

## Het Waterkwaliteitsverstoringmodel

*Onno Kramer (Waternet/TU Delft/Hogeschool Utrecht), Allyshah Maduro (BLUE-tec), Leon Kors (Waternet), Eric Baars (Waternet), Wim van Vugt (Hogeschool Utrecht)*

**Bij een verstoring van de waterkwaliteit hebben de mensen op het crisiscentrum van Waternet baat bij informatie over de omvang en de locatie van deze verstoring. Het door Waternet in samenwerking met de Hogeschool Utrecht ontwikkelde Waterkwaliteitsverstoringmodel geeft op basis van tijd de vereiste informatie. Met dit beslissingsondersteunend model kunnen er adequate maatregelen worden genomen om de verstoring te beheersen en de volksgezondheid wat betreft de drinkwaterkwaliteit te waarborgen. Waternet heeft het model in de praktijk succesvol getest.**

Bij drinkwaterbereiding kunnen zich altijd verstoringen voordoen. Snel handelen en de juiste maatregelen treffen is dan van wezenlijk belang. Na ruim tien jaar ontwikkelen heeft het Waternet operationeel crisisteam (WOT) een beslissingsondersteunend Waterkwaliteitsverstoringmodel (WKVM) gereed voor de vier locaties van Waternet, waarmee op basis van tijd informatie wordt verkregen over plaats en omvang van een verstoring. Met deze informatie kan het WOT in het crisiscentrum de juiste maatregelen nemen (Weten en beheersen). Waternet wil het WKVM graag samen met collega-drinkwaterbedrijven verder door ontwikkelen. Een goede stap om Nederland wat betreft kraanwater nog veiliger te maken.

### Historie

In 1977 schreef sectorhoofd Peter Weesendorp bij de toenmalige Gemeentewaterleidingen het handboek Procesvoering Plassenwaterleiding. Hierin was een eenvoudig doch functioneel overzicht opgenomen van de verblijftijden van het water in de processen, op basis van de dimensies van de zuivering. Met dit overzicht had de dienstdoende chef van het regelcentrum globaal inzicht in het verloop van de kwaliteit van het drinkwater door de zuivering heen op basis van de kwantiteitsgegevens.

Het voormalig afdelingshoofd Productie Loek Stam sprak in 2004 de wens uit voor een simpel rekenmodel ('Nijntje-model') om bij een incident snel en adequaat te kunnen optreden als de waterkwaliteit in het geding is. De opzet van dit model moest zijn dat het altijd zou werken en dat iedereen het kon begrijpen en gebruiken. Bij het maken van een model werd de voorkeur gegeven aan gebruikersgemak en eenvoud boven grote nauwkeurigheid. De mensen van het crisisteam hadden namelijk belang bij een intuïtief rekenmodel waarmee de gevolgen van een incident op de waterkwaliteit vrij eenvoudig moesten kunnen worden voorspeld.

Een simpel rekenmodel werd in 2005 opgesteld in Excel omdat veel mensen hiermee kunnen werken en dit op vrijwel elke pc is geïnstalleerd. Zodoende was het model vrijwel overal beschikbaar.

De achterliggende rekenmethodiek was heel eenvoudig. Op basis van de kenmerken van de objecten in de zuivering en de productiedebieten werd de hydraulisch gemiddelde verblijftijd  $t_{50}$  uitgerekend. Het ontwikkelde model bood overzichtelijk en in hoofdlijnen inzicht in de verblijftijd voor de vier vestigingen Loenderveen+Weesperkarspel en Nieuwegein+Leiduin met aanvullend de hoofddistributieleidingen naar de stad Amsterdam. Tot 2009 zijn er bij Waternet geen

noemenswaardige incidenten geweest en is dit Nijntje-model niet operationeel ingezet. Wel is het model gebruikt voor trainingsdoeleinden voor het crisisteam bij de sector Drinkwater.

## Incident

Een belangrijke zuiveringsstap in de integrale waterbehandeling met een multi-desinfectiebarrière is de ozonisatie, waarbij organische microverontreinigingen worden omgezet. In 2009 viel op productielocatie Weesperkarspel deze ozonisatie door samenloop van omstandigheden een aantal uren uit. Het incident heeft in de publieke media de nodige aandacht gekregen.



Afbeelding 1. Bericht in het WeesperNieuws van 9 september 2009, naar aanleiding van de ozonuitval bij Waternet.

