



Antoinette van Schaik, MARAS*

Markus Reuter, MARAS*

Hein van Stokkom, Waterschap Brabantse Delta

Jack Jonk, Waterschap Brabantse Delta

Victor Witter, Waterschap Brabantse Delta

Recycling van personenauto's en de implementatie van de KRW

Het beheersen van stofstromen en het vermijden van moeilijk of niet te scheiden stoffen aan de bron vormt in essentie de overeenkomst tussen de problematiek van de recycling van personenauto's en het waterkwaliteitsvraagstuk. Vanwege deze parallel is gekozen voor een door de auteurs ontwikkelde, en binnen de automobiellindustrie reeds toegepaste, holistische aanpak van het waterbeheer en -beleid. De water- en stofstromen van de diverse emissieketens worden in deze aanpak tegelijkertijd met de processen en stromen van de zuiveringsketen opgenomen. Met het ontwikkelde systeemoptimalisatiemodel kan tot een evenwichtige afweging van resultaten en consequenties van de diverse maatregelen voor bron- en end-of-pipe-gericht beleid worden gekomen. Bovendien biedt de gekozen aanpak de mogelijkheid om in een volgende fase factoren als kosten en energiegebruik mee te nemen. Dit artikel is vooral ook een uitnodiging om de hier gepresenteerde aanpak aan te vullen, uit te breiden en de resultaten te benutten in discussies over het meest geschikte KRW-maatregelenpakket.

Bij de recycling van auto's gaat het grofweg om de vraag hoe in het productie- en recyclingproces van personenauto's aan de eis kan worden voldaan om in 2015 95 procent van het gewicht van de afgedankte auto te recyclen. Het antwoord op die vraag concentreert zich op de eenvoud waarmee een auto kan worden gedemonteerd en de scheidbaarheid en kwaliteit van materiaalstromen, waardoor het te behalen recyclingpercentage wordt bepaald. Dit wordt aanzienlijk vereenvoudigd en dus goedkoper indien slechts metalen, plastics, etc. worden gebruikt die goed terugwinbaar zijn en/of eenvoudig te scheiden voor hergebruik.

Het vermijden van materialen in het ontwerp die niet of moeilijk terug te winnen zijn, is tegen de achtergrond van genoemde eis dus profijtelijk. Dit vraagstuk uit de auto-industrie is gemodelleerd door Van Schaik & Reuter^{1),2),3),4)} in de vorm van een (dynamisch) systeemmodel dat inmiddels operationeel in de automobiellindustrie wordt benut. Het model fungeert daarbij als een beslissingondersteunend optimaliseringssysteem.

In essentie is het vraagstuk van de implementatie van de KRW vergelijkbaar. Het gaat daarbij ook om demontabiliteit en de beheersing van stofstromen. In het afvalwa-

terzuiveringsproces gaat het immers om het zodanig scheiden van het complex samengestelde afvalwater dat het effluent binnen de vergunningseisen op het oppervlaktewater kan worden geloosd. Evenzo gaat de discussie over een brongerichte of een end-of-pipe aanpak voor de beheersing van stofstromen. In beginsel zou ook hier moeten gelden dat stoffen die lastig of niet uit het afvalwater te halen zijn, er bij hoge voorkeur niet in terecht zouden moeten komen. Feit is dat momenteel diverse stoffen in het afvalwater zitten die als het ware ongemoeid een rioolwaterzuivering passeren en dus het oppervlaktewater verontreinigen. Dit geldt ook voor bronnen die direct op het oppervlaktewater lozen.

