

Het waterkwaliteitsmodel PEGASE als beleidsonder- steunend instrument bij de opmaak van het stroomgebied- beheerplan van de Schelde

De waterkwaliteit van onze waterlopen wordt beïnvloed door de uitwisseling van stoffstromen. Stoffen worden aangevoerd naar de waterlopen via verschillende transportroutes. In de waterloop zelf vinden biologische processen plaats, met inbegrip van de interacties van de waterkolom met de waterbodem en de lucht. Via zoninstraling wordt energie aan het ecosysteem toegevoegd. Dit vormt de belangrijkste energiebron voor de processen.

Een waterkwaliteitsmodel moet rekening houden met de achterliggende processen in het aquatisch ecosysteem om de fysisch-chemische waterkwaliteitsvariabelen op een betrouwbare manier te kunnen berekenen. Het waterkwaliteitsmodel PEGASE (Plannification Et Gestion de l'Assainissement des Eaux) ontwikkeld door de Universiteit van Luik (ULg) is zo'n model. Het is een gedetailleerd hydrodynamisch, deterministisch waterkwaliteitsmodel dat drie submodellen omvat: een hydrologisch en hydrodynamisch submodel, een thermisch submodel en een biologisch submodel. Specifiek kan met PEGASE de zuurstofhuishouding en de nutriëntenproblematiek in de waterlopen onderzocht worden.

2. Doelstellingen van de Vlaamse Milieumaatschappij met betrekking tot waterkwaliteitsmodellering

De Vlaamse Milieumaatschappij (VMM) gebruikt sinds 2002 het waterkwaliteitsmodel PEGASE voor het Scheldestroomgebied als beleidsondersteunend instrument ter voorbereiding van het stroomgebiedbeheerplan van de Schelde. In eerste instantie werd in 2004 een evaluatie van de emissie-immissie relaties gemaakt voor het referentiejaar 2000. Er werd vervolgens een eerste risico-analyse van de fysisch-chemische waterkwaliteit voor het jaar 2015 opgemaakt in functie van Artikel 5 van de Kaderrichtlijn Water (KRW) - kenmerken van het stroomgebiedsdistrict, beoordeling van de milieueffecten van menselijke activiteit en economische analyse van het watergebruik -, omgezet in de Vlaamse wetgeving via artikel 60 van het Decreet Integraal Waterbeleid.

Na een revisie van het waterkwaliteitsmodel PEGASE naar het referentiejaar 2006 zal opnieuw een risico-analyse van de fysisch-chemische waterkwaliteit voor het jaar 2015 uitgevoerd worden. De centrale vraag is of de goede toestand in de Vlaamse oppervlaktewaterlichamen in 2015 al dan niet behaald zal worden.

Bij de behandeling van de risico-analyse van de fysisch-chemische waterkwaliteit voor het jaar 2015 komen verschillende scenario's aan bod. In eerste instantie wordt een scenario Basismaatregelen opgesteld, vertrekkende van de bepalingen hieromtrent in artikel 11 van de KRW. Indien de goede toestand met de basismaatregelen niet behaald wordt, worden via diverse scenario's aanvullende maatregelen onderzocht. Met behulp van het PEGASE-model zal nagegaan worden in welke mate aanvullende maatregelen de gewenste waterkwaliteitsverbetering teweegbrengen. Het Milieukostenmodel Water - welke bij de Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO) in

ontwikkeling is - wordt gebruikt om de kosteneficiëntie van de maatregelen te onderzoeken. Op die manier is het PEGASE-model een belangrijk beleidsondersteunend instrument bij de opmaak van het maatregelenprogramma in het stroomgebiedbeheerplan van de Schelde

3. Opbouw van het waterkwaliteitsmodel PEGASE

Het waterkwaliteitsmodel PEGASE voor het Scheldestroomgebied wordt in vier stappen opgebouwd, welke achtereenvolgens toegelicht worden.

- stap 1: voorstelling van het rivierennetwerk en van het stroomgebied,
- stap 2: beschrijving van de gemodelleerde processen per submodel,
- stap 3: beschrijving van de nodige invoergegevens,
- stap 4: kalibratie en validatie van het model.