Dit incident was de aanleiding om het 'Nijntje-model' in de praktijk te gebruiken. In het rekenmodel werden tijdstip en plaats van verstoring ingevoerd. Het model voorspelde een  $t_{50} = -3$ , oftewel dat de piek van on-geozoniseerd water al drie uur de poort uit was. Het WOT kon toen direct preventieve maatregelen nemen, zoals het uitschrijven van een kookadvies. Op basis van waterkwaliteitsanalyses bleek achteraf dat er geen normoverschrijding was opgetreden van het reine water en zodoende de volksgezondheid niet in het geding is geweest. Productielocatie Weesperkarspel heeft een bron met een zeer constante waterkwaliteit en tijdens de ozonuitval was de waterkwaliteit vanuit Loenderveen gunstig waardoor de belasting van de zuivering laag was. De voorspelde drie uur was achteraf gezien niet erg betrouwbaar. Het gaf enkel een indicatie dat er iets gaande was en dat er maatregelen nodig waren. Van dit incident heeft Waternet veel geleerd. Enerzijds is een eenvoudig rudimentair model zeer handig voor het handelen en het nemen van maatregelen. Anderzijds is er ook behoefte aan meer gedetailleerde informatie over het verloop van de waterkwaliteit, zowel voor als na de zuivering, als functie van de tijd.

090907 Waternet - Responstijd verstoring model v1.18 Ozon uitval 7 sep 2009 [Compatibiliteitsmodus] - Microsoft Excel

Bestand Start Invoegen Pagina-indeling Formules Gegevens Controleren Beeld Ontwikkelaars Invoegtoepassingen Acrobat

Responstijd verstoringmodel **Plassenwaterleidingen** Versie: 1,18 Bij vragen bel Onno: 7066

Invoer gegevens	Invoergegevens	
Vermoedelijke locatie van verstoring	Ozonisatie	Dit is de plaats waar een verstoring (ongewenste stof) in het proces is aangebracht.
Klant keuze	Eerste dichtstbijzijnde Waternet klant	Welke klant krijgt te maken met de verstoring.
Vermoedelijk tijdstip van verstoring	ma-7-sep-2009 16:15	Actuele datum en tijd (nu): <b>di-8-sep-2009 10:15</b>
Actuele productie [m <sup>3</sup> /uur]	2800	Standaardwaarde water flow 3000 m <sup>3</sup> /h. 2776 m <sup>3</sup> /h <input type="button" value="Opvragen meeste recente productie"/>
Verblijftijd in proces [uur]	15	Hoe lang nog verblijft de stof X nog in het (zuiverings)proces tot de klant bij de heesende productie.
Verlopen tijd na verstoring [uur]	18	Hoeveel uur geleden is de verstoring ontstaan?
Resterende tijd in proces [uur]	<b>-3</b>	Hoeveel tijd is er nog voordat de verstoring de klant bereikt? Negatief = tijd te kort → productie omlaag. Postief = tijd over.
Vermoedelijk tijdstip van aankomst	di-8-sep-2009 07:35	Wanneer? Het moment dat de stof X bij de eerste klanten uit de kraan kan komen. De piek welgesteld.
Vermoedelijk locatie in proces van piek	Eerste dichtstbijzijnde Waternet klant	Waar bevindt zich thans de verstoring?

Ga naar de gegevens van het proces

**Zoek optie**

Tijdperiode mogelijk [uur]	24	Hoeveel tijd is gewenst voordat de verstoring de eerste klanten bereikt. Bijv. om maatregelen te treffen.
Resterende tijd	<b>-27</b>	Negatief betekent tijd te kort en moet de productie worden aangepast. Postief = tijd over.

Afbeelding 2. Numerieke resultaten van het 'Nijntje-model' in Excel tijdens de ozonuitval te Weesperkarspel. Volgens het model was de piek  $t_{50}$  al 3 uur vanaf de productielocatie verpompt.

