

Rijn-Alarmmodel bij gestuwde Nederrijn-Lek

Evaluatie waterbalans en stoftransport

RIWA
Rijnwaterbedrijven



A. van Mazijk, TU Delft

Januari 2005

Vereniging van Rivierwaterbedrijven

Inhoud

Ten geleide	3
Duitse Samenvatting	4
1 Inleiding	5
2 Waterbalans	7
2.1 Aanpak onderzoek	7
2.2 Inventarisatie balansposten	8
2.2.1 Algemeen	8
2.2.2 Afvoermeetstation Lobith	9
2.2.3 Pannerdensch Kanaal en IJssel	9
2.2.4 Stuwpannd Driel	9
2.2.5 Stuwpannd Amerongen	11
2.2.6 Stuwpannd Hagestein	13
2.2.7 Lekkanaal	18
2.3 Analyse waterbalans IJsselkop – Hagestein	19
2.3.1 Stuwpannd Driel	19
2.3.2 Stuwpannden Amerongen en Hagestein	19
2.3.3 Hydrologische invoer Rijn-Alarmmodel	22
3 Stoftransport Lobith – Hagestein	27
3.1 Bepaling looptijd met behulp van kruiscorrelatie van chloride meetreeksen	27
3.2 Evaluatie Rijn-Alarmmodel	30
4 Conclusies en aanbevelingen	37
Referenties	39
Colofon	40

Ten Geleide

Het Waterwinstation ir. Cornelis Biemond in Nieuwegein neemt bij het Lekkanaal water in ten behoeve van de drinkwatervoorziening van Noord-Holland. Indien er bij Lobith een verontreiniging getraceerd wordt dan is het van groot belang te weten wat de aankomsttijd is bij Hagestein en het Lekkanaal van deze verontreiniging. Voor de voorspelling van deze aankomsttijd wordt gebruik gemaakt van het Rijn-Alarmmodel.

Echter, een betrouwbare voorspelling wordt bepaald door de betrouwbaarheid van de hydrologische informatie, waarmee het model wordt gevoed. Voor een verhoging van deze betrouwbaarheid tijdens lage Rijnafoeren, waarbij de stuwen Driel, Amerongen en Hagestein zijn gestreken (gestuwde situatie), is het afvoerloop en de afvoerverdelingen tussen Lobith en Hagestein - Lekkanaal tijdens laagwaterperiode onderzocht.

Deze analyse heeft geresulteerd in een aantal voorstellen tot verbetering van de hydrologische invoer voor het Rijn-Alarmmodel, maar ook in voorstellen tot nadere afspraken met de rijksoverheid, tijdens de passage van een verontreiniging in de Nederlandse Rijntakken met betrekking tot het schut- en spuibeleid bij de respectieve sluiscomplexen in het Amsterdam-Rijnkanaal, teneinde te voorkomen, dat de verontreiniging in het inname water van voornoemd pompstation terecht komt.

Voor het gebruik van het Rijn-Alarmmodel tijdens laagwater houdt dit in:

- de gemeten afvoeren bij de stuwen automatisch te corrigeren met een in het model in te bouwen vaste waarde;
- binnen het model het opsplitsen van het stuwpannd Hagestein in twee deeltrajecten, waarbij per deeltraject de hydrologie moet worden ingevoerd;
- het inbouwen van het Amsterdam-Rijnkanaal bij Wijk bij Duurstede als een provisorische tak voor het verkrijgen van een correcte weergave van de hydrologie en daarmee de stofbalans.

Met de rijksoverheid afspraken maken dat tijdens passage van de verontreinigingsgolf bij de aansluitingen van het Amsterdam-Rijnkanaal met de Waal bij Tiel en de Nederrijn - Lek bij Wijk bij Duurstede en bij Nieuwegein het schut- en spuibeidrijf bij de desbetreffende sluiscomplexen te staken.

Indien dit echter niet mogelijk zou zijn, dan moet in het Rijn-Alarmmodel zowel het Betuwepand van het Amsterdam-Rijnkanaal als ook het Amsterdam-Rijnkanaal tussen Wijk bij Duurstede tot aan de aansluiting met het Lekkanaal en het Lekkanaal in het model worden opgenomen. Voor het operationele gebruik van het model vereist dit de invoer van:

- de afvoer in het Betuwepand;
- de afvoeren in het Amsterdam-Rijnkanaal op een aantal nog nader aan te geven locaties.

Met de voorgestelde wijziging wordt de betrouwbaarheid van het model verhoogd bij lage afvoeren, met name in het geval van passage van de vervuiling via Waal en het Amsterdam-Rijnkanaal.

Zusammenfassung

Der Stofftransport in den holländischen Rheinzeigen Niederrhein/Lek und Waal bei Niedrigwasser

Für die Trinkwasserversorgung von Amsterdam und Teilen von der Provinz Nord-Holland wird das Rohwasser aus dem Lekkanal bei Utrecht entnommen (Abb. 2-1). Dieser Kanal ist mit den sogenannten Beatrix-Schleusen direkt verbunden mit dem Rheinzeig Niederrhein/Lek. Im Falle bei der Grenzstation Lobith eine Schadstoffwelle beobachtet wird, dann ist eine sofortige Information über die zu erwartende Ankunftszeit dieser Welle bei der Zufahrt zu diesen Schleusen für den Betrieb dieser Entnahmestelle Nieuwegein unentbehrlich. Für die Vorhersage der Eintreffzeit der Schadstoffwelle wird das Rhein-Alarmmodell benutzt.

Jedoch bei Niedrigwasser, wenn die Stauwehre bei Driel, Amerongen und Hagestein im Niederrhein/Lek (Abb. 2-1) niedergelassen sind, wird mit den gemessenen Abflüssen bei Driel und Hagestein der Abflussverlauf in diesem Rheinzeig unvollständig erfasst und damit eine zu ungenaue Vorhersage der Ankunftszeit mit dem Modell ermittelt. So erfassen die Abflussmessungen bei den Wehren nicht den Abfluss durch die Schifffahrtsschleusen, die bei gestauter Situation in Betrieb sind und dessen Abfluss bei Niedrigwasser nicht vernachlässigbar ist.

Ein anderes Problem in Sache Stofftransport bei Niedrigwasser bildet die Verbindung zwischen Waal und Niederrhein/Lek, der sogenannte Betuwe-Abschnitt des Amsterdam-Rhein-Kanals (Abb. 2-1). Normalerweise ist der Abfluss in diesem Kanalabschnitt mit höchstens einigen m^3/s zu vernachlässigen gegenüber den Abflüssen im Niederrhein/Lek und in der Waal. Aber bei Niedrigwasser wird der Abfluss infolge des Schleusenbetriebs in diesem Kanalabschnitt bei einem Gefälle von 0,5 bis 1 m bedeutsam. Überdies hat sich ergeben, dass bei einem Wasserstand von circa NAP + 3m auf der Waal bei Tiel, die Wasserstände bei Hagestein und Tiel identisch sind. Dies bedeutet, dass bei Niedrigwasser der Betuwe-Abschnitt des Amsterdam-Rheinkanals eine offene Verbindung bildet zwischen den Rheinzeigen Waal und Lek (Abb. 2-14).

Anders gesagt: bei Niedrigwasser gibt es zwei Transportwege von Lobith nach Hagestein/Lekkanal:

- Lobith-Arnheim-Stauwehre Driel-Amerongen-Hagestein (Niederrhein-Lek) und
- von Lobith über Nimwegen, Tiel (Waal) und Betuwe-Abschnitt des Amsterdam-Rheinkanals nach Hagestein (Abb. 3-7).

Es sei zu beachten, dass der zweite Transportweg über der Waal und dem Betuwe-Abschnitt des Amsterdam-Rheinkanals nicht vom Rhein-Alarmmodell abgedeckt wird.

Eine genaue Analyse der Wasserbilanz bei Niedrigwasser für die Niederrhein-Lek-Strecke hat zu Vorschläge zur Verbesserung der Vorhersage des Stofftransportes durch das Rheinalarmmodell geführt. Diese Vorschläge umfassen den Einbau von:

- Default-Werten, womit automatisch die gemessenen, bzw. in das Modell einzugebenden Abflüsse bei Driel, Amerongen und Hagestein korrigiert werden müssen damit das Modell den Stofftransport erheblich genauer berechnen kann.
- Einem kurzen Kanalabschnitt, der den Amsterdam-Rhein-Kanal darstellt, ohne dass man in diesen Abschnitt etwas einspeisen kann, aber wodurch die Wasserbilanz und damit die Massebilanz bei dem Anschluss dieses Kanals richtig vom Modell wiedergegeben wird.

Wenn das Rheinalarmmodell auch den Transportweg über den Betuwe-Abschnitt wiedergeben sollte, so wird das Modell die Eingabe von Abflusswerten in diesem Abschnitt benötigen. Dies würde den Bau einer Abflussmessstation in dieser Strecke verlangen, was eine nicht reale Voraussetzung wäre.

Deshalb wird vorgeschlagen ein Protokoll zu verfassen, worin festgelegt wird, dass bei der Beobachtung von Schadstoffwellen bei Lobith, die Verbindungsschleusen im Amsterdam-Rheinkanal rechtzeitig geschlossen werden, damit kein Schadstoff in den Kanal (einschließlich dem Betuwe-Abschnitt) gelangen kann. Dabei könnte man auch überlegen unter welchen Bedingungen dann die Stauwehre im Niederrhein-Lek hochgezogen werden, damit der Transport beschleunigt und so der Stoff schneller abgeführt wird. Die heutige Version des Rheinalarmmodells bietet die Möglichkeit den Stofftransport bei Niedrigwasser und gezogenen Wehren zu berechnen.

Inleiding

Het Waterwinstation ir. Cornelis Biemond van de voormalige Watertransportmaatschappij Rijn-Kennemerland (WRK), thans onderdeel van het Waterleidingbedrijf Amsterdam (WLB) in Nieuwegein neemt bij het Lekkanaal water in ten behoeve van de drinkwatervoorziening van Noord-Holland. Indien er bij Lobith een verontreiniging getraceerd wordt dan is het van groot belang te weten wat de aankomsttijd is bij Hagestein en het Lekkanaal. Voor de voorspelling van deze aankomsttijd wordt gebruik gemaakt van het Rijn-Alarmmodel. Echter bij lage Rijnafvoeren, waarbij de stuwen Driel, Amerongen en Hagestein zijn gestreken (gestuwde situatie), bestaat er twijfel omtrent de betrouwbaarheid van de door het model voorspelde aankomsttijden van een verontreiniging. Deze twijfel wordt gebaseerd op het feit dat de hydrologische situatie bij laag water nog onvoldoende bekend is en dus het Rijn-Alarmmodel bij gestuwde situatie niet gevoed kan worden door volledig correcte hydrologische gegevens. Met het oog op de klimaatontwikkelingen en het vermoeden dat daardoor de perioden van laagwater met een gestuwde situatie op de Nederrijn-Lek langduriger zullen worden, is het belang van een goede voorspelling van het transport van verontreinigingen op dit traject met behulp van het Rijn-Alarmmodel toegenomen.

Figuur 1-1: De Nederrijn – Lek



Derhalve heeft de RIWA, de Vereniging van Rivierwaterbedrijven, -gelet op haar doelstelling 'het controleren van de kwaliteit van het oppervlaktewater zodat de drinkwatervoorziening gewaarborgd blijft'- het project 'Analyse werking Rijn-Alarmmodel bij laagwater situaties' geëntameerd.

Op basis van een analyse van de waterbalans tussen de IJsselkop en Hagestein bij lage Rijnafvoeren zijn aanvullende hydrologische gegevens bepaald waarmee het Rijn-Alarmmodel gevoed moet worden bij gestuwde situatie.

Daarnaast is het stoftransport tussen Lobith en Hagestein geanalyseerd door middel van kruiscorrelaties van gemeten verlopen van de chloride concentratie bij Lobith en Hagestein ter validatie van het Rijn-Alarmmodel rekening houdend met het resultaat van de analyse van de waterbalans.

Waterbalans

2

2.1 Aanpak onderzoek

Voor het opstellen van een nauwkeurige waterbalans van de Nederrijn – Lek tussen IJsselkop en Hagestein bij gestuwde situatie worden de volgende drie trajecten onderscheiden:

1. **stuwwand Driel (km 878.5 – 891.2):** traject IJsselkop – Driel;
2. **stuwwand Amerongen (km 891.2 – 922):** traject Driel – Amerongen;
3. **stuwwand Hagestein (km 922 – 946.6):** traject Amerongen – Hagestein.

Figuur 2-1: Balans trajecten Nederrijn – Lek



Voor een waterbalans geldt:

$$\text{Volume in} = \text{volume uit} + \text{toe-/afname berging} \quad (1)$$

Aangezien voor de waterbalans voor bovengenoemde trajecten wordt uitgegaan van een gestuwde situatie en dus bij benadering constante waterstanden, is er sprake van een stationaire situatie. Dit houdt in dat de berging nul is en daarmee de balans eigenlijk een balans van af- en toevoeren c.q. debieten is. De waterbalans ziet er dan als volgt uit:

$$Q_{\text{in}} = Q_{\text{uit}} + \Delta Q \quad (2)$$

ΔQ is de restterm en wordt bepaald door:

- neerslag;
- verdamping;
- toe- of afstroom van grondwater, dat niet in de balans is meegenomen;
- meetonauwkeurigheden;
- (toch) kleine waterstandsverschillen (=berging).

Vergelijking (2) uitgewerkt voor bovengenoemde deeltrajecten resulteert in:

Stuwpannd Driel

$$Q_{\text{Pannerdensch Kanaal}} = Q_{\text{Driel}} + Q_{\text{IJssel}} + \Delta Q_1 \quad (3)$$

Stuwpannd Amerongen

$$Q_{\text{Driel}} = Q_{\text{Amerongen}} + \Delta Q_2 \quad (4)$$

Stuwpannd Hagestein

$$Q_{\text{Amerongen}} + Q_{\text{Pr. Bernhardsluis}} = Q_{\text{Hagestein}} + Q_{\text{Pr. Irenesluis}} + \Delta Q_3 \quad (5)$$

waarin $Q_{\text{Pannerdensch Kanaal}}$ het debiet in het Pannerdensch Kanaal

Alvorens de balans per deeltraject in detail op te stellen wordt eerst een inventarisatie gemaakt van de balansposten per deeltraject.

2.2 Inventarisatie balansposten

2.2.1 Algemeen

Voor de inventarisatie van de balansposten van Lobith tot aan Hagestein zijn gegevens verzameld uit de periode van 1990 tot en met 2003. Uit deze jaren zijn de volgende perioden van lage afvoeren te onderscheiden:

- juni tot en met november 1990;
- juni tot en met december 1991;
- februari tot en met juni 1993;
- juli tot en met september 1994;
- augustus tot en met november 1996;
- augustus tot en met december 1997;
- juni tot en met september 1998;
- juli tot en met december 2003.