3.1 Voorstelling van het rivierennetwerk en van het stroomgebied

De basiskaart voor het aanmaken van het rivierennetwerk in het PEGASE-model, is de VHA kaartlaag van de waterlopen in Vlaanderen. Er wordt een selectie gemaakt van het rivierennetwerk in het Vlaams gedeelte van het Scheldestroomgebied vanuit de VHA kaartlaag. Eerst worden alle hoofdwaterlopen van de negen samenstellende bekkens in Vlaanderen opgenomen: de bekkens van de Bovenschelde, Benedenschelde, Leie, Dender, Dijle-Zenne, Demer, Nete, Gentse kanalen en Brugse polders. In het bekken van de Gentse kanalen en de Brugse polders worden de kanalen opgenomen vanwege hun rol als afleiding van het Leie- en Scheldewater. Deze kanalen vormen belangrijke secundaire outputs van het Scheldestroomgebied. Typische polderwaterlopen worden

vanwege hun specifieke karakter in het PEGASE-model niet opgenomen.

Naast de hoofdwaterlopen worden alle zijwaterlopen geselecteerd waarlangs een belangrijke vuilvracht afstroomt. Dit is het geval wanneer minstens één rioolwaterzuiveringsinstallatie (RWZI), een of meerdere bedrijven en een reeks ongezuiverde huishoudelijke lozingen op de waterloop lozen. Tevens werden enkele belangrijke afvoer- of bypasskanalen eveneens opgenomen, waaronder het Zeekanaal Schelde-Brussel en het kanaal Brussel-Charleroi als voornaamste. De kaartlaag heeft een voorbehandeling ondergaan om een coherent routesysteem op te bouwen en om de topologie van het rivierennetwerk te controleren. Het rivierennetwerk in het Vlaams gedeelte van het Scheldestroomgebied voor het jaar 2000 wordt in figuur 1 weergegeven.

3.2 Beschrijving van de gemodelleerde processen per submodel

PEGASE bevat drie submodellen om het functioneren van het aquatisch ecosysteem te modelleren en de resulterende fysisch-chemische waterkwaliteit te berekenen: een hydrologisch en hydrodynamisch submodel, een thermisch submodel en een biologisch submodel. De processen die in elk submodel behandeld worden, worden hier achtereenvolgens bondig toegelicht.

3.1.1 De hydrologische en hydrodynamische modellering in PEGASE

De kennis van de debieten is onontbeerlijk om de waterkwaliteit te berekenen omdat het water in de waterlopen de drager is van alle stofstromen die in de waterlopen aanwezig zijn. Vuilvrachten worden gekenmerkt door het debiet van het water en de concentratie aan verontreinigende stoffen in het water.

In PEGASE wordt geen klassiek neerslagafvoermodel gebruikt. De debieten worden berekend op basis van debietmeetreeksen van de debietmeetposten op de waterlopen. Uitgaande van de gemeten debieten wordt een natuurlijk debiet bepaald door de debieten van de puntlozingen af te trekken en de debieten van wateronttrekkingen op te tellen bij de debietmeetreeksen. Dit wordt

in eerste instantie uitgevoerd voor het gebied stroomopwaarts de debietmeetpost welke het meest stroomopwaarts op een waterloop gelegen is. Door het natuurlijk debiet door de oppervlakte van het stroomopwaarts gebied te delen verkrijgt men een specifiek debiet. Vervolgens beschouwt men een gebied tussen een stroomopwaartse en een stroomafwaarts debietmeetpost op de waterloop. Door middel van het verschil in natuurlijk debiet tussen beide debietmeetposten kan een specifiek debiet berekend worden door dit debiet te delen door de afstroomoppervlakte tussen beide debietmeetposten. Dit specifiek debiet stelt de natuurlijke afvoer via de bodem naar het oppervlaktewater voor.

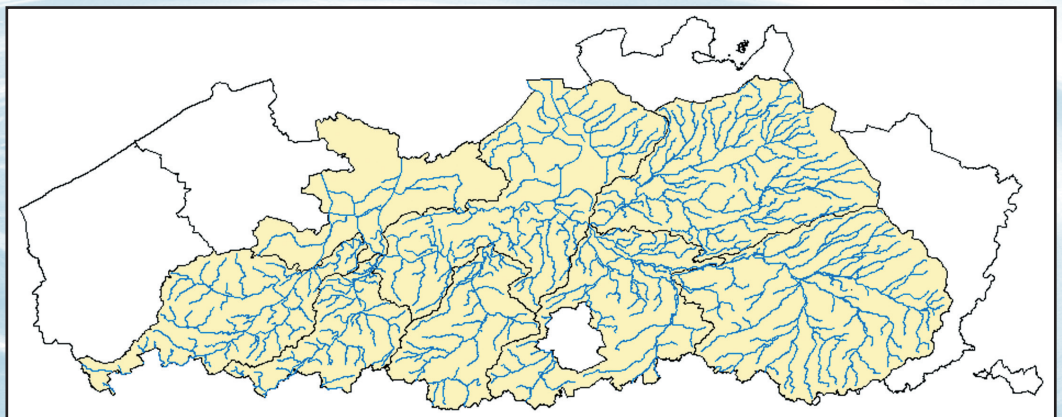
Het uiteindelijk debiet wordt in alle knooppunten herberekend door rekening te houden met het specifiek debiet en de debieten van de lozingen en wateronttrekkingen. Deze werkwijze heeft het voordeel om debieten in toekomstscenario's uit te rekenen. Het natuurlijk specifiek debiet blijft ongewijzigd. Het debiet in de waterloop kan wijzigen op basis van de prognoses op de debieten van de diverse lozingen en wateronttrekkingen in de toekomst. Deze berekeningswijze wordt van stroomopwaarts naar stroomafwaarts toegepast.