## Drinkwaterwet en kwaliteit

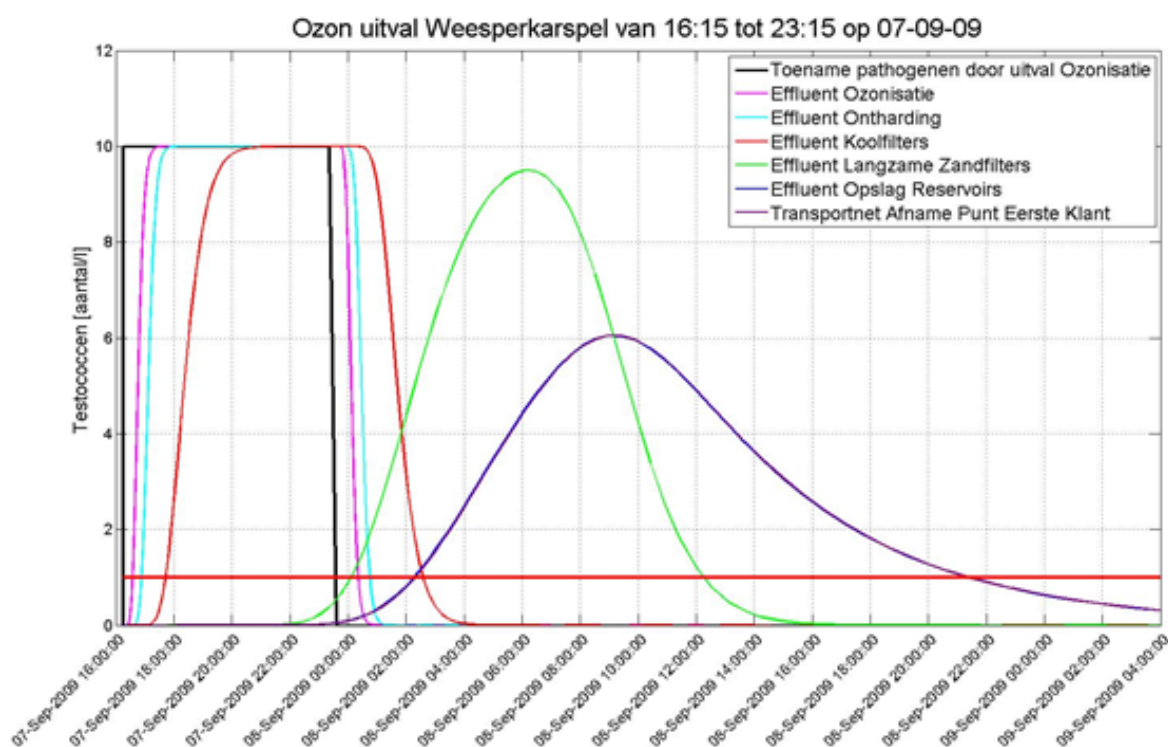
De overheid neemt maatregelen om de kwaliteit van het drinkwater te beschermen en de beschikbaarheid te waarborgen [1]. De Inspectie Leefomgeving en Transport (ILT) is aangewezen als toezichthouder op de naleving van de regels voor drinkwatervoorziening. Het drinkwater in Nederland voldoet aan de wettelijke kwaliteitseisen. Het water is schoon en veilig om te drinken. Dit blijkt uit metingen door drinkwaterbedrijven. Het Crisis Expert Team milieu en drinkwater (CET-md) is één landelijk netwerk en in 2014 voortgekomen uit de samenvoeging van het Beleidsondersteunend Team milieu-incidenten (BOT-mi) en de Eenheid Planning en Advies drinkwater (EPA-d).

Om in te springen op verstoringen in waterkwaliteit zijn nieuwe meetmethoden in ontwikkeling, zoals sensoren voor de dagelijkse bewaking van de drinkwaterkwaliteit, maar ook moleculaire detectietechnieken en bio-assays als vangnet voor en aanvulling op stoffenanalyse verricht door het laboratorium [2]. Ook voorspellende waterkwaliteitsmodellen kunnen een positieve bijdrage leveren aan het beschermen van ons drinkwater. Omdat deze modellen vaak worden ontwikkeld in academische instituten en opleidingscentra is de praktische implementatie en toepassing bij de waterbedrijven zelf niet vanzelfsprekend.

## Dynamische modellering

Bij een nadere analyse en vergelijking van de resultaten van het Nijntje-model bleek de mate van menging en verblijftijdspreiding door de zuivering heen van invloed op het concentratieverloop en plaats in het proces. Het Nijntje-model berekende bij het ozon-incident een  $t_{50}$  van -3 uur. Oftewel dat het de piek van niet-geozoniseerde drinkwater al drie uur de zuivering had verlaten en de stad in is gedistribueerd. Om de mate van spreiding te onderzoeken is gebruik gemaakt van het dynamisch modelgebaseerde simulatiepakket Matlab-Simulink [3]. Hier kwam duidelijk naar voren dat de processen met veel inhoud, zoals de langzame zandfilters en de drinkwaterreservoirs, veel afvlakking veroorzaakten [4], [5]. Het numerieke resultaat van 3 uur geeft een eerste indruk waardoor de eerste

maatregelen kunnen worden getroffen, maar niet meer dan dat. Dit is te vergelijken met een stoplicht; het is goed of er is actie nodig. De breedte van de golf door de zuivering kan niet worden verkregen met het Nijntje-model. Dit is wel mogelijk met Matlab-Simulink. Dit is echter een specialistisch pakket waar weinig praktijkmensen mee werken. Bovendien is het opzetten van een model dat een representatieve simulatie kan maken van een vergelijkbaar incident tijdrovend. En juist op het moment van een incident is deze tijd beperkt. Het in kort tijdbestek aanpassen van het Nijntje-model in Excel is daarentegen wel mogelijk. Dit was de aanleiding om een model te ontwikkelen in samenwerking met de Hogeschool Utrecht, waarin werd gebruik gemaakt van beide voordelen: gebruiksgemak en robuustheid alsmede de gedetailleerder informatie van het dynamisch modelleren. In dit Waterkwaliteitsverstoringsmodel werd zowel de theoretische kennis als praktische ervaring te gecombineerd.