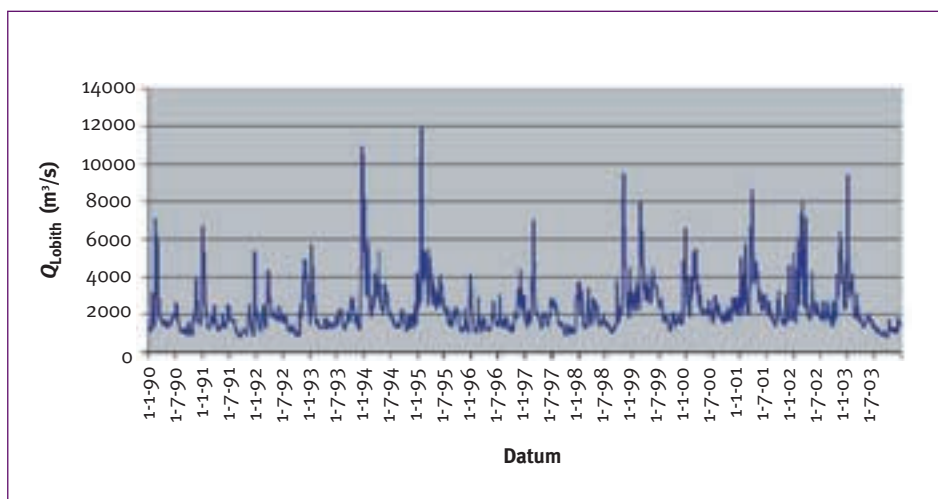
Figuur 2-2: Sluizen en stuwen op het traject Lobith – Pannerdensch kanaal – Nederrijn – Lek



2.2.2 Afvoermeterstation Lobith

Het debiet van de Rijn wordt bij binnenkomst in Nederland gemeten door de Rijkswaterstaat in Lobith (km 862,2). Dit debiet is een onderdeel van de waterbalans voor de Nederrijn – Lek, van belang voor de bepaling van de looptijden. Er wordt gesproken van lage afvoeren als het debiet bij Lobith minder is dan 2000 m³/s. Vanaf dat moment wordt er gestuurd op de Nederrijn – Lek om voor de scheepvaart voldoende waterdiepte te garanderen. Van zeer lage afvoeren is sprake als het debiet bij Lobith minder is dan circa 1500 m³/s. De periode dat deze afvoerwaarde bij Lobith wordt onderschreden is gemiddeld ruim 25% (over de jaren 1990-2003), terwijl dit 76% was in het extreem droge jaar van 1976. In natte jaren kan het aantal dagen van het jaar dat de afvoer minder dan 1500 m³/s is 20% of minder bedragen. Zo trad in 1999 een dergelijke lage afvoer gedurende 10% van het jaar op.

Figuur 2-3: Debiet Lobith 1990-2003



2.2.3 Pannerdensch Kanaal en IJssel

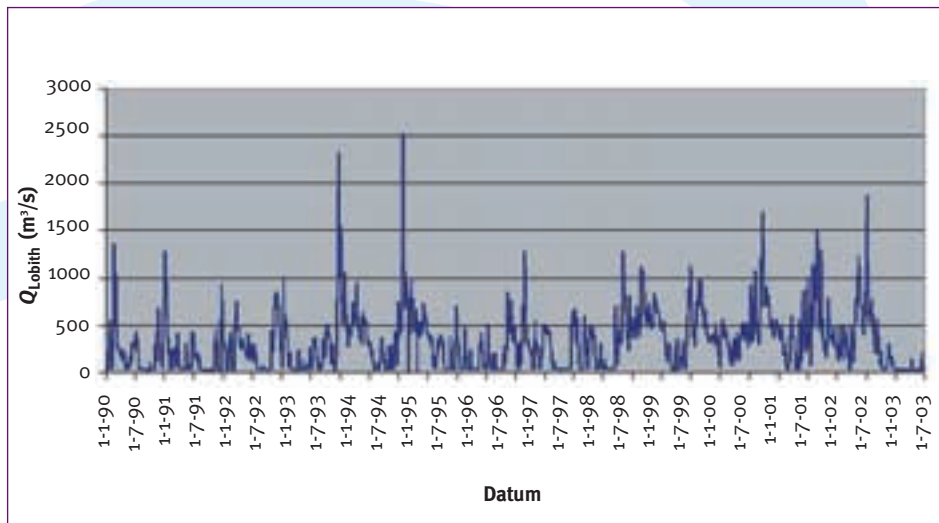
Het debiet door de Waal wordt gemeten bij Tiel (km 913), dit is circa 46 km benedenstrooms van de Pannerdensch Kop (splittingspunt Waal – Pannerdensch Kanaal, km 867,2). Het debiet door de IJssel wordt gemeten bij Olst (km 957,1, dit is nabij Deventer, km 945) circa 80 km benedenstrooms van de splitsing bij de IJsselkop (km 878,5). Daarnaast worden waterstanden gemeten bij de Pannerdensch Kop en bij de IJsselkop, waaruit afvoeren worden afgeleid. De hiervoor gehanteerde Q-H-relaties (afvoer – waterstands relaties) zijn echter zodanig vereffend in relatie met de gemeten afvoer te Lobith, dat bij voorbaat de sluitfout ΔQ bij deze splitsingspunten bij benadering nul is.

2.2.4 Stuwpannd Driel

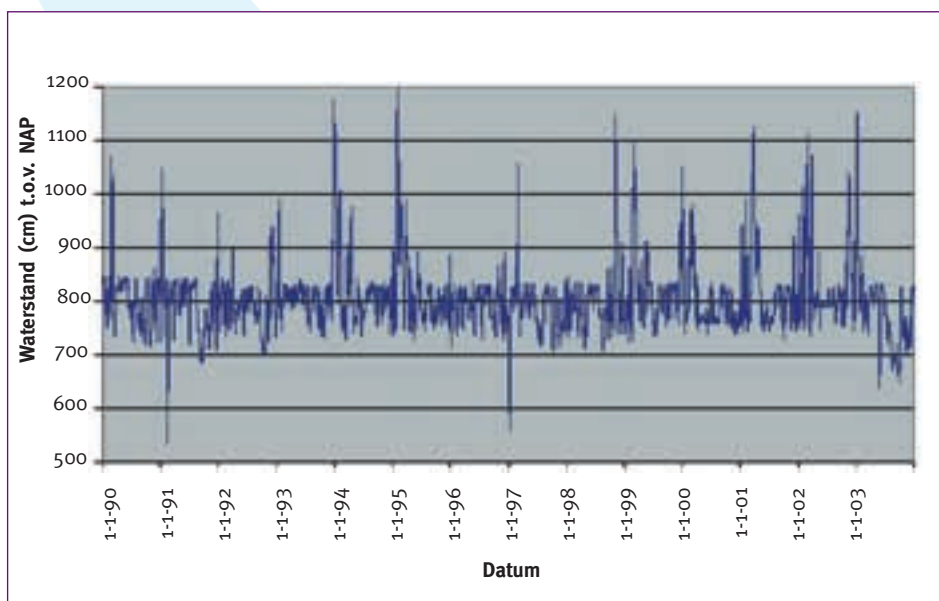
De stuw bij Driel (km 891.2) zorgt ervoor dat de IJssel en de Waal bevaarbaar blijven bij lage afvoeren van de Rijn. Deze stuw is als het ware de kraan waarmee de afvoer van de Nederrijn en daarmee die van de IJssel wordt geregeld. De verder benedenstrooms gelegen stuwen bij Amerongen (km 922) en Hagestein (km 946.6) zijn bedoeld voor het handhaven van voldoende grote vaarwaterdiepte.

Bij een zeer lage afvoer van de Rijn wordt met de stuw te Driel de afvoer van de Nederrijn beperkt tot ongeveer 25 tot 30 m³/s. Deze afvoer wordt nodig geacht om vervuiling van deze Rijntak te voorkomen. In principe dient er volgens het zogenaamde programma S285 te worden gestuurd, dat wil zeggen dat bij lage afvoeren een IJsselafvoer van 285 m³/s wordt gegarandeerd in verband met de scheepvaart. In werkelijkheid zal uiteraard niet altijd geheel volgens dit programma worden gestuurd. Zo blijkt dat de stuwmeesters doorgaans stuwen op waterstand: een vrijwel constante waterstand wordt gehandhaafd in de stuwpannen tussen Hagestein en Driel.

Figuur 2-4: Debiet Driel 1990 – 2003



Figuur 2-5: Waterstanden Driel-boven 1990 – 2003



Stuw Driel

Het debiet dat door de stuw Driel gaat, wordt continue gemeten door Rijkswaterstaat met behulp van een zogenaamde akoestische debietmeter aan de bovenstroomse zijde van de stuw tussen de linker oever en de strekdam, die de rivier scheidt van het kanaal dat naar het naastgelegen sluizencomplex voert. In Fig. 2-4 wordt het verloop van deze afvoer voor de jaren 1990-2003 gepresenteerd. Tevens wordt hier ook aan de bovenstroomse zijde van de stuw de waterstand gemeten (Fig. 2-5). Hieruit blijkt dat het peil voor gestuwde situatie bij circa NAP + 800 cm ligt.

Schutzluis Driel

Het debiet bij Driel dat het sluisencomplex passeert, kan worden afgeleid met behulp van de volgende formule:

$$Q_{\text{schut}} = \frac{\Delta h \cdot L \cdot B \cdot (0,5 \cdot s)}{24 \cdot 60 \cdot 60} \quad (6)$$

met

Q_{schut} = schutdebiet (m³/s)

Δh = waterstandsverschil tussen bovenstroomse en benedenstroomse zijde van sluis (m)

$L \cdot B$ = oppervlakte van de sluis (m²)

s = aantal schuttingen per dag

Bij een gemiddeld aantal schuttingen per dag van 30, een schutkolklengte en -breedte van 260 m, resp. 18 m en een verval over de schutkolk van 3 m, is het schutdebiet ongeveer 2,5 m³/s.

Het bedrijf Parengo (Norske Skog) ter hoogte van km 896 onttrekt zowel grondwater (diep) als oppervlakte water en loost dit weer na zuivering. Bij gebrek aan precieze cijfers wordt vooralsnog aangenomen, dat de netto hoeveelheid geloosd water verwaarloosbaar klein is, ook bij lage afvoersituaties.

2.2.5 Stuwpannd Amerongen

Infiltratie en drainage

Op het stuwpannd Amerongen vindt zowel infiltratie (wegzijing) naar lager gelegen gebieden als drainage (kwel) vanuit de Utrechtse Heuvelrug plaats. Wesseling (1985) berekent voor het stuwpannd Amerongen een netto verlies (wegzijing) van 0,4 m³/s bij een relatief grote doorlatendheid (hoge kD -waarde). (zie Tabel 2-1). Bij een lage kD -waarde (slechte doorlatendheid) wordt het netto verlies slechts 0,2 m³/s. Voor de waterbalans wordt vooralsnog een netto verlies van 0,5 m³/s aangehouden.

Tabel 2-1 Netto verlies water Nederrijn/Lek volgens Wesseling (1985)

	Debiten (m ³ /s)		
	Stuwpannd Amerongen	Stuwpannd Hagestein	Totaal
Infiltratie	- 1,4	- 1,9	- 3,3
Drainage (kwel)	+ 1,0	-	+ 1,0
Afstroom naar ARK*	-	- 0,5	- 0,5
Netto verlies	- 0,4	- 2,4	- 2,8

*ARK = Amsterdam Rijn-kanaal

Mr. G.J.H. Kuijkgemaal

Het Mr. G.J.H. Kuijkgemaal bij km 901 aan de linker oever zorgt voor de waterinlaat ten behoeve van de wateraanvoer van het Lingekanaal. In perioden van droogte wordt water ingelaten uit de Nederrijn – Lek voor de waterhuishouding op en rond het Lingekanaal. De inlaat ofwel onttrekking aan het stuwpannd Amerongen bedraagt maximaal 4,7 m³/s.

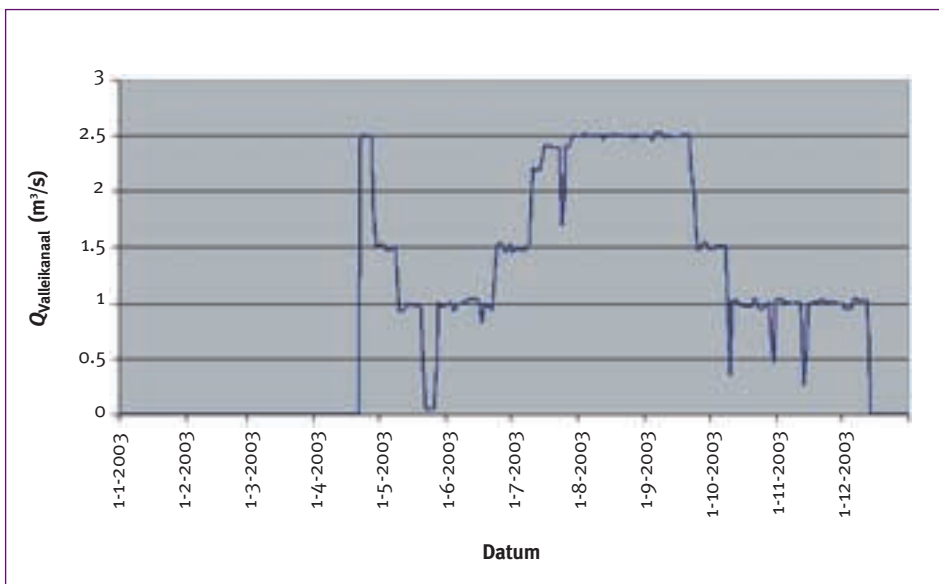
Figuur 2-6: Mr. G.J.H. Kuijkgemaal



Valleikanaal

In perioden met weinig neerslag wordt er voor het Valleikanaal water ingelaten uit de Nederrijn via de zogenaamde Grebbesluis (km 908, rechter oever). Sinds 2003 wordt de grootte van de ingelaten hoeveelheid water nauwkeurig en continu gemeten (Fig. 2-7). Deze inname zorgt voor het doorspoelen van het effluent van enkele rioolwaterzuiveringsinstallaties (RWZI's) en verversing van de stadsgrachten van Amersfoort.

Figuur 2-7: Debiet Grebbesluis 2003

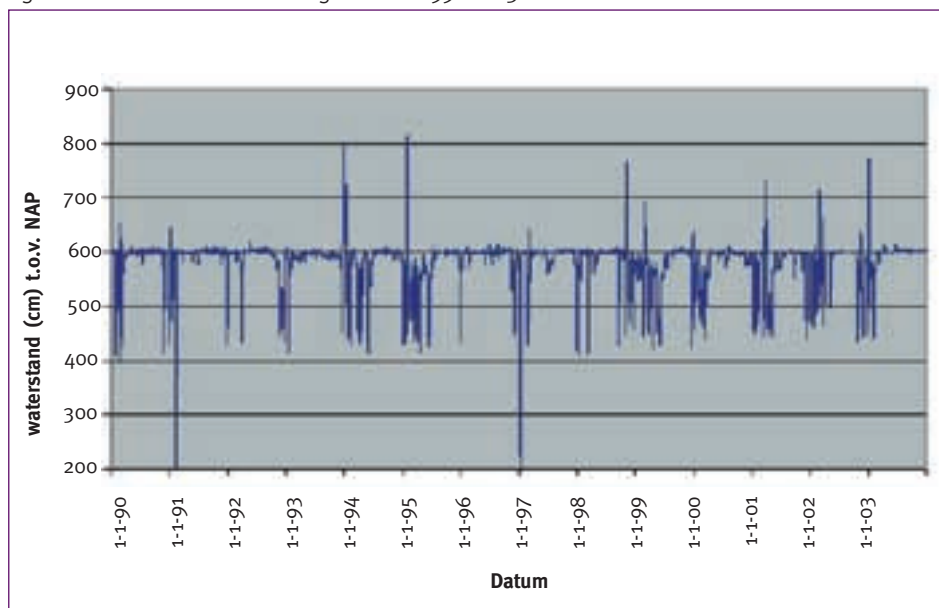


Figuur 2-7 toont duidelijk dat in de droge periode van 2003 een maximum inlaatdebiet van 2,5 m³/s is gehandhaafd. Derhalve wordt voor de waterbalans uitgegaan van 2,5 m³/s.