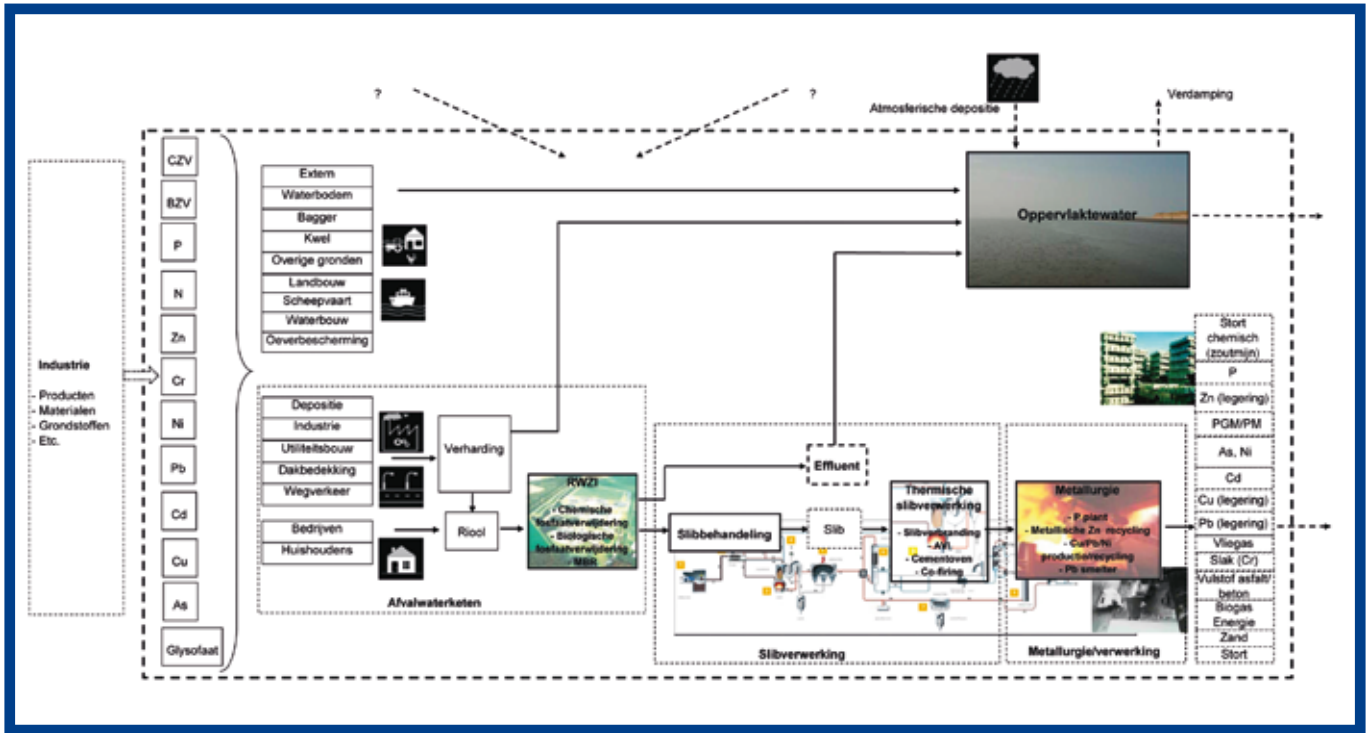
Op basis van deze vergelijkbaarheid is getracht de in de autorecycling ontwikkelde en toegepaste aanpak van systeemmodellering toe te passen op het vraagstuk van de KRW. Dit heeft geleid tot een holistische benadering van het waterkwaliteitsvraagstuk, waarbij in beginsel alle water- en stofstromen, in meer of mindere mate uitgewerkt, in het ontwikkelde model zijn opgenomen.

Dit artikel beschrijft het model en enkele toepassingen ter illustratie van de mogelijkheden. Een wetenschappelijk artikel onderbouwt het hier besproken werk⁵⁾.

Model voor het afval- en oppervlaktewatersysteem

Het maken van een effectieve afweging van de mogelijkheden en beperkingen van de zuivering in een rwzi (end-of-pipe) enerzijds en brongerichte maatregelen anderzijds, nodig om de KRW-doelen te realiseren, vereist een aanpak die de maatregelen op een kwantitatieve basis tegen elkaar afzet. De genoemde holistische aanpak richt zich op alle ketens van waaruit verontreinigingen in het oppervlaktewater terechtkomen, de hierin aanwezige stoffen en hun interactie. Dit brengt tevens de relatieve bijdrage vanuit de verschillende bronnen onder de aandacht. Niet alleen de processen vanuit de zuiveringsketen worden meegenomen, maar ook thermische en metallurgische processen voor de behandeling van zuiveringsglib en de terugwinning van materialen hieruit (bijvoorbeeld fosfaat).