Afbeelding 3. Simulatie met Matlab-Simulink van de ozonuitval in 2009, waarbij de verblijftijdspreiding door de zuivering heen inzichtelijk wordt gemaakt.

### Benodigheden

Voor een goed voorspellend model zijn verscheidene onderdelen nodig:

1. Chemische reactorkunde
2. Rekenmodule om dynamisch te simuleren
3. Geschikte softwareomgeving
4. Kenmerken, eisen en grenswaarden van de processen

### Chemische reactorkunde

In de praktijk heeft men te maken met verspreiding van een verontreiniging door de zuiveringsprocessen heen. Om de effecten van deze verspreiding te kunnen voorspellen is bij de modellering gebruik gemaakt van chemische reactortechnologie [6]. In de reactorkunde maakt men

veel gebruik van twee uiterste ideale modelreactoren: de Ideale geroerde tankreactor (CSTR) en de propstroom- of buisreactor (PFR). In het eerste geval is er sprake van ideale menging en is de uitgaande concentratie gelijk aan de concentratie in het vat, terwijl er in de buisreactor helemaal geen menging is en in feite een prop wordt doorgegeven in de tijd. De praktijk is weerbarstiger omdat er altijd een zekere mate van spreiding is. Dit kan worden benaderd door het achter elkaar schakelen van meerdere CSTR's. Oneindig veel CSTR's achter elkaar leveren dan weer een PFR op. De mate van menging wordt in de modellering bepaald door het aantal geschakelde reactoren  $N$ .

### ***Rekenmodule***

In het WKVM is een rekenmodule (CPU) ontwikkeld en geïmplementeerd met één tijdsconstante (stapgrootte), waarbij het dynamische concentratieverloop wordt berekend aan de hand van de basismodelreactoren. Het model geeft essentiële informatie over de mate van verblijftijdspreiding. Naast de piek,  $t_{50}$ , geeft het model ook informatie over de kop,  $t_{10}$ , en staart,  $t_{90}$ , van een verstoring.  $T_{10}$  geeft aan bij welk tijdstip 10 procent van de verontreiniging is gepasseerd en  $t_{90}$  90 procent. De numerieke resultaten van het rekenmodel zijn vergeleken met Matlab-Simulink en kwamen nagenoeg met elkaar overeen (Afbeelding 3).

### ***Geschikte softwareomgeving***

Het WKVM is ontwikkeld in Excel met Visual Basic Application (VBA). Deze keuze voor Excel met VBA inside verdient de voorkeur boven een zwaarder modelleringspakket omdat het programma inzichtelijk blijft voor de technologen van Waternet en bovendien eenvoudig aanpasbaar is. De programmeercode is beperkt van omvang en in Excel eenvoudig aan te passen.

### ***Kenmerken, eisen en grenswaarden***

Een belangrijk onderdeel van het model is de zogenaamde KEG-database: Kenmerken, Eisen en Grenswaarden. Hierin zijn de basiskenmerken opgenomen van de zuiveringsprocessen, zoals maten, inhouden, capaciteiten en de normenset plus de eisen die het management aan een zuiveringsinstallatie stelt. Een voorbeeld van dit laatste is bij welk productiedebiet de installatie doorgaans moet draaien. De grootte en schakeling van de procesonderdelen zijn van belang om de mate van spreiding en verloop van de concentratie te kunnen berekenen.

### **Educatie**

Waternet werkt al jaren intensief samen met de Hogeschool Utrecht. Veel studenten van het Institute for Life Sciences and Chemistry voltooien hun stageopdracht bij de afdeling Productie van de sector Drinkwater. De meeste studenten komen van de opleiding Chemische Technologie waar zij het vak reactorkunde [7] krijgen. Dit vak sluit heel goed aan bij het vraagstuk van de verblijftijdspreiding. Zodoende zijn er meerdere studenten bezig geweest met het verder omwikkelen van het WKVM. Student chemische technologie Emiel van der Woerdt [8] heeft verscheidene verblijftijdsspreidingsexperimenten (tracerproeven) uitgevoerd om voor de verschillende processtappen de  $N$  te bepalen [9],[10]. Student Mohamed el Mokaddam [11], nu werkzaam bij Evides, heeft vervolgens het dynamisch-reactorkundige WKVM ontwikkeld. Tijdens zijn eindpresentatie voor Waternet kwam er een melding binnen van fenol in het Lekkanaal bij de vestiging Nieuwegein. Zo kon hij direct live zijn model demonstreren, waardoor er accurate maatregelen

