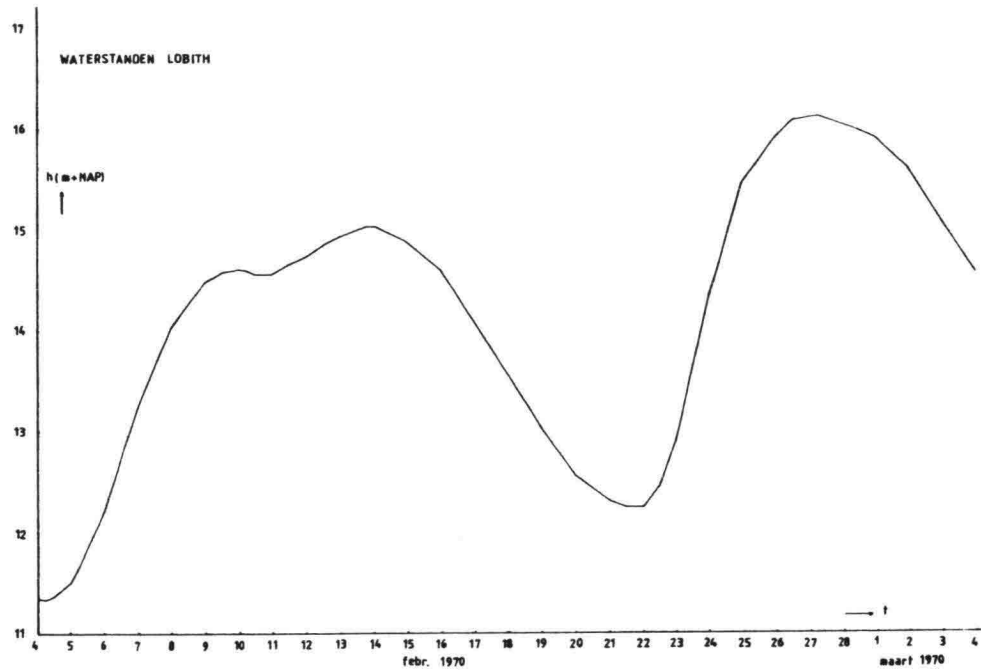


# Voorspellingsmodel voor hoogwater op de Rijn

Onderzoek verricht in opdracht van Rijkswaterstaat (Nr. WW 440)

Maart 1986

G.N. Slats/N. Booij/H.R. Vermeulen



Deel 1: Projectverslag (Tekst)

## Voorwoord

Dit rapport betreft het in opdracht van Rijkswaterstaat door de Technische Hogeschool Delft uitgevoerde project "Voorspellingsmodel voor Hoogwater op de Rijn".  
Nummer overeenkomst WW 440.

In aansluiting op zijn gelijknamig afstudeerverslag werd door ir. G.N. Slats in het kader van dit project het op de TH ontwikkelde voorspellingsmodel operationeel gemaakt op de Univac computer van Rijkswaterstaat.

Het complete project verslag bestaat uit twee delen:

- dit project verslag met bijlagen
- een gebruikershandleiding voor het voorspellingsmodel op de Univac

Waar nodig wordt verwezen naar eerdergenoemd afstudeerverslag, waarvan een exemplaar in het bezit van Rijkswaterstaat is.

De eindverantwoordelijkheid en begeleiding waren in handen van ir. H.R. Vermeulen en dr.ir. N. Booy, Afdeling der Civiele Techniek, Technische Hogeschool Delft.

Van de zijde van de opdrachtgever werd het project begeleid door J.G. de Ronde en ir. L.P.M. de Vrees, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging.

Delft, maart 1986

Inhoudsopgave

Hoofdstuk	Omschrijving	blz.
	Voorwoord	
	Overzicht bijlagen	4
1.	Inleiding	6
2.	Opzet hoogwaterberekening	8
3.	Programma-systeem ZWENDL	11
3.1.	Stuurinvoerbestand	12
3.2.	Randvoorwaardenbestand	13
3.3.	Schematisatiebestand	14
3.4.	Beginvoorwaardenbestand	17
3.4.1.	Beginvoorwaarden bij de opstart van de hoogwater- berekening	18
4.	Voorschakelprogramma voor de eigenlijke hoogwater- berekening	24
4.1.	Programma 'SCHRIJVEN.ZWENDL'	25
4.1a	Omzetting van waterstanden naar debieten	26
4.1b	Debietcorrectie voor het hysteresis-effect	26
4.1c	Genereren van een reeks 3-uurs debieten uit een discon- tinue reeks debieten	27
4.1d	Vermenigvuldigingsfactoren en -termen voor de debieten van grotere zijrivieren	28
4.1e	Debieten van de kleinere zijrivieren	28
4.1f	Afvoervoorspelling op de instroomranden	29
4.1g	Minimum en maximum debiet	32
5.	Criteria voor het gebruik van het model	44
6.	Conclusies en aanbevelingen	48
7.	Literatuurlijst	50

Overzicht Bijlagen

	Omschrijving
Bijlage 1	Stuurinvoerbestand
Bijlage 2	Randvoorwaardenbestand
Bijlage 3	Schematisatiebestand
Bijlage 4	Invloed van bodem veranderingen op de Rijn op de afvoer- voorspelling bij Lobith
Bijlage 5	Beginvoorwaardenbestand
Bijlage 6	Dummy-beginvoorwaardenbestand
Bijlage 7	Voorschakelprogramma 'INLEZEN.RUN'
Bijlage 8	Invoerbestand met gegevens van meetstation Mainz (Rijn)
Bijlage 9	Idem voor Grolsheim (Nahe)
Bijlage 10	Idem voor Kalkofen (Lahn)
Bijlage 11	Idem voor Cochem (Moezel)
Bijlage 12	Idem voor Menden (Sieg)
Bijlage 13	Idem voor Hattingen (Ruhr)
Bijlage 14	Idem voor Schermbeck (Lippe)
Bijlage 15	Idem voor de Ahr

Omschrijving

- Bijlage 16    Idem voor de Wied
- Bijlage 17    Idem voor de Wupper
- Bijlage 18    Idem voor de Erft
- Bijlage 19    Computerprogramma 'SCHRIJVEN.ZWENDL'
- Bijlage 20    Verklaring parameters in het computerprogramma  
'SCHRIJVEN.ZWENDL'
- Bijlage 21    Benadering van de afvoerreeks door een functievoorschrift
- Bijlage 22    IMSL SUBROUTINES RLFOTH en RLDOPM
- Bijlage 23    Overeenkomst tot het ontwikkelen van een hoogwatervoorspel-  
lingsmodel voor de Rijn.  
Nr. WW 440, Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en  
Waterbeweging.

1. Inleiding

Dit verslag geeft een overzicht van de werkzaamheden die in het kader van een project voor Rijkswaterstaat (No. WW 440, Bijlage 23) zijn uitgevoerd.

Het project is een vervolg op het onderzoek naar een voorspellingsmodel voor hoogwater op de Rijn (lit. 1). Het daarbij ontwikkelde voorspellingsmodel is gebaseerd op het flood-routing principe en geeft voorspellingen voor Lobith tot 3 dagen vooruit.

De berekening maakt gebruik van het standaardcomputerprogramma FLOWS (ICES-STRU DL pakket, TH Delft).

Het doel van dit project is het operationeel maken van het ontwikkelde hoogwatervoorspellingsmodel voor de Rijn.

In de eerste fase van het project is het model herschreven voor het programma-systeem ZWENDL en overgezet op de UNIVAC-computer van Rijkswaterstaat.

In de tweede fase van het project stond de uitvoering van de hoogwaterberekening centraal. Hierbij is onder meer een voorschakelprogramma ontwikkeld dat de door de gebruiker ingevoerde gegevens (waterstanden en neerslagen) transformeert naar invoerbestanden (afvoeren) voor het programma-systeem ZWENDL.

Het verslag is opgebouwd uit een 6-tal hoofdstukken, welke hieronder kort worden besproken.

Volgend op de inleiding wordt in hoofdstuk 2 de opzet van de hoogwatervoorspelling toegelicht, bestaande uit een toelichting op de rekenprocedure alsmede een overzicht van de door de gebruiker in te voeren gegevens.

Voor de eigenlijke hoogwaterberekening wordt gebruik gemaakt van het programma-systeem ZWENDL.

Het systeem is opgebouwd uit het rekenprogramma ZWENDL30, waaraan vier invoerbestanden worden gekoppeld (zie hoofdstuk 3).

Deze 4 invoerbestanden zijn achtereenvolgens het stuurinvoerbestand, het randvoorwaardenbestand, het schematisatiebestand en het beginvoorwaardenbestand.

Van elk invoerbestand wordt toegelicht wat de functie is en hoe het is opgebouwd.

Met betrekking tot de opbouw van het randvoorwaardenbestand dient er een transformatie plaats te vinden van de door de gebruiker opgegeven reeksen waterstanden naar equidistante afvoerreeksen, die geschikt zijn voor het rekenprogramma ZWENDL 30.

Deze transformatie wordt uitgevoerd in een voorschakelprogramma voor de eigenlijke hoogwaterberekening (zie hoofdstuk 4).

Aangezien het model slechts voor een beperkt waterstandsbereik geijkt is - het betreft hier de modellering van dwarsprofielen, uiterwaarden, C-waarden e.d. - wordt in hoofdstuk 5 een aantal criteria gegeven voor het gebruik van het voorspellingsmodel.

Het laatste hoofdstuk bestaat uit conclusies en aanbevelingen voor nader onderzoek.

## 2. Opzet hoogwaterberekening

De hoogwaterberekening voor de Rijn betreft hier een afvoervoorspelling voor Lobith tot 3 dagen vooruit, waarbij gebruik wordt gemaakt van het programma-systeem ZWENDL.

Om het programma-systeem ZWENDL toe te kunnen passen zijn de Rijn en haar zijrivieren geschematiseerd tot een hydraulisch netwerk, bestaande uit takken en knooppunten.

In figuur 2.1. is een overzichtskaartje getekend van de Rijn en de zijrivieren, alsmede van de meetstations, die in het voorspellingsmodel voorkomen.

De invoergegevens bestaan uit de gemeten waterstanden bij het meetstation Mainz op de Rijn en een aantal meetstations op de zijrivieren; in een aantal gevallen zal de computer om neerslaggegevens vragen.

De door de gebruiker ingevoerde gegevens worden in een voorschakelprogramma getransformeerd naar een equidistante reeks debieten op de instroomranden van het netwerk, met een vaste tijdstap van 3 uur. Door deze debieten op de randen te leggen wordt binnen het netwerk een hoogwatergolf opgewekt, welke na verloop van tijd bij Lobith zal arriveren.

De gebruiker kan het hoogwaterverloop bij Lobith volgen door de debieten gedurende de voorspelperiode met een vaste regelmaat te laten afdrukken.

De hoogwaterberekening is uit drie fasen opgebouwd, indien de hoogwatergolf voor de eerste maal wordt doorrekend.

De hoogwaterberekening bestaat uit één fase, indien de hoogwatergolf al eerder werd doorgerekend.

Het doel van de twee extra berekeningen, indien de hoogwaterberekening voor de eerste maal wordt uitgevoerd, is de begintoestand in het netwerk op het voorspel-tijdstip  $T_{vsp}$  te bepalen. In andere woorden betekent dit dat het model ingespeeld moet worden.



De inspeelperiode bestaat dus uit twee fasen, zie ook figuur 3.2.

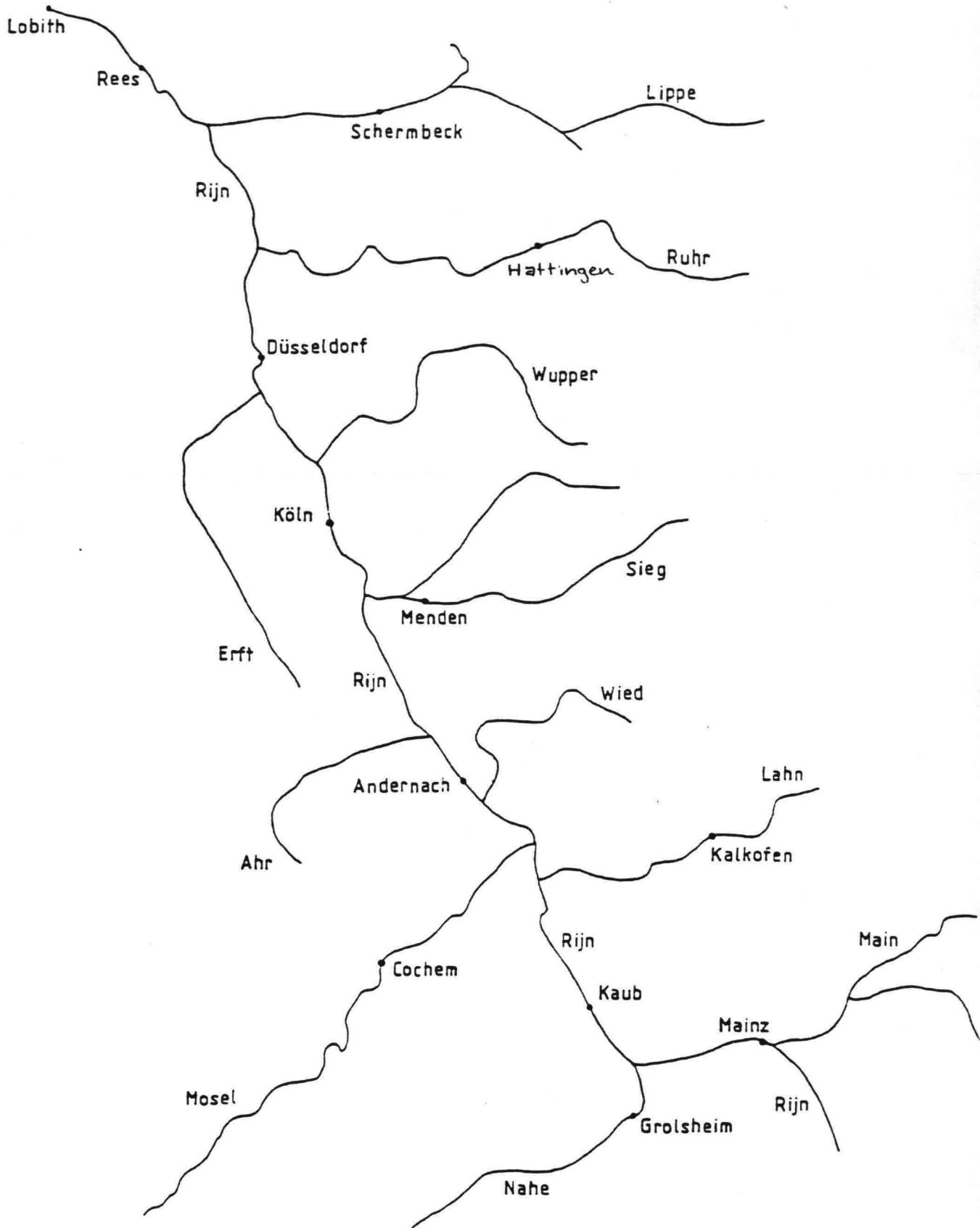
Gedurende aanlooperperiode 1 vindt er een overgang plaats van de standaardtoestand in het netwerk naar een begintoestand voor de betreffende hoogwatergolf.

