

Een nieuwe methodologie voor het ontwerp en het beheer van automatisch gestuurde wachtbekkens in kleine rivieren, geïllustreerd met het voorbeeld van de Zwalmrivier

Samenvatting

De bedoeling van deze bijdrage is het voorstellen van een economisch verantwoord real-time regeling die een efficiënter beheer toelaat van wachtbekkens op kleine rivieren dan de klassieke configuratie met vaste uitlaatconstructies.

Nadat in paragraaf 1 het nut van een dergelijke regeling wordt aangetoond volgt een korte beschrijving van het Zwalmbekken (paragraaf 2). In paragraaf 3 volgt dan de formulering van de voorgestelde, voor kleine rivierbekkens economisch verantwoorde real-time regeling.



J. MARIËN
assistent bij het Centrum
voor Statistiek en
Operationeel Onderzoek
Vrije Universiteit Brussel

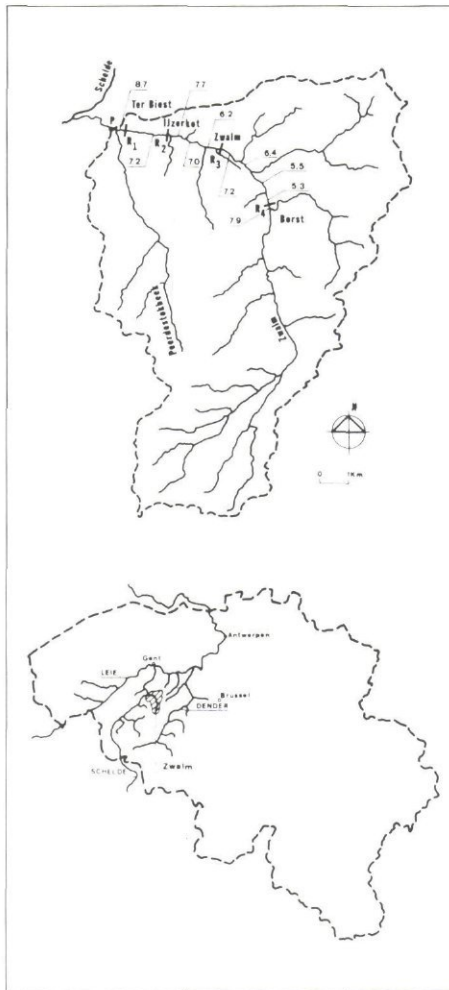
Vervolgens wordt uiteengezet hoe men het ontwerp van de wachtbekkens kan verwezenlijken bij het gebruik van de voorgestelde regeling (paragrafen 4 en 5). Dit alles wordt numeriek geïllustreerd aan de hand van het voorbeeld van de Zwalmrivier.

1. Inleiding

Voor de regulatie van hoge afvoeren in rivieren gebruikt men voornamelijk twee methodes: het verhogen van de afvoercapaciteit van de waterwegen door rivierverbeteringswerken of het voorzien van één of meerdere wachtbekkens die dan zorgen voor een vertraging en een afvlakking van de afvoer. In vele gevallen is de tweede methode een minder drastische milieu-ingreep dan de eerste. In het huidige waterbeheer bestaat dan ook de trend om wachtbekkens te verkiezen boven drastische rivierverbeteringswerken.

Indien men dergelijke wachtbekkens voorziet dan stelt zich het probleem van de regeling van deze reservoirs. Men kan voorzien in vaste uitlaatconstructies, waarbij dan de vulling van het reservoir enkel en alleen afhangt van het inloophydrogram en de hydraulische karakteristieken van de uitlaatconstructies [zie bijv. Chow, 1964 en James and Lee, 1971].

Dit eerste alternatief heeft echter als nadeel dat in stormsituaties de reservoirs reeds gedeeltelijk vollopen voordat een kritische afvoersituatie bereikt wordt [Chow, 1964; James and Lee, 1971]. Daarom voorziet men dikwijls de wachtbekkens van regelbare uitlaatconstructies, door één of meerdere operatoren beheerd, zodanig dat deze vroegtijdige vulling niet optreedt. Dankzij de hedendaagse technologie van de elektronica, is er in de laatste tien jaar een derde alternatief naar voren getreden voor het



Afb. 1 - De Zwalm. a. plaats van de bergingen en kritieke secties met bijpassende kritische afvoeren in m³/s. b. ligging in België.

beheer van wachtbekkens, namelijk de zogenaamde real-time regeling. Deze bestaat erin om, door middel van automatische meting, transmissie en verwerking van hydrologische data in verband met de toestand van het beschouwde rivierbekken, op een automatische wijze, een zo optimaal mogelijk beheer van de reservoirs te bekomen [Ford, 1978; Jamieson and Wilkinson, 1972; Jamieson et al., 1976; Mariën, 1978; Mariën, 1980; Meyer-zur Well, 1973; Plate and Schultz, 1973; Van der Beken et al., 1980].

De efficiëntie van het beheer is natuurlijk het grootst bij het derde alternatief en het kleinst bij het eerste en bijgevolg is ook de bergingscapaciteit die men moet voorzien om een bepaalde graad van overstromingspreventie te bereiken het grootste bij het eerste alternatief en het kleinste bij het derde. Deze verhoogde efficiëntie gaat natuurlijk gepaard met significant hogere installatie-, operatie- en onderhoudskosten. Voor kleine rivierbekkens (tot $\pm 150 \text{ km}^2$) heeft men, tot hiertoe, steeds geopteerd voor het eerste alternatief, daar dergelijke hoge kosten voor

TABEL I - De bestaande bergingen.

Molen	Bestaande Berging in 10^3 m^3
Ter Biest (R_1)	20
IJzerkot (R_2)	10
Zwalm (R_3)	8
Borst (R_4)	2,5

dergelijke rivieren economisch onverantwoord zijn. In de huidige studie, echter, zal worden aangetoond dat men, rekening houdende met de economische beperkingen eigen aan het beheer van wachtbekkens voor kleine rivieren, toch kan voorzien in real-time regelingen die efficiënter zijn dan vaste uitlaatconstructies. Aldus zal men in staat zijn met kleinere bergingscapaciteiten dezelfde graad van overstromingspreventie te bereiken. De voorgestelde methodologie werd op punt gesteld naar aanleiding van een studie van de Zwalm, een kleine bijrivier van de Schelde met een afstromingsgebied van 110 km^2 . De gebruikte methodes zullen dan ook uiteengezet worden aan de hand van het voorbeeld van de Zwalm. Deze studie is een onderdeel van het onderzoek dat de werkgroep Hydrologie van de VUB uitvoert in opdracht van de Landelijke Waterdienst.

