdelijk) te verminderen (Blokker en Moerman 2018) en inzichtelijk maken wat er gebeurt zonder en met de aanpassing van het waterverbruik/gedrag (Blokker en Moerman 2018). Het is nog onzeker hoe de drinkwatervraag in de komende jaren zal veranderen.

SIMDEUM bevat geen model voor hoe de drinkwatervraag verandert, of hoe consumenten kunnen worden beïnvloed in hun waterverbruik. SIMDEUM is toegepast voor allerlei soorten vraagstukken. Tabel 6 bevat een lijst van voorbeelden waar SIMDEUM voor is toegepast, en waar we goede mogelijkheden zien van SIMDEUM, en maakt witte vlekken duidelijk. Deze lijst kan ter inspiratie dienen voor de toepassing van een ABM voor waterverbruik.

Tabel 6. Voorbeelden van toepassingen van SIMDEUM, deels gebaseerd op (Blokker et al. 2017). DWDS: drinkwaterdistributiesysteem, DWI: drinkwaterinstallatie. N.B. in deze lijst zijn de onderzoeken weggelaten die gericht zijn om validatie van SIMDEUM.

Toepassing	Van bron tot tap - plus gebruikte modellen	Soort onderzoek
Modelleren waterkwantiteit	DWDS - <i>Hydraulisch netwerkmodel (EPS): EPANET, Synergi, InfoWorks; (unsteady flow): model Piazza, WANDA</i>	Maximale stroomsnelheden
		Omkeringen van stroomrichting
		Lek zoeken (SIMDEUM als lekvrije referentie)
		Transients
		Verblijftijden
	DWI - <i>EPANET</i>	T.b.v. modellering waterkwaliteit
	Binnenriolering - <i>DRAINET (nog niet toegepast)</i>	
Modelleren waterkwaliteit	Riolering - <i>Hydraulisch netwerkmodel: InfoWorks, SOBEK</i>	Verblijftijd
	DWDS - <i>EPANET, EPANET-MSX, Unsteady flow model met dispersie/diffusie</i>	Chloorafbraak
		Stoftransport (incl. dispersie)
		Temperatuur
		Nagroeï bacteriën
		Sensoren, backtracing
		Sediment
	DWI - <i>EPANET, EPANET-MSX</i>	Temperatuur
		Loodafgifte
	Binnenriolering - <i>DRAINET (nog niet toegepast)</i>	(toevoegen van organisch keukenafval)
Ontwerp	Riolering - <i>InfoWorks, SOBEK</i>	Temperatuur
		Nutriënten (N, P, COD, TSS)
		Virus (COVID 19)
	DWDS	Diameters in zelfreinigende netwerken
	DWI	Diameters koudwaterleidingen
		Diameters warmwaterleidingen en boilertanks
		Grijswater (tankgrootte)
Scenariostudies		Toevoegen van organisch keukenafval
	Effect op verbruik	Effect van regio (verschillende regio's in Nederland, VK, Milford (Ohio), Vlaanderen)
		Effect van grootschalige uitval energie en te lage druk
		Effect van waterbesparing, waterhergebruik, inzet regenwater
	Effect van ander verbruik op	Ontwerpparameters
		Robuustheid van DWDS
		Robuustheid van riolering
Onderzoeks- doeleinden (virtuele) meetset	Waterkwaliteit i.r.t. hydraulische omstandigheden (vaststellen zelfreinigende snelheid)	
	Kans op lekdetectie, gegeven normale variatie van drukken	
	Verbeteren SIMDEUM invoerparameters m.b.v. digitale watermeters	
	Lab set-up DWI (onderzoek temperatuur en microbiologische parameters)	
	Lab set-up DWDS (onderzoek biofilm)	

3.4 SIMDEUM in relatie tot ABM

SIMDEUM is niet als agentgebaseerd model beschreven, en is ook niet zo opgezet. Om het vergelijk met ABM maken wordt hier kort de beschrijving uit § 2.1 herhaald: Drie belangrijke bouwstenen die ABM kenmerken zijn: een set van agenten, een interactiemodule en een omgeving. Het gedrag van agenten wordt beïnvloed door eigen (persoonlijke) kenmerken, andere agenten, de omgeving en voorkomende situaties. De elementen van SIMDEUM zijn geen zelfstandige entiteiten (agenten) die onder invloed van anderen en hun omgeving beslissingen nemen, en waarvan de eigenschappen (of kenmerken) zich over de tijd ontwikkelen. SIMDEUM simuleert waterverbruik in een woning – en door aggregatie kan het verbruik van een woongebouw, straat of woonwijk of stad worden verkregen – terwijl er geen interactie is tussen leden van een huishouden of tussen huishoudens. De achterliggende invloedsfactoren die waterverbruik over de tijd en over geografische locaties beïnvloeden (zoals demografie, het weer, campagnes, subsidies, etc.) zijn niet in SIMDEUM opgenomen. De kracht van een ABM voor de drinkwatervraag ten opzichte van SIMDEUM is dat met een ABM kan worden onderzocht hoe sociale interacties tot gedragsveranderingen en daarmee veranderingen in het waterverbruik leiden. Daarbij valt te denken aan veranderingen in leefpatronen (thuis werken, minder vaak wassen of douchen), en aan voorlichtingscampagnes, mond-tot-mondreclame, competitief gedrag, etc.

In SIMDEUM zijn keuzes gemaakt m.b.t. de parameters en interactie die wel of niet meegenomen wordt. Dat is gedaan met het oog op de beoogde toepassing, voornamelijk lokale hydraulische omstandigheden in het distributienet. Voor andere toepassingen (al dan niet als ABM) zouden logischerwijs andere keuzes gemaakt worden, bijvoorbeeld:

- Een toepassing die meer gericht is op transportleidingen (primaire of secundaire hoofdstructuur) en de ontwikkeling over de tijd behoeft een model waarin mensen als ze niet thuis zijn ergens anders zijn (of onderweg ergens heen) waar ze ook water kunnen verbruiken. De invloed van de omgeving zou dan relevant zijn, bijv. omdat scholen, winkels, horeca etc. door mensen uit de buurt kunnen worden bezocht, en een bewoner dan niet thuis, maar wel in de wijk water verbruikt.
- Een toepassing die meer gericht is op wat er in de drinkwaterinstallatie gebeurt zou bijv. meer interactie tussen huisgenoten en tussen bewoner en de installatie willen modelleren.
- Een toepassing die meer gericht is op hoe verschillende SEPTED factoren het waterverbruik beïnvloeden zou de invloed van omgeving en andere agenten expliciet modelleren.

Verschillende toepassingen vragen dus een eigen perspectief. Voor een nieuw perspectief is het niet altijd nodig om een heel nieuw model te ontwikkelen, mogelijk kunnen bestaande modellen worden aangepast zodat ze ook in andere (nieuwe) toepassingen kunnen worden gebruikt. Om te beoordelen wat de mogelijkheden zijn voor de inzet van SIMDEUM in andere toepassingen, wordt SIMDEUM in het licht van de kenmerken van een ABM beschouwd (Tabel 7). Dit is een nieuw perspectief in het beschouwen van SIMDEUM. De vergelijking tussen SIMDEUM en ABM is niet bedoeld om SIMDEUM te diskwalificeren als ABM, noch om te suggereren dat met enkele aanpassingen in SIMDEUM er geen reden is voor een nieuw ABM voor de drinkwatervraag.

Tabel 7. Beschouwing van ABM kenmerken (https://nl.wikipedia.org/wiki/Agent-gebaseerd_model) en SIMDEUM. N.B. emergentie is een eigenschap van het grotere systeem dat voortkomt uit, maar niet is opgenomen in, het gedrag en de interactie van de individuele leden.

Algemene beschrijving, ABM kenmerken		SIMDEUM (nu)	
	Voldoet aan ABM kenmerk	Toelichting	Aanpassingen nodig om aan kenmerk te voldoen
Gebruik van computersimulaties	+	Simulaties in Matlab	
Gebruik van agenten	+/-	In SIMDEUM kan zowel het tappunt als de bewoner als agent worden gezien die bepalen wanneer, hoe lang en hoeveel water wordt getapt. Op simulatieniveau is het tappunt de "agent", er wordt per tappunt bekeken wanneer een bewoner deze gebruikt.	Keuze voor bewoner als agent; er wordt dan per bewoner bepaald wanneer deze welk tappunt gebruikt.
Agenten hebben een bepaalde doelstelling, en gedragen zich rationeel en autonoom. Een systeem is autonoom als zijn gedrag wordt bepaald door zijn eigen ervaringen. Het systeem kan lerend gedrag vertonen.	-	Regels die het gedrag en de interactie van bewoners beschrijven zijn niet gedefinieerd. De bewoner is niet autonoom noch zelflerend. Als in het model 30 minuten tussen opstaan en vertrek van huis zit is het toch mogelijk dat 10 minuten voor vertrek de bewoner nog 10 minuten (of zelfs langer) gaat douchen.	Regels kunnen worden afgeleid van dagbesteding, klantperspectieven (gezondheid, duurzaamheid, comfort,...) en aan sociale normen (niet stinken → tanden poetsen, wassen, douchen). Zelflerend zou zijn dat als persoon A om 9.00 u op zijn werk moet zijn dat hij dan om 8.00 u in de auto stapt en dan om 7.00 u moet opstaan om nog 10 minuten te kunnen douchen, te ontbijten en zijn kinderen te laten douchen.
In de modellen worden elementen van complexe systemen, de speltheorie, emergentie, de computationele sociologie, multi-agent systemen en evolutionair programmeren gecombineerd.	+	computationele sociologie (opstaan/naar bed, vertrek/thuiskomst en waterverbruik) en multi-agent systemen (meerdere bewoners en tappunten, met beperkte interactie)	Speltheorie is de strategische beschouwing van keuzes en interacties. Wanneer dit wordt toegevoegd kan er ook sprake zijn van emergentie (uitkomsten die er niet expliciet erin zijn gestopt) als een agent een afweging maakt tussen verschillende keuzes (bijv. aanschaf van zuinig toilet o.i.v. prijs, verhuisplannen, omgeving, etc.)
Monte-Carlosimulaties met als resultaat verdelingsfunctie t.b.v. statistische analyse	+		
Simulaties van gelijktijdig werken van verschillende agenten	+	Tappunten kunnen gelijktijdig worden gebruikt in een woning. Twee bewoners kunnen niet tegelijk hetzelfde tappunt aanzetten. Idem voor een verzameling van woningen, maar die worden onafhankelijk van elkaar gesimuleerd.	

Algemene beschrijving, ABM kenmerken	SIMDEUM (nu)		
	Voldoet aan ABM kenmerk	Toelichting	Aanpassingen nodig om aan kenmerk te voldoen
Doel is het reconstrueren en voorspellen van complexe verschijnselen. Er wordt emergentie van het microniveau overgedragen op het macroniveau. Het gedrag van complexe systemen als geheel is het resultaat van de wisselwerking tussen de delen.	-	Gedrag van de agenten leidt tot een watervraagpatroon als som van alle individuele gedragingen. De gelijktijdigheid van waterverbruik kan nauwelijks beschouwd worden als emergentie.	Interactie tussen agenten onderling en met de omgeving en een afweging van keuzes is een vereiste om tot emergentie te kunnen komen.
In de meeste computationele modellen wordt bij het beschrijven van systemen een stationaire toestand of het laveren tussen enkele stationaire toestanden als uitgangspunt genomen. ABM geven daarentegen met simpele uitgangspunten complex en interessanter gedrag als gevolg van wisselwerking tussen objecten (emergentie).	+/-	Bewoners gebruiken op ieder moment van de dag wel of niet een tappunt. De kans hangt af van beperkte agentmodellen: 1. het slaap-waakritme en aanwezigheid thuis; 2. gedrag / voorkeuren in waterverbruik (frequentie, duur, volumestroom) 3. installatie: gelijktijdig gebruik warm tapwater mogelijk of niet – en dus ook van gebruik aan andere tappunten en van andere gebruikers 4. (nog) niet van hun gebruik van andere tappunten (indirect wel van warm tapwater) 5. Gedragspatronen van bewoners van een huis zijn niet met elkaar verbonden	Meer interactie tussen bewoners (punt 5, incl. eventueel bezoek van en naar de woning); meer interactie met installatie (druk, wachttijd warm water – punt 3); meer de bewoner als agent betekent dat deze niet gelijktijdig kan douchen en de keukenkraan opendoen bijv. (punt 4).
De agenten zijn (enigszins) intelligent en vertonen doelgericht gedrag.	-	De acties van de agenten zijn geen intelligente keuzes. Keuzes worden wel beïnvloed door leeftijd, sekse, huishoudgrootte.	Zie punt 4 hierboven, maar ook de keuze voor het wel of niet aanschaffen van een bepaald apparaat (vaatwasser bijv.)
Agenten hebben een plaats in de tijd en ruimte en maken onderdeel uit van netwerken.	-	Bewoners zijn thuis (of weg), variatie over de tijd (tijd van de dag), en gebruikers opereren onafhankelijk van elkaar.	Meer interactie tussen gebruikers, of met andere agenten (campagnes voor bewust met water omgaan bijv.; oproep tot thuis werken in Coronatijd). Als agenten niet thuis zijn, zijn ze ergens anders (kantoor, restaurant etc.) waar ze mogelijk water verbruiken.

Algemene beschrijving, ABM kenmerken	SIMDEUM (nu)		
	Voldoet aan ABM kenmerk	Toelichting	Aanpassingen nodig om aan kenmerk te voldoen
Zowel de locatie als het gedrag van de agenten wordt ingevoerd in de vorm van een algoritme.	+/-	Gedrag wel, locatie zeer beperkt.	Een agent is “in de keuken” of “in de badkamer”. Het is dan ook mogelijk om bijv. handen wassen na toiletbezoek te modelleren. Wanneer een agent gaat sporten kan hij buitenshuis douchen, in plaats van thuis.
Het modelleerproces zelf heeft min of meer de vorm van een inductie, aangezien de modelleur van tevoren enkele veronderstellingen doet die er voor de gegeven situatie het meest toe doen.	+	Veronderstelling dat kans op huishoudelijk waterverbruik groter is bij wijziging in toestand (thuis/niet thuis, slaap/waak)	Factoren die bepalen welke waterverbruikende apparaten worden aangeschaft zoals invloed van subsidie.

4 ABM voor toekomstige watervraag t.b.v. ontwerp robuuste streefstructuur

4.1 De beoogde toepassing

De aanleiding voor dit onderzoek naar ABM is de vraag of een ABM goede mogelijkheden biedt voor het beschrijven van veranderingen in de drinkwatervraag over tijd en ruimte zodat een streefstructuur kan worden ontworpen met meer vertrouwen in de aannames met betrekking tot de drinkwatervraag. De beoogde toepassing van een ABM is het ontwerp van een robuust leidingnet dat goed presteert over zijn gehele levensduur, d.w.z. dat het leidingnet zodanig wordt ontworpen dat de drinkwatervraag, de druk en de drinkwaterkwaliteit de gegarandeerd worden gedurende de levensduur van het systeem (leidingnet en de wijk die het voedt): een toekomstbestendig leidingnet. Omdat druk (ten gevolge van volumestroom door leidingen) en waterkwaliteit (t.g.v. opwerveling van sediment onder invloed van stroomsnelheid tijdens de piekwatervraag, en o.i.v. de verblijftijd) sterk samenhangen met de locatie en grootte van de drinkwatervraag, kan de beoogde toepassing terug worden gebracht tot “modelleer de drinkwatervraag in een bepaald gebied op een bepaalde tijdschaal en over een bepaalde tijdshorizon”. In onze toepassing geldt:

- het gebied is een voorzieningsgebied, met huishoudelijk en niet-huishoudelijk verbruik verdeeld over de stedelijke plattegrond (Pieterse-Quirijns en van de Roer 2013);
- de tijdschaal zal kort moeten zijn (Agudelo-Vera en Blokker 2016a) om de piekwatervraag goed in beeld te krijgen (10 sec) en om de verblijftijd goed te kunnen modelleren (5 minuten);
- de tijdshorizon zal gelijk aan de levensduur van een leidingnet (ca. 50-80 jaar) moeten zijn (Vertommen et al. 2020).

De huidige oplossing is dat het ontwerpen van het tertiaire net, secundaire plus primaire net en productielocatie met andere modellen worden uitgevoerd.

- Het tertiaire net wordt ontworpen met DiVerDi (Blokker 2012). Belangrijkste criteria zijn dat de zelfreinigende snelheid regelmatig wordt gehaald en dat bij een piekvraag van eens per jaar de druk nog voldoende hoog is. Hier is veel detail nodig (kleine tijdschaal en ruimtelijke schaal); maar omdat het netwerk vertakt is, is het qua berekenen van druk relatief eenvoudig. Op basis van SIMDEUM worden maximale volumestromen bepaald, en dit kan voor allerlei toekomstscenario's, die vervolgens in DiVerDi worden ingebracht.
- Het secundaire plus primaire net wordt ontworpen (als streefstructuur) met behulp van een hydraulisch leidingnetmodel plus eventueel een optimalisatietool. Belangrijkste criteria zijn leveringscontinuïteit en de drukeis, zodat vermaasde structuren nodig zijn (en een hydraulisch netwerkmodel nodig is om de druk te kunnen berekenen). De inhoud van het leidingnet wordt vaak als extra criterium gebruikt bij het ontwerp, omdat een kleinere inhoud lagere aanlegkosten betekent en een kortere verblijftijd (en daarmee een grotere kans op goede waterkwaliteit) (Agudelo-Vera en Blokker 2016b). De ruimtelijke schaal van verbruik is relatief grof (bijv. 100 woningen per knoop), en de benodigde tijdschaal is ook wat langer (15 minuten of 1 uur). Hier is onduidelijkheid hoe de toekomstige drinkwatervraag het beste kan worden meegenomen (Agudelo-Vera en Blokker 2016a; Vertommen et al. 2020), zowel qua ontwikkelingen over de tijd per soort gebruiker als hoe de gebruikers ruimtelijk verdeeld zullen zijn over de tijd. Voor het toekomstige waterverbruik is zowel gekeken naar scenario's die met behulp van SIMDEUM zijn opgesteld als voorspellingen op basis van historische data. In beide gevallen bleek het erg lastig om ook nog stedelijke toekomstplannen erbij te betrekken. Dat kwam vooral doordat in het kader van een onderzoeksproject de waterbedrijven geen informatie hebben opgehaald van de stedelijke plannen. Dit zal wel noodzakelijk zijn in een toekomstbestendig ontwerp.