Om de consequenties van de mogelijkheden in één oogopslag te kunnen overzien en af te wegen moeten de stromen, stoffen en processen tegelijkertijd worden beschouwd. Dit vereist een harmonie in de datastructuur voor de diverse ketens en sectoren, processen en stromen binnen het oppervlaktewatersysteem. Ook vanuit de slibverwerking is dit noodzakelijk. De samenstelling van de totale stroom bepaalt



Afb. 1: Vereenvoudigde 'flowsheet' van het afval- en oppervlaktewatersysteem.

de thermodynamische interactie tussen de verschillende elementen en hiermee de beperking van de verwerkbaarheid van het slib en terugwinbaarheid van de materialen. Dit reduceert niet alleen de lozing naar het oppervlaktewater en de hoeveelheid te storten materiaal, maar draagt tevens bij aan het in de grondstoffenketen houden van deze stoffen. Op deze wijze wordt de vaak energie-intensieve productie van materialen en/of metalen uit primaire bronnen (ertsen) en de hieraan verbonden milieubelasting teruggedrongen⁴⁾.

De basis voor het model is een 'flowsheet' van het afval- en oppervlaktewatersysteem (zie afbeelding 1). Alle verschillende, nauw met elkaar verbonden processen voor rioolwaterzuivering, slibverwerking en thermische en metallurgische verwerking van zuiveringsslib zijn in één model opgenomen evenals de emissiebronnen, processtromen en lozingen op het oppervlaktewater en hun samenstelling (afvalwater, effluent, slibstromen, teruggewonnen metalen en andere bronnen, zoals gedefinieerd volgens Witteveen+Bos⁶⁾).

Het schema laat duidelijk zien dat nu nog een onbalans bestaat in het detail en/of de beschikbare data en daarom ook in de modellering van het huidige oppervlaktewatersysteem, hetzij in de zuivering van de verschillende emissieketens ten opzichte van die van het afvalwater in de rwzi's en/of in de beschikbaarheid van gegevens (de afvalwaterstroom via de rwzi's is veel gedetailleerder gemodelleerd dan de overige emissieprocessen en bronnen). Het maakt ook duidelijk waar in een eventueel verdere uitwerking van deze aanpak aanvullende gegevens nodig zijn voor een betere beoordeling en vergelijking van de diverse maatregelen, waarbij het detailniveau van de modellering voor de diverse stromen en processen in het oppervlaktewatersysteem meer in balans is.

Een massabalans beschrijft de water- en stofstromen in afbeelding 1 op basis van hun stofvracht (kilo per jaar) en debiet (kubieke meter per jaar). De verschillende processen zijn gemodelleerd op basis van de verwijderingsrendementen en/of terugwinfactoren (recovery) (0-100%) voor de beschouwde stoffen (CZV, BZV, KJN, P, As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Ni, Zn, Fe, en glyfosaat als voorbeeld van organische microverontreinigingen) en debieten van de diverse stromen. De kwaliteit en samenstelling van iedere stroom in het systeem kan direct uit het model worden berekend. Het oppervlaktewater wordt op het moment beschouwd als een 'bak' waarin geen verdere afbraakprocessen plaatsvinden.

De data zijn afgeleid van procesdata en/of procesmodellen en beschikbare rapportages^{4),6),7),8)}. In het huidige model is ervoor gekozen een aantal gecombineerde processtappen binnen bijvoorbeeld de rwzi als 'blackbox' te modelleren om in lijn te blijven met de complexiteit van het systeem. Het model dupliceert bestaande proces-simulatiemodellen dus niet. Deze kunnen de systeemaanpak echter verder aanvullen en detailleren waar nodig.

Het bepalen en beoordelen van de combinatie van maatregelen nodig voor het (zo ver als mogelijk) behalen van KRW-doelstellingen gebeurt in het model door het uitvoeren van een optimalisatie. Hiervoor dient een doelfunctie te worden gedefinieerd, bijvoorbeeld minimale belasting van het oppervlaktewater, maximale terugwinning van metalen, minimale kosten, maximale energetische efficiëntie, etc., of een (complexe) combinatie hiervan.