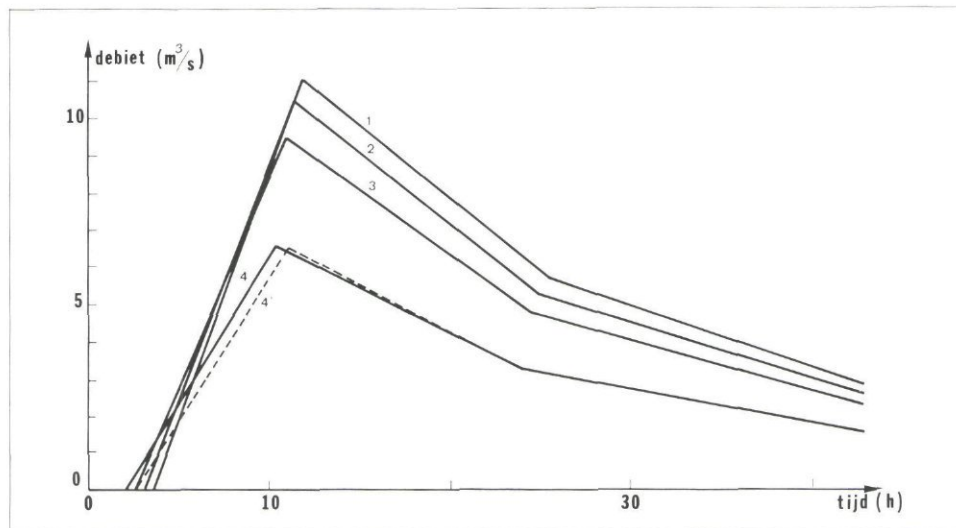
2. Beschrijving van de Zwalm

De Zwalm zal voorzien worden van 4 automatische klepstuwen ter hoogte van de Ter Biest-, IJzerkot-, Zwalm- en Borst-molen (zie afb. 1) met het doel om tijdens de zomerperiode een minimumpeil in de rivier te verwezenlijken. Het schijnt dan ook logisch te zijn om, tijdens de winterperiode, deze stuwen en de juist stroomopwaarts ervan gelegen bergingen te benutten om de incidentele hoge afvoeren van de rivier te regulariseren.

Tabel I geeft een overzicht van de, ter hoogte van de verschillende molens, bestaande bergingscapaciteit aanwezig in de bedding van de rivier.

Een eerste deel van de studie bestaat er dan ook in een regeling voor de stuwen te ontwerpen die het debiet aan de monding van de rivier optimaal reduceert, in de veronderstelling dat een welbepaalde standaardstorm optreedt (paragraaf 3).

Het bleek echter dat de maximale reductie van de piekafvoeren aan de monding te klein was om beneden de huidige afvoercapaciteit van de rivier aldaar, te vallen. Om eventuele rivierverbeteringswerken aldaar te kunnen vermijden was het dus noodzakelijk om na te gaan welke regeling en welke bijkomende berging noodzakelijk zouden zijn om te komen tot maximale mondingsdebieten die kleiner zijn dan de afvoercapaciteit zodanig dat overstromingsschade en erosieschade (beperking van de stroomsnelheden) vermeden kan worden (paragraaf 4).



Afb. 2 - Inloophydrogrammen ter hoogte van de vier stuwen voor de standaardstorm.

Uit deze studie bleek dat de bergingscapaciteit nodig om de design storm voldoende te reduceren, meer dan het drievoudige bedraagt van de bestaande bergingscapaciteit. Men moet dan ook besluiten dat verbeteringswerken, althans aan de monding van de rivier, onvermijdelijk zijn. Dit feit leidde logischerwijze tot het ondernemen van een poging om een regeling en bijkomende bergingen te ontwerpen om in het gedeelte stroomopwaarts van de Ter Biestmolen de geschatte afvoercapaciteiten te respecteren, zodanig dat de noodzakelijke rivierverbeteringswerken zouden kunnen beperkt blijven tot het pand stroomafwaarts van de Ter Biestmolen (paragraaf 5).

3. Studie van de standaardstorm bij de huidige berging

3.1. De beschouwde storm

Door het studiebureau belast door de Landelijke Waterdienst met de sanering van de benedenloop van de Zwalm werd een

maatgevende afvoer van 1,2 l/s/ha aanvaard. Deze afvoer heeft vermoedelijk een retourperiode van 1,5 à 2 jaar.

Wij verwijzen naar Van der Beken [1981] voor een meer gefundeerde berekeningsmethodologie om niet alleen de piekafvoer maar ook het afvoeroverloop in functie van de tijd te berekenen.

Voor deze studie werden echter historisch opgetreden hydrogrammen (storm van 25-26/11/1974) waargenomen op drie plaatsen op de Zwalm¹, aangewend. Zij werden in grootte getransformeerd tot 4 inloophydrogrammen voor de 4 beschouwde bergingen, evenredig met de aanvaarde maatgevende afvoer van 1,2 l/s/ha. Deze inloophydrogrammen vormen de zogenaamde maatgevende storm. De curven 1, 2, 3 en 4 van afb. 2 geven de debieten in de Zwalm in functie van de tijd respectievelijk ter hoogte van de Ter Biest-, IJzerkot-, Zwalm- en Borstmolen.

Indien men een regeling toepast op de

Borstmolen en men bijgevolg een gedeelte van het afstromend water ophoudt, dan zullen de uitstroomdebieten van de Borstmolen in functie van de tijd, die een gedeelte van de instroming van de Zwalmvormen, verschillend zijn van curve 4 van afb. 1.

Toch zal het nodig zijn om de instroming in functie van de tijd in de Zwalmvormen te kennen. Dit inloophydrogram bestaat enerzijds uit de eventueel vertraagde lozingen uit de Borstmolen en anderzijds uit het effect van de zijdelingse instroming in de Zwalm, tussen Borst- en Zwalmvormen. De eerste bijdrage zal afhangen van de regeling van de Borstmolen. De tweede bijdrage is afleesbaar op afb. 2; hiertoe verschuift men curve 4 van afb. 2 een half uur naar rechts (curve 4') en maakt het verschil tussen de ordinaten van curve 4' en curve 3. Door op identieke wijze te werk te gaan vindt men de zijdelingse instroming tussen Zwalm- en IJzerkotvormen tussen IJzerkotvormen en Ter Biestvormen. Dit geeft aanleiding tot afb. 3 waarvan de curven de volgende betekenis hebben:

I_4 : Instroming in R_4 (Borstmolen).