Gedurende aanlooperperiode 2 worden de werkelijke debieten op de instroomranden van het netwerk tot aan voorspeltijdstip  $T_{vsp}$  opgelegd. Voor de duur van aanlooperperiode 2 is drie dagen gekozen, ongeveer gelijk aan de looptijd van de verst weggelegen instroomrand (Mainz) tot Lobith.

De toestand in het netwerk aan het einde van de inspeelperiode, dus op tijdstip  $T_{vsp}$ , geldt als begintoestand bij de eigenlijke hoogwaterberekening(en).

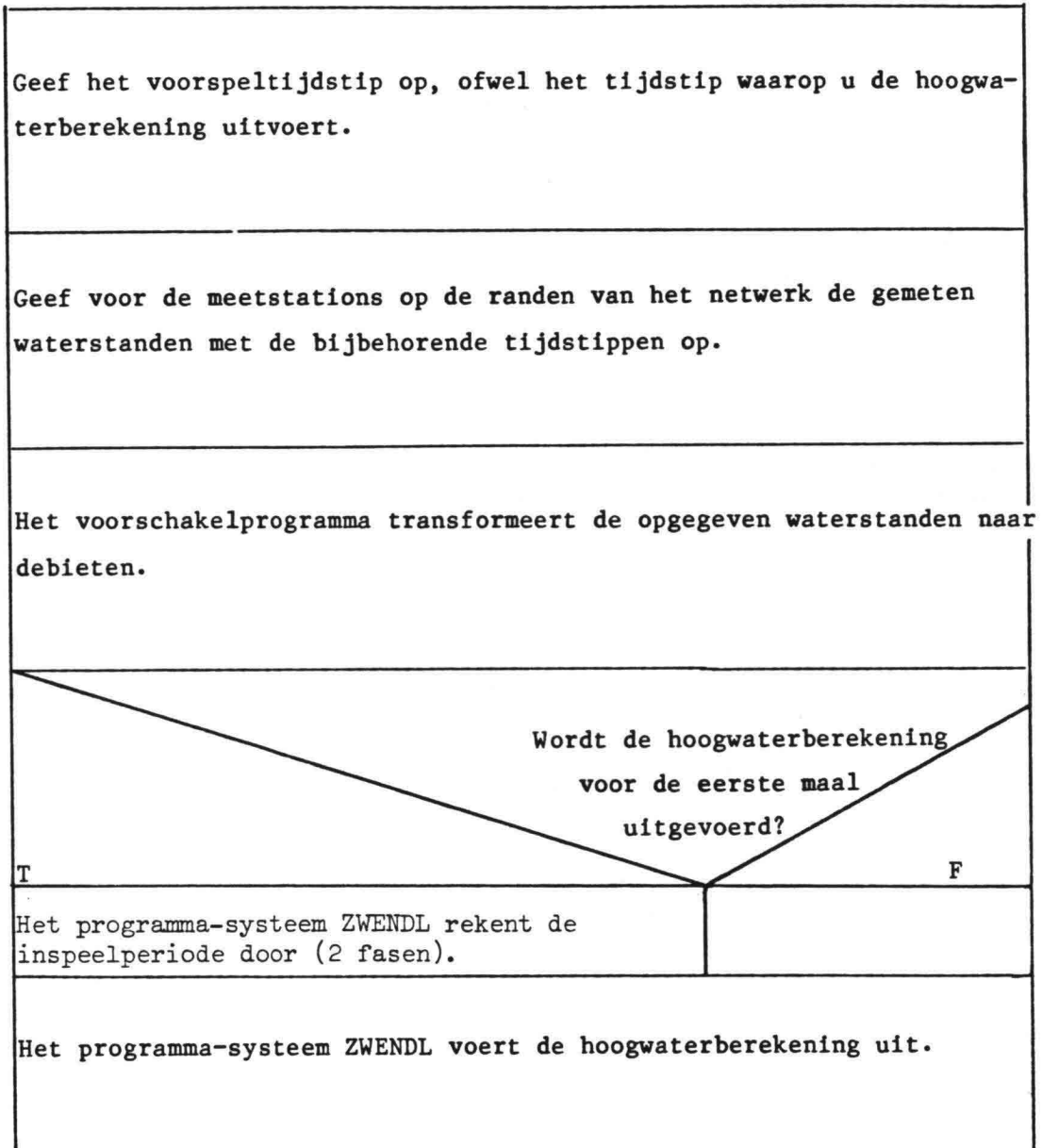
In paragraaf 3.4.1. wordt een en ander m.b.t. de inspeelperiode nader toegelicht.

In figuur 2.2. is de hiervoor beschreven opzet van de hoogwaterberekening in een structuurdiagram weergegeven.



Figuur 2.1: Overzichtskaartje van de Rijn en de zijrivieren die in het voorspellingsmodel voorkomen.

Figuur 2.2. Hoofdstructuurdiagram van de hoogwaterberekening.



T = True

F = False

3. Programma-systeem ZWENDL

Er is voor het programma-systeem ZWENDL gekozen omdat IMPLIC ten tijde van de eerste aanroep niet werkte .

ZWENDL is een uitbreiding van IMPLIC met een vergelijking voor de zoutbeweging.

ZWENDL staat voor 'zout- en waterbeweging een-dimensionaal noordelijk deltabekken' en is ontwikkeld door de directie Benedenrivieren van Rijkswaterstaat.

Het programma-systeem ZWENDL bestaat uit verschillende deelprogramma's.

Het programma ZWENDL 30 is het eigenlijke rekenprogramma, dat een eendimensionale berekening van de water- en zoutbeweging uitvoert in een gebied dat geschematiseerd is als een netwerk van open waterlopen. Het netwerk is opgebouwd uit vakken.

De rekenprocedure van de waterbeweging bestaat uit een numerieke uitwerking van de Saint-Venant vergelijking en de continuïteitsvergelijking.

Aan het rekenprogramma ZWENDL 30 wordt een 4-tal invoerbestanden gekoppeld, achtereenvolgens een stuurinvoerbestand, een randvoorwaardenbestand, een schematisatiebestand en een beginvoorwaardenbestand. Het stuurinvoerbestand bevat o.a. het begin- en eindtijdstip van de berekeningsperiode, alsmede de rekentijdstap. (zie paragraaf 3.1.) Het randvoorwaardenbestand kan bestaan uit verschillende typen randvoorwaarden zoals tijd-reeksen of permanente randvoorwaarden. Als randvoorwaarden kunnen debieten en/of waterstanden worden opgelegd (zie paragraaf 3.2.)

In het schematisatiebestand wordt het netwerk van open waterlopen opgegeven. Het netwerk bestaat uit vakken en knooppunten. Per vak zijn onder meer opgegeven: vaknummer, beginknoopnummer, eindknoopnummer, vaklengte, Chézy-waarde, bodemverhang en stroomvoerend dwarsprofiel (zie paragraaf 3.3.).

In het beginvoorwaardenbestand kunnen voor elk vak de waterstanden en debieten op het begintijdstip van de berekening worden opgegeven (zie paragraaf 3.4.).

Het programma-systeem ZWENDL berekent op ieder tijdstip voor ieder vak in het netwerk waterstanden en debieten.

Tijdens de programma-executie kunnen gegevens per berekeningsstap worden uitgeprint, terwijl vanaf een gegeven tijdstip de gewenste berekeningsresultaten op een uitvoerbestand kunnen worden gezet.

Op een gegeven tijdstip kan de berekende situatie van het netwerk naar een bestand worden weggeschreven, om deze situatie later als beginvoorwaarde te gebruiken bij een volgende berekening.

### 3.1. Stuurinvoerbestand

Het stuurinvoerbestand bevat wat algemene gegevens omtrent de uitvoering van de hoogwaterberekening.

In deze paragraaf worden de verschillende codes toegelicht zoals ze voorkomen in het stuurvoorwaardenbestand op bijlage 1.

De DATY-kaart geeft informatie omtrent de berekeningsperiode met achtereenvolgens begindatum/begintijdstip en einddatum/eindtijdstip van de berekening, de rekestijdstap - welke gelijk is aan 15 min. voor de inspeelperiode en 20 min bij de hoogwatervoorspelling - en de tijdstap waarmee de resultaten worden weggeschreven.

De ALFA-kaart bevat de numerieke dempingsfactor  $\theta$  ( $= 1-\alpha$ ).

Gedurende de inspeelperiode is een dempingsfactor  $\theta = 1$  gekozen; voor de voorspelperiode bleek  $\theta = 0,8$  het beste resultaat op te leveren (lit. 1).

Uit de PRIV-kaart volgt dat tijdens de programma-executie de waterstanden en debieten van vak 20 worden afgedrukt; Lobith is namelijk het bovenstrooms gelegen knooppunt van vak 20.

De QMEE- en HMEE-kaarten laten zien dat de berekende debieten resp. waterstanden voor alle vakken van het netwerk naar een resultatenbestand worden weggeschreven.

De DUMP-kaart bevat het tijdstip - hier het eindtijdstip van de berekeningsperiode - waarop de situatie van het gehele netwerk wordt bepaald.

Deze situatie kan bij een volgende hoogwaterberekening als begintoestand worden gebruikt.

Het stuurinvoerbestand wordt in het voorschakelprogramma 'INLEZEN.RUN' aangemaakt (zie paragraaf 4), uitgaande van het door de gebruiker opgegeven voorspeltijdstip.

### 3.2. Randvoorwaardenbestand

Het randvoorwaardenbestand levert de waterstanden en/of debieten die gedurende de rekenperiode op de randen van het netwerk worden opgelegd.

Er kunnen permanente en/of tijdreeksrandvoorwaarden worden opgelegd, zoals in het voorbeeld op bijlage 2 te zien is.

De PH-kaarten laten zien dat er permanente waterstanden van 0,0 m worden opgelegd; dit zijn de benedenstroomse randvoorwaarden van het netwerk, overeenkomende met de gemiddelde waterstanden op de Noordzee en het IJsselmeer.

De PQ-kaarten duiden op permanente debieten van  $0 \text{ m}^3/\text{s}$ ; deze randvoorwaarden geven de gesloten randen van de reservoirs in het netwerk weer, welke een uiterwaarde-functie hebben.

De Q-kaart geeft dat er op een instroomrand een tijdreeks in de vorm van debieten wordt opgelegd.

De getallen na 'Q' geven achtereenvolgens het knooppuntnummer waar de randvoorwaarde wordt opgelegd, datum/tijdstip van het eerste reekselement en de tijdstap waarmee de reekselementen worden opgegeven; in dit geval worden er debieten met een tijdsinterval van 180 min. opgegeven.

De vervolgkaarten bevatten de debieten op de betreffende instroomrand.

In paragraaf 4 wordt toegelicht op welke wijze de 3-uurs debietreeksen voor de instroomranden worden bepaald uit de, door de gebruiker opgegeven, reeks gemeten waterstanden.

### 3.3. Schematisatiebestand

In het schematisatiebestand wordt de opbouw van het hydraulische netwerk opgegeven, alsmede de waarden voor de rivierparameters voor de afzonderlijke vakken waaruit het netwerk is opgebouwd.

Bij de schematische weergave van de Rijn en haar zijrivieren is van twee soorten vakken gebruik gemaakt, t.w.:

- gewone vakken
- verval vakken

De gewone vakken dienen om riviersecties met een stroomvoerend karakter te beschrijven, maar kunnen ook gebruikt worden om reservoirs weer te geven - waarmee in dit geval de uiterwaarden gesimuleerd worden - die uitsluitend een bergende functie hebben.

Van verval vakken is gebruik gemaakt om de reservoirs met de stroomvoerende secties te verbinden.

Door deze verval vakken een bepaalde breedte een drempelhoogte te geven kunnen de in- en uitstroomweerstand bij het vollopen resp. leeglopen van de uiterwaarden worden nagebootst.

Figuur 3.1. toont de netwerkschematisatie van het hoogwatervoorspellingsmodel voor de Rijn.

De vakken zijn verbonden door knopen. Elk vak heeft twee knopen, een begin- en een eindknoop. In een knoop kunnen meerdere vakken samenkomen.

De positieve stromingsrichting is per vak gedefinieerd van beginknoop naar eindknoop.

Het volledige schematisatiebestand, dat bij de hoogwaterberekening aan het rekenprogramma ZWENDL 30 wordt gekoppeld, is weergegeven in bijlage 3.

Hieronder worden de verschillende codes in het schematisatiebestand toegelicht.

Elk vak, met de daarbij behorende beschrijving, is zowel aan de boven- als aan de onderzijde begrensd door een blanco regel.

De letter-code aan het begin van de eerste regel geeft het vaktype aan. Dit kan zowel de letter C van Chézy zijn voor een gewoon vak (het laatste getal geeft dan de Chézy-waarde van het vak) als de letter V van een verval vak.

Ter indicatie zal alleen het gewone vak besproken worden; zie verder de gebruikersdocumentatie ZWENDL 30/2-2 (lit. 2).

De getallen na de letter C staan achtereenvolgens voor het vaknummer, het beginknooppunt, het eindknooppunt, de vaklengte, het basis-niveau van het begin van het vak, het basisniveau van het eind van het vak en de eerdergenoemde Chézy-waarde.

