

**DE KOPPELING VAN HET GRONDWATERMODEL GELDYM-MUST
EN HET OPENWATERMODEL LYMPHA**

MODEL TRIGON

P. M. Promes

RAPPORT 9

Oktober 1990

**Vakgroep Hydrologie, Bodemnatuurkunde en Hydraulica
Nieuwe Kanaal 11, 6709 PA Wageningen**

529980

Dit onderzoek werd verricht in opdracht en ten laste van het provinciaal bestuur van Gelderland,
en vormt een deelstudie van het onderzoek "Optimaliseren Peilbeheer".

INHOUDSOPGAVE

blz.

VOORWOORD

SAMENVATTING

1	INLEIDING	7
1.1	Achtergronden van het onderzoek "Optimaliseren Peilbeheer"	7
1.2	Aanpak en uitvoering	12
1.3	Leeswijzer	13
2	KORTE THEORETISCHE BESCHRIJVING VAN DE AFZONDERLIJKE MODELLEN	13
2.1	Algemeen	13
2.2	GELDYM	14
2.3	MUST	16
2.3.1	Modelbeschrijving	16
2.3.2	Koppeling met GELDYM	18
2.4	LYMPHA	20
3	DE KOPPELING GELDYM-LYMPHA	23
3.1	Doelstelling	23
3.2	De discretisatie in de tijd	24
3.3	De ruimtelijke discretisatie	27
3.4	De interactie tussen grondwater en openwater	28
3.4.1	Algemeen	28
3.4.2	Het openwater als randvoorwaarde van het grondwater	31
3.4.3	De zijdelingse toe- of afvoer vanuit het grondwater naar het openwater	35
3.5	Het iteratief algoritme	39
3.6	Initialisatie	41
3.7	De uitvoer	41

4	TESTBEREKENINGEN	42
4.1	Algemeen	42
4.2	Berekening 1: GELDYM stationair, LYMPHA stationair	43
4.3	Berekening 2: GELDYM niet-stationair, LYMPHA stationair	47
4.4	Berekening 3: GELDYM niet-stationair, LYMPHA niet-stationair	51
4.5	Verschillen in de modellering van de interactie tussen grondwater en openwater	52
5	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	53
	LITERATUUR	58
	LIJST VAN SYMBOLEN	60
	APPENDIX A Gebruikershandleiding en documentatie voor het model TRIGON	62

VOORWOORD

De voorliggende publikatie is het eindverslag van een onderzoek, dat werd uitgevoerd van januari 1989 tot en met maart 1990 aan de Vakgroep Hydrologie, Bodemnatuurkunde en Hydraulica van de Landbouwniversiteit in Wageningen. Het onderzoek werd uitgevoerd in samenwerking met de Dienst Milieu en Water, afdeling Water, van de Provincie Gelderland en vormt een deelstudie van het project "Optimaliseren Peilbeheer" van de Provincie Gelderland. Deze deelstudie had tot doel het totstandbrengen van een koppeling tussen het verzadigd-onverzadigd grondwatermodel Geldym-Must en het openwatermodel Lympha.

Het onderzoek werd uitgevoerd door mw. P.M. Promes. De directe begeleiding was in handen van de heren H.J. van Ieperen, J.N.M. Stricker en P.J.J.F. Torfs.

Voorts werd het onderzoek ondersteund door een werkgroep in de volgende samenstelling:

ir. R.H.C.M. Awater	: Dienst Milieu en Water, Provincie Gelderland
H.J. Brinkhof	: Dienst Milieu en Water, Provincie Gelderland
ir. J. Cusell	: Dienst Milieu en Water, Provincie Gelderland
ir. H.J. van Ieperen	: Vakgroep Hydrologie, Bodemnatuurkunde en Hydraulica, LU Wageningen
dr.ir. Th.J. van de Nes	: Dienst Milieu en Water, Provincie Gelderland
ir. P.M. Promes	: Vakgroep Hydrologie, Bodemnatuurkunde en Hydraulica, LU Wageningen
ir. H.J. Reit	: Dienst Milieu en Water, Provincie Gelderland
ir. J.N.M. Stricker (voorz.)	: Vakgroep Hydrologie, Bodemnatuurkunde en Hydraulica, LU Wageningen
drs. P.J.J.F. Torfs	: Vakgroep Hydrologie, Bodemnatuurkunde en Hydraulica, LU Wageningen
ir. L. van der Werff	: Dienst Milieu en Water, Provincie Gelderland

Daarnaast werd de studie begeleid door de begeleidingscommissie Onderzoek Optimaliseren Peilbeheer onder voorzitterschap van dhr. Th.J. van de Nes.

De begeleidingscommissie is als volgt samengesteld:

dr.ir. Th.J. van de Nes (vz):	Provincie Gelderland, Dienst Milieu en Water
ing. H.F.J. Kempen (secr)	: Provincie Gelderland, Dienst Milieu en Water
ir. R.H.C.M. Awater	: Provincie Gelderland, Dienst Milieu en Water
H.J. Brinkhof	: Provincie Gelderland, Dienst Milieu en Water
ing. G.P. Meijers	: Provincie Gelderland, Dienst Milieu en Water
ir. J.M.S. Overmars	: Provincie Gelderland, Dienst Ruimte, Wonen en Groen
ir. J.N.M. Stricker	: LU Wageningen, vakgroep Hydrologie, Bodemnatuurkunde en Hydraulica
dr.ir. P.J. van Bakel	: Staringcentrum
ing. F. Mandersloot	: St. Proefstation voor de Rundveehouderij
ir. Th.V. Vellinga	: St. Proefstation voor de Rundveehouderij
ing. G.M. Pronk	: Landinrichtingsdienst, afdeling Landbouw-Economisch Onderzoek
ing. G.J. Koerselman	: Min. van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij, Dir. Landelijke Gebieden Natuur en Openluchtrecreatie in de Provincie Gelderland
ing. P. Nicolai	: Min. van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij, Consulentschap voor de Rundveehouderij
ir. P. van der Kloet	: TU Delft, afd. Elektrotechniek
ing. B. Ensing	: Gelderse Waterschapsbond; Waterschap van de Berkel
J. van der Plicht	: Gelderse Waterschapsbond; Zuiveringsschap Oostelijk Gelderland

Op deze plaats wens ik allen die aan de totstandkoming van deze publikatie hebben bijgedragen van harte te bedanken voor het in mij gestelde vertrouwen, de vruchtbare discussies en kritische kanttekeningen, het verzorgen van type- en tekenwerk en de morele steun.

Pauline Promes

Oktober 1990

SAMENVATTING

Dit eindverslag vormt een deelstudie van het project "Optimaliseren Peilbeheer" van de Provincie Gelderland. Doelstelling van dit project is "het ontwikkelen van een methodiek die op grond van de actuele situatie en de te verwachten omstandigheden aangeeft welke openwaterpeilen dienen te worden nagestreefd opdat de (landbouwkundige) schade door droogte en/of wateroverlast wordt geminimaliseerd". Deze deelstudie had tot doel het totstandbrengen van een koppeling tussen het verzadigd-onverzadigd pseudo stationair grondwatermodel GELDYM-MUST en het openwatermodel LYMPHA. Het gekoppelde model heeft de naam TRIGON vanwege het ontstaan uit drie (TRI) afzonderlijke modellen met betrekking tot grondwater (G), oppervlaktewater (O) en onverzadigde zone (ON). Tevens is het de latijnse naam voor kaatsbal hetgeen verwijst naar de interactie tussen de modellen en het heen en weer rekenen.

Ten behoeve van de koppeling werd een iteratief algoritme ontwikkeld waarmee de grondwaterstroming en de openwaterstroming simultaan kunnen worden berekend. Simultaan berekenen betekent dat de voor een bepaald tijdstip berekende waterdiepten in het openwater invoer zijn voor de berekeningen van de stijghoogten in het grondwater voor datzelfde tijdstip en vice versa. Het ontwikkelde rekenmodel TRIGON heeft een modulaire opbouw en bestaat uit de rekenmodules MUST, GELDYM en LYMPHA die subroutines van één hoofdprogramma zijn. De rekenmodules kunnen ook onafhankelijk van elkaar worden gebruikt in welk geval dezelfde invoerfiles gebruikt kunnen worden. Bij het gebruik van het gekoppelde rekenmodel vormt de modellering van het verzadigd grondwatersysteem de basis, terwijl de modelberekening kan worden uitgebreid met modelleringen van het onverzadigd grondwatersysteem en/of het openwatersysteem. Indien met TRIGON gerekend wordt terwijl wordt opgegeven dat niet gekoppeld aan MUST en LYMPHA moet worden, is de berekening identiek aan die van het ongekoppelde model GELDYM.

De berekening van de grondwaterstroming en openwaterstroming start met de berekening van stationaire stroming in grondwater en openwater. Per rekentijdstap van het gekoppelde model vinden iteraties plaats. De iteraties worden gestaakt wanneer de verschillen in berekende stijghoogten en de ver-

schillen in berekende fluxen tussen openwater en grondwater tussen twee opeenvolgende iteraties kleiner zijn dan de opgegeven criteria.

Met het gekoppelde rekenmodel is het zowel mogelijk niet-stationaire openwaterstroming te berekenen, als de openwaterstroming te benaderen met stationaire stromingstoestanden per rekentijdstap. De grondwaterstroming kan in beide gevallen met een andere rekentijdstap berekend worden dan de openwaterstroming en tevens kan de rekentijdstap van de koppeling onafhankelijk gekozen worden.

Bij de koppeling van GELDYM en LYMPHA is ervan uitgegaan dat alle openwaterknopen samenvallen met grondwaterknooppunten. De schematiseringen van grondwater en openwater zullen daarom op elkaar aan moeten sluiten.

In het gekoppelde rekenmodel wordt de flux q_1 tussen grondwater en openwater berekend met een lineaire q_1 - ϕ -relatie (ϕ =stijghoogte). Er zijn drie methoden ontwikkeld waarmee de flux q_1 wordt opgelegd in de grondwater- en openwatermodule. De methoden onderscheiden zich in de wijze waarop de flux q_1 wordt gedefinieerd:

- methode 1: openwater : $q_1=f(t)$
 grondwater: $q_1=f(t)$
- methode 2: openwater : $q_1=f(h,t)$
 grondwater: $q_1=f(t)$
- methode 3: openwater : $q_1=f(t)$
 grondwater: $q_1=f(\phi,t)$

(h = waterdiepte in het openwater)

De uitvoer van het gekoppelde rekenmodel kan bestaan uit:

- de berekende stijghoogten per grondwaterknooppunt,
- de berekende waterdiepten en afvoeren per openwaterrekenpunt,
- de berekende flux tussen openwater en grondwater per grondwaterknooppunt,
- de coëfficiënten van de relatie tussen de flux tussen verzadigde en onverzadigde zone en de stijghoogte per grondwaterknooppunt.

1 INLEIDING

De voorliggende studie vormt een deelstudie van het onderzoek "Optimaliseren Peilbeheer" ten behoeve van het provinciaal waterhuishoudingsplan van de Provincie Gelderland. Om de plaats van deze deelstudie binnen het onderzoek "Optimaliseren Peilbeheer" te verduidelijken zullen hieronder eerst de achtergronden van dit onderzoek worden toegelicht en zal de daarin gevolgde aanpak worden beschreven.

1.1 Achtergronden van het onderzoek "Optimaliseren Peilbeheer"

Het beleid met betrekking tot het integraal waterbeheer streeft naar een zo optimaal mogelijke tegemoetkoming aan de wensen van de belanghebbenden bij de waterhuishouding. Deze wensen zullen in het kwantitatieve waterbeheer veelal geformuleerd zijn in termen van grondwaterstanden in het veld. De grondwaterstanden worden mede beïnvloed door de openwaterpeilen die weer verband houden met het gehanteerde peilbeheer in de watergangen.

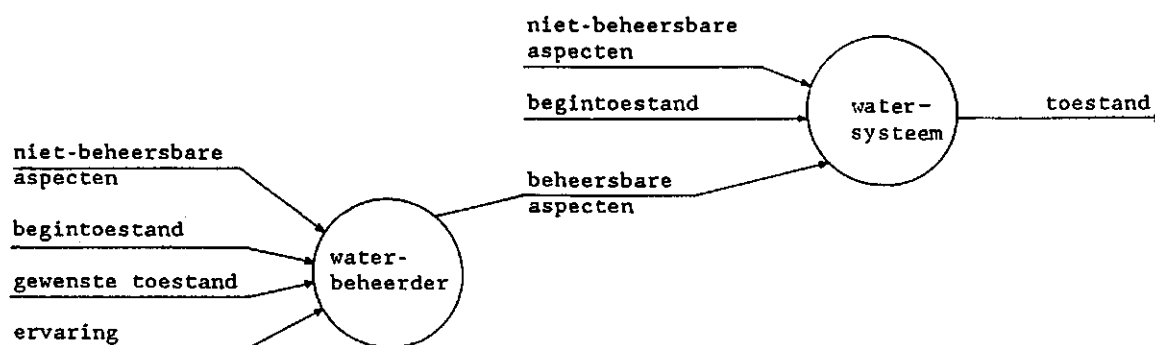
Momenteel berust het peilbeheer veelal op officiële peilbesluiten, die gemiddelde stuwpeilen per seizoen en de data van wijzigingen van de gemiddelde stuwpeilen omschrijven.

Behalve door het peilbeheer wordt het verloop van grondwaterstanden en openwaterpeilen in de tijd bepaald door de beginsituatie en niet-beheersbare aspecten. In het kader van dit onderzoek worden de klepstanden van de aanwezige stuwen beschouwd als de beheersbare aspecten. Onder niet-beheersbare aspecten worden hier verstaan de omstandigheden die niet door de waterbeheerder in zijn dagelijkse beheer beïnvloed kunnen worden. Binnen het kader van het onderzoek zal de onderhoudstoestand van de watergangen niet als een via ingrepen te variëren grootheid worden beschouwd, maar steeds als gegeven worden aangenomen. Onderscheiden kunnen worden:

- tijdsonafhankelijke niet-beheersbare aspecten zoals: infrastructuur en geometrie van de watergangen, locaties van stuwen in de watergangen, geohydrologische en hydraulische parameters;
- tijdsafhankelijke niet-beheersbare aspecten zoals onderhoudstoestand van de watergangen, neerslag en verdamping.

De samenhang tussen waterbeheerder, niet-beheersbare en beheersbare aspecten en de grondwaterstanden en openwaterpeilen (toestand) staat weergegeven in figuur 1.1.

In feite wordt in figuur 1.1 slechts een discrete tijdstap aangegeven binnen het continue proces. De begintoestand is de toestand aan het begin van de tijdstap welke gelijk is aan de toestand op het eind van de vorige tijdstap zoals bepaald door de processen binnen het watersysteem. De toestand kan gemeten worden in het watersysteem maar zal altijd slechts gebrekkig bekend zijn omdat de toestand, in dit geval de grondwaterstanden en openwaterpeilen, slechts op een beperkt aantal lokaties gemeten kan worden.

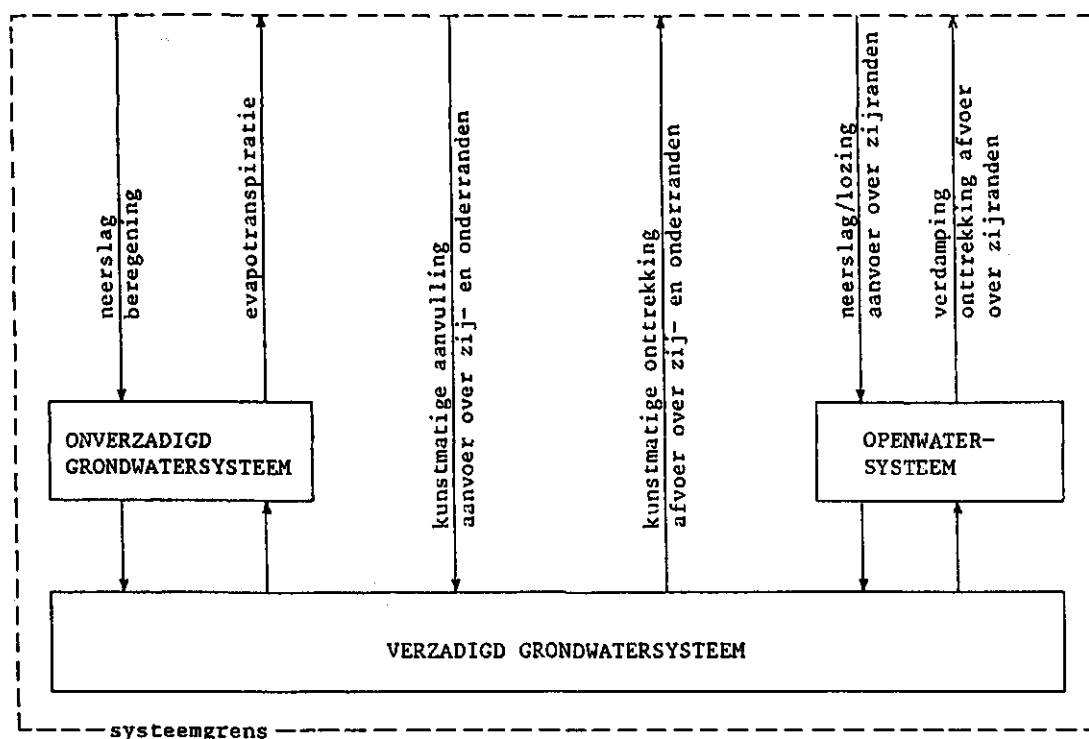


Figuur 1.1 De samenhang tussen waterbeheerder, niet-beheersbare en beheersbare aspecten en de grondwaterstanden en openwaterpeilen (toestand) (bron: Awater (1987))

In figuur 1.2 wordt getoond wat binnen het kader van het onderzoek optimaliseren peilbeheer bedoeld wordt met het watersysteem en de interacties die daarin een rol spelen. Het watersysteem is een deel (ruimtelijk begrensd) van het (geo-)hydrologisch systeem en kan opgebouwd worden gedacht uit de volgende drie subsystemen:

- het verzadigd grondwatersysteem;
- het onverzadigd grondwatersysteem;
- het openwatersysteem.

Indien de openwaterpeilen gemanipuleerd worden op grond van peilbesluiten wordt slechts beperkt rekening gehouden met de actuele situatie in het veld en met mogelijke verwachtingen van de niet-beheersbare aspecten. Verwacht mag worden dat beter op de veranderlijke niet-beheersbare aspecten en de actuele situatie kan worden ingespeeld met een wetenschappelijk onderbouwd flexibel peilbeheer.



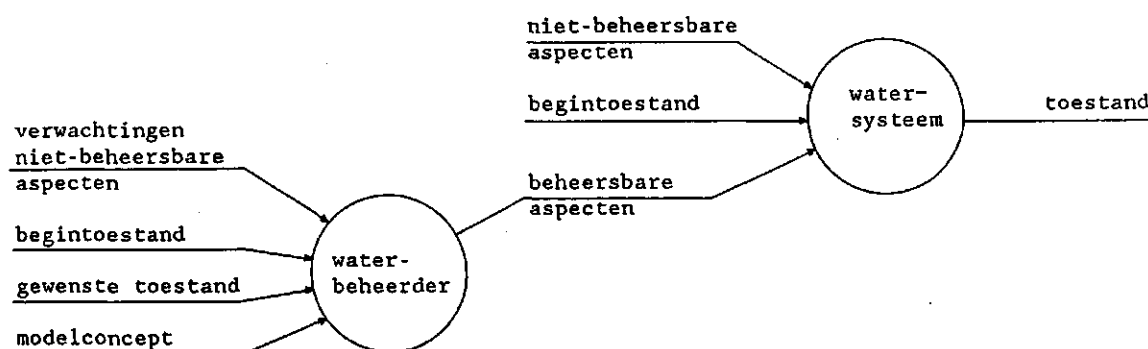
Figuur 1.2 Het watersysteem (bron: Awater (1987))

Daarvoor is het volgende nodig:

- kennis van de gewenste situatie (bijvoorbeeld grondwaterstand waarbij de schade door droogte en/of wateroverlast wordt geminimaliseerd)
- kennis van de samenhang tussen de gewenste situatie en het daarvoor noodzakelijke peilbeheer.

