
Het Betuwepand en het stoftransport in Lek en Amsterdam-Rijnkanaal bij lage Rijnafvoeren

Albert van Mazijk¹, Theo Olsthoorn², Steven van Duijvenbode³

Aanleiding tot ‘Haalbaarheidsstudie aanpassing Rijnalarmmodel’

Amsterdam is voor ca. 60% van zijn drinkwater afhankelijk van Rijnwater. Een belangrijk deel daarvan is afkomstig uit het Lekkanaal, waar het wordt ingenomen door het pompstation Cornelis Biemond van Waternet te Nieuwegein. Een geografisch overzicht is weergegeven in afbeelding 1. Voor een goede bedrijfsvoering beschikt Waternet over het Rijnalarmmodel. Hiermee voorspelt Waternet de concentratie en aankomsttijd van verontreinigingen op de Nederrijn-Lek om tijdig de inname te kunnen onderbreken. Bij lage Rijnafvoeren, waarbij de stuwen Driel, Amerongen en Hagestein op de Nederrijn-Lek zijn gestreken, zijn de stroomsnelheden in deze Rijntak slechts enkele centimeters per seconde. Dit betekent dat de transporttijd vanaf Lobith tot aan de aansluiting van de Lek met het Lekkanaal direct benedenstrooms van de stuw Hagestein onder deze omstandigheden kan oplopen tot een maand.

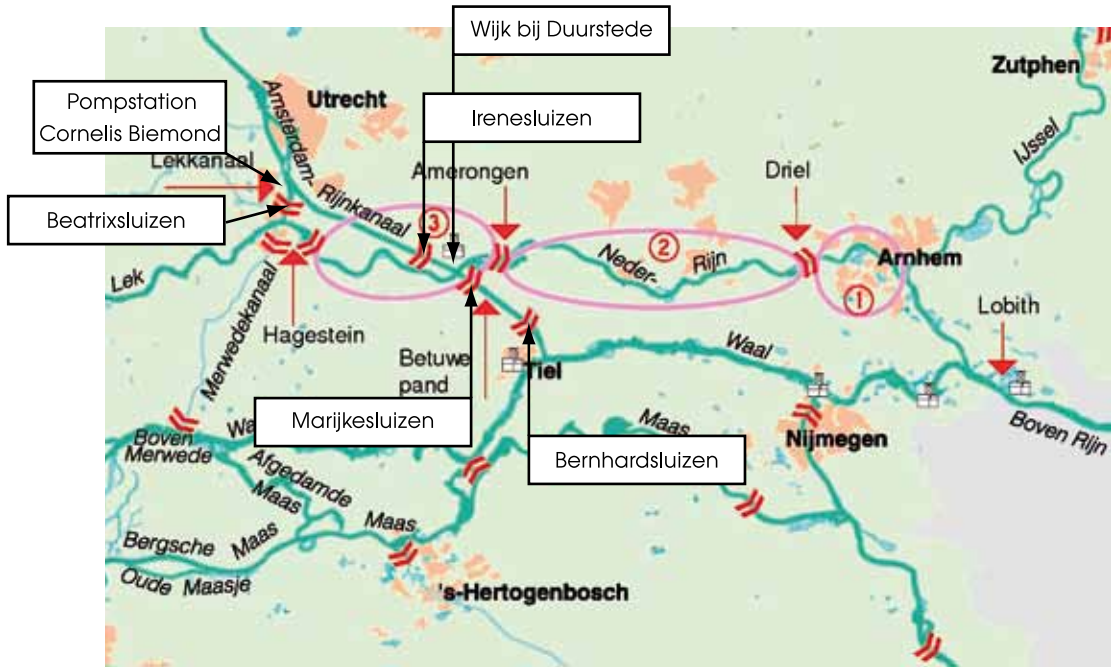
Een vergelijking van het chlorideverloop bij Lobith met dat in het Lekkanaal bij het innamepunt tijdens de laagwaterperiode in het najaar 2003 deed echter vermoeden dat er, naast deze lange transporttijd via de gestuwde Nederrijn-Lek, een aanzienlijk kortere transporttijd kan optreden via de Waal en het Betuwepand (Mazijk, 2005). Dat ook bij laagwater de transporttijd van Lobith via de Waal naar Tiel minder dan één dag is, ondersteunt dit vermoeden.