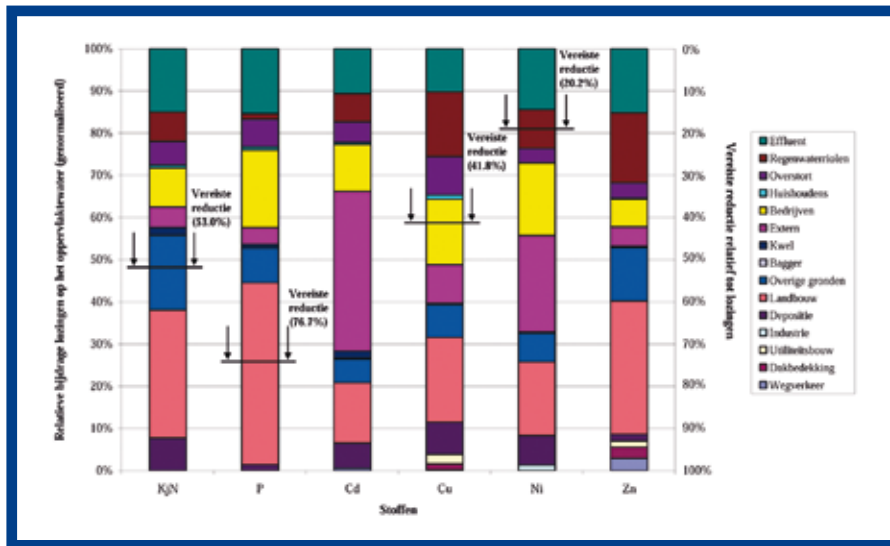
Binnen het afval- en oppervlaktewatersysteem spelen diverse beperkende factoren een rol die kunnen worden meegenomen

in het model. Deze variëren van procesgerelateerde voorwaarden (kwaliteitseisen voor de metallurgische verwerking van slib, capaciteitsbeperkingen, technologische beperkingen van de procesefficiëntie) en kwaliteit- en kwantiteitbeperkingen voor de lozingsbronnen en afvalwaterstromen (KRW-doelstellingen en vergunningseisen voor het effluent) tot aan kosten, energieverbruik, etc. In het huidige model zijn nog geen economische, milieu-, exergie- of energiefactoren opgenomen.

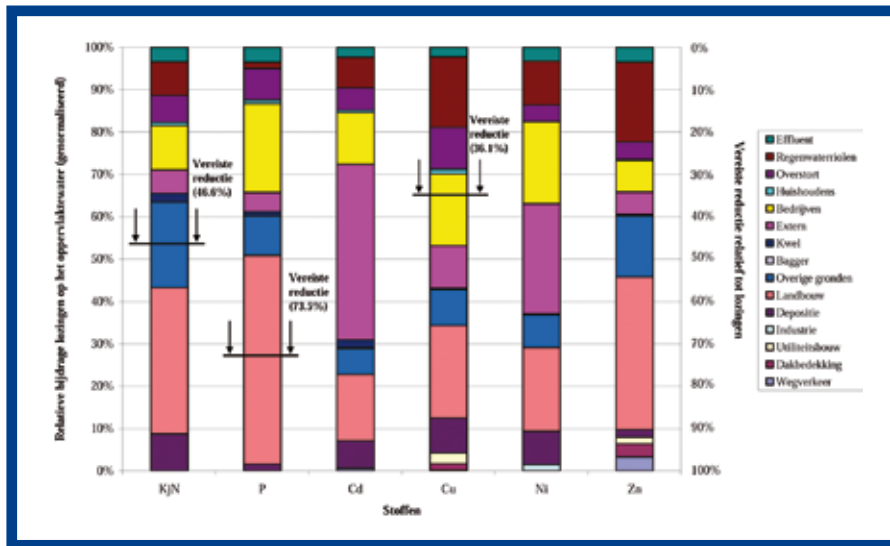
De oplossing van het optimalisatiemodel wordt bepaald door de maximalisatie van de doelfunctie als functie van de gedefinieerde randvoorwaarden, en verandert afhankelijk van deze parameters. In tegenstelling tot de vereenvoudigde weergave van afbeelding 1 is het model zodanig geconstrueerd dat verschillende combinaties van de beschikbare processen, procesalternatieven, bronmaatregelen, etc. als oplossing van het optimalisatiemodel kunnen worden verkregen.