Dit modelconcept is informatie voor de waterbeheerder.

In plaats van op grond van ervaring zal de waterbeheerder met behulp van het modelconcept komen tot beslissingen ten aanzien van het te voeren peilbeheer. Dit is weergegeven in figuur 1.3.



Figuur 1.3 De samenhang tussen gewenste toestand, model concept, beheersbare aspecten en de toestand van het watersysteem (bron: Awater (1987))

In de eerste plaats zal een model voor de gewenste toestand ontwikkeld moeten worden dat de relatie beschrijft tussen grondwaterstanden en geldelijke opbrengst. Binnen het onderzoek "Optimaliseren Peilbeheer" zal in eerste instantie alleen gekeken worden naar landbouwkundige belangen, in het bijzonder naar de belangen van rundveehouderijbedrijven. Daarnaast zou bij het optimaliseren van het peilbeheer ook rekening gehouden kunnen worden met andere belangen. Gestreefd zou kunnen worden naar kostenminimalisatie ten aanzien van het onderhoud van de watergangen alsook naar minimalisatie van schade aan watergangen ten gevolge van overdruk in taluds of te hoge stroomsnelheden. Voorlopig worden deze belangen echter niet meegenomen in het onderzoek maar wordt gekeken naar de mogelijkheden van peilbeheer als alternatief voor beregening.

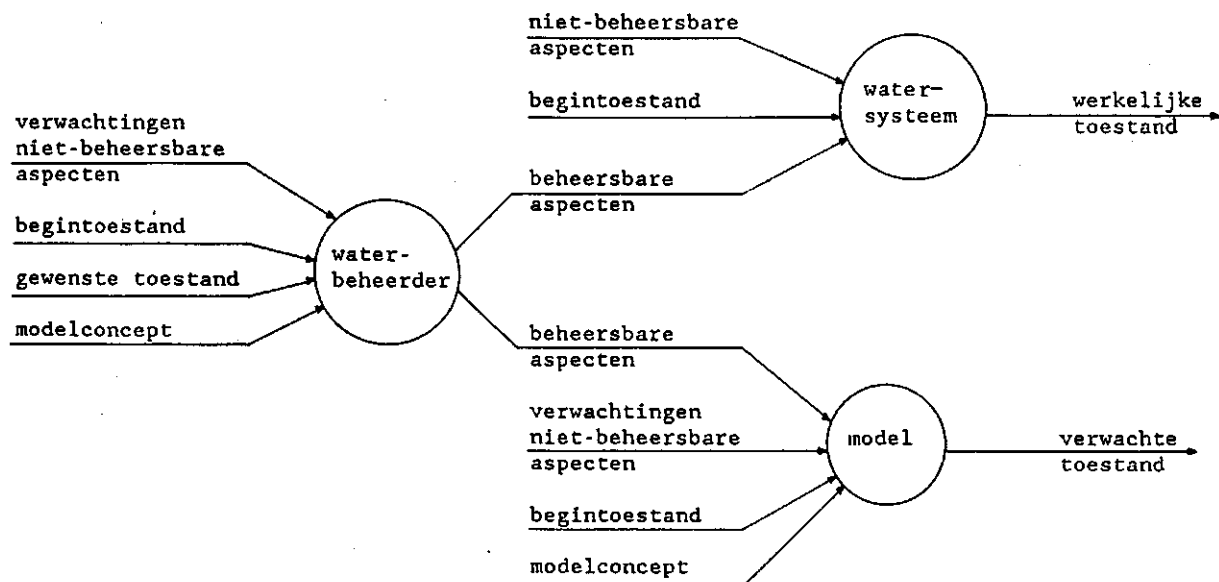
In de tweede plaats zal een model ontwikkeld moeten worden dat, gegeven de begintoestand en de verwachting omtrent niet-beheersbare aspecten, de te

verwachten grondwaterstanden bij een bepaalde peilmaatregel berekent (figuur 1.4).

Met de twee modellen samen kunnen voor een concreet gebied de effecten van verschillende peilmaatregelen gekwantificeerd worden en met elkaar worden vergeleken om tot een keuze van peilmaatregel te komen. Het ligt in de bedoeling om met de twee modellen per gebied, onder uiteenlopende weersomstandigheden en vanuit verschillende uitgangssituaties, steeds de "optimale" peilmaatregel te bepalen. Uit de rekenresultaten van de diverse scenario's zullen uiteindelijk per gebied eenvoudige beheersregels met betrekking tot het stuwbeheer afgeleid moeten worden, die inspelen op de actuele situatie en de te verwachten neerslag en verdamping, zonder dat in het dagelijks beheer de volledige modellen gebruikt hoeven te worden.

Samenvattend is de doelstelling van het onderzoek ten behoeve van het optimaliseren van het peilbeheer als volgt geformuleerd:

"Ontwikkelen van een methodiek die op grond van de actuele situatie en de te verwachten omstandigheden aangeeft welke openwaterpeilen dienen te worden nagestreefd opdat de schade door droogte en/of wateroverlast wordt geminimaliseerd". (Bijlage I van de brief aan de leden van de Begeleidingscommissie Onderzoek Optimaliseren Peilbeheer van de voorzitter van deze commissie d.d. 16-10-1987)



Figuur 1.4 De samenhang tussen gewenste, verwachte en werkelijke toestand (bron: Awater (1987))

1.2 Aanpak en uitvoering

In de afgelopen periode is binnen het onderzoek "Optimaliseren Peilbeheer" de aandacht gericht geweest op de bepaling van de relatie tussen de grondwaterstanden en de geldelijke opbrengst en op de ontwikkeling van een model dat het natuurlijk systeem beschrijft.

In opdracht van de Provincie Gelderland zijn door het Staring Centrum te Wageningen, in samenwerking met het Proefstation voor de Rundveehouderij te Lelystad, modellen ontwikkeld waarmee de relatie tussen de landbouwwaterhuishouding en de economische produktie op rundveehouderijbedrijven beschreven wordt. Uit berekeningen met de modellen zijn schadefuncties voor grasland afgeleid, die gelden voor zowel natte als droge situaties [Peerboom (1990)]. Hierbij is rekening gehouden met de directe invloed van de waterhuishouding op de groei alsook met aspecten die betrekking hebben op de bedrijfsvoering. Met de schadefuncties kan een waterhuishoudkundige maatregel gerelateerd worden aan landbouw-economische opbrengst.

In een samenwerkingsverband tussen de Provincie Gelderland en de Landbouwuniversiteit Wageningen is een fysisch rekenmodel ontwikkeld dat het natuurlijk systeem, zoals weergegeven in figuur 1.2 beschrijft. Het ontwikkelde computermodel TRIGON heeft een modulaire opbouw en bestaat uit drie rekenmodules die de drie subsystemen afzonderlijk beschrijven:

- het verzadigd grondwatersysteem : GELDYM
- het onverzadigd grondwatersysteem: MUST
- het openwatersysteem : LYMPHA

De modules GELDYM, MUST en LYMPHA zijn van oorsprong "zelfstandige" programma's die onafhankelijk van elkaar gebruikt kunnen worden.

Bij de ontwikkeling van het rekenmodel is de taakverdeling als volgt geweest:

Provincie Gelderland:

- leveren van de module voor het onverzadigd grondwatersysteem: MUST
- leveren van de module voor het verzadigd grondwatersysteem : GELDYM
- zorgdragen voor de koppeling van MUST en GELDYM

Landbouwniversiteit Wageningen:

- leveren van de module voor het openwatersysteem: LYMPHA
- modellering van de interactie tussen het verzadigd grondwatersysteem en het openwatersysteem
- zorgdragen voor de koppeling van GELDYM en LYMPHA

Dit rapport behandelt de modellering van de interactie tussen het verzadigd grondwatersysteem en het openwatersysteem en de koppeling van GELDYM en LYMPHA.

1.3 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 zal kort worden ingegaan op de theoretische achtergronden van de modellen GELDYM, MUST en LYMPHA en op de door de Provincie Gelderland gerealiseerde koppeling tussen het model GELDYM en het model MUST. In hoofdstuk 3 zal daarna de koppeling tussen het grondwatermodel GELDYM en het openwatermodel LYMPHA uitgebreid ter sprake komen. In hoofdstuk 4 zullen enige rekenvoorbeelden besproken worden, die werden uitgevoerd ter controle van de koppeling van GELDYM en LYMPHA. In hoofdstuk 5 worden tot slot enkele knelpunten genoemd en enige aanbevelingen voor de toekomst gedaan. In appendix A is een handleiding en documentatie voor het model TRIGON opgenomen.

2 KORTE THEORETISCHE BESCHRIJVING VAN DE AFZONDERLIJKE MODELLEN

2.1 Algemeen

Het gekoppelde rekenmodel TRIGON heeft een modulaire opbouw en bestaat uit drie rekenmodules die de drie subsystemen afzonderlijk beschrijven:

- het verzadigd grondwatersysteem : GELDYM
- het onverzadigd grondwatersysteem: MUST
- het openwatersysteem : LYMPHA

De modules GELDYM, MUST en LYMPHA kunnen ook onafhankelijk van elkaar gebruikt worden. Dit heeft als voordeel dat bij toepassingen op praktijk-situaties, modelleringen van de verschillende subsystemen afzonderlijk kunnen worden getest en beoordeeld, voordat naar de koppeling van de

subsystemen wordt gekeken. Bij het gebruik van het gekoppelde rekenmodel vormt de modellering van het verzadigd grondwatersysteem de basis, terwijl de modelberekening kan worden uitgebreid met modelleringen van het onverzadigd grondwatersysteem en/of het openwatersysteem.

Voor de modellering van het onverzadigd grondwatersysteem zijn in het gekoppelde rekenmodel twee mogelijkheden opgenomen:

- de bergingsveranderingen worden beschreven met behulp van een lineaire bergingsfunctie, waarbij de bergingscoëfficiënt een constante is,
- de bergingsveranderingen worden beschreven met behulp van een niet-lineaire bergingsfunctie, waarbij de bergingscoëfficiënt berekend wordt met het model MUST.

Voor de modellering van het openwatersysteem zijn in het gekoppelde rekenmodel drie mogelijkheden opgenomen:

- de waterdiepten in het openwater en de drainageweerstand zijn per tijdstap bekend en worden als een vast gegeven ingevoerd,
- de waterdiepten in het openwater worden met behulp van het model LYMPHA berekend, waarbij wordt uitgegaan van stationaire stroming in het openwatersysteem,
- de waterdiepten in het openwater worden met behulp van het model LYMPHA berekend, waarbij wordt uitgegaan van niet-stationaire stroming in het openwatersysteem.

In de volgende paragrafen worden de modellen GELDYM, MUST en LYMPHA zoals ze onafhankelijk van elkaar bestaan, kort beschreven.

2.2 GELDYM

GELDYM is een quasi drie-dimensionaal grondwaterstromingsmodel dat de waterstroming in de verzadigde zone beschrijft. Daarbij wordt verondersteld dat de verzadigde zone juist onder de laagste grondwaterstand begint. De verzadigde zone bestaat uit één of meerdere watervoerende pakketten, die gescheiden kunnen zijn door semi-permeabele lagen en worden gekenmerkt door hoofdzakelijk horizontale waterstroming.

In GELDYM wordt de grondwaterstroming in de verzadigde zone geschematiseerd in een twee-dimensionale horizontale stroming in de watervoerende pakketten

en een één-dimensionale vertikale stroming in de semi-permeabele lagen. Interacties met aangrenzende subsystemen worden vertaald naar fluxen.

Per watervoerend pakket kunnen de volgende fluxen worden onderscheiden:

- kwel naar/wegzijging uit de verzadigde zone
- drainage naar/infiltratie uit het openwater
- (kunstmatige) onttrekking/infiltratie
- flux van/naar onder-/bovenliggend watervoerend pakket
- flux over gebiedsranden

De volgende partiële differentiaalvergelijking beschrijft de stroming in een watervoerend pakket:

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(T_{xx} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(T_{xy} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(T_{yx} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(T_{yy} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) = P \quad (1)$$

met

- ϕ = stijghoogte van het grondwater [L]
- T_{xx} = (anisotrope) transmissibiliteit van het watervoerend pakket [$L^2 T^{-1}$]
- P = bronterm per eenheid van oppervlak,
- som van interacties met aangrenzende subsystemen [LT^{-1}]
- x, y = plaats in horizontaal vlak [L]

De hierboven genoemde fluxen zijn als bronterm in het rechterdeel van de vergelijking opgenomen en kunnen willekeurige functies van ϕ zijn:

$$P = \sum_{i=1}^m q_i \quad [LT^{-1}] \quad (2)$$

$$q_i = f_i(\phi) \quad [LT^{-1}]$$

met

- q = fluxdichtheid [LT^{-1}]
- i = index van het type flux [-]
- m = aantal typen flux dat per watervoerend pakket wordt onderscheiden [-]

In GELDYM wordt de grondwaterstroming berekend met behulp van de eindige elementen methode. Daartoe wordt het modelgebied gediscrètiseerd in een netwerk van driehoekige elementen, waarbij wordt aangenomen dat de stijghoogte binnen een element gedefinieerd is volgens een plat vlak. De hoekpunten van de driehoeken vormen de grondwaterknooppunten. Per knooppunt moet stromingsvergelijking (vgl. (1)) worden opgelost. Het linker deel van de vergelijking wordt gelineariseerd onder de Dupuit-Forchheimer-aanname. In het rechter deel van de vergelijking worden de functies voor q_i , die in plaats van P komen te staan, gelineariseerd tot de volgende algemene vorm:

$$q_i = a_i \cdot \phi + b_i \quad (3)$$

Voor alle knooppunten samen ziet het op te lossen stelsel van lineaire vergelijkingen in matrixnotatie er nu als volgt uit:

$$[S] \cdot [\phi] = [A] \cdot [\phi] + [B] \quad (4)$$

met

- $[S]$ = weerstandsmatrix ($n \times n$)
- $[A]$ = matrix met Σa_i -termen van de q_i - ϕ -relaties ($n \times n$)
- $[B]$ = matrix met Σb_i -termen van de q_i - ϕ -relaties ($n \times 1$)
- $[\phi]$ = stijghoogte-vector ($n \times 1$)
- n = aantal knooppunten

Het stelsel vergelijkingen wordt in GELDYM opgelost met behulp van de Gauss-Seidel iteratie methode met successive overrelaxation.

Een uitgebreide beschrijving van het model GELDYM wordt gegeven door Reit (1988a). Voorts wordt verwezen naar de gebruikershandleiding [Reit (1988b), (1989)].

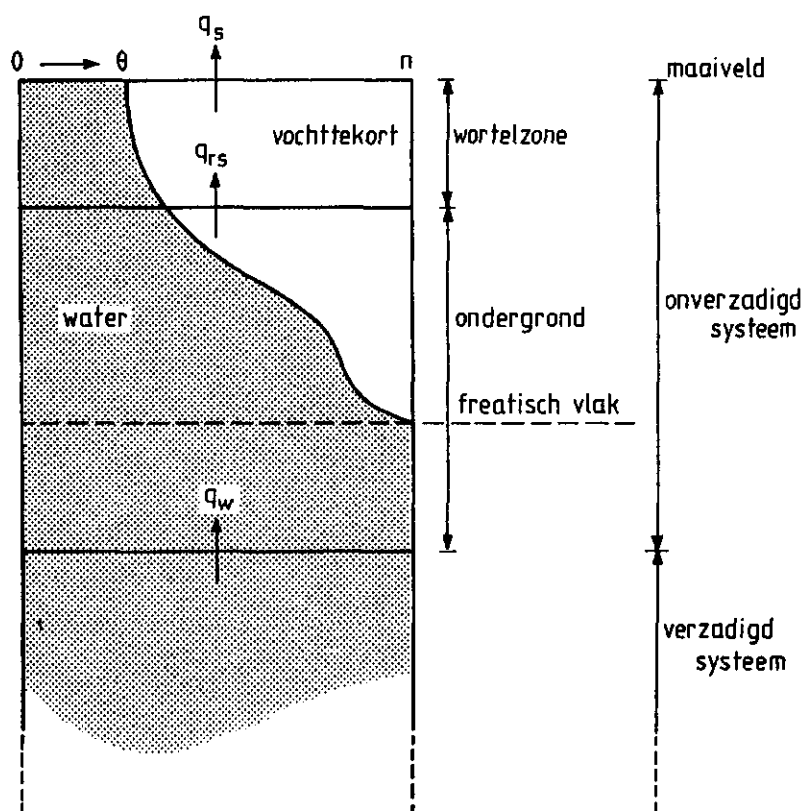
2.3 MUST

2.3.1 Modelbeschrijving

MUST (Model for Unsaturated flow above a Shallow water Table) is een pseudo stationair één-dimensionaal waterstromingsmodel dat de waterstroming in de

onverzadigde zone beschrijft. De fysieke onderrand van het model ligt in het verzadigd grondwatersysteem, juist beneden de laagste grondwaterstand. In de onverzadigde zone treden als gevolg van bergingsveranderingen grondwaterstandsfluctuaties op. De bergingsveranderingen worden veroorzaakt door het voornamelijk verticale vochttransport als gevolg van neerslag, verdamping, wegzijging en kwel.

In het model MUST wordt het onverzadigd grondwatersysteem onderverdeeld in een wortelzone, waarin wateropname door plantenwortels plaatsvindt, en een ondergrond, waarin vertikaal transport optreedt. Figuur 2.1 toont deze schematisering.



Figuur 2.1 Schematisering van het onverzadigd grondwatersysteem in MUST

met q_s = flux van/naar bovenliggend systeem, de atmosfeer $[LT^{-1}]$
 q_{rs} = flux tussen wortelzone en ondergrond $[LT^{-1}]$
 q_w = flux van/naar onderliggend systeem, de verzadigde zone $[LT^{-1}]$

In de wortelzone is de gradiënt van de hydraulische potentiaal gelijk gesteld aan nul. De wateropname van de wortels is een functie van de drukhoogte. In de ondergrond wordt voor iedere tijdstap de stromingssituatie gekarakteriseerd door een combinatie van stationaire stromingstoestanden die overeenkomen met de flux door respectievelijk de boven- en onderrand. Deze pseudo-stationaire benaderingswijze stelt als eis dat de lengte van de tijdstap één of meerdere dagen bedraagt.

De actuele verdamping van bodem en gewas q_s wordt door het model berekend uit meteorologische gegevens of uit potentiële verdampingscijfers.

Berekening is mogelijk volgens een door de gebruiker te specificeren strategie. De randvoorwaarde aan de onderzijde kan gedefinieerd worden met de flux q_w , de grondwaterstand of een relatie tussen deze twee.

Een uitgebreide beschrijving van de theoretische achtergrond is terug te vinden in het proefschrift van De Laat (1980). Tevens is een gedetailleerde gebruikershandleiding beschikbaar [De Laat (1985)].

2.3.2 Koppeling met GELDYM

Door het model MUST te koppelen aan het model GELDYM kunnen gevolgen van diverse ingrepen in de regionale waterhuishouding voorspeld worden. MUST vormt in dat geval de schakel tussen de verdamping van bodem en gewas en de waterbeweging in de verzadigde ondergrond.

Bij de koppeling van GELDYM en MUST wordt de interactie tussen het onverzadigd en het verzadigd grondwatersysteem vertaald naar de flux q_w per grondwaterknooppunt. In GELDYM is q_w één van de termen waaruit de bronterm P (vgl. (1) en (2)) is opgebouwd. In MUST vormt q_w de randvoorwaarde aan de onderzijde van het model.

Figuur 2.2 toont de relatie tussen de stijghoogteverandering over een tijdstap en de fluxdichtheid q_w .