Door een verschillend begin- en eindbasisniveau te kiezen kan een bodemverhang worden ingebouwd.

De tweede regel kan beginnen met de kode H, gevolgd door een aantal waterstanden t.o.v. het basisniveau.

Door deze waterstanden bij het basisniveau op te tellen worden de werkelijke waterstanden gevonden.

Aan de waterstandniveaus achter de kode H, die eventueel ook meerdere regels in beslag kunnen nemen, worden in de hierop volgende regels waarden voor de rivierparameters A1, A2, BB of R gekoppeld.



Indien de tweede regel niet begint met de kode H worden default-wa-  
terstandniveaus aangenomen, beginnend met een waterstand gelijk 0 en  
oplopend met 0,5 m.

De getallen achter de code A1 staan voor de stroomvoerende oppervlak-  
ken aan het begin van het vak.

Het stroomvoerende oppervlak betreft hier het totale stroomvoerende  
oppervlak beneden het betreffende waterstandniveau.

De code A2 staat voor het stroomvoerend oppervlak aan het einde van  
het vak.

De kode BB staat voor de bergende breedte.

De getallen achter BB, eventueel ook op de vervolgregels, zijn gelijk  
aan de bergende breedten op de hiermee corresponderende waterstandni-  
veaus.

Indien BB niet is opgegeven wordt aangenomen dat de bergende breedte  
gelijk is aan de stroom- voerende breedte.

De kode R staat voor de hydraulische straal.

De waarden voor de hydraulische stralen op de hiermee corresponderen-  
de waterstandniveaus zijn berekend met de formule van Engelund-  
Hansen.

Om een uitspraak te kunnen doen over de vraag of de schematisatie,  
zoals deze is bepaald bij de ijking van het model voor de hoogwater-  
golf van februari 1970, ook voor toekomstige hoogwatergolven geschikt  
is, werd een onderzoek uitgevoerd naar de invloed van bodemverande-  
ringen op de Rijn op de afvoervoorspelling voor Lobith. In bijlage 4  
zijn de resultaten van dit onderzoek opgenomen.

Uit het onderzoek blijkt dat indien de bodemdaling op de Rijn, die in  
de periode tussen 1970 en 1983 heeft plaatsgevonden, in de schemati-  
satie wordt verwerkt, dit slechts een verschil in topdebiet (10.000  
 $\text{m}^3/\text{s}$ ) te zien geeft van ongeveer  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Wanneer dit verschil in topdebiet wordt vergeleken met andere onnauwkeurigheden in het voorspellingsmodel (zoals b.v. onnauwkeurigheden in de afvoertabel), kan worden gekonkludeerd dat de schematisatie ook voor toekomstige hoogwatergolven geschikt is.

#### 3.4. Beginvoorwaardenbestand

De beginwaarden voor een vak kunnen zowel expliciet als impliciet worden opgegeven.

Het beginvoorwaardenbestand, zoals deze aan het rekenprogramma ZWENDL 30 wordt gekoppeld, bevat expliciete beginvoorwaarden, in de vorm van waterstanden en debieten op het begintijdstip van de berekening, voor één of meer vakken in het netwerk.

Bijlage 5 geeft een voorbeeld van een beginvoorwaardenbestand.

Het eerste getal op iedere regel is het vaknummer, gevolgd door de beginwaterstand aan het begin van het vak, de beginwaterstand aan het einde van het vak, het begindebiet aan het begin van het vak en het begindebiet aan het einde van het vak.

De beginwaarden kunnen eveneens op impliciete wijze worden opgegeven, door koppelen van een doorstartbestand aan het rekenprogramma ZWENDL 30. Dit doorstartbestand bevat de toestand in het netwerk op het begintijdstip van de berekening. Het doorstartbestand is bij een voorgaande berekening aangemaakt en bevat de toestand in het netwerk op het eindtijdstip van deze berekening.

Voorwaarde hierbij is dat het eindtijdstip van de oude berekening overeenkomt met het begintijdstip van de nieuwe berekening.

Indien voor een begintoestand in het netwerk wordt gekozen in de vorm van een doorstartbestand, dient er toch een beginvoorwaardenbestand aan het rekenprogramma ZWENDL 30 gekoppeld te worden.

Het beginvoorwaardenbestand is in dit geval een dummy-bestand.

In bijlage 6 is een voorbeeld van zo'n dummy-bestand gegeven; het op te geven beginvoorwaardenbestand bestaat hier uitsluitend uit de vaste randvoorwaarde voor de Noordzee van 0,0 m.

### 3.4.1. Beginvoorwaarden bij de opstart van de hoogwaterberekening

Het tijdstip waarop we de hoogwaterberekening opstarten wordt zodanig gekozen dat de op de randen van het netwerk opgelegde beginvoorwaarden niet van invloed zijn op de eigenlijke hoogwatervoorspelling. Enerzijds wil men zo min mogelijk handelingen verrichten bij het opstellen van het beginrandvoorwaardenbestand, anderzijds dient men toch met de nodige zorgvuldigheid te werk te gaan om instabiliteiten binnen het netwerk te voorkómen.

Hieronder wordt de uiteindelijke keuze m.b.t. het invoeren van de beginvoorwaarden voor de inspeelperiode toegelicht.

Het uitvoeren van de hoogwaterberekening, mits deze voor de eerste maal wordt uitgevoerd, is in drie fasen opgesplitst (zie figuur 3.2.), t.w.:

1. Aanlooperperiode 1
2. Aanlooperperiode 2
3. Voorspelperiode

Het onderzoek dat is uitgevoerd ter bepaling van de beginvoorwaarden voor de inspeelperiode betreft de aanlooperperioden 1 en 2.

Bij het onderzoek is de hoogwatergolf van april 1983 doorgerekend. Op tijdstip  $T_0$  worden de debieten op de instroomranden gelijk aan de (quasi-) stationaire debieten gekozen, zoals die optraden gedurende de inspeelperiode van de ijk-hoogwatergolf van februari 1970.

De waterstanden en debieten in de overige knooppunten c.q. takken van het netwerk op tijdstip  $T_0$  worden gelijk genomen aan de stationaire waterstanden en debieten op tijdstip  $T_1$  bij de hoogwaterberekening van februari 1970.

Dit zijn de waterstanden c.q. debieten in het netwerk, indien gedurende de periode van drie dagen de constante debieten op de instroomranden worden opgelegd zoals ze op tijdstip  $T_0$  optraden.

De aldus verkregen beginvoorwaarden op tijdstip  $T_0$ , die gebruikt werden bij het opstarten van de hoogwaterberekening van april 1983, zijn aanwezig in een bestand.

Dit bestand wordt gebruikt als beginvoorwaardenbestand bij het doorrekenen van aanlooperperiode 1.

Op tijdstip  $T_1$  worden op de instroomranden de werkelijke debieten opgelegd, zoals ze 3 dagen voor het voorspeltijdstip  $T_{vsp}$  optraden.

Tussen de tijdstippen  $T_0$  en  $T_1$  wordt een lineair verloop van de debieten op de instroomranden aangehouden, zie tabel 3.1.

De rekentijdstap is gelijk aan 15 minuten gekozen.

De tijdsduur  $T_1 - T_0$  van aanlooperperiode 1 is bij het onderzoek verkleind van 3 dagen tot 12 uur.

Omdat op het voorspeltijdstip  $T_{vsp}$  de op tijdstip  $T_1$  opgelegde debieten op de instroomranden, de uitstroomranden van het netwerk gepasseerd zijn, is zowel aanlooperperiode 1 als aanlooperperiode 2 doorerekend.

Bij verschillende tijdsduren  $T_1 - T_0$  van aanlooperperiode 1 is onderzocht of er tot aan het voorspeltijdstip  $T_{vsp}$  instabiele toestanden in het netwerk ontstonden.

Was dit niet het geval, dan was de keuze van de betreffende tijdsduur  $T_1 - T_0$  van aanlooperperiode 1 toelaatbaar.

Het onderzoek had tot doel de minimaal toelaatbare tijdsduur  $T_1 - T_0$  te vinden.

Onderzocht zijn:  $T_1 - T_0 = 3$  dagen

$T_1 - T_0 = 2$  dagen

$T_1 - T_0 = 1$  dag

$T_1 - T_0 = 12$  uur

Het onderzoek leverde als resultaat dat voor geen van de 4 onderzochte tijdsduren van aanlooperperiode 1 instabiliteiten optraden binnen het netwerk bij het doorrekenen van de aanlooperperioden 1 en 2.

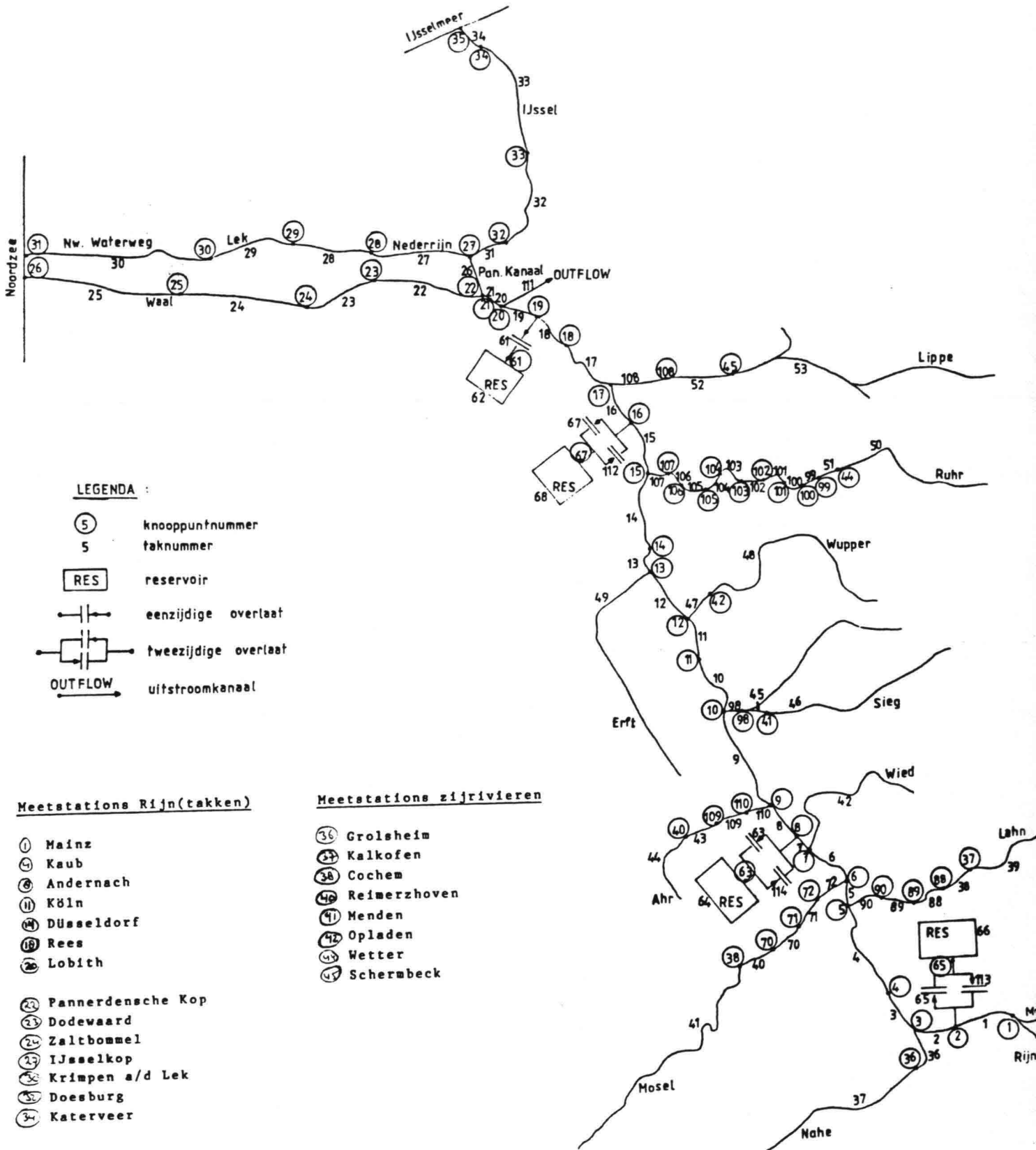
Het bleek dus mogelijk om in een tijdsduur van 12 uur de debieten op de instroomranden te veranderen van  $Q(T_0)$  naar  $Q(T_1)$ .

De rekentijd bij een tijdsduur van aanlooperperiode 1 gelijk aan 1 dag bedroeg 19 sec., terwijl de totale computertijd gelijk was aan 59 sec. De rekentijd bij een tijdsduur van aanlooperperiode 1 gelijk aan 12 uur bedroeg 14 sec.; de totale computertijd was in dit geval 54 sec.