I_3 : Instroming in R_3 (Zwalmvormen) te wijten aan de zijdelingse instroming in de Zwalm tussen R_4 en R_3 .

I_2 : Instroming in R_2 (IJzerkotvormen) te wijten aan de zijdelingse instroming in de Zwalm tussen R_3 en R_2 .

I_1 : Instroming R_1 (Ter Biestvormen) te wijten aan de zijdelingse instroming in de Zwalm tussen R_2 en R_1 .

I_5 : Debieten in P te wijten aan de toevoer van de Peerdestokbeek (verkregen door de ordinaten van curve 1 te vermenigvuldigen met de verhouding van de respectievelijke bekkenoppervlakten in ha (11.469 - 9.211)/(9.211)).

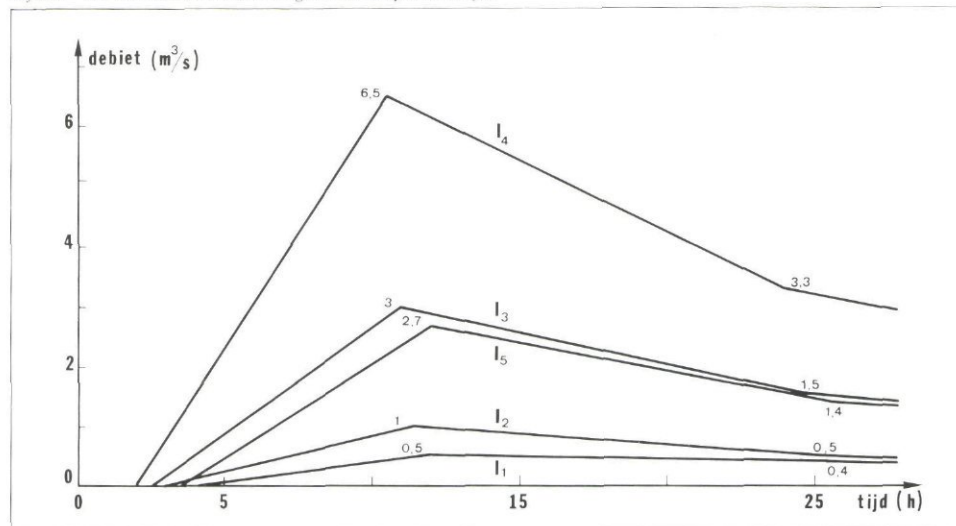
Indien men alle curven van afb. 3 over de respectievelijke looptijden verschuift en men telt ze bij elkaar op, dan verkrijgt men een piekdebit van 13,7 m³/s voor het punt P van afb. 1, wat overeenkomt met de maatgevende afvoer in deze sectie.

Wij zullen de grafieken van afb. 3 als basis nemen voor alle verdere berekeningen.

3.2. De gebruikte modelhypothesen

Modelhypothese 1: Om een computer te kunnen gebruiken bij de verschillende uit te voeren berekeningen werden de hydrogrammen van afb. 3 gediscrètiseerd op een tijdbasis van een kwartier, d.w.z. dat men de continue curven van afb. 3 vervangt door trapfuncties, zoals ter illustratie aangegeven is op afb. 4. Uit afb. 4 blijkt duidelijk dat de oppervlakten onder de twee curven gelijk zijn (behoud van de volumes water) maar dat de

Afb. 3 - De verschillende instromingen in de loop van de tijd.



¹: Waarnemingen van het Laboratorium voor Hydraulica, RUG.

piek van het gediscretiseerde hydrogram kleiner is. Vermits voor de regelingen van de verschillende bergingen enkel de volumes een rol spelen is deze discretisatie toelaatbaar. De reductie van de piekafvoeren bij deze discretisatie is van de grootte-orde van 1,5%. Dit kan zijn belang hebben bij de evaluatie van de later gevonden piekafvoeren bij de optimale regeling van de bergingen.

Modelhypothese 2: We veronderstellen dat er geen vertraging is van de afvoer tussen de verschillende bergingen. Dat wil zeggen: indien we in het 5de kwartier een debiet van $5 \text{ m}^3/\text{s}$ lossen uit de Borstmolen dan geeft dit aanleiding tot een instroming van $5 \text{ m}^3/\text{s}$ gedurende het 5de kwartier in de Zwalmolen. Deze hypothese is schijnbaar in tegenstelling met de onderstelde vertragingen van een half uur in afb. 2, gebaseerd op de niet-nauwkeurig gesynchroniseerde meettoestellen die thans op de Zwalm staan. Indien we een vertraging van een half uur zouden onderstellen, dan zou dezelfde lozing van $5 \text{ m}^3/\text{s}$ in de Zwalmolen aankomen gedurende het 7de kwartier. Het is echter zo dat als men de bergingen van de rivier zelf gebruikt als een langgerekt reservoir dan zal een lozing uit het meer stroomopwaarts gelegen reservoir als een golf verlopen en zal aldus sneller deel uitmaken van het water opgeslagen in het stroomafwaartse reservoir. Dit verantwoordt in zekere mate de gemaakte vereenvoudigde hypothese.

In een latere fase van de studie werd deze hypothese getoetst door vertraging in rekening te brengen.

Modelhypothese 5: We onderstellen een totale berging van 40.500 m^3 als volgt verdeeld:

$R_1 : 20.000 \text{ m}^3$

$R_2 : 10.000 \text{ m}^3$

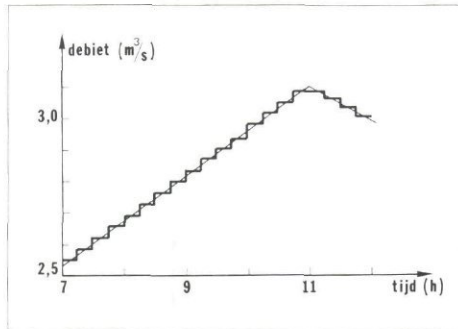
$R_3 : 8.000 \text{ m}^3$

$R_4 : 2.500 \text{ m}^3$

Deze volumes werden afgeleid op basis van de ligging van de oude schotbalkstuw. Gelet op het feit dat de nieuwe automatische klepstuw slechts 20 à 30 meter opwaarts van de oude stuw worden gebouwd kunnen deze bergingsvolumes als voldoende nauwkeurig beschouwd worden.