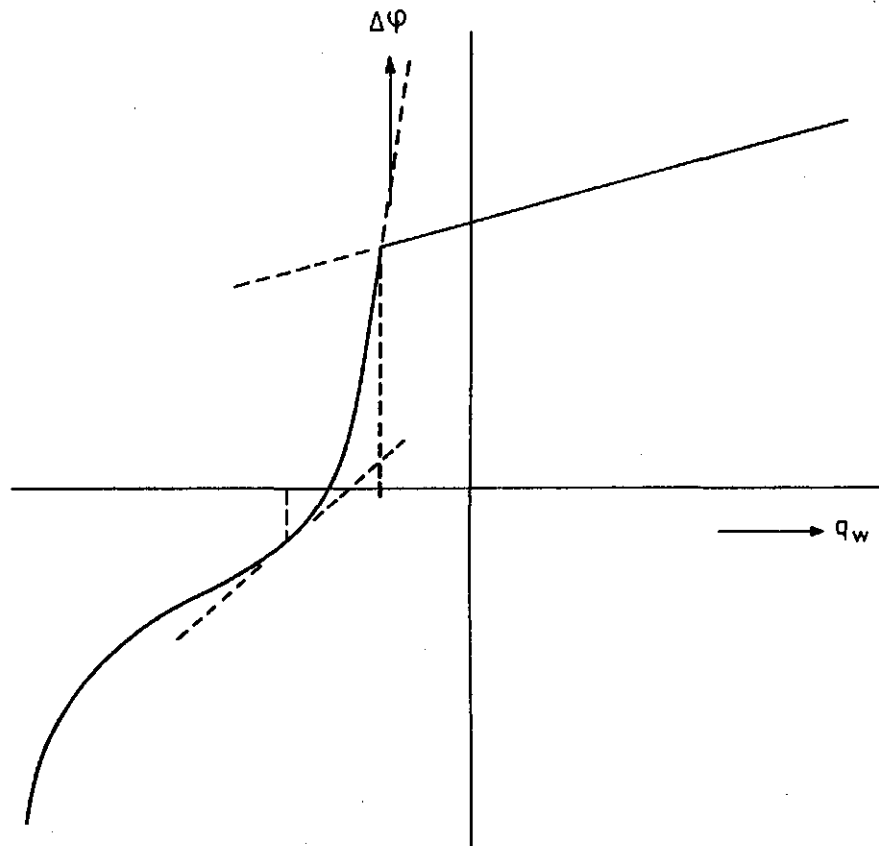
$$q_w = a_w^* \Delta\phi + b_w^* \quad [LT^{-1}] \quad (5)$$

met $\Delta\phi = \phi_t - \phi_{t-1}$

= stijghoogteverschil in een knooppunt over een
tijdstap

[L]

- q_w - fluxdichtheid over het scheidingsvlak onverzadigde-
 verzadigde zone [LT⁻¹]
 a_w^*, b_w^* - coëfficiënt, constant voor het lineaire deel van
 figuur 2.2, voor het niet-lineaire deel van
 figuur 2.2 te bepalen door middel van koorden [T⁻¹], [LT⁻¹]



Figuur 2.2 De stijghoogteverandering over een tijdstap als functie van de flux tussen de onverzadigde en verzadigde zone.

Om vergelijking (1) van GELDYM te kunnen oplossen wordt de in figuur 2.2 getoonde relatie voor elke iteratie en alle knooppunten gelineariseerd door middel van koorden [Reit (1989)], zodat de algemene vorm (vgl. 3) wordt verkregen:

$$q_w = a_w \phi + b_w \quad [LT^{-1}] \quad (6)$$

$$\text{met } a_w = a_w^* \quad [T^{-1}]$$

$$b_w = a_w^* \phi_{t-1} + b_w^* \quad [LT^{-1}]$$

Deze vergelijking kan nu worden opgenomen in het op te lossen stelsel vergelijkingen (vgl. 4). Bij de koppeling van GELDYM en MUST wordt in het verzadigde en in het onverzadigde grondwatersysteem met eenzelfde rekentijdstap gerekend.

Deze methode van koppelen van MUST aan een verzadigd grondwatermodel werd eerder beschreven door De Laat en Awater [1978]. Een uitgebreide beschrijving van de koppeling GELDYM-MUST kan worden aangetroffen in Reit (1989).

2.4 LYMPHA

Het computermodel LYMPHA is ontwikkeld voor de berekening van stationaire en niet-stationaire waterstroming in vertakte open waterlopenstelsels. De naam is ontleend aan het latijnse woord "Lympha" dat onder andere "helder water, uit bron of rivier" betekent. Hiermee wordt aangegeven dat het een waterkwantiteitsmodel betreft en de waterkwaliteit buiten beschouwing blijft.

Bij de ontwikkeling van de rekenmodules van LYMPHA is uitgegaan van de volledige St. Venantvergelijkingen voor één dimensionale waterstroming:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \beta \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial y} = gA(S_0 - S_f) \quad (7)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial y} = q_1 \quad (8)$$

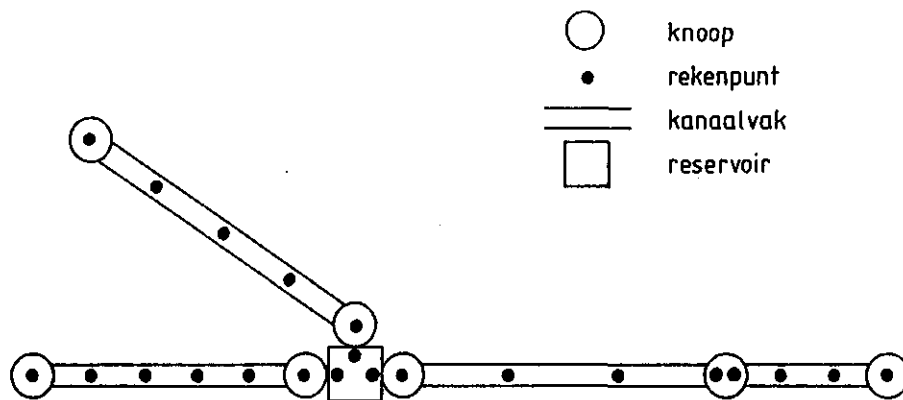
waarbij,

h = waterdiepte t.o.v. bodem [L]	$S_0 = - \frac{\partial z}{\partial y}$ = bodemverhang [-]
A = natte doorsnede [L ²]	
g = zwaartekrachtversnelling [L T ⁻²]	S_f = wrijvingsverhang [-]
	= op te geven functie van h en Q
Q = afvoer [L ³ T ⁻¹]	t = tijd [T]
q_1 = zijdelingse toevoer per eenheid van lengte y [L ² T ⁻¹]	y = plaats in horizontaal vlak [L]
β = correctiecoëfficiënt voor het snelheidsprofiel [-]	z = plaats in verticaal [L]

Voor niet-stationaire waterstroming worden in LYMPHA de St. Venant-vergelijkingen numeriek opgelost met behulp van een expliciet-iteratief (predictor-corrector) rekenschema. Een beschrijving hiervan wordt gegeven door Verweij (1987). Het gekozen rekenschema heeft als consequentie dat stabiliteit gegarandeerd is, mits aan bepaalde voorwaarden wordt voldaan. Binnen LYMPHA wordt de rekentijdstap aangepast aan de opgegeven randvoorwaarden en de stromingstoestand om stabiliteit van de oplossing te bewerkstelligen.

Bij de schematisering van waterlopenstelsels wordt in LYMPHA gebruik gemaakt van drie soorten bouwstenen: knopen, kanaalvakken en reservoirs (figuur 2.3). In knopen kunnen relaties voor de waterdiepte h en/of de afvoer Q worden opgegeven. Knopen worden met elkaar verbonden door kanaalvakken of reservoirs. Het aantal rekenpunten in een kanaalvak moet per kanaalvak worden opgegeven. In de knopen ligt het eerste en laatste rekenpunt van een kanaalvak. De tussenliggende rekenpunten worden gelijk over een kanaalvak verdeeld (equidistant rekenschema per kanaalvak). De afstand tussen de rekenpunten is van invloed op de rekentijdstap voor niet-stationaire waterstroming. In een knoop tussen twee kanaalvakken liggen twee rekenpunten, één die betrekking heeft op het benedenstroomse kanaalvak en één die betrekking heeft op het bovenstroomse kanaalvak. In een knoop tussen een kanaalvak en een reservoir ligt maar één rekenpunt.

Reservoirs kunnen in de schematisering worden opgenomen op plaatsen waar zich in werkelijkheid ook reservoirs bevinden, en moeten worden opgenomen op plaatsen waar in de schematisering meer dan twee kanaalvakken samenkomen. In het laatste geval hebben deze reservoirs geen afmetingen en geen inhoud indien in de werkelijkheid zich hier geen reservoir bevindt. Ten behoeve van de berekening wordt per aanliggende knoop in de reservoirs een extra rekenpunt gesitueerd. Dit gebeurt intern in het programma en de rekenresultaten van deze rekenpunten worden ook niet naar de uitvoerfile geschreven. Wel wordt per reëel reservoir de berekende waterdiepte en inhoud weggeschreven naar de uitvoerfile.



Figuur 2.3 Schematisering van een vertakt waterlopenstelsel in LYPHA

Per kanaalvak wordt één dwarsprofiel, één weerstandsformule en één zijdelingse toe- of afvoerrelatie opgelegd. Onder zijdelingse toe- of afvoer wordt verstaan dat over de gehele lengte van een kanaalvak water toestroomt of het kanaalvak verlaat. De zijdelingse toe- of afvoer wordt per eenheid kanaallengte opgegeven en de relatie hiervoor kan de volgende algemene vormen hebben:

$$\begin{array}{ll} q_1 = f(t) & [L^2T^{-1}] \\ q_1 = f(h, t) & [L^2T^{-1}] \end{array}$$

Per kanaalvak geldt één constante relatie voor q_1 , met andere woorden in de verschillende rekenpunten van één kanaalvak wordt steeds dezelfde formule voor q_1 gebruikt.

In LYPHA worden de waterdiepten en afvoeren per rekenpunt berekend en weggeschreven naar een uitvoerfile. Voor meer informatie over LYPHA wordt verwezen naar Kors en Promes (1990) en Verweij (1987).

3 DE KOPPELING VAN GELDYM-LYMPHA

3.1 Doelstelling

Met het model GELDYM en het model LYMPHA worden de partiële differentiaalvergelijkingen voor de grondwaterstroming (vgl. 1 en 2) en de openwaterstroming (vgl. 7 en 8) afzonderlijk opgelost. Wanneer beide modellen in een modelgebied worden toegepast, moeten de rekenresultaten van beide modellen met elkaar in overeenstemming worden gebracht zodat de waterbalans tussen grondwater en openwater klopt. Doelstelling van deze studie was het ontwerpen van een zo efficiënt mogelijk algoritme hiervoor, zodat de grondwaterstroming en de openwaterstroming simultaan kunnen worden berekend. Simultaan berekenen betekent dat de berekende waterdiepten in het openwater voor een bepaald tijdstip invoer zijn voor de berekeningen van de stijghoogten in het grondwater voor datzelfde tijdstip en vice versa.

Tijdens het ontwerpen van een iteratief algoritme voor het koppelen van een grondwatermodule en een openwatermodule moeten verschillende keuzes gemaakt worden. Deze staan weergegeven in tabel 1. Door Promes (1990) worden deze keuzes besproken aan de hand van in het verleden in andere onderzoeken gerealiseerde koppelingen tussen grondwater- en openwatermodellen. In de hiernavolgende paragrafen zullen de keuzes besproken worden die bij de koppeling van GELDYM en LYMPHA zijn gemaakt. Daarbij zal steeds worden aangegeven wat de voordelen en de beperkingen van de gemaakte keuzes zijn en in hoeverre aanpassing van de bestaande rekenmodules nodig was.

Tabel 1 Keuzemomenten bij het ontwerp van een iteratief algoritme voor het koppelen van een grondwater- en een openwatermodule (bron: Promes (1990)).

-	Al of niet samenvallen van de knooppunten van het openwatermodel met de knooppunten van het grondwatermodel (§3.3).	
-	Wijze van modelleren van het openwater in de grondwatermodule	
	het openwater vormt een externe rand waarvoor een extra vergelijking moet worden opgelost	Dirichlet randvoorwaarde $\phi=f(t)$ Neuman randvoorwaarde $\frac{d\phi}{dx}=f(t)$ Cauchy randvoorwaarde $\frac{d\phi}{dx}=f(\phi)$
	het openwater vormt een interne rand (§3.4.2)	lekterm $q_1=f(t)$ lekterm $q_1=f(\phi)$ éénparametermodel (§6.1.1) meerparametermodel (§6.1.2)
-	Wijze van modelleren van de laterale toevoer vanuit het grondwater in de openwatermodule	
	het grondwater veroorzaakt een flux (§3.4.3)	$q'_1=f(t)$ $q'_1=f(h)$ éénparametermodel meerparametermodel
-	Een éénstapsalgoritme of iteratief algoritme	
-	Al of niet de grondwatermodule (Δt_g) en de openwatermodule (Δt_o) en de koppeling van de modules (ΔT) met eenzelfde tijdstap doorrekenen (§3.2).	

3.2 De discretisatie in de tijd

Met het model LYMPHA kan zowel stationaire als niet-stationaire stroming in een openwaterlopenstelsel berekend worden. Bij de niet-stationaire berekening worden de volledige St. Venantvergelijkingen numeriek opgelost met behulp van een expliciet-iteratief (predictor-corrector) rekenschema. Om

stabiliteit van de oplossing te bewerkstelligen wordt binnen LYMPHA de rekentijdstap aangepast aan de stromingstoestand en de randvoorwaarden. De grootte van de rekentijdstap is voorts afhankelijk van de gekozen ruimtelijke discretisatie en zal in het algemeen in de orde van seconden liggen.

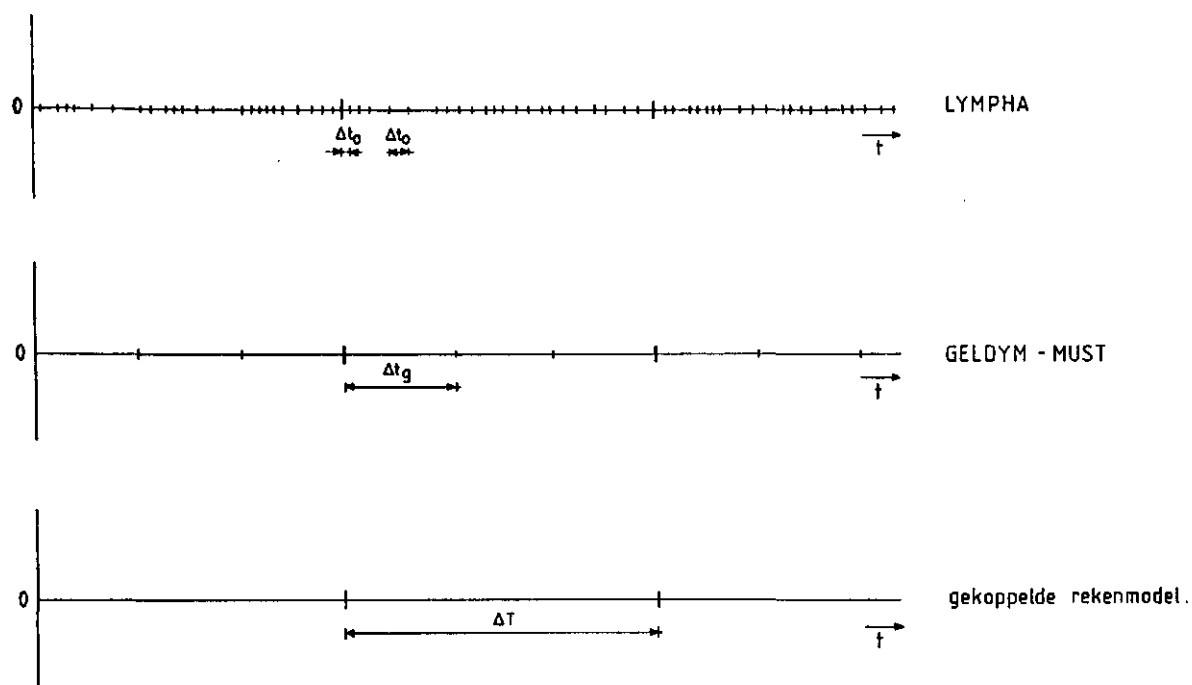
Met het model GELDYM kunnen bergingsveranderingen berekend worden met behulp van een lineaire bergingsfunctie. Door de koppeling met MUST kan er ook met een niet-lineaire bergingsfunctie gerekend worden waarbij de bergingscoëfficiënt volgt uit berekeningen met MUST. In beide gevallen wordt in het verzadigde en in het onverzadigde grondwatersysteem met een zelfde rekentijdstap gerekend. Door de pseudo-stationaire benaderingswijze die in MUST is gehanteerd zal in het laatste geval de grootte van de rekentijdstap één of meerdere dagen moeten bedragen.

Vanwege het grote verschil in lengte van de vereiste rekentijdstappen is het niet mogelijk het grondwatersysteem en het openwatersysteem met eenzelfde rekentijdstap door te rekenen. Ten behoeve van een zo groot mogelijke flexibiliteit zijn daarom in het gekoppelde rekenmodel drie soorten rekentijdstappen geïntroduceerd:

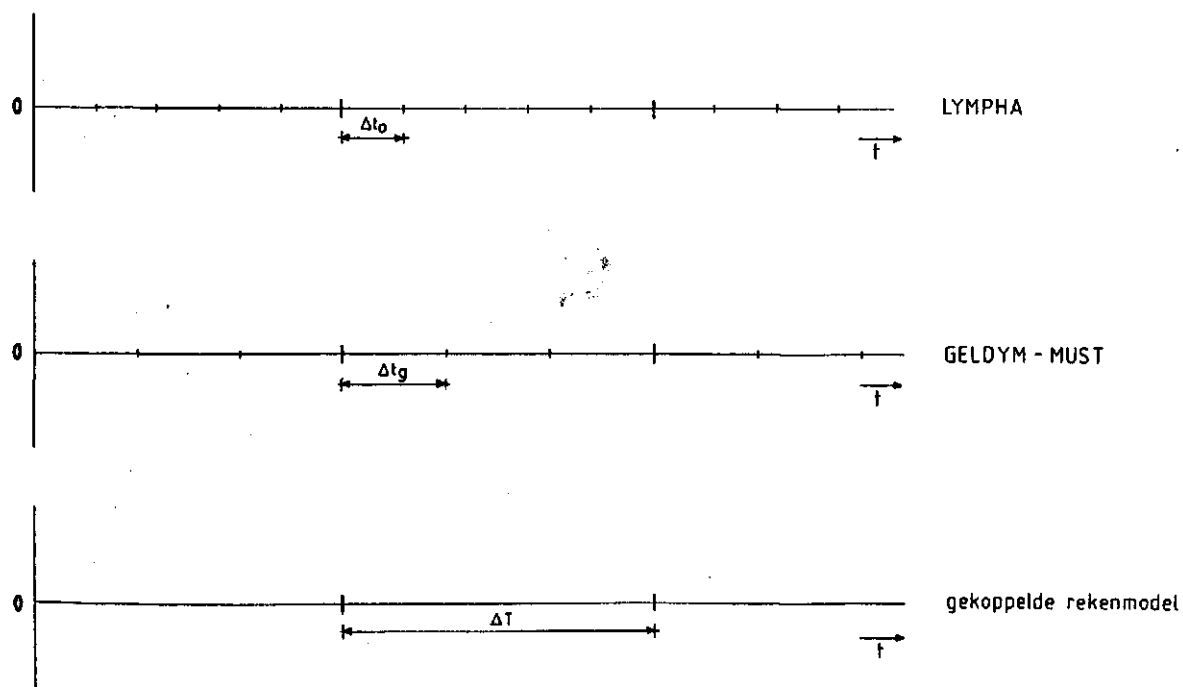
- een rekentijdstap voor het grondwatersysteem Δt_g ,
- een rekentijdstap voor het openwatersysteem Δt_o ,
- een rekentijdstap voor het gehele gekoppelde systeem ΔT .

