ALTERRA,
Wageningen Universiteit & Research centre
Omgevingswetenschappen
Centrum Water & Klimaat
Team Integraal Waterbeheer

ICW nota 1946
december 1988

nota

instituut voor cultuurtechniek en waterhuishouding, wageningen

Optimalisering van de verdeling van oppervlaktewateraanvoer op basis van landbouwkundige rendementen en een sterk geschematiseerde beschrijving van de regionale hydrologie

P.E.V. van Walsum

VOORWOORD

Deze nota is tot stand gekomen in het kader van het project 'Toepassing van niet-lineaire programmering op regionaal waterbeheer' (ICW projectnummer 100.36).

INHOUD

ALTERRA,
Wageningen Universiteit & Research centre
Omgevingswetenschappen
Centrum Water & Klimaat
Team Integraal Waterbeheer

1. INLEIDING

In het kader van het project 'Optimalisering regionaal waterbeheer in gebieden met tegengestelde belangen' (Drent(red.), in druk) is een methodiek ontwikkeld waarmee scenario's kunnen worden gegenereerd die de gebruiksmogelijkheden van een regionaal waterhuishoudingssysteem maximaal benutten. In deze methodiek is o.a. het netwerkaspect van wateraanvoer nog niet gerepresenteerd. Tot dusver is wateraanvoer namelijk gemodelleeerd als ware ieder subgebied via een aquaduct verbonden met het hoofdaanvoerpunt, wat in veel gevallen een te grote vereenvoudiging van de werkelijkheid is. Het hier beschreven waterverdelingsmodel bevat de representatie van het netwerkaspect zoals het ook in de bovengenoemde methodiek zal worden ingebracht.

Het beschreven model is meer gedacht als een gedocumenteerd tussenstation dan als een eindprodukt, hoewel het gebruik ervan in de beschreven vorm natuurlijk wel mogelijk is.

2. UITGANGSPUNTEN

Diverse factoren kunnen een beperkte beschikbaarheid van aanvoerwater tot gevolg hebben. Er ontstaat dan een verdelingsprobleem dat hier geformuleerd wordt als een wiskundig optimaliseringsvraagstuk. Dit vereist het specificeren van:
- de beslissingsvariabelen;
- de doelstellingsfunctie;
- de randvoorwaarden.

De beslissingsvariabelen zijn de variabelen waar het optimaliseringsalgoritme een waarde aan dient toe te kennen. De doelstellingsfunctie is een wiskundige functie van deze variabelen die moet worden gemaximaliseerd. Hierbij dienen de waarden van de beslissingsvariabelen dusdanig te zijn dat voldaan wordt aan de opgelegde randvoorwaarden.

Ten behoeve van de optimalisering wordt een regio opgedeeld in aanvoereenheden. Binnen een aanvoereenheid kunnen verschillende gewassen worden onderscheiden. Het aanvoersysteem wordt geschematiseerd tot een netwerk van takken en knooppunten. De hydraulica van het aanvoersysteem wordt slechts in de vorm van doorvoercapaciteiten gerepresenteerd.

De hier beschouwde vormen van watervoorziening zijn aanvoer voor peilbeheer en aanvoer voor beregening uit oppervlaktewater. Uit practische overwegingen kan het zo zijn dat wanneer een bepaalde aanvoereenheid van water wordt voorzien dit met niet minder dan een bepaalde drempelhoeveelheid geschiedt - de keuze tussen het wel of niet aanvoeren heeft dan een 'discreet' karakter.

Bij de bepaling van de netto baten van wateraanvoer wordt rekening gehouden met de volgende posten:
- de bruto baten;
- de variabele kosten;
- de vaste kosten.

De bruto baten van peilbeheer volgen uit de opbrengstvermeerdering die wordt bereikt. Dit is eveneens het geval voor beregening indien beregening plaatsvindt op een plaats waar nog niet beregend wordt

uit grondwater. Indien wel reeds beregend wordt, dan bestaan de bruto baten uit de kostenbesparing die wordt bereikt door het overbodig worden van het onttrekken van grondwater. De variabele kosten van wateraanvoer hangen direct samen met het volume water dat moet worden aangevoerd en (bij beregening) op het veld moet worden gebracht.
De vaste kosten houden verband met de infrastructuur die ten behoeve van wateraanvoer in stand moet worden gehouden ('onderhoud') of zelfs nieuw moet worden gerealiseeerd ('aanleg').

De bepaling van de bruto baten en de wateraanvoervolumes die daarvoor benodigd zijn worden geacht buiten het hier beschreven model te zijn berekend voor verschillende watervoorzieningsmogelijkheden. Deze baten en aanvoervolumes zijn afhankelijk van het weer in een bepaald jaar: in een droog jaar zijn de baten en aanvoervolumes uiteraard hoger dan in een nat jaar. De wijze waarop dit aspect in de berekeningen moet worden verwerkt hangt af van de doelstellingsfunctie die men wenst te optimaliseren. Twee gangbare alternatieven voor de doelstellingsfunctie zijn

- de 'verwachtingswaarde' van de baten;
- de baten die een bepaalde onderschrijdingskans hebben.

