



Circulatie in stedelijk oppervlaktewater: wanneer en hoe snel?

IR. ROB NIEUWENHUIS, GRONTMIJ ADVIES & TECHNIEK BV

ING. LOUIS BROERSMA, GRONTMIJ ADVIES & TECHNIEK BV

DRS. MARIO MAESSEN, GRONTMIJ ADVIES & TECHNIEK BV

Tijdens overstoringen wordt een oppervlaktewatersysteem belast met een BZV-vracht die gevaarlijk lage zuurstofconcentraties kan veroorzaken. Lokale problemen kunnen worden voorkomen door de watergangen door te spoelen of door middel van circulatie. Bij het doorspoelen wordt de vuillast binnen relatief korte tijd uit het systeem gespoeld en wordt het water vervangen door inlaatwater. In het geval van circulatie wordt binnen het stedelijk oppervlaktewatersysteem stroming opgewekt, zonder dat daarvoor gebiedsvreemd water wordt ingelaten en zonder dat extra (vervuild) water uit de stad wordt geloosd op het oppervlaktewater in de omgeving. Circulatie past daarmee beter in het denkkader van de Vierde Nota Waterhuishouding dan doorspoelen.

De invloed van circulatie op de zuurstofhuishouding berust op twee principes: er treedt verdunning op van de vuillast als gevolg van menging en verspreiding. Daarnaast leidt stroming tot een verhoogde herbeluchting van het water (reaeratie). Bij doorspoelen geldt het 'weg is weg'-principe. De waterkwaliteitsbeheerder probeert de vuillast binnen 24 uur tot enkele dagen de stad uit te werken.

Bij circulatie wordt de vuillast binnen het stedelijk watersysteem verwerkt. Tot op heden is er geen kwantitatieve circulatienorm, die een goed resultaat garandeert voor de waterkwaliteit. Om in de advisering over circulatie meer eenduidigheid te brengen, is door Grontmij met behulp van het pakket DUFLOW een onderzoek uitgevoerd naar het effect van circulatie op de zuurstofhuishouding. Getracht is een optimale circulatie-intensiteit te bepalen. Hierbij wordt niet het fysieke optimum bedoeld, maar wordt tevens rekening gehouden met de met circulatie gemoeide kosten.

Twee typen rioolstelsels zijn onderzocht: het gemengd stelsel (GEM) en het verbeterd gescheiden stelsel (VGS). Bij het gemengd stelsel blijkt circulatie noodzakelijk om te lage zuurstofconcentraties te voorkomen. Het effect van zelfs een geringe circulatie is al vrij groot. Een circulatiesnelheid van 3 à 5 cm/s heeft een behoorlijk effect. Bij overstoringen

uit een verbeterd gescheiden stelsel is de belasting van het oppervlaktewater zo laag, dat zuurstofproblemen niet waarschijnlijk zijn. Circulatie is dan doorgaans overbodig.

In droge zomers kan de inlaat van (nutriëntrijk) gebiedsvreemd water eveneens een belasting vormen van het oppervlaktewater. Indien tijdens waterinlaat-perioden niet wordt gecirculeerd, blijft het inlaatwater als een prop rond het inlaatpunt hangen en kan bijvoorbeeld resulteren in algenbloei. Het verspreiden van nutriënten door middel van circulatie kan een grote kwaliteitswinst opleveren (door verdunning). Een circulatiesnelheid van circa 3 cm/s levert een goede menging op. Een circulatiegemaal kan dus zowel na overstoringen als tijdens inlaatperioden worden gebruikt.

Opzet onderzoek

In deze studie is de stroomsnelheid gekozen als stuurvariabele. Voor de overstortberekeningen wordt getoetst op de diepte en duur van de zuurstofdip (de periode dat de zuurstofconcentratie beneden de MTR-norm voor stadswateren (3,0 mg/l) ligt). Voor de inlaatberekeningen zijn de verdunning en de mate van menging het belangrijkste. Belangrijke processen als dispersie en reaeratie zijn direct afhankelijk van de stroomsnelheid (zie kader). Sturing op verversingstijd geeft de beheerder geen inzichtelijke handvatten voor het beheer.