Case studies

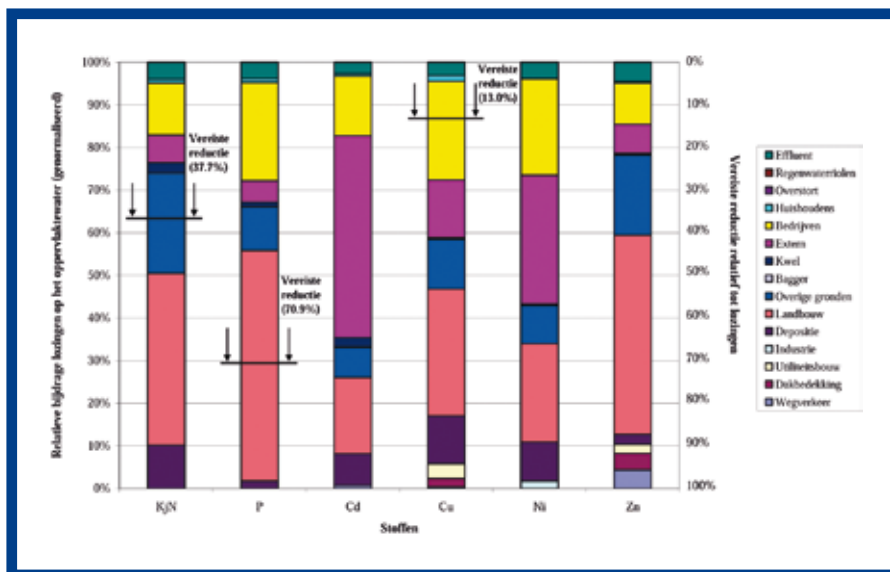
Een aantal voorbeelden is met het ontwikkelde model uitgewerkt. Deze zijn in eerste instantie met opzet eenvoudig gehouden om de verschillende facetten van de toepassing en mogelijkheden van het model te illustreren. Tevens speelt het (deels) ontbreken van data vanuit de diverse emissieketens hierin een rol (zie afbeelding 1). De consequentie hiervan is dat een aantal casussen in meer of mindere mate als triviaal kunnen worden gezien. De resultaten geven echter een goede indicatie van de toepassingsmogelijkheden van deze aanpak, de benodigde data vanuit de diverse ketens en de (hieraan gerelateerde) uitbreiding van het model om tot een gedetailleerde afweging van de verschillende KRW-maatregelen te komen.



Afb. 2: Lozingen op het oppervlaktewater vanuit de verschillende bronnen en de vereiste reductie (% t.o.v. lozing zoals gedefinieerd in het model voor deze casus) zonder toevoeging van een vierde trap (voor cadmium en zink is voor de huidige berekeningen geen reductie vereist).



Afb. 3: Lozingen op het oppervlaktewater vanuit de verschillende bronnen en de vereiste reductie (% t.o.v. lozing voor deze casus) in combinatie met een vierde trap met gedefinieerd zuiveringsrendement (door de genomen maatregelen valt de concentratie van nikkel binnen de gestelde kwaliteitseisen).



Afb. 4: Lozingen op het oppervlaktewater vanuit de verschillende bronnen en de vereiste reductie (% t.o.v. lozing voor deze casus) in combinatie met een vierde trap met gedefinieerd zuiveringsrendement en aangepaste systeemarchitectuur (volledige sanering van overstort en reductie van lozing vanuit regenwaterriolen).

De daadwerkelijke toepassing van het model ligt in de combinatie van deze casussen in één optimalisatie, waarbij de diverse end-of-pipe en brongerichte maatregelen tegen elkaar worden afgezet en tegelijkertijd systeemarchitectuur alternatieven en kosten, energie, etc. worden meegenomen. Dit toont de niet-lineaire en holistische toepassing van het ontwikkelde model, waarmee uit een palet van opties en onder verschillende condities, een oplossing kan worden bepaald voor alle stoffen, processen en emissiebronnen tegelijk. (Let wel: deze casestudies zijn uitgevoerd met de berekende waarden volgens⁹⁾).