konden worden genomen. De zin van deze modelontwikkeling werd hiermee aangetoond. De opvolger van Mohamed, Gerard van Hassel [12], nu werkzaam bij Royal HaskoningDHV, heeft het model omgebouwd met gebruik van VBA. Hierdoor ging de prestatie van de rekensnelheid met een factor 100 omhoog en de bestandsgrootte omlaag tot amper 1 MB. Aan de hand van data over 10 jaar van Het Waterlaboratorium (HWL), heeft Gerard voor meer dan 1000 in het ruwe water van Nieuwegein en Leiduin gemeten stoffen de verwijderingsrendementen bepaald. Hiermee konden de reactiesnelheidsconstanten worden bepaald die als basis dienen voor de omzetting in de reactorkundige rekenmodule. Aanvullend heeft student Sven Schoonhoven de gebruikerswensen vormgegeven in een Graphical User Interface (GUI) en heeft Jasper Steenbrink een data-stroomkaart voor het model ontwikkeld.

### **Praktijkaanpak**

Samen met de inbreng van vele studenten en de kennis van Waternet is uiteindelijk gekozen voor een meer generiek en vereenvoudigd model. Hierbij is de balans gezocht tussen enerzijds eenvoud en robuustheid, rekening houdend met gebruikersgemak, en anderzijds veelzijdigheid en nauwkeurigheid, rekening houdend met het risico van te veel complexiteit. Met een generiek en vereenvoudigd model van acht in serie geschakelde processtappen, met één tijdsconstante, is naast de reactortechnologie van verblijftijdsspreiding ook de afbraak ingebracht. De afbraak kan groepspecifiek worden aangebracht of stofspectief indien bekend. Deze meer 'recht toe, recht aan'-resulteerde in een generiek, werkbaar dynamisch model in Excel-VBA. Met dit WKVM kunnen de omvang en locatie van de verstoring worden bepaald om daarna maatregelen te nemen om de verstoring te beheersen.

Het is daarna gelukt om de beide voor- en hoofdzuiveringen van Leiduin en Weesperkarspel in vier aparte modules van acht processen werkende dynamische waterkwaliteitsverstoringmodellen te plaatsen. De randvoorwaarde hierbij was dat de verblijftijden van de processen in een orde van grootte van 1 tot 10 uur liggen. De Waterleidingplas en het Duingebied, met verblijftijden van 50 tot 100 dagen (1200 - 2400 uur), dienen in aparte éénstapsmodules opgenomen te worden met een grotere tijdsconstante.

### **Kalibreren en valideren**

Om het WKVM te kalibreren is de KEG-database gevuld voor specifiek de zuiveringen van Waternet en zijn verwijderingsrendementen (k-waardes) gegenereerd. Geplande proceswijzigingen lenen zich uitstekend voor het valideren van het model. In het WKVM worden de tijdsduur van de verstoring en de concentratie ingevoerd. Ook het productiedebiet is van belang, omdat hiermee de mate van spreiding door de zuivering kan worden beïnvloed.

Begin hier:

**Start**

**Ingevuld gegevens:**

Tijd:	20:00:00	[uu:mm]
Datum:	30-05-2017	[dd:mm:jjjj]
Locatie:	Leiduin	[-]
Debiet:	6000	[m <sup>3</sup> /h]
Concentratie:	1,00	mmol/L
Stof:	Hardheid	[-]
(Gekozen) Afbraak:	0%	
Norm:	1,00	mmol/L
Type:	Stapverstoring	
Plek van verstoring:	Ontharding Leiduin	
Eind:	Reservoir Leiduin	