- Voor het ontwerp van een waterproductiestation is ook kennis van de toekomstige drinkwatervraag nodig. De ruimtelijke schaal is dan zeer grof (het hele voorzieningsgebied), en de tijdschaal is ook groot (per jaar voor de vergunningscapaciteit en piekdag voor het ontwerp van reservoirs). Vaak wordt de voorspelling van het drinkwaterverbruik gedaan op basis van historische data, eventueel aangevuld met invloedsfactoren zoals het weer of vakantiegegevens (Vonk et al. 2017).

De grootste uitdaging lijkt te liggen bij het ontwerp van de streefstructuur van secundaire en primaire net. Tegelijkertijd kan ook opgemerkt worden dat op dit moment de uitgangspunten van de toekomstige watervraag in de ontwerpvragestukken van alle bovengenoemde infrastructuur niet dezelfde zijn doordat heel andere modellen worden toegepast. Een tweede uitdaging is daarom op een methodiek te hebben die ook op een niveau dieper dat het secundaire net (nl. het tertiaire net) en een niveau hoger (productie) een zinvolle bijdrage kan leveren aan het ontwerpproces.

Voor het ontwerp van de streefstructuren is behoefte aan een model voor de ontwikkeling van de drinkwatervraag over de tijd (50 jaar) en ruimte (op stadniveau) met een resolutie van ca. 1 uur en een cluster van (een equivalent van) ca. 100 woningen (gem. iets meer dan 1m³/h volgens huidige verbruik). De factoren die verbruik doen toenemen, afnemen, verplaatsen over de dag of over de ruimte moeten expliciet meegenomen kunnen worden zodat verschillende scenario's kunnen worden doorgerekend. Een koppeling met een transportmodel (hydraulisch netwerkmodel) is nodig om de consequenties voor ontwerp (Vertommen et al. 2020) en/of prestatie van het leidingnet (Agudelo-Vera en Blokker 2016a) te kunnen bepalen. Voor het kunnen opschalen of afschalen van zo'n model voor respectievelijk het tertiaire net en de productielocatie is het nodig dat de invloedsfactoren ook vertaald kunnen worden naar invoergegevens voor SIMDEUM (Vertommen et al. 2018), respectievelijk modellen voor de drinkwatervraag van een voorzieningsgebied (EDWARD, (Vonk et al. 2017) of bijv. OPIR (Bakker et al. 2013)).

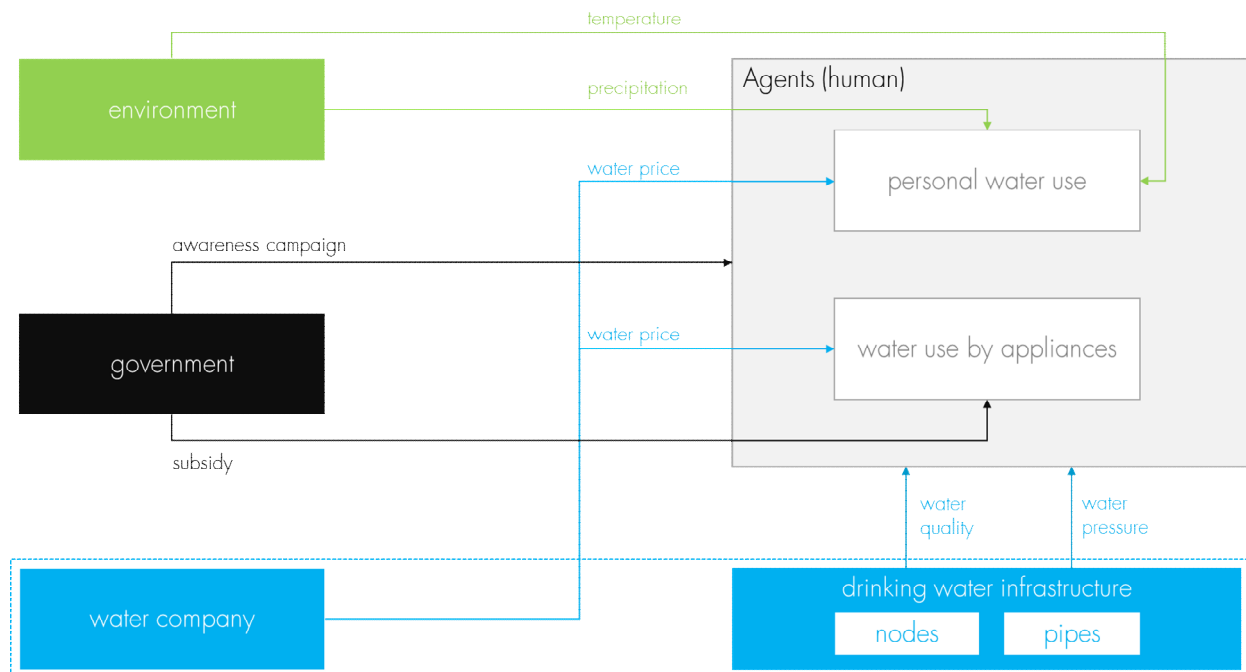
Een belangrijk kenmerk van ontwerpen voor een lange tijdshorizon is dat de toekomst onzeker is. Door Monte Carlo simulaties uit te voeren is het mogelijk om een bandbreedte van de toekomstige watervraag te bepalen, inclusief de kans op bepaalde scenario's. In optimalisatieproblemen die ontwerpen op robuustheid en/of regret zijn dit soort watervraagscenario's inclusief de kans zeer goed bruikbaar. In wetenschappelijke artikelen wordt met dit soort zaken geëxperimenteerd voor watervraagscenario's, maar ook voor scenario's met betrekking tot brand en leidingbreuken (Cunha en Sousa 2010; Marques et al. 2012; Marques et al. 2015). Deze manier van ontwerpen betekent dat de relatie tussen de prestatie van een leidingnet (verschillende prestatie-indicatoren en eisen zijn mogelijk) en de drinkwatervraag helder gemaakt kan worden.

Een aanpak met een ABM lijkt hier geëigend, omdat zowel de ontwikkeling over de tijd en over de ruimte belangrijk zijn, en de watervraag uiteindelijk bepaald wordt door personen (handelende entiteiten, agents). In de volgende paragraaf wordt een eerste illustratie gegeven van zo'n ABM. Vervolgens wordt ingezoomd op de onderliggende modellen die nodig zijn (beschikbaar of nog te ontwikkelen) en de data die nodig is. Op basis hiervan worden voor- en nadelen van deze aanpak benoemd.

4.2 TUD aanpak als illustratie

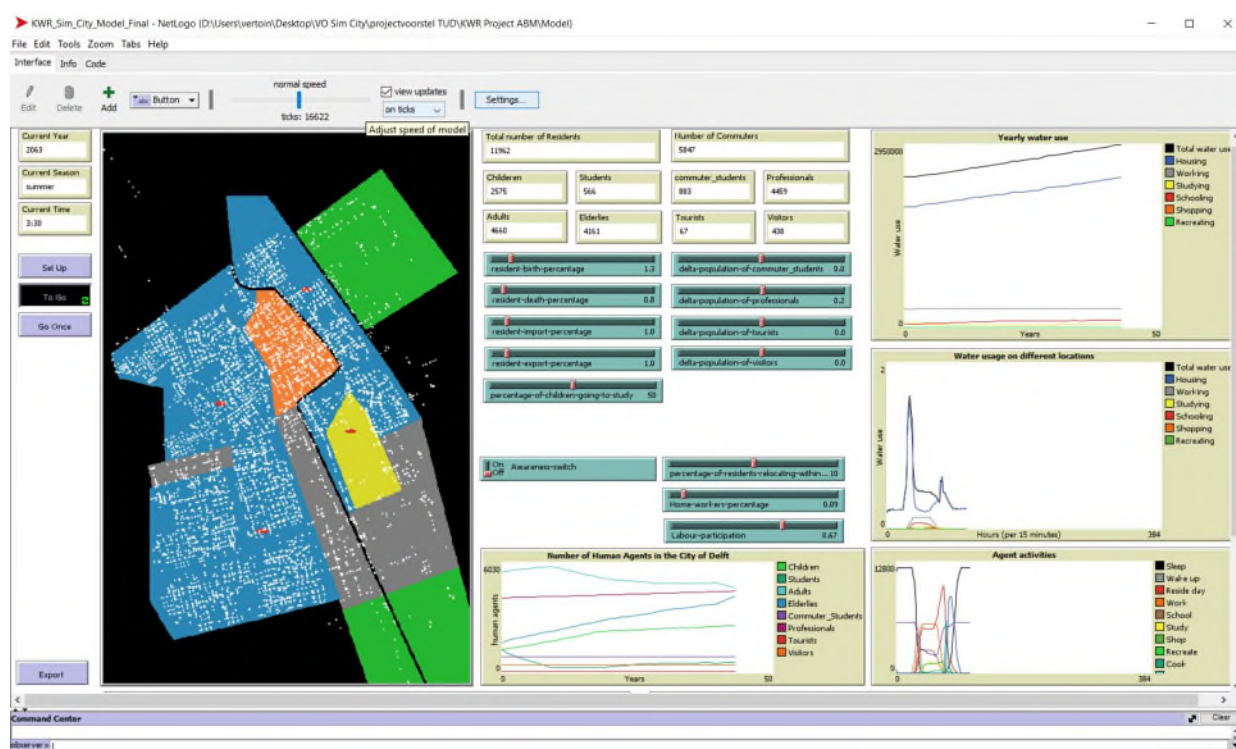
Tussen november 2019 en februari 2020 hebben in het kader van de cursus 'Advanced Agent Based Modeling', onder begeleiding van Professor Igor Nikolic (Faculteit van Techniek, Bestuur en Management, TU Delft) twee studenten een project met KWR uitgevoerd. De studenten hebben een ABM ontwikkeld voor een levensechte casestudie, met als doel de toekomstige ontwikkeling en bijhorende watervraag voor een Nederlandse stad (Delft) te simuleren (zie opdracht in Bijlage I). De uitkomsten van de samenwerking met de TU Delft zijn een mooie illustratie van hoe een ABM voor de drinkwatersector eruit kan zien.

De studenten (Maarten Berendschot en Bernard Luttikhuisen) hebben als eerste stap de opdracht beschreven aan de hand van de kenmerkende bouwstenen (agenten, interactiemodule en omgeving). Figuur 3 bevat een schema van de agenten en onderliggende relaties. Wat betreft menselijke agenten zijn acht verschillende types gedefinieerd: inwoners (kinderen, studenten, volwassenen en senioren), forenzen (studenten en werknemers), toeristen (overnachtingen) en bezoekers (enkel gedurende de dag aanwezig).



Figuur 3. Agenten en onderlinge relaties, geïdentificeerd door de studenten van de TU Delft.

De volgende stap was om het ABM te bouwen. Hiervoor hebben de studenten NetLogo gebruikt. Zij hebben clusters van verbruik gedefinieerd: huishoudens, onderwijs, kantoorwerk, vrije tijd (winkelen, sporten, cultuur); reistijd is in eerste instantie niet meegenomen. Iedere geografische locatie in de casestudie bevat een cluster. In het model bevinden zich agenten: mensen die water kunnen verbruiken. De agenten bevinden zich op elk moment van de dag in een van de clusters (waarbij ook agenten die niet in Delft wonen voor onderwijs, werk of vrije tijd naar Delft kunnen komen, en agenten die wel in Delft wonen voor andere activiteiten de stad kunnen verlaten). Voor het waterverbruik is niet expliciet gebruik gemaakt van SIMDEUM, maar is wel gebruik gemaakt van de inzichten uit SIMDEUM, zoals het waterverbruik per persoon, en de relatie tussen opstaan/naar bed gaan en waterverbruik. In de beperkte tijd die de studenten hadden hebben ze zich vooral gefocust op de ontwikkeling van de demografie en de ruimtelijke verdeling van het waterverbruik, dus waar bevinden zich de agenten, en hoe dit over de loop van jaren kan veranderen. De gebruiker van het model kan zelf de percentages voor o.a. geboorte, sterfte, migratie en arbeidsparticipatie aanpassen. In dit model is het ook mogelijk om voorkeuren m.b.t. waterverbruik te laten variëren over de tijd, zo is het mogelijk om bewustwording aan of uit te zetten, en om en het percentage thuiswerkers te veranderen. Beleid in de vorm van subsidies en zuinige apparatuur is nog niet in het model opgenomen, noch de interactie tussen agenten (d.w.z. agenten beïnvloeden elkaar niet in het model). Het effect van het weer (of klimaatverandering) op waterverbruik is nog niet geïmplementeerd. De studenten hebben aannames gemaakt voor de temperatuur op de verschillende dagen, maar hebben daar verder niets mee gedaan. Op lente- en zomerdagen is de kans op sproeien 10% en op herfst en winterdagen is deze 0%, bijvoorbeeld. Figuur 4 bevat een schermafdruck van het ABM in NetLogo. De watervraag op vier verschillende type dagen (lente, zomer, herfst en winter, met verschillende kansen op het sproeien van de tuin) is voor de periode 2020-2070 gesimuleerd, met een tijdstap van 15 minuten.



Figuur 4. ABM voor de toekomstige ontwikkeling en bijhorende watervraag voor Delft, ontwikkeld in NetLogo door Bernard Luttkhuizen en Maarten Berendschot van de TU Delft. Het model bepaald de watervraag voor de komende 50 jaar o.b.v. demografie, landgebruik en beleid. Links boven is informatie over het jaar, tijdstap en type dag dat wordt gemodelleerd. Rechts daarvan is een kaart van Delft, waarin de kleuren het landgebruik aangeven: woningen (blauw), werk (grijs), studie (geel), winkels en horeca (oranje), scholen (rood) en recreatie (groen). Rechts van de kaart is bovenin informatie over de demografie (aantal inwoners en leeftijdsindeling, bezoekers en toeristen), onderaan kunnen via schuifjes verschillende parameters worden bijgesteld (o.a. bewustzijn, percentage thuiswerkers, sterfte). Midden onder en rechts zijn verschillende grafieken zoals het verloop van het aantal agenten in het system over de tijd heen, totaal jaarlijkse watervraag, watervraagpatronen en activiteiten van de agenten.

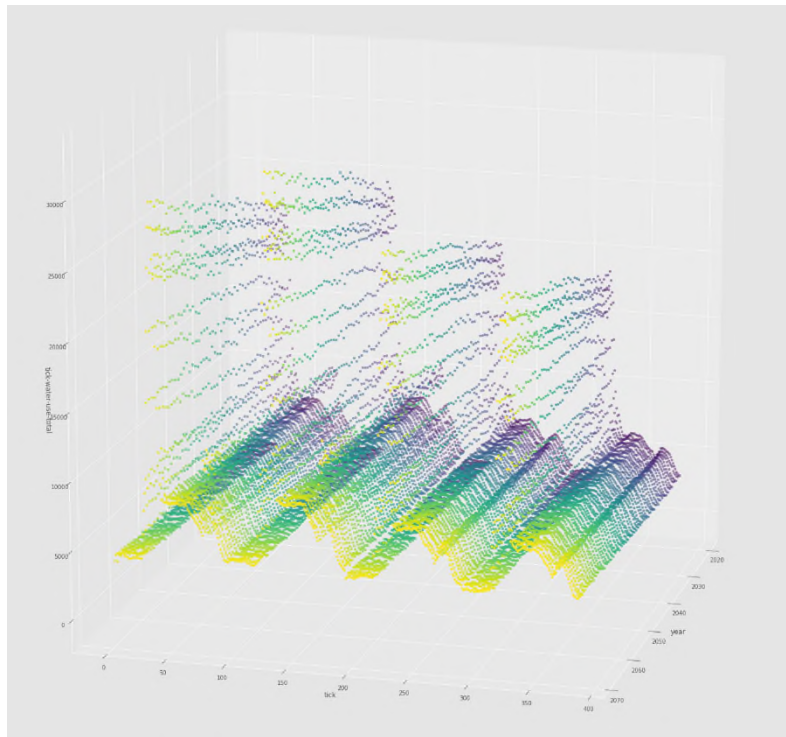
De studenten hebben hun best gedaan om de uitvoer van het model te visualiseren. Er was geen koppeling met een hydraulisch netwerkmodel, dus de uitvoer is vooral weergegeven als verbruikspatronen per cluster (niet per geografische locatie) en per jaar. Hun ABM is heel dynamisch, en de illustratie van de uitvoer werkt het beste door zelf aan wat invoerparameters te sleutelen en de effecten te bekijken. In Figuur 5 en Figuur 6 zijn enkele schermafdrucken weergegeven. We willen nogmaals benadrukken dat de rekenresultaten slechts als illustratie bedoeld zijn en niet inhoudelijke betekenisvol.

Een groot deel van de inspanning ging zitten in een gevoeligheidsanalyse en consistentietests van het model (d.w.z. dat aanpassingen in een parameter leidt tot verwachte veranderingen in de uitvoer). Er was daardoor beperkte tijd voor het doorrekenen van veel scenario's en de resultaten daarvan te presenteren.