De rekentijdstap voor het gehele gekoppelde systeem ΔT is een enkel- of veelvoud van de rekentijdstap voor het grondwatersysteem Δt_g en van de rekentijdstap van het openwatersysteem Δt_o zijn. Indien $\Delta T/\Delta t_g = m$, dan wordt de grondwaterstroming berekend op de tijdstippen $t+k \cdot \Delta t_g$, met $k=1,2,\dots,m$. Hetzelfde geldt voor het openwater; de openwaterstroming wordt berekend op de tijdstippen $t+k \cdot \Delta t_o$, met $k=1,2,\dots,n$ voor $\Delta T/\Delta t_o = n$. Voor beiden geldt dat m respectievelijk n ook 1 kan zijn.

Indien met het model LYMPHA niet-stationaire stroming wordt berekend wordt binnen een rekentijdstap voor het gehele gekoppelde systeem ΔT het openwatersysteem doorgerekend met variabele rekentijdstappen die door LYMPHA zelf worden bepaald. Indien met het model LYMPHA stationaire stroming wordt berekend wordt per rekentijdstap voor het openwatersysteem Δt_o (constant van grootte) de stationaire stroming berekend. Eén en ander wordt verduidelijkt in figuur 3.1 en 3.2.



Figuur 3.1 De discretisatie in de tijd indien LYPHA niet-stationair.

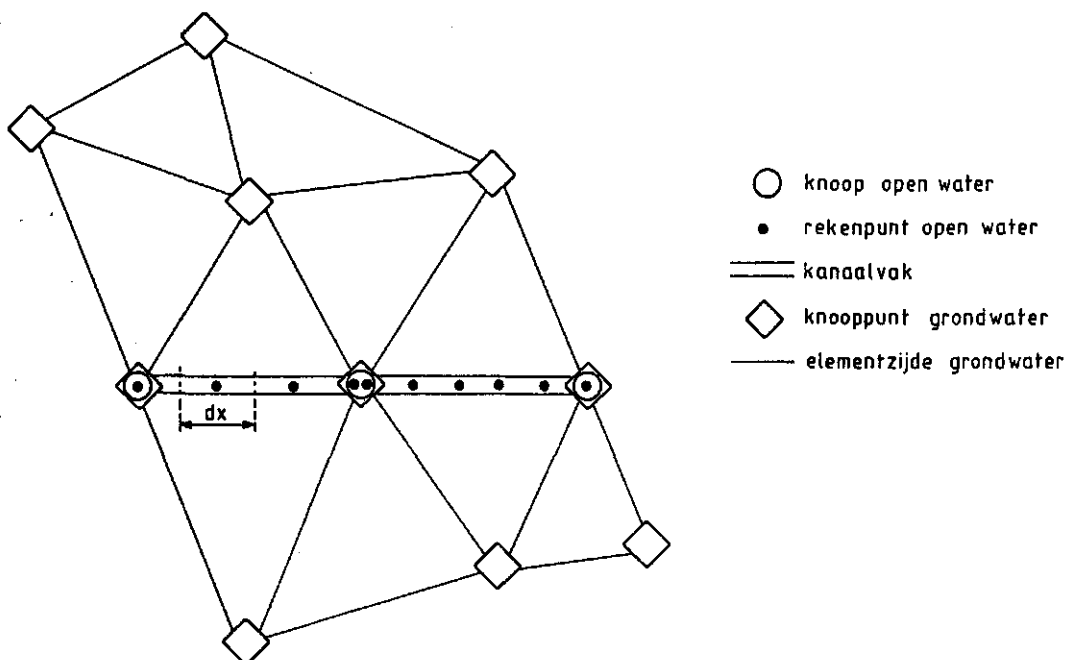


Figuur 3.2 De discretisatie in de tijd indien LYPHA stationair.

Alleen de waterdiepten die berekend zijn voor de tijdstippen $t=n \cdot \Delta T$ met $n=0,1,2,\dots$ zijn invoer voor de grondwatermodule en omgekeerd zijn alleen de stijghoogten die berekend zijn voor de tijdstippen $t=n \cdot \Delta T$ invoer voor de openwatermodule. Op welke wijze interpolatie plaats vindt ten behoeve van de berekeningen van grondwater en openwater op tussenliggende tijdstippen wordt besproken in §3.4.

3.3 Ruimtelijke discretisatie

Uitgangspunt bij de koppeling van GELDYM en LYMPHA is dat alle knopen van het openwatermodel samenvallen met knooppunten van het grondwatermodel. Het is daarbij wenselijk dat de kanaalvakken van het openwater samenvallen met elementzijden van het grondwatermodel (figuur 3.3). Tevens is het wenselijk dat alle grondwaterknooppunten die ter plaatse van kanaalvakken liggen samenvallen met openwaterknopen. Een kanaalvak mag niet langs een gebiedsrand van een grondwatermodel lopen. In het gekoppelde rekenmodel wordt een extra invoerfile ingelezen waarin per grondwaterknooppunt moet worden opgegeven met welke openwaterknoop het grondwaterknooppunt samenvalt (zie appendix A). De gekozen methode van ruimtelijke koppeling heeft als consequentie dat de schematiseringen van grondwater en openwater op elkaar moeten worden afgestemd.



Figuur 3.3 Schematisering van openwater en grondwater in het gekoppelde model

In GELDYM wordt de flux tussen het openwater en de verzadigde zone, gegeven het openwaterpeil, als bronterm per knooppunt gemodelleerd. Deze flux q_1 wordt opgegeven in volume per tijdseenheid [L^3T^{-1}]. Bij de koppeling van GELDYM en LYMPHA wordt aangenomen dat alleen in het eerste watervoerende pakket interactie tussen het openwater en de verzadigde zone plaatsvindt.

In LYMPHA wordt de flux tussen openwater en grondwater, gegeven de grondwaterstand, per rekenpunt berekend aan de hand van een zijdelingse toe- of afvoer-relatie die per kanaalvak wordt opgegeven (§2.4). De flux q'_1 wordt gegeven als volume per eenheid kanaallengte per tijdseenheid [L^2T^{-1}]. In LYMPHA wordt deze flux q'_1 per rekenpunt vermenigvuldigd met de afstand dx tussen twee rekenpunten bij het oplossen van de St. Venantvergelijkingen (vgl. 7 en 8).

Bij de koppeling van GELDYM en LYMPHA moet er middels een ruimtelijke interpolatie en iteraties voor gezorgd worden dat de waterbalans tussen grondwater en openwater klopt.

De flux q_1 die in een grondwaterknooppunt van of naar het openwater stroomt moet gelijk zijn aan de totale flux $\sum q'_1 \cdot dx$ die in de naburige rekenpunten van het openwater naar of van het grondwater stroomt. In §3.4 zal de ruimtelijke interpolatie worden beschreven.

3.4 De interactie tussen grondwater en openwater

3.4.1 Algemeen

In GELDYM wordt de flux q_1 tussen openwater en verzadigde zone als bronterm per grondwaterknooppunt gemodelleerd. De vergelijking voor deze flux heeft binnen GELDYM de volgende vorm:

$$q_1 = a_1 \cdot \phi + b_1 \quad [L^3T^{-1}] \quad (9)$$

In LYMPHA wordt de flux q'_1 tussen openwater en grondwater per rekenpunt berekend aan de hand van een zijdelingse toe- of afvoerrelatie die per kanaalvak wordt opgegeven. Voor alle rekenpunten geldt in de gekoppelde versie de volgende relatie voor de zijdelingse toe- of afvoer:

$$q'_1 = (a'_1 \cdot h + b'_1) \cdot dx \quad [L^3T^{-1}] \quad (10)$$

met dx = afstand tussen de rekenpunten $[L]$

De algemene vorm van vergelijking (9) en (10) heeft als voordeel dat afhankelijk van de waarden van a_1 en a'_1 de fluxen al of niet afhankelijk zijn van de nog te berekenen stijghoogte ϕ respectievelijk waterdiepte h . Tevens kan door $a_1=b_1=0$ op eenvoudige wijze de flux q_1 in grondwaterknooppunten die niet samenvallen met het openwater, gelijk aan nul worden gesteld.

In het gekoppelde rekenmodel kan gekozen worden uit drie methoden om de coëfficiënten a_1 , b_1 , a'_1 en b'_1 van vergelijking (9) en (10) te bepalen. Afhankelijk van de gekozen methoden wordt de directe afhankelijkheid tussen q_1 en ϕ opgenomen in de op te lossen stromingsvergelijking van GELDYM (vgl. 1 en 2), of wordt de directe afhankelijkheid tussen q'_1 en h opgenomen in de op te lossen stromingsvergelijkingen van LYMPHA (vgl. 7 en 8). Bij de drie methoden worden de flux q_1 en de flux q'_1 als volgt aan GELDYM respectievelijk LYMPHA opgelegd:

- methode 1: $q_1 = f(t)$
 $q'_1 = f(t)$
- methode 2: $q_1 = f(t)$
 $q'_1 = f(h^+, t)$
- methode 3: $q_1 = f(\phi, t)$
 $q'_1 = f(t)$

De coëfficiënten a_1 , b_1 , a'_1 en b'_1 zijn afhankelijk van de stijghoogte ϕ , de waterdiepte h^+ en een op te geven drainageweerstand tussen het grondwater en het openwater. De waterdiepte h^+ is de waterdiepte h die in LYMPHA berekend wordt, gesommeerd met de bodemhoogte van het kanaalvak ter plaatse ten opzichte van het referentievlak van de stijghoogte ϕ . De drainageweerstand tussen het grondwater en openwater moet in het gekoppelde rekenmodel opgegeven worden per kanaalvak. Hiervoor worden de oorspronkelijke invoerroutines van LYMPHA gebruikt (zie appendix A en Kors en Promes (1990)).

De waarde die de coëfficiënten a_1 , b_1 , a'_1 en b'_1 krijgen is afhankelijk van de gekozen methode. De wijze waarop in de tijd en in de ruimte geïnterpoleerd wordt is ook afhankelijk van de gekozen methode. Algemeen ten grond-

slag aan de bepaling van de coëfficiënten ligt de volgende formule:

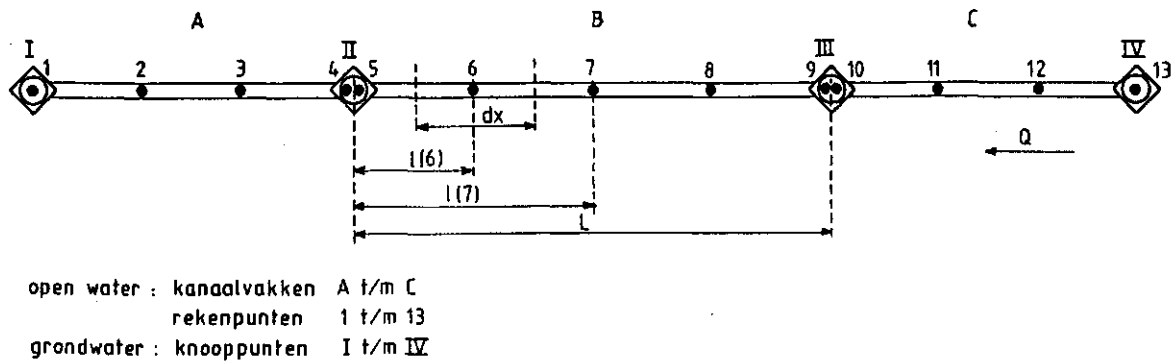
$$q'_1 = (\phi - h^+) \cdot c_{dr} \cdot P \quad [L^2T^{-1}] \quad (11)$$

met

q'_1	= flux per eenheid kanaallengte vanuit het grondwater per openwater rekenpunt	$[L^2T^{-1}]$
ϕ	= stijghoogte van het grondwater	$[L]$
h^+	= waterdiepte + bodemhoogte	$[L]$
c_{dr}	= reciproke drainage-weerstand	$[T^{-1}]$
P	= natte omtrek	$[L]$
	= afhankelijk van de waterdiepte h	

De flux q'_1 is gedefinieerd als volume per tijdseenheid en per eenheid kanaallengte. In LYMPHA wordt deze flux q'_1 vermenigvuldigd met de afstand dx (of dx/z) tussen twee rekenpunten bij het oplossen van vergelijking (7) en (8). Voordat de flux q'_1 tussen openwater en grondwater als randvoorwaarde aan GELDYM kan worden opgelegd moet een soortgelijke vermenigvuldiging plaatsvinden zodat de flux q_1 (gedefinieerd als volume per tijdseenheid verkregen wordt. Via een ruimtelijke interpolatie moet ervoor gezorgd worden dat dezelfde flux die in de openwatermodule wordt uitgesmeerd over één of meerdere kanaalvakken, wordt toegerekend naar één grondwaterknooppunt. De toegepaste ruimtelijke interpolatie verschilt in geringe mate tussen de verschillende methoden. Eén en ander zal in §3.4.2 en §3.4.3 worden verduidelijkt aan de hand van figuur 3.4.

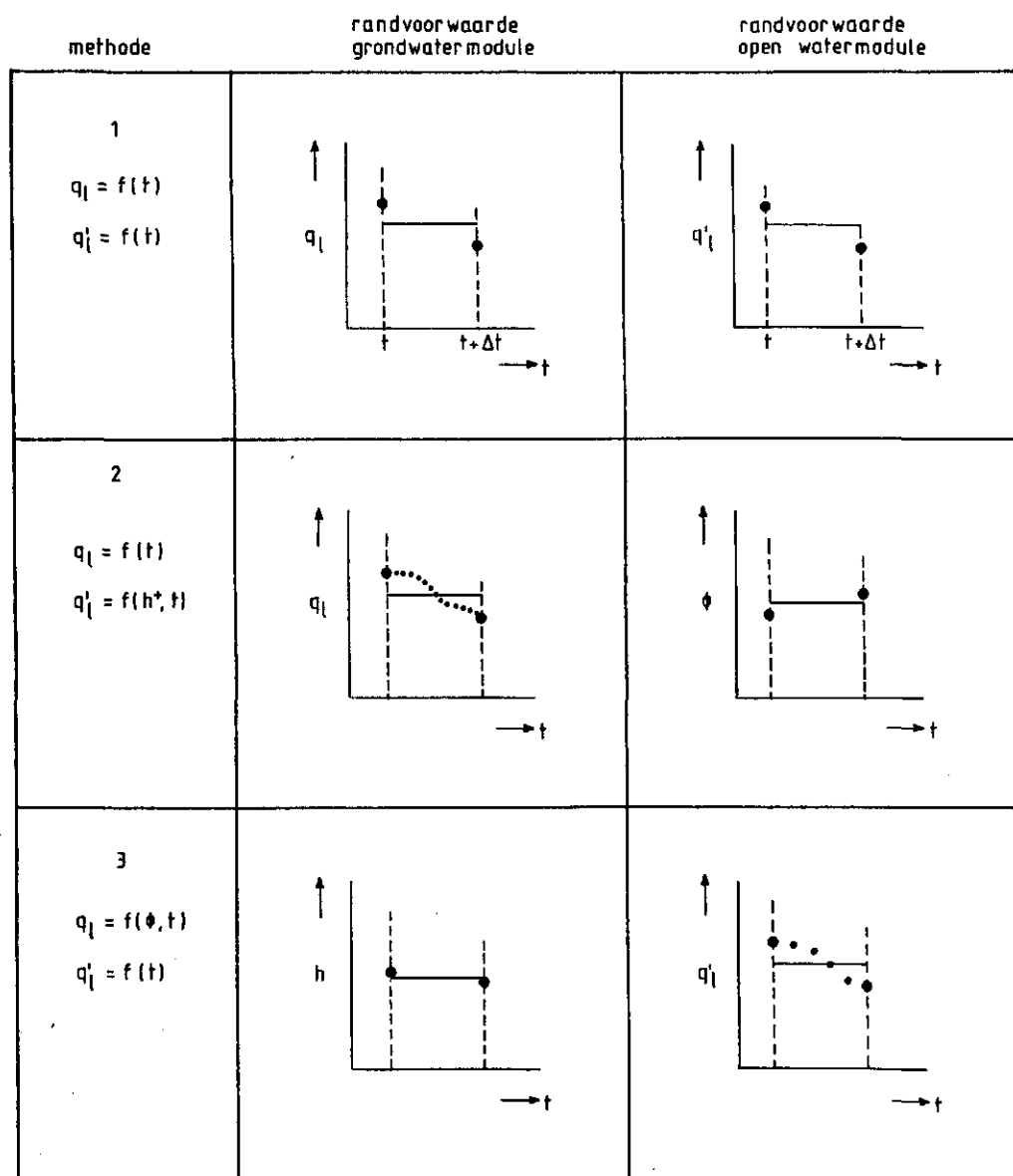
Als uitgangspunt voor alle drie methoden geldt dat gedurende een tijdstap ΔT van het gehele gekoppelde rekenmodel de randvoorwaarden die door het grondwater aan het openwater worden opgelegd (q'_1 of ϕ) constant zijn en de randvoorwaarden die door het openwater aan het grondwater worden opgelegd (q_1 of h^+) constant zijn. Dit wordt geïllustreerd in figuur 3.5. In §3.4.2 en §3.4.3 zal worden aangegeven hoe vergelijking (11) gebruikt wordt om per methode de coëfficiënten a_1 , b_1 , a'_1 en b'_1 te bepalen.



Figuur 3.4 De ligging en nummering van grondwaterknooppunten en knopen en rekenpunten van het openwater.

3.4.2 Het openwater als randvoorwaarde van het grondwater

In deze paragraaf zal per methode beschreven worden hoe de coëfficiënten a_1 en b_1 van vergelijking (9) per grondwaterknooppunt worden bepaald. Algemeen geldt dat een grondwaterknooppunt kan samenvallen met één of meerdere rekenpunten van het openwater. Het aantal rekenpunten waarmee een grondwaterknooppunt samenvalt komt overeen met het aantal kanaalvakken dat ter plaatse samenkomt (zie figuur 2.3, 3.3 en 3.4). Bij methode 1 en 3 spelen alleen deze rekenpunten een rol bij de bepaling van de coëfficiënten a_1 en b_1 per grondwaterknooppunt. Bij methode 2 zijn ook de tussenliggende rekenpunten in de kanaalvakken van belang. De coëfficiënten a_1 en b_1 worden bij alle drie methoden in een aparte subroutine buiten het rekenhart van GELDYM berekend.