Aangezien het Betuwepand niet in het Rijnalarmmodel is opgenomen, gaf Waternet opdracht voor een ‘Haalbaarheidsstudie Aanpassing Rijnalarmmodel’ (Mazijk, 2008a). Hierin zijn zowel het transport op de Nederrijn-Lek als via de Waal en het Betuwepand naar de Lek nader geanalyseerd. Daarbij is ook het transport in beschouwing genomen via de Irenesluizen bij Wijk bij Duurstede en het Amsterdam-Rijnkanaal tot de aansluiting met het Lekkanaal. Dit laatste was noodzakelijk omdat bij beperkt schutbedrijf van de Beatrixsluizen het Pompstation Cornelis Biemond water aantrekt vanuit het Amsterdam-Rijnkanaal. Bovendien wordt hiermee ook een indicatie verkregen voor de aankomsttijd van een verontreiniging in het Amsterdam-Rijnkanaal bij het verder noordelijk gelegen innamepunt van Waternet aan het Amsterdam-Rijnkanaal bij Loenersloot.

1 Oud medewerker TUDelft, Tel.: +31 (0)30-6880334, E-mail: avanmazijk@solcon.nl

2 TUDelft, Tel.: +31 (0)15-2787346 (doorkies), E-mail: t.n.olsthoorn@tudelft.nl en Waternet, E-mail: theo.olsthoorn@waternet.nl

3 Waternet, Tel.: +31 (0)6-20016272, E-mail: Steven.van.Duijvenbode@waternet.nl

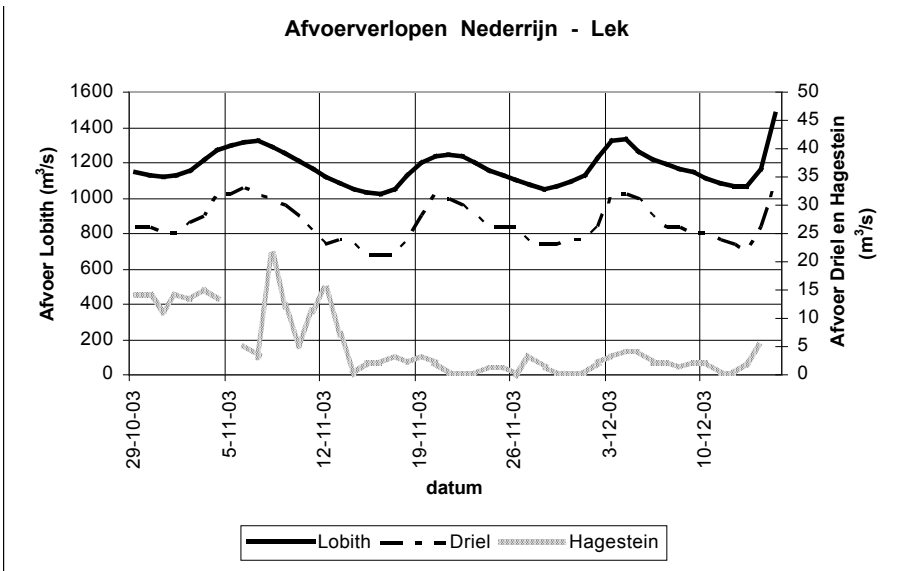


Afbeelding 1: Rijntakken met de stuwpanden Driel (1), Amerongen (2) en Hagestein (3), en de sluiscomplexen in het Amsterdam-Rijnkanaal.

Invloed Betuwepand op transport in Lek en Amsterdam-Rijnkanaal

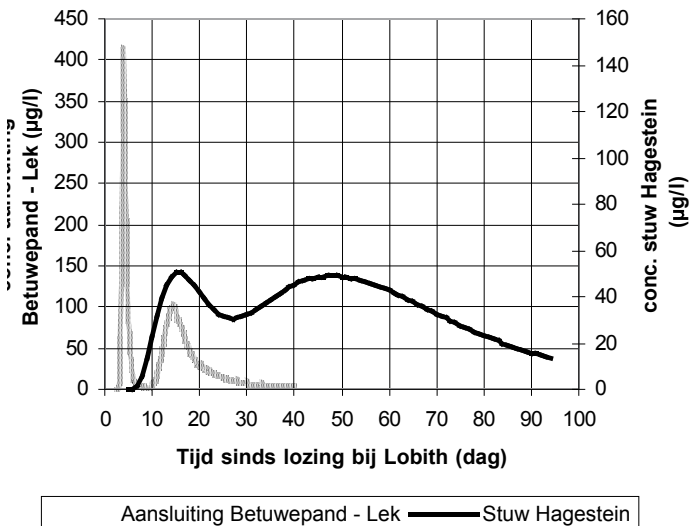
De invloed van het Betuwepand op het stoftransport in de Lek en het Amsterdam-Rijnkanaal is geanalyseerd door simulatie van een momentane lozing van 100.000 kg van een niet nader gedefinieerde, niet afbreekbare stof bij Lobith (km. 862,2). De gebruikte hydrologische gegevens betreffen de laagwaterperiode in het najaar van 2003 (afbeelding 2)