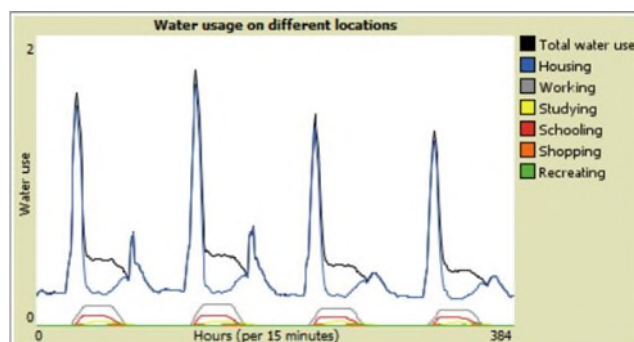
In drie maanden een ABM vanaf nul opbouwen was voor de studenten een goede leerschool. Een werkend model met functionaliteit die zaken toevoegt aan SIMDEUM en EPANET heeft het niet opgeleverd. Het heeft wel een aantal zaken duidelijk gemaakt:

- SIMDEUM heeft heel veel functionaliteit die niet zomaar na te bouwen is.
- SIMDEUM (de Matlabversie) is niet zomaar aan een ABM te koppelen.
- Het simuleren van watervverbruik in een ABM is rekenintensief. Om het behapbaar te houden is gekozen voor het simuleren van verbruik per cluster (per soort agent in een cluster) en per 15 minuten, en vier dagpatronen per jaar.
 - N.B. SIMDEUM rekent per tappunt, per seconde en vele dagpatronen per jaar. Om dit ruimtelijk te verdelen gebruiken we een hydraulisch netwerkmodel waar we SIMDEUM-patronen in opnemen.
 - Het is niet op voorhand duidelijk dat een ABM zonder transportmodel (hydraulisch netwerkmodel) meerwaarde biedt.

- Waar mensen zich bevinden is op basis van aannames en eigen inschattingen geprogrammeerd. Data van het tijdsbestedingsonderzoek (Sociaal en Cultureel Planbureau 2005), mobiliteitsonderzoek of bijv. mobiele telefoonlocaties (Castro-Gama et al. 2020) zouden een belangrijke toegevoegde waarde kunnen hebben. Ook de data van CBS, en de modellen waarmee CBS toekomstscenario's opstelt zouden interessant kunnen zijn om mee te nemen in een ABM.



Figuur 5. Patronen voor de watervraag van 4 type dagen in het jaar (op de y-as: dag in de lente, zomer, herfst en winter) voor de komende 50 jaar (x-as).



Figuur 6. Watervraag totaal en per cluster voor de 4 type dagen in het jaar (lente, zomer, herfst en winter).

4.3 Benodigde modellen

De submodellen die nodig zijn voor een ABM m.b.t. de ontwikkeling van de drinkwatervraag over de tijd (50 jaar) en ruimte (op stadniveau) met een resolutie van ca. 1 uur en een cluster van (een equivalent van) ca. 100 woningen (gem. iets meer dan 1m³/h volgens huidige verbruik), inclusief de factoren die verbruik doen toenemen, afnemen, verplaatsen over de dag of over de ruimte zijn de volgende:

- 1 Basis: definitie van:
 - a. Agenten, namelijk mensen die activiteiten ontplooiën en water kunnen verbruiken. Wellicht is het zinvol om ook andere agenten te definiëren, zoals bedrijven, overheid, etc. Dit hangt af van hoe submodellen 6 en 7 worden ingevuld.
 - b. Waterverbruikende apparatuur, met karakteristiek verbruik per toepassing.
 - c. Locaties, die worden gekarakteriseerd als “thuis”, “school”, “werk” (eventueel met onderverdeling naar soorten industrie), “vrije tijd” (eventueel met onderverdeling naar sport, uit eten, theater/film, winkelen, familiebezoek, ...).
- 2 Waterverbruik: een model dat het waterverbruik over de dag kan simuleren (per uur) op basis van locatie van agenten, en hun activiteit (dat kan samenhangen met het seizoen), en de aanwezigheid van waterverbruikende apparatuur (dat ook weer kan afhangen van de aanwezigheid van een tuin bijv.).
- 3 Locatie: een model dat de locatie van agenten over de dag beschrijft, incl. transport.
- 4 Demografische ontwikkeling: een model dat beschrijft hoe de agenten over de jaren veranderen: geboorte, leeftijd, sterfte, paarvorming en –ontbinding, verhuizing.
- 5 Stedelijke ontwikkeling: een model dat beschrijft hoe karakteristieke locaties over de stad verspreid zijn, en hoe dit over de jaren verandert.
- 6 Keuze voor waterverbruikende apparatuur: een model dat de aanschaf van waterverbruikende apparatuur beschrijft op basis van verschillende soorten input: prijs, duurzaamheid, bestaande apparatuur, verbouwing (badkamer, keuken), marketing acties, etc.
- 7 Keuze voor (en invloed op) gedrag m.b.t. waterverbruik: een model dat het gedrag (hoe lang, wanneer of waar douchen, etc.) beschrijft op basis van verschillende soorten input: prijs, bewustwording (al dan niet m.b.v. een digitale watermeter), status werk, wellicht psychologische factoren (zoals attitudes, intenties, sociale normen), of er een interventie loopt (en het soort interventie, bijv. vergelijken met buurtgenoten), etc.; en hoe het gedrag kan worden beïnvloed door onderlinge interactie en door andersoortige entiteiten (overheid, organisaties).

Het model van de TUD-studenten bestond uit (1) een basismodel (met een beperkt aantal type locaties), (2) een waterverbruikmodel en (3) een beperkt locatiemodel (namelijk zonder transport, en een zeer grove ruimtelijke resolutie). De modellen 4 en 5 ontbraken, en modellen 6 en 7 waren impliciet in scenario's opgenomen (bijv. een verandering van de huidige toiletten naar waterloze toiletten).

Tabel 8 doet enkele suggesties voor modellen die in de literatuur beschreven zijn en hier toegepast kunnen worden. De basis zal het beste opnieuw worden opgebouwd, waarbij wel inspiratie kan worden opgedaan bij in de literatuur beschreven modellen. De keuze voor de submodellen zal ook de invulling van het basismodel beïnvloeden. Waar beschikbaar is er een voorkeur voor Nederlandse modellen, omdat deze al goed passen bij de data die beschikbaar is in de Nederlandse context. Modellen die beschrijven hoe gedrag m.b.t. waterverbruik kan worden beïnvloed zijn er ook, maar wat nog lijkt te ontbreken zijn modellen die verschillende gedragsveranderingstechnieken naast elkaar meenemen. Hoeveel invloed een campagne heeft wordt namelijk bepaald door de effectiviteit van de toegepaste gedragsveranderingstechniek. Een campagne die gericht is op kennisoverdracht is minder effectief dan een campagne die bijvoorbeeld ook gericht is op sociale normen, nudges, of het geven van gerichte feedback.

Omdat onze toepassing gericht is op waterverbruik, is het acceptabel om submodellen op dit vlak (modellen 2, 6, 7) te ontwikkelen of uit te breiden; het lijkt echter niet proportioneel om de andere submodellen (modellen 3, 4, 5) zelf te ontwikkelen. In Nederland zijn CBS, PBL, RWS of universitaire onderzoeksgroepen meer logische ontwikkelaars voor dat soort modellen.

Tabel 8. Submodellen voor een ABM m.b.t. de ontwikkeling van de drinkwatervraag over de tijd en ruimte, inclusief de factoren die verbruik doen toenemen, afnemen, verplaatsen over de dag of over de ruimte.

Model	Opties numerieke modellen	Opmerkingen / aandachtspunten
1 Basis	Naar eigen smaak nieuw op te zetten, inspiratie uit:	Keuze voor platform kan afhangen van overige modellen.
	Agent + activiteit	Zorg voor interactie tussen agenten (m.b.t. activiteiten en locatie)
	Locatie	
	Waterverbruikende apparatuur	
2 Waterverbruik	SIMDEUM	aangepast SIMDEUM zodat verbruikers de agenten zijn, en er interactie is tussen agenten en waterverbruikende apparatuur
3 Locatie	ALBATROSS	
4 Demografische ontwikkeling	CBS-model (Regionale bevolkings- en huishoudensprognose 2019–2050 van het Planbureau voor de Leefomgeving en het Centraal Bureau voor de Statistiek)	Op regioniveau, dit model is geen ABM
	ILUTE	Op niveau van agent (ouder worden, kinderen krijgen, verhuizen, sterven, etc.)
5 Stedelijke ontwikkeling	HI-LIFE Fontaine en Rounsevell (2009) of ILUTE	
6 Keuze voor water-verbruikende apparatuur	Model van (Schwarz en Ernst 2009)	Leefstijlen toevoegen aan agenten
	Model van (Galán et al. 2009)	Type woning en milieubewustzijn toevoegen aan model
	Modellen van (Athanasiadis et al. 2005; Chu et al. 2009)	Econometrische modellen
7 Keuze voor gedrag m.b.t (huishoudelijk) waterverbruik	Model van Linkola et al. (Linkola et al. 2013)	Focus op zorgen over het milieu, toepassing van watermeters, campagnes, gewoonten m.b.t. hygiëne, wassen, etc.
	Pilot model van Boerema et al. (Boerema et al.)	Focus waterbesparende campagnes, de introductie van waterrestricties en langere perioden van waterschaarste
	Modellen van Rixon et al. (Rixon et al. 2006)	Focus op sociale interactie

4.4 Benodigde data

De submodellen uit de vorige paragraaf moeten worden gevoed met data. De data hebben verschillende functies:

- a Initialisatie van de modellen: data over de huidige situatie.
- b Validatie en/of kalibratie van de modellen: historische data.
- c Modelbouw: beschrijving van de relatie tussen twee of meer variabelen (bijv. de relatie tussen gezinsgrootte en aanwezigheid van een bad of vaatwasmachine). Dit zal op basis zijn van huidige en historische gegevens.
- d Prognoses voor toekomstige ontwikkelingen. Dit is vaak op basis van historische ontwikkelingen en een aantal aannames of scenario's. Modellen voor demografische ontwikkeling zijn bijv. gebaseerd op historische data m.b.t. leeftijd bij 1^e kind, levensverwachting, etc. en op aannames over toekomstige migratie.

Omdat de submodellen nog niet geselecteerd of ontwikkeld zijn kan slechts een globale inschatting worden gemaakt van de benodigde data. Idealiter zou voor de toepassing m.b.t. waterverbruik de Nederlandse data voor de submodellen die betrekking hebben op demografie en ruimtelijke ordening (3, 4, 5) alleen betrekking hebben op functie a en/of b, afhankelijk van of de modellen in Nederland zijn toegepast, en meegeleverd moeten worden met de submodellen, of gemakkelijk toegankelijk zijn. Voor de submodellen die over waterverbruik gaan (2, 6, 7) is data nodig die met betrekking tot alle bovengenoemde functies. Tabel 9 doet suggesties voor het type data dat nodig is en mogelijke bronnen voor de data. De tabel is niet compleet, en kan in vervolgonderzoek verder worden aangevuld.

Tabel 9. Benodigde data voor ABM. "X" betekent niet van toepassing, omdat deze data ofwel door anderen gebruikt moet worden (kolom b en c), ofwel deze data is een resultante (in kolom d).

Model		functie			
		a) initialisatie	b) validatie	c) modelbouw	d) prognose
1	Basis				
	Agent + activiteit	Tijdbestedingsonderzoek (SCP), schooltijden (?), ...		Interactie tussen agenten (of nieuw submodel)	
		SIMDEUM-aanpak		(submodel 7)	
	Locatie	Mobiliteitsonderzoek (RWS)? Tijdbestedingsonderzoek (SCP)		(submodel 3)	
	Waterverbruikende apparatuur	Waterverbruik thuis (Vewin)		(submodel 6)	
2	Waterverbruik	Waterverbruik thuis (Vewin)	Historische veranderingen (Moerman et al. 2018)		X
3	Locatie	(basismodel)	X	X	??
4	Demografische Ontwikkeling (Huishoudens: samenstelling, aantal, grootte)	CBS huishoudens, PC4-niveau	X	X	Regionale prognose
5	Stedelijke ontwikkeling	Case study, BAG en kadaster	X	X	Gemeentelijke en provinciale plannen
6	Waterverbruikende apparatuur, invloedfactoren:				
	Sociaal-cultureel	Bijv. reclame voor luxe apparatuur			
	Economie	Bijv. subsidie voor waterbesparende apparatuur			

Model		functie			
		a) initialisatie	b) validatie	c) modelbouw	d) prognose
	Politiek	Bijv. labels voor (vaat)wasmachines			
	Technologie	Bijv. waterbesparend (toilet, douche, (vaat)wasmachine), luxe waterverbruikers (douche, bubbelbad), nieuwe waterverbruikers (airco, ???)			
	Ecologie				
	Demografie	Bijv. invloed gezinsgrootte op aanschaf bad en vaatwasser, SIMDEUM-aanpak			
7	Gedrag, invloedfactoren:				
	Sociaal-cultureel	Bijv. oproep beperken waterverbruik, campagne voor bewustwording			
	Economie	Bijv. prijs (warm) water			
	Politiek	Bijv. de beschikbaarheid van water. Er is een relatie met ecologie, maar de politiek bepaalt hoeveel water beschikbaar wordt gesteld als drinkwater.			
	Technologie	Bijv. interactie met technische installatie (wachtijd voor warm water, druk)			
	Ecologie	Bijv. invloed weer (temperatuur en droogte) op gedrag (doucheduur, tuin sproeien)	Historische KNMI-data	Relatie weer en gedrag	KNMI-prognose
	Demografie	Bijv. invloed leeftijd op doucheduur, SIMDEUM-aanpak			

4.5 Onzekerheden

Vrijwel alle voorgenoemde aspecten en invoerdata van een ABM zijn gebonden aan onzekerheden, zowel in het heden als in de voorspellingen voor de toekomst. ABM modellen worden meestal één keer gekalibreerd, met historische gegevens, en dan vooruit geprojecteerd in de tijd om een voorspelling te doen. Hierbij is de kalibratie ideaal voor één bepaald tijdstip, maar naarmate de simulatie vordert, wijkt de voorspelling snel af van de werkelijkheid ten gevolge van onderliggende onzekerheden. Deze onzekerheden zijn het gevolg van dynamische (veranderlijk in ruimte en tijd), stochastische (inherente willekeur bevattende) en niet-waargenomen (niet uit de gegevens af te leiden) omstandigheden van het te bestuderen reële systeem. Er zijn methoden ontwikkeld om real-time data in modellen op te nemen, zoals data-assimilatie routines. In het algemeen verwijst data-assimilatie naar een reeks technieken waarmee observatiegegevens in modellen kunnen worden verwerkt om een optimale schatting te maken van de evoluerende toestand van het systeem. Het uitvoeren van data-assimilatie verhoogt de kans op een accurate weergave van de huidige toestand van het systeem, en vermindert zo de onzekerheid van toekomstige voorspellingen (Kieu et al., 2020).

Het blijft belangrijk om te benadrukken dat één scenario doorgerekend doormiddel van een ABM niet 'de absolute waarheid' is voor de toekomst. Het doorrekenen van meerdere scenario's biedt wel inzicht in de richting en bereik van mogelijke uitkomsten en hoe verschillende factoren invloed kunnen hebben op resultaten.

4.6 Voor- en nadelen ABM in de beoogde toepassing

De voordelen van ABM ten opzichte van andere modelleringstechnieken kunnen worden vastgelegd in drie stellingen: (1) ABM legt opkomende verschijnselen vast; (2) ABM geeft een natuurlijke beschrijving van een systeem; en (3) ABM is flexibel (Bonabeau 2002). Voor onze toepassing geldt dan specifiek het volgende.

- 1 ABM legt opkomende verschijnselen vast: een ABM voor de watervraag kan de stedelijke ontwikkeling in aanmerking nemen. Een model dat laat zien welke effect de stedelijke ontwikkeling heeft op het (ontwerp van het) leidingnet helpt drinkwaterbedrijven in overleg met derden (gemeente/provincie).
- 2 ABM geeft een natuurlijke beschrijving van een systeem: de scenario's waarmee een ABM voor de watervraag rekent zijn goed uit te leggen, het zijn geen statistische "best fits" op basis van alleen historische ontwikkelingen in de watervraag en de aannames die gedaan zijn en de onderliggende modellen zijn op zich te begrijpen en gevalideerd. De kracht van een ABM is dat de verschillende onderliggende modellen gecombineerd kunnen worden.
- 3 ABM is flexibel: er kunnen eenvoudig agenten worden toegevoegd. Zodra bijvoorbeeld meer bekend is over het effect van bepaalde communicatiestrategieën of wanneer nieuwe technologie wordt geïntroduceerd kan dit aan de ABM worden toegevoegd.