Stuw Amerongen

Bij Amerongen (km 922) wordt het debiet door de stuw niet gemeten. Voor de analyse van de waterbalans wordt het debiet door de stuw afgeleid uit de bovenstroomse situatie met behulp van de waterbalans van het traject Driel – Amerongen (stuwpannd Amerongen) en uit de benedenstroomse situatie met behulp van de waterbalans van het traject Amerongen – Hagestein (stuwpannd Hagestein). Wel wordt aan de bovenstroomse zijde van de stuw de waterstand continu gemeten (Fig. 2-8). Bij gestuwde situatie wordt gestreefd naar een peil van NAP + 600 cm.

Figuur 2-8: Waterstanden Amerongen-boven 1990-2003



Schutsluis Amerongen

Voor de bepaling van het schutdebiet bij de stuw Amerongen wordt Vgl.(6) gebruikt. Bij een gemiddeld aantal schuttingen per dag van 30, een schutkolk lengte en –breedte van van 260 m, resp. 18 m en een verval over de schutkolk van 3 m, is het schutdebiet ongeveer 2,5 m³/s. Volgens Lorenz (1997) is dit debiet 2,4 m³/s.

2.2.6 Stuwpannd Hagestein

Infiltratie en drainage

Voor het stuwpannd Hagestein heeft Wesseling (1985) een netto verlies (inzijging) berekend van 2,4 m³/s bij een relatief grote doorlatendheid (zie Tabel 2-1). Daarmee komt voor het traject Driel – Hagestein het totale netto verlies op 2,8 m³/s. Bij een slechte doorlatendheid (lage *kD*-waarde) wordt het totale netto verlies 1,7 m³/s over dit traject. Door Wesseling (1985) wordt tevens gerefereerd aan een eerdere studie met betrekking tot infiltratie en drainage tussen Driel en Hagestein, uitgevoerd door de voormalige Studiedienst Bovenrivieren van de Rijkswaterstaat (Bruin, 1972). Op grond van deze studie komt Wesseling (1985) tot een totaal netto verlies van 9 m³/s. Voor de waterbalans wordt voor het stuwpannd Hagestein vooralsnog een netto verlies van 2,5 m³/s aangehouden.

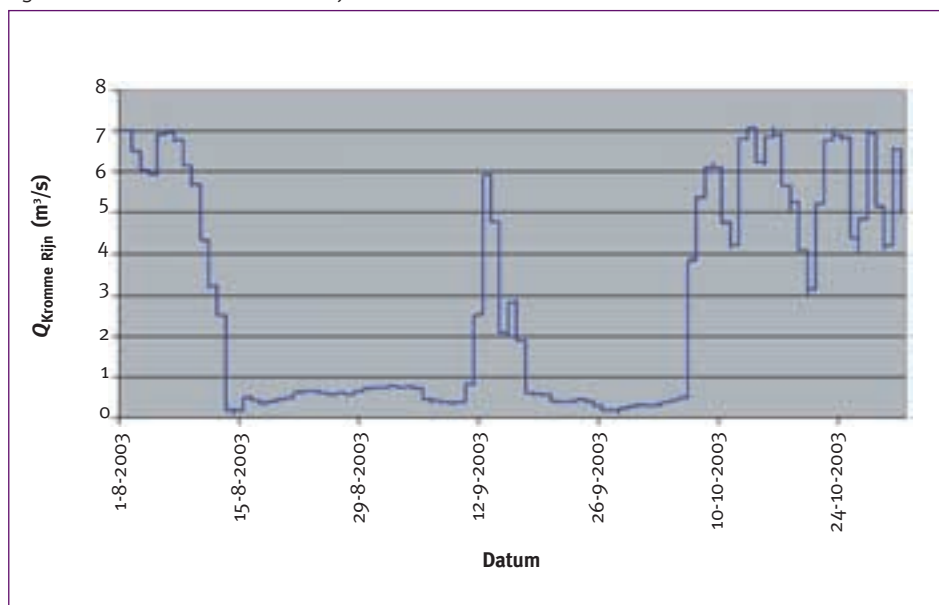
Figuur 2-9: Inlaat Kromme Rijn



Figuur 2-10: Akoestische debietmeter Kromme Rijn



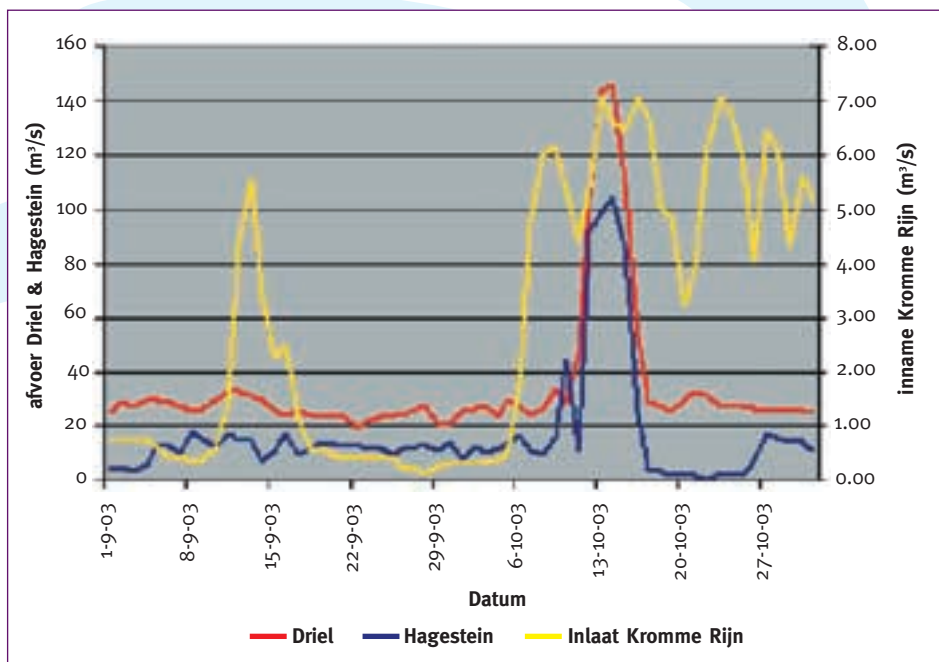
Figuur 2-11: Inlaatdebiet Kromme Rijn



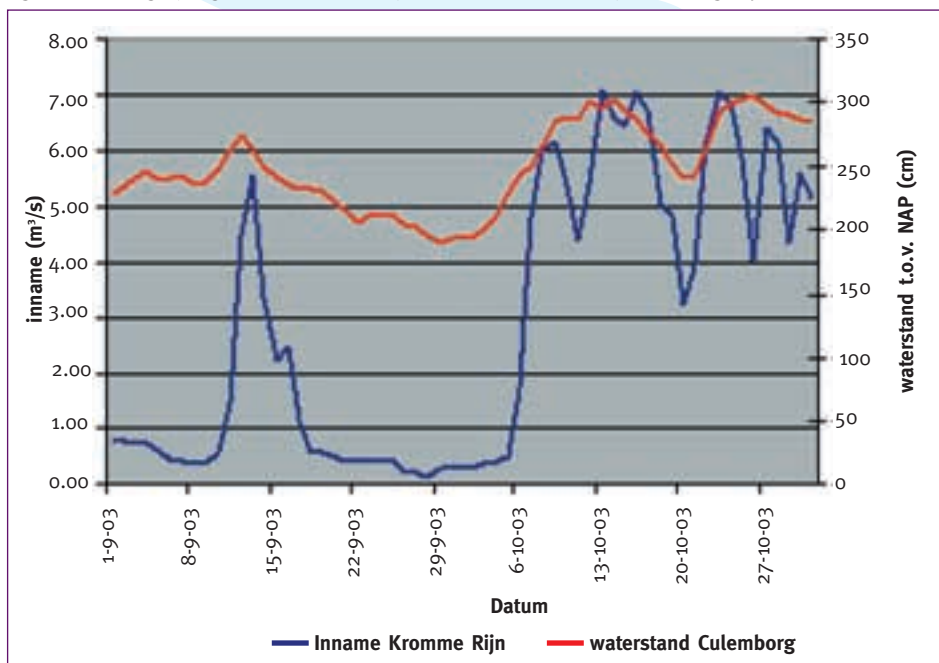
Kromme Rijn

Door het Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden wordt vanuit de Lek aan de rechter oever bij km 926,3 water ingelaten naar de Kromme Rijn nabij Wijk bij Duurstede. De hoeveelheid ingelaten water wordt gemeten met een akoestische debietmeter (Fig. 2-10). De gegevens van augustus – oktober 2003 zijn beschikbaar (Fig. 2-11). Het maximale ingelaten debiet is $7 \text{ m}^3\text{/s}$, maar in perioden van lage afvoeren op de Nederrijn – Lek varieert dit tussen $0,3$ en $7 \text{ m}^3\text{/s}$. In de zeer droge periode van augustus en september 2003 was de inname vrijwel constant en gelijk aan $0,3 \text{ m}^3\text{/s}$, terwijl tijdens de laagwater periode in de tweede helft van oktober de gemiddeld inname $5,5 \text{ m}^3\text{/s}$ bedraagt (Fig. 2-12). Dit verschil in inname tijdens laagwater hangt samen met de waterstand op de Nederrijn – Lek. Bij lage waterstand kan naar verhouding veel minder tot geen water worden ingenomen. Ter illustratie zijn in Fig. 2-13 de verlopen van het innamedebiet van de Kromme Rijn en de waterstand op het stuwpand Hagestein weergegeven. Voor de waterbalans wordt uitgegaan van $0,3$ tot $5,5 \text{ m}^3\text{/s}$ met als voorlopig gemiddelde waarde van $3 \text{ m}^3\text{/s}$.

Figuur 2-12: Vergelijking afvoerregiem Nederrijn/Lek met inname Kromme Rijn september-oktober 2003



Figuur 2-13: Vergelijking inname Kromme Rijn – waterstanden Lek bij Culemborg september-oktober 2003



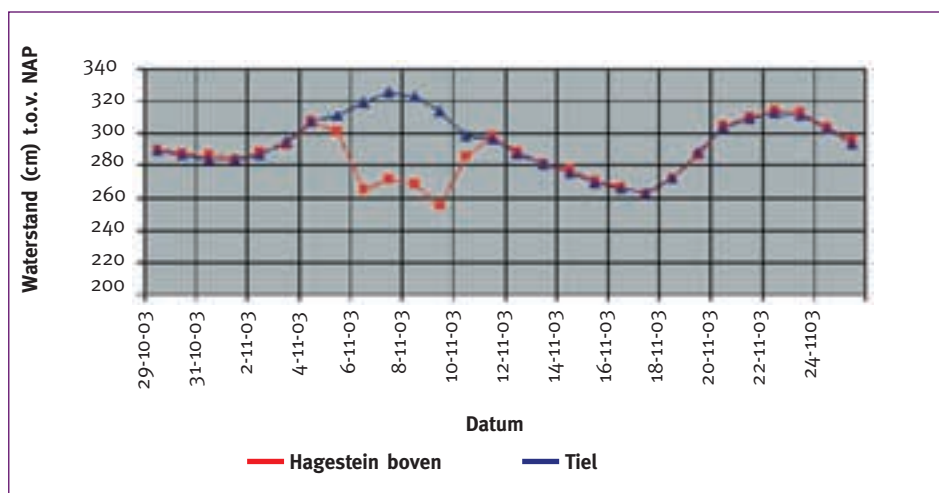
Betuwepand Amsterdam-Rijnkanaal

De Prinses Marijkesluis in het Amsterdam-Rijnkanaal (Fig. 2-2, blz. 8) is een keersluis, die alleen dicht gaat bij zeer hoge waterstanden in de Lek (NAP + 5,50 m). De bijdrage van het Betuwepand van het Amsterdam-Rijnkanaal in de waterbalans van het stuwpand Hagestein wordt dus bepaald door de situatie bij de Prins Bernhardsluis en de toe- en afstroming van de Linge in het Betuwepand.

Bij lage afvoeren en een waterstand bij Tiel overeenkomend met het stuwpeil Hagestein (NAP + 3 m) staat de Prins Bernhardsluis open, waardoor het stuwpand Hagestein dan in open verbinding staat met de Waal. De waterstand kan dan zelfs lager zijn dan NAP + 3m. In deze situatie zijn de waterstanden gemeten bij Hagestein aan de bovenstroomse zijde en bij Tiel in de Waal gelijk (Fig. 2-14). Bij hogere

waterstanden op de Waal wordt er dus wel geschat bij de Prins Bernhardsluis (Fig. 2-14: van 5 t/m 11 november 2003). De grootte van het schutdebiet varieert dan met de waterstand op de Waal. Bij een verval van 1 m over de Prins Bernhardsluis bedraagt het schutdebiet 4,6 m³/s. Hierbij is uitgegaan van een schutkolkoppervlak van 6000 m² en 2000 schuttingen per maand. Voor de waterbalans wordt voorts uitgemaakt van een verval van 0,25 m met een bijbehorend schutdebiet van orde 1 m³/s.

Figuur 2-14: Vergelijking waterstanden Lek (Hagestein boven) en Waal bij Tiel tijdens laagwater 2003



Volgens Reitsma en Wuijts (1992) kan de infiltratie vanuit het Betuwepand naar het omliggende land aanzienlijk zijn en zelfs oplopen tot 10 m³/s. Eén en ander betekent, dat met betrekking tot de in- en uitstroom vanuit het Betuwepand naar het stuwpand Hagestein bij een lage afvoersituatie geen betrouwbare waarden beschikbaar zijn.

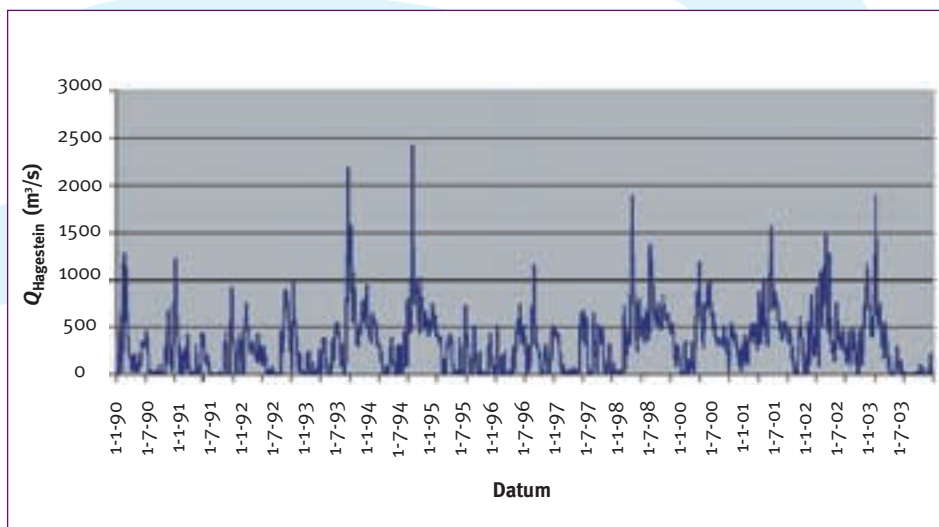
Prinses Irenesluis

In de huidige situatie bedraagt het daggemiddelde inlaatdebiet bij de Prinses Irenesluizen (km 929) 10 m³/s, ter voorkoming van indringing van zout water vanuit het Noordzeekanaal en ten behoeve van koelwatertoevoer naar energiecentrales in Utrecht en Diemen, alsmede de gevestigde industrieën. Uit cijfers over schutintensiteiten van de jaren 1990 tot en met 2003 blijkt dat er per dag zo'n 60 schuttingen worden verricht. Het normaalpeil van het Amsterdam-Rijnkanaal ten noorden van de sluis is NAP - 0,40 m. Het peil van het stuwpand Hagestein is gemiddeld NAP + 3,0 m. Dit levert een extra schutdebiet op van 2,2 m³/s. Dit schutdebiet wordt meegerekend in het totaal aan water wat nodig is voor het Amsterdam-Rijnkanaal. Derhalve kan voor de waterbalans van een debiet van 10 m³/s worden uitgegaan.