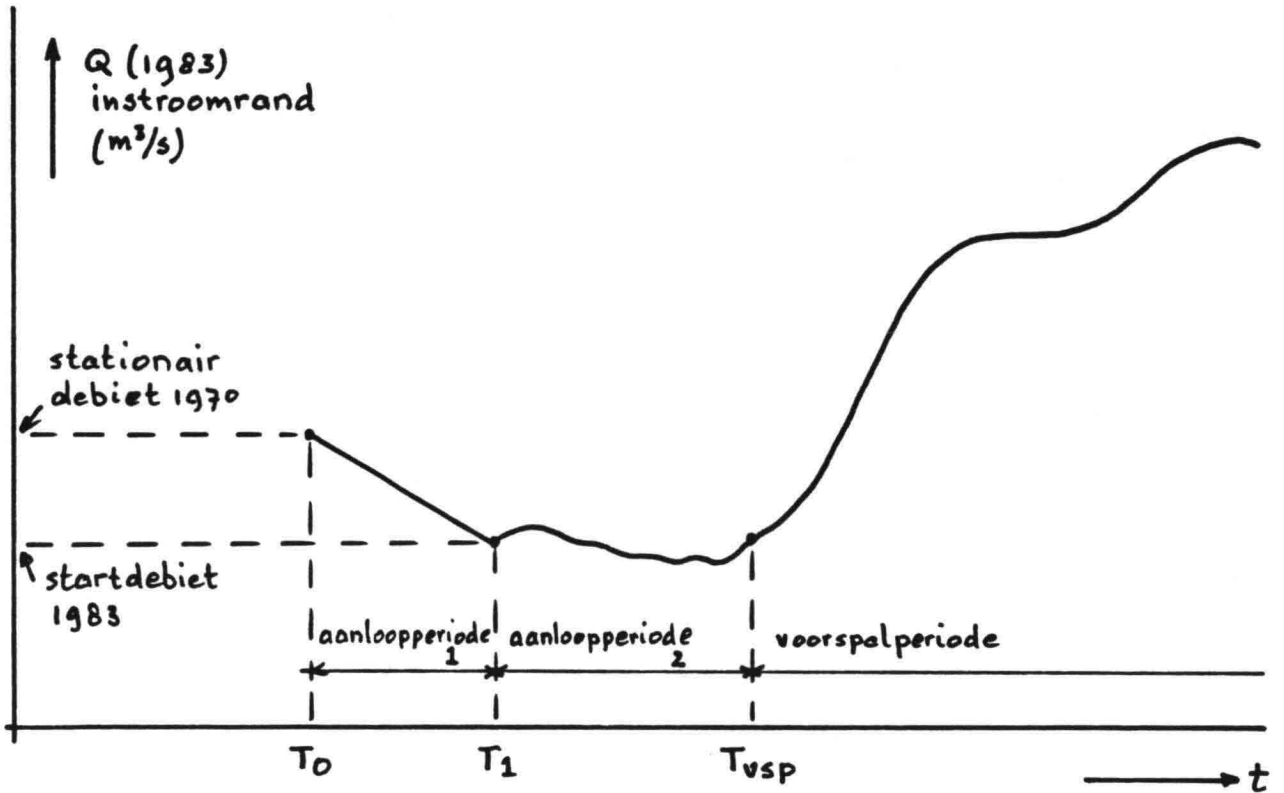
Met betrekking tot de computerkosten volgt uit het bovenstaande dat een verkorting van de tijdsduur  $T_1 - T_0$  van de aanlooperperiode van 1 dag naar 12 uur, procentueel gezien slechts een geringe besparing oplevert.

Op grond van de overweging dat de gebruiker het hoogwatervoorspellingsmodel bij hogere startdebieten op tijdstip  $T_1$  kan gaan gebruiken en gezien geringe kostenbesparing wordt gekozen voor  $T_1 - T_0 = 1$  dag.

Figuur 3.1.: Netwerkschematisatie van de Rijn en haar zijrivieren.



Figuur 3.2. Inspelen van het model.



Tabel 3.1. Debieten op de instroomranden voor aanlooperperiode 1.

Randmeetstation	Q (T0) m <sup>3</sup> /s	Q (T1) m <sup>3</sup> /s
Mainz (Rijn)	1090	2050
Grolsheim (Nahe)	91	232
Cochem (Moezel)	22	126
Kalkofen (Lahn)	346	620
Menden (Sieg)	61	106
Opladen (Wupper)	38	40
Hattingen (Ruhr)	37	200
Schermbeck (Lippe)	25	97
Ter vergelijking		
Lobith (Rijn)	1745	4134



#### 4. Voorschakelprogramma voor de eigenlijke hoogwaterberekening

Voordat de eigenlijke hoogwaterberekening met het programma-systeem ZWENDL kan worden uitgevoerd dient eerst het voorschakelprogramma 'INLEZEN.RUN' te worden aangeroepen.

Het doel van het voorschakelprogramma is tweeledig, nl:

- a. Transformatie van de door de gebruiker in te voeren gegevens naar invoergegevens voor het rekenprogramma ZWENDL 30.
- b. In het juiste format wegschrijven van de getransformeerde invoergegevens naar invoerbestanden, die bij de hoogwaterberekening aan het rekenprogramma ZWENDL 30 gekoppeld worden.

ad a. De door de gebruiker in te voeren gegevens bestaan ondermeer uit gemeten waterstanden en enkele 12-uurs neerslagsommen voor een aantal meetstations.

Aangezien het rekenprogramma ZWENDL 30 om debieten op de instroomranden van het netwerk vraagt, dient er dus een transformatie van waterstanden naar debieten plaats te vinden.

ad b. De reeksen met meetgegevens op de instroomranden, die door de gebruiker aan de computer worden aangeboden, zijn over het algemeen discontinu in de tijd.

Het voorschakelprogramma heeft daarom mede tot doel deze discontinue reeksen te herleiden tot equidistante reeksen en deze vervolgens in het juiste format - dus volgens het invoerboekje - weg te schrijven naar het randvoorwaardenbestand dat aan het rekenprogramma ZWENDL 30 wordt gekoppeld.

Evenzo worden gegevens omtrent het tijdstip van de hoogwaterberekening in het juiste format weggeschreven naar het stuurinvoerbestand, dat eveneens aan het rekenprogramma ZWENDL 30 wordt gekoppeld.

Het computerprogramma 'INLEZEN.RUN' is weergegeven op bijlage 7.

Dit programma is opgebouwd uit het eigenlijke voorschakelprogramma 'SCHRIJVEN.ZWENDL', waaraan een aantal in- en uitvoerbestanden is gekoppeld.

Het programma 'SCHRIJVEN.ZWENDL' bevat de mechanismen om de door de gebruiker opgegeven invoergegevens te transformeren naar invoergegevens van het juiste 'format' voor het rekenprogramma ZWENDL 30.

Het programma 'SCHRIJVEN.ZWENDL' wordt in paragraaf 4.1 aan de hand van wat structuurdiagrammen nader toegelicht.

Aan het programma 'SCHRIJVEN.ZWENDL' worden bestanden gekoppeld met gegevens betreffende de instroomranden van het netwerk als afvoertabellen, bodemhellingen, knooppuntnummers, looptijden tot Lobith e.d.

De filenames van deze invoerbestanden, zoals opgenomen in het computerprogramma 'INLEZEN.RUN', komen overeen met de namen van de meetstations of zijrivieren die bij de betreffende instroomranden horen.

De bijlagen 8 t/m 18 bevatten de bestanden met gegevens voor de instroomranden.

Er zijn nog 3 invoerbestanden, nl. PRINTKOP., WATERBEST. en PRINTZWENDL, die wat tekstregels voor de uitvoerbestanden van het programma 'INLEZEN.RUN' bevatten.

De uitvoerbestanden, die tijdens de programma-executie worden aangemaakt, bestaan uit stuurinvoerbestanden en randvoorwaardenbestanden die bij de verschillende fasen van de hoogwaterberekening aan het rekenprogramma ZWENDL 30 worden gekoppeld.

Tenslotte is er nog het resultatenbestand 'RESULTBEST.', waarin de gebruiker alle tussenresultaten bij de transformatie van de opgegeven waterstanden naar een continue reeks debieten nog eens na kan lezen.

#### 4.1 Programma 'SCHRIJVEN.ZWENDL'

Het computerprogramma 'SCHRIJVEN.ZWENDL', weergegeven in de bijlagen 19 en 20, bevat als belangrijkste mechanismen:

- a. Een rekenmechanisme om de door de gebruiker opgegeven waterstanden te transformeren naar debieten.
- b. Een mechanisme om een stuurinvoer- en randvoorwaardenbestand aan te maken, welke bij de hoogwaterberekening aan het rekenprogramma ZWENDL 30 worden gekoppeld.

De opbouw van het programma 'SCHRIJVEN.ZWENDL' volgt uit de structuur-diagrammen in de figuren 4.1 t/m 4.8.

De belangrijkste onderdelen van het programma worden in de paragrafen 4.1a t/m 4.1f nader toegelicht.

#### 4.1a Omzetting van waterstanden naar debieten

Omdat de peilsprekers van de meetstations op de randen van het netwerk waterstanden doorgeven en het programma-systeem ZWENDL om debieten op de instroomranden vraagt, moeten de waterstanden worden omgezet in debieten.

Hiertoe is gebruik gemaakt van de meest recente afvoerkrommen voor de betreffende meetstations. Per meetstation is een aantal (Q,h)-paren uit de afvoertabel weggeschreven naar een bestand. Hierbij is per waterstandsinterval van 20 cm één (Q,h)-paar opgegeven.

De gebruiker dient een reeks waterstanden in te typen, waarna het programma zoekt tussen welke twee 20 cm-waterstanden de opgegeven waterstand ligt. Via lineaire interpolatie tussen de bij deze 20 cm-waterstanden behorende debieten berekent het programma het debiet bij de opgegeven waterstand.

#### 4.1b Debietcorrectie voor het hysteresis-effect

Het debiet dat volgens de afvoertabel bij een bepaalde waterstand hoort geldt voor de situatie van uniforme stroming.

Met name tijdens hoogwatergolven dienen de uit de afvoertabel volgende debieten te worden gecorrigeerd voor het hysteresis-effect.

In het bijzonder voor meetstation Mainz kunnen deze correcties enkele honderden m<sup>3</sup>/s bedragen.

In een programma-subroutine worden de m.b.v. de afvoertabel bepaalde debieten gecorrigeerd volgens de formule van Jones:

$$Q = Q_u * \sqrt{1 + \frac{dh/dt}{c * i_b}}, \quad Q_u = \text{debiet volgens de afvoertabel.}$$

Om de formule voor de afvoercorrectie toe te kunnen passen is het bestand, waarin ook de afvoertabel gediscrètiseerd is weergegeven, aangevuld met waarden voor de golfvoortplantingssnelheid  $c$  en het bodemverhang  $i_b$  ter plaatse van het betreffende meetstation.

De variabele  $dh/dt$  in de formule van Jones wordt gediscretiseerd volgens het centrale differentiatie-schema:

$$dh/dt = \frac{(h,t + \Delta t) - (h,t - \Delta t)}{2 \Delta t}$$

Voor het eerste element van de debietreeks wordt een voorwaartse differentie gebruikt:

$$dh/dt = \frac{(h,t + \Delta t) - (h,t)}{\Delta t}$$

Voor het laatste element van de debietreeks wordt een achterwaartse differentie gebruikt:

$$dh/dt = \frac{(h,t) - (h,t - \Delta t)}{\Delta t}$$

#### 4.1c Genereren van een reeks 3-uurs debieten uit een discontinue reeks debieten

De begintoestand voor deze programma-subroutine is een discontinue afvoerreeks met bijbehorende tijdstippen.

Allereerst wordt het tijdstip afgerond op 3 uur en wordt de datum met behulp van de standaardfunctie 'JULIAN' omgerekend naar een Juliaans dagnummer.

Tussen elk tweetal elementen van de aldus getransformeerde afvoer/tijdreeks worden door lineaire interpolatie de tussenliggende 3-uurs elementen, bestaande uit debieten met de bijbehorende Juliaanse uurwaarde, gegenereerd. Met de standaardsubroutine 'GREGOR' wordt de Juliaanse uurwaarde van de gegenereerde 3-uurs reeks omgerekend naar een datum en een uurwaarde.

Er is gekozen voor een 3-uurs debietreeks, omdat

- a. De waterstanden van de instroompunten Mainz, Kalkofen, Cochem en Hattingen dagelijks om 05.00 uur worden doorgebeld.
- b. De waterstanden van de instroompunten Grolsheim, Menden en Schermbeck dagelijks om 08.00 uur worden verkregen door zelf te bellen.

Het tijdsverschil tussen beide reeksen van gemeten dagelijkse waterstanden bedraagt 3 uur.

#### 4.1d Vermenigvuldigingsfactoren en -termen voor de debieten van de grotere zijrivieren

De afvoeren van de grotere zijrivieren in het netwerk kunnen worden bepaald door de debieten ter plaatse van de meetstations op deze zijrivieren, welke volgen uit de door de gebruiker opgegeven gemeten waterstanden, te vermenigvuldigen met een factor en/of te vergroten met een term.

Door middel van een factor en/of term kan namelijk het deel van de afvoer van een zijrivier in rekening worden gebracht, dat afkomstig is uit het benedenstrooms van het meetstation gelegen deel van het stroomgebied. Immers, de meetstations liggen over het algemeen op enige afstand van het uitstroompunt in de Rijn.

De factoren en termen zijn afkomstig uit het afstudeerverslag (lit. 1) en hebben de volgende waarden:

$$\begin{aligned} Q \text{ (Nahe)} &= Q \text{ (Grolsheim)} \star 1,00 + 59 \text{ m}^3/\text{s} \\ Q \text{ (Lahn)} &= Q \text{ (Kalkofen)} \star 1,05 + 0 \text{ m}^3/\text{s} \\ Q \text{ (Moezel)} &= Q \text{ (Cochem)} \star 1,04 + 0 \text{ m}^3/\text{s} \\ Q \text{ (Sieg)} &= Q \text{ (Menden)} \star 1,33 + 0 \text{ m}^3/\text{s} \\ Q \text{ (Ruhr)} &= Q \text{ (Hattingen)} \star 1,04 + 0 \text{ m}^3/\text{s} \\ Q \text{ (Lippe)} &= Q \text{ (Schermbbeck)} \star 1,02 + 0 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

#### 4.1e Debieten van de kleinere zijrivieren

De debieten van de kleinere zijrivieren, waarvan geen waterstanden worden ontvangen, kunnen worden afgeschat door deze te schrijven als functie van de debieten van de grotere zijrivieren.

Voorwaarde hiervoor is wel dat de kleinere en bijbehorende grotere zijrivier een overeenkomstig afvoerverloop hebben.

De factoren en termen waarmee de debieten van de kleinere zijrivieren in het netwerk worden afgeleid uit de debieten van de grotere zijrivieren, zijn afkomstig uit het afstudeerverslag (lit. 1) en hebben de volgende waarden:

Q (Wied)	=	Q (Kalkofen)	*	0,15	+	0	m <sup>3</sup> /s
Q (Ahr)	=	Q (Sieg)	*	0,08	+	0	m <sup>3</sup> /s
Q (Wupper)	=	Q (Sieg)	*	0,37	+	0	m <sup>3</sup> /s
Q (Erft)	=	Q (Ruhr)	*	0,50	+	30	m <sup>3</sup> /s

#### 4.1f Afvoervoorspelling op de instroomranden

Het model geeft hoogwatervoorspellingen voor Lobith voor 3 dagen vooruit. Het gebruik van het programma-systeem ZWENDL impliceert dat, om een voorspelling voor Lobith voor 3 dagen vooruit te kunnen maken, ook voor de debieten op de instroomranden waarden voor 3 dagen vooruit moeten worden opgegeven.