Er zijn ook nadelen of uitdagingen te identificeren:

- 1 Ieder model, dus ook een ABM, wordt met een bepaald doel gemaakt, en dus voor een bepaalde schaal. Het is daarom niet eenvoudig om een ABM voor de watervraag te ontwerpen die op verschillende tijdschalen, ruimtelijke schalen en tijdshorizonten worden toegepast. Het is dus de vraag of dezelfde uitgangspunten en scenario's kunnen worden toegepast om ontwerp van zuivering, primaire, secundaire en tertiaire leidingnet op te baseren. Ook is onbekend of een ABM dat goed de gemiddelde vraagpatroon voorspelt ook inzicht geeft in de piekwatervraag. De toepassingen met SIMDEUM suggereren dat dit voor bepaalde schaal wel geldt, dus dat stemt hoopvol.
- 2 Een ABM kan zeer rekenintensief zijn, en hoe meer agenten worden ingebouwd en hoe groter het detail dat gewenst is in de uitkomsten (ruimtelijke schaal, tijdschaal, aantal stappen tussen nu en de ingestelde tijdshorizon), hoe meer reken capaciteit nodig is. Dit kan betekenen dat de eis aan de duur van een modelberekening beperkend wordt in de hoeveelheid detail die meegenomen kan worden, ofwel dat het gewenste detailniveau niet kan worden gerealiseerd. Voor een ABM voor de watervraag is dat niet op voorhand duidelijk.
- 3 Een opstapeling van onzekerheden (als som van alle onzekerheden in alle submodellen, agents en processen) kan ertoe leiden dat de uitkomsten niet waardevol zijn. Voor een ABM voor de watervraag is dat niet op voorhand duidelijk. Het is aan te bevelen om met een beperkt aantal agents te starten, en bij iedere uitbreidingsstap te controleren of de totale onzekerheid nog steeds acceptabel is.
- 4 Vooral de meer soft parameters (al dan niet rationeel gedrag van de agents) zijn lastig te modelleren. Dit aspect van het model leidt ook zeker niet tot een voorspelling van individueel gedrag, maar kan wel worden ingezet om inzicht te verkrijgen. En dit inzicht kan worden toegepast in verbeterde ontwerpen van in dit geval het leidingnet. Nog onbekend is of alle gewenste processen al (correct) beschreven zijn, en dus in modellen kunnen worden gevat, noch of alle benodigde data voor die modellen (eenvoudig) beschikbaar zijn.
- 5 Voor de ontwikkeling van een ABM voor de watervraag zijn vele submodellen nodig die niet raken aan de expertise van KWR, zoals modellen voor demografische ontwikkelingen en reisbewegingen. In hoeverre bestaande modellen geschikt zijn voor onze toepassingen hoe gemakkelijk ze zijn te koppelen is nog onbekend. Ook is er nog beperkt zicht op mogelijke samenwerkingspartners die ABM-modules ontwikkelen die voor de drinkwatersector en voor de toepassing van een ABM voor de drinkwatervraag interessant kunnen zijn. Het is ook nog niet goed duidelijk wat KWR te bieden heeft aan mogelijke samenwerkingspartners; hebben zij interesse in de expertise van KWR op het vlak van de watervraag, bijv. om op vergelijkbare wijze ook de vraag naar elektriciteit of ruimteverwarming te modelleren?

De wet van de remmende voorsprong kan gelden: er is al een model beschikbaar dat de drinkwatervraag goed kan beschrijven, namelijk SIMDEUM. Is het dan nodig om een nieuw (ABM) model op te bouwen; kan SIMDEUM niet gewoon worden uitgebreid? De auteurs zijn van mening dat voor de beoogde toepassing het gebruik van SIMDEUM zoals dat nu bestaat beperkt geschikt is. Het uitbreiden van het ontwerpproces op basis van hydraulische leidingnetten met scenario's vanuit SIMDEUM waarbij alle SEPTED-effecten op de watervraag en de locatie van verschillende gebruikers wordt meegenomen vergt veel modelontwikkeling. Dit is bovendien niet automatisch eenvoudiger dan het ontwikkelen van een nieuw model, dat voor de beoogde toepassing optimaal kan worden ingericht. De auteurs zijn wel van mening dat in de ontwikkeling van een ABM voor de watervraag SIMDEUM een zeer goede basis biedt.

Verscheidene expertises van KWR komen samen in de ontwikkeling van een ABM voor de watervraag: technische expertise m.b.t. modelleren, toepassingen in ontwerpvragestukken, kennis van de drinkwatervraag, expertise op het vlak van klant en markt, governance en toekomstverkenningen. KWR kan al deze expertises samen in een model brengen waarmee we niet alleen kwalitatief maar ook kwantitatief kunnen beschrijven wat het effect is van allerlei maatregelen en scenario's. Dit is een groot voordeel voor de watersector.

5 Discussie

Er zijn verscheidene voordelen van het maken van een ABM voor de simulatie van de drinkwatervraag, die verder gaan dan alleen de toepassing voor het ontwerp van een robuuste streefstructuur. N.B. voor enkele toepassingen is een koppeling met een hydraulisch netwerkmodel noodzakelijk.

ABM's kunnen een aanvulling vormen op conventionele benaderingen met betrekking tot het duurzaam kunnen leveren van de (huishoudelijk) drinkwatervraag:

- Inzicht in de effectiviteit van beleid kan worden gebruikt om vraag en aanbod van drinkwater beter op elkaar af te stemmen.
- Inzicht in over de tijd en locatie veranderende drinkwatervraag kan worden toegepast om netwerken (niet alleen drinkwaterdistributie maar ook riolering) beter te ontwerpen. ABM's geven niet alleen de situatie weer aan het einde van de beschouwde tijdshorizon, maar ook op tussentijdse momenten. Daarmee kan zowel een streefstructuur als ook de transitie van huidige structuur naar de streefstructuur worden ontworpen.

Om het effect van factoren die het waterverbruik beïnvloeden (bijv. de waterprijs) met een ABM te onderzoeken is het nodig om de relaties tussen deze factoren en het waterverbruik expliciet en kwantitatief te definiëren. De invloedfactoren zijn zeer verschillend van aard (SEPTED, zie hoofdstuk 3). Dat betekent dat de relaties voor veel factoren niet zo exact bekend zijn. Het voordeel is dat een ABM het bewustzijn m.b.t. de relaties vergroot en kwantificeert (en daarmee intuïtieve inschattingen kan onderbouwen of onderuit halen), het effect van de verschillende factoren kan berekenen en zo een ordening aan kan brengen in welke factoren belangrijker of minder belangrijk zijn, en kan laten zien of maatregelen en beleid zinvol kunnen zijn. Vooral de invloed van de combinatie van verschillende invloedsfactoren (beleid, gedrag, techniek, ...) kan met een ABM in kaart worden gebracht.

Een ABM is geschikt tijdsafhankelijke scenario's door te rekenen. Ieder scenario geeft een deterministische (of exacte) uitkomst, maar door simulaties te herhalen of scenario's te combineren kan ook de onzekerheid m.b.t. de scenario's in beeld worden gebracht.

Een ABM is geschikt om de wisselwerking tussen waterverbruikers en de watersystemen te modelleren en daarmee de consequenties voor het hele systeem inzichtelijk te maken.

- De bevordering van waterbesparende apparatuur kan ervoor zorgen dat er geen nieuwe drinkwaterbron hoeft te worden aangeboord (lagere kosten), en dat het drinkwaterdistributiesysteem niet meer zelfreinigende is (verslechtering van de waterkwaliteit), en het riool vaker verstopt (hogere kosten).
- Grootschalige installatie van luxe douches met een hoog waterverbruik kan ervoor zorgen dat er de druk in het huidige drinkwaterdistributiesysteem vaak laag is waardoor bijv. stortbakken van toiletten zeer langzaam vollopen en de inzet van het douchewater als grijs water voor toiletspoelingen interessanter wordt (verandering van perspectief).
- De afgifte van een kookadvies omdat er een besmetting in het drinkwater is aangetroffen kan ertoe leiden dat men minder water verbruikt, niet alleen voor consumptie, maar ook bijv. niet voor de afwas of voor douchen uit angst voor besmetting. Dit kan ertoe leiden dat het veel langer duurt voordat de besmetting het distributiesysteem verlaat.
- Klantgerichte communicatie kan beter worden onderbouwd. Bijvoorbeeld in geval van droogte kan worden onderzocht wat het effect is van verschillende oproepen (geen tuin sproeien, zwembadjes vullen, korter douchen) op de beperking van de (piek)watervraag.

Een aantal toepassingen is eerder verkend met behulp van hydraulische netwerkmodellen en verschillende verbruiksscenario's (op basis van SIMDEUM of anders). Een ABM kan deze toepassingen vereenvoudigen, of specifieker maken voor bijv. de regio of de tijdshorizon.

- Pieterse-Quirijns en van de Roer (2013) hebben laten zien wat het effect is van specifieke verbruikspatronen (huishoudelijk en niet-huishoudelijk) om de doorstroming in een leidingnet. Agudelo-Vera en Blokker (2016a) hebben in een stresstest laten zien wat het effect is op de druk, verblijftijd, en waterkwaliteit (zelfreinigende werking) wanneer in het huidige leidingnet de drinkwatervraag verandert (in 12 mogelijke toekomstscenario's van huishoudelijk verbruik).
- Agudelo-Vera et al. (2013) hebben vraag en aanbod van grijs water (nodig voor toiletspoeling en geleverd door douche) op de schaal van een woning en een appartementsgebouw gemodelleerd om te kunnen bepalen hoe groot het buffervat zou moeten zijn. Iets dergelijks is ook op wijkniveau gedaan voor Brainport Smart District in Helmond (Hillebrand en Castro-Gama 2020).
- Castro-Gama et al. (2020) hebben laten zien hoe een digitale tweeling van het leidingnet gebruik kan maken van data van mobiele telefoons om beter te kunnen schatten wanneer op de dag en waar waterverbruik plaatsheeft. Een ABM kan aan een digitale tweeling worden gekoppeld om scenariostudies door te rekenen.
- Verschillende waterbedrijven richten DMA's in waarmee ze op basis van de (nachtelijke) waterbalans hopen in te kunnen schatten hoe groot het lekverlies is. Hiervoor is het gewenst om een goed model te hebben van de huishoudelijke drinkwatervraag voor een specifieke situatie, zoals dag van de week, feest- en vakantiedagen, de temperatuur en droogte (Vertommen et al. 2018). Net als bij de digitale tweeling is ook hier het doel om de actuele situatie zo goed mogelijk te modelleren.
- In dit kader is het ook interessant om de situatie tijdens de Corona-crisis te beschouwen. Een combinatie van veel thuis werken en droogte zorgt ervoor dat mensen soms op andere tijdstippen water verbruiken, en er veel aandacht was voor de tuin waardoor ook meer water is verbruikt. Dit scenario is misschien niet heel extreem voor het waterverbruik, maar het laat wel zien dat er ook scenario's kunnen optreden die niet te extrapoleren zijn uit historische trends. Veerkrachtige systemen kunnen ook dit soort scenario's aan (Makropoulos 2018), voor zowel de totale watervraag als de piekwatervraag.

Het is aan te bevelen om voor verschillende toepassingen of vraagstukken waarbij een simulatiemodel van de drinkwatervraag wordt ingezet een afweging te maken tussen verschillende soorten modellen, waarbij wordt geëvalueerd welke perspectief (tappuntperspectief, SIMDEUM versus het gebruikersperspectief, ABM) het beste past en wat de benodigde inspanning is om het model te ontwikkelen of toe te passen (in relatie tot de opbrengsten). Aangezien SIMDEUM al bestaat is de inspanning voor toepassing nu veel minder dan voor een ABM, maar zodra een ABM beschikbaar is kan de balans tussen inspanning en opbrengst per toepassing anders uitpakken.

6 Conceptueel ontwerp

6.1 Inleiding

De inventarisatie en de discussie geven voldoende aanleiding om ook vast na te denken over hoe een ABM voor de watervraag er technisch uit zou kunnen zien. Paragrafen 0 en 4.4 bieden inzicht in benodigde modellen en data om vorm te geven aan een agentgebaseerd watervraagmodel. In dit hoofdstuk worden deze aspecten verder uitgewerkt tot een conceptueel (en niet een volledig functioneel) ontwerp. Het achterliggend idee is dat dit illustreert hoe alle submodellen en data met elkaar zijn verbonden en dat in toekomstig onderzoek de submodellen één voor één in detail worden uitgewerkt.

De belangrijkste stappen in de ontwikkeling van een agentgebaseerd model zijn volgens (Macal en North 2006) de volgende:

- 1 het identificeren van de agenten;
- 2 het nauwkeurig specificeren van het gedrag van de agenten;
- 3 het definiëren van de omgeving waarin de agenten leven en mee omgaan;
- 4 het identificeren van de relaties tussen de agenten en het ontwikkelen van een theorie over de interactie met elkaar en de omgeving;
- 5 het uitwerken van de belangrijke agent-gerelateerde kenmerken en gegevens;
- 6 adequaat beschrijven van interacties tussen agenten en tussen agenten en de omgeving;
- 7 het valideren van het agent-gedragsmodel.

Voor meer details wordt de lezer doorverwezen naar (Gilbert 2008; Niazu en Hussain 2011; Salgato en Gilbert 2013; Macal en North 2017).

Voor een conceptueel ontwerp op hoofdlijnen is er vooralsnog gefocust op de identificatiestappen; stap 1 (§ 6.2, waarin wel ook aan stap 2 en 3 wordt geraakt) en stap 4 (§ 6.3, waarin ook aan stap 5 en 6 wordt geraakt). Het uitwerken en definiëren is voor een vervolgproject. Over het valideren van het model is nog niet nagedacht.

6.2 Agenten

De suggestie is om de volgende agenten te definiëren:

- **Personen:** personen zijn de meest natuurlijke agenten omdat het de personen zijn die water verbruiken. Personen hebben kenmerken zoals leeftijd, geslacht, migratieachtergrond (inclusief ‘culturele gewoontes’), tijdsbesteding, locatie voor wonen en tijdsbesteding en, naast deze kenmerken, verschillende gedragsaspecten. Deze agenten zijn niet enkel de personen die wonen in het gebied waarvoor een agentgebaseerd model wordt ontwikkeld, maar ook personen die er komen om te werken, voor vrije tijd of toerisme. De kenmerken over personen kunnen in eerste instantie worden ingevuld aan de hand van de beschikbare data bij het CBS. Deze kenmerken ontwikkelen zich in de tijd, hiervoor is een demografisch model nodig. De gedragsaspecten vereisen een gedragsmodel.
- **Gebouwen:** gebouwen nemen geen beslissingen (of hebben geen gedrag) en lijken daarom wellicht minder op een ‘agent’. In de ABM-literatuur zijn agenten entiteiten die besluiten kunnen nemen, en kunnen dus vertegenwoordigers zijn van individuen, groepen (zoals belangenbehartigers), overheid, etc. Gebouwbeheerders kunnen ook agenten zijn. Omdat een gebouwbeheerder tevens een individu is die zelf water verbruikt en tegelijk dit gebouw (en andere gebouwen) kan beheren vanuit een andere locatie, kiezen we er voor om in dit geval de agent niet de gebouwbeheerder te maken, maar het gebouw zelf (dat niet van locatie verandert en dat zelf geen water verbruikt). Het is ook in een gebouw dat waterverbruikend apparatuur wordt geplaatst, gebouwen veranderen ook in de tijd en personen hebben een interactie met de

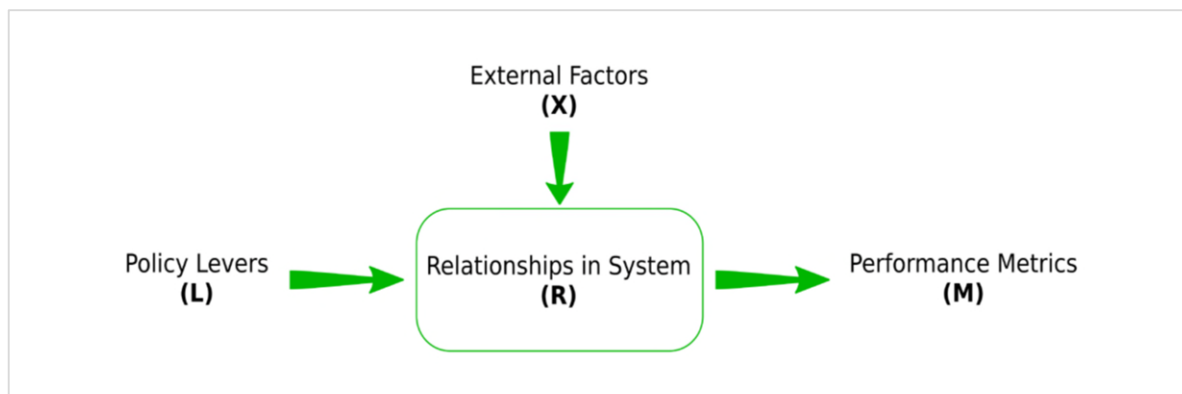
gebouwen. Deze agenten kunnen zo de stedelijke ontwikkeling reflecteren, het type verbruik dat er kan plaatsvinden en het soort apparatuur dat aanwezig is. Door gebouwen in aanmerking te nemen als agenten, kan bijvoorbeeld de invloed van beleid op aanschaf apparatuur in beeld worden gebracht (bv. een nieuwe woonwijk waar enkel waterbesparend toiletten worden geïnstalleerd), of de frequentie van vervanging van apparatuur (bv. wasmachine om de x jaar vervangen en, bij vervanging nieuwe technische specificaties in aanmerking nemen). Gebouwen hebben kenmerken zoals een locatie, bouwjaar, status (in of uit gebruik), gebruiksdoel (bv. woon-, industrie- of kantoorfunctie) en eventueel een tuin, en hebben daardoor bepaalde apparatuur (bv. wasmachine, douches, sproei installaties). De kenmerken van de huidige gebouwen in een gebied (objecten) zijn beschikbaar bij de Basisregistratie Adressen en Gebouwen (BAG). Ook deze kenmerken ontwikkelen zich in de tijd. Hiervoor is een model voor de stedelijke ontwikkeling nodig. Voor de update van de gebruikte apparatuur is een model voor de technologische ontwikkeling nodig.