Modelhypothese 4: De regeling van de vier stuw zal onafhankelijk van elkaar plaatsvinden met behulp van microprocessoren geplaatst bij elke stuw. Elke microprocessor zal beschikken over lokale getelemetreerde informatie om de regeling van de desbetreffende klep te verwezenlijken. We onderstellen dus dat bij elke klepstuw een microprocessor (mc.p) staat die kan beschikken over alle noodzakelijke lokale informatie, zoals bijvoorbeeld:

- het peil van het water juist opwaarts van de klep;
- de stand van de klep zelf;



Afb. 4 - Een deel van het continu en kwartuurlijks discreet hydrogram I_3 van afb. 3.

- het peil van het water boven de klep;
 - het peil van het water afwaarts van de klep.
- Aan de hand van deze informatie moet de microprocessor dan een nieuwe klepstand bepalen voor de komende regelperiode van bijvoorbeeld 60 s.

De hypothese van *lokale informatie* is zeer belangrijk wat betreft de mogelijke regelingen die men kan doorvoeren; het is bijvoorbeeld onmogelijk om de mc.p van de Borstmolen te informeren aangaande inhoud van het reservoir van de Zwalmolen op een bepaald ogenblik. Tevens is het onmogelijk om hem te informeren aangaande het huidige instroomdebiets aan de Borstmolen omdat 1e. het verschil tussen de inhoud van de Borstmolen op twee dicht bij elkaar gelegen tijdstippen praktisch onmogelijk nauwkeurig te meten is (indien dit wel mogelijk zou zijn zou men hiermee het ogenblikkelijk instroomdebiets kunnen berekenen);

2e. een peil dat representatief is voor het instroomdebiets slechts op een grote afstand van de klep kan gemeten worden, hetgeen geen lokale informatie meer zou zijn.

3.3. De gebruikte suboptimale regeling

Om redenen die later zullen blijken hebben we ons binnen de regelingen die enkel gebruikmaken van lokale informatie nogmaals beperkt tot een zeer specifieke soort regelingen, namelijk regelingen die trachten het uitstroomdebiets beneden bepaalde kritische waarden te houden:

- voor R_1 beneden $QCRIT_1$
- voor R_2 beneden $QCRIT_2$
- voor R_3 beneden $QCRIT_3$
- voor R_4 beneden $QCRIT_4$.

De waarden $QCRIT_i$ voor $i = 1, 2, 3$ en 4 moeten bepaald worden op een zodanige wijze dat men in de verschillende segmenten de grootst mogelijke debietsreducties verkrijgt. Laten we hiertoe eerst de Borstmolen beschouwen.

Afb. 5 geeft het instroomdebiets in de Borstmolen ($= R_4$).

We kunnen $QCRIT_4$ gelijk aan Q nemen waarbij Q zodanig is dat de oppervlakte ABC gelijk is aan 2.500 m^3 dat wil zeggen de capaciteit K_4 van R_4 . Het uitstroomdebiets

zal dan verlopen volgens de curve IFACJ. Indien we $QCRIT_4$ gelijk aan $Q' > Q$ nemen dan zal het maximum debiet stroomafwaarts van R_4 groter zijn en zullen we de bestaande berging voor een deel onbenut laten. Het uitstroomdebiets zal dan verlopen volgens de curve IFADECJ. Indien we $QCRIT_4$ gelijk nemen aan $Q'' < Q$ dan zal op een bepaald tijdstip t_1 , R_4 vol zijn en moeten we ofwel een lokale overstrooming verwezenlijken ofwel moeten we het uitstroomdebiets gelijk nemen aan het instroomdebiets voor alle tijdstippen na t_1 , hetgeen een maximum debiet $Q'' > Q$ geeft. Het uitstroomdebiets zal dan verlopen volgens de curve IFGHECJ.

Om het maximum debiet stroomafwaarts van de stuw zo klein mogelijk te houden moeten we dus $QCRIT_4$ gelijk aan Q nemen.

Beschouwen we nu de *Zwalmolen*.

De instroming in de Zwalmolen bestaat uit de zijdelingse instroming I_3 van afb. 3 en de uitstroming IACJ van R_4 , geschetst op afb. 5. Dit geeft een totaal inloophydrogram dat niet volledig driehoekig is maar wel verloopt volgens gebroken lijnen. We bepalen nu weer $QCRIT_3$ op een zodanige wijze dat de oppervlakte tussen het inloophydrogram en $QCRIT_3$ gelijk is aan de capaciteit K_3 van R_3 . Op overeenkomstige wijze bepalen we $QCRIT_2$ en $QCRIT_1$. De numerieke waarden van de $QCRIT$ zijn:

$QCRIT_1 = 8,3 \text{ m}^3/\text{s}$

$QCRIT_2 = 8,6 \text{ m}^3/\text{s}$

$QCRIT_3 = 8,2 \text{ m}^3/\text{s}$

$QCRIT_4 = 6 \text{ m}^3/\text{s}$

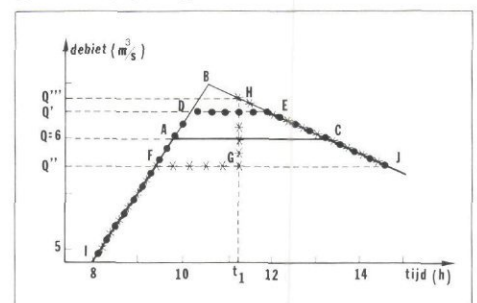
Wanneer wij $QCRIT_1 = 8,3 \text{ m}^3/\text{s}$ optellen bij de piekafvoer $2,7 \text{ m}^3/\text{s}$ van I_3 (afb. 3) dan verkrijgen wij als maximaal debiet $11 \text{ m}^3/\text{s}$.

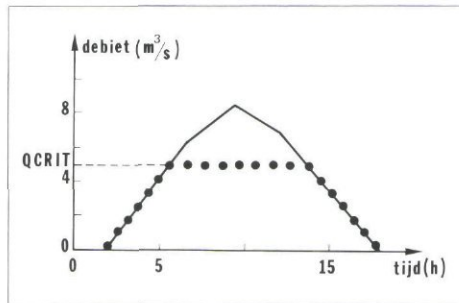
3.4. Verantwoording van de gebruikte suboptimale regeling

Er zijn verschillende motieven om de hoger besproken regeling te gebruiken.