In het Rijnalarmmodel Versie 3.06.04.2a is het Betuwepand niet opgenomen, terwijl het traject vanaf de stuw Amerongen tot de stuw Hagestein in het model als één traject is gemodelleerd. Daarom is voor de analyse eerst met het Rijnalarmmodel het stoftransport berekend vanaf Lobith langs de Nederrijn tot de stuw Amerongen en via de Waal tot Tiel, waar het Betuwepand aansluit. Vervolgens is handmatig, dat wil zeggen met behulp van het programma Excel van Microsoft, het stoftransport in stroomafwaartse richting berekend, uitgaande van de door het Rijnalarmmodel berekende concentratieverlopen bij Amerongen en Tiel. Hierbij is gebruik gemaakt van het 1-dimensionale stoftransportmodel volgens Taylor (1953), dat het concentratieverloop van een verontreinigingsgolf beschrijft volgens de normale verdeling. Omdat dit model uitgaat van een momentane lozing, worden bij de handberekening de concentratieverlopen bij Amerongen en Tiel eerst gediscrètiseerd in een reeks van momentane lozingen. Het benedenstroomse concentratieverloop wordt dan verkregen door sommatie van de berekende verlopen per momentane lozing. De hydrologische gegevens van de Nederrijn-Lek tussen de stuwen Amerongen en Hagestein kwamen van het Rijnalarmmodel. Voor het 12 km lange Betuwepand zijn voor de breedte en de diepte de waarden van 100 m, respectievelijk 5 m als



Afbeelding 2: Afvoerverlopen bij Lobith en de stuwen Driel en Hagestein tijdens de laagwaterperiode in het najaar van 2003.

**Conc. verloop stuw HAGESTEIN bij geg. conc. verloop aansluiting Betuwepand - Lek , situatie 2003
incl. invloed Betuwepand met 20 m³/s**

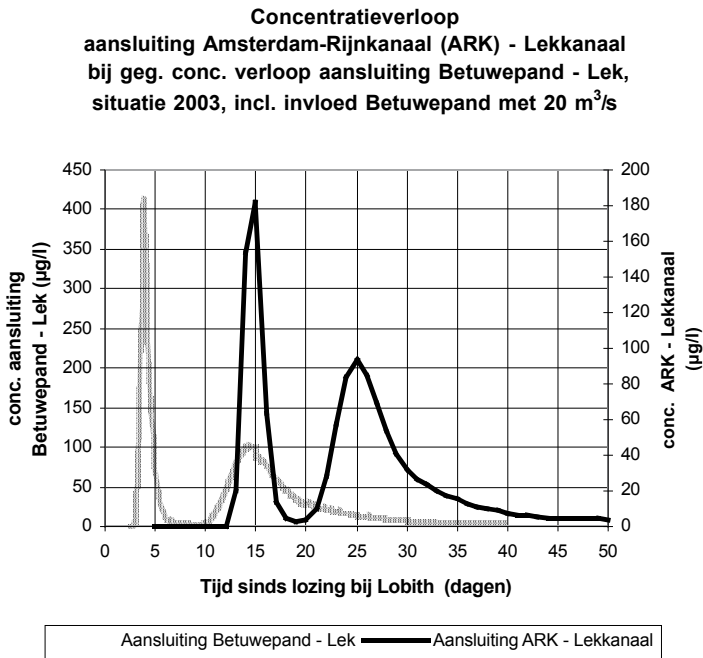


Afbeelding 3: Concentratieverloop bij de aansluiting van het Betuwepand met de Lek en bij de stuw Hagestein, situatie 2003, volgens de simulatie met het Betuwepand, waarbij de afvoer door het Betuwepand 20 m³/s bedraagt.

eerste benadering gekozen. Voor het 17 km lange traject van het Amsterdam-Rijnkanaal vanaf de Lek tot de aansluiting met het Lekkanaal, zijn een breedte van 112,5 m en een diepte van 6 m gehanteerd.

Voor de analyse van de invloed van het Betuwepand op het stoftransport in de Lek is een afvoer van 20 m³/s beschouwd, wat overeenkomt met de situatie waarin de Bernhardsluizen open staan (Mazijk, 2008a). Voor de berekening van het stoftransport in het Amsterdam-Rijnkanaal vanaf de Irenesluizen tot de aansluiting met het Lekkanaal is een kanaalafvoer van 12,6 m³/s gehanteerd, een waarde uit een eerdere balansstudie van Mazijk en Maas (1994).