6.3 Structuur: XLMR-kader

Het is duidelijk dat er submodellen nodig zijn om de ontwikkeling van de agenten en het gedrag in beeld te brengen. Daarnaast is het ook nodig om de relaties tussen agenten en agenten en de omgeving vorm te geven. Om hier een overzicht in te creëren kan een zogenaamde ‘XLMR-kader’ worden gebruikt, zie Figuur 7:

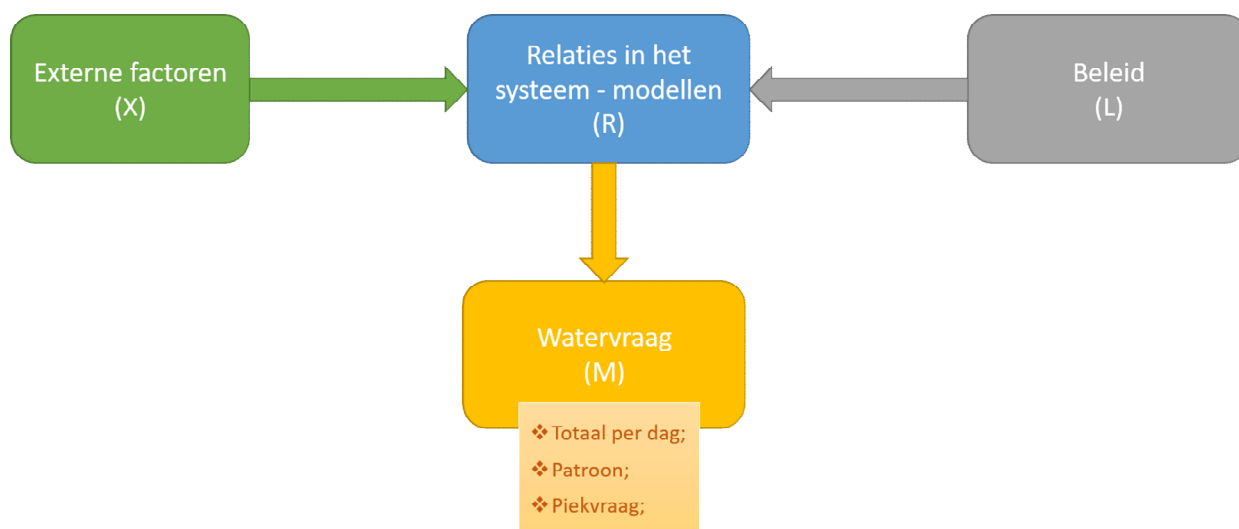
- X (eXternal factors): exogene of externe factoren zijn buiten de controle van besluitvormers;
- L (Policy Levers): beleidsinstrumenten;
- M (Performance Metrics): prestatie indicatoren of resultaten van belang;
- R (Relations in the system): relaties in het systeem.

Een dergelijke kader helpt ook met het formuleren van de onderzoeksvraag waarvoor het agentgebaseerd model wordt ingezet, bv.: *wat is het effect van beleid op de outputvariabelen gegeven externe factoren en de relaties in het systeem?*



Figuur 7. Overzicht van een generieke XLMR – kader (Berendschot en Luttikhuisen 2020) dat helpt bij het vormgeven van een agentgebaseerd model om een bepaalde onderzoeksvraag te beantwoorden.

In Figuur 8 is het XLMR-kader vertaald naar een agentgebaseerd model voor de watervraag en zodanig ook de onderzoeksvraag: *wat is het effect van beleid op de watervraag (patroon, totaal en maximum per dag, nu en in de toekomst) gegeven externe factoren en de onderlinge relaties in het systeem?*



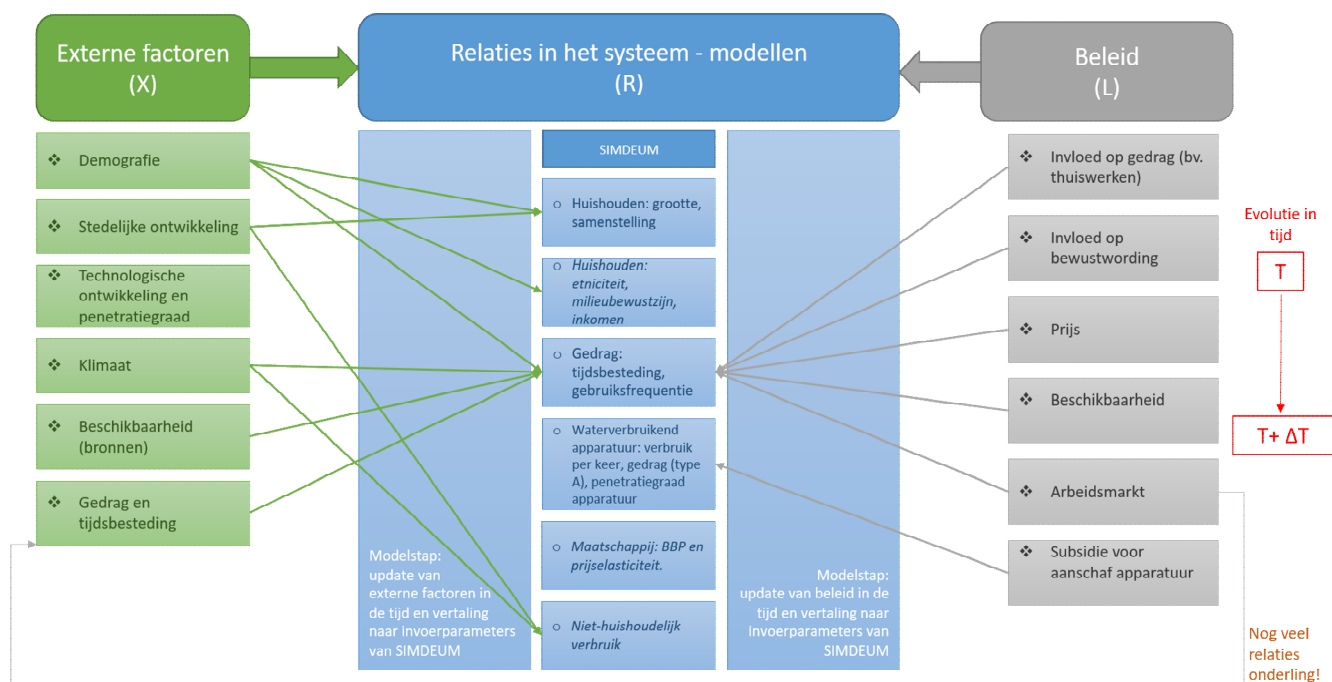
Figuur 8. Agentgebaseerd model voor de watervraag aan de hand van het XLMR-kader. Externe factoren (groen) en beleid (grijs) vormen de invoer van het model (blauw) waarmee de watervraag (geel) wordt gegenereerd.

De XLMR-kader is in Figuur 9 verder uitgewerkt door de relevante externe factoren (groene blokken), beleidsaspecten (grijze blokken) en relaties in het systeem (blauwe blokken) te identificeren.

Met betrekking tot de relaties in het systeem is gekozen om SIMDEUM te gebruiken om de watervraag te simuleren. Dit betekent wel dat SIMDEUM moet worden gevoed met data uit de overige submodellen (bv. demografie, gedrag). Deze submodellen vormen in feite een soort van extra laagjes aan SIMDEUM en hiermee verschuift het perspectief van SIMDEUM van de tappunten naar de agenten (in aanvulling op de huidige benadering). Bij het ontwikkelen van de submodellen kan dus direct worden gedacht aan het geschikt maken van de output van de submodellen als invoerparameters van SIMDEUM. Dit wil zeggen dat in ‘relaties in het systeem – modellen’ het volgende plaatsvindt:

- de interactie tussen agenten en agenten en de omgeving;
- de ontwikkeling van de externe factoren en beleid door de tijd heen;
- vertaling van zowel externe factoren als beleidsaspecten naar invoerparameters van SIMDEUM;
- modelleren van de watervraag met SIMDEUM.

In de figuur is gekozen om voor enkele voorbeelden expliciet te maken welke externe factoren en beleidsaspecten invloed hebben op welke invoerparameters van SIMDEUM (pijltes in de figuur). Om het overzichtelijk te houden is gekozen om niet alle mogelijke relaties te identificeren, de figuur is daarom niet volledig – er zijn nog meer relaties denkbaar.



Figuur 9. Agentgebaseerd model voor de watervraag aan de hand van het XLMR-kader: uitwerking van de externe factoren, beleid en relaties in het systeem. Externe factoren en beleid vormen de invoer van het model SIMDEUM waarmee de watervraag wordt gegenereerd, maar dienen op zichzelf ook gemodelleerd te worden om de ontwikkeling in de tijd in kaart te brengen.

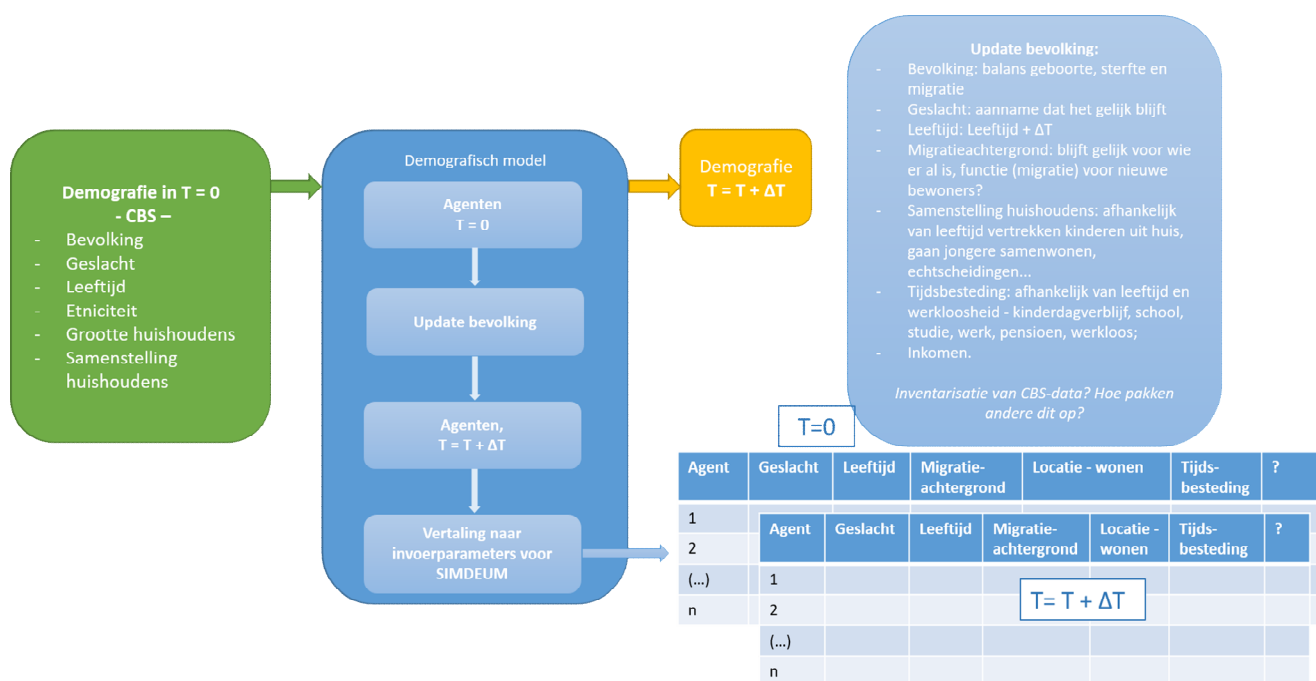
Wat betreft de **externe factoren** kunnen deze aan de hand van beschikbare data voor het heden worden beschreven. Verschillende submodellen in 'Relaties in het systeem' moeten er voor zorgen dat deze gegevens worden geüpdatet voor de toekomst en vertaald naar bruikbare invoerparameters voor SIMDEUM. Relevante externe factoren zijn:

- **Demografie:** waaronder totaal aantal personen in een gebied (inwoners, werknemers, bezoekers), samenstelling en grootte huishoudens, kenmerken per agent (zoals weergegeven in **Error! Reference source not found.**). Een demografische model moet zorgen dat deze gegevens zich ontwikkelen in de tijd, door o.a. geboorte-, sterfte- en migratiecijfers in aanmerking te nemen, de leeftijd, samenstelling van huishoudens (bv. uit huis vertrekken van jonge volwassenen, vormen van nieuwe gezinnen, echtscheidingen) en tijdsbesteding te updaten. Figuur 10 biedt een overzicht van hoe een demografisch model er uit kan zien.
- **Stedelijke ontwikkeling:** kenmerken van de huidige objecten (gebouwen) zijn beschikbaar bij de Basisregistratie Adressen en Gebouwen (BAG), zoals de locatie, bouwjaar, status (wel of niet in gebruik), gebruiksdoel (bv. winkelfunctie, woonfunctie). Aan de hand van beleid en plannen van de gemeente kan worden bepaald hoe de stedelijke ontwikkeling zich zal voortzetten. Deze heeft invloed op de locaties voor wonen en tijdsbesteding van de agenten – personen, en de kenmerken van de agenten – gebouwen.
- **Technologische ontwikkeling:** ontwikkelingen in waterverbruikende apparatuur, penetratiegraad en hoe snel nieuwe technologie wordt geïmplementeerd (uit onderzoek blijkt dat m.b.t. waterverbruikende apparatuur dit wel 20 jaar kan duren (Agudelo-Vera et al. 2014)). Ook technologie die een invloed heeft op het waterverbruik is van belang, zoals bv. apps die inzicht geven in het waterverbruikend gedrag van de agenten.
- **Klimaat:** het weer beïnvloedt het gedrag, zowel de gebruiksfrequentie als –duur (o.a. douchen en tuinsproeien) en de beschikbaarheid van drinkwater. Relevante kenmerken van weer zijn bv. temperatuur, neerslag, neerslagtekort, extremen, aantal dagen met een bepaalde temperatuur, aantal dagen zonder neerslag. Deze gegevens zijn beschikbaar op het Koninklijk Nederlands Meteorologisch

Instituut (KNMI)³. Ook is bij het KNMI een tool ('Transformator') beschikbaar om tijdreeksen van klimaat te simuleren voor de toekomst (op basis van huidige gegevens en aannames).

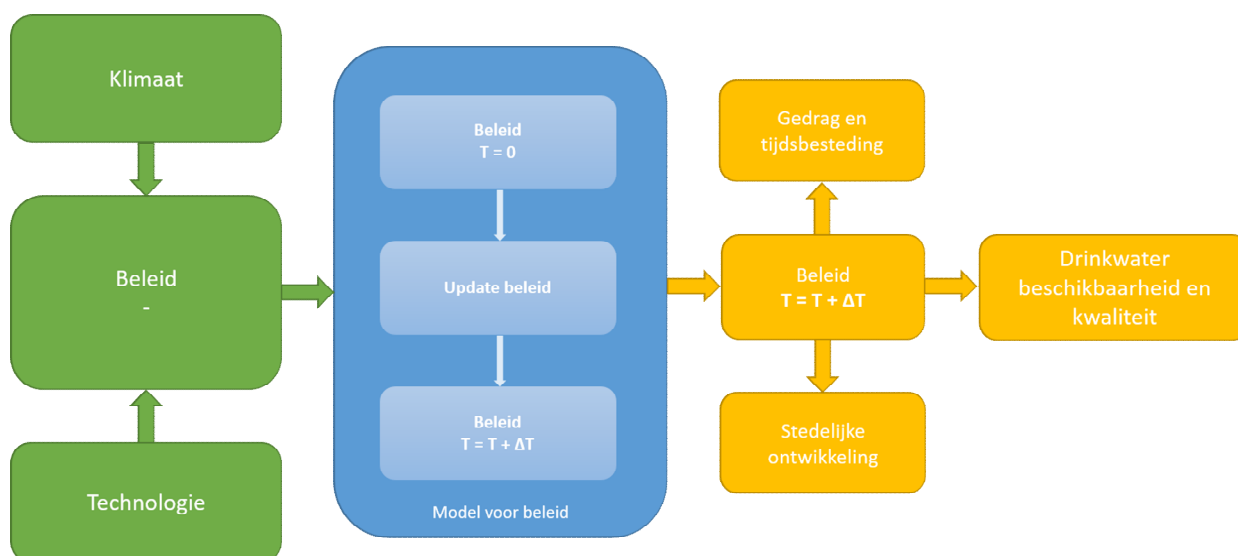
- **Waterbeschikbaarheid en –kwaliteit:** beschikbare bronnen en kwaliteit van het water en vergunningen om de bronnen te gebruiken (bv. hoe wordt het water verdeeld tussen industrie en huishoudens).
- **Gedrag en tijdsbesteding (locatie):** de tijdsbesteding heeft invloed op de locatie van agenten (personen) en waar en wanneer ze water verbruiken. De tijdsbesteding wordt grotendeels bepaald door de leeftijd en arbeidsmarkt (bv. werken of naar school gaan), maar ook door persoonlijke voorkeuren (wel of niet sporten of uitvoeren van vrijetijdsactiviteiten buitenshuis) en meer of minder thuiswerken. Andere gedragsaspecten, zoals culturele gewoontes en milieubewustzijn, hebben invloed op de gebruiksfrequentie en –duur. Ook leeftijd heeft een invloed op de gebruiksfrequentie en –duur. Al deze aspecten kunnen veranderen in de tijd. Het modelleren van het gedrag en tijdsbesteding is daarom een cruciaal aspect in een agentgebaseerd watervraagmodel.

Elk van de voorgenoemde externe factoren en beleid zijn een submodel op zich. Enkele voorbeelden zijn geïllustreerd in Figuur 10 en 11.



Figuur 10. Voorbeeld voor het submodel demografie. Huidige gegevens (invoer in het groen) zijn beschikbaar bij het CBS. Een demografisch model zorgt ervoor dat de ontwikkeling van de demografie inzichtelijk is en dat de kenmerken worden vertaald naar invoerparameters van SIMDEUM. De output (geel) is de demografie op ieder gewenste moment in de tijd.