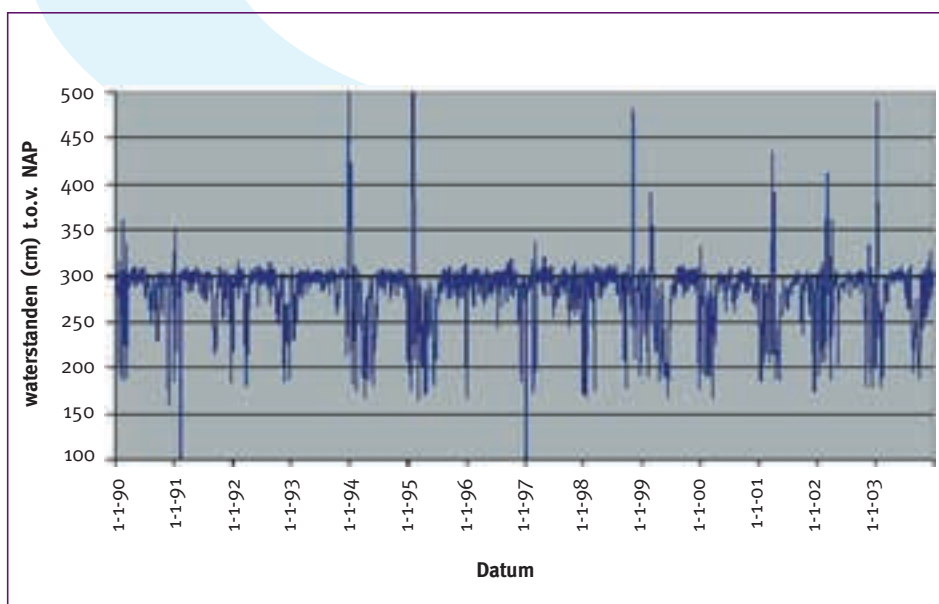
Stuw Hagestein

Het debiet dat door de stuw Hagestein (km 946,6) gaat wordt op dezelfde manier als bij Driel met behulp een akoestische debietmeter (ADM) gemeten. Dat betekent dat ook het schutdebiet van de naast de stuw gelegen scheepvaartsluis niet is inbegrepen in de ADM-meting. Bij volledig gestuwde situatie op de Nederrijn/Lek en bij zeer lage afvoeren is er geen debiet door de stuw en is de waterkrachtcentrale, die ingebouwd is in de stuw, ook niet in werking. Het enige debiet is dan nog het schutdebiet van de scheepvaartsluis ernaast. In Fig. 2-15 wordt het afvoerloop, gemeten met de ADM bij Hagestein weergegeven. In Fig. 2-16 wordt het waterstandsverloop aan de bovenstroomse zijde van de stuw gepresenteerd. Hier blijkt het stuwpeil bij benadering gelijk aan NAP + 300 cm.

Figuur 2-15: Debiet Hagestein 1990 - 2003



Figuur 2-16: Waterstanden Hagestein-boven 1990-2003



Schutsluis Hagestein

Bij Hagestein vinden gemiddeld 30 schuttingen in 24 uur plaats. De sluis is gesloten van zaterdagavond 20:00 uur tot zondagochtend 8:00 uur en van zondagavond 20:00 uur tot maandagochtend 6:00 uur. Volgens Vgl.(6) bedraagt het schutdebiet, bij 30 schuttingen per dag en sluisafmetingen van 220 m lang en 18 m breed, en een verval dat tussen de 2,5 en 3,5 m ligt, circa 2 m³/s.

2.2.7 Lekkanaal

Het Lekkanaal verbindt de Lek benedenstrooms van de stuw te Hagestein met het Amsterdam-Rijnkanaal. Het Lekkanaal is met de Lek verbonden via de Prinses Beatrixsluizen. Net zoals bij de Prinses Irenesluizen wordt ter voorkoming van indringing van zout water vanuit het Noordzeekanaal en ten behoeve van koelwaterlevering aan energiecentrales in Utrecht en Diemen en de gevestigde

industrieën, op dagbasis gemiddeld 5 m³/s ingelaten. Uit gegevens over het aantal schuttingen blijkt dat per dag gemiddeld 85 schuttingen plaatsvinden, wat bij de gegeven schutkolk afmetingen neerkomt op een extra schutdebiet van 2,7 m³/s.

Ten behoeve van de drinkwatervoorziening van Noord-Holland onttrekt het Waterwinstation ir. Cornelis Biemond te Nieuwegein circa 4 m³/s aan het Lekkanaal.

2.3 Analyse waterbalans IJsselkop – Hagestein

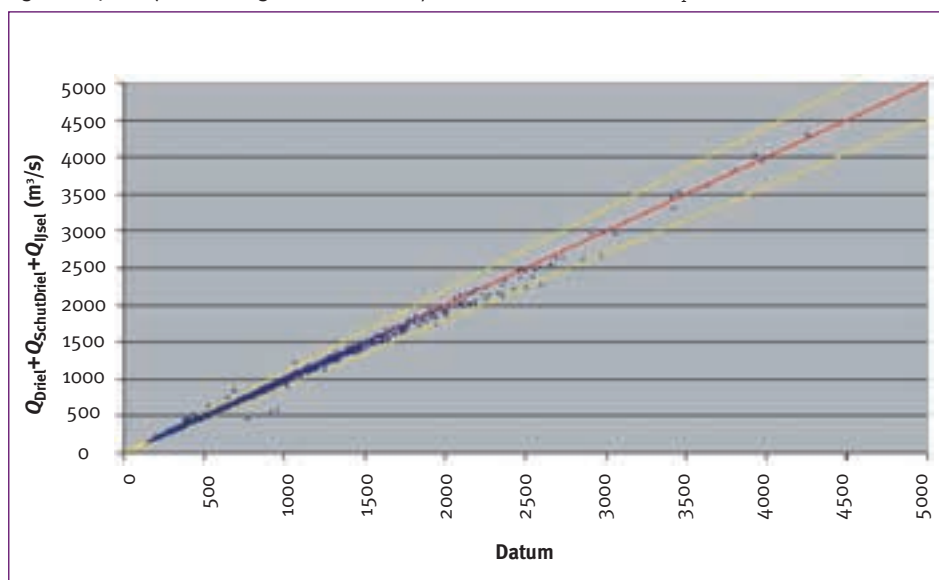
2.3.1 Stuwpannd Driel

De waterbalans van het traject IJsselkop – stuw Driel wordt nu gegeven door (zie ook Vgl. 3)

$$Q_{\text{Pannerdensch Kanaal}} = Q_{\text{Driel}} + Q_{\text{Schut Driel}} + Q_{\text{IJssel}} + \Delta Q_1 \quad (7)$$

waarin $Q_{\text{Schut Driel}}$ het schutdebiet is bij de stuw Driel, welke wordt gesteld op 2,5 m³/s. Verder is verondersteld, dat de lozing van het bedrijf Parengo verwaarloosbaar is. Omdat de gemeten afvoeren van het Pannerdensch Kanaal en de IJssel gebaseerd zijn op vereffende Q-H-relaties, mag verwacht worden dat de sluitfout ΔQ_1 bij benadering nul is. Dit wordt bevestigd door de grafische weergave van de balans volgens Vgl.(7) in Fig. 2-17.

Figuur 2-17: Grafische weergave balans stuwpannd Driel met restterm ΔQ_1



Hiermee is aangetoond, dat het debiet in het stuwpannd Driel gegeven wordt door:

$$Q_{\text{Driel}} + Q_{\text{Schut Driel}} = Q_{\text{Driel}} + 2,5 \text{ m}^3/\text{s} \quad (8)$$

2.3.2 Stuwpannden Amerongen en Hagestein

Voor het stuwpannd Amerongen geldt op basis van de inventarisatie nu de volgende balans:

$$Q_{\text{Driel}} + Q_{\text{Schut Driel}} = Q_{\text{Amerongen}} + Q_{\text{Schut Amerongen}} + Q_{\text{grondwater}_1} + Q_{\text{Kuijkgemaal}} + Q_{\text{Valleikanaal}} + \Delta Q_2 \quad (9)$$

waarbij op basis van de inventarisatie geldt:

$Q_{\text{Schut Driel}}$	= 2,5 m ³ /s
$Q_{\text{Schut Amerongen}}$	= 2,5 m ³ /s
$Q_{\text{grondwater1}}$	= 0,5 m ³ /s (netto inzijging Driel - Amerongen, Tabel 2-1)
$Q_{\text{Kuijkgemaal}}$	= 4,7 m ³ /s
$Q_{\text{Valleikanaal}}$	= 2,5 m ³ /s

Met deze numerieke waarden wordt Vgl.(9):

$$Q_{\text{Amerongen}} = Q_{\text{Driel}} - 7,7 \cdot \Delta Q_2 \quad (10)$$

De balans voor het stuwpand Hagestein is op basis van de inventarisatie:

$$Q_{\text{Amerongen}} + Q_{\text{Schut Amerongen}} + Q_{\text{Pr. Bernhardsluis}} = Q_{\text{Hagestein}} + Q_{\text{Schut Hagestein}} + Q_{\text{Pr. Irenesluis}} + Q_{\text{grondwater2}} + Q_{\text{Kromme Rijn}} + \Delta Q_3 \quad (11)$$

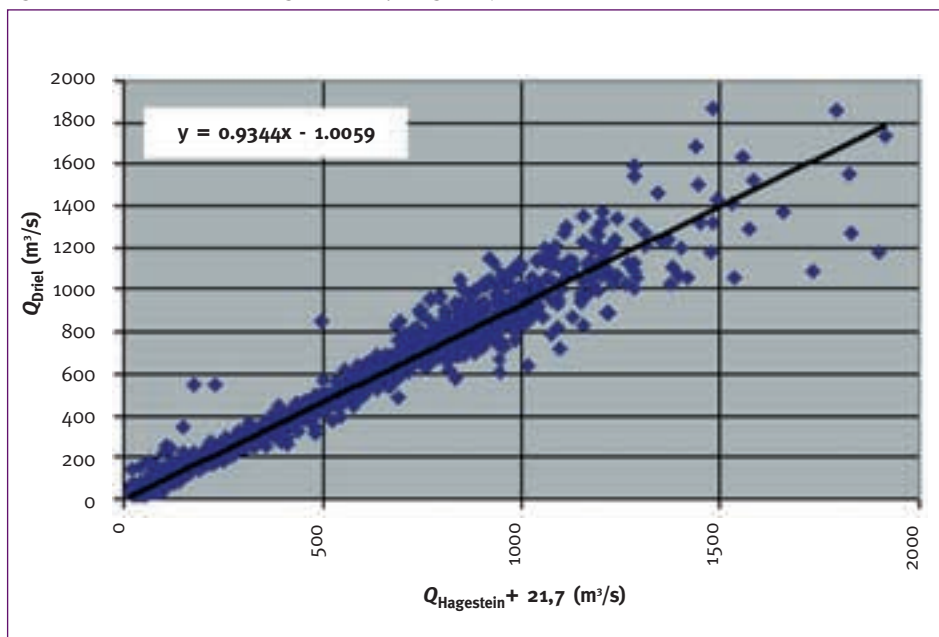
waarbij de volgende waarden zijn geïnventariseerd:

$Q_{\text{Schut Amerongen}}$	= 2,5 m ³ /s
$Q_{\text{Pr. Bernhardsluis}}$	= 1 m ³ /s
$Q_{\text{Schut Hagestein}}$	= 2 m ³ /s
$Q_{\text{Pr. Irenesluis}}$	= 10 m ³ /s
$Q_{\text{grondwater2}}$	= 2,5 m ³ /s (netto inzijging Amerongen – Hagestein, Tabel 2-1)
$Q_{\text{Kromme Rijn}}$	= 3 m ³ /s

Uit Vgl. (11) kan het debiet door de stuw van Amerongen ook worden uitgedrukt in de gemeten afvoer bij de stuw van Hagestein:

$$Q_{\text{Amerongen}} = Q_{\text{Hagestein}} + 14,0 + \Delta Q_3 \quad (12)$$

Figuur 2-18: Balans Driel – Hagestein: bepaling sluitfout

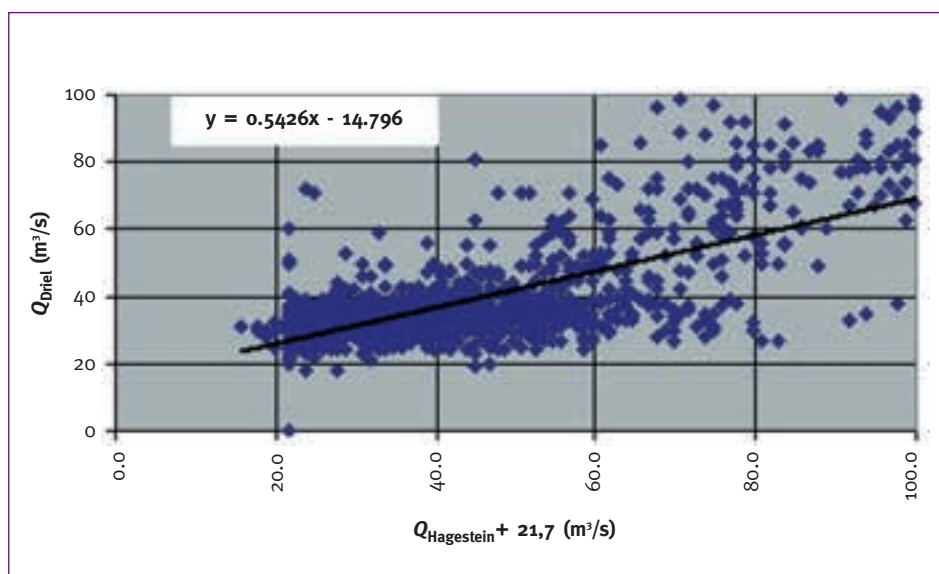


Aangezien het debiet bij de stuw Amerongen ($Q_{\text{Amerongen}}$) niet wordt gemeten, wordt voor de analyse van de waterbalans tussen Driel en Hagestein deze $Q_{\text{Amerongen}}$ uit de Vgln (10) en (12) geëlimineerd. Dit resulteert in de volgende vergelijking:

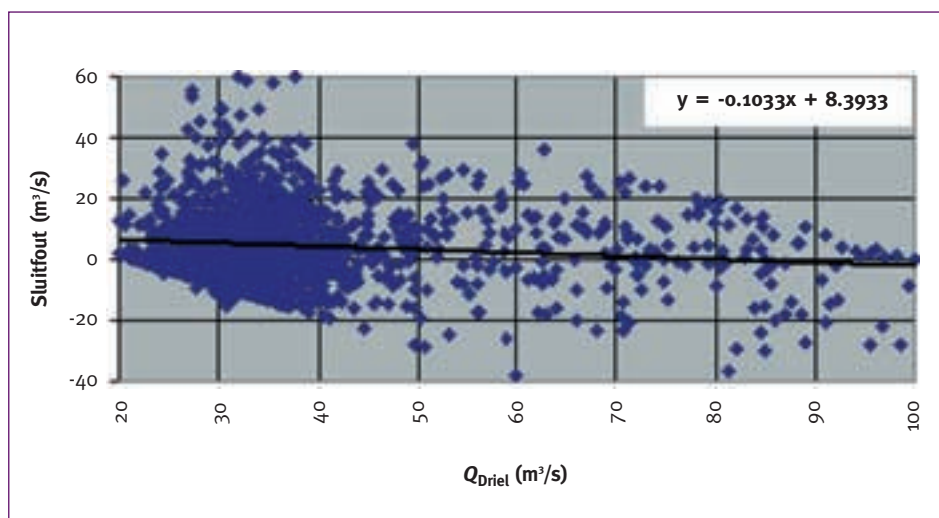
$$Q_{\text{Driel}} + Q_{\text{Hagestein}} + 21,7 + (\Delta Q_2 + \Delta Q_3) = (Q_{\text{Hagestein}} + 21,7) + \Delta Q_{2,3} \quad (13)$$

waarin $\Delta Q_{2,3}$ de sluitfout is over het traject Driel – Hagestein.