Een deel van de op te geven afvoerreeks voor de instroompunten zal moeten worden voorspeld c.q. geschat.

Dit deel is afhankelijk van de plaats van het instroompunt in het hydraulische netwerk en is gelijk aan de voorspelduur (3 dagen) minus de looptijd van het betreffende instroompunt tot Lobith.

Deze tijdsduur, waarvoor een goede voorspelling van de debieten voor de instroompunten gemaakt dient te worden, wordt de relevante voorspeltijd genoemd. De relevante voorspeltijd blijkt afvoerafhankelijk te zijn; in tabel 4.1 zijn de relevante voorspeltijden voor de instroomranden van het netwerk bij Rijnafvoeren van 4000 en 10.000 m<sup>3</sup>/s opgesomd.

In een aantal gevallen kan de debietreeks tot het voorspeltijdstip op de instroomrand worden benaderd door een functievoorschrift.

Met behulp van dit functievoorschrift kan hierna een afvoervoorspelling voor de betreffende instroomrand worden gemaakt.

In bijlage 21 is een en ander met betrekking tot de benadering van de afvoerreeks door een functievoorschrift toegelicht.

In sommige gevallen zal het echter ook noodzakelijk zijn om neerslaggegevens bij de afvoervoorspelling te betrekken.

Hieronder zal een en ander nader worden toegelicht.

Uit hoogwatergolven die in het verleden zijn opgetreden blijkt dat de afvoerverlooppijnen voor de belangrijkste instroompunten van het netwerk, t.w. de meetstations Mainz, Grolsheim, Cochem en Kalkofen, in de meeste gevallen goed door een functievoorschrift te benaderen zijn.

Er is hiervoor een tweetal redenen te noemen:

1. De eigenschappen van het stroomgebied bovenstrooms van deze instroompunten zijn dusdanig - groot oppervlak, grote looptijden, flauwe hellingen, goede doorlatendheid van de grond e.d. - dat neerslagpieken afgevlakt in de tijd als afvoer zichtbaar worden.  
In dit geval is een hoogwatergolf redelijk goed te benaderen door een functie nl. een parabool.
2. De instroompunten hebben een dermate kleine relevante voorspeltijd dat een relatief grote fout in de functie benadering de afvoervoorspelling voor Lobith voor 3 dagen vooruit nauwelijks beïnvloedt.

In de meeste gevallen kunnen de afvoerverlooppijnen voor de instroompunten Menden (Sieg), Hattingen (Ruhr) en Schermbeck (Lippe) eveneens door een functievoorschrift benaderd worden.

Een uitzondering hierop is de situatie dat neerslagpieken in de stroomgebieden van deze zijrivieren hoogwatergolven veroorzaken.

Deze afvoergolven zijn piekvormig, met een top die kan liggen tussen  $400 \text{ m}^3/\text{s}$  (Lippe) en  $900 \text{ m}^3/\text{s}$  (Sieg).

Indien het voorspeltijdstip op de stijgende tak ligt is het goed mogelijk dat het tijdstip van de afvoertop gedurende de relatief grote relevante voorspeltijd, behorende bij deze instroompunten, wordt bereikt.

Omdat uit de afvoerreeks tot het voorspeltijdstip, vanwege de piekvorm, geen informatie kan worden verkregen omtrent een mogelijk tijdstip van de afvoertop, kan dit tijdstip van de afvoertop ook niet uit de functie volgen.

Een gevolg is b.v. dat de afvoertop **wordt** gemist en een debiet wordt voorspeld dat veel te groot is (zie figuur 4.9.).

Er is voor deze situatie dus extra informatie nodig om het tijdstip van de afvoertop redelijk te schatten.

Deze extra informatie wordt verkregen door gebruik te maken van de vertragingstijd tussen de neerslag en de afvoer voor het stroomgebied van de betreffende zijrivier.

De vertragingstijd is hierbij gedefinieerd als het tijdsverschil tussen het zwaartepunt van de neerslag en de afvoertop. De vertragingstijd voor de betreffende stroomgebieden wordt bepaald aan de hand van een aantal hoogwaters die in het verleden zijn opgetreden.

In figuur 4.10 is de vertragingstijd tussen het zwaartepunt van de neerslag en het tijdstip van de afvoertop grafisch weergegeven.

De vertragingstijd, zoals deze in het afstudeerverslag (lit. 1) is bepaald, bedraagt voor de Lippe (Schermbeck) 2,4 dag, voor de Ruhr (Hattingen) 1,8 dag en voor de Sieg (Menden) 1,8 dag.

Met betrekking tot de bepaling van de vertragingstijd moet een aantal kanttekeningen worden geplaatst:

1. Ofschoon de neerslagsommen voor de verschillende neerslagstations binnen een stroomgebied van een zijrivier grote verschillen vertonen, komt de neerslagverdeling in de tijd voor deze neerslagstations redelijk goed overeen.

Omdat het tijdstip van het zwaartepunt van de neerslag uitsluitend afhangt van de neerslagverdeling in de tijd is deze methode van de vertragingstijd aanvaardbaar.

2. Er is aangenomen dat het zwaartepunt van de afvoergolf samenvalt met het tijdstip van de afvoertop.

Deze aanname is gedaan na bestudering van een aantal opgetreden hoogwatergolven op de betreffende zijrivieren.

Omdat het zeer moeilijk is om de afvoergolf te scheiden in een grondwatercomponent en een oppervlaktecomponent (alleen van laatstgenoemde dient het zwaartepunt bepaald te worden) wordt deze aanname niet geverifieerd.

3. Uit opgetreden hoogwatergolven op de zijrivieren Sieg, Ruhr en Lippe kan worden afgeleid dat de neerslag tot ongeveer 4 dagen voor de afvoertop de hoogwatergolf gestalte geeft.

Bij de bepaling van de vertragingstijd wordt daarom uitsluitend de neerslag tot 4 dagen voor de afvoertop in rekening gebracht.



4. Bij de zwaartepuntsbepaling van de neerslag wordt de totale neerslagsom in rekening gebracht in plaats van de gebruikelijke netto neerslag. Het uitgangspunt hierbij is dat een hoogwatergolf op de betreffende zijrivier volgt op een dermate natte periode, dat alle neerslag tot directe afvoer komt.

#### 4.1g Minimum en maximum debiet

Op grond van een aantal criteria, die hieronder zullen worden toegelicht, mogen met name de debieten op de zijrivieren niet onder het minimum debiet danwel boven het maximum debiet voor de betreffende zijrivier komen. Voor de waarden van dit minimum/maximum debiet wordt verwezen naar de bijlagen 8 t/m 18.

Wanneer de debieten op de zijrivieren beneden de genoemde minimum debieten komen, treden bij de toegepaste rekentijdstrappen in het rekenmodel instabiliteiten op de zijrivieren op.

De minimum debieten voor de verschillende zijrivieren zouden bereikt of onderschreden kunnen worden gedurende droge perioden. Daarom wordt in deze gevallen in het voorschakelprogramma het betreffende minimum debiet aangehouden.

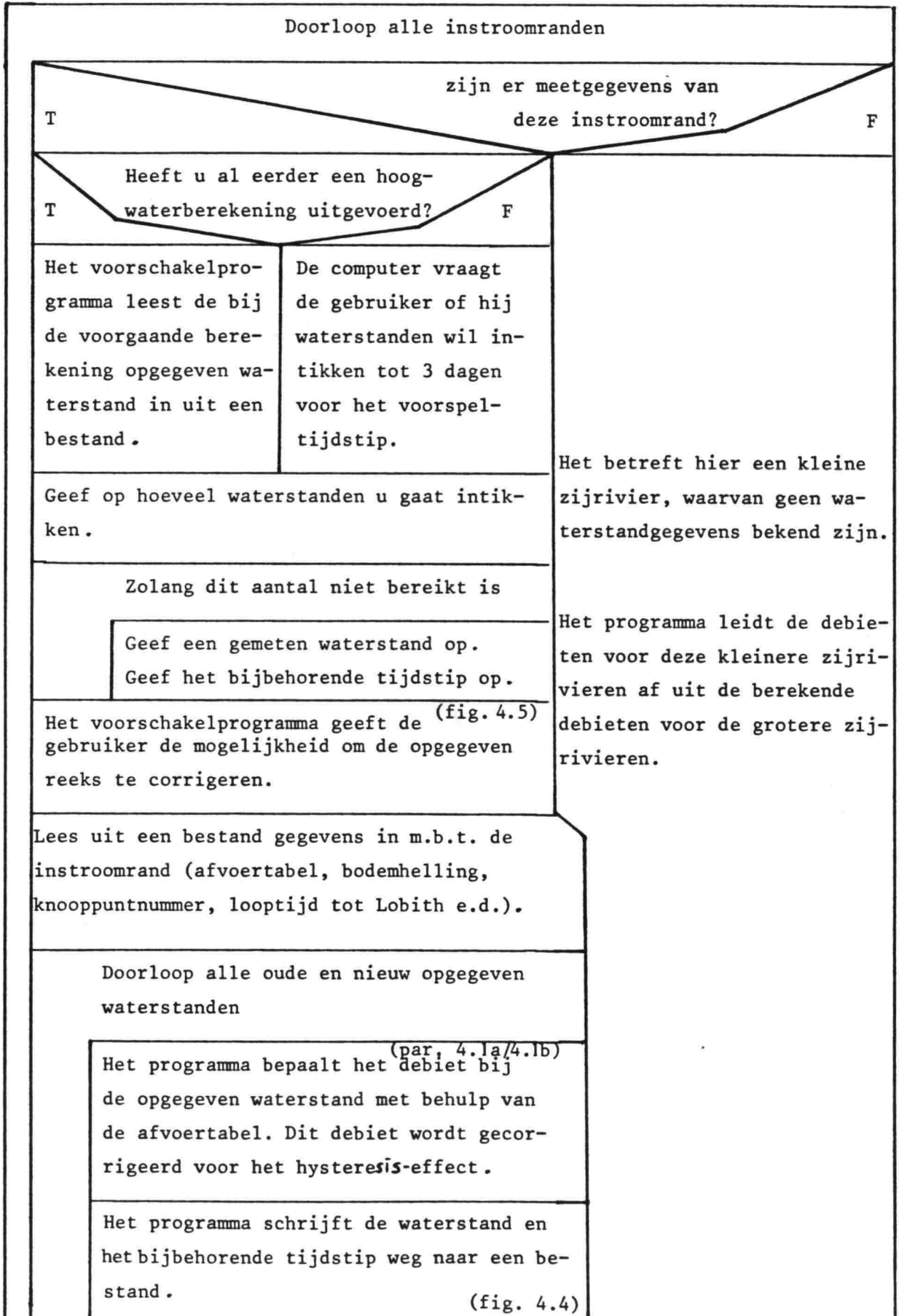
De maximum debieten in het reken- netwerk worden enerzijds bepaald door het bereik van de opgegeven afvoerkrommen voor de meetstations op de instroomranden en anderzijds door de maximaal opgegeven waterstandniveaus van de opgegeven dwarsprofielen.

Indien het debiet groter is dan het opgegeven maximum debiet wordt in het voorschakelprogramma het maximum debiet aangehouden ten einde foutmeldingen van het model te voorkomen.

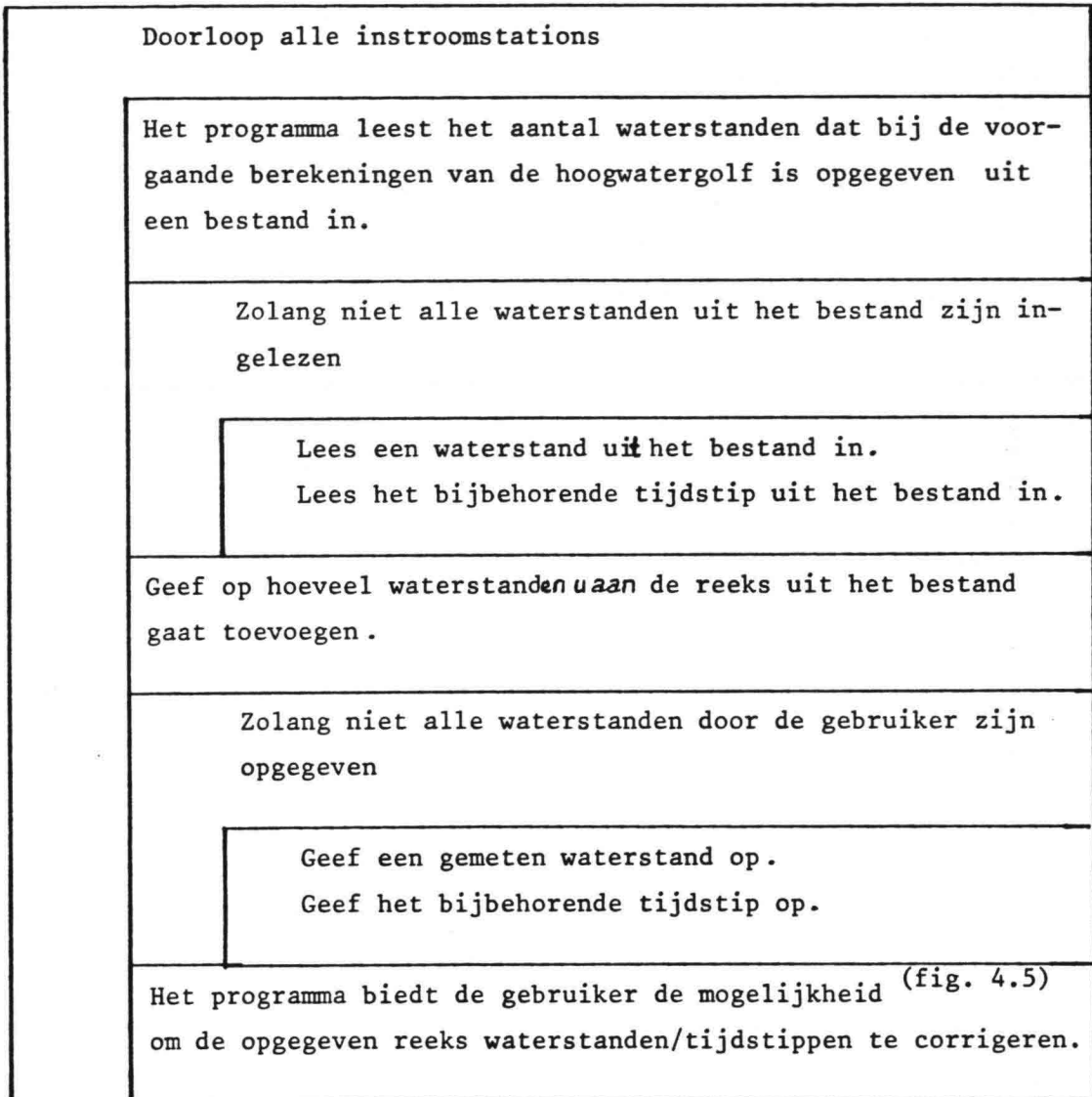
Figuur 4.1: Hoofdstructuurdiagram van het voorschakelprogramma 'SCHRIJVEN.ZWENDL'.