Ook combinaties van bovengenoemde alternatieven zijn mogelijk, waarbij voor een van de twee een randvoorwaarde (ondergrens) wordt gespecificeerd.

Om bovengenoemde alternatieven in het model te kunnen opnemen wordt het klimaat geschematiseerd tot een aantal 'weerjaren', met ieder een bepaalde kans van voorkomen. Het eerste type doelstellingsfunctie kan dan worden ingebracht als een gewogen gemiddelde van de baten in deze weerjaren, met hun kansen van voorkomen als de relatieve gewichten (zie b.v. ook Vreke, 1988). Het tweede type doelstellingsfunctie leidt tot een randvoorwaarde voor de baten in een bepaald weerjaar.

Het groeiseizoen van een weerjaar wordt in het model onderverdeeld in een aantal tijdvakken van gelijke lengte. Dit aantal wordt dusdanig gekozen dat de watervraag binnen een tijdvak als vrijwel constant mag worden beschouwd.

Wat betreft het operationele beheer van het aanvoersysteem is met de volgende aspecten rekening gehouden:

- het aanbod van aanvoerwater kan eventueel varieren per weerjaar en ook binnen een bepaald jaar. Om maximaal van het beschikbare water te kunnen profiteren kan het model de vrijheid worden gelaten om tussen de weerjaren en ook binnen een bepaald jaar van watervoorzieningsniveau te veranderen. Deze vrijheid om van niveau te wisselen kan in het model worden ingeperkt indien men het niet reeel acht dat er in een bepaalde praktijksitiuatie een dermate variabel waterbeheer kan worden uitgevoerd. Indien het veranderen van niveau wel wordt toegestaan dan is uiteraard is het hoogst voorkomende niveau van een bepaalde aanvoereenheid bepalend voor de vereiste infrastructurele voorzieningen.
- er kunnen meerdere (potentiele) inlaatpunten zijn, die op uiteenlopende hoogtes boven NAP kunnen liggen (wat van belang is voor de variabele kosten);
- behalve dat er verschillende inlaatpunten kunnen zijn die bepaalde aanvoereenheden eventueel van water zouden kunnen worden voorzien, kunnen er in sommige gevallen alternatieve routes naar de aanvoereenheden zijn;
- per weerjaar kan de optimale route verschillend zijn, en ook binnen een jaar kan het overgaan op een andere route voordelig zijn (i.v.m. het minimaliseren van de variabele kosten).

Wat betreft de relaties tussen het aanvoersysteem en de directe omgeving van het leidingenstelsel is met het volgende rekening gehouden:

- bepaalde leidingvakken ('takken') kunnen worden gevoed door drainerend grondwater;
- het watervoerend maken van bepaalde leidingvakken kan gepaard gaan met infiltratie naar het grondwater ('verliezen');
- op bepaalde plaatsen ('knooppunten') in het aanvoersysteem kunnen er lozingen of onttrekkingen zijn (b.v. door rioolwaterzuiveringsinstallaties of industrie).

Tenslotte kan het vanuit het oogpunt van waterkwaliteit wenselijk zijn in bepaalde leidingvakken een minimumdebiet te handhaven.

3. WISKUNDIGE FORMULERING VAN HET OPTIMALISERINGSVRAAGSTUK

In dit hoofdstuk wordt eerst aangegeven hoe het aanvoersysteem wiskundig beschreven wordt. Vervolgens komt de wijze van representeren van de watervoorzieningsopties aan bod. Nadat de doelstellingsfunctie is geformuleerd volgt de wiskundige beschrijving van de randvoorwaarden waar de beslissingsvariabelen aan moeten voldoen.

Het optimaliseringsvraagstuk wordt geformuleerd als een 'niet-lineair programmeringsprobleem met continue variabelen'. Dit betekent dat het eventueel 'discrete' karakter van wateraanvoer (het niet of minimaal met een bepaalde drempelhoeveelheid plegen van wateraanvoer) niet op een formeel-mathematische wijze in de formulering van het optimaliseringsvraagstuk wordt opgenomen. De reden hiervoor is dat door de toegepaste interpolatietechnieken voor de berekening van de baten het optimaliseringsalgoritme uit zichzelf reeds sterk de neiging heeft om op een van de discrete wateraanvoeropties uit te komen. In gevallen dat dit niet gebeurt kan de verkregen oplossing een nabewerking ondergaan, waarbij de wateraanvoer alsnog 'discreet' wordt gemaakt. Eventueel kan dit worden gevolgd door een nieuwe oplossingsronde om de hierdoor vrijgekomen aanvoercapaciteit van een nieuwe bestemming te voorzien. Het voordeel van deze werkwijze is dat de zeer bewerkelijke en rekenintensieve 'geheeltallige programmering' wordt vermeden zonder veel verlies aan effectiviteit.