Figuur 3.5 De modellering van de interactie tussen grondwater en openwater in de grondwater- en openwatermodule per methode

methode 1: $q_1 = f(t)$

De flux q_1 wordt buiten het rekenhart van GELDYM berekend en is constant gedurende de rekentijdstap ΔT en gelijk aan het gemiddelde van $q_1(t)$ en

$q_1(t+\Delta T)$ (zie fig. 3.5). De flux $q_1(t)$ in een grondwaterknooppunt wordt berekend als de som van de fluxen $q'_1(t)$ in de openwaterrekenpunten die samenvallen met het grondwaterknooppunt vermenigvuldigd met de halve lengte van de bijbehorende kanaalvakken. Voor $q_1(t)$ geldt nu de volgende vergelijking:

$$q_1(t) = \sum_r (h^+(r,t) - \phi(t)) \cdot c_{dr}(v) \cdot P(r,t) \cdot \frac{L(v)}{2} \quad [L^3T^{-1}] \quad (12)$$

met r = openwaterrekenpunt dat samenvalt met
grondwaterknooppunt

$[-]$

v = kanaalvak waar het rekenpunt betrekking
op heeft

$[-]$

c_{dr} = reciproke drainageweerstand per kanaalvak

$[T^{-1}]$

L = lengte kanaalvak

$[L]$

Voor grondwaterknooppunt III in figuur 3.4 betekent dit voor q_1 :

$$\begin{aligned} q_1(III,t) &= (h^+(9,t) - \phi(III)) \cdot c_{dr}(B) \cdot P(9,t) \cdot \frac{L(B)}{2} \\ &+ (h^+(10,t) - \phi(III)) \cdot c_{dr}(C) \cdot P(10,t) \cdot \frac{L(C)}{2} \\ &= q'_1(9,t) \cdot \frac{L(B)}{2} + q'_1(10,t) \cdot \frac{L(C)}{2} \end{aligned} \quad [L^3T^{-1}]$$

Voor a_1 en b_1 geldt nu voor $t < t + k \cdot \Delta t_g \leq t + \Delta T$:

$$a_1 = 0 \quad [L^2T^{-1}] \quad (13a)$$

$$b_1 = \frac{q_1(t) + q_1(t+\Delta T)}{2} \quad [L^3T^{-1}] \quad (13b)$$

Bij de berekening van $q_1(t+\Delta T)$ worden steeds de laatste benaderingen van h^+ en ϕ voor $t+\Delta T$ ingevuld. Dit zal worden verduidelijkt in §3.5.

methode 2: $q_1 = f(t)$

De flux q_1 in een grondwaterknooppunt wordt afgeleid uit de flux q'_1 in de openwaterrekenpunten van aan dit grondwaterknooppunt grenzende kanaalvakken, gewogen naar de afstand (zie §3.4.3 en figuur 3.6) en gemiddeld in de tijd (zie figuur 3.5), en als vast gegeven aan het rekenhart van GELDYM

opgelegd. De coëfficiënten a_1 en b_1 worden als volgt gevonden:

$$a_1 = 0 \quad [L^2T^{-1}] \quad (14a)$$

$$b_1 = \frac{\sum_{r=6}^{t+\Delta T} ((\sum_r q'_1(r) * \text{gewicht}(r) * dx(r)) \cdot \Delta t_0)}{\Delta T} \quad [L^3T^{-1}] \quad (14b)$$

met Δt_0 = rekentijdstap LYMPHA [T]
 ΔT = rekentijdstap gekoppelde rekenmodel [T]
 r = openwaterrekenpunt van aan dit grond
waterknooppunt grenzend kanaalvakken [-]
 $dx(r)$ = afstand tussen twee rekenpunten, of voor
meest bovenstrooms of benedenstrooms gele-
gen rekenpunt halve afstand [L]

Deze waarden van a_1 en b_1 gelden voor $t < t + k \cdot \Delta t_g \leq t + \Delta T$ (zie figuur 3.5).

Vergelijking (14) a+b worden duidelijker aan de hand van figuur 3.4. Op een bepaald tijdstip geldt voor grondwaterknooppunt III:

$$b_1 \text{ (III)} = \sum_{r=6}^8 q'_1(r) \cdot \left[\frac{1(r)}{L(B)} \right] \cdot dx(B) + q'_1(9) \cdot \frac{dx(B)}{2} + q'_1(10) \cdot \frac{dx(C)}{2} +$$

$$\sum_{r=11}^{12} q'_1(r) \left[1 - \frac{1(r)}{L(C)} \right] \cdot dx(C) \quad [L^3T^{-1}]$$

Indien in dit grondwaterknooppunt maar één kanaalvak zou uitkomen, vallen de eerste twee of laatste twee termen van deze vergelijking weg. Indien meer dan twee kanaalvakken in dit grondwaterknooppunt zouden samenkomen, komen er in de vergelijking extra termen bij.

methode 3: $q_1 = f(\phi, t)$

De flux q_1 wordt per grondwaterknooppunt berekend in het rekenhart van GELDYM. De waterdiepten h^+ in de openwaterrekenpunten die samenvallen met

een grondwaterknooppunt worden als randvoorwaarde gebruikt in de berekening van a_1 en b_1 per grondwaterknooppunt buiten het rekenhart van GELDYM:

$$a_1 = - \sum_r c_{dr}(v) \cdot \frac{L(v)}{2} \cdot \left[\frac{P(r,t) + P(r,t+\Delta T)}{2} \right] \quad [L^2T^{-1}] \quad (15a)$$

$$b_1 = \sum_r c_{dr}(v) \cdot \frac{L(v)}{2} \cdot \left[\frac{h^+(r,t) \cdot P(r,t) + h^+(r,t+\Delta T) \cdot P(r,t+\Delta T)}{2} \right] \quad [L^3T^{-1}] \quad (15b)$$

met r = openwaterrekenpunt dat samenvalt met
grondwaterknooppunt

[-]

Voor $h^+(r,t+\Delta T)$ wordt steeds de laatste benadering ingevuld (zie §3.5). De coëfficiënten a_1 en b_1 zijn constant gedurende de rekentijdstap ΔT van het gekoppelde rekenmodel (zie figuur 3.5).

Vergelijking (15) a + b worden duidelijker wanneer ze samen met vergelijking (9) worden toegepast voor grondwaterknooppunt III in figuur 3.4:

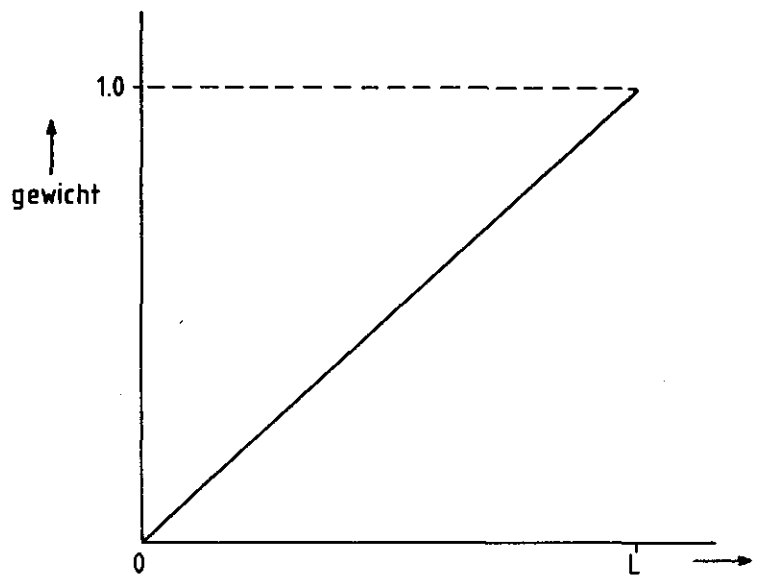
$$q_1(III, t+k \cdot \Delta t_g) = c_{dr}(B) \cdot \frac{L(B)}{2} \cdot \left[\overline{h^+(9) \cdot P(9)} - \phi(III, t+k \cdot \Delta t_g) \cdot \bar{P}(9) \right] \\ + c_{dr}(C) \cdot \frac{L(C)}{2} \cdot \left[h^+(10) \cdot P(10) - \phi(III, t+k \cdot \Delta t_g) \cdot \bar{P}(10) \right]$$

met $\overline{h^+(9) \cdot P(9)}$ en $\bar{P}(9)$ = gemiddelde van t en $t + \Delta T$.

3.4.3 De zijdelingse toe- of afvoer vanuit het grondwater naar het openwater

Hieronder zal per methode worden beschreven hoe de coëfficiënten a'_1 en b'_1 van vergelijking (10) per rekenpunt in het openwater worden bepaald. Bij de beschrijving zal q'_1 steeds per eenheid van kanaallengte worden gegeven en wordt in plaats van de waterdiepte h , de waterdiepte gesommeerd met de bodemhoogte h^+ in vergelijking (10) ingevuld. Voor alle drie methoden geldt dat alleen voor de rekenpunten die samenvallen met grondwaterknooppunten de

coëfficiënten a'_1 en b'_1 in een aparte subroutine buiten het rekenhart van LYMPHA worden bepaald. Voor de tussenliggende rekenpunten in de kanaalvakken worden a'_1 en b'_1 in LYMPHA afgeleid uit de a'_1 en b'_1 die in het meest bovenstrooms en het meest benedenstrooms gelegen rekenpunt van het betreffende kanaalvak gelden. Bij de ruimtelijke interpolatie die daarbij wordt gehanteerd worden gewichten toegekend die evenredig zijn met de afstand tot het benedenstroomse rekenpunt (zie figuur 3.4 en 3.6).



Figuur 3.6 Gewichten als functie van de afstand l

methode 1: $q'_1 = f(t)$

De flux q'_1 wordt buiten het rekenhart van LYMPHA per kanaalvak in het meest benedenstrooms en het meest bovenstrooms gelegen rekenpunt berekend. De flux q'_1 is constant gedurende ΔT en gelijk aan het gemiddelde van $q'_1(t)$ en $q'_1(t+\Delta T)$ zie figuur (3.5):

$$q'_1 = \left[\frac{(\phi(t) \cdot h^+(t)) \cdot c_{dr} \cdot P(t) + (\phi(t+\Delta T) \cdot h^+(t+\Delta T)) \cdot c_{dr} \cdot P(t+\Delta T)}{2} \right] \quad [L^2T^{-1}] \quad (16)$$

c_{dr} = afhankelijk van het kanaalvak

Bij de berekening worden steeds voor $h^+(t+\Delta T)$ en $\phi(t+\Delta T)$ de laatste benaderingen voor dat tijdstip ingevoerd (zie §3.5).

In LYMPHA worden nu voor alle rekenpunten a'_1 en b'_1 berekend als gewogen gemiddelden naar de plaats:

$$a'_1 = 0 \quad [LT^{-1}] \quad (17a)$$

$$b'_1 = \frac{1}{L} \cdot q'_1 \text{ (boven)} + \left(1 - \frac{1}{L}\right) \cdot q'_1 \text{ (beneden)} \quad [L^2T^{-1}] \quad (17b)$$

De flux tussen openwater en grondwater (gedefinieerd als volume per tijdseenheid) wordt nu in LYMPHA berekend per rekenpunt met

$$(a'_1(r) \cdot h^+(r) + b'_1(r)) \cdot dx(v) \quad [L^3T^{-1}] \quad (17c)$$

Voor rekenpunten die samenvallen met openwaterknopen wordt vermenigvuldigd met $\frac{dx}{2}$.

In rekenpunt 6 in figuur 3.4 geldt dus:

$$\begin{aligned} q'_1(6) \cdot dx(B) &= \frac{1(6)}{L(B)} \cdot q'_1(9) \cdot dx(B) \\ &+ \left[1 - \frac{1(6)}{L(B)}\right] \cdot q'_1(5) \cdot dx(B) \quad [L^3T^{-1}] \end{aligned}$$

methode 2: $q'_1 = f(h^+, t)$

Per kanaalvak wordt het gemiddelde bepaald van $\phi(t)$ en $\phi(t+\Delta T)$ in het grondwaterknooppunt dat samenvalt met het meest bovenstrooms gelegen rekenpunt. Hetzelfde geschiedt met de stijghoogten in het grondwaterknooppunt dat samenvalt met het meest benedenstrooms gelegen rekenpunt (zie figuur 3.5). De gemiddelden in de tijd worden buiten het rekenhart van LYMPHA berekend en doorgegeven aan LYMPHA. Binnen LYMPHA worden a'_1 en b'_1 vervolgens per rekenpunt berekend voor iedere $t < t + k \cdot \Delta t_0 \leq t + \Delta T$:

$$a'_1 = - c_{dr} \cdot P \quad [LT^{-1}] \quad (18a)$$

$$b'_1 = c_{dr} \cdot P \cdot \left[\frac{1}{L} \cdot \bar{\phi}(\text{boven}) + \left(1 - \frac{1}{L}\right) \cdot \bar{\phi}(\text{beneden}) \right] [L^2T^{-1}] \quad (18b)$$

met $\bar{\phi} = \text{gemiddelde stijghoogte} = \frac{\phi(t+\Delta T) + \phi(t)}{2} \quad [L]$

Doordat P afhankelijk is van $h(t + k \cdot \Delta t_0)$ zijn a'_1 en b'_1 bij deze methode niet constant gedurende ΔT .

Dit wordt duidelijker als vergelijking (11) en (18) a+b worden toegepast voor rekenpunt 6 in figuur 3.4 voor tijdstip $t+k \cdot \Delta t_0$:

$$q'_1(6, t+k \cdot \Delta t_0) \cdot dx(B) = c_{dr}(B) \cdot P(6, t+k \cdot \Delta t_0) \cdot dx(B).$$

$$\left\{ \left[\frac{1(6)}{L(B)} \cdot \bar{\phi}(III) + \left(1 - \frac{1(6)}{L(B)}\right) \cdot \bar{\phi}(II) \right] \cdot h^+(6, t+k \Delta t_0) \right\} [L^3T^{-1}]$$

methode 3: $q'_1 = f(t)$

Per kanaalvak wordt de flux q'_1 in het meest bovenstrooms gelegen en het meest benedenstrooms gelegen rekenpunt afgeleid uit de flux q_1 in de grondwaterknooppunten die ter plaatse liggen, gemiddeld in de tijd (zie figuur 3.5), en als vast gegeven opgelegd aan het rekenhart van LYMPHA. In de meest bovenstrooms en benedenstrooms gelegen rekenpunten geldt voor q'_1 per eenheid van kanaallengte:

$$q'_1 = \frac{\sum_t^{t+\Delta T} \left[\frac{q_1}{nr} \cdot \frac{2}{L(v)} \cdot \Delta t_g \right]}{\Delta T} \quad [L^2T^{-1}] \quad (19)$$

met $nr = \text{aantal kanaalvakken dat ter plaatste samenkomt}$

In LYMPHA worden nu voor alle rekenpunten de coëfficiënten a'_1 en b'_1 berekend volgens vergelijking (17a) en (17b).

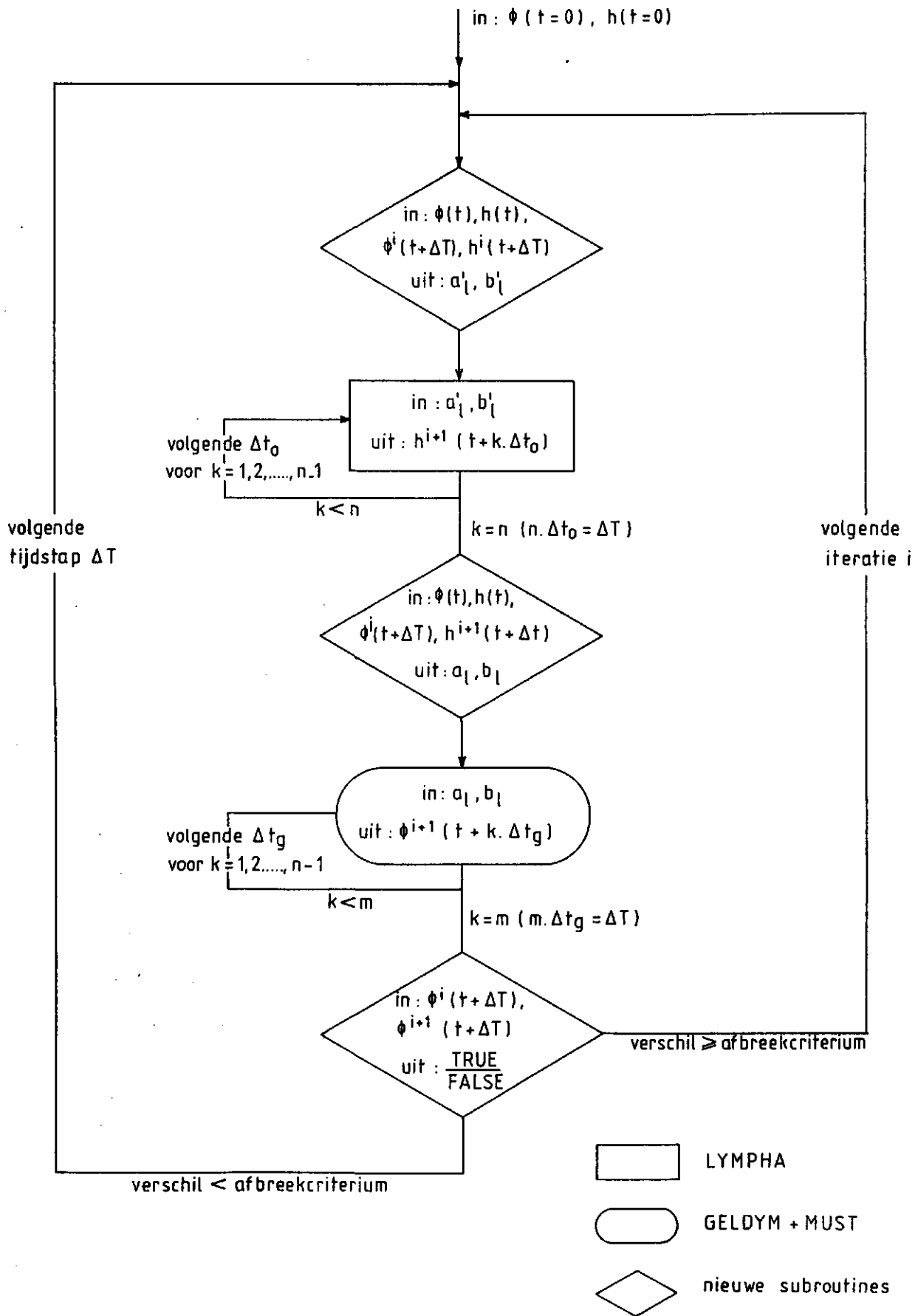
Voor rekenpunt 6 in figuur 3.4 geldt nu dus voor $t < t + k \cdot \Delta t_0 < t + \Delta T$:

$$q'_1(6) \cdot dx = \left\{ \left(\frac{l(6)}{L(B)} \right) \cdot \frac{ql(III)}{nr(III)} \cdot \frac{2}{L(B)} + \left(1 - \frac{l(6)}{L(B)} \right) \cdot \frac{ql(II)}{nr(II)} \cdot \frac{2}{L(B)} \right\} \cdot dx \quad [L^3 T^{-1}]$$

De flux in grondwaterknooppunt III wordt verdeeld over het aantal kanaalvakken dat daar samenkomt (B en C) en uitgesmeerd over de halve lengte van deze kanaalvakken.

3.5 Het iteratief algoritme

In het iteratief algoritme waarmee GELDYM en LYMPHA worden gekoppeld worden de rekenharten van GELDYM en LYMPHA om beurten aangeroepen tot de uitkomsten van beide modules met elkaar in overstemming zijn. In het stroomschema van figuur 3.7 is het iteratief algoritme weergegeven dat voor de koppeling van GELDYM en LYMPHA ontworpen is. In het stroomschema wordt ondermeer aangegeven hoe de verschillende rekentijdstappen Δt_g , Δt_0 en ΔT in elkaar grijpen.



Figuur 3.7 Stroonschema van het iteratief algoritme.

De iteraties in de koppeling worden gestaakt wanneer in alle grondwaterknooppunten het verschil in stijghoogte tussen twee opeenvolgende iteraties kleiner is dan het opgegeven criterium. In het gekoppelde rekenmodel wordt hiervoor gebruik gemaakt van het criterium dat in de rekenmodule GELDYM gebruikt wordt als stopcriterium voor de Gauss-Seidel iteraties. Indien aan dit criterium wordt voldaan, wordt als extra controle het verschil in q_1 tussen de laatste twee iteraties vergeleken met een extra op te geven stopcriterium.

3.6 Initialisatie

De berekening van de grondwaterstroming en openwaterstroming start met de berekening van stationaire stroming in grondwater en openwater. Voor de berekening van de flux tussen grondwater en openwater op $t=0$ kan gekozen worden uit de drie methoden zoals beschreven in §3.4. Voorwaarde bij het gebruik van methode 1 en 2 is echter dat bij de definiëring van het grondwaterstromingsprobleem in minstens één grondwaterknooppunt de stijghoogte voor $t=0$ gegeven wordt (Dirichlet-randvoorwaarde).

Voor $t=0$ wordt hetzelfde stroomschema doorlopen als voor $t>0$ (figuur 3.7), zij het dat overal geldt dat $\Delta t_g = \Delta t_o = \Delta T = 0$. Met andere woorden, overal wordt voor $\phi(t+\Delta T)$ de waarde van $\phi(t=0)$ ingevuld en voor $h(t+\Delta T)$ de waarde van $h(t=0)$.

3.7 Uitvoer

In het gekoppelde rekenmodel worden verschillende uitvoerfiles aangemaakt afhankelijk van de modellering die gekozen is.