Geef het voorspeltijdstip op, ofwel het tijdstip waarop u de hoogwaterberekening uitvoert.	
Geef op of u de hoogwaterberekening voor de eerste maal uitvoert.	
Geef voor de meetstations op de randen van het netwerk gemeten water met de bijbehorende tijdstippen op (fig. 4.2/4.3).	
Het voorschakelprogramma transformeert de opgegeven waterstand.	
wordt de hoogwaterberekening voor de eerste maal uitgevoerd?	
T	F
Het voorschakelprogramma genereert voor de inspeelperiode een continue reeks debieten op de instroomranden van het netwerk. (fig. 4.6)	
Het voorschakelprogramma maakt een stuurinvoeren randvoorwaardenbestand voor de inspeelperiode aan.	
Geef een afvoervoorspelling voor de relevante voorspeltijd (fig. 4.7/4.8) op voor de meetstations op de instroomranden van het netwerk (De relevante voorspeltijd is gelijk aan de voorspeltijd van 3 dagen minus de looptijd van de betreffende instroomrand tot Lobith) (par. 4.1f).	
Het voorschakelprogramma genereert voor de voorspelperiode (duur 3 dagen) een continue reeks debieten op de instroomranden.	
Het voorschakelprogramma maakt een stuurinvoer- en randvoorwaardenbestand aan voor de inspeelperiode.	

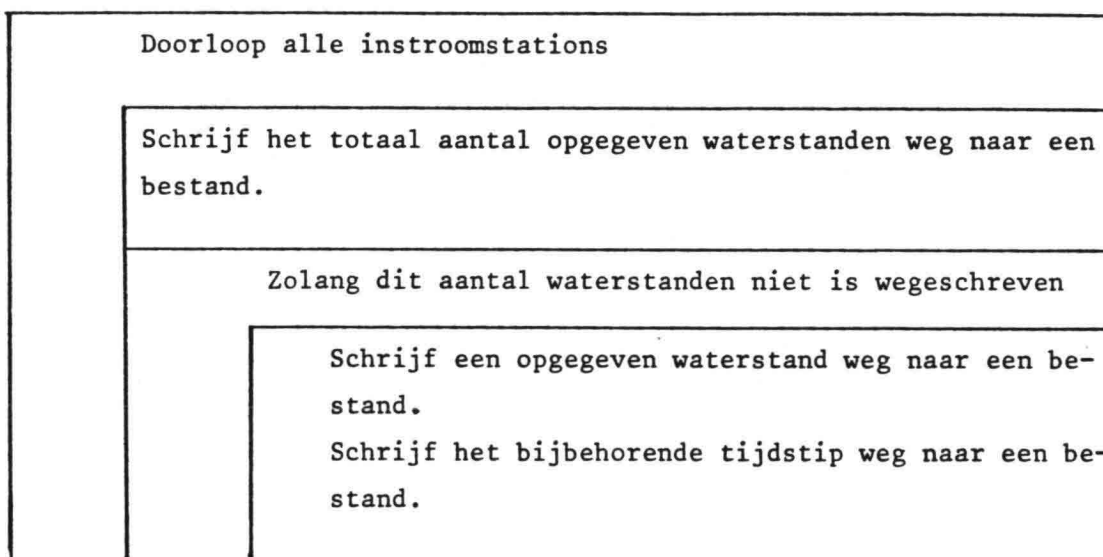
Figuur 4.2: Structuurdiagram voor de transformatie van de door de gebruiker opgegeven waterstanden naar debieten.



Figuur 4.3: Structuurdiagram voor het inlezen van waterstanden/tijdstippen, zowel uit een bestand als interactief.

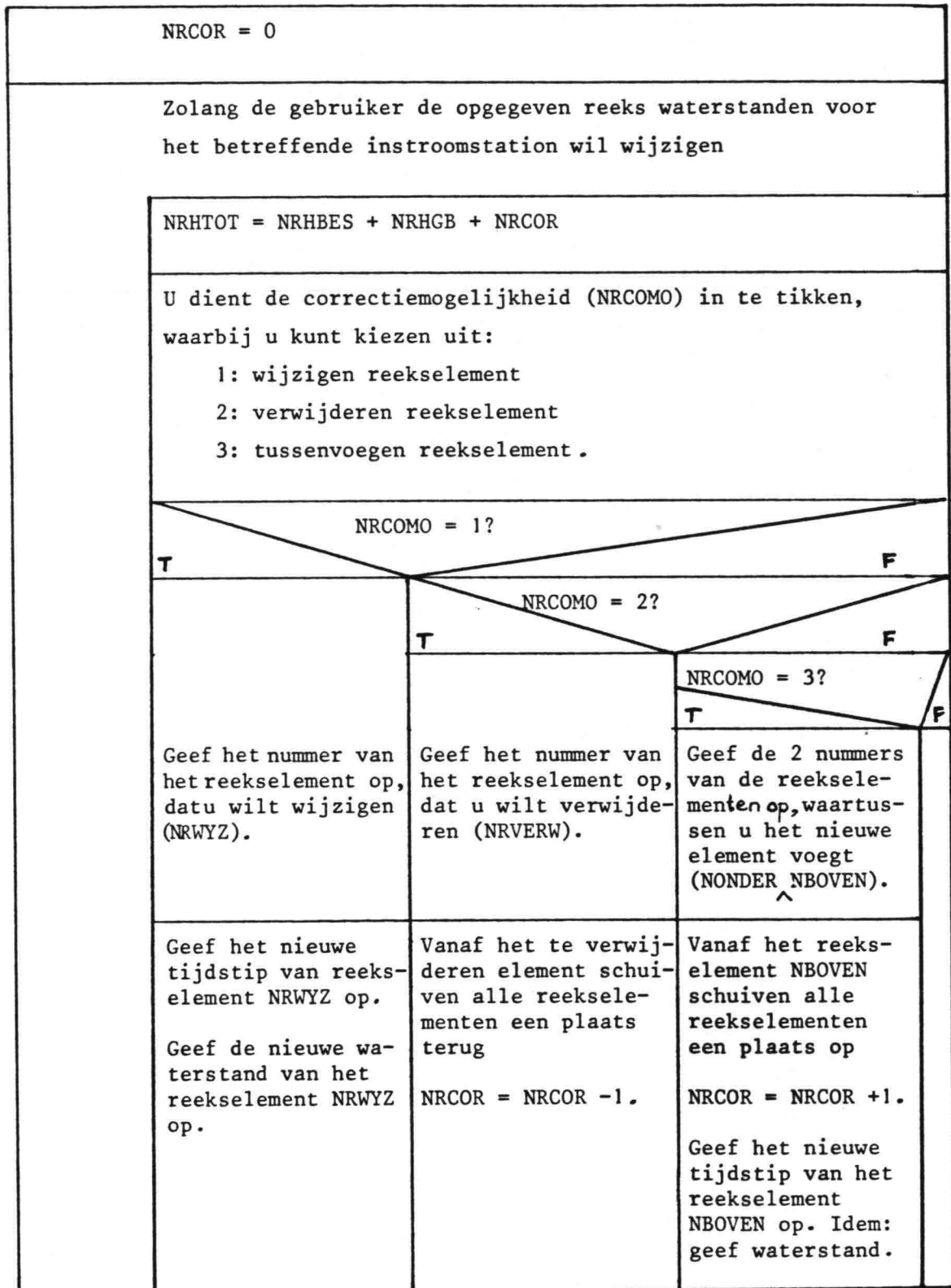


Figuur 4.4: Structuurdiagram voor het wegschrijven van het totaal aantal opgegeven waterstanden voor de betreffende hoogwatergolf naar een bestand.

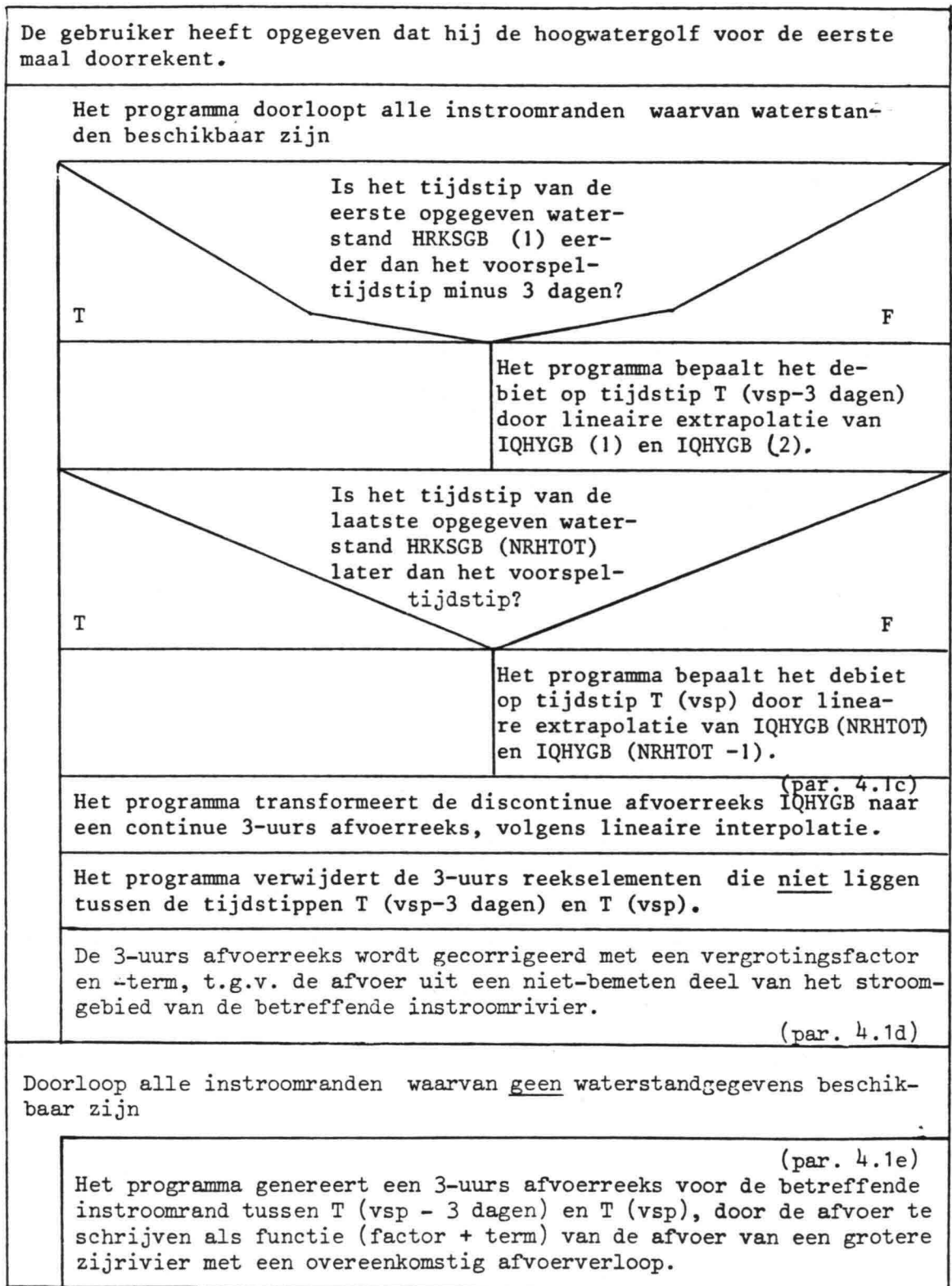


Figuur 4.5: Structuurdiagram voor het corrigeren van de opgegeven reeks waterstanden/tijdstippen.