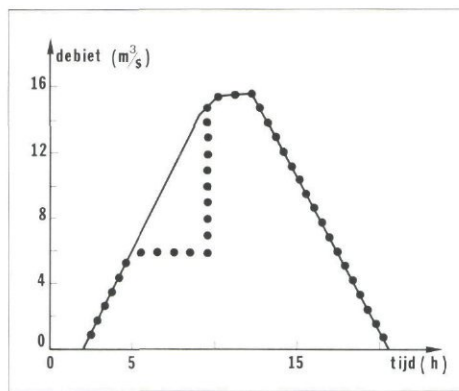
1e. Deze regeling is realiseerbaar voor wat betreft lokale metingen en programmatie van de mc.p's. Inderdaad, indien een storm opkomt, meet men het uitstroomdebiets boven de neergelaten klep en de mc.p wijzigt de stand van de klep niet. Indien het debiet de waarde $QCRIT$ bereikt, wordt de klep

Afb. 5 - In- en uitstroomdebiets van de Borstmolen (R_4) als $QCRIT = Q, Q'$ en Q'' .





Afb. 6 - Instroomdebiet (volle lijn) en uitstroomdebiet (bolletjes) voor een fictieve berging als de storm kleiner is dan de standaardstorm.



Afb. 7 - Instroomdebiet (volle lijn) en uitstroomdebiet (bolletjes) voor een fictieve berging als de storm groter is dan de standaardstorm.

opgeheven zodanig dat het uitstroomdebiet op de waarde QCRIT blijft. Tegelijkertijd meet de mc.p het peil enkele meters stroomopwaarts van de klep. Indien dit peil zijn maximum bereikt dan wordt, indien nodig, de klep gedeeltelijk terug neergelaten op een zodanige wijze dat het maximum peil niet overschreden wordt maar toch de berging vol blijft. Het is duidelijk dat het terug neerlaten van de klep, waardoor er uitstroomdebieten groter dan QCRIT zullen optreden, enkel zal voorkomen indien de storm sterker is dan de hierboven beschouwde standaardstorm. Na een bepaalde tijd zal het uitstroomdebiet dan terugvallen op waarden kleiner dan QCRIT, hetgeen beduidt dat de storm in intensiteit afneemt. Op dat ogenblik zal men voorzieningen moeten treffen voor de lediging van de berging. We gaan hier op dit ogenblik niet op in. Ter illustratie geven afb. 6 en 7 het verloop van het uitstroomdebiet bij het optreden van een storm die kleiner en groter is dan de standaardstorm voor een fictief reservoir, zonder maatregelen voor lediging. 2e. Deze regeling heeft de mogelijkheid in zich om toch aanzienlijke effecten te hebben op het maximum debiet in de verschillende riviersegmenten als de optredende storm verschilt in tijdsverloop of grootte van de standaardstorm. Men zou inderdaad regelingen kunnen bedenken die meer steunen op de specifieke vorm van de gebruikte standaardstorm, met als gevolg dat

men misschien iets betere resultaten boekt voor deze storm maar veel slechtere resultaten voor stormen die weinig afwijken van de standaardstorm. Alhoewel de voorgestelde regeling de meest eenvoudige regeling is, bestaan er misschien andere regelingen die ook aan de gestelde eisen wat betreft gebruik van lokale informatie voldoen en tevens de 2 hogervermelde eigenschappen bezitten. Men zou zich de vraag kunnen stellen of deze andere regelingen geen aanleiding geven tot lagere maximale debieten. Het maximum debiet in punt P van afb. 2 is met de voorgestelde regeling 11 m³/s. Indien andere regelingen dit zouden reduceren tot bijv. 7 m³/s zou het nodig zijn deze andere regelingen te onderzoeken. Men kan echter bewijzen dat voor de standaardstorm het maximum debiet in P met geen enkele regeling beneden de waarde 10,7 m³/s kan liggen. Het is dus duidelijk dat het niet erg lonend is om andere regelingen te onderzoeken.

3.5. Theoretische optimale regelingen

Dat het maximum debiet bij ongeacht welke regeling groter is dan 10,7 m³/s kan op de volgende wijze bewezen worden. Stel dat de opeenvolgende uitstroomdebieten voor de 4 bergingen bepaald worden door één centrale eenheid die vanaf het eerste uur beschikt over een exacte voorspelling van alle zijdelingse instromingen (dat wil zeggen $I_{i,t}$ t/m $I_{5,t}$ van afb. 3), en over alle andere nodige informatie zoals bergingsvolumes en dergelijke. Met deze informatie zou de centrale eenheid afnamedebieten van de 4 bergingen en voor elke tijdsperiode moeten bepalen zodanig dat het maximum debiet in P in de loop van de tijd zo klein mogelijk is. Er zijn dus een aantal keuzeveranderlijken, de afnames uit de 4 bergingen in functie van de tijd. Deze veranderlijken voldoen aan een aantal beperkingen: de inhouden van de bergingen in functie van de tijd moeten kleiner of gelijk zijn aan hun capaciteit.

Bovendien is er een objectief dat functie is van de keuzeveranderlijken: het maximum debiet in P moet geminimaliseerd worden. Dit geeft aanleiding tot een wiskundig programma dat opgelost werd op de CDCV 6.600 rekenmachine van het ULB/VUB rekencentrum. De waarde van het objectief voor de optimale oplossing was 10,72 m³/s.

Vermits de zogenaamde centrale eenheid beschikt over *alle mogelijke informatie* en de *allerbeste oplossing* kiest in overeenstemming met deze informatie, is het duidelijk dat geen enkele regeling met beperkte informatie, zoals ze praktisch uitvoerbaar zijn in het Zwalmbecken, een lager maximum debiet kan realiseren. De details van het op te lossen wiskundig programma zijn de volgende.

Zij:

- $I_{i,t}$ zijdelingse instroming in R_i in periode t (gekeerde constanten)
- $y_{i,t}$ afname debiet in periode t uit R_i (keuzeveranderlijken)
- K_i capaciteit van R_i (gekeerde constanten)
- $I_{5,t}$ debiet in periode t in de Peerdestokbeek (gekeerde constanten)
- t beschouwde periode variërend van 1 tot T
- $y_{5,t}$ hulpveranderlijken gelijk aan nul voor alle t
- $Z_{i,t}$ begin-inhoud in periode t in R_i .

Alle volumes hebben de eenheid m³ en alle debieten m³/s.

De inhoud van de reservoirs in de opeenvolgende periodes worden gegeven door

$$Z_{i,t+1} = Z_{i,t} + D(I_{i,t} - y_{i,t} + y_{i+1,t}) \quad \text{voor } \begin{cases} t = 1, \dots, T \\ i = 1, \dots, 4 \end{cases} \quad (1)$$

waarbij

$$Z_{i,1} = 0 \quad \text{voor } i = 1, \dots, 4 \quad (2)$$

Hierbij is D de duur van één periode in seconden.

Inderdaad is $y_{i+1,t}$ de afname uit R_{i+1} , die een instroming vormt in R_i (zie afb. 1 voor de nummering van de wachtbekkens).