Case 1: vereist zuiveringsrendement vierde trap en brongericht versus end-of-pipe aanpak

Eén van de oplossingen voor de verbetering van de kwaliteit van het oppervlaktewater wordt gezien in het toevoegen van een vierde zuiveringstrap. De vraag is echter of deze end-of-pipe aanpak alleen afdoende is. Aangezien het maximaal haalbare verwijderingsrendement wordt bepaald door de technologische limieten van het proces is het belangrijk te bepalen aan welke functionele specificaties een vierde trap zou moeten voldoen om de KRW-eisen te realiseren eventueel in combinatie met andere maatregelen. Op basis hiervan kan worden beoordeeld of dit vanuit een technisch (en economisch) perspectief een haalbare optie is. Bestaande alternatieven, zoals onder meer besproken door STOWA⁹⁾ kunnen hieraan getoetst worden of worden opgenomen in het model als verschillende procesalternatieven die gelijktijdig kunnen worden beoordeeld.

De resultaten laten zien dat, wanneer de andere emissiebronnen onveranderd blijven, het te behalen zuiveringsrendement voor het merendeel van de beschouwde stoffen 100 procent moet zijn. Dit betekent dat zelfs bij volledige verwijdering van deze stoffen in de afvalwaterketen nog niet kan worden voldaan aan de gestelde eisen. Zuiveringsrendementen van 100 procent zijn vanzelfsprekend technisch (fysisch, chemisch en thermodynamisch) gezien niet haalbaar. Doordat de andere maatregelen voor reductie van de belasting van het oppervlaktewater niet zijn meegenomen in deze casestudie, is dit antwoord in dit geval triviaal. De berekende waarden tonen echter de vereiste reductie aan. Brongerichte of aan systeemarchitectuur (bestemming en verwerking van (emissie)stromen, procesalternatieven, etc.) gerelateerde maatregelen zullen nodig zijn.

Doordat het holistische model behalve de zuiveringsketen ook de andere emissiebronnen kwantitatief beschouwt, kunnen de bijdragen en ook de vereiste reductie van de stofvracht in al deze stromen tegelijkertijd worden beoordeeld en onderling worden afgewogen. Het model berekent en optimaliseert de bereikte oppervlaktewaterkwaliteit, al dan niet met de toevoeging van de vierde trap (met een zeker rendement) en kwantificeert gelijktijdig de benodigde terugdringing van stofvracht vanuit de andere bronnen om te voldoen aan de in het model opgenomen

kwaliteitseisen van het oppervlaktewater, eventueel in combinatie met aanpassing van de systeemarchitectuur en de selectie van procesalternatieven (indien aanwezig).

Deze optimalisatie is voor drie verschillende situaties uitgevoerd: in de eerste casestudie wordt de vereiste reductie vanuit alle lozingsbronnen berekend zonder dat er verder iets aan de huidige architectuur (volgens Witteveen+Bos⁶⁾ van het afval- en oppervlaktewatersysteem verandert (zie afbeelding 2), in de tweede casestudie wordt de vereiste reductie berekend in aanvulling op een vierde trap met een gedefinieerd rendement (80 procent voor de beschouwde stoffen) (zie afbeelding 3); in de derde berekening wordt tevens de mogelijkheid meegenomen om de bestaande systeemarchitectuur aan te passen. De resultaten van deze derde casestudie laten zien dat een hogere kwaliteit van het oppervlaktewater kan worden bereikt door het (volledig) saneren van overstort en reduceren van ongerioleerde lozingsbronnen; de berekende noodzakelijke reductie aan de bron neemt hierdoor af (zie afbeelding 4). (De afbeeldingen 2 t/m 4 illustreren de lozingsbronnen op het oppervlaktewater genormaliseerd op basis van stofvracht in kg/jaar).

De afbeeldingen 2, 3 en 4 laten bijvoorbeeld zien dat voor de reductie van fosfaat in elk geval de stofvracht vanuit de landbouw moet worden gereduceerd, ongeacht welke andere bron ook wordt teruggebracht of een vierde trap wordt toegevoegd. Deze resultaten zouden onder andere toegepast kunnen worden in de discussie over de emissievergunning vanuit de diverse ketens.