3.1 Representatie van aanvoerinfrastructuur en aanvoereenheden

Het netwerk van takken en knooppunten wordt voortgezet tot in de aanvoereenheden. In Fig. 1 is een (fictief) netwerk getekend met bijbehorende nummeringen van knooppunten, takken en aanvoereenheden. Voor deze nummeringen worden de indices k, j en i gebruikt. De bovenwaarden van deze indices worden aangegeven met nk, nj, en ni. Voor het type gewas wordt de index g gebruikt, waarvan de bovenwaarde met ng wordt aangegeven.

Wanneer de term 'benedenstrooms' dan wel 'bovenstrooms' wordt gebezigd, dan wordt dit bedoeld in relatie tot de stromingsrichting zoals die zich voordoet bij wateraanvoer. (Indien een bepaald leidingvak vanuit

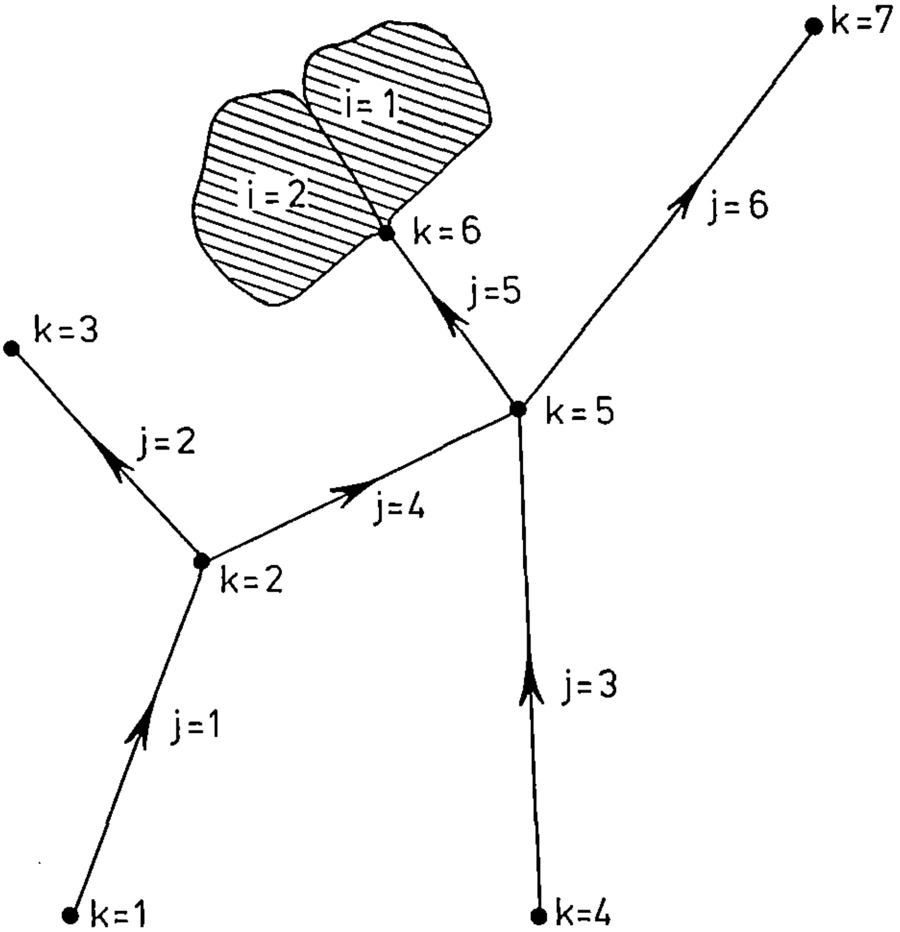

Fig. 1. Voorbeeld van een geschematiseerd aanvoersysteem, met bijbehorende nummering van knooppunten (k), takken (j) en aanvoereenheden (i).

twee verschillende kanten van water kan worden voorzien, dan wordt in het netwerk een 'parallel-leiding' geintroduceerd, met dwarsverbindingen ter hoogte van de inlaatpunten naar de aanvoereenheden.)

Ter beschrijving van het netwerk worden verder de volgende symbolen gehanteerd:

- nd(k) : aantal benedenstroomse takken vanuit knooppunt k;
- nu(k) : aantal bovenstroomse takken dat in knooppunt k samenkomt;
- jd(k,lj) : j-waarde van benedenstroomse tak lj van knooppunt k;
- ju(k,lj) : j-waarde van bovenstroomse tak lj van knooppunt k;
- ki(i) : k-waarde van het knooppunt van waaruit de watervoorziening van aanvoereenheid i plaatsvindt;
- qc(j) : doorvoercapaciteit van tak j (m3/d).

De doorvoercapaciteit hoeft niet een vaststaand gegeven te zijn; het kan een beslissingsvariabele zijn met een bepaalde kostenkarakteristiek (zie hoofdstuk 3.2).