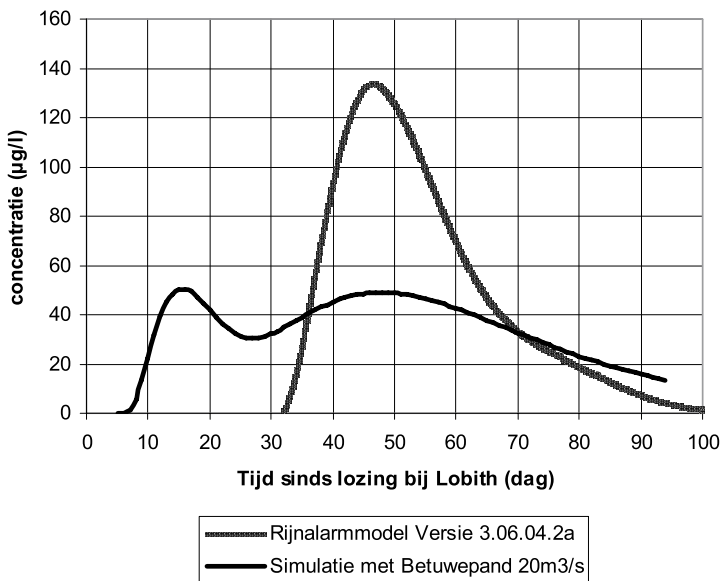
De berekening van het stoftransport in de Lek vanaf de stuw Amerongen tot de aansluiting met het Betuwepand enerzijds en het transport vanaf Tiel via het Betuwepand tot de aansluiting met de Lek anderzijds resulteert in twee concentratieverlopen ter plaatse van genoemde aansluiting, die vervolgens worden gesommeerd, gewogen naar de grootte van de afvoeren (afbeeldingen 3 en 4). Er waren in de droge periode van 2003 dus twee concentratiepieken: een 'snelle' via Waal en Betuwepand en een 'trage' via Nederrijn-Lek. De 'snelle' concentratiepiek treedt na circa 3 dagen op en de 'trage' na 15 dagen.



afbeelding 4: Concentratieverloop bij de aansluiting van het Betuwepand met de Lek en in het Amsterdam-Rijnkanaal bij de aansluiting met het Lekkanaal, situatie 2003, volgens de simulatie met het Betuwepand, waarbij de afvoer door het Betuwepand 20 m³/s bedraagt.

Het gesommeerde concentratieverloop bij de aansluiting van het Betuwepand met de Lek is randvoorwaarde voor de verdere 'handmatige' berekening van het stoftransport. Dit resulteert enerzijds in het concentratieverloop bij stuw Hagestein via de Lek (afbeelding 3) en anderzijds in het concentratieverloop bij de splitsing waar het Lekkanaal aansluit op het Amsterdam-Rijnkanaal (afbeelding 4). Bij Hagestein treedt dan het eerste maximum op na circa 15 dagen en het tweede maximum na circa 50 dagen. In afbeelding 5 wordt dit verloop vergeleken met het berekende verloop volgens het Rijnalarmmodel Versie 3.06.04.2a. De tweede concentratiepiek blijkt nu overeen te stemmen met de aankomsttijd van de concentratiepiek volgens het Rijnalarmmodel. De concentratiepieken bij genoemde splitsing treden op 15 respectievelijk 25 dagen na de lozing bij Lobith. De weg vanaf de kruising Betuwepand-Lek via het Amsterdam-Rijnkanaal naar het Pompstation Biemond is dus beduidend korter dan die via de Lek over Hagestein, namelijk 25 ten opzichte van 50 dagen vanaf Lobith. Los daarvan is de weg tot aan genoemde kruising via Waal en Betuwepand bij lage afvoer korter dan via Nederrijn en Lek.