³ <https://www.knmi.nl/home>



Figuur 11. Voorbeeld voor een submodel voor beleid: beleid kan worden beïnvloed door klimaat en technologische ontwikkelingen en heeft vervolgens invloed op gedrag en tijdsbesteding van agenten, stedelijk ontwikkeling en beschikbaarheid van drinkwater. Via en model dient dit geüpdatet te worden van de huidige situatie naar ieder gewenste moment in de tijd. Het voorstel is om de aspecten die onder beleid vallen flexibel te laten en door de gebruiker te laten bepalen via schuifbalken. Zo worden de effecten van verschillende keuzes in beleid op de watervraag inzichtelijk gemaakt.

Met betrekking tot beleidsaspecten, is het doel om door middel van het agentgebaseerd model de invloed van verschillende beleidsaspecten op de ontwikkeling van de watervraag inzichtelijk te maken. Het idee is daarom dat de volgende beleidsaspecten zodanig worden toegevoegd aan het model dat de gebruiker deze zelf kan instellen (bv. doormiddel van schuifbalken):

- invloed op gedrag (bv. advies om meer thuis te werken);
- invloed op bewustwording en milieubewustzijn (breed installeren van slimme watermeteroplossingen kan hier wellicht aan bijdragen);
- prijs van het water;
- beschikbaarheid van het water;
- arbeidsmarkt (meer of minder werkloosheid);
- subsidie voor aanschaf van waterbesparend apparatuur.

7 Conclusies en aanbevelingen

Uit dit onderzoek is te concluderen dat er voldoende toegang bestaat tot alle ingrediënten die nodig zijn om een ABM te ontwikkelen dat de watervraag door de tijd heen kan simuleren. Hierin komen ook verscheidene expertises van KWR samen: technische expertise m.b.t. modelleren, toepassingen in ontwerpvragestukken, kennis van de drinkwatervraag, expertise op het vlak van klant en markt, governance en toekomstverkenningen. KWR kan al deze expertises samen in een model brengen waarmee we niet alleen kwalitatief maar ook kwantitatief kunnen beschrijven wat het effect is van allerlei maatregelen en scenario's op de watervraag. Door agenten en hun gedrag toe te voegen wordt het mogelijk om thuisblijfgedrag in de simulaties op te nemen, of om de effecten van waterbesparingscampagnes gericht op specifieke segmenten van de bevolking te modelleren, en nog veel meer. Dit is een groot voordeel voor de watersector. In dit onderzoek is de focus gelegd op de meerwaarde van ABM voor het ontwerp van streefstructuren. Maar ook op andere gebieden, zoals real-time modellering en digitale tweelingen van zowel drinkwaterleidingnetwerken en drinkwaterdistributiesystemen (inclusief winning en productie), of governance vraagstukken zoals hoe effectief bepaalde maatregelen zijn om de watervraag (in het algemeen of tijdens piekmomenten) te reduceren, kunnen ABM van meerwaarde zijn.

KWR beschikt al om een tool voor het modelleren van de drinkwatervraag: SIMDEUM. SIMDEUM is ontwikkeld om zicht te krijgen op de variatie van de drinkwatervraag van dag tot dag of van huis tot huis op ieder van de dag. SIMDEUM is niet als ABM beschreven, en is ook niet zo opgezet. SIMDEUM bevat geen model voor hoe de drinkwatervraag verandert, of hoe consumenten kunnen worden beïnvloed in hun waterverbruik, en is daardoor minder geschikt om beleid en stedelijke veranderingen te vertalen naar veranderingen in de hoogte en de locatie van de drinkwatervraag in een voorzieningsgebied. De kracht van een ABM voor de drinkwatervraag ten opzichte van SIMDEUM is dat met een ABM kan worden onderzocht hoe sociale interacties tot gedragsveranderingen en daarmee veranderingen in het waterverbruik leiden. Daarbij valt te denken aan veranderingen in leefpatronen (thuis werken, minder vaak wassen of douchen), en aan voorlichtingscampagnes, mond-tot-mondreclame, competitief gedrag, etc. SIMDEUM heeft wel heel veel functionaliteit die niet zomaar na te bouwen is. Onze overtuiging is daarom dat SIMDEUM van grote waarde is voor het bouwen van een ABM voor de watervraag.

Een ABM voor de drinkwatervraag kan dus veel opleveren maar kost ook veel inspanning om te realiseren. Idealiter zouden elders ontwikkelde submodules worden ingeplugd die buiten de expertise van KWR liggen, zoals een module voor demografische ontwikkelingen en een module die de volledige stedelijke ontwikkeling tracht te beschrijven, zodanig dat scenario's en maatregelen in samenhang (tussen de verschillende nutssectoren bijv.) kunnen worden onderzocht. Een dergelijk ABM zou dan ook buiten de watersector van nut kunnen zijn, op toepassingen zoals verkeer en energieconsumptie. Een mooie ambitie zou kunnen zijn om een ABM op brede schaal te ontwikkelen, waaronder de watervraag een van de modules is, naast andere mogelijke toepassingen. Mogelijke samenwerkingspartners moeten hiervoor nog gezocht worden.

Aanbevelingen voor vervolgonderzoek zijn:

- Onderzoek te doen naar de meerwaarde van ABM voor andere toepassingen binnen de watersector.
- Bouwen van een ABM voor de watervraag, door submodules stapsgewijs uit te werken (dus, eerst een module voor bv. technologische ontwikkelingen, dan een module voor gedrag en tijdsbesteding, enzovoort.). Samenwerking met studenten uit universiteiten kan hiervoor een geschikt middel zijn.
- Verkenning van geschikte samenwerkingspartners om algemenere modules zoals demografische en stedelijke ontwikkeling vorm te geven.

8 Referentielijst

Abar, S., Theodoropoulos, G. K., Lemarinier, P. en O'Hare, G. M. P. (2017). "Agent Based Modelling and Simulation tools: A review of the state-of-art software." *Computer Science Review*, 24, 13-33, doi:10.1016/j.cosrev.2017.03.001.

Agudelo-Vera, C., Blokker, E., Büscher, C. en Vreeburg, J. (2014). "Analysing the dynamics of transitions in residential water consumption in the Netherlands." *Water Science and Technology: Water Supply*, 14(5), 717-727.

Agudelo-Vera, C. en Blokker, E. J. M. (2016a). *Developing a stress-test to assess drinking water distribution systems under changing demand* (eBook), IWA. eBook only.

Agudelo-Vera, C. M. en Blokker, E. J. M. (2016b). "Evaluatie streefstructuren. Vijf jaar praktijkervaring met aanscherping van het secundair netontwerp." BTO 2016.090, KWR, Nieuwegein.

Agudelo-Vera, C. M. en Blokker, E. J. M. (2017a). "Bepaling toekomstige drinkwatervraag met Simdeum." *TVVL Magazine*.

Agudelo-Vera, C. M. en Blokker, E. J. M. (2017b). "Ontwerp van grijs- en hemelwatersystemen met Simdeum." *TVVL Magazine*, 34-37.

Agudelo-Vera, C. M., Keesman, K. J., Mels, A. R. en Rijnaarts, H. H. M. (2013). "Evaluating the potential of improving residential water balance at building scale." *Water Research*, 47(December), 7287-7299.

Ahmad, S. en Prashar, D. (2010). "Evaluating Municipal Water Conservation Policies Using a Dynamic Simulation Model." *Water Resources Management*, 24(13), 3371-3395, doi: 10.1007/s11269-010-9611-2.

Ali, A. M., Shafiee, M. E. en Berglund, E. Z. (2017). "Agent-based modeling to simulate the dynamics of urban water supply: Climate, population growth, and water shortages." *Sustainable Cities and Society*, 28, 420-434.

Arentze, T. A., Hofman, F., van Mourik, H. en Timmermans, H. J. P. (2000). "Albatross : multi-agent rule based model of activity pattern decisions." *Urban Planning and Transportation*, 1706, 136-144.

Athanasiadis, I. N., Mentis, A. K., Mitkas, P. A. en Mylopoulos, Y. A. (2005). "A Hybrid Agent-Based Model for Estimating Residential Water Demand." *Simulation*, 81(3), 175-187, doi: 10.1177/0037549705053172.

Bailey, O., Arnot, T. C., Blokker, E. J. M., Kapelan, Z. en Hofman, J. A. M. H. (2020a). "Predicting impacts of water conservation with a stochastic sewer model." *Water Science & Technology*, 80(11), 2148-2157.

Bailey, O., Zlatanovic, L., van der Hoek, J. P., Kapelan, Z., Blokker, M., Arnot, T. en Hofman, J. (2020b). "A Stochastic Model to Predict Flow, Nutrient and Temperature Changes in a Sewer under Water Conservation Scenarios." *Water*, 12(4), 1187.

Bakker, M., Vreeburg, J., Van Schagen, K. en Rietveld, L. (2013). "A fully adaptive forecasting model for short-term drinking water demand." *Environmental modelling & software*, 48, 141-151.

Baliatti, S. en Helbing, D. (2011). "How to Do Agent-Based Simulations in the Future: From Modeling Social Mechanisms to Emergent Phenomena and Interactive Systems Design." *Santa Fe Institute Working Paper 2011-06-*

024. Reprinted as Chapter 2 in: Helbing D. (2012), *Social Self-Organization, Understanding Complex Systems*, Springer Verlag.

Berendschot, M. en Luttikhuisen, B. (2020). "Sim City: Agent-Based Water Demand Model", TU Delft, Delft.

Berglund, E. Z. (2015). "Using Agent-Based Modeling for Water Resources Planning and Management." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(11), doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000544.

Billings, R. B. en Jones, C. V. (2008). *Forecasting urban water demand*, American Water Works Association.

Blokker, E. J. M. (2006). *Modelleren van afnamepatronen; beschrijving en evaluatie van simulatiemodel SIMDEUM*, Kiwa N.V., Nieuwegein. BTO 2006.010.

Blokker, E. J. M. (2010). "Stochastic water demand modelling for a better understanding of hydraulics in water distribution networks," Delft University of Technology.

Blokker, E. J. M. (2012). "Handleiding DiVerDi_Dunea." KWR 2012.074, KWR, Nieuwegein.

Blokker, E. J. M., Agudelo-Vera, C., Moerman, A., van Thienen, P. en Pieterse-Quirijns, E. J. (2017). "Review of applications for SIMDEUM, a stochastic drinking water demand model with a small temporal and spatial scale." *Drinking Water Engineering and Science*, 10(1), 1-12.

Blokker, E. J. M., Beverloo, H., Vogelaar, A. J., Vreeburg, J. H. G. en van Dijk, J. C. (2011). "A bottom-up approach of stochastic demand allocation in a hydraulic network model; a sensitivity study of model parameters." *Journal of Hydroinformatics*, 13(4), 714-728, doi: 10.2166/hydro.2011.067.

Blokker, E. J. M. en Moerman, A. (2018). "Toekomstige toepassingen van SIMDEUM." Chapter, *Waterstromen boven- en benedenstrooms sanitair*, TVVL, 234-237.

Blokker, E. J. M., Pieterse-Quirijns, E. J., Vogelaar, A. en Sperber, V. (2014). "Bacterial growth model in the drinking water distribution system. An early warning system." PREPARED 2014.023, Prepared.

Blokker, E. J. M. en Vloerbergh, I. N. (2011). "Kwantitatieve toekomstscenario's waterverbruik." BTO 2011.060, KWR, Nieuwegein.

Blokker, E. J. M., Vreeburg, J. H. G., Beverloo, H., Klein Arfman, M. en van Dijk, J. C. (2010). "A bottom-up approach of stochastic demand allocation in water quality modelling." *Drink. Water Eng. Sci.*, 3(1), 43-51.

Boerema, A., Cameron, B., Dawson, M., Dixon, J., Moglia, M., Cook, S. en Tapsuwan, S. "Using agent based modelling techniques to understand and predict water conservation behaviours."

Bonabeau, E. (2002). "Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99 Suppl. 3(Supplement 3), 99, 7280–7287 doi: 10.1073/pnas.082080899.

Bousquet, F. en Le Page, C. (2004). "Multi-agent simulations and ecosystem management: a review." *Ecological Modelling*, 176(3-4), 313-332, doi:10.1016/j.ecolmodel.2004.01.011.

Brown, D., Page, S., Riolo, R. en Rand, W. (2004). "Agent-based and analytical modeling to evaluate the effectiveness of greenbelts." *Environmental Modelling & Software*, 19(12), 1097-1109, doi: 10.1016/j.envsoft.2003.11.012.

Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS); Rijkswaterstaat (RWS) (2015): Onderzoek Verplaatsingen in Nederland 2014 - OViN 2014. DANS. <https://doi.org/10.17026/dans-x95-5p7y>

Castro-Gama, M. E., Bouziotas, D., Béen, F. M. en Vertommen, I. (2020). "Op weg naar een digitale tweeling voor drinkwaterleidingnetten." BTO 2020.029, KWR, Nieuwegein.

Chingcuanco, F. en Miller, E. J. (2012). "A microsimulation model of urban energy use: Modelling residential space heating demand in ILUTE." *Computers, Environment and Urban Systems*, 36(2), 186-194, doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2011.11.005.

Chu, J., Wang, C., Chen, J. en Wang, H. (2009). "Agent-Based Residential Water Use Behavior Simulation and Policy Implications: A Case Study in Beijing City." *Water Resources Management*, 23(15), doi: 10.1007/s11269-009-9433-2.

Cunha, M. en Sousa, J. (2010). "Robust design of water distribution networks for a proactive risk management." *Journal of water resources Planning and Management* 136(2), doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000029.

de Bok, M. en Tavasszy, L. (2018). "De incrementele ontwikkeling van een data-driven agent-gebaseerd simulatiemodel voor goederenvervoer."

Downing, T. E., Butterfield, R. E., Edmonds, Knox, J. W., Moss, S., Piper, B. S. en Weatherhead, E. K. (2003). "Climate Change and Demand for Water." Rep. CPM-03-107, Stockholm Environ. Inst. Oxford Off., Oxford, U. K.

Dubbelboer, J., Nikolic, I., Jenkins, K. en Hall, J. (2017). "An Agent-Based Model of Flood Risk and Insurance." *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 20(1), doi:10.18564/jasss.3135.

Eppstein, M., Rizzo, D., Lee, B., Krupa, J. en Manukyan, N. (2015). "Using National Survey Respondents as Consumers in an Agent-Based Model of Plug-in Hybrid Vehicle Adoption." *IEEE Access*, 1-1, doi:10.1109/access.2015.2427252.

Ernst, A. en Briegel, R. (2017). "A dynamic and spatially explicit psychological model of the diffusion of green electricity across Germany." *Journal of Environmental Psychology*, 52, 183-193, doi:10.1016/j.jenvp.2016.12.003.

Faber, A., Valente, M. en Janssen, P. (2010). "Exploring domestic micro-cogeneration in the Netherlands: An agent-based demand model for technology diffusion." *Energy Policy*, 38(6), 2763-2775, doi:10.1016/j.enpol.2010.01.008.

Fellendorf, M. en Vortisch, P. (2010). "Microscopic Traffic Flow Simulator VISSIM." Chapter Chapter 2, *Fundamentals of Traffic Simulation*, 63-93.

Ferber, J. (1999). "Multi-agent systems - an introduction to distributed artificial intelligence." Harlow: Addison Wesley Longman, 509 pp.

Fontaine, C. M. en Rounsevell, M. D. A. (2009). "An agent-based approach to model future residential pressure on a regional landscape." *Landscape Ecology*, 24(9), 1237-1254, doi: 10.1007/s10980-009-9378-0.

Galán, J. M., López-Paredes, A. en del Olmo, R. (2009). "An agent-based model for domestic water management in Valladolid metropolitan area." *Water Resources Research*, 45(5), doi:10.1029/2007wr006536.

Gemeente Amsterdam. "Ruimte en Duurzaamheid, "Amsterdam Land Use Data," 2014. [Online]. Available: <https://maps.amsterdam.nl/grondgebruik/>

Gerst, M. D., Wang, P., Roventini, A., Fagiolo, G., Dosi, G., Howarth, R. B. en Borsuk, M. E. (2013). "Agent-based modeling of climate policy: An introduction to the ENGAGE multi-level model framework." *Environmental Modelling & Software*, 44, 62-75, doi: 10.1016/j.envsoft.2012.09.002.

Gilbert, N. (2008). "Agent-Based Models." Sage Publications, Inc.

Giuliani, M. en Castelletti, A. (2013). "Assessing the value of cooperation and information exchange in large water resources systems by agent-based optimization." *Water Resources Research*, 49(7), 3912-3926, doi: 10.1002/wrcr.20287.

Hager, K., Rauh, J. en Rid, W. (2015). "Agent-based Modeling of Traffic Behavior in Growing Metropolitan Areas." *Transportation Research Procedia*, 10, 306-315, doi: 10.1016/j.trpro.2015.09.080.

Hare, M. en Deadman, P. (2004). "Further towards a taxonomy of agent-based simulation models in environmental management." *Mathematics and Computers in Simulation*, 64(1), 25-40, doi: 10.1016/s0378-4754(03)00118-6.

Hillebrand, B. en Castro-Gama, M. E. (2020). "De waterbalans van Brainport Smart District's waterbesparingscenario's." KWR 2020.062, KWR, Nieuwegein.

House-Peters, L. A. en Chang, H. (2011). "Urban water demand modeling: Review of concepts, methods, and organizing principles." *Water Resources Research*, 47(5), doi: 10.1029/2010wr009624.

Huber, L., Bahro, N., Leitinger, G., Tappeiner, U. en Strasser, U. (2019). "Agent-Based Modelling of a Coupled Water Demand and Supply System at the Catchment Scale." *Sustainability*, 11(21), doi: 10.3390/su11216178.

Janssen, S., Sharpanskykh, A. en Curran, R. (2019). "AbSRiM: An Agent-Based Security Risk Management Approach for Airport Operations." *Risk Anal*, 39(7), 1582-1596, doi:10.1111/risa.13278.