De casussen maken duidelijk dat het model kan worden aangewend voor het berekenen van de vereiste reductie vanuit de diverse bronnen, eventueel in combinatie met de berekening van het benodigde verwijderingsrendement voor een vierde trap, en het aanpassen van de systeemarchitectuur voor alle stoffen tegelijkertijd en hiermee de combinatie van maatregelen om te voldoen aan de KRW-eisen.

Case 2: hergebruik fosfaat uit zuiverings-slib

Naast het realiseren van de KRW-restricties kan een ander doel zijn zoveel mogelijk (waardevolle) stoffen, die meekomen met het afvalwater en terecht komen in het zuiverings-slib hieruit terug te winnen. De terugwinning van bijvoorbeeld fosfaat uit zuiverings-slib in een thermische fosforplant legt echter specifieke eisen op aan de samenstelling van het zuiverings-slib. Het fosfaatgehalte moet zodanig hoog zijn dat de verwerking economisch zinvol is. Daarnaast gelden maximaal toelaatbare concentraties voor een aantal metalen, zoals zink, koper, arseen, cadmium, ijzer, nikkel en lood om het verwerkingsproces niet te storen vanwege de thermodynamische interactie tussen deze stoffen. De aanwezigheid van deze stoffen leidt tot vermindering van procesopbrengst, procesbeïnvloeding, overmatige vorming van slak en vlieg-as, creëren van afvalstoffen, etc., met andere woorden milieuproblemen bij de fosfaatproducent. Tegelijkertijd

moet echter de kwaliteit van het effluent na zuivering aan de gestelde eisen blijven voldoen. Aangezien al deze processen, stromen en kwaliteitseisen in het model zijn opgenomen, kan worden bepaald onder welke condities hergebruik van bijv. fosfaat uit het zuiverings-slib mogelijk is. Tevens kan worden bepaald welke instroomreductie van bepaalde elementen nodig is om dit te realiseren. Het model kan met andere woorden aantonen hoe met andere stoffen in de zuiveringsketen en het oppervlaktewatersysteem moet worden omgegaan met het oog op terugwinning van materialen uit het zuiverings-slib door end-of-pipe technologie.

Een voorbeeld van een mogelijke toepassing van het model is het vraagstuk of het toepassen van de bio-fosfaatroute of het toevoegen van aluminium in plaats van ijzer tijdens de chemische fosfaatverwijdering de beste oplossing is voor de terugwinning van fosfaat in de fosforinstallatie (waarbij ijzer een sterk storend element is). Onder de huidige omstandigheden laat het model zien dat een reductie van ijzer in het slib nodig is om tot terugwinning van fosfaat in de thermische fosforinstallatie te komen. Dit vraagstuk kan worden beantwoord door het meenemen van de kostenaspecten van deze en eventueel andere alternatieven in het model.

De resultaten laten zien dat de balans tussen terugwinning van materialen uit zuiverings-slib en kwaliteitsbeheer van het oppervlaktewater wordt bepaald door de complexe interactie en combinatie van de verschillende beschikbare processen voor de rwzi, thermische verwerking en metallurgische/thermische terugwinning van stoffen. Het model brengt alle opties in kaart. De vereiste reductie van stoffen aan de bron kan hierdoor voor elke afzonderlijke situatie worden bepaald, waarbij gelijktijdig de noodzakelijke bron- en end-of-pipe maatregelen voor alle stoffen en stromen kan worden vastgesteld met het oog op de KRW.

Conclusies en vervolg

Samenvattend kan worden geconcludeerd dat de gepresenteerde holistische aanpak goed aan te wenden is binnen het waterbeheer en -beleid en een antwoord kan geven op de complexe vragen waarvoor de waterbeheerders en beleidsmakers worden gesteld. Het vormt een fundamentele, maar tevens praktisch toepasbare basis voor de optimalisatie van het afval- en oppervlaktewatersysteem en voor de beoordeling van te nemen maatregelen voor de implementatie van de KRW. Tevens biedt het een objectieve basis om de invloed van de verschillende sectoren die (direct of indirect) lozen op het oppervlaktewater te vergelijken en eventueel te vertalen naar emissie- en/of beleidsmaatregelen. Deze basis biedt zo mogelijkheden om van een polariserende naar een meer exploratieve benadering van het KRW-vraagstuk te komen.