**Concentratieverloop HAGESTEIN (km 946,5)
Lozing bij Lobith (km 862,2) op 29 oktober 2003**



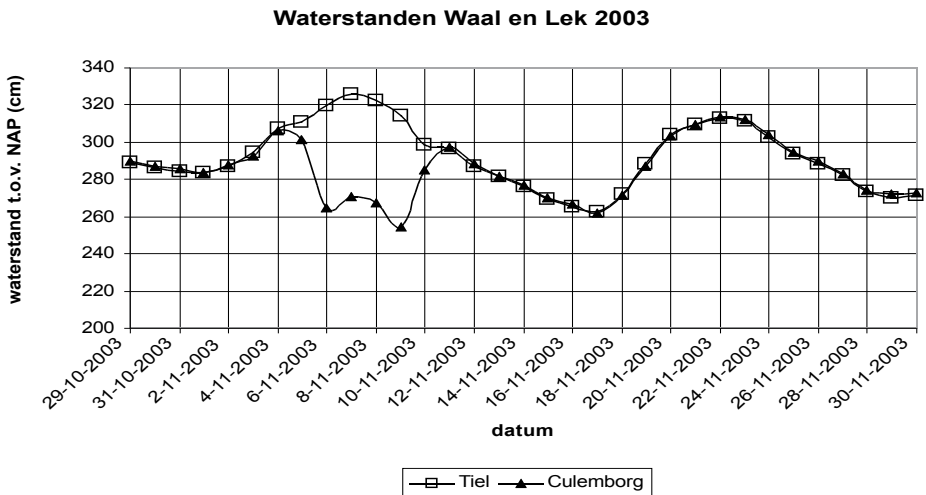
Afbeelding 5: Vergelijking concentratieverloop Hagestein volgens het Rijnalarmmodel Versie 3.06.04.2a en volgens de simulatie met het Betuwepand, waarbij de afvoer door het Betuwepand 20 m³/s bedraagt.

Deze resultaten zijn aanleiding geweest voor Waternet om het Rijnalarmmodel uit te breiden met het Betuwepand en het traject van het Amsterdam-Rijnkanaal vanaf de Irenesluizen bij Wijk bij Duurstede tot aan de aansluiting met het Lekkanaal. Deze modeluitbreiding heeft geresulteerd in de Versie 3.08.01 van het Rijnalarmmodel (Mazijk, 2008b).

Evaluatie Rijnalarmmodel Versie 3.08.01

Het Rijnalarmmodel vraagt met betrekking tot de hydrologie van een waterloop om de betreffende afvoer, dan wel om een waterstand, waarmee via een afvoer-waterstandrelatie de afvoer wordt afgeleid. Voor de bepaling van de afvoer in het Betuwepand is een akoestische debietmeter het meest wenselijk, gezien het feit dat zich in het Betuwepand de volgende twee afvoersituaties voordoen:

- (1) Bij de Bernhardsluizen wordt gesloten. De waterstand op de Waal is dan hoger dan op de Lek: waterstanden op de Waal bij Tiel zijn hoger dan NAP+295 cm, een peil dat bij benadering overeenkomt met het stuwpeil Hagestein.
- (2) Er wordt niet gesloten omdat de waterstanden op de Waal en de Lek bij benadering gelijk zijn en Rijkswaterstaat de sluis openhoudt. Dit laat onverlet dat dan een aanzienlijke stroming in het Betuwepand kan optreden. Ter illustratie worden in afbeelding 6 de waterstanden in de Waal bij Tiel vergeleken met de waterstanden in de Lek bij Culemborg.



Afbeelding 6: Waterstandsverloop bij Tiel (Waal) en Culemborg (Lek) van 29-10-2003 tot 31-11-2003

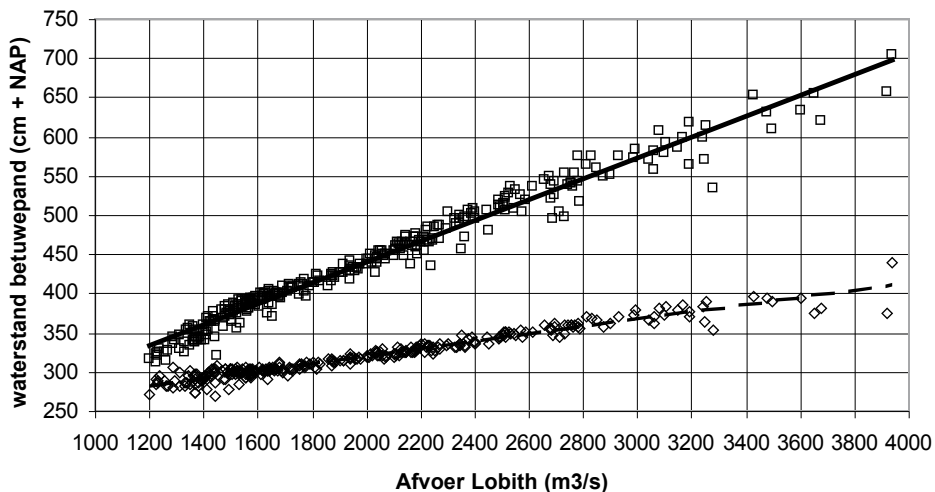
Momenteel kunnen echter alleen de actuele waterstanden op de Waal bij Tiel en in het Betuwepand, direct achter de Bernhardsluizen worden opgevraagd. Beide waterstanden tonen een lineair verband met de afvoer bij Lobith voor afvoeren groter dan 1200 m³/s bij Lobith (afbeelding 7). Met gemiddelde waarden van de shutgegevens en de kolkafmetingen van de Bernhardsluizen is hieruit de afvoer door het Betuwepand gerelateerd aan de afvoer te Lobith, respectievelijk de waterstand in het Betuwepand. Het verband met genoemde waterstand is vertaald in de voor het Rijnalarmmodel gebruikelijke afvoer-waterstandrelatie. In het geval deze waterstand onverhoopt niet beschikbaar is, gebruikt het verbeterde Rijnalarmmodel de relatie tussen de afvoer in het Betuwepand en de afvoer te Lobith.