Het is duidelijk dat de inhouden moeten voldoen aan:

$$0 < Z_{i,t} < K \quad \text{voor } \begin{cases} t = 1, \dots, T+1 \\ i = 1, \dots, 4 \end{cases} \quad (3)$$

en dat de afnames noodzakelijkerwijze positief zijn:

$$y_{i,t} < 0 \quad \text{voor } \begin{cases} t = 1, \dots, T+1 \\ i = 1, \dots, 4 \end{cases} \quad (4)$$

Het debiet aan de monding in periode t wordt gegeven door:

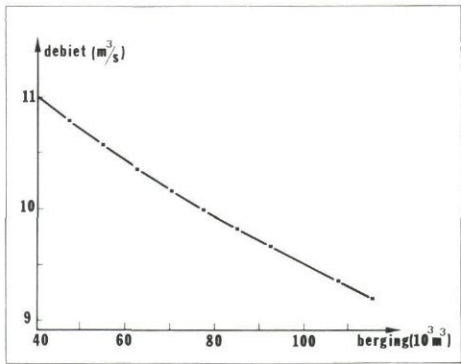
$$I_{5,t} + y_{1,t} \quad \text{en het is het maximum debiet, over alle periodes dat geminimaliseerd moet worden. Het objectief is dus minimaliseren van het maximum van:} \\ I_{5,1} + y_{1,1}; I_{5,2} + y_{1,2}; \dots; I_{5,T} + y_{1,T} \quad (5)$$

Dit niet lineair objectief kunnen we omzetten in een lineair objectief door gebruik te maken van een hulpveranderlijke Q , die voldoet aan de beperkingen.

$$I_{5,t} + y_{1,t} \leq Q \quad \text{voor } t = 1, \dots, T \quad (6)$$

en door als objectief te stellen minimum Q (7)

Inderdaad is wegens (6) de grootte Q groter of gelijk aan het maximum van de opeenvolgende mondingsdebieten opgesomd in (5). Omdat men het minimum van Q zoekt en de enige beperkingen op Q door (6) gegeven worden zal de optimale waarde voor Q gelijk zijn aan het maximum der mondingsdebieten (5). Omdat bovendien in het lineair programma, gevormd door de



Afb. 8 - Maximum mondingsdebit in functie van de totale berging.

beperkingen (1), (2), (3), (4) en (6) met als objectief (7), de andere keuzeveranderlijken $Z_{i,t}$ en $y_{i,t}$ zodanig gekozen worden dat Q geminimaliseerd wordt, zal de optimale oplossing van dit lineair programma wel degelijk de maximale reductie van de piek-debeten aan de monding geven. De oplossing van een dergelijk lineair programma met ongeveer 200 keuzeveranderlijken en enkele honderden beperkingen kan op een zeer efficiënte wijze opgelost worden door de toepassing van het simplex-algoritme [zie o.a. Hillier en Lieberman, 1974 of Brans, 1977] op een ordinator zoals bijvoorbeeld de CDC 6.600 van het VUB/ULB reken-centrum. Het feit dat de optimale oplossing van het lineair programma slechts $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ lager ligt dan de oplossing verkregen met de voorgestelde eenvoudige regeling is een belangrijk feit:

- 1e. het verzekert ons dat, althans voor de standaardstorm, het niet de moeite loont om naar meer complexe regelingen te zoeken binnen de verzameling regelingen die enkel lokale informatie gebruiken;
- 2e. het verzekert ons dat men met de bestaande berging geen reductie van de pieken lager dan $10,7 \text{ m}^3/\text{s}$ kan verkrijgen

onafhankelijk van welke regeling men in de praktijk ook gebruikt. Zo bijvoorbeeld weet men dat het voorzien van een verbindingslijn tussen de microprocessen, zodanig dat informatie-uitwisseling mogelijk wordt, nauwelijks enig effect kan hebben, voor zover enkel de standaardstorm beschouwd wordt.

3.6. Resultaten en besluiten

De reductie van $13,7 \text{ m}^3/\text{s}$ in de sectie juist stroomafwaarts van de samenvloeiing Zwalm-Peerdestokbeek is onvoldoende gezien de kritische afvoercapaciteit aan de monding $8,7 \text{ m}^3/\text{s}$ bedraagt (zie afb. 1). Het is dan ook noodzakelijk om na te gaan in hoeverre men, door het inplanten van bijkomende bergingen, de hoger vermelde kritische afvoercapaciteit kan respecteren.

4. Studie van de standaardstorm met bijkomende berging

4.1. Plaatsbepaling van de bijkomende berging

Indien men een bijkomende berging voorziet van bijvoorbeeld 10.000 m^3 dan stelt zich de vraag waar deze bijkomende berging zal situeren. Er werd echter numeriek nagegaan dat het maximum debiet dat men krijgt stroomafwaarts van de Ter Biestmolen slechts afhangt van de totale bergings-capaciteit beschikbaar op de Zwalm. Dat wil zeggen, indien men de situatie 1 heeft of situatie 2:

Situatie	$K_1(\text{m}^3)$	$K_2(\text{m}^3)$	$K_3(\text{m}^3)$	$K_4(\text{m}^3)$	$\sum_{i=1}^4 K_i(\text{m}^3)$
					$\sum_{i=4} K_i(\text{m}^3)$
1	20.000	20.000	8.000	2.500	50.500
2	20.000	10.000	18.000	2.500	50.500

dan zal het maximum debiet stroomafwaarts van K_1 hetzelfde zijn in beide gevallen. Dit wil natuurlijk niet zeggen dat de $QCRIT_i$, die de regeling bepalen, in situatie 1 en in situatie 2 dezelfde zijn.

Dit laat ons toe om het effect te bestuderen van een bepaalde hoeveelheid bijkomende berging, zonder ons te bekommeren om de exacte situering van deze bijkomende berging. Indien men dan effectief zou overgaan tot het beschouwen van bijkomende berging dan zal de situering moeten volgen uit:

- 1e. de potentiële berging op het terrein;
- 2e. de plaatsen stroomopwaarts van de Ter Biestmolen waar men ook een sterkere reductie van het maximum debiet wenst te bereiken dan met de huidige bestaande berging.

4.2. Het nut van bijkomende berging voor de standaardstorm

Afb. 8 geeft het maximum debiet in P in functie van de totale voorziene bergings-capaciteit, in de veronderstelling dat de standaardstorm optreedt en dat men de regeling toepast passend bij de standaard-storm en de beschouwde totale bergings-capaciteit.