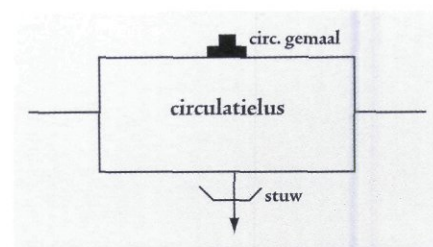
Uitgangspunten (referentie-) watersysteem

In de DUFLOW-berekeningen wordt uitgegaan van een bestaand stedelijk oppervlaktewatersysteem. De verdeling in oppervlakken is als volgt:

- F_{bruto} : 100 ha
- $F_{\text{open water}}$: 4 ha
- F_{verhard} : 45 ha
- $F_{\text{onverhard}}$: 51 ha

Het (referentie-)watersysteem, dat gebruikt is voor de simulaties in DUFLOW, is gemodelleerd als een vijf km lange lus met twee dode takken (afbeelding 1). Het watersysteem bestaat uit secties van ieder 50 meter lengte. Het dwarsprofiel is voor alle secties in de lus gelijk. De breedte op de waterlijn bedraagt 6 meter, de bodembreedte 3 meter en de diepte 0,75 m. De K_M waarde bedraagt $20,5 \text{ m}^1/3\text{s}^{-1}$. De twee dode takken (die wel meedoen in de berging, maar niet circuleren) zijn beide 500 m lang en 10 m breed, bij een diepte van 0,75 m.

In het watersysteem is een circulatiepomp aanwezig. De capaciteit van deze pomp wordt steeds gevarieerd, om de gewenste stroomsnelheid te verkrijgen. In de overstortberekeningen slaat de pomp aan bij een peilstijging van 10 cm. In de inlaatberekeningen staat de pomp vanaf het begin van de berekening aan.



Afb. 1 Schematische weergave van het circulatiesysteem.

Afvoer uit het systeem vindt plaats via een stuw op streefpeil, die een maximaal debiet van $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$ ($1,5 \text{ l/s/ha}$) doorlaat. In de berekeningen waarbij water wordt ingelaten vindt geen afvoer plaats.

De dispersie is dynamisch ingevoerd, afhankelijk van de stroomsnelheid. Daarbij zijn waarden gekozen, die zijn gemiddeld tussen de berekende dispersie volgens de empirische relatie van Elder (zie kader) en (lagere) meetwaarden in vergelijkbare watergangen (Stowa, 1996). Bovendien is rekening gehouden met de eisen die het rekenhart van DUFLOW aan de dispersie stelt.

Overstortberekeningen

Voor de overstortberekeningen is gebruik gemaakt van het door Stowa (1996) geleverde en door Grontmij op enkele punten aangepaste waterkwaliteitsmodel 'zuurstof'. In dit model wordt de zuurstofhuishouding

beschreven aan de hand van afbraak van BZV, nitrificatie, sediment-zuurstofverbruik, reaeratie en zuurstofproductie door algen. Er is gerekend met overstortingen als gevolg van een T=10 bui (een hevige zomerse bui met een neerslaghoeveelheid die gemiddeld eens in de tien jaar wordt overschreden).

Allereerst is een calibratie uitgevoerd, om de

verschillende processen en de diffuse input van BZV zodanig op elkaar af te stemmen, dat een stabiele beginsituatie wordt bereikt. De concentraties in deze uitgangssituatie bedragen:

- BZV snel afbreekbaar: 4,0 mg O₂/l;
- BZV langzaam afbreekbaar: 4,0 mg O₂/l;
- NH₄⁺: 0,35 mg N/l;
- O₂: 7,0 mg/l.

Het verhard oppervlak per overstort bedraagt 3 ha. De kenmerken van de rioolstelsels worden weergegeven in tabel 1. De 15 overstorten zijn met een tussenafstand van 300 tot 350 m gelokaliseerd aan de doorgaande lus.

De neerslag die op het open water valt, heeft een zuurstofgehalte van 9 mg/l en een ammoniumgehalte van 1,1 mg-N/l (RIVM).

Theorie

Reaeratie

Reaeratie is het transport van zuurstof door het grensvlak water/lucht. Reaeratie vindt plaats wanneer het water ten opzichte van de lucht over- of onderverzadigd is met zuurstof. In geval van onderverzadiging zal transport van zuurstof vanuit de lucht naar het water plaatsvinden. Bij oververzadiging is de transportrichting omgedraaid.