Indien alleen het verzadigd grondwatersysteem wordt gemodelleerd wordt er slechts één uitvoerfile gecreëerd met daarin de berekende stijghoogten per grondwaterknooppunt per rekentijdstap Δt_g . Indien daarbij het onverzadigd grondwatersysteem wordt gemodelleerd met behulp van het model MUST wordt er tevens een uitvoerfile aangemaakt waarnaar de coëfficiënten a_w en b_w (vgl. 6) per grondwaterknooppunt en per rekentijdstap Δt_g worden weggeschreven. Indien het openwatersysteem met behulp van LYMPHA mede wordt gemodelleerd worden er nog twee extra uitvoerfiles gecreëerd. In de ene uitvoerfile wordt per Δt_o (indien LYMPHA stationair) de waterdiepte en afvoer per openwater-

rekenpunt weggeschreven. In de andere uitvoerfile staan de fluxen q_1 per grondwaterknooppunt per rekentijdstap Δt_g . Indien met LYMPHA niet-stationaire openwaterstroming wordt berekend moet worden opgegeven met welke tijdstap Δt_{uitv} uitvoer van de waterdiepten en afvoeren per openwaterrekenpunt gewenst is.

Om de benodigde geheugenruimte te beperken zijn de modules GELDYM en LYMPHA zodanig opgebouwd dat alleen de stijghoogten, waterdiepten en afvoeren van de laatst berekende tijdstap in het werkgeheugen staan. Hierdoor is het noodzakelijk dat het stroomschema in figuur 3.6, nadat het verschil $\phi^{i+1}(t+\Delta T) - \phi^i(t+\Delta T) < \text{stopcriterium}$, nog eenmaal wordt doorlopen om de stijghoogten ϕ , de fluxen q_1 , de waterdiepten h en de afvoeren Q op de tussenliggende tijdstippen $t+k \cdot \Delta t_g$ resp. $t+k \cdot \Delta t_o$ te kunnen wegschrijven.

4 TESTBEREKENINGEN

4.1 Algemeen

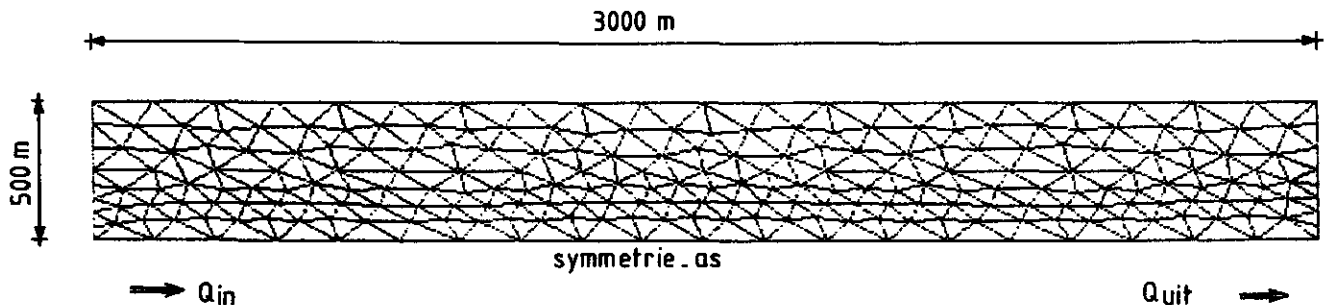
Om de koppeling van GELDYM en LYMPHA te testen op correctheid van de programmatuur zijn enige berekeningen met het gekoppelde rekenmodel uitgevoerd. Aan de hand van theoretische rekenvoorbeelden zijn de volgende berekeningen uitgevoerd:

1. GELDYM stationair en LYMPHA stationair,
2. GELDYM niet-stationair met constante bergingscoëfficiënt μ en LYMPHA stationair,
3. GELDYM niet-stationair met constante bergingscoëfficiënt μ en LYMPHA niet-stationair.

Alle berekeningen zijn uitgevoerd met de drie mogelijke methoden waarmee de flux tussen grondwater en openwater aan de rekenharten van GELDYM en LYMPHA kan worden opgelegd (zie §3.4). In §4.2 t/m §4.4 worden de resultaten besproken van de drie berekeningen zoals verkregen bij toepassing van methode 3. In §4.5 zal worden ingegaan op de verschillen in rekensnelheid en in rekenresultaten van de verschillende methoden.

4.2 Berekening 1: GELDYM stationair, LYMPHA stationair

Als eerste voorbeeld (voorbeeld A) is een zo eenvoudig mogelijke situatie gemodelleerd, waarbij midden in een grondwatermodel een openwaterloop ligt. Over de zijranden van het grondwatermodel vindt geen stroming plaats. De enige uitwisseling die plaatsvindt is de interactie met de atmosfeer (effectieve neerslag) en de interactie met het openwater. In figuur 4.1 staat de helft van het driehoekennetwerk weergegeven dat voor deze berekening werd gegenereerd, de openwaterloop vormt een symmetrie-as.



Figuur 4.1 Voorbeeld A

In het grondwatermodel wordt uitgegaan van één homogeen isotroop watervoerend pakket met een transmissibiliteit T van $240 \text{ m}^2/\text{d}$. De openwaterloop is zodanig geschematiseerd dat ieder grondwaterknooppunt ter plaatste van de waterloop samenvalt met een knoop van het openwater. De waterloop is een aaneenschakeling van identieke kanaalvakken met de volgende eigenschappen:

- rechthoekig dwarsprofiel
- bodembreedte $B = 2 \text{ m}$
- $S_0 = 0.0001$
- coëfficiënt van Chézy $C = 25 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$
- $c_{dr} = 1.16 \text{ E-05 s}^{-1} (\hat{=} 1 \text{ d}^{-1})$

Bovenstrooms wordt als randvoorwaarde het debiet opgegeven: $Q_{in} = 0.3 \text{ m}^3/\text{s}$.
Benedenstrooms wordt een meetstuw gemodelleerd met de volgende Q-h-relatie:

$$Q_{uit}(t) = c (h(t) - h_0)^m$$

$$\begin{aligned}\text{met } c &= 3.4 \text{ m}^3/2/\text{s} \\ h_0 &= 0.68 \text{ m} \\ m &= 1.5\end{aligned}$$

Bij de eerste berekening bedroeg de effectieve neerslag $N = 0 \text{ mm/d}$. In het geval van stationaire stroming in grondwater en openwater resulteert dit in het isohypsenpatroon van figuur 4.2a.



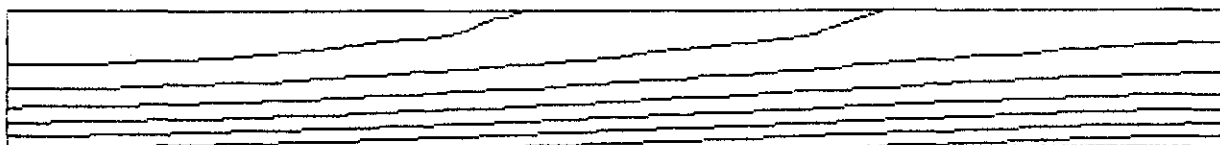
Figuur 4.2.a Voorbeeld A, $N=0 \text{ mm/d}$, $t=0$

In het openwater is de waterdiepte overal gelijk en komt overeen met de waterdiepte bij uniforme stroming ($h=0.878 \text{ m}$). De helling van de stijghoogte in het grondwater is gelijk aan de bodemhelling S_0 in de waterloop. Door de no-flux-randvoorwaarde in het grondwatermodel aan de smalle zijden wijkt het isohypsenpatroon aan die randen af van het te verwachten patroon met evenwijdige isohypsen. De berekende flux tussen openwater en grondwater bedraagt overal nul. De waterbalans van het voorbeeld ziet er als volgt uit:

$$\text{openwater: } Q_{\text{uit}} - Q_{\text{in}} = 0.3 \text{ m}^3/\text{s} - 0.3 \text{ m}^3/\text{s} = 0 \text{ m}^3/\text{s} = \sum q'_1 \cdot dx$$

$$\text{grondwater: } \text{toevoer} = 0 \text{ m}^3/\text{s} = \sum q_1 = \sum q'_1 \cdot dx$$

Bij de tweede berekening bedroeg de effectieve neerslag $N=1 \text{ mm/d}$. Berekening van de stationaire stromingstoestand met het gekoppelde model resulteert in het isohypsenpatroon van figuur 4.2.b.



Figuur 4.2.b Voorbeeld A, $N=1 \text{ mm/d}$, $t=0$.

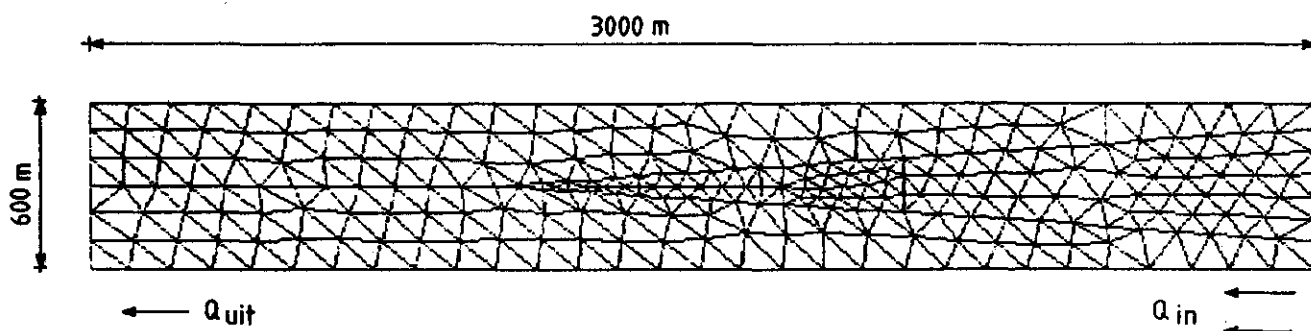
De opbolling die in het grondwater (loodrecht op de waterloop) berekend wordt, komt overeen met de opbolling volgens de formule van Hooghoudt. De waterbalans van het voorbeeld ziet er als volgt uit:

$$\text{openwater: } Q_{\text{uit}} - Q_{\text{in}} = 0.0347 \text{ m}^3/\text{s} = \sum q'_1 \cdot dx$$

$$\text{grondwater: toevoer} = \frac{1 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 \cdot 3000}{24 \cdot 3600} = 0.0348 \text{ m}^3/\text{s} = \sum q_1 = \sum q'_1 \cdot dx$$

De gemiddelde q'_1 bedraagt $\frac{0.0347 \text{ m}^3/\text{s}}{3000 \text{ m}}$, de gemiddelde waterdiepte $\bar{h}=0.9 \text{ m}$, met $\bar{q}'_1 = c_{dr} \cdot P \cdot (\phi - h^+)$ volgt hieruit $(\phi - h^+) = 0.263 \text{ m}$. De waarden die voor $(\phi - h^+)$ gevonden worden lagen tussen 0.245 m bovenstrooms en 0.283 m benedenstrooms.

Als tweede voorbeeld (voorbeeld B) ter controle van de stationaire berekening werd opnieuw een rechthoekige grondwatermodel vervaardigd waarin nu een vertakt openwaterstelsel ligt. Figuur 4.3 toont het driehoekennetwerk.



Figuur 4.3 Voorbeeld B.

Over de buitenranden van het grondwatermodel stroomt geen flux. Wederom wordt uitgegaan van één homogeen isotroop watervoerend pakket met een transmissibiliteit T van $240 \text{ m}^2/\text{d}$. Alle grondwaterknooppunten die samenvallen met het waterlopenstelsel vallen samen met een openwaterknoop en alle openwaterknopen vallen samen met een grondwaterknooppunt. De kanaalvakken rechts van het splitsingspunt zijn identiek en hebben de volgende eigenschappen:

- rechthoekig dwarsprofiel
- bodembreedte $B = 1 \text{ m}$
- $S_0 = 0.0001$
- coëfficiënt van Chézy $C = 25 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$
- $c_{dr} = 1.16 \text{ E-05 s}^{-1}$

Bovenstrooms wordt als randvoorwaarde het instromend debiet gegeven: $Q_{in} = 0.09 \text{ m}^3/\text{s}$. Benedenstrooms stromen beide waterlopen vrij uit in de waterloop links van het splitsingspunt. Deze waterloop bestaat uit identieke kanaalvakken met de volgende eigenschappen:

- rechthoekig dwarsprofiel
- bodembreedte $B = 1.74 \text{ m}$
- $S_0 = 0.0001$
- Coëfficiënt van Chézy $C = 25 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$
- $c_{dr} = 1.16 \text{ E-05 s}^{-1}$

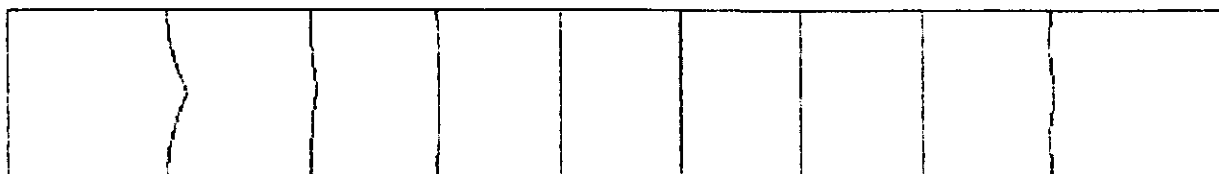
Benedenstrooms wordt een meetstuw gemodelleerd met de volgende Q-h-relatie:

$$Q_{uit}(t) = c(h(t) - h_0)^m$$

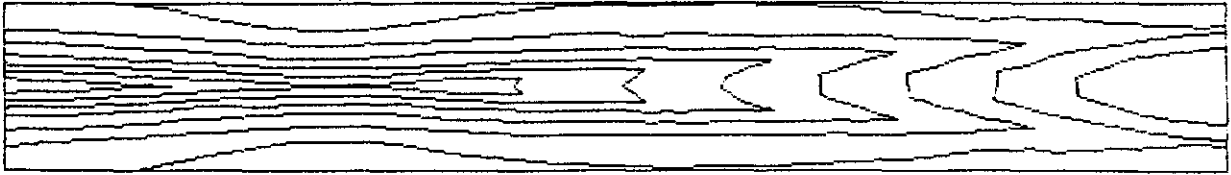
met $c = 2.96 \text{ m}^{3/2}/\text{s}$

$h_0 = 0.517 \text{ m}$

$m = 1.5$



Figuur 4.4.a Voorbeeld B, $N=0 \text{ mm/d}$, $t=0$



Figuur 4.4.b Voorbeeld B, $N=1$ mm/d, $t=0$

Figuren 4.4.a en 4.4.b tonen de berekende isohypsenpatronen in geval van stationaire stroming en $N=0$ mm/d respectievelijk 1 mm/d. In het geval van geen neerslag is de berekende flux tussen openwater en grondwater gelijk aan nul. In het openwater is $Q_{uit}-Q_{in}=0$ m³/s en wordt overal de uniforme waterdiepte (0.672 m) berekend.

Bij de berekening met $N=1$ mm/d wordt op plaatsen waar de grondwaterstroming loodrecht staat op de kanaalvakken en de isohypsen min of meer evenwijdig lopen een opbolling berekend die gelijk is aan de opbolling volgens de formule van Hooghoudt.

De waterbalans is in dit geval:

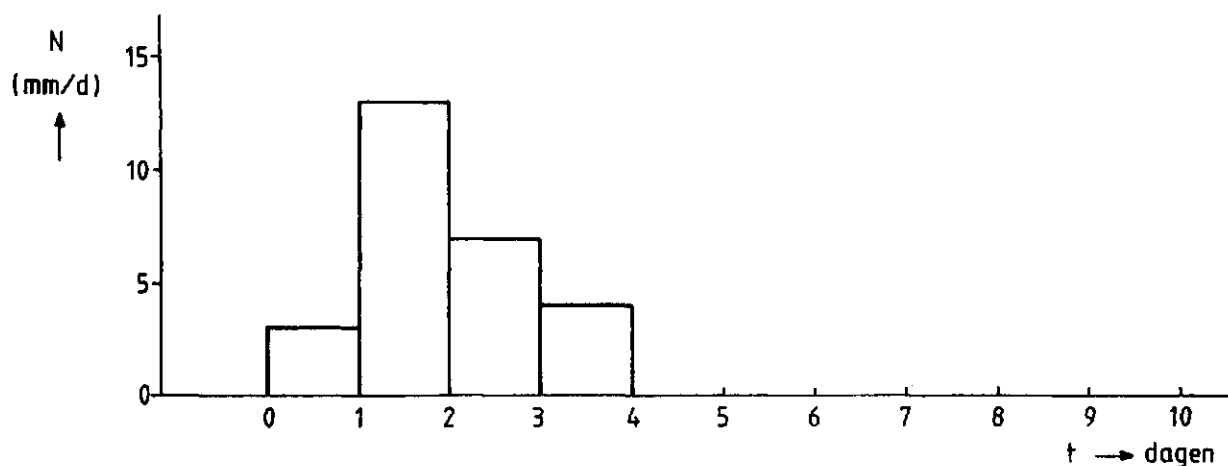
$$\text{openwater: } Q_{uit} - Q_{in} = 0.2009 - 2 \cdot 0.09 = 0.0209 \text{ m}^3/\text{s} = \Sigma q'_1 \cdot dx$$

$$\text{grondwater: toevoer} = \frac{1 \cdot 10^{-3} \cdot 600 \cdot 3000}{24 \cdot 3600} = 0.0208 \text{ m}^3/\text{s} = \Sigma q_1$$

4.3 Berekening 2: GELDYM niet-stationair, LYMPHA stationair

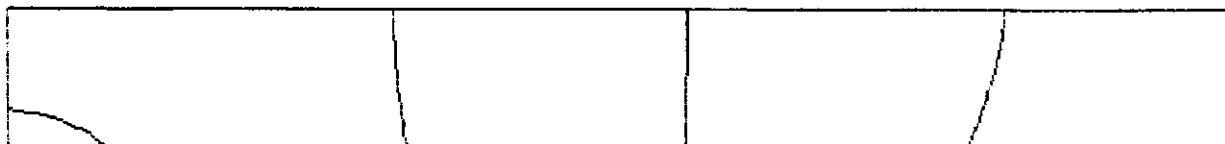
Voor de testberekening met het gekoppelde model, waarbij in het grondwatersysteem niet-stationaire stroming wordt berekend, is voorbeeld A uit §4.2 gebruikt (zie figuur 4.1). Voor de berekening van de niet-stationaire stroming in het grondwatersysteem is gebruik gemaakt van de mogelijkheid om de bergingsveranderingen te beschrijven met behulp van een lineaire bergingsfunctie met constante bergingscoëfficiënt (zie §2.1). De bergingscoëfficiënt μ in het rekenvoorbeeld bedraagt 0.08. Op tijdstip $t=0$

wordt de stationaire stromingstoestand berekend in het geval er geen neerslag valt. Vanaf $t=0$ wordt een veranderlijke neerslag opgelegd (homogeen over het modelgebied) zoals weergegeven in figuur 4.5.

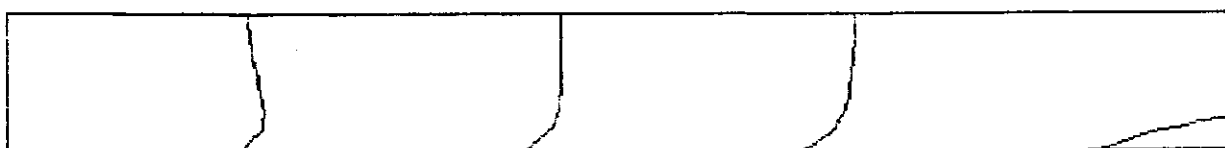


Figuur 4.5 De neerslag als functie van de tijd.