Voor afvoeren kleiner dan 1200 m³/s bij Lobith is er geen eenduidig verband meer, omdat de sluizen dan open staan en de waterstanden op de Waal en de Lek beneden NAP+295 cm zijn en bij benadering gelijk (afbeeldingen 6 en 7). *Voor het operationeel gebruik van het model voor waterstanden beneden NAP+295 cm moet de gebruiker nu zelf een afvoer schatten tussen 2,5 m³/s en 40 m³/s, en zo de invloed van het Betuwepand op het stoftransport analyseren.* De minimale afvoer van 2,5 m³/s komt overeen met het minimale schutdebiet, de maximale afvoer van 40 m³/s treedt op bij een aangenomen gemiddelde stroomsnelheid van circa 5 cm/s, gebaseerd op globale visuele waarnemingen van de eerste auteur. Deze wijze van modelgebruik laat natuurlijk te wensen over en beklemtoont de noodzaak van het hebben van een debietmeter in het Betuwepand.

Voor de afvoer in het Amsterdam-Rijnkanaal beschikt Rijkswaterstaat over een akoestische debietmeter in het kanaal nabij Wijk bij Duurstede.

Ter verificatie van het uitgebreide Rijnalarmmodel Versie 3.08.01, is wederom het stoftransport van een fictieve momentane lozing van 100.000 kg van een niet nader gedefinieerde, niet afbreekbare stof bij Lobith gesimuleerd met dezelfde hydrologische data als bij bovenstaande analyse.

Waterstanden Betuwepand 2005

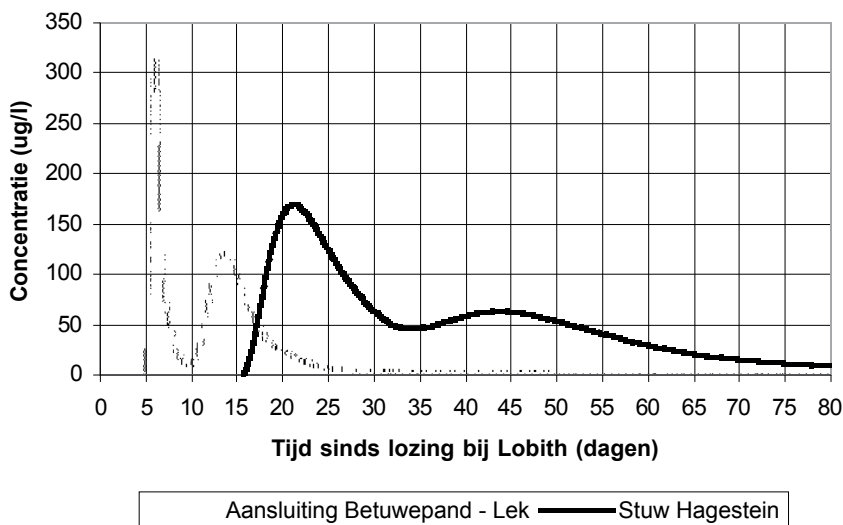


◇ Waterstand Betuwepand	□ Tiel Waal INVAART Betuwepand
— — Linear (Waterstand Betuwepand)	— Linear (Tiel Waal INVAART Betuwepand)

Afbeelding 7: Relaties tussen de afvoer te Lobith en de waterstanden op de Waal bij Tiel (INVAART Betuwepand) en in het Betuwepand, benedenstrooms van de Bernhardsluizen voor de afvoerrange van 1200 tot 4000 m³/s te Lobith in 2005. Hierbij zijn de sluizen in het Betuwepand gesloten. Beneden 1200 m³/s, dan wel beneden NAP+295 cm zijn de sluizen van het Betuwepand open, met als gevolg vrije doorstroming en is er geen significant peilverschil tussen Betuwepand en Waal.