In de literatuur zijn verscheidene empirische relaties te vinden, die reaeratie beschrijven aan de hand van de stroomsnelheid, de diepte van de watergang en de temperatuur. De temperatuur is van invloed op de verzadigingsconcentratie van het water en op de snelheid waarmee processen verlopen. De afhankelijkheid van de stroomsnelheid en de diepte kan worden beschreven met de relatie van Owens e.a. (1964). De stromingscondities en de afmeting van de meeste stedelijke watergangen vallen binnen het geldigheidsbereik van deze empirische relatie. De relatie is als volgt:

$$K_L = 5,33u^{0,67} H^{-0,85}$$

waarin:

K_L: reaeratie-constante (m/d);

u: stroomsnelheid (m/s);

H: diepte.

Voor deze relatie gelden het volgende geldigheidsbereik:

- 0,03 < u < 1,5 m/s;
- 0,12 < H < 3,36 m.

In veel gangbare waterkwaliteitsmodellen (zoals tewor+ en eutrof 2) wordt voor reaeratie de relatie van O'Connor en Dobbins (1956) gebruikt. Deze relatie is gebaseerd op meetgegevens van stromende wateren (beken en kleine rivieren, stroomsnelheid tussen 0,17 en 0,56 m/s, diepte tussen 0,23 en 11 m) en is derhalve niet zo geschikt voor toepassing in modellen van stedelijke watersystemen.

Een typische minimum waarde voor K_L, K_{Lmin} voor wateren die niet stromen, bedraagt

0,1 m/d á 0,18 m/d. Het omslagpunt waarbij de stroomsnelheid een positief effect heeft op de reaeratie ligt bij een waterdiepte van 0,75 m rond 0,5 cm/s. Voor beide empirische relaties liggen deze kritieke stroomsnelheden eigenlijk buiten het geldigheidsbereik, maar voor Owens e.a. is de afwijking van de ondergrens niet groot.

Voor circulatie in stedelijke watersystemen betekent dit, dat het gebruik van een circulatiegemaal om de reaeratie te verhogen, in theorie pas zin heeft als de opgewekte stroomsnelheden minstens 0,5 á 1 cm/s bedragen.

Reaeratieconstante (K_{re})

De uiteindelijke reaeratie is vervolgens ook nog afhankelijk van de waterdiepte en van het zuurstofdeficit (verschil tussen zuurstofconcentratie in het water en de verzadigingsconcentratie). De correctie van K_L voor de diepte levert de reaeratieconstante K_{re} op. Het product van deze waarde en het deficit resulteert in de bijdrage van reaeratie aan de zuurstofbalans. In afbeelding 1 is K_{re} voor verschillende dieptes uitgezet tegen de stroomsnelheid. Met name voor ondiepe (stedelijke) watergangen blijkt K_{re} sterk toe te nemen met de stroomsnelheid. Bij een diepte van 0,50 m, een stroomsnelheid van 5 cm/s en een zuurstofconcentratie van 7 mg/l kan de reaeratiesnelheid oplopen tot ruim 5 mg-O₂/l/dag!

Dispersie

In stromende systemen zorgt dispersie voor extra menging van meegevoerde stoffen. Dispersie wordt veroorzaakt doordat de stroomsnelheid in een dwarsprofiel nooit homogeen verdeeld is. Nabij de bodem en de oevers stroomt het water doorgaans langzamer dan in het midden van de waterloop. Naarmate de gemiddelde stroomsnelheid toeneemt, neemt ook de dispersie toe. Hierdoor

wordt de menging in de lengterichting van de waterloop ook beter, zodat pieken en dalen in de concentratieverdeling worden afgevlakt. Een veel gebruikte empirische relatie voor de dispersie is de volgende van Elder:

$$D = C_e nu R^{\frac{5}{8}} \sqrt{g}$$

waarin:

D: dispersiecoëfficiënt (m²/s);

C_e: evenredigheidsconstante: 1910 (m^{1/6});

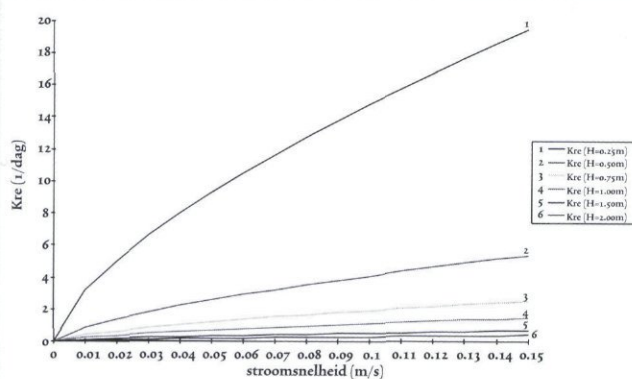
g: valversnelling: 9,81 (m/s²);

n: Manningconstante (=1/K_m) (s/m^{1/3});

u: stroomsnelheid (m/s);

R: hydraulische straal (m).