Doordat het model niet alleen de vereiste terugdringing van de emissies en/of lozingsbronnen identificeert maar ook kwantificeert, kunnen bestaande procesalternatieven en uitbreidingen van de zuiveringsketen⁹⁾, alsook beleidsalternatieven⁷⁾ hiertegen

worden afgezet en worden meegenomen in het optimalisatiemodel. Wanneer kosten, energie- en/of milieuaspecten^{10),11)} worden toegevoegd, kan een gebalanceerde keuze worden gemaakt voor het bepalen van de meest wenselijke oplossing voor de KRW en het beoordelen van de haalbaarheid van deze richtlijn.

De opgezette modelstructuur toont bovendien aan op welke plaatsen in het afval- en oppervlaktewatersysteem meer kwantitatieve gegevens nodig zouden zijn om tot een betere beoordeling van doelstellingen en beleidsmaatregelen binnen het KRW-vraagstuk te komen. Het model biedt een sectoroverbruggende aanpak om de datacollectie en -structuur te standaardiseren en harmoniëren. De holistische aanpak schept een gezamenlijk draagvlak voor de verschillende spelers binnen de KRW-discussie om tot constructieve en objectieve oplossingen te komen. Dit artikel is dan ook vooral een uitnodiging om de hier gepresenteerde aanpak aan te vullen en uit te breiden.

LITERATUUR

- 1) Reuter M., A. van Schaik, O. Ignatenko en G. de Haan (2006). Fundamental limits for the recycling of end-of-life vehicles. *Minerals Engineering* nr. 19, pag. 433-449.
- 2) Schaik A. van, en M. Reuter (2007). The use of fuzzy rule models to link automotive design to recycling rate calculation. *Minerals Engineering* nr. 9, pag. 875-890.
- 3) Schaik A. van, M. Reuter en U. Boin (2002). Dynamic modelling and optimisation of the resource cycle of passenger vehicles. *Minerals Engineering* nr. 11, pag. 1001-1016.
- 4) Reuter M., K. Heiskanen, U. Boin, A. van Schaik, E. Verhoef, Y. Yang en G. Georgianni (2005). *The Metrics of Material and Metal Ecology*. Elsevier Science.
- 5) Schaik A. van, M. Reuter, H. van Stokkom, J. Jonk en V. Witter (2007). The link between the recycling of passenger vehicles, the Web of Water and the implementation of the European Water Framework Directive. Submitted to *Water Research*.
- 6) Witteveen+Bos (2003). Inventarisatie en balansstudie (diffuse bronnen deelrapport 5: Hoogheemraadschap van West-Brabant (herzien met nieuwe emissiefactoren en correcties).
- 7) Bertens P., L. Santbergen en M. Stark (2006). Globale verkenning van knelpunten en maatregelen Europese Kaderrichtlijn Water (ambtelijk werkdocument). Deelgebiedrapportage Brabantse Delta. Oranjestad. Projectbureau Maas.
- 8) Waterschap Brabantse Delta (2005). Bedrijfsresultaten Zuiveringstechnische Werken 2004.
- 9) Jong P. de, J. Kramer, W. Slotema en K. Third (2005). Verkenningen zuiveringstechnieken en KRW. STOWA. Rapport 2005-28.
- 10) Ignatenko O., A. van Schaik en M. Reuter (2007). Exergy as a tool for evaluation of the resource efficiency of recycling systems. *Minerals Engineering* nr. 9, pag. 862 tot 874.
- 11) Wiegant W., M. Würdemann, H. Kamphuis, J. van de Marel en W. van der Koopman (2005). Slibketenstudie - Onderzoek naar de energie- en kostenaspecten in de water- en slibketen. STOWA. Rapport 2005-26.

* MARAS = een adviesbureau dat technologische systeemoplossingen en kennis brengt op het gebied van recycling van afvalsystemen (o.a. afvalwater).