De met de nieuwe modelversie berekende concentratieverlopen bij Hagestein en de aansluiting van het Amsterdam-Rijnkanaal met het Lekkanaal zijn gepresenteerd in de afbeeldingen 8 en 9 samen met het verloop op de kruising van het Betuwepand/Amsterdam-Rijnkanaal met de Lek, waar beide stromen samen komen. De verlopen in afbeeldingen 8 en 9 worden vergeleken met de hiervoor beschreven ‘handberekeningen’, die zijn weergegeven in de overeenkomstige afbeeldingen 3 en 4.

**Concentratieverloop aansluiting Betuwepand - Lek en
stuw Hagestein, situatie 2003
afvoer Betuwepand 20 m³/s**



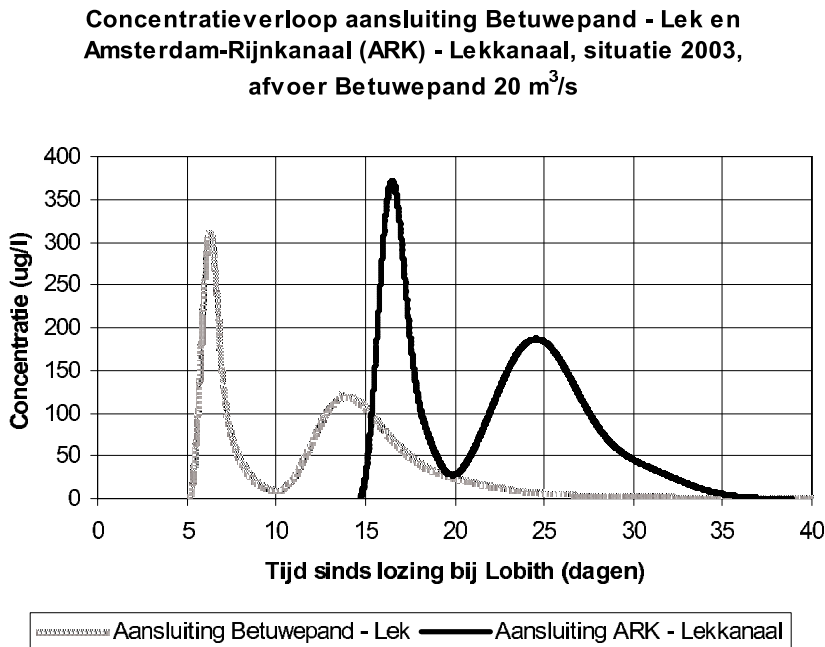
Afbeelding 8: Concentratieverloop bij de aansluiting van het Betuwepand met de Lek en de stuw Hagestein bij een gesimuleerde momentane lozing bij Lobith, Rijnalarmmodel Versie 3.08.01, afvoer Betuwepand 20 m³/s, afvoer Amsterdam-Rijnkanaal 12,6 m³/s.

Locatie Concentratieverloop	Transporttijden maxima gerekend vanaf moment van lozing in dagen		
	Maximum	Rijnalarmmodel Versie 3.08.01	Berekening volgens figuren 3 en 4
Hagestein	1 ^e	21,2	16
	2 ^e	43,8	48
Aansluiting ARK-Lekkanaal	1 ^e	16,5	15
	2 ^e	24,5	25

Tabel 1: Aankomsttijd maxima concentratieverlopen bij Hagestein en aansluiting Amsterdam-Rijnkanaal – Lekkanaal.

In tabel 1 zijn de aankomsttijden van de maximale concentraties weergegeven. De eerste piek bij Hagestein en de aansluiting van het Amsterdam-Rijnkanaal met het Lekkanaal treedt volgens het Rijnalarmmodel later op dan bij de ‘handberekening’. De oorzaak is dat de ‘handberekening’ voor het Betuwepand een dwarsdoorsnede hanteerde

van 500 m², wat kleiner is dan de later van Rijkswaterstaat verkregen gegevens van respectievelijk 850 tot 900 m². De volgens het Rijnalarmmodel eerdere aankomsttijd van de tweede piek bij Hagestein is toe te schrijven aan het verschil in stroomsnelheid op het traject 'Kruising Betuwepand/Amsterdam-Rijnkanaal - Lek' tot aan stuw Hagestein. De 'handberekening' ging namelijk uit van 6 m³/s, terwijl het model nauwkeuriger debietcijfers gebruikte die hoger bleken: vanaf 3 november 2003 waren die aanvankelijk 15 m³/s (afbeelding 2).