**Aanpassen**

**Funtionaliteiten:**

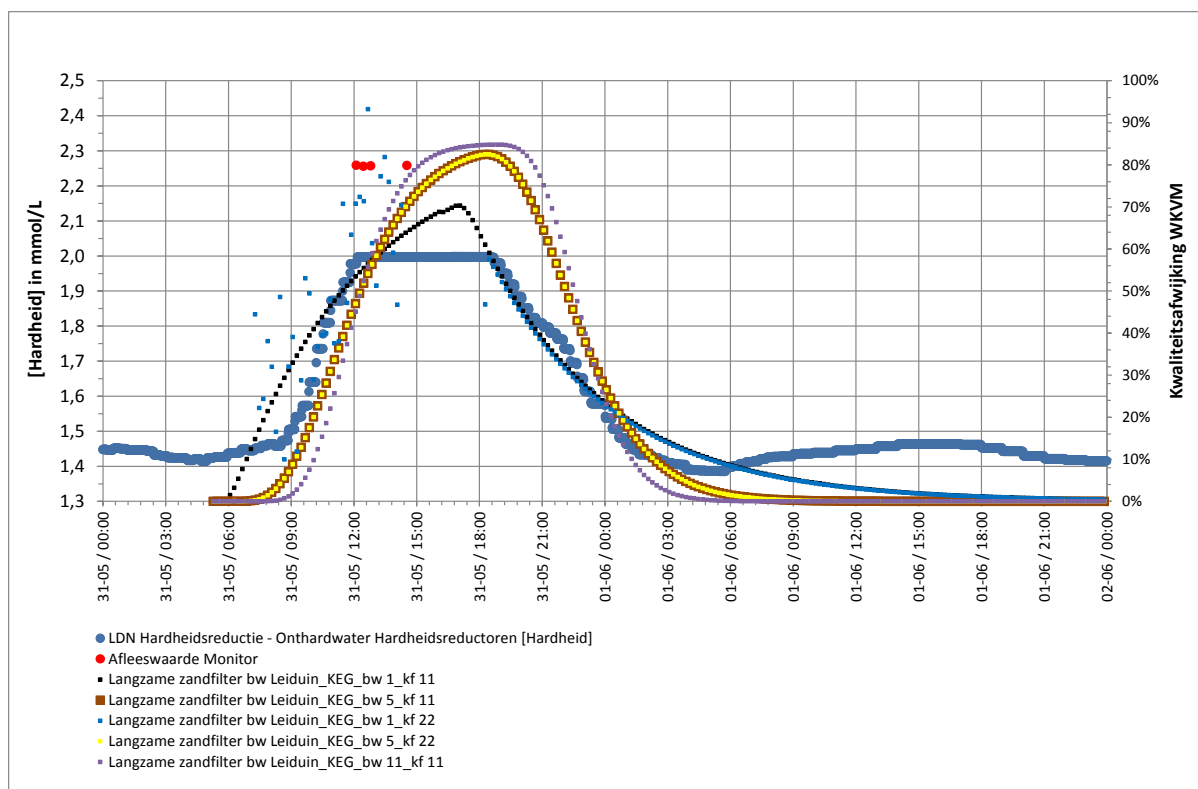
Save als PDF      Save Worksheet      Send Email

Afbeelding 4. Het WKVM in Excel met de 8 zuiveringsstappen met invoerscherm.

### **The proof of the pudding: het model en de praktijk**

In verband met een grote onderhoudsactiviteit op Leiduin moest op 31 mei 2017 de ontharding worden stopgezet. Dit leverde een goede casus op voor het testen van het WKVM. Er kon immers gedurende een periode van ongeveer 11 uur een tijdelijk hogere hardheid als ‘verstoring’ worden doorgerekend. De kernvraag was: kunnen we de tijdelijke wijziging van de hardheid redelijk nauwkeurig voorspellen?