De daadwerkelijke watervoorziening van de landbouw, inclusief het water dat wordt gebruikt voor peilbeheer, wordt gedacht plaats te vinden vanuit het eindknooppunt in een aanvoereenheid. Wat betreft het water in het aanvoernetwerk wordt de interactie met de omgeving in de vorm van infiltratie of drainage gedacht plaats te vinden in de takken. Daarentegen worden lozingen en onttrekkingen gedacht plaats te vinden in de knooppunten. Dit is eveneens het geval met de aanvoer van water van buiten en het eventueel weer uitstromen van water aan de andere zijde van het beschouwde gebied.

3.2 Beslissingsvariabelen m.b.t. transport van water en watervoorziening van de landbouw

Voor het kunnen hanteren van 'weerjaren' en tijdvakken binnen de groeiseizoenen van die jaren worden resp. de indices m en t gebruikt, met als bovenwaarden nm en nt.

Ter beschrijving van de stroming door het netwerk en de interactie met de omgeving worden de volgende variabelen geintroduceerd:
- qi(j,m,t) : instroomdebiet van tak j (m3/d);
- qo(j,m,t) : uitstroomdebiet van tak j (m3/d);
- qd(j,m,t) : drainagedebiet naar tak j (m3/d);
- qg(j,m,t) : infiltratiedebiet van tak j (m3/d);
- qb(k,m,t) : lozing (interne knooppunten) of aanvoer van buiten (randknooppunten) naar knooppunt k (m3/d);
- qp(k,m,t) : onttrekking (interne knooppunten) of doorvoer over de rand van het gebied (randknooppunten) in knooppunt k (m3/d).

Het gebruik van aanvoerwater door de landbouw in een bepaalde aanvoereenheid wordt gerepresenteerd door een aantal elkaar uitsluitende opties. Deze opties worden aangegeven met behulp van de index w, en het totaal aantal opties waarmee het model wordt geimplementeerd met nw.

Wanneer bijvoorbeeld nw=3 wordt genomen, dan zijn er de volgende watervoorzieningsopties:

- w = 0 : geen wateraanvoer;
- w = 1 : aanvoer ten behoeve van peilbeheer;
- w = 2 : aanvoer ten behoeve van beregening uit oppervlaktewater met een capaciteit van B mm/d;
- w = 3 : aanvoer ten behoeve van beregening uit oppervlaktewater met een capaciteit van 2B mm/d;

Een waarde van B overeenkomend met een beregeningsgift in de orde van grootte van 25 mm per 14 dagen zal in de meeste praktijkgevallen voldoen. De beregeningscapaciteit van een bepaalde beregeningsoptie bedraagt (w-1)*B mm/d.

Een bepaalde watervoorzieningsoptie wordt in het model gerepresenteerd door een continue variabele x(i,g,w,m,t) die een een waarde kan aannemen tussen 0 en 1:

- x(i,g,w,m,t) : de fractie van de oppervlakte van gewas g in aanvoereenheid i die op niveau w wordt voorzien van aanvoerwater tijdens tijdvak t van weerjaar m (-).

Indien het varieren van het watervoorzieningsniveau tussen verschillende tijdvakken en weerjaren als niet reeel wordt gezien dan moet de index t en eventueel ook m komen te vervallen.

3.2 Doelstellingsfunctie en aanverwante hulpvariabelen

Zoals bij de beschrijving van de uitgangspunten is gesteld in hoofdstuk 2, worden de netto baten berekend aan de hand van de volgende drie posten:

- de bruto baten;
- de variabele kosten;
- de vaste kosten;

De variabele kosten die gemoeid zijn met het op het veld brengen van het water worden hier geacht te zijn verwerkt in de bruto baten. Met bruto baten wordt dus eigenlijk bedoeld de netto baten van aanvoer zonder verdiscontering van de variabele kosten van watertransport door het leidingenstelsel.

De variabele kosten per eenheid van debiet worden geacht buiten het model te zijn berekend, voor iedere tak van het netwerk. In het model worden deze kostenparameters vermenigvuldigd met de instroomdebieten van de takken.

Wanneer als doelstellingsfunctie de verwachtingswaarde van de netto baten wordt genomen, dan wordt hiervoor als benadering gebruikt de gewogen som van de baten minus de kosten in de verschillende weerjaren, waarbij als gewichten worden genomen de kansen van voorkomen van de weerjaren. De vaste kosten zijn onafhankelijk van het weer en vallen dus buiten de berekening van deze gewogen som:

$$Y = \sum_{m=1}^{nm} w(m)*\sum_{t=1}^{nt} \left(\sum_{i=1}^{ni} \sum_{g=1}^{ng} \sum_{w=1}^{nw} bx(i,g,w,m,t)*x(i,g,w,m,t) - \sum_{j=1}^{nj} rqi(j)*qi(j,m,t)\right) - \sum_{j=1}^{nj} pqc(j) \quad (1)$$

waarin:

- Y : verwachtingswaarde van de netto baten (f/jr);
- w(m) : kans van voorkomen van ee weerjaar m (-);
- bx(i,g,w,m,t) : bruto baten van wateraanvoer (f/jr);
- rqi(j) : variabele kosten per eenheid van instroom in tak j (f/jr/(m3/d));
- pqc(j) : vaste kosten van tak j van het aanvoernetwerk (f/jr).