In deze relatie is de dispersie lineair afhankelijk van de stroomsnelheid. Dit betekent dat een hogere circulatiesnelheid rechtstreeks resulteert in een hogere dispersie en dus in een betere menging. De invloed van de dispersie op modelberekeningen is zeer groot. Bovendien stelt het rekenhart van een simulatiepakket zoals DUFLOW om stabiliteitsredenen specifieke eisen aan de grootte van de dispersie.



Reaeratieconstante K_{re} als functie van de stroomsnelheid, bij verschillende dieptes.

Deze moet namelijk groter zijn dan het produkt van de sectielengte en de stroomsnelheid. Anders geformuleerd betekent dit dat de sectielengte van het model moet worden afgestemd op de stroomsnelheid en de ingevoerde dispersie. Bij het modelleren van het netwerk van waterlopen en kunstwerken moet de modelleur dus al rekening houden met het hydraulisch functioneren van het systeem!

De BZV-concentraties zijn gebaseerd op WRW-richtlijnen voor extreme situaties (GEM) en op een interne analyse van beschikbare meetgegevens (VGS).

Resultaat overstortberekningen Gemengd rioolstelsel

Indien na een T-10 bui niet gecirculeerd wordt, daalt het zuurstofgehalte tot beneden 1 mg/l (afbeelding 2). In afbeelding 2 wordt het verloop van de zuurstofconcentratie weergegeven voor het gemengde stelsel en het verbeterd gescheiden stelsel, voor verschillende stroomsnelheden, op een meetpunt dat precies tussen twee overstortlokaties ligt (op 200 m afstand). De norm voor stedelijk water bedraagt 3 mg/l. Bij de hier beschreven uitgangspunten wordt de norm slechts gehaald als een circulatiesnelheid van 10 cm/s wordt gehanteerd. Bij die snelheid wordt het verhang in het watersysteem echter erg groot. De kosten voor het bemalen zijn ook erg hoog. Bovendien mag aan de hier gepresenteerde resultaten geen absolute waarde worden gehecht, aangezien het een gestandaardiseerde modelsituatie betreft. De onderlinge verschillen leveren echter veel nuttige informatie op. Op grond daarvan kan worden geconcludeerd dat het gebruik van een circulatiegemaal dat een stroomsnelheid van 3 à 5 cm/s opwekt, een gunstige verhouding tussen zuurstofdip en circulatiesnelheid oplevert.

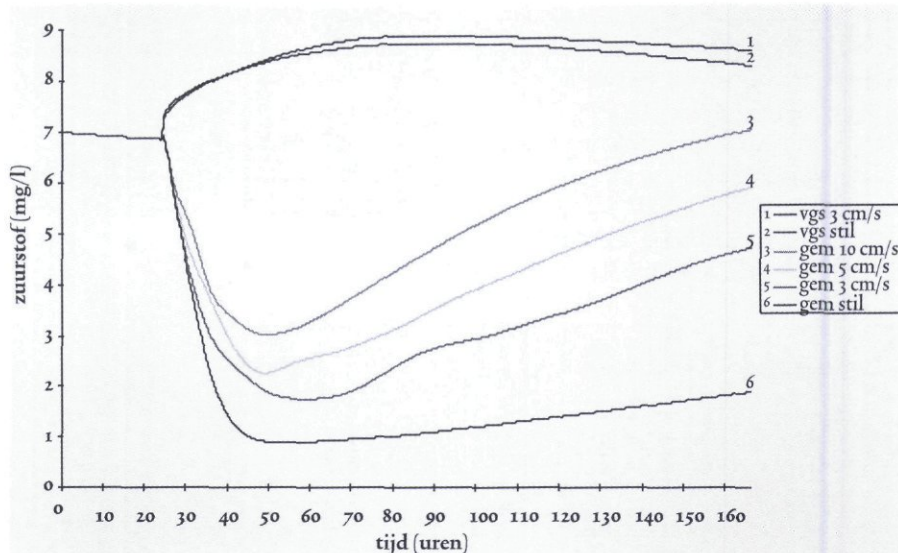
Verbeterd gescheiden rioolstelsel

De kwaliteit van overstortwater uit VGS is soms zelfs beter dan de kwaliteit van het aanwezige oppervlaktewater. Regenwater is immers een belangrijke 'schoon-waterbron'. Met name de zuurstofconcentratie is gunstiger. Circulatie blijkt voor de zuurstofhuishouding dan ook niet nodig, als enkel VGS overstorten aanwezig zijn (afbeelding 2)