3.1.2 De thermische modellering in PEGASE

Het is belangrijk om de watertemperatuur te modelleren aangezien de watertemperatuur de kinematica van de processen van het aquatisch ecosysteem sterk beïnvloedt.

Om het verloop van de watertemperatuur in de waterlopen in PEGASE te modelleren wordt gebruikt gemaakt van continue watertemperatuurmeetreeksen op bijzondere meetplaatsen in de waterlopen. Aangezien deze watertemperatuurmeetposten schaars zijn, wordt een extrapolatie uitgevoerd op de maandelijkse watertemperatuurmeting van de VMM op een gegeven rivier met behulp van de curve van een continue watertemperatuurmeetreeks op de dichtst nabij gelegen rivier met een continue watertemperatuurmeetreeks. Ook hier wordt een aanpassing doorgevoerd op basis van de ligging en kwantificatie van thermische lozingen

Figuur 1: voorstelling van het rivierennetwerk in het Vlaams gedeelte van het Scheldestroomgebied voor het jaar 2000 (De waterlopen in het bekken van de Brugse polders welke recent in het PEGASE-model opgenomen werden, zijn in deze kaart niet weergegeven).



(meestal bij elektriciteitscentrales). De resulterende curve met het verloop van de watertemperatuur gedurende een jaar wordt in grafiek weergegeven. In figuur 2 is het verloop van de temperatuur in de Mark weergegeven (waarbij geen thermische lozing aanwezig is).

3.1.3 De modellering van het aquatisch ecosysteem in PEGASE

De volgende vier types processen die zich in het aquatisch ecosysteem voordoen, worden in PEGASE gemodelleerd:

- transport en verdunning,
- biochemische processen in de waterkolom,
- interacties van de waterkolom met de lucht aan het wateroppervlak
- interacties van de waterkolom met de waterbodem

3.1.3.1 Transport en verdunning

Stoffen komen in hun minerale of organische vorm in de waterlopen terecht via bronwater of kwel, via zijwaterlopen, via puntlozingen op de waterloop of via diffuse bronnen. Deze stoffen worden in de waterloop verdund en getransporteerd via advectie en dispersie.

3.1.3.2 Biochemische processen in de waterkolom

In PEGASE wordt rekening gehouden met de organische en de anorganische vorm van de stoffen in de waterkolom. De organische stoffen zijn afkomstig van de biologische processen in de rivier en van antropogene bronnen. Bij de particuliere organische stoffen wordt tevens een onderscheid gemaakt tussen het levend organisch materiaal (uitgedrukt in een biomassa) en dood organisch materiaal. De flux van materie en van energie die door het aquatisch ecosysteem stroomt, wordt gebruikt door verschillende organismen

die kunnen ingedeeld worden in produceerders, consumeerders en decomposeerders. De voornaamste produceerders zijn de fotosynthetische planten. Door middel van de zoninstraling worden CO_2 en nutriënten geassimileerd en levend materiaal geproduceerd. De productie van zuurstof bij het fotosyntheseprocess speelt een essentiële rol bij het evenwicht van de zuurstofconcentratie in het aquatisch milieu. Het afsterven van de waterplanten is een bron van dood organisch materiaal.