Omdat de vaste kosten van wateraanvoer niet een lineaire functie hoeven te zijn van de doorvoer- en opvoercapaciteit, worden zogenaamde lineaire splines gebruikt voor de kostenfuncties van de infrastructuur. Tussen de discrete opties waarvoor de kosten bekend zijn wordt dus eenvoudigweg lineair geinterpoleerd (zie Fig. 2).

Een dergelijke spline kan als volgt door middel van vergelijkingen worden gerepresenteerd:

$$pqc(j) = \sum_{ls=1}^{nls(j)} rqs(j,ls) * qs(j,ls) \ , \qquad (2)$$

voor alle j, met

$$qc(j) = \sum_{ls=1}^{nls(j)} qs(j,ls) \ , \qquad (3)$$

voor alle j, waarin

- pqc(j) : vaste kosten verbonden aan het hebben van een doorvoercapaciteit qc(j) (f/jr)
- ls : index voor traject nummer van de lineaire spline
- qs(j,ls) : hulpvariabele voor het construeren van een lineaire spline voor de vaste kosten (m3/d)
- rqs(j,ls) : vaste kosten per eenheid van qc(j) in het traject ls van de lineaire spline (f/jr/(m3/d))

Voorwaarde voor het juist zijn van vgl.(2) is dat de hulpvariabelen qs(j,ls) van 'links naar rechts worden opgevuld' (zie ook Fig. 2.) Aangezien de kosten niet een dusdanige functie van de capaciteit hoeven te zijn dat het opvullen op de juiste wijze geschiedt, zal er met behulp van extra nevenvoorwaarden hiervoor gezorgd moeten worden. Dit geschiedt als volgt:

- de variabelen qs(j,ls) worden geimplementeerd als beslissingsvariabelen van het optimaliseringsvraagstuk met als bovengrenzen qsmax(j,ls);
- m.b.v. randvoorwaarden wordt ervoor gezorgd dat het optimaliseringsalgoritme pas met het groter dan nul maken van een bepaalde qs(j,ls+1) kan beginnen als de variabele qs(j,ls) tegen zijn bovengrens qsmax(j,ls) aan zit.