Figuur 2-19: Balans Driel – Hagestein: bepaling sluitfout bij afvoeren tot 100 m³/s



Figuur 2-20: Balans Driel – Hagestein: bepaling sluitfout bij afvoeren tot 100 m³/s



In Fig. 2-18 worden nu de debieten bij Driel en Hagestein rekening houdend met de onttrekkingen van totaal 21,7 m³/s volgens Vgl.(13) met elkaar vergeleken. Hieruit blijkt een trendmatige sluitfout van circa 1 m³/s op te treden, wat op zich verwaarloosbaar klein is. Echter bij een afvoerbereik tot 100 m³/s blijkt de sluitfout, bepaald uit de trendlijn significant groter: een systematische sluitfout van 15 m³/s (Fig. 2-19), wat van dezelfde orde van grootte is als de som van alle onttrekkingen op dit riviertraject. Tot slot is derhalve in Fig. 2-20 de sluitfout expliciet weergegeven voor afvoeren te Driel tot 100 m³/s. Uit deze resultaten blijkt dat de sluitfout voor afvoeren te Driel tot 100 m³/s gemiddeld 4,5 m³/s, maar kan voor het afvoerbereik tot 60 m³/s te Driel variëren tussen -20 en +40 m³/s. Deze variatie is van dezelfde orde van grootte als de geïnventariseerde onttrekkingen tezamen. Een nadere beschouwing van de nauwkeurigheid van de geïnventariseerde onttrekkingen heeft dus geen betekenis.

Het is zeer goed mogelijk, dat de grote variatie van de sluitfout met name wordt veroorzaakt door de niet bemeten toe- of afstroming via het Betuwepand, wanneer de Lek via dit pand bij laagwater in open verbinding met de Waal staat als het stuwpeil Hagestein min of meer overkomt met peil in de Waal (Fig. 2-14). In een dergelijke situatie zou de inname van 10 m³/s bij de Prinses Irenesluis bijvoorbeeld wel eens gevoed kunnen worden vanuit de Waal, waardoor de afvoer van de Lek tussen de Prinses Irenesluis en de stuw Hagestein bijna uitsluitend bepaald wordt door het schutdebiet bij Hagestein. Eén en ander toont aan dat een betrouwbare waterbalans voor met name het stuwepand Hagestein met een onbemeten Betuwepand niet is te geven.

Omdat bovendien bij Amerongen de afvoer door de stuw niet gemeten wordt, is dus op basis van een waterbalans geen verificatie van de geïnventariseerde onttrekkingen op volledigheid mogelijk. Voor een verbeterde invoer van de afvoersituatie in het Rijnalarmmodel bij gestuwde situatie op de Nederrijn-Lek zal derhalve worden uitgegaan van de inventarisatie, zoals beschreven in paragraaf 2.2 met de gegeven indicaties van de respectieve onttrekkingen.

2.3.3 Hydrologische invoer Rijn Alarmmodel

Voor de gestuwde situatie Nederrijn – Lek kan het afvoerloop worden gegeven volgens Tabel 2-2.

Tabel 2-2: Afvoerloop/toe- en afstromingen tussen Driel en Hagestein

Locatie	km	omschrijving	Debiet (m ³ /s)
Stuw Driel	891,2	debiet door stuw	ADM-meting
	891,2	schutdebiet	2,5
	896,8 ³⁾	netto infiltratie Driel-Amerongen ³⁾	0,5
Mr. G.J.H. Kuijkgemaal	901	onttrekking tbv Linge	2,5
Grebbesluis	908	onttrekking Valleikanaal	4,7
Stuw Amerongen	922	schutdebiet	2,5
	925,5 ³⁾	netto infiltratie Amerongen-ARK ³⁾	1
Kromme Rijn	926,3	onttrekking	3
Amsterdam-Rijnkanaal (ARK)	929	Pr. Irenesluis	10
	929	Betuwepand/Pr. Bernhardsluis	1 (?)
	938 ³⁾	netto infiltratie ARK-Hagestein ³⁾	1,5
Stuw Hagestein	946,6	Debiet door stuw	ADM-meting
	946,6	schutdebiet	2,0

³⁾ Netto infiltratie wordt hier gelokaliseerd halverwege het beschouwde traject

In het Rijn-Alarmmodel wordt de hydrologische situatie langs de Nederrijn – Lek gevoed met afvoeren

en waterstanden bij Driel, Amerongen en Hagestein, als geldend voor de gelijknamige stuwpanden. Daar de afvoer bij Amerongen niet wordt gemeten, wordt hiervoor doorgaans de afvoer van Driel ingevoerd. Op grond van dit invoerschema voor het Rijn-Alarmmodel worden de volgende aanpassingen voor het Rijn-Alarmmodel voorgesteld voor gestuwde situatie, een optie, die tot het invoermenu behoort.

Stuwpannd Driel (traject IJsselkop – stuw Driel)

Voor de in te voeren afvoer voor Driel geldt:

$$Q_{\text{Driel_invoer}} = Q_{\text{Driel_ADM}} + 2,5 \text{ m}^3/\text{s} \quad (14)$$

waarin $Q_{\text{Driel_ADM}}$ de met de ADM gemeten afvoer is.

Stuwpannd Amerongen (traject Driel – Amerongen)

Op het stuwpand Amerongen wordt in principe uitgegaan van de afvoer bij de stuw Driel. Op het stuwpand Amerongen bevinden zich nu twee onttrekkingspunten (Kuijkgemaal en Grebbesluis) naast diffuse onttrekking (infiltratie), die in Tabel 2-2 geconcentreerd gedacht is bij km 896,8. Als deze onttrekkingen expliciet in het Rijn-Alarmmodel zouden moeten worden ingebouwd, dan moet dit traject binnen het model opgesplitst worden een viertal deeltrajecten, waarvan de begrenzingen samenvallen met de locaties van deze onttrekkingspunten. Gelet op de geringe grootte van de infiltratie van slechts 0,5 m³/s wordt als eerste vereenvoudiging deze ‘onttrekking’ naar ratio bij de andere twee opgesteld:

- Kuijkgemaal: 2,5 + 0,2 = 2,7 m³/s
- Grebbesluis: 4,7 + 0,3 = 5,0 m³/s

Indien men echter voor het stuwpand Amerongen de gemeten afvoer bij Driel wil corrigeren met slechts één (default-)waarde voor het gehele stuwpand, dan is deze afhankelijk van de gemeten afvoer bij Driel volgens de volgende vergelijking voor de daarbij behorende totale looptijd van dit traject $T_{\text{Driel-Amerongen}}$

$$T_{\text{Driel-Amerongen}} = A_{\text{Driel-Amerongen}} \frac{\sum x_i}{Q_{\text{gem.}}} = A_{\text{Driel-Amerongen}} \left[\frac{x_1}{Q_{\text{Diel}}} + \frac{x_2}{Q_{\text{Diel}} - 2,7} + \frac{x_3}{Q_{\text{Diel}} - 7,7} \right] \quad (15)$$

waarin $Q_{\text{gem.}}$ gemiddelde debiet over het gehele stuwpand
 $A_{\text{Driel-Amerongen}}$ gem. dwarsdoorsnede Driel - Amerongen
 x lengte van de respectieve deeltrajecten

Met $x_1 = 9,8\text{km}$, $x_2 = 7\text{km}$ en $x_3 = 7\text{km}$, kan de defaultwaarde $\Delta Q_{\text{Driel-Amerongen}}$ voor het hele traject gegeven worden:

$$\frac{30,8}{Q_{\text{Diel}} - \Delta Q_{\text{Driel-Amerongen}}} = \frac{9,8}{Q_{\text{Diel}}} + \frac{7}{Q_{\text{Diel}} - 2,7} + \frac{14}{Q_{\text{Diel}} - 7,7}$$

waaruit volgt

$$\Delta Q_{\text{Drielt/Amerongen}} = Q_{\text{Drielt}} - \frac{30,8 Q_{\text{Drielt}} (Q_{\text{Drielt}} - 2,7)(Q_{\text{Drielt}} - 7,7)}{9,8(Q_{\text{Drielt}} - 2,7)(Q_{\text{Drielt}} - 7,7) + 7 Q_{\text{Drielt}} (Q_{\text{Drielt}} - 7,7) + 14 Q_{\text{Drielt}} (Q_{\text{Drielt}} - 2,7)} \quad (16)$$

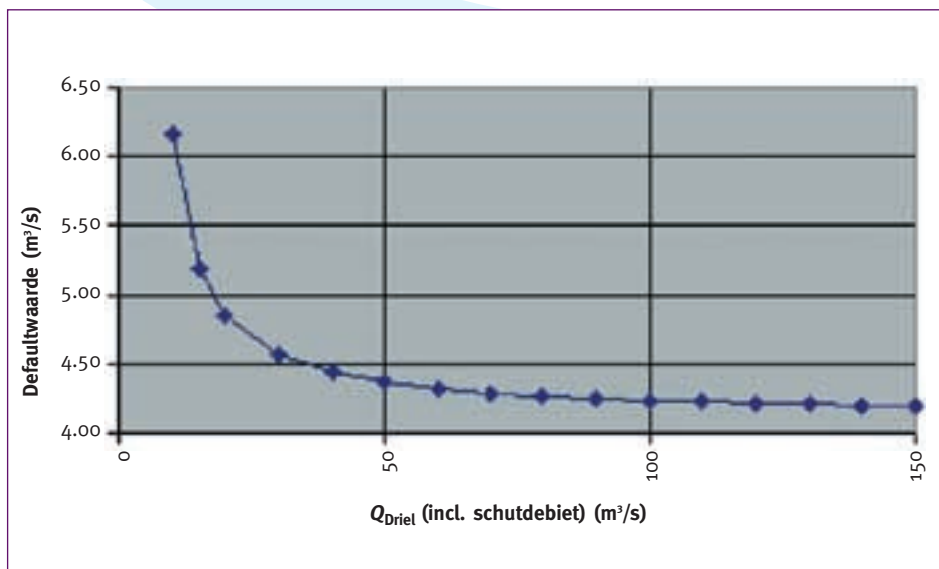
en het werkelijk gemiddelde debiet op het stuwpand Amerongen:

$$\Delta Q_{\text{gem}} = \frac{30,8 Q_{\text{Drielt}} (Q_{\text{Drielt}} - 2,7)(Q_{\text{Drielt}} - 7,7)}{9,8(Q_{\text{Drielt}} - 2,7)(Q_{\text{Drielt}} - 7,7) + 7 Q_{\text{Drielt}} (Q_{\text{Drielt}} - 7,7) + 14 Q_{\text{Drielt}} (Q_{\text{Drielt}} - 2,7)} \quad (17)$$

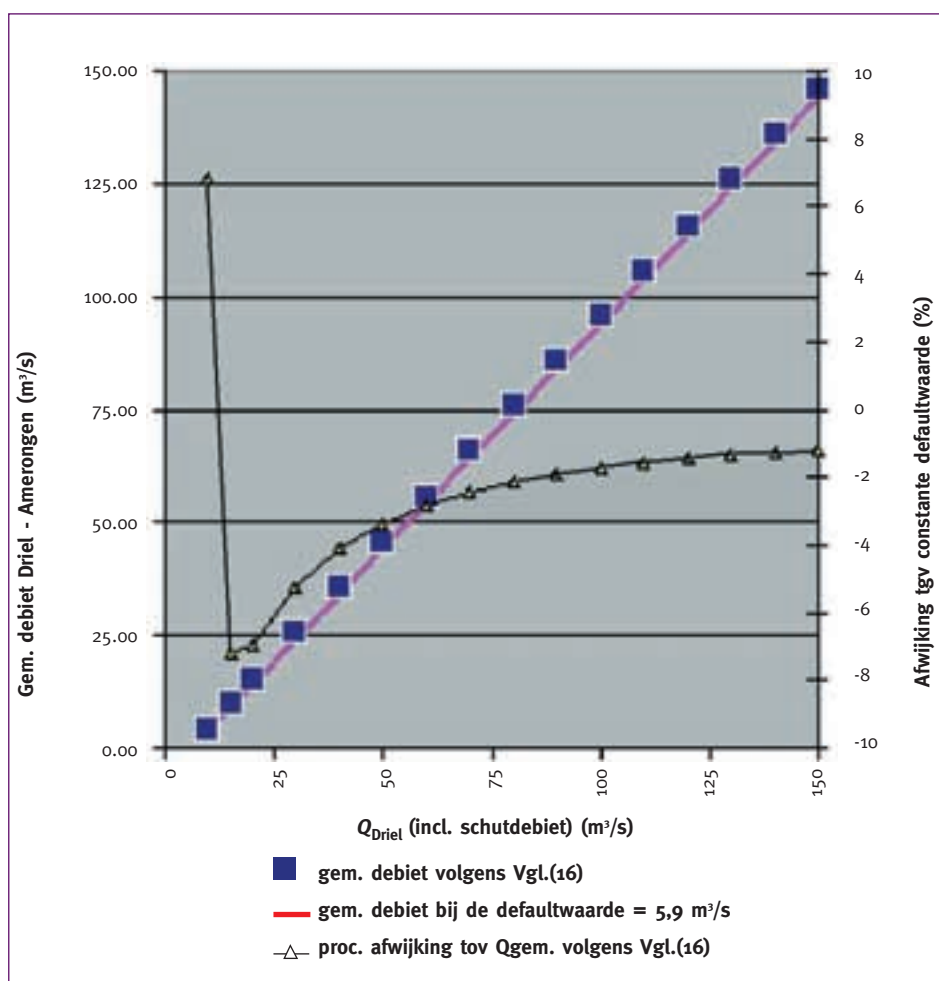
In Fig. 2-21 wordt Vgl.(16) grafisch weergegeven voor Q_{Drielt} tot 150 m³/s. Gelet op de onzekerheden in de geïnventariseerde onttrekkingen, lijkt het alleszins voldoende nauwkeurig om uit te gaan van één defaultwaarde voor het stuwpand Amerongen, waarop de gemeten afvoer bij Driel wordt gecorrigeerd. Indien bij de toepassing van één vaste defaultwaarde de afwijking in het afvoerbereik van 10 tot 150 m³/s niet meer dan 10% mag zijn, wordt een defaultwaarde van 5,9 m³/s aanbevolen (zie Fig. 2-22). Er geldt dan voor de invoer bij Amerongen:

$$Q_{\text{Amerongen_invoer}} = Q_{\text{Drielt_ADM}} + 2,5 - 5,9 = Q_{\text{Drielt_ADM}} - 3,4 \text{ m}^3/\text{s} \quad (18)$$

Figuur 2-21: Defaultwaarde onttrekkingen Driel – Amerongen als functie van de afvoer te Driel



Figuur 2-22: Invloed keuze van een constante defaultwaarde = 5,9 m³/s op werkelijke afvoer in procenten (= afwijking in looptijd) als functie van de afvoer te Driel



Stuwpannd Hagestein (traject Amerongen – Hagestein)

Gelet op de relatief grote onttrekking door het Amsterdam-Rijnkanaal van 10 m³/s via de Prinses Irenesluis wordt, mede vanwege de massabalans voorgesteld, het stuwpannd Hagestein in twee deeltrajecten op te splitsen: Stuw Amerongen (km 922) – Amsterdam-Rijnkanaal (ARK) (km 929) en ARK (km 929) – Stuw Hagestein (km 946,6). Gelet op de grote onzekerheidsfactor in de waterbalans door de open verbinding met de Waal via het Betuwepand van het ARK enerzijds en de onzekerheid rond de infiltratie vanuit de Lek, maar ook via dit pand van het ARK (zie ook Wesseling, 1985 en Mazijk et al., 1992) wordt voor de debieten op deze deeltrajecten de volgende relaties voorgesteld.