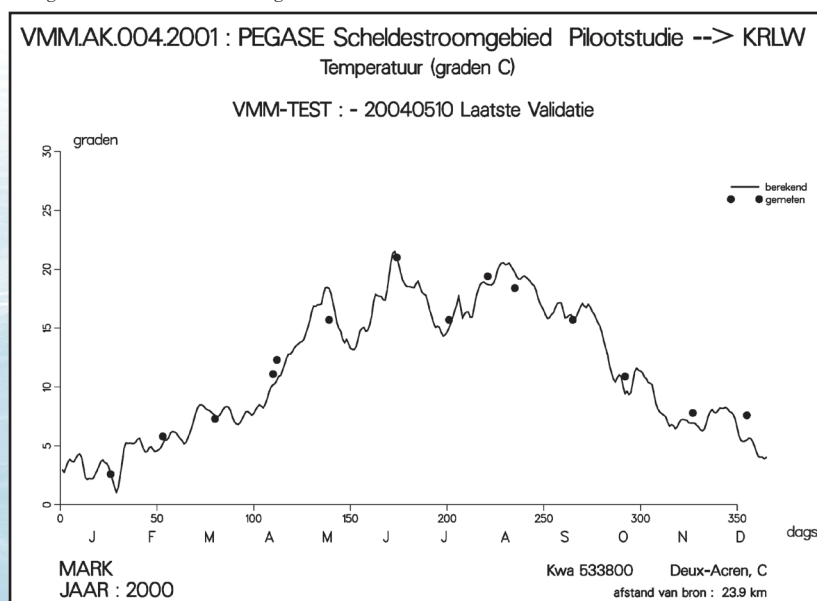
In het PEGASE-model wordt de biomassa van fytoplankton en het fyto benthos gemodelleerd. Het fytoplankton is onderverdeeld in 4 soortengroepen die elk expliciet gemodelleerd worden omdat één of meerdere soortengroepen zich ontwikkelen op basis van de omstandigheden in de waterloop (debiet, temperatuur, zoninstraling, ...). De biomassa van het fyto benthos wordt gemodelleerd met een semi-statistisch submodel dat rekening houdt met de hellingsgraad van de rivierbodem, de geomorfologie van de rivier, de belasting met organisch materiaal en de tijd van het jaar. In totaal worden een 4-tal soorten gemodelleerd: *ranunculus fluitans*, *ranunculus peltatus*, *potamogeton pectinatus* en de bryofyten.

De consumeerders of heterotrofen voeden zich met dood en levend organisch materiaal. Hierbij wordt zuurstof verbruikt en CO_2 en excretiestoffen gevormd. Deze organismen zijn heterotroof omdat organisch materiaal geproduceerd door andere organismen afgebroken wordt. In het PEGASE-model wordt de biomassa van zoöplankton en bentische filtreerders gemodelleerd. Het zoöplankton graast op het fytoplankton en dus heeft dus een invloed op de ontwikkeling van het fytoplankton in de rivier. Voor zoöplankton worden de biomassa's van *brachionus* en *keratella* gemodelleerd. De bentische filtreerders bevinden zich op de waterbodem, waarbij de populatie vooral uit Mollusca-soorten bestaat. De biomassa wordt geschat op basis van een semi-statistisch model.

De decomposeerders breken dood organisch materiaal af op aërobe of anaërobe wijze tot mineralen, waarbij zuurstof of nitraat wordt verbruikt. Dit zijn ook heterotrofe organismen. In PEGASE wordt de biomassa van de heterotrofe bacteriën in de waterkolom gemodelleerd. De groei van de heterotrofe bacteriën hangt samen met de hoeveelheid gedegradieerd organisch materiaal. De biomassa van bacteriën op biofilms wordt niet expliciet berekend, maar op indirecte wijze in rekening gebracht via de afbraak van de biofilms. Ook de activiteit van de bacteriën op de waterbodems wordt op indirecte wijze in rekening gebracht via een afbraakconstante. Bij aërobe omstandigheden wordt zuurstof verbruikt, bij anaërobe omstandigheden wordt nitraat als oxydans verbruikt waarbij tevens de groei van de bacteriën vertraagt en de nitrificatie stilvalt.

Bij nitrificatie wordt ammonium omgezet in nitraat door verbruik van zuurstof door autotrofe bacteriën. De biomassa's van bacteriën van het type *nitrosomonas* die ammonium omzetten in nitriet en van het type *nitrobacter* die nitriet omzetten in nitraat worden expliciet gemodelleerd in PEGASE

Figuur 2: thermische modellering in PEGASE



3.1.3.3 Interacties van de waterkolom met de lucht aan het wateroppervlak

Hier worden voornamelijk gasuitwisselingen waargenomen: invoer van zuurstof vanuit de lucht (re-aëratie) en stikstofuitstoot bij denitrificatie. Dit laatste wordt niet expliciet in PEGASE berekend.