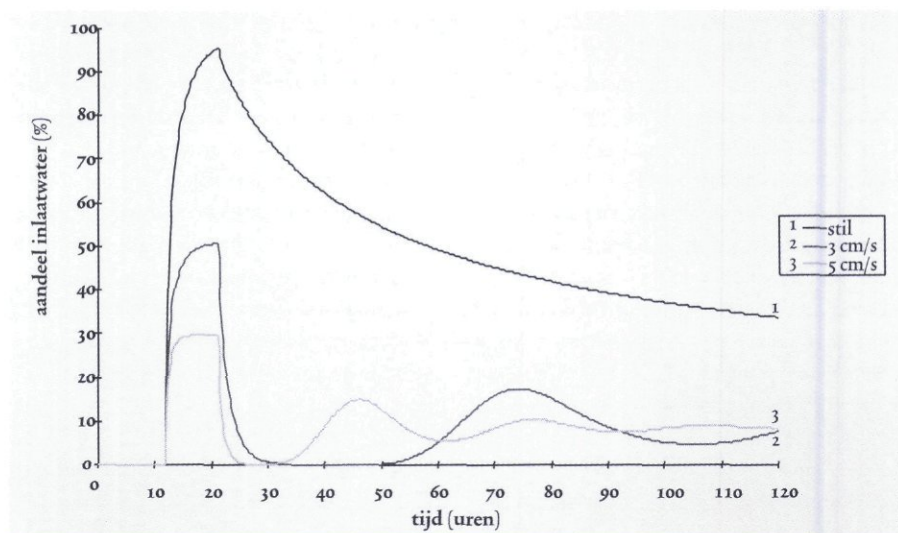
Waterinlaatberekningen

In droge perioden kan het noodzakelijk zijn voor suppletie gebiedsvreemd water in te laten. Dit inlaatwater is meestal rijker aan nutriënten dan het systeemeigen water. Het inlaatwater kan dus, net als overstortwater, als verontreiniging worden beschouwd. Teneinde deze verontreiniging zo min mogelijk tot lokale problemen te laten leiden, kan ook in deze situaties worden gecirculeerd.

Voor de simulatie van een inlaatgebeurtenis is uitgegaan van een situatie waarin het waterpeil 5 cm beneden streefpeil ligt. Met een debiet van 0,6 l/s/ha (voor het bruto oppervlak) wordt het systeem ter hoogte van de stuw weer aangevuld tot streefpeil. Dit duurt iets meer dan 9 uur. De mate van menging wordt getoetst aan de hand van de verspreiding van een tracer in het inlaatwater.



Afb. 2 Verloop zuurstofgehalte bij verschillende circulatiesnelheden, gemengd stelsel en verbeterd gescheiden stelsel.



Afb. 3 Percentage inlaatwater juist benedenstrooms inlaatpunt bij verschillende circulatiesnelheden.

stelsel	berging (mm)	p.o.c. (mm/h)	ov. Volume (m ³)	BZV snel (mg-O ₂ /l)	BZV langz. (mg-O ₂ /l)	NH ₄ ⁺ (mg-N/l)	O ₂ (mg/l)
GEM	9	0,7	787	50	50	1,8	7
VGS	4	0,3	1202	2,75	2,50	1,8	8

Tabel 1: Kenmerken overstorten per referentiestelsel.

Resultaat inlaatberekningen

De verspreiding van inlaatwater en de daarin voorkomende stoffen blijkt sterk afhankelijk van circulatie te zijn. Bij afwezigheid van circulatie zal het inlaatwater nabij het inlaatpunt het aanwezige water grotendeels verdringen, zodat er een grote ruimtelijke variatie ontstaat. Door middel van circulatie kan deze variatie sterk worden teruggedrongen.

Naarmate de stroomsnelheid hoger is, is de menging beter. De maximale concentraties

liggen steeds lager, omdat het inlaatwater gelijkmatiger over het aanwezige water wordt verdeeld. De resultaten voor de verschillende stroomsnelheden zijn weergegeven voor een locatie juist benedenstrooms van het inlaatpunt (afbeelding 3). In deze afbeelding is het verschil in circulatietijd goed te onderscheiden aan de hand van de opeenvolging van concentratiepieken. Iedere keer dat een piek langskomt, heeft het water weer 5 km afgelegd door de circulatielus.