Voor het deeltraject Stuw Amerongen – ARK geldt hetzelfde debiet als voor het stuwpannd Amerongen:

$$Q_{Amerongen_invoer} = Q_{Driel_ADM} \cdot 3,4 \text{ m}^3/\text{s} \quad (19)$$

Met andere woorden, dit deeltraject refereert binnen het Rijn-Alarmmodel aan hetzelfde afvoermeetstation (te weten Amerongen) als het stuwpannd Amerongen zelf.

Het debiet in het deeltraject ARK – Hagestein wordt gekoppeld aan het debiet bij Hagestein bestaande uit het gemeten debiet (ADM) plus het schutdebiet:

$$Q_{\text{Hagestein_invoer}} = Q_{\text{Hagestein_ADM}} + 2\text{m}^3/\text{s} \quad (20)$$

Dit betekent dat in het model een fictieve tak voor het ARK moet worden ingebouwd, waarvan het debiet gelijk is aan:

$$\Delta Q_{\text{Amerongen_Hagestein}} = Q_{\text{Amerongen_invoer}} - Q_{\text{Hagestein_invoer}} = Q_{\text{Driel_ADM}} - Q_{\text{Hagestein_ADM}} - 5,4\text{m}^3/\text{s} \quad (21)$$

Op deze wijze wordt het verschil in afvoer tussen het bovenstroomse en benedenstroomse deeltraject correct in de massabalans vertaald.

Omdat het ARK en de inname van de Kromme Rijn zich relatief dicht bij elkaar bevinden (slechts 2,7 km van elkaar verwijderd), wordt in bovenstaande beschouwing de Kromme Rijn qua locatie als samenvallend met het ARK beschouwd. Ook de infiltratie wordt, gelet op de onzekerheden, niet expliciet in de in te voeren afvoergegevens meegenomen, maar gezien als onderdeel van $\Delta Q_{\text{Amerongen_Hagestein}}$ volgens Vgl.(21).

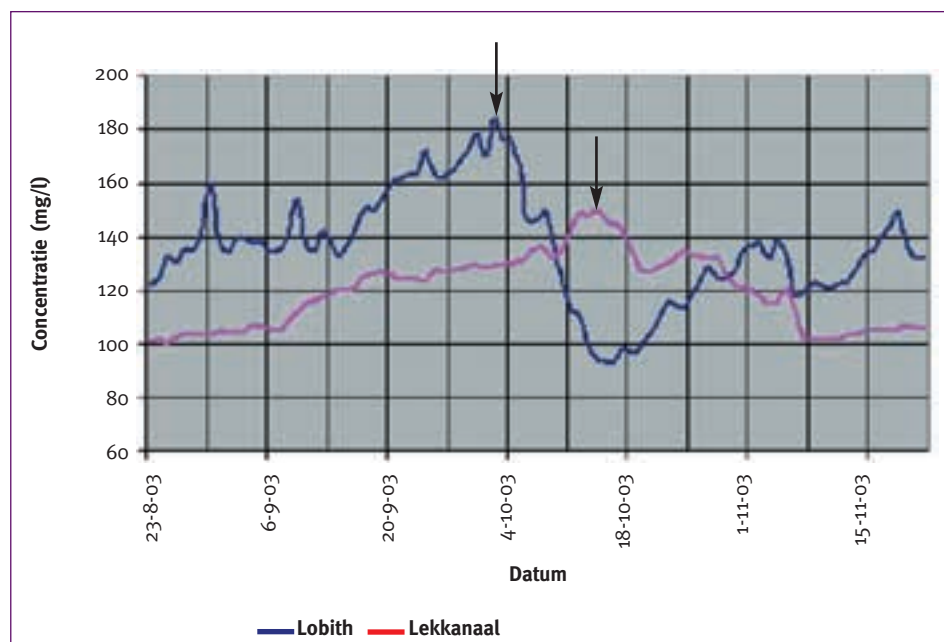
Stoftransport Lobith – Hagestein

3

3.1 Bepaling looptijd met behulp van kruiscorrelatie van chloride meetreeksen

Voor de bepaling van de looptijd van een verontreinigingsgolf op het traject Lobith – Hagestein kan in principe gebruik worden gemaakt van gemeten chlorideverlopen bij Lobith en Hagestein. Als gevolg van variaties in gemeten concentraties kan in principe via patroonherkenning een looptijd worden 'gemeten'. De looptijd wordt dan bijvoorbeeld afgeleid uit de tijdstippen dat overeenkomende concentratiepieken bij Lobith en Hagestein – Lekkanaal worden gemeten (Fig. 3-1).

Figuur 3-1: Chloride verloop 23-08 tot 21-11-2003



Om nu uit te zoeken of dit ook werkelijk zo is, wordt voor een periode waar deze piek inzit de mate van samenhang bepaald. De samenhang kan bepaald worden door middel van het berekenen van de pearson-correlatiecoëfficiënt. De Pearson-correlatiecoëfficiënt is een dimensieloze index tussen -1 en 1, die de mate van lineaire samenhang tussen twee gegevensverzamelingen aangeeft. Dus met andere woorden, wanneer de correlatiecoëfficiënt gelijk is aan 1, is de samenhang maximaal, welke aangeeft dat bij deze kruiscorrelatie de looptijd is bepaald. Is de correlatiecoëfficiënt gelijk aan 0 dan is de samenhang minimaal. Is de correlatiecoëfficiënt gelijk aan -1 dan is de samenhang ook maximaal, maar dan negatief gecorreleerd.

De correlatiecoëfficiënt r wordt verkregen met:

$$r = \frac{n(\sum XY) - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[n\sum X^2 - (\sum X)^2][n\sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \quad (22)$$

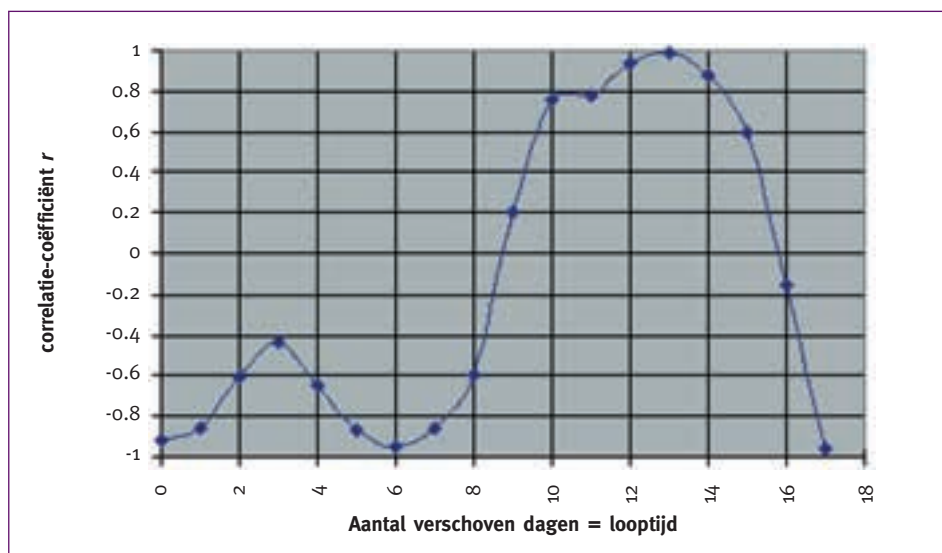
waarin X de waarden van de ene meetreeks beschrijft en Y de andere meetreeks, terwijl n het aantal beschouwde waarden is.

Uitgaande van een gegeven dataset, zoals gepresenteerd in Tabel 3-1, wordt de correlatiecoëfficiënt bepaald door een meetreeks van 7 dagen van het meetstation Lobith (bijv. van 10-02-03 t/m 10-08-03) te vergelijken met een aaneensluitende reeks van 7 dagen van het meetstation aan het Lekkanaal, te beginnen met dag 10-02-03 (zelfde periode) en vervolgens steeds de reeks één dag te verschuiven. Zo begint bij een verschuiving van 5 dagen de meetperiode van het Lekkanaal op 10-07-03. De gevonden correlatiecoëfficiënten als functie van het aantal verschoven dagen wordt gepresenteerd in Fig. 3-2. In dit geval is de correlatie maximaal ($r = 0,99$) bij een verschuiving van 13 dagen. Met andere woorden de met behulp van kruiscorrelatie gevonden looptijd is 13 dagen.

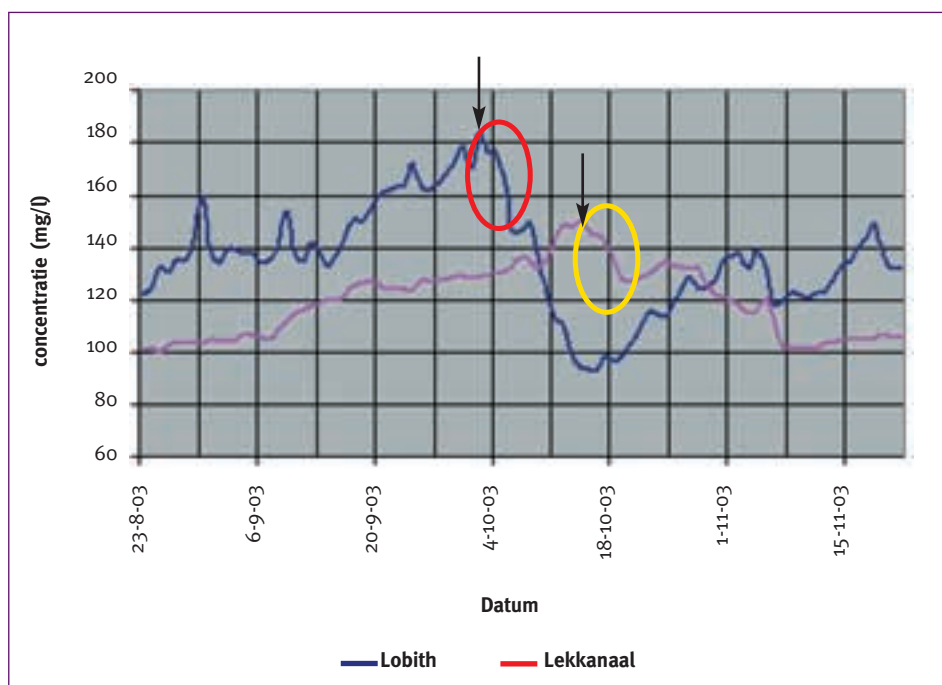
Tabel 3-1: Chloride meetreeksen Lobith – Lekkanaal 2003, gemarkeerde reeksen geven maximale kruiscorrelatie-coëfficiënt $r = 0,99$

Datum	Chloride concentratie (mg/liter)	
	Lobith (X)	Lekkanaal (Y)
02-10-2003	184	129
03-10-2003	176	130
04-10-2003	176	130
05-10-2003	164	132
06-10-2003	147	133
07-10-2003	146	136
08-10-2003	150	135
09-10-2003	138	132
10-10-2003	123	136
11-10-2003	114	143
12-10-2003	110	149
13-10-2003	100	148
14-10-2003	94	150
15-10-2003	93	147
16-10-2003	93	145
17-10-2003	99	143
18-10-2003	97	135
19-10-2003	99	128
20-10-2003	104	127
21-10-2003	108	128
22-10-2003	115	130

Figuur 3-2: Verloop kruiscorrelatie Lobith – Lekkanaal periode 02-10-2003 t/m 26-10-2003

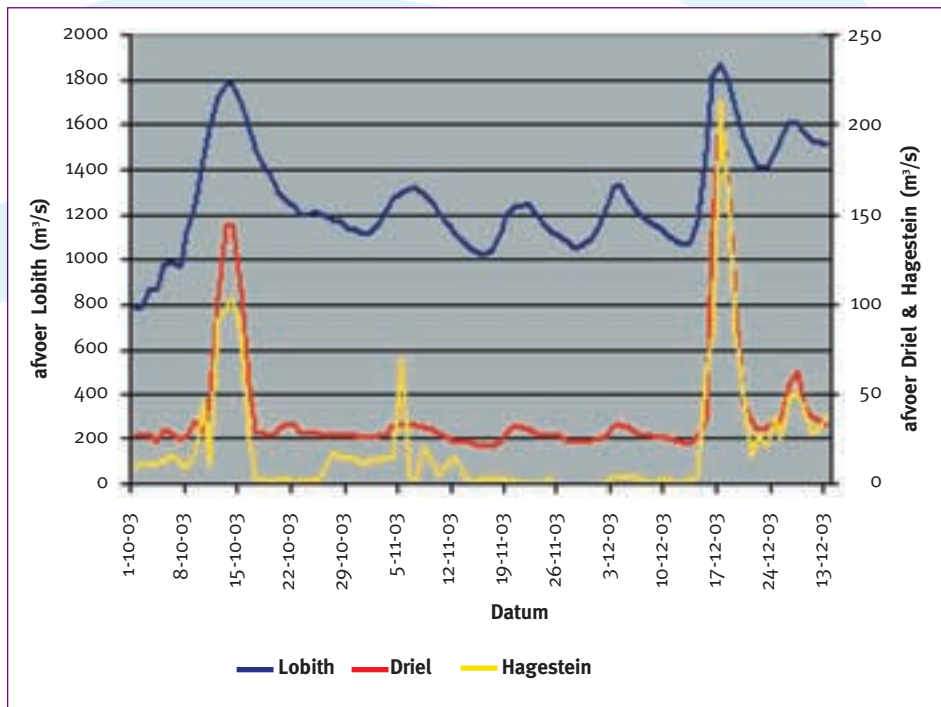


Figuur 3-3: Vergelijking patroonherkenning en resultaat kruiscorrelatie Lobith – Lekkanaal voor periode 2-10-2003 t/m 22-10-2003



De overeenkomstige perioden zijn in Fig. 3-3 nader aangegeven en blijken overeen te komen met de op basis van visuele patroonherkenning gevonden overeenkomstige tijdstippen voor de concentratiepieken.