De bedoelde bovengrenzen en randvoorwaarden luiden

$$qs(j,ls) =< qsmax(j,ls), \qquad (4)$$

voor alle j en ls=1,...,nls(j) , en

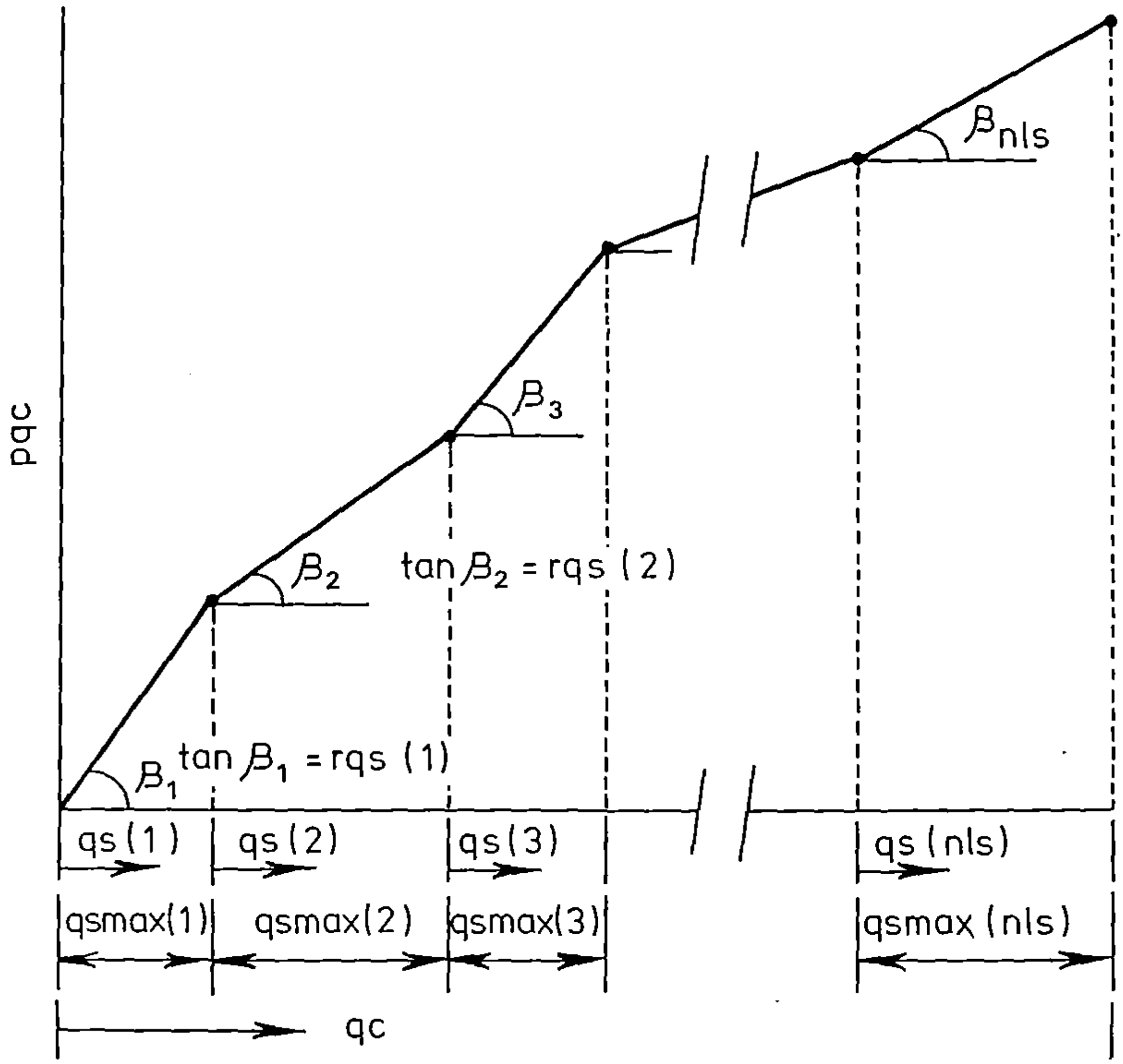

Fig. 2. Vaste kosten van de doorvoercapaciteit (pqc) van een tak: benadering met behulp van een lineaire spline functie.

$$[qs(j,ls) - qsmax(j,ls)] * qs(j,ls+1) = 0, \tag{5}$$

voor alle j en ls=1,...,(nls(j)-1).

De werking van deze beperkingen is als volgt:

- zolang qs(j,ls) niet tegen zijn bovengrens aan zit is de eerste factor van het product ongelijk aan nul; dit dwingt het optimaliseringsalgoritme qs(j,ls+1) op de waarde nul te houden;
- de eerste factor van het produkt wordt gelijk aan nul wanneer qs(j,ls) gelijk is geworden aan zijn bovengrens; het optimaliseringsalgoritme is dan 'vrij' de variabele qs(j,ls+1) een waarde binnen het interval [0,qsmax(j,ls+1)] toe te kennen.

3.3 Randvoorwaarden

3.3.1 Takken

De aanvoer speelt zich af binnen de randvoorwaarden die bepaald worden door de (al of niet aan te passen) aanwezige infrastructuur. Ten eerste betreft dit de transportcapaciteit van de leidingvakken (inclusief de eventueel benodigde oppompinstallaties). De doorvoercapaciteit van een leidingvak moet zodanig zijn dat ten allen tijden het instroomdebiet verwerkt kan worden:

$$qi(j,m,t) =< qc(j), \tag{6}$$

voor alle j, m en t. (Andersom geredeneerd moet ten allen tijden het instroomdebiet de aanwezige capaciteit niet overschrijden.)

Over het algemeen zal water dat door een tak stroomt niet geisoleerd zijn van de ondergrond: er zal een interactie zijn in de vorm van infiltratie van oppervlaktewater of voeding met uitstromend grondwater. Hier wordt deze interactie in de vorm van een constante parameter gemodelleerd. In het geval dat er grondwater draineert naar een bepaalde tak is deze parameter eenvoudigweg het drainagedebiet; de variabele die met dit debiet overeenkomt wordt aan deze parameter gelijkgesteld:

qd(j,m,t) = qdfix(j,m,t) , (7)

voor bepaalde j en alle m en t, waarin

- qd(j,m,t) : drainagedebiet naar tak j (m3/d);
- qdfix(j,m,t) : constante waarde van qd(j,m,t) (m3/d).

In het geval dat er infiltratie in een bepaalde tak kan plaatsvinden als gevolg van een relatief diepe lokale grondwaterstand, dan komt de constante parameter overeen met de maximale waarde van de infiltratie. Het al of niet plaatsvinden van infiltratie hangt echter af van het voldoende beschikbaar zijn van aanvoerwater. De infiltratie wordt in het optimaliseringsmodel berekend met behulp van een exponentiele functie (zie Fig. 3). Deze functie laat de hoeveelheid infiltratie de maximumwaarde asymptotisch naderen bij het toenemen van het instroomdebiet:

qg(j,m,t) = qgmax(j,m,t) * (1 - exp[-s*qi(j,m,t)/qgmax(j,m,t)]), (8)

voor bepaalde j, en alle m en t, waarin

- qg(j,m,t) : infiltratiedebiet van tak j (m3/d);
- qgmax(j,m,t) : maximale infiltratie (m3/d);
- qi(j,m,t) : instroomdebiet (m3/d);
- s : richtingscoefficient (=<1) van de raaklijn van de grafiek in het punt (0,0).