Er wordt gerekend met een rekentijdstap van het gehele gekoppelde systeem ΔT van 1 d. De rekentijdstap voor het grondwatersysteem $\Delta t_g=1$ d en in het openwater wordt per dag de stationaire stromingstoestand berekend. De rekenresultaten zijn in de figuren 4.6 t/m 4.8 weergegeven. In figuur 4.6.a t/m h wordt aangegeven hoe de opbolling zich in de tijd opbouwt. De intervallen tussen de isohypsen zijn voor alle tijdstippen gelijk. In figuur 4.7 wordt het afvoer-verloop aan de benedenstroomse zijde van het openwater weergegeven. Bovenstrooms werd het instromende debiet constant gehouden ($Q_{in}=0.3 \text{ m}^3/\text{s}$). In figuur 4.7 staat het afvoerverloop indien op $t=0$, $N=0 \text{ mm/d}$ en indien op $t=0$, $N=1 \text{ mm/d}$ (voorbeeld A). Er zijn in het totaal 20 dagen doorerekend. Op dat moment is één derde van de totaal gevallen neerslag afgevoerd via het openwaterstelsel. In figuur 4.8 wordt de totale flux q_1 van alle grondwaterknooppunten samen, weergegeven als functie van de tijd. Op het in deze figuur naar voren komende verschil tussen methode 1 en 3 wordt ingegaan in §4.5.



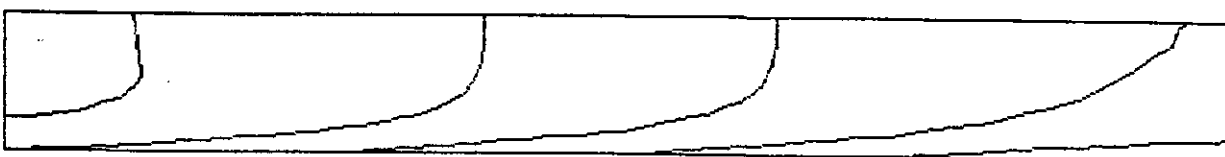
Figuur 4.6.a $t=0$



Figuur 4.6.b $t=1$ d



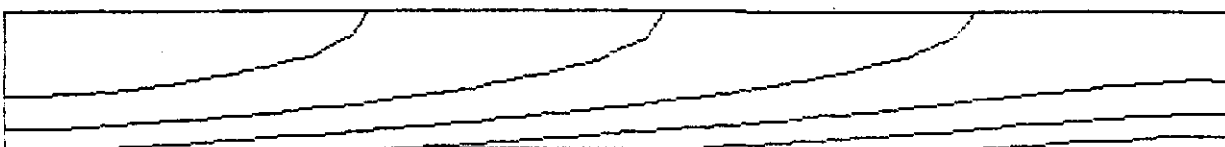
Figuur 4.6.c $t=2$ d



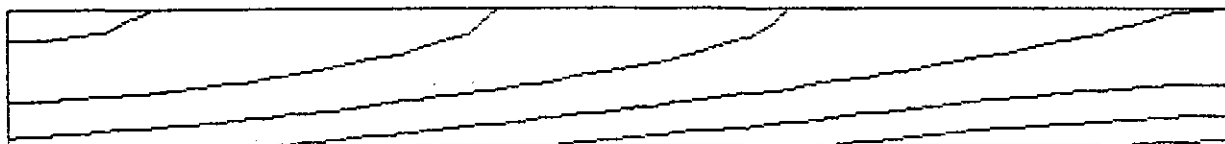
Figuur 4.6.d $t=3$ d



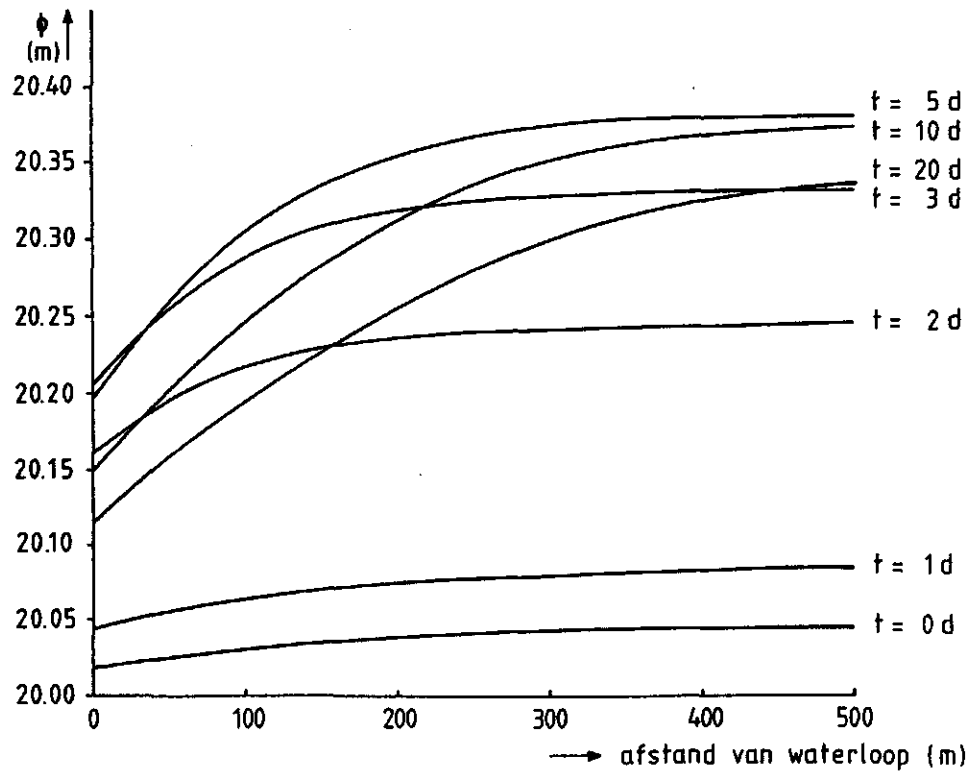
Figuur 4.6.e $t=5$ d



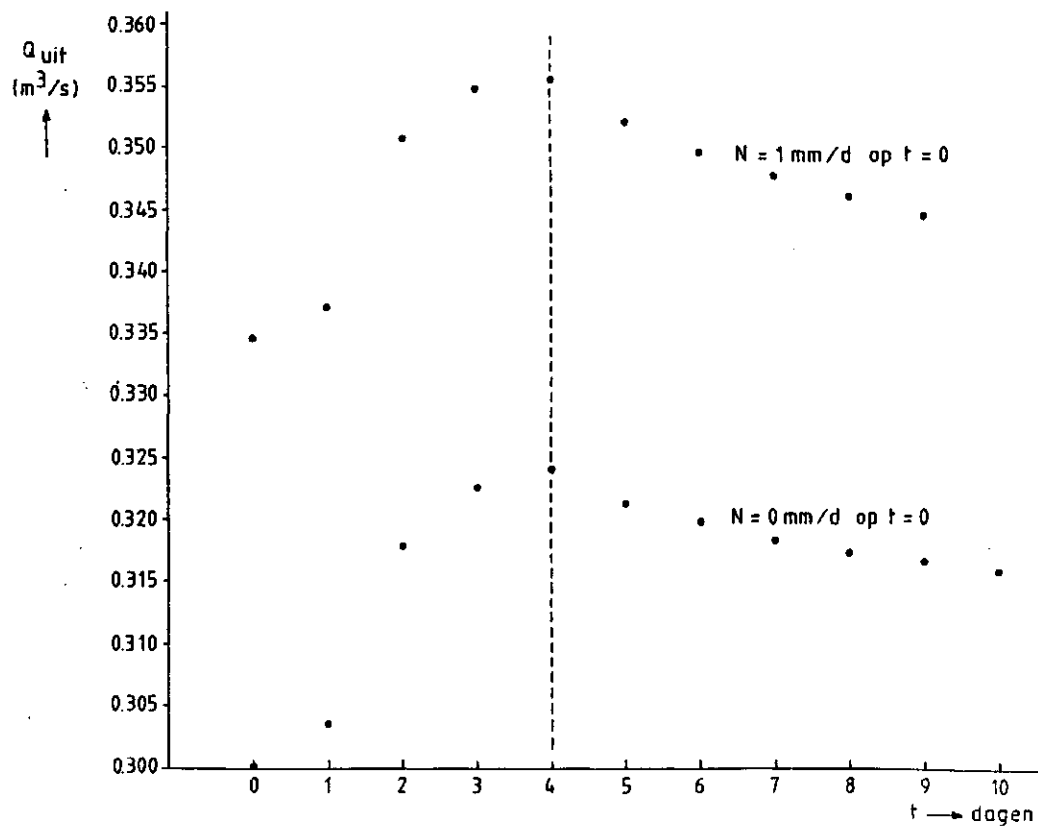
Figuur 4.6.f $t=10$ d



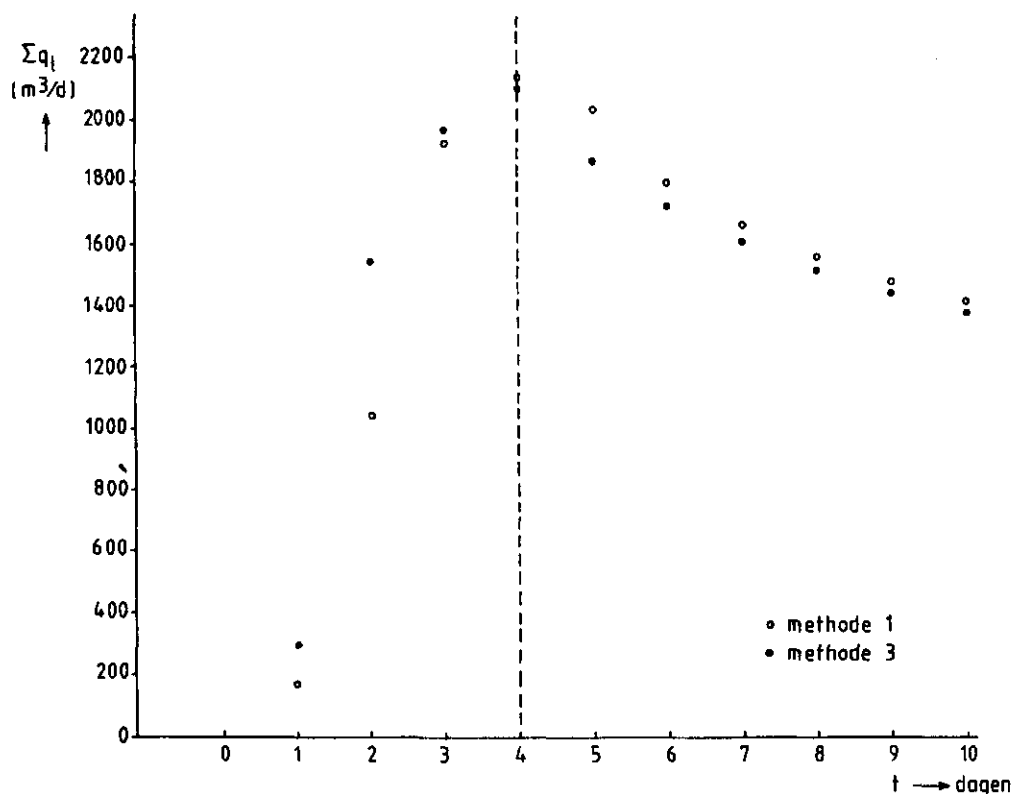
Figuur 4.6.g $t=20$ d



Figuur 4.6.h Het stijghoogteverloop loodrecht op de waterloop bij het uitstroompunt als functie van de tijd.



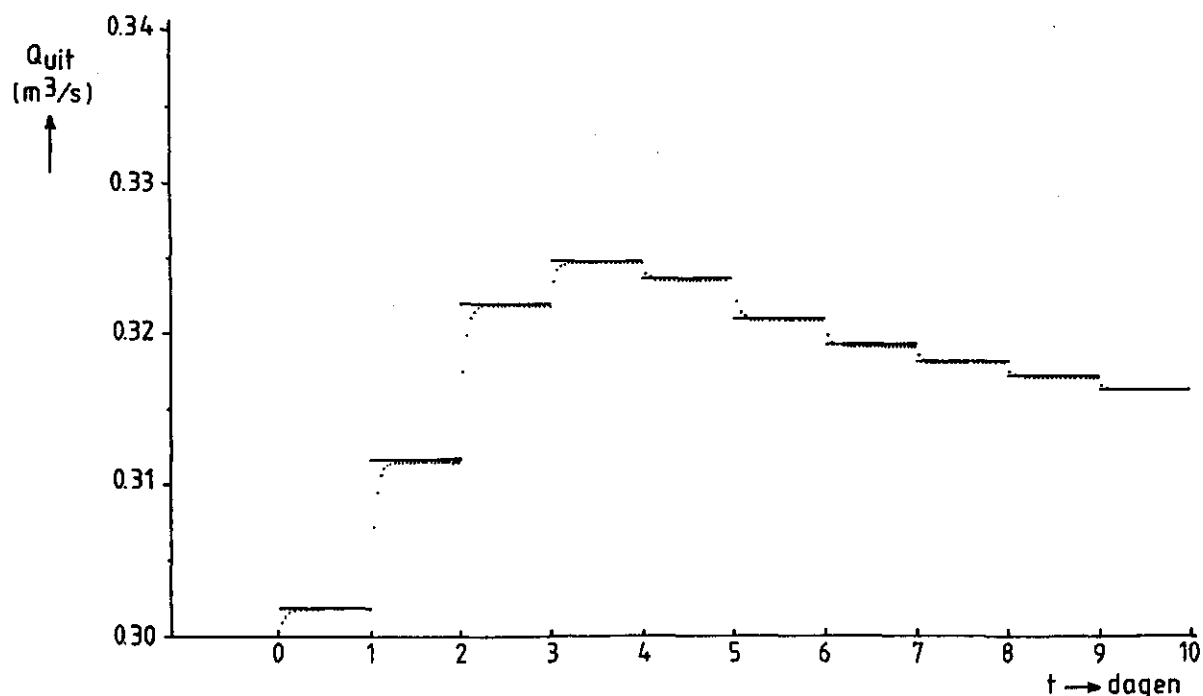
Figuur 4.7 De afvoer Q_{uit} als functie van de tijd.



Figuur 4.8 De totale flux q_1 van grondwater naar openwater als functie van de tijd.

4.4 Berekening 3: GELDYM niet-stationair, LYMPHA niet-stationair

Voor de testberekening met het gekoppelde model, waarbij zowel in het grondwatersysteem als in het openwatersysteem niet-stationaire stroming wordt berekend, is eveneens voorbeeld A uit §4.2 gebruikt. Hetzelfde neerslagverloop als in §4.3 werd opgelegd (figuur 4.5). De rekentijdstap voor het gehele gekoppelde systeem ΔT en de rekentijdstap voor het grondwatersysteem Δt_g bedragen 1 d. De rekentijdstap in het openwatersysteem wordt door LYMPHA zelf bepaald en is variabel. De waterdiepten en afvoeren in de rekenpunten van het openwater worden uitgevoerd met tussentappen $\Delta t_{uitv}=1$ uur. Figuur 4.9 toont de afvoer Q_{uit} als functie van de tijd, zoals wordt berekend met behulp van methode 2 indien in het openwatersysteem stationaire (doorgetrokken lijn) en niet stationaire stroming wordt berekend.



Figuur 4.9 De afvoer Q_{uit} als functie van de tijd.

4.5 Verschillen in de modellering van de interactie tussen grondwater en openwater

De rekenvoorbeelden in §4.2 en §4.3 zijn doorgerekend met de drie methoden die in het gekoppelde rekenmodel zijn opgenomen om de randvoorwaarden tussen grondwater en openwater te modelleren (§3.4).

Bij berekening 1 zijn er geen verschillen in berekende ϕ , Q , h en q_1 gevonden tussen de drie methoden. Methode 3 onderscheidt zich echter van de andere twee methoden doordat in de koppeling minder iteraties nodig zijn. Het aantal iteraties dat in de rekenmodule GELDYM zelf nodig is, verschilt echter niet met dat van de andere methoden. Crebas et al. (1984) beschreef reeds eerder het fenomeen waarbij in de koppeling minder iteraties nodig zijn indien de directe afhankelijkheid tussen q_1 en ϕ wordt opgenomen in de op te lossen stromingsvergelijking van het grondwatersysteem (vgl. 1 en 2).

Bij berekening 2 zijn er wel kleine verschillen in berekende ϕ , Q , h en q_1 waarneembaar tussen methode 1 en 2 enerzijds en methode 3 anderzijds. Bij methode 3 komt de gevallen neerslag eerder tot afstroming (zie figuur 4.8). Dit kan verklaard worden uit de wijze waarop q_1 bij methode 3 bepaald wordt in vergelijking tot de manier waarop dit bij methode 1 en 2 gebeurt. Bij methode 1 en 2 worden zowel $\phi(t)$ als $\phi(t+\Delta T)$ meegenomen in de bepaling van q_1 en q'_1 . Bij methode 3 wordt echter alleen de nieuw te berekenen stijghoogte $\phi(t+k \cdot \Delta t_g)$ meegenomen.

Hetzelfde geldt in principe voor methode 2 in vergelijking met methode 1 en 3 voor de waterdiepte. Bij methode 2 wordt alleen de nieuw te berekenen waterdiepte $h(t+k \cdot \Delta t_o)$ meegenomen in de berekening van q'_1 en q_1 . In het geval van een verstoring in het openwater mag verwacht worden dat deze bij methode 2 zich sneller naar en in het grondwater zal verplaatsen dan bij methode 1 en 3. Wanneer de totale flux q_1 van alle grondwaterknooppunten van berekening 2 gesommeerd wordt over 20 dagen blijkt dat tussen methode 3 en de andere methoden het verschil slechts 0.3% bedraagt. Het verschil tussen de verschillende methoden zit dus alleen in de reactie-snelheid.

Ook bij berekening 2 wordt gevonden dat bij methode 3 minder iteraties nodig zijn voor de koppeling. Indien als stopcriterium voor $\phi^{i+1}(t+\Delta T) - \phi^i(t+\Delta T)$ de waarde 0.0001 m wordt aangehouden ligt het gemiddelde aantal koppelings-iteraties bij methode 1 en 2 tussen 4 en 5 en voor methode 3 iets onder de 3. Het aantal Gauss-Seidel-iteraties in GELDYM zelf verschilt niet tussen de methoden. De totale benodigde rekentijd op de Apollo-computer van de LU bedraagt voor berekening 2 (10 dagen doorgerekend) bij het gebruik van methode 1 en 2, 12 minuten en bij het gebruik van methode 3, 7 minuten.

Het opnemen van de directe afhankelijkheid tussen q'_1 en h in de op te lossen stromingsvergelijking (vgl. 7 en 8) van het openwatersysteem (methode 2) lijkt niet tot minder koppelingsiteraties te leiden.

5 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Het ontwikkelde rekenmodel TRIGON heeft een modulaire opbouw en bestaat uit

drie rekenmodules: MUST, GELDYM en LYMPHA die het onverzadigd en verzadigd grondwatersysteem respectievelijk het openwatersysteem beschrijven. Voordeel van een dergelijke modulaire opbouw is dat de modules eventueel door vereenvoudigde versies dan wel totaal andere te vervangen zijn. De modules MUST, GELDYM en LYMPHA zijn van oorsprong zelfstandige programma's die afhankelijk van elkaar gebruikt kunnen worden. Hierdoor is het mogelijk om modelleringen van de verschillende subsystemen afzonderlijk te testen en te beoordelen voordat met het gekoppelde model gerekend wordt. Bij de koppeling van de modules zijn zoveel mogelijk de bestaande invoerroutines behouden, zodat voor TRIGON dezelfde invoerfiles gebruikt kunnen worden als voor de ongekoppelde modules.

Bij de koppeling zijn drie verschillende rekentijdstappen geïntroduceerd:

- de rekentijdstap ten behoeve van het onverzadigd-verzadigd grondwatersysteem Δt_g ,
- de rekentijdstap ten behoeve van het openwatersysteem Δt_o ,
- de rekentijdstap ten behoeve van de koppeling tussen beiden ΔT .