Jaxa-Rozen, M., Kwakkel, J. H. en Bloemendal, M. (2019). "A coupled simulation architecture for agent-based/geohydrological modelling with NetLogo and MODFLOW." *Environmental Modelling and Software*, 115, 19-37, doi: 10.1016/j.envsoft.2019.01.020.

Jensen, T. en Chappin, E. J. L. (2017). "Reducing domestic heating demand: Managing the impact of behavior-changing feedback devices via marketing." *J Environ Manage*, 197, 642-655, doi: 10.1016/j.jenvman.2017.04.036.

Kaminski, N., Murphy, M. en Marchetti, N. (2016). "Agent-based modeling of an IoT network." *IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*, doi: 10.1109/SysEng.2016.7753151.

Kandiah, V. K., Berglund, E. Z. en Binder, A. R. (2019). "An agent-based modeling approach to project adoption of water reuse and evaluate expansion plans within a sociotechnical water infrastructure system." *Sustainable Cities and Society*, 46, doi: 10.1016/j.scs.2018.12.040.

Kieu, L-M., Malleson, N. en Heppenstall, A. (2020). Dealing with uncertainty in agent-based models for short-term predictions. *R. Soc. Open sci.* 7:191074. <https://doi.org/10.1098/rsos.191074>.

Koutiva en Makropoulos. (2019). "Exploring the Effects of Alternative Water Demand Management Strategies Using an Agent-Based Model." *Water*, 11(11), doi: 10.3390/w11112216.

Koutiva, I. en Makropoulos, C. (2016). "Modelling domestic water demand: An agent based approach." *Environmental Modelling & Software*, 79, 35-54, doi:10.1016/j.envsoft.2016.01.005.

- Krebs, F. en Ernst, A. (2017). "A spatially explicit agent-based model of the diffusion of green electricity: model setup and retrodictive validation." *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 217-230, doi: 10.1007/978-3-319-47253-9_19.
- Lämmel, G. en Klüpfel, H. (2012). "Slower is faster: the influence of departure time distribution on the overall evacuation performance." *ICEM 2012*, doi: 10.13140/RG.2.1.3787.9201.
- Linkola, L., Andrews, C. J. en Schuetze, T. (2013). "An agent based model of household water use." *Water*, 5(3), 1082-1100.
- Liu, Y., Sun, F., Zeng, S., Lauzon, K. en Dong, X. (2016). "Integrated Model Driven by Agent-Based Water End-Use Forecasting to Evaluate the Performance of Water and Wastewater Pipeline Systems." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142(10), doi: 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000672.
- Macal, C. M. en North, M. J. (2006). "Tutorial on Agent-Based Modelling and simulation part 2: how to model with agents." *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*.
- Macal, C. M. en North, M. J. (2017). "Tutorial on agent-based modelling and simulation." *Journal of Simulation*, 4(3), 151-162, doi: 10.1057/jos.2010.3.
- Makropoulos, C. (2018). "Developing Water Wise Cities: A resilience assessment method applied to Oasen's water system." BTO 2018.020, KWR, Nieuwegein.
- Makropoulos, C. K., Natsis, K., Liu, S., Mittas, K. en Butler, D. (2008). "Decision support for sustainable option selection in integrated urban water management." *Environmental Modelling & Software*, 23(12), 1448-1460, doi: 10.1016/j.envsoft.2008.04.010.
- Marques, J., Cunha, M. en Savić, D. (2015). "A Multicriteria Approach for a Phased Design of Water Distribution Networks." *Procedia Engineering*, 119, 1231-1240, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.983>.
- Marques, J., Cunha, M. C., Sousa, J. en Savić, D. (2012). "Robust optimization methodologies for water supply systems design." *Drinking Water Engineering and Science*, 5(1), 31-37, doi: 10.5194/dwes-5-31-2012.
- Matthews, R. B., Gilbert, N. G., Roach, A., Polhill, J. G. en Gotts, N. M. (2007). "Agent-based land-use models: a review of applications." *Landscape Ecology*, 22(10), 1447-1459, doi: 10.1007/s10980-007-9135-1.
- Mayaud, J., Anderson, S., Tran, M. en Radić, V. (2018). "Insights from Self-Organizing Maps for Predicting Accessibility Demand for Healthcare Infrastructure." *Urban Science*, 3(1), doi: 10.3390/urbansci3010033.
- Mayaud, J. R., Tran, M., Pereira, R. H. M. en Nuttall, R. (2019). "Future access to essential services in a growing smart city: The case of Surrey, British Columbia." *Computers, Environment and Urban Systems*, 73, 1-15, doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2018.07.005.
- McCoy, D. en Lyons, S. (2014). "Consumer preferences and the influence of networks in electric vehicle diffusion: An agent-based microsimulation in Ireland." *Energy Research & Social Science*, 3, 89-101, doi: 10.1016/j.erss.2014.07.008.
- Melnikov, V. R., Krzhizhanovskaya, V. V., Lees, M. H. en Boukhanovsky, A. V. (2016). "Data-driven Travel Demand Modelling and Agent-based Traffic Simulation in Amsterdam Urban Area." *Procedia Computer Science*, 80, 2030-2041, doi: 10.1016/j.procs.2016.05.523.

Miller, E. J., Farooq, B., Chingcuanco, F. en Wang, D. (2011). "Historical Validation of an Integrated Transport – Land Use Model".

System." Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2255, 91-99, doi: 10.3141/2255-10.

Moerman, A., Blokker, E. J. M. en Agudelo-Vera, C. M. (2018). "Drinkwaterverbruik in Nederland." Chapter, Waterstromen boven- en benedenstrooms sanitair, TVVL, 16-19.

Monticino, M., Acevedo, M., Callicott, B., Cogdill, T. en Lindquist, C. (2007). "Coupled human and natural systems: A multi-agent-based approach." Environmental Modelling & Software, 22(5), 656-663, doi: 10.1016/j.envsoft.2005.12.017.

Nationaal Dataportaal Wegverkeer <http://opendata.ndw.nu/>

Ng, T. L., Eheart, J. W., Cai, X. en Braden, J. B. (2011). "An agent-based model of farmer decision-making and water quality impacts at the watershed scale under markets for carbon allowances and a second-generation biofuel crop." Water Resources Research, 47(9), doi: 10.1029/2011wr010399.

Niazu, M. en Hussain, A. (2011). "Agent-based computing from multi-agent systems to agent-based models: a visual survey." Scientometrics, 89(2), 479-499, doi: 10.1007/s11192-011-0468-9.

Palmer, J., Sorda, G. en Madlener, R. (2015). "Modeling the diffusion of residential photovoltaic systems in Italy: An agent-based simulation." Technological Forecasting and Social Change, 99, 106-131, doi:10.1016/j.techfore.2015.06.011.

Parker, D. C., Manson, S. M., Janssen, M. A., Hoffmann, M. J. en Deadman, P. (2003). "Multi-Agent Systems for the Simulation of Land-Use and Land-Cover Change: A Review." Annals of the Association of American Geographers, 93(2), 314-337, doi: 10.1111/1467-8306.9302004.

Pieterse-Quirijns, E. J. en Blokker, E. J. M. (2012). "Nieuwe rekenregels voor waterverbruik." H2O, 13.

Pieterse-Quirijns, E. J. en van de Roer, M. (2013). "Verbruikspatronenbibliotheek." BTO 2013.058, KWR, Nieuwegein.

Pieterse-Quirijns, I., Scheffer, W., Agudelo-Vera, C. en Blokker, M. (2012). "Duurzaam ontwerp van de aan- en afvoer van drinkwater." H2O, 37-39.

Rai, V. en Robinson, S. A. (2015). "Agent-based modeling of energy technology adoption: Empirical integration of social, behavioral, economic, and environmental factors." Environmental Modelling & Software, 70, 163-177, doi: 10.1016/j.envsoft.2015.04.014.

Rixon, A., Moglia, M. en Burn, S. (2006). "Exploring water conservation behavior through anticipatory agent-based modeling." Chapter 4, Topics on Systems Analysis for Integrated Water Resource Management, A. Castelletti en R. Soncini-Sessa, eds., Elsevier, 73-96.

Robertson, D. A. (2017). "Review of Agent-Based Modeling and Simulation (OR Essentials)."

Robinson, S. A. en Rai, V. (2015). "Determinants of spatio-temporal patterns of energy technology adoption: An agent-based modeling approach." Applied Energy, 151, 273-284, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.04.071.

Rozos, E., Photis, Y. N. en Makropoulos, C. (2015). "Water demand management in the expanding urban areas of South Attica." CEST2015 – Rhodes, Greece.

Salgato, M. en Gilbert, N. (2013). "Agent Based Modelling." T. Teo (Ed.), Handbook of Quantitative Methods for Educational Research, 247–265.

Salvini, P. en Miller, E. J. (2005). "ILUTE: An Operational Prototype of a Comprehensive Microsimulation Model of Urban Systems." Networks and Spatial Economics, 5, 217-234.

Sanchez, A., Medina, N., Vojinovic, Z. en Price, R. (2014). "An integrated cellular automata evolutionary-based approach for evaluating future scenarios and the expansion of urban drainage networks." Journal of Hydroinformatics, 16(2), 319-340, doi: 10.2166/hydro.2013.302.

Sanchez Torres, A., Vojinovic, Z. en Price, R. (2014). "Assessing rehabilitation strategies of urban drainage systems based on future scenarios of urbanization." 11th International Conference on Hydroinformatics HIC 2014, New York City, USA.

Scalco, A., Ceschi, A., Shiboub, I., Sartori, R., Frayret, J.-M. en Dickert, S. (2017). "The Implementation of the Theory of Planned Behavior in an Agent-Based Model for Waste Recycling: A Review and a Proposal." Chapter Chapter 4, Agent-Based Modeling of Sustainable Behaviors, 77-97.

Schwarz, N. en Ernst, A. (2009). "Agent-based modeling of the diffusion of environmental innovations — An empirical approach." Technological Forecasting and Social Change, 76(4), 497-511, doi: 10.1016/j.techfore.2008.03.024.

Shafiee, M. E. en Zechman, E. M. (2011). "Sociotechnical simulation and evolutionary algorithm optimization for routing siren vehicles in a water distribution contamination event." Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference 2011 (GECCO), Evolutionary Computation and Multi-agent Systems and Simulation (ECoMASS) Workshop, Dublin, Ireland, July 2011.

Shafiee, M. E. en Zechman, E. M. (2013). "An agent-based modeling framework for sociotechnical simulation of water distribution contamination events." Journal of Hydroinformatics, 15(3), 862-880, doi: 10.2166/hydro.2013.158.

Sikirica, N., Segrave, A. en Blokker, E. J. M. (2009). "Drivers for household water consumption."

Smit, S. K., Ubink, E. M., van der Vecht, B. en Langley, D. J. (2013). "Agent Based Modelling for Social Simulation." TNO report.

Sociaal en Cultureel Planbureau. (2005). Tijdsbestedingsonderzoek 2005 - TBO 2005 [computer file], Data Archiving and Network Services - DANS, Den Haag. Persistent identifier: urn:nbn:nl:ui:13-v64-rd7.

Sopha, B. M., Klöckner, C. A. en Hertwich, E. G. (2013). "Adoption and diffusion of heating systems in Norway: Coupling agent-based modeling with empirical research." Environmental Innovation and Societal Transitions, 8, 42-61, doi: 10.1016/j.eist.2013.06.001.

Sopha, B. M., Klöckner, C. A. en Febrianti, D. (2017). "Using agent-based modeling to explore policy options supporting adoption of natural gas vehicles in Indonesia." Journal of Environmental Psychology, 52, 149-165, doi: 10.1016/j.jenvp.2016.06.002.

Stephen Lansing, J. en N. Kremer, J. (1993). "Emergent Properties of Balinese Water Temple Networks: Coadaptation on a Rugged Fitness Landscape." *American Anthropologist*, 95(1), 97-114.

van Thienen, P., Vries, D., de Graaf, B., van de Roer, M., Schaap, P. en Zaadstra, E. (2013). "Probabilistic backtracing of drinking water contamination events in a stochastic world." 12th International Conference on Computing and Control for the Water Industry, CCWI, Perugia, Italy.

Vasiljevskaja, J., Douw, J., Mengolini, A. en Nikolic, I. (2017). "An Agent-Based Model of Electricity Consumer: Smart Metering Policy Implications in Europe." *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 20(1), doi: 10.18564/jasss.3150.

Vertommen, I. en Blokker, E. J. M. (2016). "Weers- en seizoensinvloeden op waterverbruik in DMA's." BTO 2016.004, KWR, Nieuwegein.

Vertommen, I., Blokker, E. J. M., Albert, M. en Agudelo-Vera, C. M. (2018). "Weers- en seizoensinvloeden op waterverbruik II." KWR 2018.043, KWR, Nieuwegein.

Vertommen, I., van Laarhoven, K. A. en Agudelo-Vera, C. M. (2020). "Optimaal ontwerp van robuuste en toekomstbestendige streefstructuren." BTO 2020.002, KWR, Nieuwegein.

Vonk, E., Cirkel, D. G. en Leunk, I. (2017). "De gevolgen van klimaatverandering en vakantiespreiding voor de drinkwatervraag." BTO 2017.043, KWR, Nieuwegein.

Yin, W., Murray-Tuite, P., Ukkusuri, S. V. en Gladwin, H. (2014). "An agent-based modeling system for travel demand simulation for hurricane evacuation." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 42, 44-59, doi: 10.1016/j.trc.2014.02.015.

Zechman, E. M. (2013). "Integrating evolution strategies and genetic algorithms with agent-based modeling for flushing a contaminated water distribution system." *Journal of Hydroinformatics*, 15(3), 798-812, doi: 10.2166/hydro.2013.102.

Zhang, L. en Levinson, D. (2004). "An Agent-Based Approach to Travel Demand Modeling: An Exploratory Analysis." *Transportation Research Board*, doi: 10.3141/1898-04.

I Opdracht TU Delft

Van	Onderwerp	Datum
Ina Vertommen (KWR)	Agent-based model for the design of future-proof water distribution networks	1 november 2019
Bestemd voor	Kopie / afschrift	Pagina
Dr. ir. Igor Nikolic (TU Delft)	Peter van Thienen, Mirjam Blokker, Bram Hillebrand (KWR)	1/2

Project description

Develop an agent-based model to simulate the evolution of a Dutch city and its demand for drinking water, in order to develop future water demand scenarios that can be used for the design of water distribution networks.

Motivation and objectives

Water distribution networks play an essential role in our society, providing water to households, services sector and industry. These systems are costly and are therefore designed and installed to last for many decades. During their life span, water distribution networks need to be able to satisfy water demand in terms of both quantity and quality. This means that when designing a water distribution network, the future demand for water needs to be taken into account. In the current practice, designers rely on expert panels and on rather rough estimates of future water demand, and tend to overdimension the systems to cope with the uncertain future. An overdimensioned system is more expensive and can also lead to water quality issues.

From the aforementioned it becomes clear that there is room for improving the design of water distribution networks by investing more attention on future water demand scenarios. This requires knowledge not only on the water demand per capita, but also on the development and evolution of cities and regions (for instance where people will work and live). Micro-simulation or agent-based models can be very useful for this end, since they can model the behavior of interest at the level of the individual decision making-unit (the agent being a person, a household, a firm, etc.). For instance, a person can have children, work part-time, buy a water saving washing machine or harvest rainwater, which are all decisions affecting his/her demand for water. Agent-based models have already been applied in household residential energy modelling [1], and are the standard approach in state-of-the-art in transportation and land-use models [2, 3]. An agent-based model also seems excellent for being combined with SIMDEUM, a tool for simulating water demand developed by KWR [4].

In this context, we would like to investigate the potential of agent-based models in providing insight in the future water demand, taking demography, behavioral changes (that can lead to less or more water use), urban and technological developments (such as new water saving appliances) into account, and how such an approach can be used to generate demand scenarios for application in the design of future-proof water distribution networks.

Case study

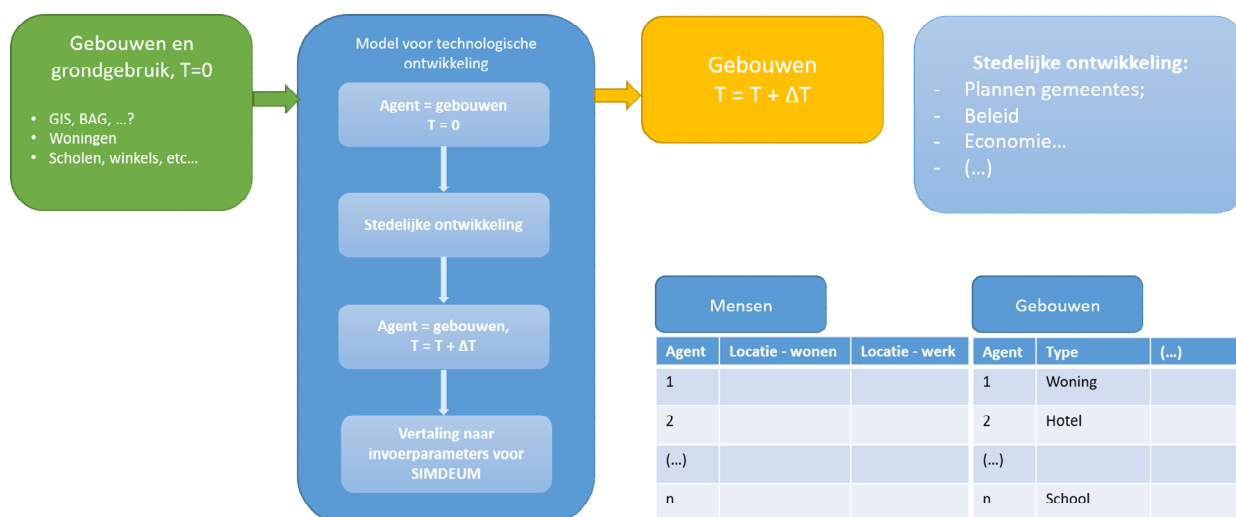
We propose to develop an agent-based model for the city of Delft. A model of the water distribution network serving Delft is available.