3.1.3.4 Interacties van de waterkolom met de waterbodem

Er kunnen uitwisselingen tussen de waterkolom en de waterbodem in de twee richtingen optreden: sedimentatie en resuspensie. Daarom is het van belang dat bij waterkwaliteitsmodellering een onderscheid gemaakt wordt tussen de opgeloste vorm en de particuliere vorm van de stoffen, zoals bij PEGASE het geval is. Het particulier materiaal in de waterlopen is onderhevig aan sedimentatie, terwijl bij sterke stroming het gesedimenteerde materiaal terug in oplossing kan komen. Dit kan leiden tot een plotse stijging in de concentraties in de waterkolom. De sedimentatie wordt reeds door het PEGASE-model behandeld; de resuspensie is nog in volle ontwikkeling.

Een overzicht van deze processen die zich in het aquatisch ecosysteem voordoen, wordt in figuur 3 weergegeven. De vakken en pijlen in streepjeslijn in figuur 3 zijn delen van het aquatisch ecosysteem welke in PEGASE nog niet gemodelleerd zijn.

Verschiedende biologische processen hebben aldus een directe invloed op de waterkwaliteit. De concentraties aan organische materie (gemeten via COD en BOD5), ammonium, nitraat, fosfaat en de zuurstofconcentratie worden bepaald door deze processen die de basis vormen voor het zelfreinigend vermogen van een waterloop. Verontreinigende stoffen afkomstig vanuit de industrie of de huishoudens worden in de waterlopen op dezelfde manier omgezet in het aquatisch milieu als de van uit natuur aangevoerde stoffen. De

mate waarin verontreinigende stoffen de waterlopen bereiken kan leiden in een verschuiving binnen het ecosysteem waardoor het zelfreinigend vermogen van de waterlopen daalt.

Gelet op bovenstaande processen worden volgende waterkwaliteitsvariabelen in PEGASE behandeld:

- organisch materiaal (C, N, P)
 - opgelost of particulier,
 - snel, traag of niet afbreekbaar
- minerale stikstof (nitraten, nitrieten en ammonium)
- minerale fosfor (orthofosfaten)
- biomassa's
 - produceerders (fytoplankton, macrofyten en fyto-benthos)
 - consumeerders (zoöplankton en benthische filtreerders)
 - decomposeerders (bacteriën)
- opgeloste zuurstof
- zware metalen (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb en Zn)

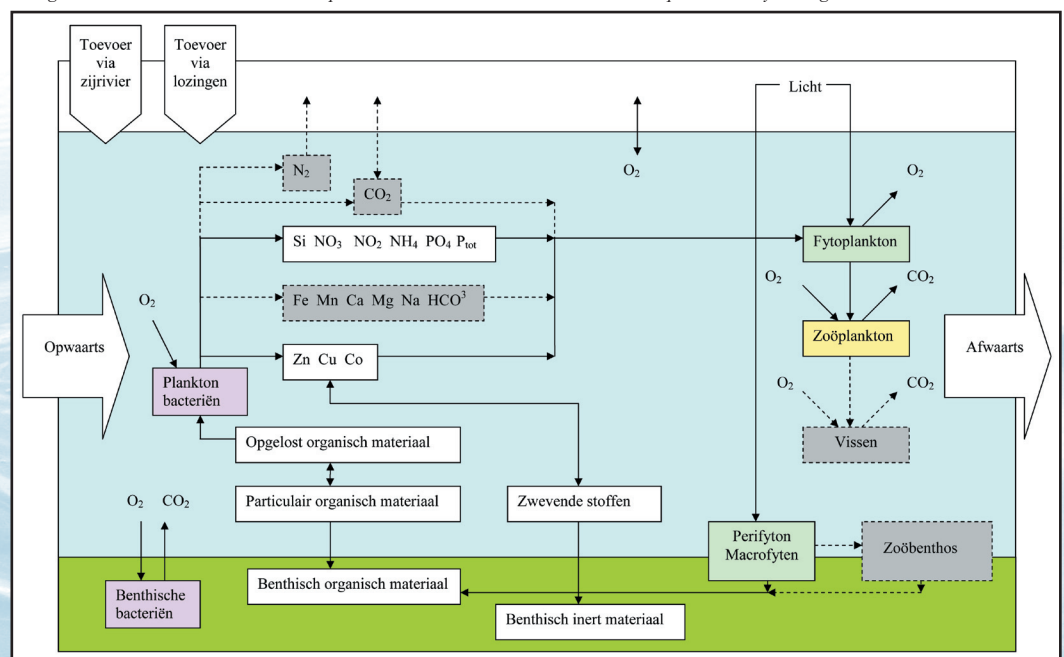
3.3 Beschrijving van de nodige invoergegevens

Om de bovenstaande processen te kunnen modelleren zijn een reeks invoergegevens nodig voor de opbouw van de submodellen van het PEGASE-model.