Men stelt dus het volgende vast:

verhoging berging	debietreductie
0 m^3 naar 40.500 m^3	$13,7 \text{ m}^3/\text{s} - 11 \text{ m}^3/\text{s} = 2,7 \text{ m}^3/\text{s}$
40.500 m^3 naar 81.000 m^3	$11 \text{ m}^3/\text{s} - 9,9 \text{ m}^3/\text{s} = 1,1 \text{ m}^3/\text{s}$
81.000 m^3 naar 115.000 m^3	$9,9 \text{ m}^3/\text{s} - 9,2 \text{ m}^3/\text{s} = 0,7 \text{ m}^3/\text{s}$

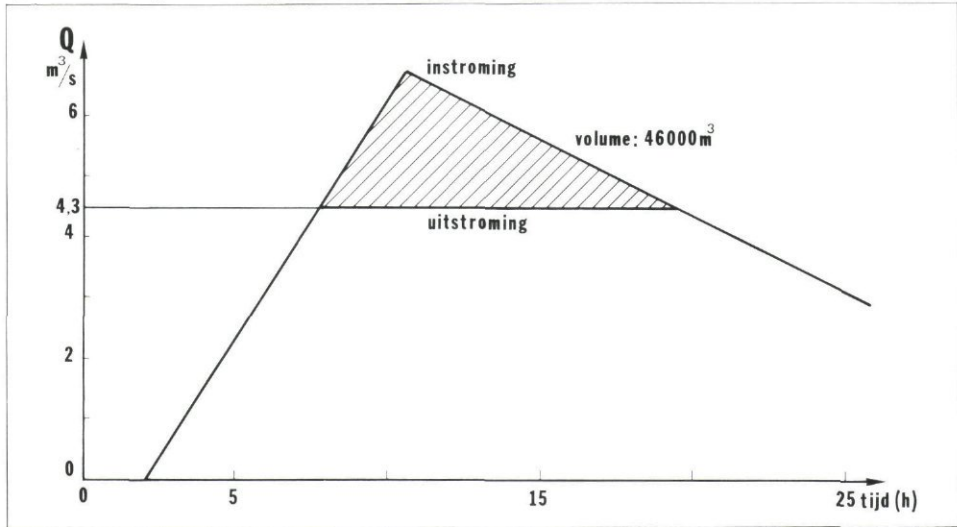
Hoe groter de bestaande berging wordt, hoe kleiner het effect is van een bijkomende berging. Met andere woorden de richtings-coëfficiënt van de maximum debietskromme is een stijgende functie van de berging (zie afb. 8).

Uit de curve is het duidelijk dat de berging nodig om verbeteringswerken aan de monding te vermijden meer dan het dried-voudige bedraagt van de huidige bestaande berging. Gezien dit praktisch niet te verwezenlijken is, is men verplicht te besluiten dat verbeteringswerken althans aan de monding van de rivier onvermijdelijk zijn. Het lijkt dan ook logisch om na te gaan waar en welke bijkomende bergingen men zou moeten voorzien om de verbeteringswerken te beperken tot de sectie stroomafwaarts van de Ter Biestmolen (R_1).

5. Bepaling van de nodige berging stroomopwaarts van de Ter Biestmolen

5.1. De gebruikte suboptimale regeling
Vermits uit het voorgaande gebleken is dat de regelingen van het type beschreven in paragraaf 2.3, de quasi maximale piek-reducties geven, zal men hier ook een dergelijk type regeling gebruiken. De waarden $QCRIT_2$, $QCRIT_3$ en $QCRIT_4$ zullen nu echter niet bepaald worden aan de hand van de bestaande berging en de instroming in het wachtbekken. Inderdaad zullen de $QCRIT_i$, $i = 2, \dots, 4$, bepaald worden door de beperking dat men tussen Borst- en Ter Biestmolen nergens de kritische afvoer-

Afb. 9 - Instroming en uitstroming uit Borstmolen (R_4) bij $QCRIT_4 = 4,3 \text{ m}^3/\text{s}$.



capaciteiten mag overschrijden, als de standaardstorm optreedt.

In afb. 1 werden de kritische afvoer-capaciteiten en de maatgevende afvoeren ingeschreven voor de verschillende segmenten van de Zwalm. Hieruit is af te leiden dat bijvoorbeeld het maximum debiet dat men mag lozen uit de Borstmolen (R_4) 4,3 m³/s is om nergens tussen Borst- en Zwalmolen het kritische debiet te overschrijden. Op overeenkomstige wijze is de maximale uitstroming uit de Zwalmolen (R_3) gelijk aan 6 m³/s en uit de IJzerkotmolen 6,7 m³/s. Men heeft dus:

$$QCRIT_4 = 4,3 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$QCRIT_3 = 6 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$QCRIT_2 = 6,7 \text{ m}^3/\text{s}$$

5.2. De nodige berging

Vermits $QCRIT_4$ gekend is alsook de uitstroming I_4 in de Borstmolen (zie afb. 3) kan men de nodige berging aan de Borstmolen berekenen, zijnde de oppervlakte onder de curve I_4 boven de waarde $QCRIT_4$ gelegen (zie afb. 9). De uitstroming samengevoegd bij de instroming I_3 (zie afb. 3) geeft de instroming in de Zwalmolen (R_3), waar men verder op dezelfde wijze te werk gaat.

Uiteindelijk geeft dit als nodige bergingen:

- Borstmolen : 46.000 m³
- Zwalmolen : 26.000 m³
- IJzerkotmolen : 8.000 m³

Gezien de bestaande bergingen (zie tabel I) zou dit dus betekenen dat de bijkomende bergingen als volgt zouden moeten verdeeld worden:

- Borstmolen : 44.500 m³
- Zwalmolen : 18.000 m³
- IJzerkotmolen : 0 m³
- Ter Biestmolen : 0 m³
- Totaal : 62.500 m³

Het is duidelijk dat rivierverbeteringswerken in strategisch gekozen secties de $QCRIT$ -waarden doen toenemen en bijgevolg de nodige bijkomende berging doen afnemen.