References

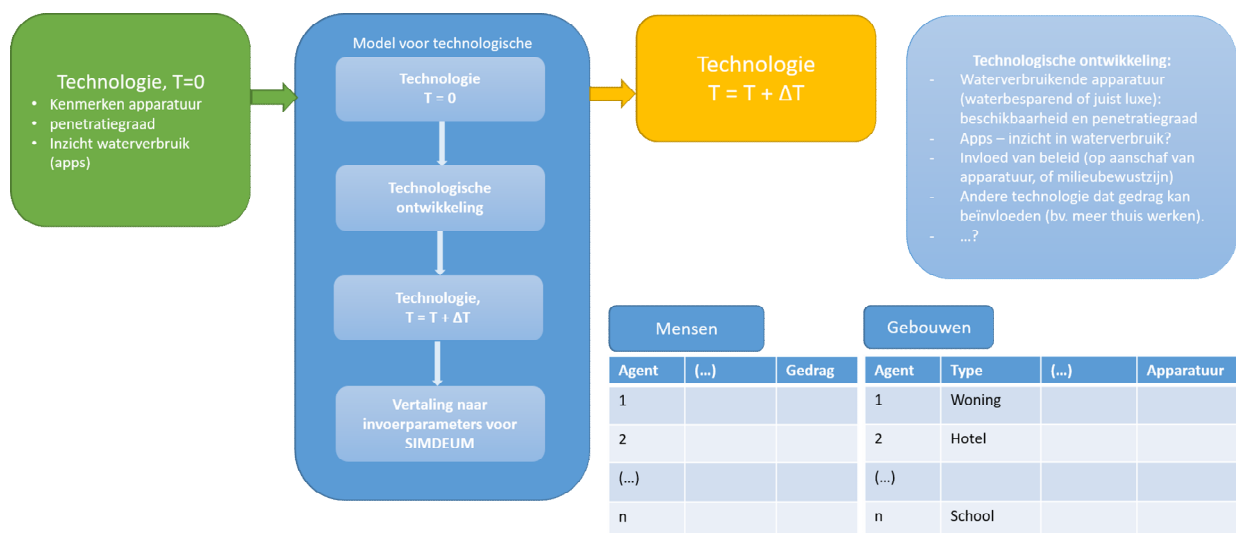
- [1] Chingcuanco, F. and E. J. Miller (2012) "A Microsimulation Model of Urban Energy Use", *Computers, Environment and Urban Systems*, special issue, *Geoinformatics* 36(2): 186-194.
- [2] Salvini, P. A. and E. J. Miller (2005) "ILUTE: An Operational Prototype of a Comprehensive Microsimulation Model of Urban Systems", *Networks and Spatial Economics*, 5: 217-234.

- [3] Miller, E. J. (2018) "Agent-based Activity/Travel Microsimulation: What's Next?", in Briassouli, et al. (eds), *Spatial Analysis: Tools and Land Use, Transport and Environmental Applications*, Springer, 119-150.
- [4] Blokker, E.J.M., C.M. Agudelo-Vera, A. Moerman, P. van Thienen, E.J. Pieterse-Quirijns, (2017) "Review of applications for SIMDEUM, a stochastic drinking water demand model with a small temporal and spatial scale", *Drinking Water Engineering and Science* 10(2017): 1-12.

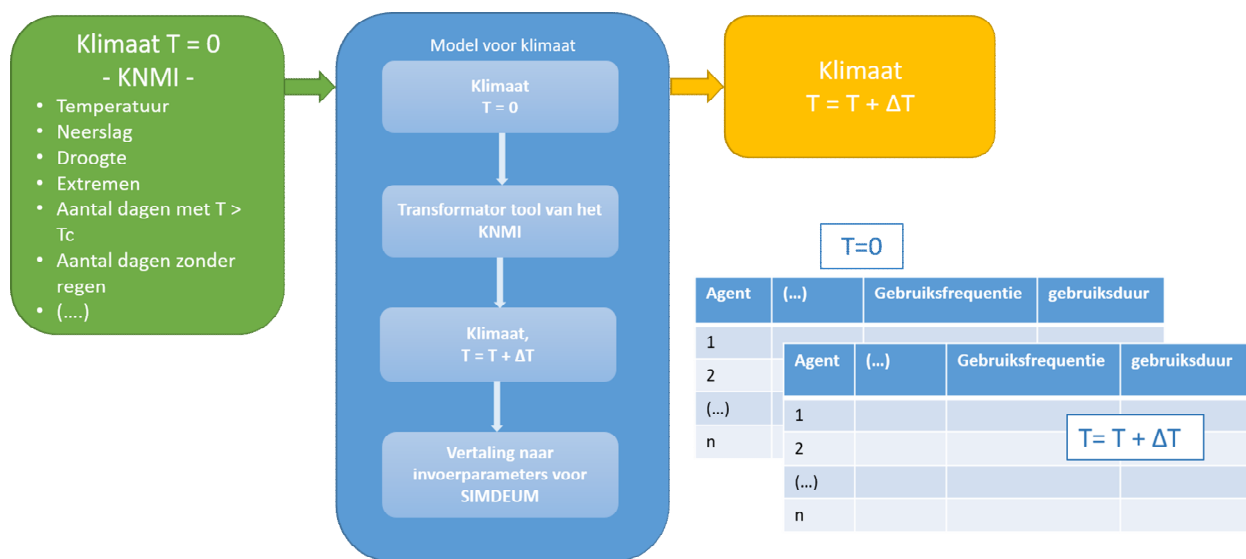
II Submodellen voor externe factoren



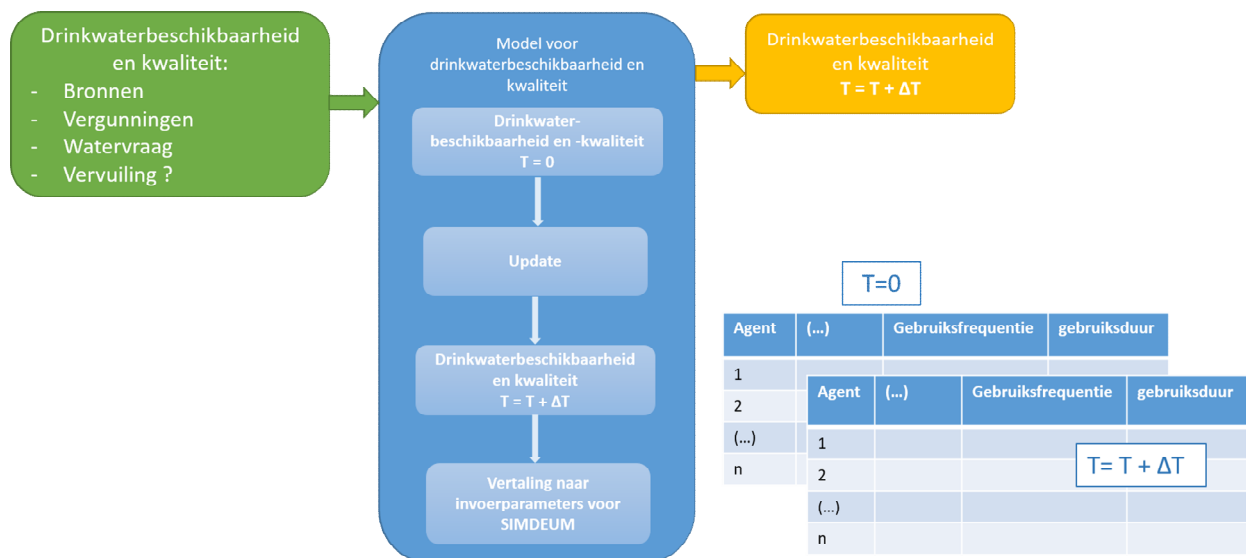
Figuur 12. Voorbeeld voor het submodel stedelijke ontwikkeling. Huidige gegevens (invoer in het groen) zijn beschikbaar bij het BAG. Een model zorgt ervoor dat de stedelijke ontwikkeling inzichtelijk is en dat deze wordt vertaald naar kenmerken van gebouwen en personen en invoerparameters van SIMDEUM. De output (geel) zijn de kenmerken van de gebouwen en locaties van wonen en werk van personen op ieder gewenste moment in de tijd.



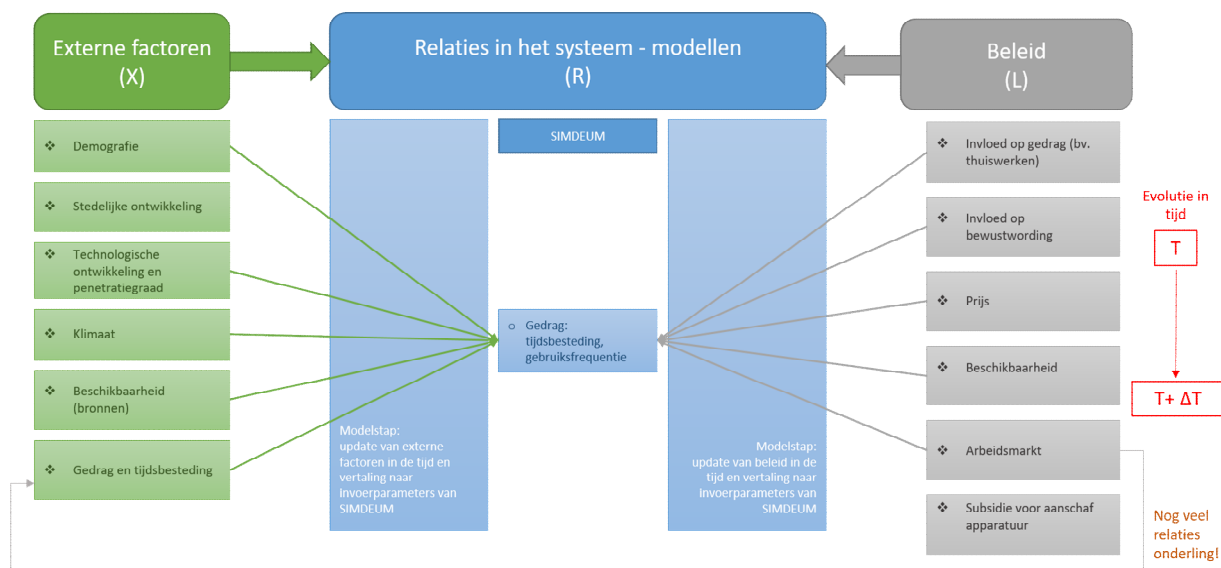
Figuur 13. Voorbeeld voor het submodel technologische ontwikkeling. Huidige gegevens (invoer in het groen) zijn beschikbaar per type apparatuur. Een model zorgt ervoor dat de ontwikkeling in technologie en de invloed daarvan op gedrag (bv. apps die inzicht geven in het waterverbruik leiden misschien tot zuiniger verbruik) en op keuzes van apparatuur in gebouwen (nieuwbouw of bij vervanging in bestaande gebouwen) inzichtelijk is. Kenmerken van apparatuur moeten worden vertaald naar invoerparameters van SIMDEUM.



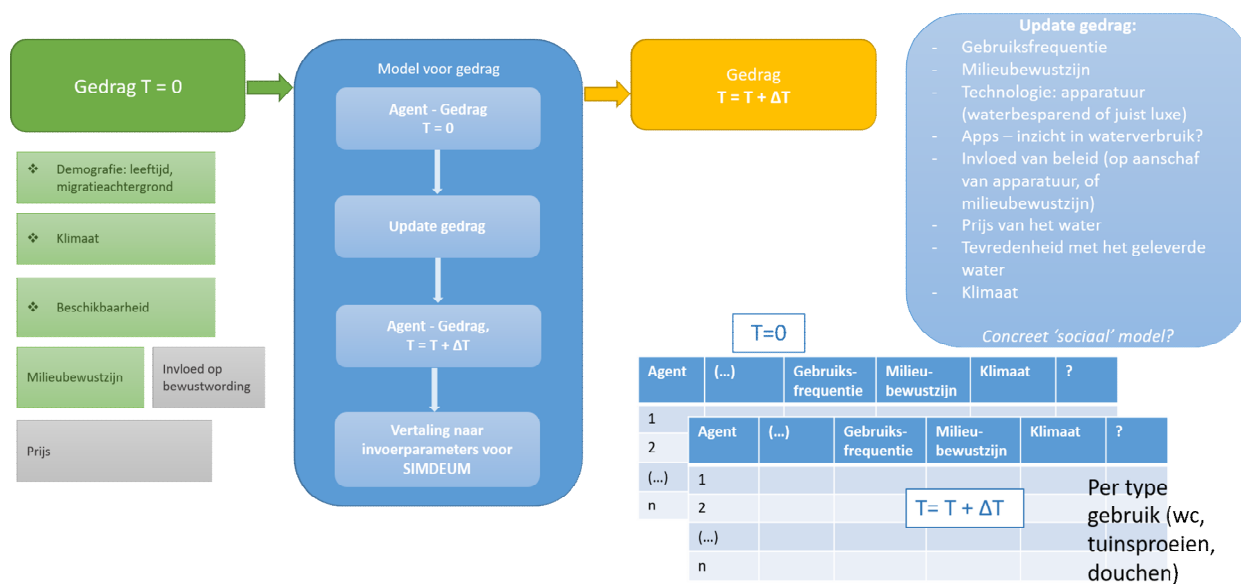
Figuur 14. Voorbeeld voor het submodel klimaat. Huidige gegevens (invoer in het groen) zijn beschikbaar bij het KNMI. Een model zorgt ervoor dat de ontwikkeling van het klimaat inzichtelijk is en dat de kenmerken worden vertaald naar invoerparameters van SIMDEUM, namelijk veranderingen in gebruiksfrequentie en -duur. De output (geel) is het klimaat op ieder gewenste moment in de tijd. Het KNMI heeft een model ter beschikking – de ‘transformator tool’. Deze zou eventueel kunnen worden gebruikt.



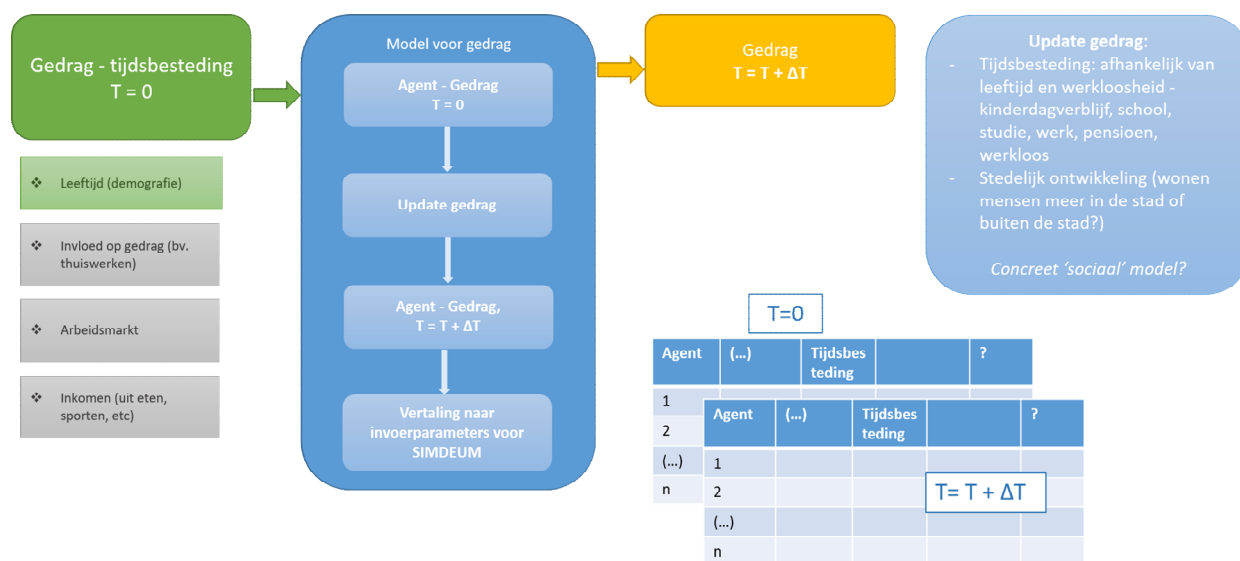
Figuur 15. Voorbeeld voor het submodel beschikbaarheid van drinkwater. Huidige gegevens (invoer in het groen) zijn bekend bij drinkwaterbedrijven en overheden. Een model zorgt ervoor dat de ontwikkeling inzichtelijk is. De beschikbaarheid van drinkwater is niet enkel afhankelijk van klimaat, maar ook vergunning en bv. de verdeling tussen water voor industrie en huishoudens. De output (geel) is de beschikbaarheid en kwaliteit van het drinkwater op ieder gewenste moment in de tijd.



Figuur 16. Complexiteit van 'gedrag' in het model: allerlei externe factoren en beleidsaspecten hebben een invloed op het gedrag van agenten en vervolgens op de gebruiksfrequentie, -duur en tijdsbesteding in SIMDEUM.



Figuur 17. Submodel voor het gedrag met focus op gebruiksfrequentie en -duur: verschillende externe factoren en beleidsaspecten hebben een invloed op de gebruiksfrequentie, -duur. Via en model dient dit geüpdatet te worden van de huidige situatie naar ieder gewenste moment in de tijd.



Figuur 18. Submodel voor het gedrag met focus op tijdsbesteding: leeftijd en beleidsaspecten zoals advies om thuis te werken, arbeidsmarkt en inkomen, hebben een invloed op de tijdsbesteding van agenten (personen). Via en model dient dit geüpdatet te worden van de huidige situatie naar ieder gewenste moment in de tijd.