Afbeelding 9: Concentratieverloop bij de aansluiting van het Betuwepand met de Lek en in het Amsterdam-Rijnkanaal bij de aansluiting met het Lekkanaal bij een gesimuleerde momentane lozing bij Lobith, Rijnalarmmodel Versie 3.08.01, afvoer Betuwepand 20 m³/s, afvoer Amsterdam-Rijnkanaal 12,6 m³/s.

In afbeelding 9 zijn de concentraties bij de benedenstroomse aansluiting met het Lekkanaal significant hoger dan bij de kruising van het Betuwepand/Amsterdam-Rijnkanaal met de Lek. Oorzaak is de massabalans, waar het Rijnalarmmodel bij de berekening van concentraties vanuit gaat, terwijl vanwege de gehanteerde afvoeren in het Betuwepand en het Amsterdam-Rijnkanaal een negatieve sluitfout van meer dan 20 m³/s optrad in de waterbalans ter plaatse van de kruising van de Lek met deze kanaalpanen: de afstroming is kleiner dan de toestroming. In de 'Haalbaarheidsstudie Aanpassing Rijnalarmmodel' werden vergelijkbare waarden gevonden (Mazijk, 2008a).

Omdat bij de 'handberekeningen', in tegenstelling tot het Rijnalarmmodel, geen rekening is gehouden met de massabalans, heeft een vergelijking van de concentraties hier geen betekenis. Daarbij zij gewezen op het feit dat in situaties van een ongewenste lozing de hoeveelheid geloosde massa doorgaans slecht bekend is. Bij het gebruik van

het model gaat het dan ook primair om de aankomsttijd van een verontreiniging, zodat tijdig een waterinname kan worden onderbroken.

Conclusies

Bij laagwatersituaties, met afvoeren bij Lobith kleiner dan 1200 m³/s, zoals in het najaar van 2003, blijkt de transportweg van het water vanaf Lobith via de Waal en het Betuwepand naar de Lek een beduidend snellere dan via de Nederrijn-Lek. Hiermee rekening houden is essentieel voor een juiste voorspelling van de aankomsttijd van een verontreinigingsgolf vanaf Lobith richting Pompstation Cornelis Biemond, het innamepunt van Waternet aan het Lekkanaal bij Nieuwegein.

Het in het Rijnalarmmodel opnemen van het Betuwepand en het Amsterdam-Rijnkanaal vanaf de Irenesluizen bij Wijk bij Duurstede tot de aansluiting met het Lekkanaal is een substantiële verbetering van de betrouwbaarheid van de aankomstvoorspelling van verontreinigingen bij laagwatersituaties en daarmee ook voor de operationele bedrijfsvoering van het pompstation Cornelis Biemond van Waternet. Daarbij is deze voorspelling niet alleen van betekenis voor het pompstation Cornelis Biemond, maar ook voor het stroomafwaarts gelegen innamepunt van Waternet bij Loenersloot. Voor optimaal gebruik van het model is een debietmeter in het Betuwepand noodzakelijk.

Ondanks de huidige onzekerheid van de afvoer in het Betuwepand in de open situatie, wordt sinds 2007 het model door Waternet voor de bedrijfsvoering van zijn innamepunten ingezet. Een belangrijk pluspunt van het model is dat het, ook bij open Betuwepand, de mogelijkheid biedt een gevoeligheidsanalyse uit te voeren naar de invloed van het Betuwepand op de aankomsttijd van een verontreinigingsgolf.

Referenties

- Mazijk, A. van en F.J. Maas (1994)** *Stoftransport en waterkwaliteit Amsterdam-Rijnkanaal; Samenwerkende Rijn- en Maaswaterleidingbedrijven RIWA en TU Delft, december 1994.*
- Mazijk, A. van (2005)** *Rijn-Alarmmodel bij gestuwde Nederrijn-Lek, Evaluatie waterbalans en stoftransport; Rijnwaterbedrijven RIWA, januari 2005.*
- Mazijk, A. van (2008a)** *Haalbaarheidsstudie aanpassing Rijn-Alarmmodel; Uitgevoerd in opdracht van Waternet, Sector drinkwater, afd. Productie, Waternet, rapportnummer 08.008380, 20 mei 2008.*
- Mazijk, A. van (2008b)** *Aanpassing Rijn-Alarmmodel Inbouw Betuwepand en Amsterdam – Rijnkanaal, Versie 3.08.01, Achtergrondinformatie Data – files & Handleiding Operationeel gebruik; Uitgevoerd in opdracht van Waternet, Sector drinkwater, afd. Productie, juni 2008.*
- Taylor, G.I. (1953)** *Dispersion of soluble matter in solvent flowing slowly through a tube; Proc. R. Soc. London Ser. A 219, pag. 186...203.*