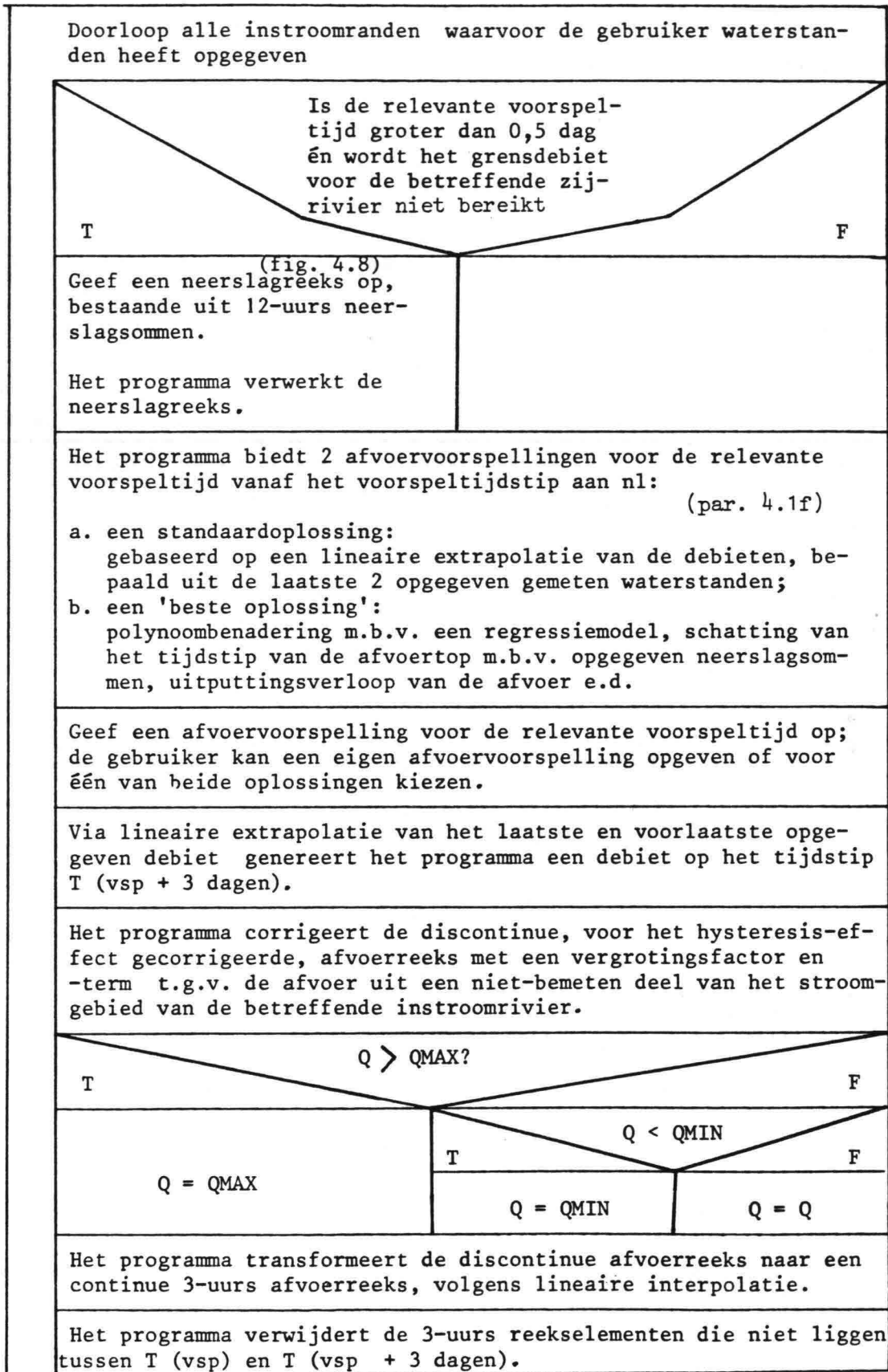
(Voor de verklaring van de gebruikte parameters, zie bijlage 20)



Figuur 4.6: Structuurdiagram voor bepalen van een continue reeks debieten op de instroomranden (inspeelperiode).

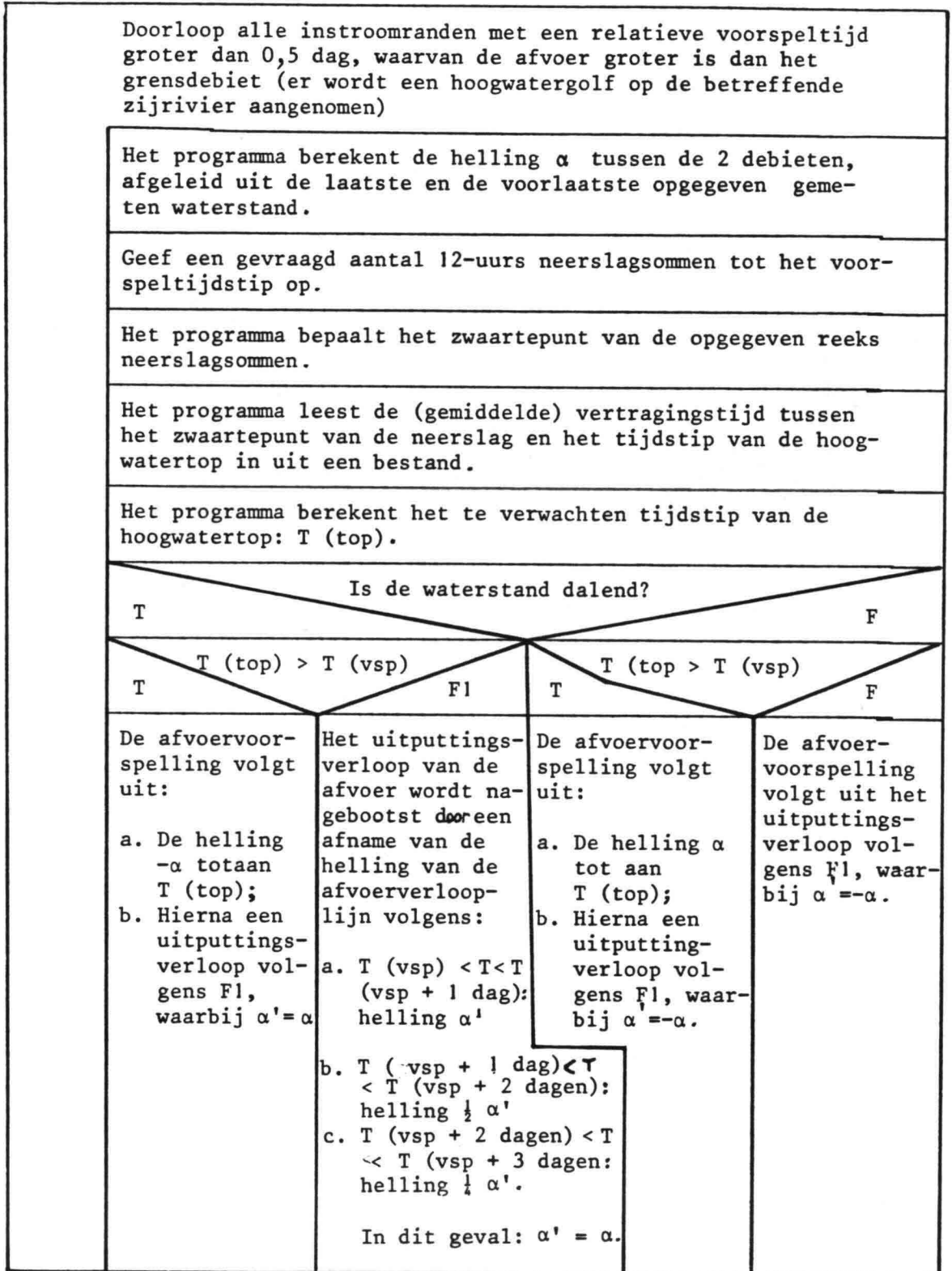


Figuur 4.7: Structuurdiagram voor het bepalen van een continue reeks debieten op de instroomranden voor de periode van 3 dagen vanaf het voorspeltijdstip.

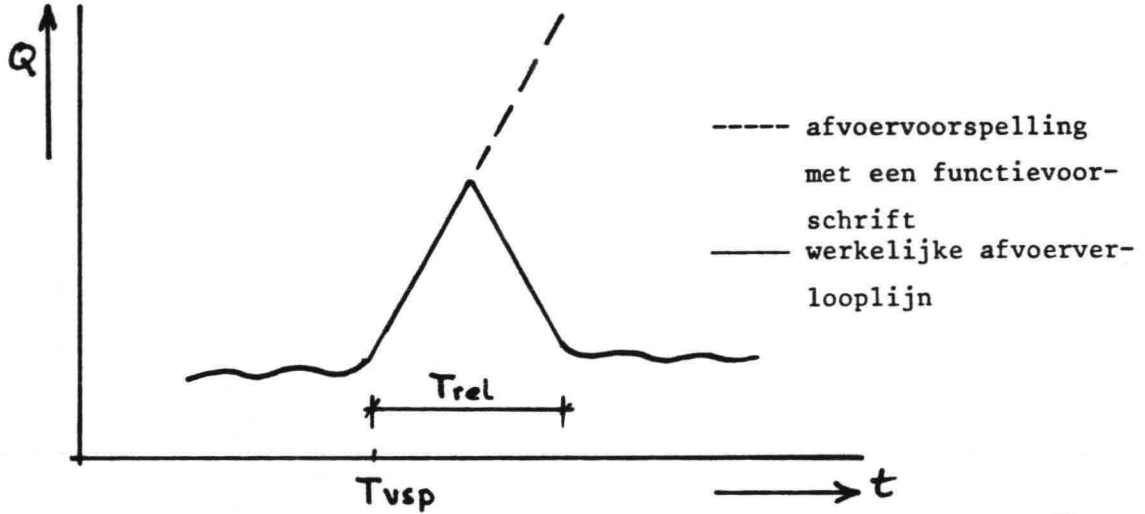




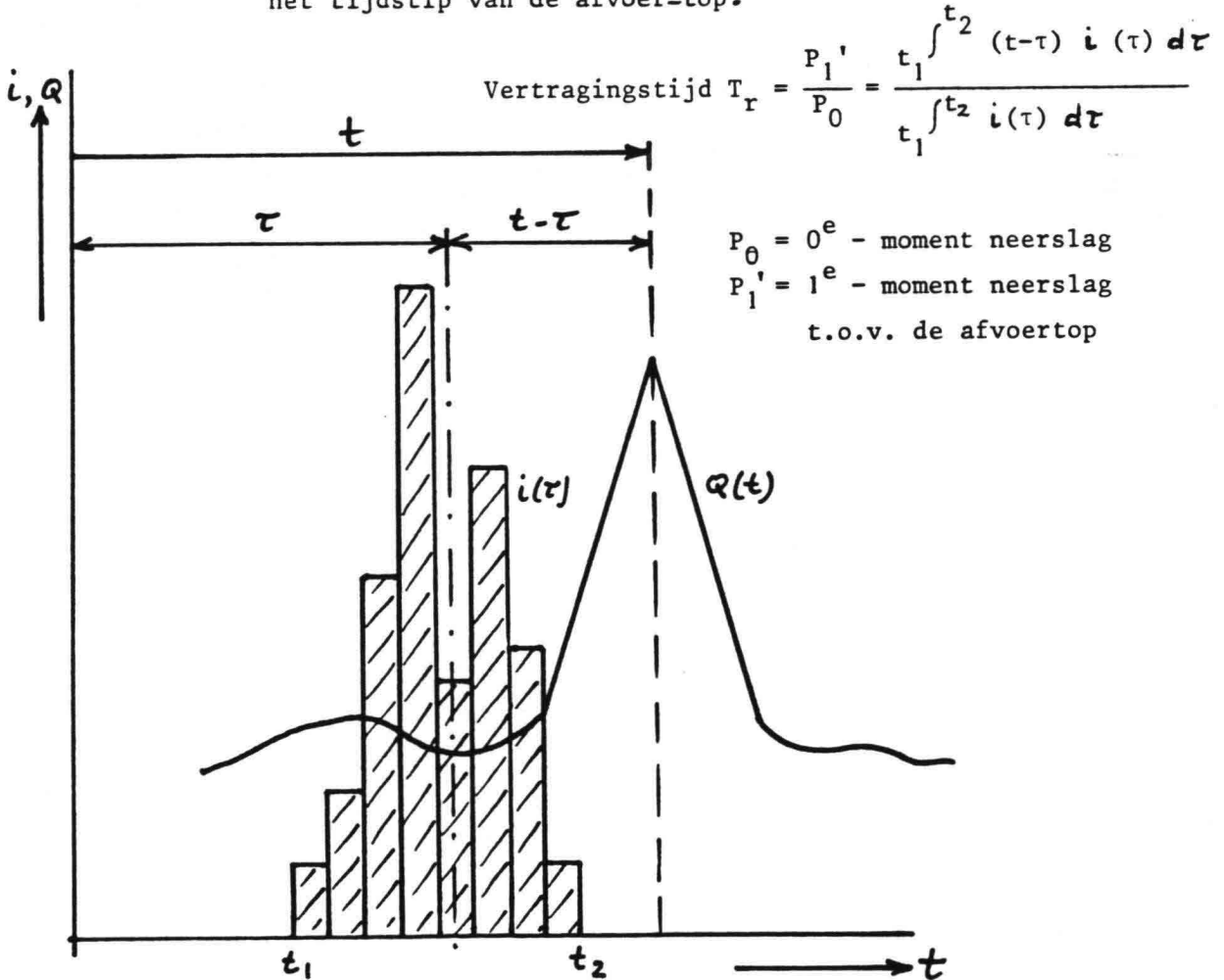
Figuur 4.8: Structuurdiagram voor de bepaling van het afvoerverloop op de instroomranden met een relatief korte looptijd tot Lobith m.b.v. neerslaggegevens (voorspeltperiode).



Figuur 4.9: Afvoervoorspelling met een functievoorschrift, in geval van een hoogwatergolf op een zijrivier met een relatief kleine looptijd tot Lobith.



Figuur 4.10: Vertragingstijd tussen het zwaartepunt van de neerslag en het tijdstip van de afvoer-top.



Tabel 4.1: Relevante voorspeltijden  $T_{rel}$  voor de instroommeetstations van het netwerk.

Instroommeetstation	$T_{rel}$ ( $Q, Rijn = 10.000 \text{ m}^3/\text{s}$ ) in dagen	$T_{rel}$ ( $Q, Rijn = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$ ) in dagen
Mainz (Rijn)	0,00	1,00
Grolsheim (Nahe)	0,25	1,00
Kalkofen (Lahn)	0,50	1,25
Cochem (Moezel)	0,50	1,25
Menden (Sieg)	1,00	1,50
Hattingen (Ruhr)	1,50	2,00
Schermbeck (Lippe)	2,25	2,50

5. Criteria voor het gebruik van het model

Het hoogwatervoorspellingsmodel voor de Rijn is geijkt voor de hoogwatergolf van februari 1970. De topwaterstand bij Lobith bedroeg ruim 16 m + N.A.P.

De ijking betrof hier met name de modellering van de uiterwaarden m.b.v. reservoirs en overlaten, de weergave van de dwarsprofielen voor de riviersecties en de schematisatie van de ruwheid door waterstands-onafhankelijke Chézy-waarden.