Voor de hydrologische en hydrodynamische modellering zijn waterkarakteristieken zoals breedte van de waterloop (in m), verval van de waterloop (in mm/m) en de ruwheid (de coëfficiënt van Manning (in s/m^{1/3})) onontbeerlijk, naast de debietmetingen.

Karakteristieken van het stroomgebied zijn hierbij ook van belang, zoals de oppervlakte van het stroomgebied (in km²) bij de bepaling van de specifieke debieten. Ook een digitaal hoogte-model en het bodemgebruik worden gebruikt om de natuurlijke afstroming van stoffen naar de

Figuur 3: schematisch overzicht van de processen die in het PEGASE-model in het aquatisch ecosysteem gemodelleerd worden.



waterlopen in te schatten.

Voor de thermische modellering in PEGASE wordt gesteund op de gemeten watertemperatuur (in °C) in de waterlopen. De watertemperatuur is een belangrijke parameter voor de kinematica van de fysische, chemische en biologische processen. Daarnaast worden ook metingen van de zoninstraling (in W/m²) gebruikt wat belangrijk is voor de fotosynthetische processen.

De belangrijkste invoergegevens voor een modelgebruiker zijn de lozingsgegevens. Deze gegevens vormen de basis voor het uitwerken van scenario's, wat uiteindelijk de doelstelling is van het model. Er wordt in de lozingsgegevens een onderscheid gemaakt naar puntlozingen en diffuse lozingen.

Puntlozingen

- ongezuiverde gerioleerde huishoudelijke lozingen, via inventarisaties en inschattingen
- effluënten van rioolwaterzuiveringsinstallaties (RWZI's), via metingen
- effluënten van bemonsterde bedrijven, via metingen
- effluënten van niet-bemonsterde bedrijven, via inventarisaties en inschattingen

Diffuse lozingen

- ongezuiverde disperse huishoudelijke lozingen, via inventarisaties en inschattingen
- diffuse lozingen vanuit de landbouw, met behulp van het SENTWA-model
- diffuse lozingen vanuit andere bodemgebruikstypes, via inschattingen

De Vlaamse Milieumaatschappij gebruikt het SENTWA-model om de nutriëntenstromen van N en P vanuit de landbouw naar het oppervlaktewater te kwantificeren. Dit model is een semi-empirisch, deductief emissiemodel.

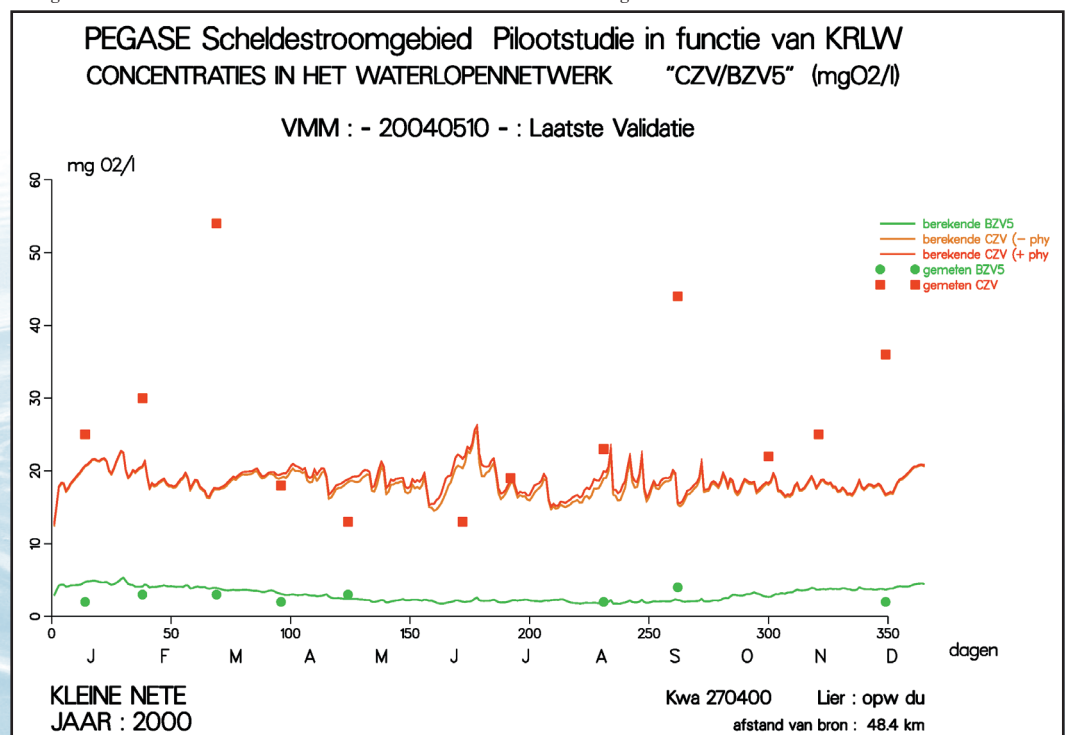
3.4 De kalibratie en validatie van het model