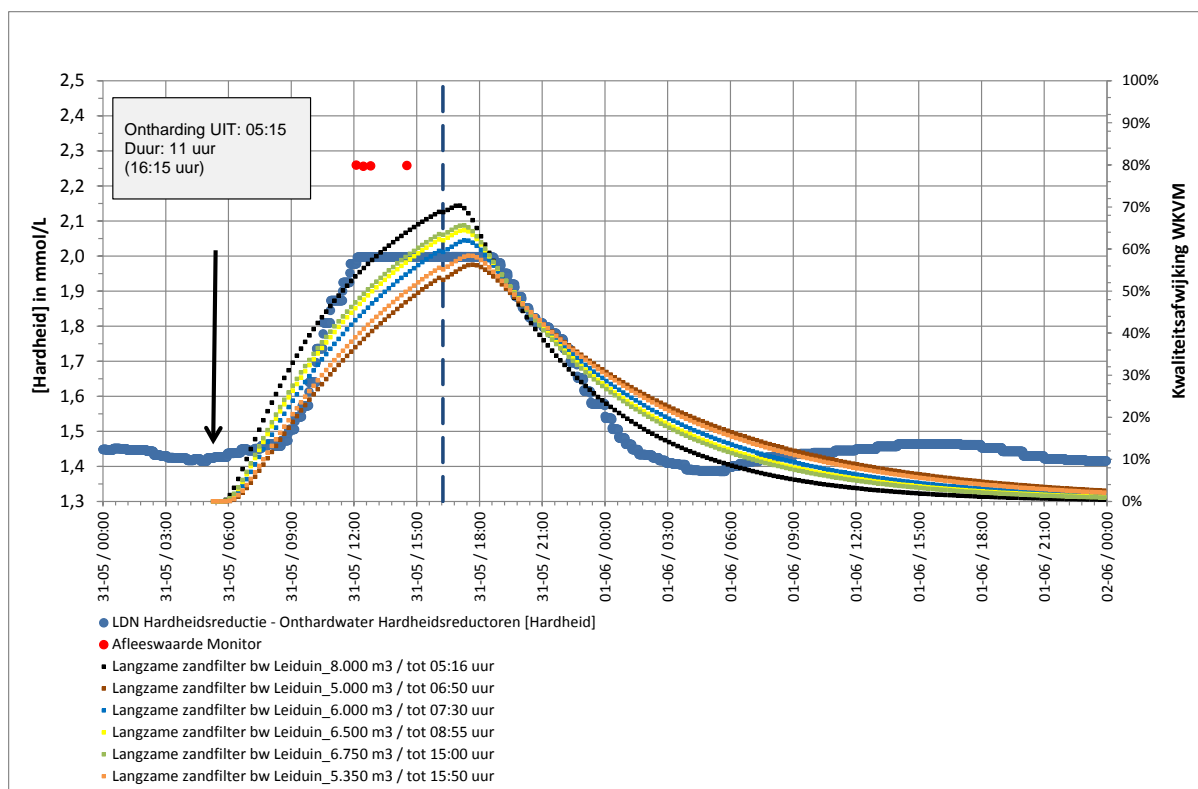
De praktijk blijkt weerbarstig, maar helpt ons weer een stuk verder op weg. Zo bleken bij de eerste meetreeks de voorspelde hardheidsverhoging na de koolfilters, bijna twee uur later door te komen dan voorspeld (Afbeelding 5). Tegelijkertijd lijkt de verandering van hardheid zich anders te gedragen dan die van de pH. Welk fysisch/chemisch principe hieraan ten grondslag ligt is nog niet achterhaald. Ook zal de zuivering zich niet als een ideale prop- of geroerde menger gedragen. Het blijft een praktijkinstallatie.



Afbeelding 5. Resultaten van het WKVM naar aanleiding van de geplande onderbreking van de ontharding te Leiduin op 31 mei 2017. Een stapverstoring van de hardheid van drinkwater is in het model ingevoerd. De effecten van de verblijftijdspreiding door de zuivering stroomafwaarts zijn gesimuleerd en weergegeven met de gekleurde lijnen. De hardheidsverhoging gaat als een golf door het bedrijf heen en duurt ongeveer een dag, tot het weer de gebruikelijke hardheid van 1,4 mmol/L is bereikt.

Een complicerende factor is dat het model uitgaat van een statisch debiet, terwijl in de praktijk sprake was van een wisselend (geleidelijk oplopend of aflopend) debiet. Het goede is dat Waternet door de model- en praktijkresultaten te vergelijken een verbeteringslag heeft kunnen maken door rekening te houden met transportonderdelen en een meer nauwkeurigere schatting van het aantal CSTR's per procesonderdeel. Door het wijzigen van de CSTR-parameters sluiten de modelwaarden beter aan op de gemeten waarden.





Afbeelding 6. Het invoerscherm van het WKVM in Excel.

Verbeterpunten liggen op het gebied van:

- Reactorkunde (verblijftijdspreiding, keuze aantallen en schakeling modelreactoren, orde van reactiekinetiek, dode zones, tijdelijke accumulatie)
- Nauwkeurigheid van KEG (verdere onderverdeling van processen in rekenmodules)
- Keuze van geschikte tracer. De vraag is of hardheid ( $\text{Ca}^{2+}$ ) de juiste te volgen parameter is.
- Simulatie (het verkleinen van rekenstapjes met als nadeel langere rekentijd versus nauwkeurigheid)
- Onderzoeken pakketkeuze: Excel/VBA omzetten naar Python/Epanet e.d.

Het model hoeft niet 100% sluitend te werken. Bij een incident willen we vooral snel een orde-van-grootte-idee krijgen waar een eventuele verstoring terug te vinden is in het proces, omdat dit ons handelingsperspectief sterk verbetert.

Bij het ontwikkelen van het model is bewust gekozen voor Excel/VBA vanwege de flexibiliteit en vrijheid te creëren om op maat wijzigingen te kunnen doorvoeren in het model. Het nadeel hiervan is dat de broncode complex wordt. Vooralsnog volstaat dit. De praktijktoets met de ontharding leert dat het wenselijk is om met meer variabelen dan voorheen rekening te kunnen houden, zoals het wisselende debiet. Dit kan betekenen dat de overstap naar een geavanceerder platform in de toekomst nodig kan zijn. Wellicht weer een leuke educatieopdracht of samenwerkingstraject met waterpartners.