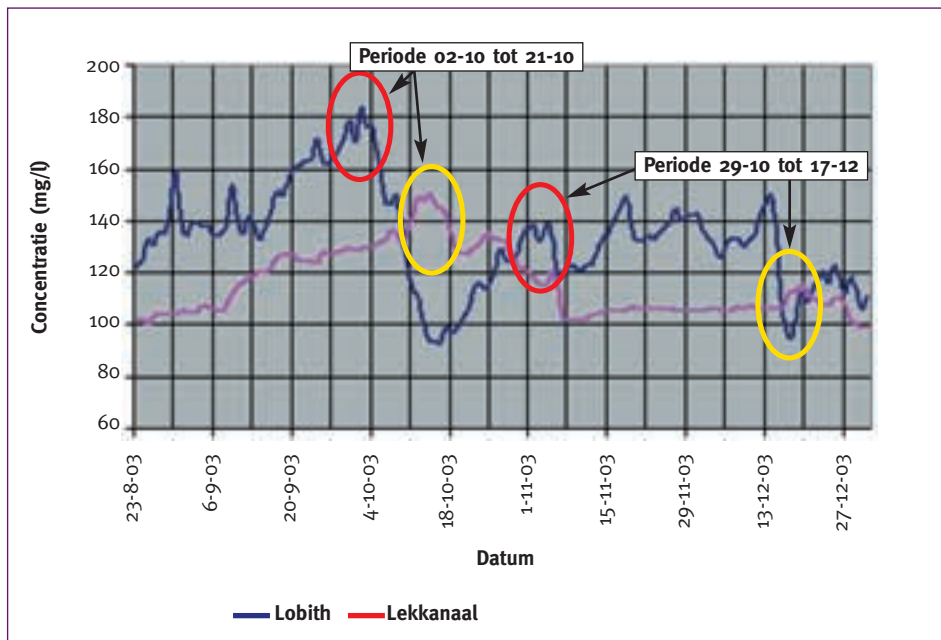
Figuur 3-4: Afvoerlopen oktober - december 2003 te Lobith, Driel en Hagestein



3.2 Evaluatie Rijn-Alarmmodel

Voor de maanden oktober t/m december 2003 zijn in Fig. 3-4 de afvoerlopen te Lobith, Driel en Hagestein gepresenteerd. Voor de bijbehorende chlorideverlopen wordt verwezen naar Fig. 3-5. Het resultaat van de kruiscorrelatie, toegepast voor de periode van 2 tot 21 oktober 2003, is gepresenteerd in Fig. 3-2 (zie ook Tabel 3-1) en voorspelt een looptijd van 13 dagen.

Figuur 3-5: Chlorideverlopen bij Lobith en in het Lekkanaal van 23 augustus tot 31 december 2003



Voor de vergelijking met het Rijn-Alarmmodel zijn 2-daags gemiddelde afvoeren en waterstanden, gerekend vanaf 2 oktober beschouwd, daar thans voor het afvoerloop slechts 10 perioden in het model kunnen worden ingevoerd (Tabel 3-2). Voor de afvoeren op het stuwpannen Driel en Amerongen zijn de Vgl'n (14) en (18) toegepast. Voor het stuwpan Hagestein is uitgegaan van het debiet bij Amerongen volgens Vgl.(18) als geldend voor het traject 'stuw Amerongen – Amsterdam-Rijnkanaal' met een lengte van 7 km, en het gemeten debiet bij Hagestein verhoogd met het schutdebiet van 2 m³/s volgens Vgl.(20) als geldend voor het traject Amsterdam-Rijnkanaal – stuw Hagestein' met een lengte van 17,6 km. Voor de invoer is het gewogen gemiddelde genomen volgens:

$$Q_{\text{Hagestein, invoer, gemogen}} = \frac{24,6}{\left(\frac{7}{Q_{\text{Amerongen, invoer}}}\right) + \left(\frac{17,6}{Q_{\text{Hagestein, invoer}}}\right)} \quad (23)$$

De invoerdata staan vermeld in Tabel 3-2.

Tabel 3-2: Hydrologische invoer Rijn-Alarmmodel oktober 2003

NR.	Datum	Gemiddeld debiet (m ³ /s)				Gem. waterstand (cm)		
		Lobith	Driel	Amer.	Hag.	Driel	Amer.	Hag.
1	02-10-03	825,5	30,0	24,1	16,8	660,9	601,0	196,9
2	04-10-03	927,0	29,0	23,1	18,4	681,5	601,5	220,3
3	06-10-03	980,0	28,5	22,6	16,1	693,7	601,8	245,8
4	08-10-03	1181,8	33,0	27,1	16,7	724,9	602,7	275,4
5	10-10-03	1519,6	40,5	34,6	31,2	801,5	602,2	288,6
6	12-10-03	1751,6	126,5	120,6	103,1	823,6	602,2	297,7
7	14-10-03	1740,7	130,0	124,1	103,4	823,7	601,7	298,2
8	16-10-03	1537,9	44,0	38,1	19,7	820,2	601,8	282,6
9	18-10-03	1391,1	29,5	23,6	7,0	793,9	601,7	259,8
10	20-10-03	1280,8	34,0	28,1	5,3	765,0	601,6	242,8

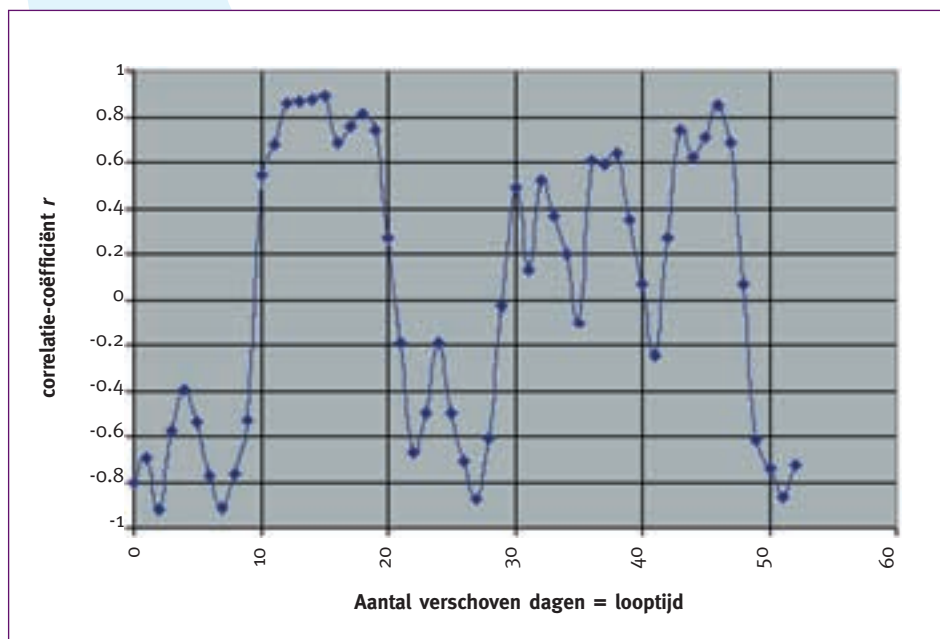
Op basis van deze hydrologische data is de looptijd Lobith – Hagestein bepaald met het Rijn-Alarmmodel voor een momentane lozing bij Lobith (km. 862,2). De looptijd wordt dan de tijd tussen het moment van lozen en het moment dat bij Hagestein de maximale concentratie van de geloosde stof optreedt. Op deze wijze is een looptijd van 12 1/2 dagen gevonden voor Hagestein en een looptijd van 12 3/4 dagen voor de invaart van het Lekkanaal bij km. 949,8, wat een verschil betekent van minder dan 5%. Hieruit kan geconcludeerd worden dat qua looptijd het Rijn-Alarmmodel een betrouwbare voorspelling doet. Hierbij zij opgemerkt dat het Rijn-Alarmmodel geen uitvoer geeft voor een locatie op het Lekkanaal nabij de inlaat van het pompstation ir. Cornelis Biemond, alwaar het beschouwde chlorideverloop is gemeten.

Omdat in oktober een afvoergolf optreedt (Fig. 3-4) is vervolgens de laagwaterperiode van 29 oktober tot 17 december 2003 beschouwd, waarbij 5-daags gemiddelde waarden zijn bepaald voor de respectieve afvoeren en waterstanden (Tabel 3-3). In Fig. 3-6 wordt het resultaat van de kruiscorrelatie grafisch weergegeven. Hieruit blijken twee looptijden, te weten een korte looptijd van 15 dagen en een lange looptijd van 47 dagen. Deze laatste is in Fig. 3-5 geel gemarkeerd omstreeks 20 december. Uitgaande van het feit dat bij lage afvoeren het Betuwepand een open verbinding vormt tussen de Waal en de Lek of het schutdebiet bij de Prins Bernhardsluis niet zonder meer verwaarloosbaar is (Par. 2.2.6, Fig. 2-14) zou kunnen verklaren dat er een korte looptijd (via de Waal) en een lange looptijd (via de Nederrijn-Lek) wordt gevonden (zie ook Fig. 3-7).

Tabel 3-3: Hydrologische invoer Rijn-Alarmmodel oktober - december 2003

NR.	Datum	Gemiddeld debiet (m³/s)				Gem. waterstand (cm)		
		Lobith	Driel	Amer.	Hag.	Driel	Amer.	Hag.
1	29-10-03	1135,7	28,3	22,4	16,7	731,6	600,4	287,5
2	03-11-03	1288,1	33,9	28,0	13,9	760,3	600,8	287,6
3	08-11-03	1205,3	29,9	24,0	16,6	748,1	600,6	279,4
4	13-11-03	1048,9	24,5	18,6	6,1	712,0	600,1	271,8
5	18-11-03	1210,5	31,5	25,6	4,5	743,7	600,5	298,0
6	23-11-03	1131,9	28,3	22,4	4,0	731,9	600,3	297,6
7	28-11-03	1114,6	26,5	20,6	3,5	723,9	600,9	278,3
8	03-12-03	1265,3	32,3	26,4	6,5	757,5	600,9	318,1
9	08-12-03	1115,2	27,1	21,2	4,0	727,8	601,2	292,4
10	13-12-03	1478,8	29,8	23,9	9,5	740,5	601,0	278,1

Figuur 3-6: Verloop kruiscorrelatie Lobith – Lekkanaal periode 29-10-2003 t/m 27-12-2003



Ter verificatie is met het Rijn-Alarmmodel de looptijd bepaald uitgaande van een momentane lozing bij Lobith (km. 862,2) tot Hagestein en de invaart van het Lekkanaal, alsmede tot Tiel. Daarbij zijn de volgende waarden gevonden:

Looptijd Lobith (km 862,2) - Hagestein (km 946,6)	46,5 dagen
Looptijd Lobith (km 862,2) - invaart Lekkanaal (km 949,8)	51 dagen
Looptijd Lobith (km 862,2) - Tiel (km 913)	0,5 dag

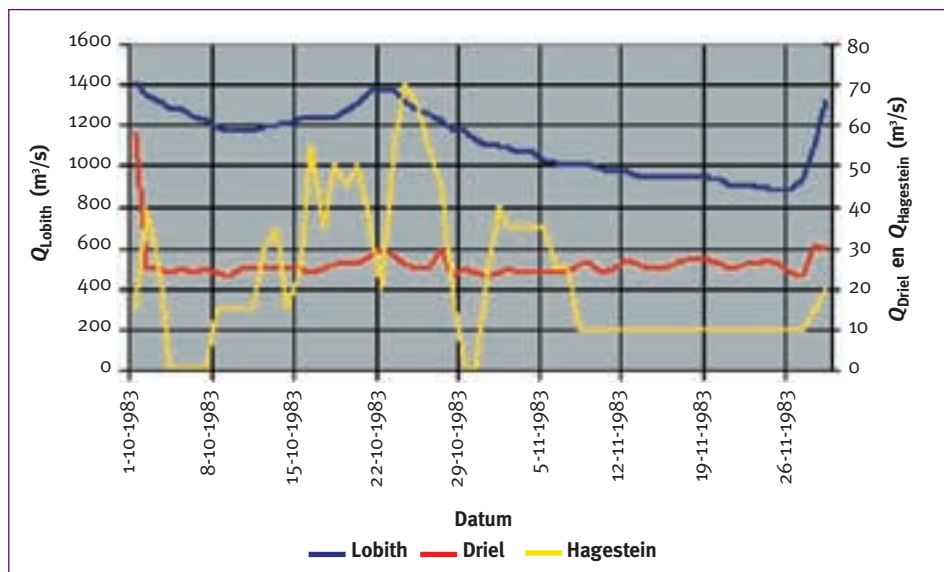
Figuur 3-7: Trajecten, waarlangs stoftransport plaatsvindt van Lobith naar Hagestein, Lekkanaal



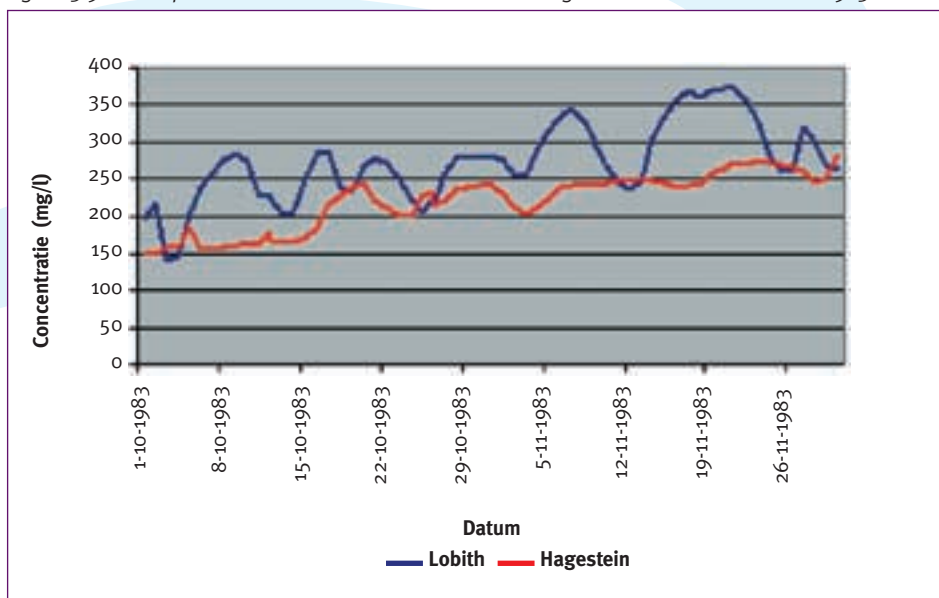
Een vergelijking van deze modelresultaten met bovenstaande waarden van 15 resp. 47 dagen, verkregen met behulp van de kruiscorrelatie bevestigt de conclusie dat het stoftransport van Lobith naar Hagestein langs twee verschillende trajecten plaatsvindt. Het verschil tussen de looptijd op basis van de kruiscorrelatie en het modelresultaat (lange looptijd) bedraagt nu minder dan 10% in het geval dat de invaart van het Lekkanaal wordt beschouwd.