Bij de hydrodynamische modellering wordt een debietkalibratie uitgevoerd wanneer onbalansen optreden tussen de debietmeetreeksen van de verschillende debietmeetposten op de waterlopen. Van het biologisch submodel wordt enkel de module van de bodemverliezen welke de diffuse toevoer vanuit de bodem simuleert, omstandig gekalibreerd. Dit gebeurt aan de hand van waterkwaliteitsmetingen in gebieden waar puntlozingen schaars en gering zijn. Aangezien het biologisch submodel gedetailleerd opgebouwd is voor een grote verscheidenheid aan riviertypes wordt geen kalibratie uitgevoerd. Er wordt wel een uitgebreide validatie uitgevoerd aan de hand van de waterkwaliteitsmetingen. Dit is relevant omdat de waterkwaliteitsmetingen niet gebruikt worden bij de berekening van de waterkwaliteit door PEGASE. Deze metingen worden enkel voor validatie achteraf aangewend.

In figuur 4 wordt een voorbeeld van validatie van modelresultaten aan de hand van waterkwaliteitsmetingen weergegeven.

Het model wordt als gevalideerd beschouwd wanneer de gesimuleerde curve in het bereik ligt van de metingen (weergegeven door de punten op de grafiek). Er moet rekening mee gehouden worden dat PEGASE-resultaten berekende daggemiddelde concentraties zijn terwijl waterkwaliteitsmetingen een momentopname zijn. In het geval van een algenbloei in een waterloop wat gekarakteriseerd wordt door een grote dag-nachtvariatie in opgeloste zuurstof is het niet aangewezen om waterkwaliteitsmetingen te gebruiken voor de validatie, alsook in het geval van calamiteiten. Een overschatting van de waterkwaliteit kan er op wijzen dat een lozing niet

Figuur 4: validatie van modelresultaten aan de hand van waterkwaliteitsmetingen



of te laag ingeschat werd.

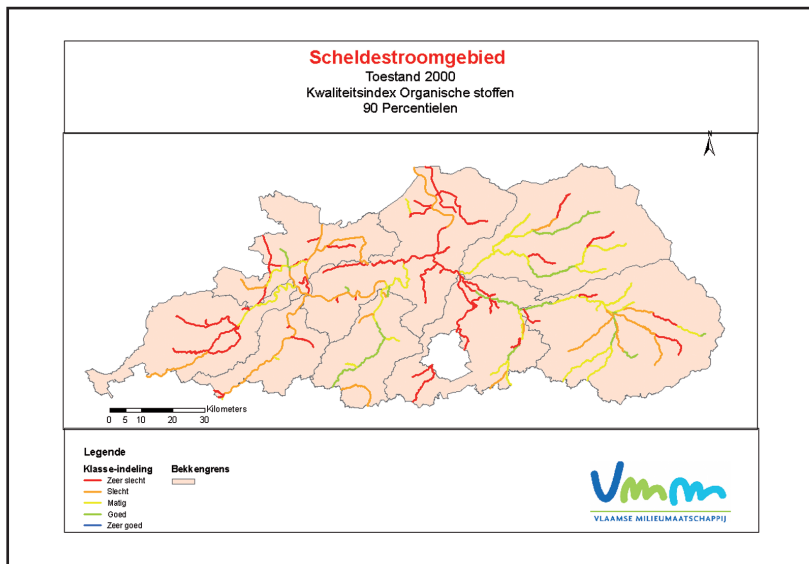
Figuur 4 toont aan dat het model correcte resultaten levert voor BZV; voor CZV is er geen goede kalibratie. De gesimuleerde curve geeft een onderschatting ten opzichte van de gemeten waarden.