## Conclusie

Met het beslissingsondersteunende Waterkwaliteitsverstoringmodel is het mogelijk snel informatie over tijd, locatie en omvang van een verstoring van de waterkwaliteit te verkrijgen, om zodoende adequate maatregelen te kunnen treffen.

Het ontwikkelen van degelijke complexe modellen kan heel goed worden gerealiseerd in samenwerking met het hoger onderwijs.

Het is bij het ontwikkelen van modellen de kunst de juiste balans te vinden tussen enerzijds eenvoud en robuustheid en anderzijds veelzijdigheid en nauwkeurigheid. Deze keuze kan beter worden gemaakt door de modellen te testen in de praktijk. Dit testen kan heel goed plaatsvinden bij geplande wijzigingen in de procesvoering, waarbij de verandering in waterkwaliteit kan worden gevolgd met in-lijn-sensoren of met een wateranalyse-meetprogramma.

Waternet wil het WKVM graag verder door ontwikkelen samen met collega-drinkwaterbedrijven in Nederland.

Het WKVM is ontwikkeld in Excel met een VBA-code en is in principe openbaar voor de collega-waterbedrijven.

## Referenties

1. Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2014). *Beleidsnota Drinkwater Schoon drinkwater voor nu en later*
2. Kaspers, B., Oostenbruggen, R. van & Zahradnik, P. (2015). *Crisis Expert Team milieu en drinkwater, Specialistische kennis bij complexe incidenten*. CET-md brochure
3. Helm, A.W.C (2007). *Integrated modeling of ozonation for optimization of drinking water treatment*. Ph.D. thesis, TU Delft
4. Helm, A.W.C (2007). Integrale modellering van ozonisatie voor optimalisatie Drinkwaterbereiding. *H<sub>2</sub>O* 23, pp. 35-38
5. Schagen, K.M. van (2009). *Model-based control of drinking-water treatment plants*. Ph.D. thesis, TU Delft
6. Akker, H.E.A. van den & Mudde, R.F. (1998). *Fysische Transportverschijnselen I*, 1<sup>e</sup> druk. Delft University Press, ISBN 90-407-1204-2
7. Vugt, W.H. van (2012). *Syllabus Reactorkunde semester 6*, Hogeschool Utrecht
8. Woerdt, E. van der (2011). *Verstoringsmodel*. Afstudeerverslag, 1<sup>e</sup> druk, Hogeschool Utrecht
9. Levenspiel, O (2012). *Tracer Technology*, 3<sup>e</sup> druk. Chemical Engineering Department, Oregon State University, ISBN 978-1-4419-8073-1
10. Levenspiel, O. (1999). *Chemical Reaction Engineering*, John Wiley & Sons, 3rd ed., ISBN: 0-471-25424-X
11. Mokaddam, M. el (2014). *Verstoringsmodel, Processimulatie waarmee de verblijftijd en verblijftijdspreiding van een verstoring van de waterkwaliteit in drinkwaterproductie- en distributieprocessen wordt berekend*. Afstudeerverslag, 2<sup>e</sup> druk, Hogeschool Utrecht
12. Hassel, G. van (2016). *Waterkwaliteits-verstoringsmodel, Een in Excel ontwikkeld reactortechnologisch model dat het concentratieprofiel van een verstoring voor het drinkwaterproductieproces kan voorspellen*. Afstudeerverslag, 1<sup>e</sup> druk, Hogeschool Utrecht
13. Vertommen, I., Thienen, P. van, Schaap, P., Keizer, J. & Sperber, V. (2017). De bron van verontreinigingen bepalen met hydraulische softwarepakketten. *H<sub>2</sub>O* 33, pp. 1-8

## Gebruikte afkortingen

BOT-mi	Beleidsondersteunend Team milieu-incidenten
CET-md	Crisis Expert Team milieu en drinkwater
CPU	Rekenmodule
CSTR	Ideale modelreactor
EPA-d	Eenheid Planning en Advies drinkwater
GUI	Graphical User Interface
HWL	het Waterlaboratorium
KEG	Kenmerken, Eisen en Grenswaarden
ILT	Inspectie Leefomgeving en Transport
PFR	Propstroomreactor
pH	Zuurgraad
VBA	Visual Basic Application
WKVM	Waterkwaliteitsverstoringsmodel
WOT	Waternet operationeel crisisteam
WRK	Watertransportmaatschappij Rijn-Kennemerland