Omdat de schematisatie van deze 3 riviergrootheden op vrij grove wijze heeft plaatsgevonden - zo worden alle uiterwaarden tussen Mainz en Lobith weergegeven door slechts vier reservoirs en de ijking hiervan heeft bij hoge Rijnstanden plaatsgevonden - moet er aan een aantal criteria worden voldoen alvorens het voorspellingsmodel mag worden toegepast.

Deze criteria hebben betrekking op minimaal vereiste waterstanden op de Rijn.

Omdat met name de reservoirs op zeer grote afstanden van elkaar liggen, is het moeilijk om de exacte Rijnstanden op te geven vanaf welke het voorspellingsmodel toegepast mag worden.

Als uitgangspunt bij het opstellen van de criteria is gekozen voor een te verwachten waterstand bij Lobith van 15 m + NAP, overeenkomend met een debiet van  $7810 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Verder wordt gebruik gemaakt van het feit dat de som van de debieten bij Cochem Mainz ongeveer 80% van het debiet bij Lobith uitmaakt (lit. 1). De sommatie van de debieten bij Cochem en Mainz op eenzelfde tijdstip is toelaatbaar omdat het looptijdverschil van deze meetstations tot Lobith slechts 0,5 dag bedraagt.

De verhouding tussen de debieten bij Cochem en Mainz is per hoogwatergolf verschillend en zal liggen tussen 1:1,5 en 1:2,5.

De waterstand bij Lobith zal 15,00 m + NAP overschrijden indien de som van de debieten bij Cochem en Mainz groter is dan  $0,8 * 7810 = 6250 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Het tijdstip waarop bij Lobith deze stand van 15,00 m + NAP kan worden verwacht zal 2,5 à 3 dagen na het tijdstip liggen waarop de som van 6250 m<sup>3</sup>/s bij Cochem en Mainz wordt bereikt.

Er kunnen afzonderlijke debieten bij Cochem en Mainz berekend worden door uit te gaan van de onderlinge afvoerverhoudingen. Daarbij is gekozen voor drie afvoerverhoudingen: 1:1,5, 1:2 en 1:2,5.

Deze debieten bij Cochem en Mainz kunnen met behulp van de bijbehorende afvoertabellen in de vorm van waterstanden worden geschreven, zie tabel 5.1.

Indien om welke reden dan ook geen waterstanden van de meetstations Cochem of Mainz kunnen worden verkregen, wordt gebruik gemaakt van meetstation Andernach.

Het debiet bij Andernach vormt ongeveer 87% van het debiet bij Lobith (zie lit. 1); de looptijd van Andernach tot Lobith bedraagt ongeveer 2 dagen. Omgerekend kan worden dat indien bij Andernach het peil van 770 cm a.P. wordt overschreden, bij Lobith een waterstand van 15,00 m + NAP verwacht mag worden.

Wanneer de voorspellingen van het model worden gerelateerd aan de waterstanden bij Lobith, kan grofweg worden gesteld dat het model is geijkt voor waterstanden te Lobith boven 14,00 m + NAP.

Bij het doorrekenen van een lagere afvoergolf bleek er in het model te weinig berging aanwezig.

Figuur 5.1 toont het gevolg hiervan voor de voorspelling bij Lobith. Voor de stijgende tak waren de voorspellingen hoger dan de werkelijk opgetreden standen.

Daarentegen gaf het model voor de dalende tak te lage voorspellingen.

Tenslotte is in figuur 5.2 voor een tweetal mogelijke hoogwatergolven weergegeven welke voorspellingen kunnen worden verwacht bij het opstarten van het model bij waterstanden te Lobith lager dan 14,00 m.

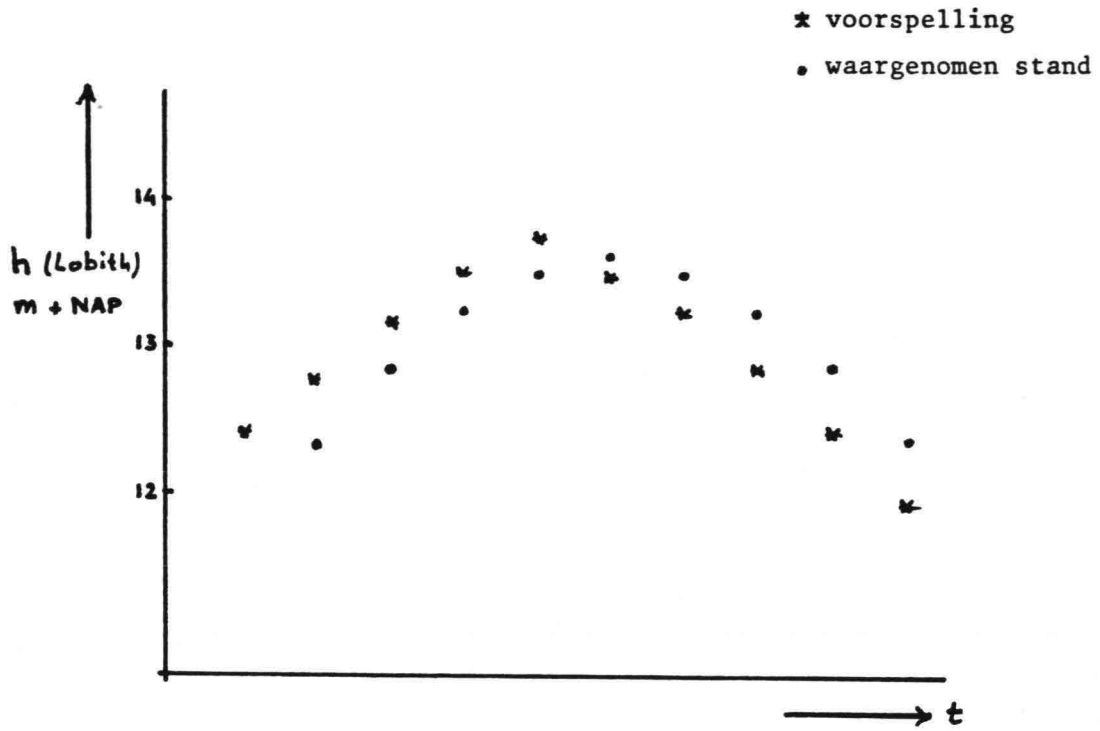


Fig. 5.1: Hoogwatervoorspelling voor Lobith (top lager dan 14 m).

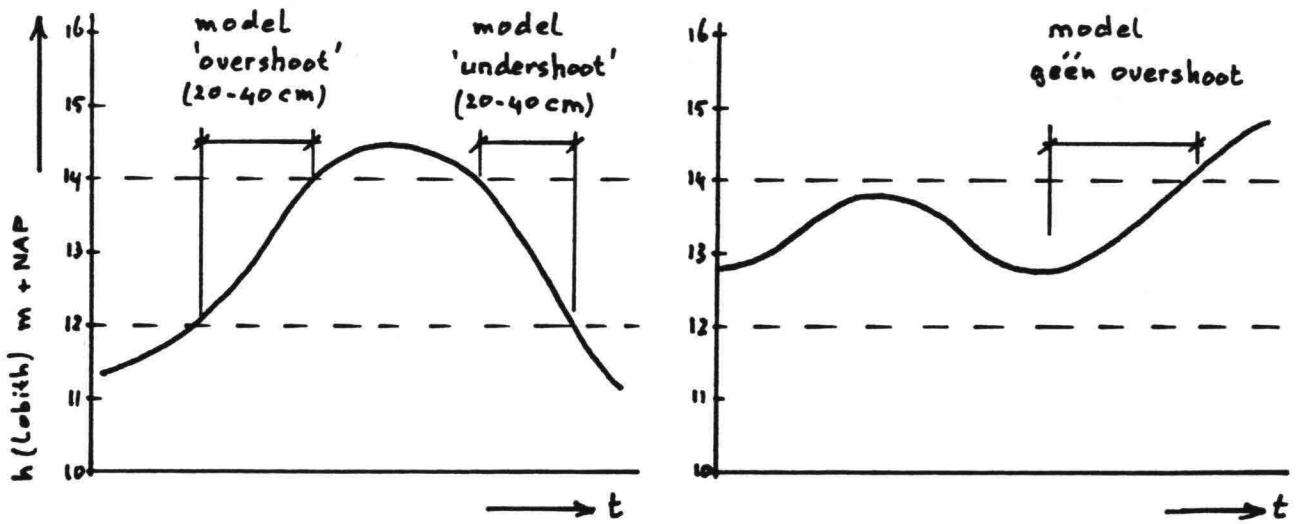


Fig. 5.2: Hoogwatervoorspelling indien het model wordt opgestart bij waterstanden te Lobith lager dan 14 m.

Tabel 5.1: Criteria waaraan voldaan moet worden alvorens men het hoogwatervoorspellingsmodel voor de Rijn mag toepassen.

	Afvoerverhouding Q (Cochem): Q (Mainz)	h (Cochem) in cm a.P.	h (Mainz) in cm a.P.
Combinatie 1	1:1,5	780 cm of meer	540 cm of meer
Combinatie 2	1:2,0	700 cm of meer	570 cm of meer
Combinatie 3	1:2,5	640 cm of meer	600 cm of meer

## 6. Conclusies en aanbevelingen

Er is in het kader van dit project gewerkt aan het operationeel maken van het hoogwatervoorspellingsmodel voor de Rijn.

Het model geeft een voorspelling voor Lobith tot 3 dagen vooruit.

De hoogwaterberekening wordt uitgevoerd met het programma ZWENDL, een variant van het meer bekende programma IMPLIC.

Het rekenprogramma van ZWENDL is gebaseerd op het flood-routing principe en bestaat uit de numerieke uitwerking van de lange golf vergelijking, gecombineerd met een continuïteitsvergelijking.

Hiertoe zijn de Rijn en haar zijrivieren geschematiseerd tot een netwerk, bestaande uit takken en knooppunten.

Omdat de invoergegevens die de gebruiker ter beschikking staan niet overeenkomen met de benodigde invoergegevens voor het programma ZWENDL is er een voorschakelprogramma voor de eigenlijke hoogwaterberekening ontwikkeld.

Het voornaamste doel van het voorschakelprogramma is het transformeren van de door de gebruiker opgegeven reeksen waterstanden naar equidistante afvoerreeksen voor de instroomranden in het netwerk.

Aangezien het model geijkt is voor een beperkt waterstandsbereik kunnen slechts goede voorspellingen met het model verwacht worden bij waterstanden te Lobith vanaf ongeveer 14 m + NAP.

Het zogenaamde "blind doorrekenen" van de hoogwatergolf van april 1983 leverde een voorspelde topwaterstand op met een nauwkeurigheid van 7 cm. Het tijdstip van de berekende topwaterstand verschilde 3 uur met het werkelijke tijdstip waarop de hoogwatertop Lobith passeerde.

Om het model voor een groter waterstandsbereik geschikt te maken en de voorspellingen met het model te verbeteren wordt een aantal aanbevelingen voor nader onderzoek gegeven.

Met name de schematisatie van de uiterwaarden d.m.v. reservoirs en de afvoervoorspelling voor de instroomranden m.b.v. neerslag-afvoer relaties kunnen aanzienlijk verbeterd worden.



De aanbevelingen voor nader onderzoek zijn:

a. Met betrekking tot de weergave van de uiterwaarden:

- Alle uiterwaarden tussen Mainz en Lobith zijn in het model slechts weergegeven door vier reservoirs, welke door middel van een in- en uitstroomoverlaat met een vaste breedte en drempelhoogte met de Rijn zijn verbonden.  
Door het inbouwen van een groter aantal reservoirs, die elk bij verschillende nader te bepalen waterstanden vol- en leeglopen, kan het effect van de uiterwaarden beter worden berekend.  
Hierdoor kan bijvoorbeeld ook de specifieke vorm van de afvoerverlooplijn bij Lobith rond  $9000 \text{ m}^3/\text{s}$  beter worden gevolgd.
- Door te onderzoeken welke uiterwaarden van de Rijn bij standen van Lobith tot  $14 \text{ m} + \text{NAP}$  vollopen en deze te schematiseren en in te bouwen in het model, kan het voorspellingsmodel al bij lagere Rijnstanden worden toegepast.
- Door het inbouwen van die uiterwaarden, die bij extreme Rijnstanden overstromen (lit. 3), zou men m.b.v. een berekening met het voorspellingsmodel kunnen toetsen in hoeverre de verwachte waterstand bij de vastgestelde maatgevende afvoer van  $16.500 \text{ m}^3/\text{s}$  van de Rijn bij Lobith (lit. 4) juist is.

b. Met betrekking tot neerslag- afvoer modellen:

Werkelijke neerslag-afvoer modellen zijn niet ontwikkeld.  
Wel is bij de afvoervoorspelling voor de zijrivieren gebruik gemaakt van de vertragingstijd tussen de neerslag en de afvoer.  
De vertragingstijd is hierbij gedefinieerd als de tijdsduur tussen het zwaartepunt van de neerslag en het tijdstip van de afvoertop.  
De afvoer-voorspelling voor de zijrivieren zal aanzienlijk kunnen worden verbeterd als per gebied een betere relatie tussen de neerslag en de afvoer wordt ontwikkeld.

c. Met betrekking tot de computertoepassing:

- Momenteel staat het model op de UNIVAC-computer.

Dit heeft als nadeel dat er in het weekend geen gebruik van kan worden gemaakt.

Door het programma geschikt te maken voor de VAX-computer kan de gebruiker het model op ieder moment draaien.

7. Literatuur

1. Afstudeerverslag 'Voorspellingsmodel voor hoogwater op de Rijn'  
door G.N. Slats, T.H. Delft, mei 1985.
2. Gebruikersdocumentatie ZWENDL 30 versie 2:2,  
door ing. B. Witteveen, Rijkswaterstaat district Zuid-West.
3. Mogelijke overstromingen in Duitsland en de gevolgen daarvan  
voor de maatgevende afvoer van de Rijn,  
door ir. A.J. Veraart, Rijkswaterstaat directie Waterhuishouding  
en Waterbeweging district Zuid-Oost, dec. 1984.
4. Een hernieuwd onderzoek naar de maatgevende afvoer van de Rijn te  
Lobith,  
door ir. J.W. van der Made en ir. J.G. de Ronde, Rijkswaterstaat  
directie Waterhuishouding en Waterbeweging, Okt. 1984.