4 Voorbeelden van modelresultaten

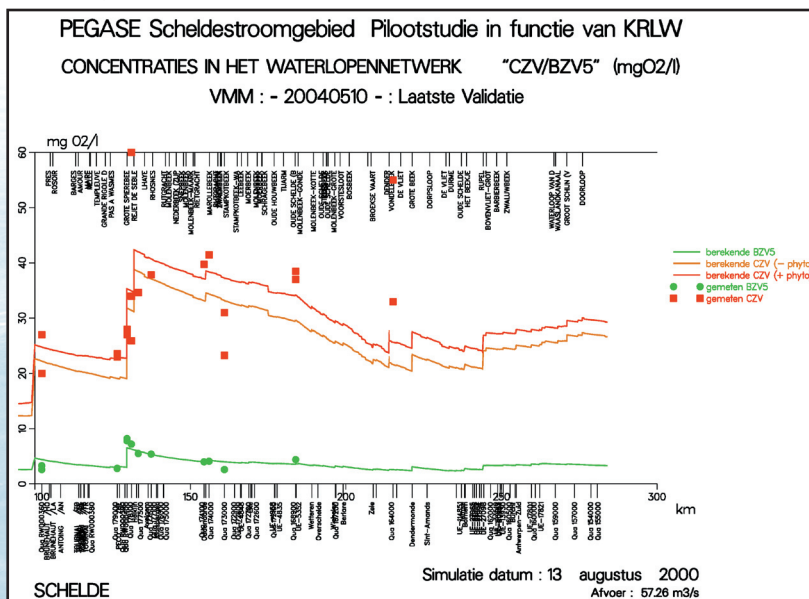
Na kalibratie en validatie is het model klaar voor gebruik. In dit deel van de uiteenzetting worden enkele voorbeelden van modelresultaten weergegeven.

Om een globaal beeld van de waterkwaliteit over heel het stroomgebied te hebben worden waterkwaliteitskaarten aangemaakt. Figuur 5 is een voorbeeld hiervan voor het Vlaams gedeelte van het Scheldestroomgebied. In deze figuur wordt de kwaliteitsindex Organische stoffen weergegeven,

Figuur 5: voorbeeld van een gebiedsdekkende waterkwaliteitskaart



Figuur 6: voorbeeld van een grafiek met het longitudinaal verloop van de waterkwaliteit over een rivier op één dag in het jaar



berekend als 90 percentiel voor het jaar 2000 op het niveau van de Vlaamse oppervlaktewaterlichamen.

Figuur 4 in paragraaf 3.4 is een voorbeeld van een grafiek om het verloop van de waterkwaliteit over een jaar op een welbepaalde plaats op een waterloop weer te geven. De evolutie van de kwaliteit van BZV₅ en CZV over het jaar 2000 op de Kleine Nete stroomopwaarts van Lier wordt er getoond. Op analoge wijze kan het verloop van de kwaliteit over een waterloop op een welbepaalde dag voorgesteld worden. In het voorbeeld van figuur 6 worden de concentraties aan BZV₅ en CZV over de loop van de Schelde in België op 13 augustus 2000 weergegeven. Hierbij valt het effect van de samenvloeiing van de Grote Spierebeek op de Schelde onmiddellijk op. Ook de invloed van andere belangrijke lozingen op de Schelde kan waargenomen worden.

Tenslotte is het eveneens mogelijk om stofstromenbalansen op te stellen op bekkenniveau voor organisch koolstof, stikstof en fosfor. Hierbij worden de stroomopwaartse aanvoer van stoffen, de aanvoer via puntlozingen en diffuse toevoer, het effect van de biochemische processen in de waterlopen en de sedimentatie op de waterbodem op de stofstromenbalans gekwantificeerd.

5. Besluit

Het PEGASE-model berekent de fysisch-chemische waterkwaliteit op basis van modellering van de fysische en biochemische processen die zich in het aquatisch ecosysteem voordoen. Hiervoor werd het model uitgerust met een hydrologisch en hydrodynamisch submodel, een thermisch submodel en een biologisch submodel. Met behulp van dit model onderzoekt de Vlaamse Milieumaatschappij mogelijke evoluties van de waterkwaliteit voor de zuurstofhuishouding en de nutriënten in de waterlopen. Diverse scenario's met betrekking tot het saneren van lozingen kunnen worden opgesteld. De effecten van deze scenario's op de fysisch-chemische waterkwaliteit kan worden gemodelleerd en getoetst aan de normen. Het PEGASE-model is bijgevolg een geschikt beleidsondersteunend instrument ter voorbereiding van het stroomgebiedbeheerplan van de Schelde.

Y. Ronse en T. D'heygere

Vlaamse Milieumaatschappij,
Afdeling Kwaliteitsbeheer,
DVP Waterkwaliteitsmodellering
Van de Maelestraat 96, 9320 Erembodegem
Tel. 053/72.66.31. en 72.65.78.
Fax 053/72.66.30.