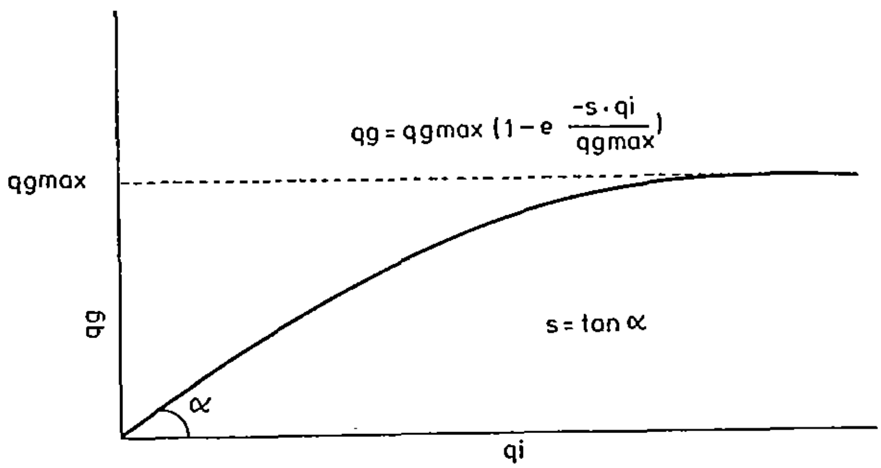

Fig. 3. Infiltratie in een tak (qg) als functie van het instroomdebiet (qi)

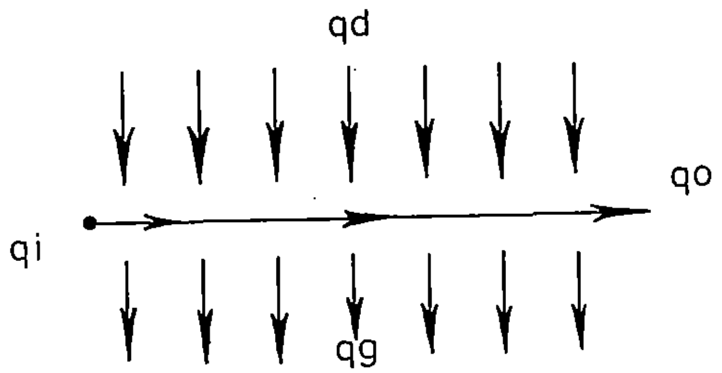

Fig. 4. Definitieschets voor de waterbalans van een tak:
qi - instroomdebiet
qo - uitstroomdebiet

Het uitstroomdebiet qo(j,m,t) van een tak volgt eenvoudig uit de waterbalans (zie ook Fig. 4):

$$qo(j,m,t) = qi(j,m,t) + qd(j,m,t) - qg(j,m,t), \qquad (9)$$

voor j, m en t. In verband met lozingen van rioolwaterzuiverings-installaties kan het nodig zijn in bepaalde takken een minimumdebiet voor doorspoeling te handhaven. In het model wordt met dit aspect rekening gehouden door middel van ondergrenzen van uitstroomdebieten van bepaalde takken:

$$qo(j,m,t) >= qomin(j,m,t), \qquad (10)$$

voor bepaalde j en alle m en t, waarin
- qomin(j,m,t) : minimumdebiet door tak j (m3/d).

3.3.2 Knooppunten

Per knooppunt wordt een bron- en een putvariabele gedefinieerd. Een bronvariabele heeft een positieve waarde wanneer water aan een knooppunt wordt toegevoegd. Dit kan zijn in de vorm van een 'lozing' of 'aanvoer' van water. Een putvariabele heeft een positieve waarde als er water wordt onttrokken aan een knooppunt of wanneer water via dit knooppunt het gebied verlaat. Voor de knooppunten waar de waarde van de bronvariabele wordt opgelegd (daar waar er een lozing is) geldt:

$$qb(k,m,t) = qbfix(k,m,t), \tag{11}$$

voor bepaalde k en alle m en t, waarin
- qbfix(k,m,t) : omvang van de lozing in knooppunt k (m3/d).

Voor de knooppunten waar aanvoer van buiten het gebied binnenkomt wordt de bronvariabele vrij gelaten tussen de waarde 0 en de maximale hoeveelheid qbmax(k,m,t) die in een bepaald tijdvak van een weerjaar beschikbaar is:

$$0 \leq qb(k,m,t) \leq qbmax(k,m,t) \tag{12}$$

voor bepaalde k en alle m en t.

Voor de knooppunten waar de waarde van de putvariabele wordt opgelegd geldt:

$$qp(k,m,t) = qpfix(k,m,t), \tag{13}$$

voor bepaalde k en alle m en t.