6. Opmerkingen en besluiten

Een aantal gevoeligheidsanalyses werd uitgevoerd om na te gaan wat de invloed is van eventuele vertragingen van de afvoeren tussen twee opeenvolgende wachtbekkens. Deze invloed bleek voldoende klein te zijn om in eerste analyse verwaarloosd te worden. In de gebruikte standaardstorm wordt de simultaneiteit ondersteld van de verschillende hydrogrammen. Voor dergelijke kleine rivierbekkens lijkt dit een verantwoorde hypothese. Bovendien geeft deze onderstelling de meest ongunstige situatie weer, vermits ze aanleiding geeft tot de maximale piekafvoeren. Een belangrijker aspect is de vorm van de gebruikte hydrogrammen, vermits deze bij

een bepaalde piekwaarde en een bepaalde $QCRIT$ -waarde de opgespaarde volumes water bepalen. Bij een definitieve keuze van de bergingen en de regelingen zou het dan ook nuttig zijn om een sensibiliteitsanalyse door te voeren, bestaande uit de simulatie van het beheer voor een reeks waargenomen stormen in het bekken.

Als algemeen besluit kan men toch stellen dat men significante reducties van de piekafvoeren kan bereiken met relatief kleine bergingen door een optimale regeling van de uitlaat van deze bergingen te voorzien.

Een dergelijke optimale regeling is praktisch uitvoerbaar door het voorzien van microprocessorgestuurde automatische klepstuwen, en van de nodige lokale telemetrie als input van deze microprocessoren.

Het is evenwel belangrijk op te merken dat hoger vermelde besluiten enkel geldig zijn voor stormsituaties waarvan de grootte de standaardstorm niet overtreft. Zo bijvoorbeeld is het zeer goed mogelijk dat men, bij stormen die de standaardstorm overtreffen, de erosie- en/of overstromingsschade in grotere mate kan beperken, dan met de besproken regelingen, door het voorzien van een uitgebreidere telemetrische informatie van de microprocessoren. Het is echter duidelijk dat men, voor het bestuderen van dergelijke, uiteraard meer ingewikkelde regelingen, moet kunnen vertrekken van gegeven bergingscapaciteiten en gegeven kritische afvoeren in verschillende secties. In de ontwerpfasen van deze bergingen en kritische afvoeren is het noodzakelijk te beschikken over een, voor de design- of standaardstorm, optimale regeling. In die zin dient men dus hoger besproken regelingen te zien als 'voorlopige optimale regelingen' met als doel de ontwerpfasen te kunnen verwezenlijken. In een latere fase zal het nodig zijn na te gaan of deze 'voorlopige optimale regelingen' niet vervangen dienen te worden door regelingen die een grotere hoeveelheid getelemetreerde informatie gebruiken. Men zal dienen na te gaan of de marginale nettobaten van dergelijke regelingen voldoende zijn om af te zien van de hier voorgestelde eenvoudige real-time regeling. Zo bijvoorbeeld, indien men zou afstappen van het principe om enkel lokale informatie te benutten dan kunnen de hoge kosten van de alsdan nodige lange transmissielijnen zodanig zijn, dat de marginale nettobaten van dit verbeterd beheer klein zijn.

Dankwoord

Dit artikel is de aangepaste tekst van de voordracht gehouden op 14-11-1980 te Gent op de studiedag 'Regulatie van Hoge afvoeren' voor het KVIV - Kultuurtechnisch Genootschap. De studie wordt uitgevoerd onder leiding van prof. G. L. Vandewiele en prof. A. Van der Beken. Onze dank gaat naar ir. Goderis, Landelijke Waterdienst en het studiebureau Agrotechniek voor de vruchtbare discussies terzake.

Literatuur

- Brans, J. P. *Lineaire Programmatie*. CSOOTW/023 bis, Dienst Uitgaven VUB, 1977.
- Chow, V. T. *Handbook of Applied Hydrology*. McGraw-Hill Book Company, New York, 1964.
- Ford, D. T. *Optimization Model for the Evaluation of Flood-Control Benefits of Multipurpose Multireservoir systems*. Technical Report CRWR 158, Center for Research in Water Resources, University of Texas at Austin, Austin, Texas, USA, 1978.
- Hillier, F. S. and Lieberman, G. J. *Introduction to operations research*. Holden-Day, Inc., 1974.
- James, L. D. and Lee, R. R. *Economics of Water Resources Planning*. McGraw-Hill Book Company, New York, 1971.
- Jamieson, D. G. and Wilkinson, J. C. 'A Short-term Control Strategy for Multi-purpose Reservoir Systems'. Water Resources Research, Vol. 8, No. 6, 1972.
- Jamieson, D. G., Smith, D. K. and Wilkinson, J. C. 'Evaluation of Short-term Operational Policies for a Multi-purpose Reservoir System'. Journal of Hydrology, Vol. 28, No. 2/4, pp. 191-213, 1976.
- Marien, J. 'A Real-time Control Policy for a Flood Protection Reservoir based on Simulation'. Problématique et Gestion des Eaux Intérieures (edited by L. Calember), Editions Derouaux, Liège, Belgium, 1978.
- Marien, J. 'Regulation of a Flood Reservoir with the Use of On-line Forecasts'. Hydrological Forecasting Symposium (Proceedings of the Oxford Symposium, April 1980), pp. 477-483, IAHS Publ. No. 129, 1980.
- Meyer-zur Well, J. 'Optimum Release Strategies for Systems of Flood Protection Reservoirs'. Proceedings of the 15th Congress of IAHR, Istanbul, Turkey, Vol. 4, 1973.
- Plate, E. J. and Schultz, G. A. 'Flood Control Policies Developed by Simulation: a Program'. Proceedings of the 2nd International Symposium on Hydrology: Water Resources Publications, Ford Collins, Colorado, USA, 1973.
- Van der Beken, A., Vandewiele, G. L., Tiberghien, J., Marien, J., Marievoet, J. and Meersseman, M. 'On-line Flow Forecasting for Automatic Operation of a Flood Reservoir'. Hydrological Forecasting Symposium (Proceedings of the Oxford Symposium, April 1980), pp. 557-5643, IAHS Publ. No. 129, 1980.
- Van der Beken, A. *Berekeningsmethodologie voor hoge afvoeren*. Het Ingenieursblad, vol. 50, nr. 9, pp. 323-239, 1981.

Waarom was de Rijn zouter dan ooit?

De Internationale Arbeitsgemeinschaft der Wasserwerke im Rheineinzugsgebiet (IAWR), het samenwerkingsverband van RIWA met haar zusterorganisaties ARW en AWBR, heeft de Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn tegen Verontreiniging gevraagd om een diepgaand onderzoek naar de oorzaken van de record-chlorideconcentratie op 20 november van 379 mg/l. Gevraagd is daarbij tevens na te gaan of het 'stand still'-beginsel geschonden is.

Ook stroomopwaarts van Lobith werden zeer hoge gehalten gemeten: op 29 november bij Mainz een waarde van 394 mg/l Cl⁻ en op 28 november bij Maxau zelfs 429 mg/l.