Wordt aangenomen dat de transportsnelheid via het Betuwepand naar Hagestein vergelijkbaar is met de transportsnelheid tussen de IJsselkop en Hagestein en zijn de respectieve lengten van deze trajecten 28.5 en 68 km, dan wordt een looptijd via de Waal naar Hagestein geschat op 19 dagen, dat qua indicatieve waarde een redelijke eerste benadering is van de middels kruiscorrelatie gevonden waarde van 15 dagen.

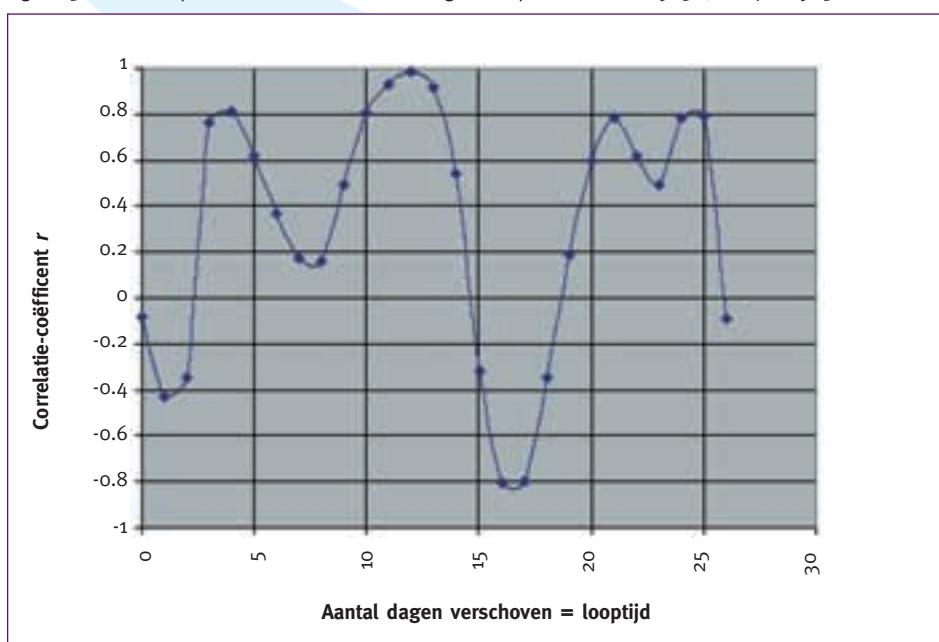
Figuur 3-8: Gemeten afvoerverloop Lobith, Driel en Hagestein oktober - november 1983



Figuur 3-9: Verloop chloride concentratie Lobith en stuw Hagestein oktober - november 1983



Figuur 3-10: Verloop kruiscorrelatie Lobith – Hagestein periode 28-10-1983 t/m 04-11-1983



Bovenstaande bevindingen met betrekking tot het stoftransport Lobith – Hagestein bij lage afvoeren worden bevestigd door een overeenkomstige analyse van de laagwater situatie oktober – november 1983. Figuur 3-8. toont het afvoeroverloop gedurende deze periode. Het bijbehorende chloride verloop is in Fig. 3-9 gepresenteerd, terwijl de kruiscorrelatie van deze verlopen wordt weergegeven in Fig. 3-10. Uit de kruiscorrelatie kan weer een korte en een lange looptijd worden afgeleid van respectievelijk 12 en 21 à 24 dagen.

Uitgaande van 3-daags gemiddelde afvoeren en waterstanden over de periode van 3 oktober – 1 november 1983 (Tabel 3-4) is met behulp van het Rijn-Alarmmodel de looptijd van Lobith tot Hagestein berekend via de Nederrijn-Lek en van Lobith tot Tiel (Waal):

Looptijd Lobith (km 862,2) - Hagestein (km 946,6)

20 3/4 dagen

Looptijd Lobith (km 862,2) - Tiel (km 913)

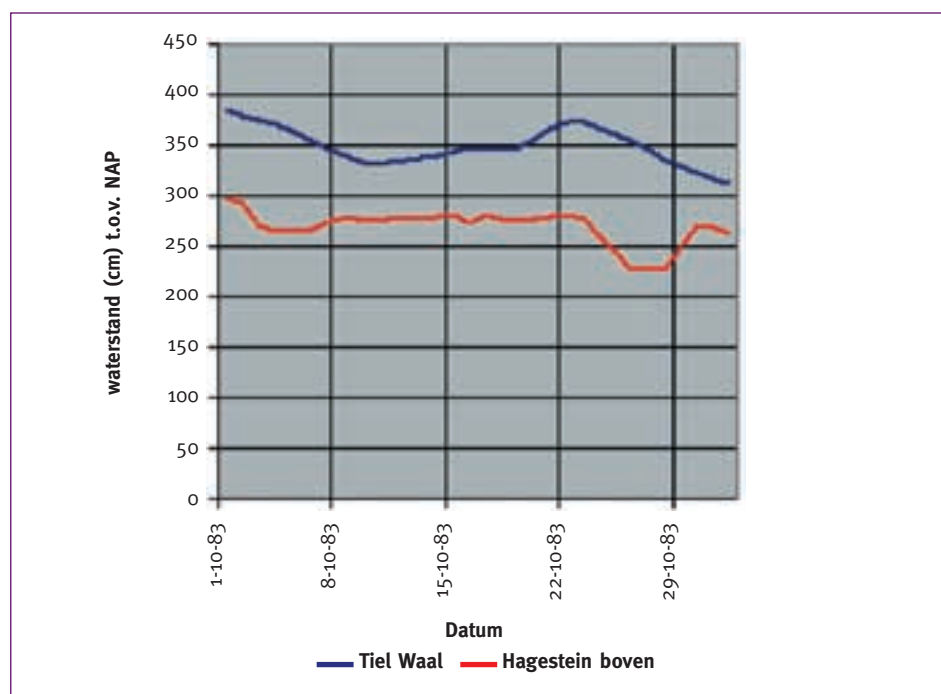
1/2 dag

Tabel 3-4: Hydrologische invoer Rijn-Alarmmodel oktober 1983

Nr.	Datum	Gemiddeld debiet (m³/s)				Gem. waterstand (cm)		
		Lobith	Driel	Amer.	Hag.	Driel	Amer.	Hag.
1	03-10-83	1296,0	27,2	21,3	12,1	836,0	599,0	265,7
2	06-10-83	1219,3	26,8	20,9	8,6	817,3	600,0	271,7
3	09-10-83	1173,7	26,8	20,9	18,0	803,7	597,3	276,7
4	12-10-83	1196,3	27,5	21,6	26,2	812,0	598,0	277,3
5	15-10-83	1232,7	27,2	21,3	32,1	817,3	603,0	280,7
6	18-10-83	1273,0	28,5	22,6	37,3	824,0	599,3	273,7
7	21-10-83	1374,3	31,2	25,3	33,6	849,7	602,3	279,7
8	24-10-83	1282,7	27,8	21,9	41,8	834,7	601,0	241,7
9	27-10-83	1189,0	28,5	22,6	23,8	807,3	603,0	232,0
10	30-10-83	1108,7	26,2	20,3	22,6	787,0	596,3	267,7

Een vergelijking van deze modelresultaten met bovenstaande waarden van 12 resp. 21 à 24 dagen, verkregen op basis van de kruiscorrelatie, bevestigt wederom de conclusie dat het stoftransport van Lobith naar Hagestein langs twee verschillende trajecten plaatsvindt. Het verschil tussen de looptijd op basis van de kruiscorrelatie en het modelresultaat (lange looptijd) bedraagt in dit geval ruim 5%. Een eerste schatting van de looptijd via het Betuwepand resulteert in circa 9 dagen, dat ook weer als een redelijk indicatie gezien kan worden in vergelijking met de gevonden waarde van 12 dagen met behulp van de kruiscorrelatie. In dit verband wordt gewezen op het feit dat gedurende de beschouwde laagwater periode het verval over de Prins Bernhardsluis circa 1 meter bedroeg, wat bij benadering een afvoer van 4,5 m³/s via het Betuwepand naar de Lek betekende (Fig. 3-11).

Figuur 3-11: Verloop waterstanden Tiel (Waal) en Hagestein boven, oktober 1983



Op grond van bovenstaande analyses kan dus geconcludeerd worden dat:

- het stoftransport via de Waal en het Betuwepand bij laagwatersituaties qua omvang vergelijkbaar is met het transport via de Nederrijn – Lek en dus van evenveel betekenis is;
- een verontreiniging via het Betuwepand beduidend eerder de invaart van het Lekkanaal bereikt dan via de Nederrijn – Lek.

Daarnaast dient nog bedacht te worden, dat een verontreiniging ook via de Prinses Irenesluis – Amsterdam-Rijnkanaal – Lekkanaal het innamepunt van het pompstation ir. Cornelis Biemond kan bereiken (Fig. 3-12). Echter in het geval van een verontreiniging kan met de Rijkswaterstaat worden afgesproken, dat tijdens het passeren van de verontreiniging bij de Prinses Irenesluis er niet gesloten wordt en ingelaten wordt. Dit dient dan ook het algemene belang dat een verontreiniging niet op het Amsterdam-Rijnkanaal komt.

Dat een verontreiniging via het Betuwepand op de Lek richting Hagestein komt, zou voorkomen kunnen worden door tijdens de passage van de verontreiniging bij Tiel, bij de Prins Bernhardsluis niet te sluiten.

Figuur 3-12: Situatie kortsluitstromen Amsterdam-Rijnkanaal richting Lekkanaal



Conclusies en aanbevelingen

Het is niet mogelijk een goede waterbalans op te stellen van de stuwpanden Driel, Amerongen en Hagestein omdat:

- de afvoer bij de stuw Amerongen niet wordt gemeten;
- het Betuwepand van het Amsterdam-Rijnkanaal bij laagwater situaties, waarbij het peil op de Waal min of meer gelijk is aan het stuwpeil van Hagestein, een open verbinding tussen Waal en Lek vormt, terwijl de afvoer door het Betuwepand niet wordt gemeten.

Derhalve moest volstaan worden tot een inventarisatie van de toe- en afstromen tussen de IJsselkop en de stuw Hagestein.

Daarnaast betekent de afwezigheid van afvoergegevens van het Betuwepand, dat het traject stuw Amerongen – stuw Hagestein opgesplitst moet worden in twee deeltrajecten:

- stuw Amerongen (km 922) – Amsterdam-Rijnkanaal (km 929), met als afvoer gelijk aan de afvoer bovenstrooms van de stuw Amerongen;
- Amsterdam-Rijnkanaal (km 929) – stuw Hagestein (km 946,6), waarvoor de afvoer bij de stuw Hagestein geldt.

De in het Rijn-Alarmmodel in te voeren afvoeren worden dan op basis van de geïnventariseerde toe- en afstromingen en de gemeten afvoeren te Driel en Hagestein (akoestische debietmetingen) per deeltraject:

Driel (stuwpannd Driel vanaf de IJsselkop)

$$Q_{\text{Driel_invoer}} = Q_{\text{Driel_ADM}} + 2,5 \text{ m}^3/\text{s}$$

Amerongen (stuwpannd Amerongen)

$$Q_{\text{Amerongen_invoer}} = Q_{\text{Amerongen_ADM}} - 3,4 \text{ m}^3/\text{s}$$

Stuw Amerongen – Amsterdam-Rijnkanaal

$$Q_{\text{Amerongen_beneden}} = Q_{\text{Driel_ADM}} - 3,4 \text{ m}^3/\text{s}$$

Amsterdam-Rijnkanaal – stuw Hagestein

$$Q_{\text{Hagestein_invoer}} = Q_{\text{Hagestein_ADM}} + 2 \text{ m}^3/\text{s}$$

In verband met de massabalans binnen het Rijn-Alarmmodel wordt derhalve aanbevolen het traject Amerongen – Hagestein op te splitsen in twee trajecten zoals boven is aangegeven, waarvoor per deeltraject de afvoer moet worden ingevoerd, terwijl ter plaatse van het Amsterdam-Rijnkanaal een fictief takje in het model wordt opgenomen, waarvan de afvoer bepaald wordt uit de afvoeren van de deeltrajecten tussen Amerongen en Hagestein. Voor beide deeltrajecten geldt overigens dezelfde waterstand, te weten de waterstand gemeten bij Hagestein bovenstrooms van de stuw.

Indien er geen afspraken gemaakt kunnen worden omtrent sluiting van het Betuwepand tijdens de passage van een verontreiniging, dan moet in het Rijn-Alarmmodel het Betuwepand worden ingebouwd. Dit vraagt dan ook om een afvoer- en waterstand-gegeven van dit pand ter bepaling van de looptijd van een verontreinigingsgolf door dit pand. Mogelijk kan een analyse van de stroomsnelheden (incl.

veldmetingen) in dit pand bij gestuwde situatie van de Nederrijn – Lek al een voldoende nauwkeurige defaultwaarde voor de transportsnelheid in het Betuwepand generen, waardoor de noodzaak van een afvoermeetstation in het Betuwepand overbodig is.

Evenzo doet zich de vraag voor of de inbouw van het Amsterdam-Rijnkanaal tot aan de aansluiting met het Lekkanaal een wenselijke uitbreiding van het Rijn-Alarmmodel is, daar dit ook een mogelijke transportweg is van een verontreiniging naar het inlaatpunt van het ir. Cornelis Biemond pompstation. Echter ook dit vraagt om aanvullende afvoergegevens. Anderzijds lijkt het zeer onwaarschijnlijk dat tijdens de passage van een verontreinigingsgolf, het schutten en het inlaten van water bij de Prinses Irenesluis niet tijdelijk gestaakt zal worden om te voorkomen dat deze verontreiniging het Amsterdam-Rijnkanaal op gaat en daarmee de verder benedentrooms gelegen wateren, zoals het Noordzeekanaal en de Vecht, mede zou vervuilen.

Referenties

Bruin, D. de (1972)

Onderzoek naar de hoeveelheden afstromend grondwater van de Veluwe naar de Neder-Rijn, Nota 72.4, Rijkswaterstaat, Studiedienst Bovenrivieren, Arnhem

Lorenz, N. (1997)

Calamiteitenmodellering van de gestuwde Nederrijn/Lek, Analyse en evaluatie van het Rijn Alarmmodel 3.0, Afstudeerverslag TU Delft, Fac. Civiele Techniek en Geowetenschappen, Dec. 1997

Mazijk, A. van, H.Th. Reitsma, S. Wuijts (1992)

Verbetering bepaling van de looptijd op de Rijn voor het traject Lobith – Hagestein, Projectgroep Voorspelling van de waterkwaliteit van de Rijn, RIWA Samenwerkende Rijn- en Maaswaterleiding-bedrijven en TU Delft, juni 1992

Wesseling, B. (1985)

Kwel-wegwijziging Nederrijn/Lek, Nota 85.1, Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, District Zuidoost, Arnhem

Colofon

- Auteur:** A. van Mazijk, TU Delft
- Uitgever:** RIWA Vereniging van Rivierwaterbedrijven
- Vormgeving:** Meyson Communicatie, Amsterdam
- Druk:** ATP Digitale Media
- ISBN:** 90-6683-113-8

Januari 2005