Met de structuur van het aanvoernetwerk wordt bij de optimalisering rekening gehouden door middel van een stelsel randvoorwaarden die overeenkomen met de waterbalansen van de knooppunten (zie ook Fig. 5). Met de volgende termen wordt rekening gehouden:

a. lozingen en onttrekkingen (interne knooppunten), aanvoer en afvoer (randknooppunten);
b. watervraag van de landbouw indien het een eindknooppunt in een aanvoereenheid betreft;
c. aanvoer van water via bovenstroomse takken;
d. afvoer van water via benedenstroomse takken.

Term a. wordt gerepresenteerd door de variabelen qb(k,m,t) en qp(k,m,t).

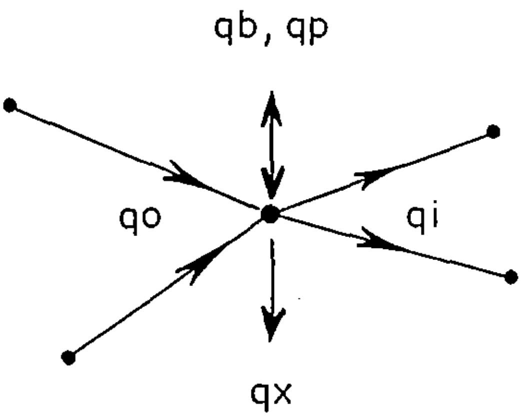

Fig. 5. Definitieschets voor de waterbalans van een knooppunt:

qi - instroomdebiet van een tak

qo - uitstroomdebiet van een tak

qb - lozing/aanvoer van het knooppunt

qp - onttrekking/doorvoer van het knooppunt

qx - watervoorziening van de landbouw

Term b. wordt gerepresenteerd door de uitdrukking

$$\left. \sum_{i-1}^{ni} \sum_{g=1}^{ng} \sum_{w-1}^{nw} x(i,g,w,m,t)*qx(i,g,w,m,t) \right|_{ki(i)-k}$$

waarin

- qx(i,g,w,m,t) : debiet dat vereist is voor het realiseren van een watervoorzieningsoptie (m3/d).

De vertikale streep en 'ki(i)-k' geven aan dat alleen indien ki(i)-k de betreffende uitdrukking in de waterbalans van knooppunt k opgenomen dient te worden.

Term c. wordt weergegeven door de uitdrukking

$$\sum_{lj-1}^{nu(k)} qo(ju(k,lj),m,t)$$

En term d. door de analoge uitdrukking

$$\sum_{lj-1}^{nd(k)} qi(jd(k,lj),m,t)$$

Samengevoegd tot een vergelijking voor de waterbalans van een knooppunt k voor een tijdvak t in een weerjaar m geeft dit:

$$qb(k,m,t) - qp(k,m,t) - \left. \sum_{i=1}^{ni} \sum_{g=1}^{ng} \sum_{w=1}^{nw} x(i,g,w,m,t)*qx(i,g,w,m,t) \right|_{ki(i)=k} +$$

$$\sum_{lj=1}^{nu(k)} qo(ju(k,lj),m,t) - \sum_{lj=1}^{nd(k)} qi(jd(k,lj),m,t) = 0, \qquad (14)$$

voor alle k, m en t.

3.3.3 Aanvoereenheden

De variabelen die de watervoorzieningsopties representeren dienen binnen het interval [0,1] te liggen omdat deze variabelen zijn genomen als fracties van de oppervlakte van een bepaald gewas:

$$0 =< x(i,g,w,m,t) =< 1 , \qquad (15)$$

voor alle i,g,w,m, en t, inclusief w=0 (=geen extra watervoorziening). Uiteraard dienen de fracties van de oppervlakten van een bepaald gewas op te tellen tot de eenheid:

$$\sum_{w=0}^{nw} x(i,g,w,m,t) = 1, \qquad (16)$$

voor alle i, g, m en t.

In de praktijk geschiedt peilbeheer op het niveau van een 'peilvak'. Uiteraard is het dan niet mogelijk binnen een peilvak de 'mate van peilbeheer' te varieren per gewas. Er wordt hier echter van uit gegaan dat binnen een bepaald peilvak er over het algemeen slechts een type gewas voorkomt. Indien er binnen een aanvoereenheid meerdere gewassen zijn wordt dus aangenomen dat er ook meerdere peilvakken zijn. Per gewas is kan dan de watervoorziening verschillend zijn.

LITERATUUR

Drent, J. (red.). in druk. Optimalisering regional waterbeheer in gebieden met tegengestelde belangen. Rapport. ICW, Wageningen.

VREKE, J. 1988. Het waterverdelingsvraagstuk in het kader van het project 'Waterbeheer Midden en Oostelijk Noord-Brabant': de opzet van het verdelingsmodel. Nota 1872, ICW, Wageningen.