Doordat deze drie rekentijdstappen vrij gekozen kunnen worden is de grootst mogelijke flexibiliteit in deze gerealiseerd. Nadelen hiervan zijn:

- sommige tijdsafhankelijke gegevens moeten nu meerdere keren opnieuw worden ingelezen (dit is mede gevolg van de structuur van GELDYM);
- na het bereiken van een overeenstemming tussen de grondwaterstroming en de openwaterstroming, is er nog een iteratie nodig om tussentijdse resultaten te kunnen wegschrijven.

Berekeningen met LYMPHA niet-stationair binnen het gekoppelde model leveren enorm grote rekentijden op. De niet-stationaire variant van LYMPHA laat zich niet voor berekeningen van de openwaterstroming overdragen. Bij het peilbeheer moet aan LYMPHA niet gedacht worden als aan een openwaterstromingsmodel dat afvoerpieken voorspelt, maar als aan een grondwaterbeheersingsmodel. Er wordt daarom aanbevolen om alleen de stationaire variant van LYMPHA te gebruiken. Uit de testberekeningen is gebleken dat het verschil in berekende stijghoogte ϕ en flux tussen openwater en grondwater q_1 tussen stationaire en niet-stationaire bereke berekeningen met LYMPHA verwaarloosbaar klein is. Door Lumadjeng (1985) werd reeds eerder getoond dat de invloed van snel verlopende processen in het openwater op de grondwaterbeweging verwaarloosd mogen worden.

Indien in het openwater alleen stationair gerekend wordt (dat wil zeggen de openwaterstroming wordt benaderd met stationaire stromingstoestanden per rekentijdstap) is het alleen zinvol om Δt_0 kleiner te kiezen dan ΔT wanneer de tijdsafhankelijke randvoorwaarden opgelegd aan het openwater dit nodig maken. De grondwater- en openwatermodule zijn zodanig gekoppeld dat de randvoorwaarden die het grondwater aan het openwater oplegt en vice versa niet variëren gedurende ΔT .

De overeenstemming tussen de grondwaterstroming en de openwaterstroming wordt binnen een koppelingstijdstap ΔT op iteratieve wijze tot stand gebracht. De iteraties worden gestaakt wanneer de verschillen in berekende stijghoogten ϕ en de verschillen in berekend fluxen q_1 tussen twee opeenvolgende iteraties kleiner zijn dan de opgegeven criteria. De grondwatermodule en openwatermodule zijn zodanig gekoppeld dat de maximale waterbalansfout tussen openwater en grondwater op dat moment kleiner is dan het opgegeven stopcriterium voor q_1 .

Er zijn drie methoden ontwikkeld om de uitwisseling tussen grondwater en het openwater te modelleren. Deze onderscheiden zich in de wijze waarop de flux q_1 wordt opgelegd in de grondwatermodule en in de openwatermodule:

- methode 1: openwater : $q_1 = f(t)$
 grondwater: $q_1 = f(t)$
- methode 2: openwater : $q_1 = f(h, t)$
 grondwater: $q_1 = f(t)$
- methode 3: openwater : $q_1 = f(t)$
 grondwater: $q_1 = f(\phi, t)$

(h = waterdiepte in het openwater)

Er is steeds gekozen voor een lineaire q_1' -h- en q_1 - ϕ -relatie. In de grondwatermodule is deze flux verwerkt als lekterm. Dit heeft als voordeel dat geen extra vergelijking dient te worden opgelost en de ruimtelijke discretisatie niet bepalend is voor de flux (zie Promes (1990)).

Uit de eerste testberekeningen is naar voren gekomen dat wanneer de flux q_1 als functie van de nog te berekenen stijghoogte ϕ wordt opgelegd aan het grondwater (methode 3) er minder koppelingsiteraties nodig zijn dan wanneer de flux als constante aan het grondwater wordt opgelegd. Uit de berekeningen is niet gebleken dat wanneer de flux q_1 als functie van de nog te berekenen

waterdiepte h aan het openwater wordt opgelegd (methode 2) dit tot minder koppelingsiteraties leidt dan wanneer de flux als constante aan het openwater wordt opgelegd.

Bij het modelleren dienen waterlopen waarin regelbare kunstwerken voorkomen expliciet binnen LYMPHA gemodelleerd te worden. Kleinere waterlopen en tertiaire ontwateringsmiddelen dienen met behulp van bovenstaande q_1 - h - ϕ -relatie gemodelleerd te worden. De ruimtelijke schematisering van het grondwater moet afgestemd worden op die van het openwater.

Mogelijke verdere onderzoekspunten:

- in hoeverre leiden afwijkingen van de in §3.3 gedane aanbevelingen ten aanzien van de ruimtelijke schematisering van het grondwater in aansluiting met de schematisering van het openwater tot ongewenste modelresultaten.
- in hoeverre is de mogelijkheid om de rekentijdstap Δt_g in het grondwatersysteem verschillend te kunnen nemen van de koppelingstijdstap ΔT wenselijk. Wanneer Δt_g en ΔT even groot genomen kunnen worden, kan de structuur van het programma aanzienlijk vereenvoudigd worden. Bovendien kunnen dan, omdat interlatie in de tijd niet meer nodig is, methoden 1 tot en met 3 (zie §3.4) symmetrisch gemaakt worden, zodat een betere onderlinge vergelijking mogelijk is wat betreft de rekensnelheid.
- GELDYM uitbreiden met een berekening van de fluxen over de gebiedsranden zodat het mogelijk wordt door alle fluxen over een langere periode te sommeren en te vergelijken met een schatting van de bergingsverandering een waterbalans in zijn algemeenheid op te stellen.
- de invloed van het stopcriterium in het iteratieve proces en de wijze waarop dit geschikt gekozen kan worden.
- een geknikte q_1 - ϕ - en q_1 - h -relatie zou betere calibratieresultaten kunnen opleveren (zie Post en Van Bakel (1986) en Promes (1990)). Het gekoppelde rekenmodel is hiervoor op eenvoudige wijze uit te breiden met een extra subroutine waarin bepaald wordt welk traject van de geknikte q_1 - ϕ - en q_1 - h -relatie van toepassing is gegeven de te verwachten ϕ .
- gevoeligheidsanalyse van het gekoppelde rekenmodel ten aanzien van:
 - de parameters,

- de dichtheid van het netwerk,
- de tijdstappen,
- de reactiesnelheden van de subsystemen.

Dit zal zeker nodig zijn voordat het model verder wordt uitgebreid met bijvoorbeeld een koppeling met een schadeberekeningsmodule.

LITERATUUR

Awater, R.H.C.M. [1987]

Het optimaliseren van de toestand van het watersysteem;
Interne notitie, Provincie Gelderland, afdeling Milieu en Water.

Crebas, J.I., B.H. Gilding and J.W. Wesseling [1984]

Coupling of groundwater and open-channel flow;
Journal of Hydrology 72 (pp 307-330).

Kors, A.G. en P.M. Promes [1990]

Gebruikershandleiding voor het openwatermodel LYMPHA;
Vakgroep Hydrologie, Bodemnatuurkunde en Hydraulica, rapport nr. 2,
Landbouwniversiteit Wageningen.

Laat, P.J.M. de en R.H.C.M. Awater [1978]

Groundwaterflow and evapotranspiration. A simulation model. Part 1:
Theory;
Basisrapport ten behoeve van de commissie bestudering waterhuishouding
Gelderland, Provincie Gelderland, Arnhem.

Laat, P.J.M. de [1980]

Model for unsaturated flow above a shallow water-table, applied to a
regional sub-surface flow problem;
Thesis, Agricultural Publishing and Documentation, Pudoc, Wageningen.

Laat, P.J.M. de [1985]

Must - a simulation model for unsaturated flow;
Report series no. 16, International institute for hydraulic and
environmental engineering, Delft.

Lumadjeng, H.S. [1985]

Een eerste aanzet tot een ontwerp van een lineair regelsysteem ten
behoefte van het stuwbeheer;
Dienst WB, Afdeling Waterhuishoudkundig Onderzoek, Provincie Gelderland,
Arnhem.

Peerboom, J.M.P.M. [1990]

Waterhuishoudkundige schadefuncties op grasland;
Staring Centrum, Rapport nr. 43.

Post, H. en P.J.T. van Bakel [1986]

Onderzoek waterbeheer in de ruilverkaveling "Ruinerwold-Koekange";

Onderzoek naar de mogelijke effecten van peilbeheer in natuur- en landbouwgebieden;

Mededelingen Landinrichtingsdienst 164.

Promes, P.M. [1990]

De problematiek van de koppeling van grondwatermodellen en openwatermodellen;

Vakgroep Hydrologie, Bodemnatuurkunde en Hydraulica, rapport nr. 1, Landbouwniversiteit Wageningen.

Reit, H.J. [1988a]

Modellering van grondwaterstroming en -kwaliteit, Deelrapport D: stroming in de verzadigde zone/GELDYM;

Provincie Gelderland, Arnhem.

Reit, H.J. [1988b]

Het quasi-drie dimensionaal grondwaterstromingsmodel GELDYM; (PC-versie), Deel: Documentatie en Handleiding;

Provincie Gelderland (intern rapport), Arnhem.

Reit, H.J. [1989]

Het quasi-drie dimensionaal dynamisch grondwaterstromingsmodel GELDYM; handleiding en documentatie (concept);

Provincie Gelderland, Arnhem.

Verweij, J.P. [1987]

Waterstroming in kanalenstelsels;

Vakgroep Hydraulica en Afvoerhydrologie, Vakgroep Informatica, Landbouwniversiteit Wageningen.

LIJST VAN SYMBOLEN

A	- natte doorsnede	[L ²]
a ₁ , b ₁	- coëfficiënten van q ₁ -φ-relatie (vgl. 3)	[T ⁻¹], [LT ⁻¹]
a ₁ , b ₁	- coëfficiënten van q ₁ -φ-relatie (vgl. 9)	[L ² T ⁻¹], [L ³ T ⁻¹]
a' ₁ , b' ₁	- coëfficiënten van q' ₁ -φ-relatie (vgl. 10)	[LT ⁻¹], [L ² T ⁻¹]
a _w , b _w	- coëfficiënten van q _w -φ-relatie (vgl. 6)	[T ⁻¹], [LT ⁻¹]
β	- correctiecoëfficiënt voor het snelheidsprofiel	[-]
B	- bodembreedte	[L]
C	- coëfficiënt van Chézy	[L ^{1/2} T ⁻¹]
c _{dr}	- reciproke drainageweerstand	[T ⁻¹]
dx	- afstand tussen de openwaterrekenpunten	[L]
g	- zwaartekrachtversnelling	[LT ⁻²]
h	- waterdiepte ten opzichte van kanaalbodem	[L]
h ⁺	- waterdiepte t.o.v. kanaalbodem + bodemhoogte	[L]
h _o	- drempelhoogte	[L]
i	- index van het type flux	[-]
k	- nummer grondwaterknooppunt	[-]
l(r)	- afstand van rekenpunt r tot dichtsbijzijnde openwaterknoop benedenstrooms van het rekenpunt	[L]
L	- lengte kanaalvak	[L]
μ	- bergingscoëfficiënt	[-]
nr(k)	- aantal kanaalvakken dat samenkomt bij grondwaterknooppunt k	[-]
P	- bronterm per eenheid van oppervlak (vgl. 1)	[LT ⁻¹]
P	- natte omtrek (vgl. 11)	[L]
φ	- stijghoogte van het grondwater	[L]
Q	- afvoer	[L ³ T ⁻¹]
q _i	- flux per eenheid van oppervlak (vgl. 3)	[LT ⁻¹]
q ₁	- flux tussen grondwater en openwater in grondwatermodule (vgl. 9)	[L ³ T ⁻¹]
q' ₁	- flux tussen grondwater en openwater per eenheid kanaallengte in openwatermodule (vgl. 10)	[L ² T ⁻¹]
q _{rs}	- flux tussen wortelzone en onverzadigde zone	[LT ⁻¹]
q _s	- flux tussen wortelzone en atmosfeer	[LT ⁻¹]
q _w	- flux tussen onverzadigde en verzadigde zone	[LT ⁻¹]

r	= nummer openwaterrekenpunt	$[-]$
S_o	= bodemverhang	$[-]$
S_f	= wrijvingsverhang	$[-]$
T_{xx}	= (anisotrope) transmissibiliteit van het water- voerend pakket	$[L^2T^{-1}]$
t	= tijd	$[T]$
ΔT	= rekentijdstap voor het gekoppelde systeem	$[T]$
Δt_g	= rekentijdstap voor het grondwatersysteem	$[T]$
Δt_o	= rekentijdstap voor het openwatersysteem	$[T]$
v	= nummer kanaalvak	$[-]$
x, y	= plaats in horizontaal vlak	$[L], [L]$
z	= plaats in verticaal	$[L]$

APPENDIX A GEBRUIKERSHANDLEIDING EN DOCUMENTATIE VOOR TRIGON

A.1 Inleiding

Het rekenmodel TRIGON heeft als doel het berekenen van de stijghoogten in alle grondwaterknooppunten en watervoerende pakketten op diverse tijdstippen. De modellering van het verzadigd grondwatersysteem met behulp van de module GELDYM vormt de basis. De modelberekening kan worden uitgebreid met modelleringen van het onverzadigd grondwatersysteem en/of het openwatersysteem.

Voor de modellering van het onverzadigd grondwatersysteem zijn in het gekoppelde rekenmodel twee mogelijkheden opgenomen:

- de bergingsveranderingen worden beschreven met behulp van een lineaire bergingsfunctie, waarbij de bergingscoëfficiënt een gegeven constante is,
- de bergingsveranderingen worden beschreven met behulp van een niet-lineaire bergingsfunctie, waarbij de bergingscoëfficiënt berekend wordt met de module MUST.

Voor de modellering van het openwatersysteem zijn in het gekoppelde rekenmodel drie mogelijkheden opgenomen:

- de waterdiepten in het openwater en de drainageweerstanden zijn per tijdstap bekend en worden als gegeven ingevoerd,
- de waterdiepten in het openwater worden met behulp van de module LYMPHA berekend, waarbij wordt uitgegaan van stationaire stroming in het openwatersysteem,
- de waterdiepten in het openwater worden met behulp van de module LYMPHA berekend, waarbij wordt uitgegaan van niet-stationaire stroming in het openwatersysteem.

De modules GELDYM, MUST en LYMPHA zijn afgeleid van drie afzonderlijke rekenmodellen die dezelfde naam dragen maar geheel zelfstandig te gebruiken zijn voor de berekening van verzadigde respectievelijk onverzadigde grondwaterstroming, respectievelijk openwaterstroming.

Hieronder zal worden ingegaan op de in- en uitvoer via het scherm en zullen in het kort de in- en uitvoerfiles worden besproken. Alleen de verschillen

met de ongekoppelde modellen LYMPHA, GELDYM en MUST zullen in detail worden besproken. Indien het gekoppelde rekenmodel geheel aansluit bij de ongekoppelde versies wordt verwezen naar de afzonderlijke gebruikershandleidingen (Kors en Promes (1990), Reit (1988b en 1989) en De Laat (1985)).

A.2 In- en uitvoer via het scherm

TRIGON bestaat uit drie programma's: PREONV.EXE, PREVER.EXE en PROCES.EXE. Met de programma's PREONV.EXE en PREVER.EXE worden de tijdsafhankelijke gegevens met betrekking tot het onverzadigde respectievelijk verzadigde grondwatersysteem (de netwerkconfiguratie en de bodemfysische gegevens) omgezet in een voor het eigenlijke rekenprogramma PROCES.EXE geschikte vorm. De gegevens met betrekking tot het openwatersysteem worden niet voorbewerkt maar direct in het programma PROCES.EXE ingelezen.

Starten van het gekoppelde rekenmodel gebeurt door het intikken van de opdracht:

```
PROCES.EXE<return>
```

Op het scherm verschijnen dan de mededelingen:

```
DEZE REKENMODULE BEREKENT OP ELK TIJDSTIP IN ELK
KNOOPPUNT EN WATERVOEREND PAKKET VAN HET VERZADIGD
GRONDWATERSYSTEEM DE STIJGHOOGTEN.
EVENTUEEL KAN DEZE BEREKENING WORDEN AANGEVULD
MET EEN BEREKENING VAN DE WATERDIEPTE EN AFVOER IN
HET OPPERVLAKTEWATERSYSTEEM OP ELK TIJDSTIP
```

Welk modelgebied?

Hierachter dient de gebiedsnaam (3 karakters) betreffende het probleem dat doorgerekend moet worden, te worden ingetikt gevolgd door een <return>. De gebiedsnaam is de naam van de subdirectory waar de subdirectories van de in- en uitvoerfiles zijn ondergebracht. Meer over de directory-structuur staat

in §A.3.

Als eerste wordt nu de stuurfile ingelezen, waarin door de gebruiker onder andere is opgegeven of met alleen de module GELDYM of ook met de modules LYMPHA en/of MUST moet worden gerekend (zie §A.3.1).

Hieronder volgen de mededelingen die vervolgens op het scherm kunnen verschijnen. De mededelingen die vooraf worden gegaan door een "/" kunnen alleen voorkomen wanneer gebruik gemaakt wordt van de module LYMPHA om de openwaterstroming te berekenen.

INLEZEN TIJDSONAFHANKELIJKE GEGEVENS
VAN HET VERZADIGD GRONDWATERSYSTEEM

/INLEZEN TIJDSONAFHANKELIJKE GEGEVENS VAN HET
OPPERVLAKTEWATERSYSTEEM

/Controleren van de input van het oppervlaktewater-
systeem via het scherm (y/n)?

Indien deze vraag met y<return> wordt beantwoord worden de ingelezen netwerkgegevens van het openwatermodel naar het scherm weggeschreven. Aan de hand daarvan kan de gebruiker controleren of in de file met netwerkgegevens geen fouten zijn gemaakt ten aanzien van de vereiste format.

/Node not connected to groundwatersystem

Deze boodschap verschijnt op het scherm indien een openwaterknoop is gedefinieerd die niet samenvalt met een grondwaterknooppunt. In dit geval wordt tevens een foutmelding weggeschreven naar de file ERRROUT.DAT en wordt de berekening afgebroken. De modellering van het openwatersysteem en/of het grondwatersysteem zal moeten worden herzien zodat alle openwaterknopen samenvallen met grondwaterknooppunten.

/INLEZEN TIJDSAFHANKELIJKE GEGEVENS VAN HET
OPPERVLAKTEWATERSYSTEEM

Indien voor het openwatersysteem géén tijdsafhankelijke randvoorwaarden zijn opgegeven wordt deze laatste mededeling overgeslagen.

Nadat alle gegevens met betrekking tot het openwatersysteem en alle tijds-onafhankelijke gegevens met betrekking tot het grondwatersysteem zijn ingelezen wordt de berekening gestart. De tijdsafhankelijke gegevens met betrekking tot het grondwatersysteem worden per tijdstap ingelezen. Per iteratie in het rekenhart van GELDYM wordt op het beeldscherm het aantal iteraties voor die tijdstap, de tijdstap en de maximum onnauwkeurigheid (het verschil in stijghoogte tussen twee opeenvolgende iteraties in [m]) getoond:

I: ... T: ... MXONNT: ...

De iteraties lopen door tot de maximum onnauwkeurigheid kleiner is dan de maximum toelaatbare onnauwkeurigheid die door de gebruiker in de stuurfile is opgegeven. De tijdstap is in dit geval de tijdstap met betrekking tot het grondwatersysteem. Indien de module LYMPHA gebruikt wordt voor de berekening van de openwaterstroming worden per iteratie in de koppeling steeds de iteraties binnen de module GELDYM naar het scherm geschreven. Indien het aantal iteraties in de koppeling tussen grondwater en openwater het maximum toegestane aantal overschrijdt, verschijnt de volgende mededeling op het scherm:

/IKOP > MXIKOP VOOR T - ...

De tijdstap die in dat geval naar het scherm wordt geschreven is de tijdstap van het gekoppelde systeem, dat wil zeggen het grondwatersysteem gekoppeld aan het openwatersysteem berekend met behulp van de module LYMPHA. De berekening wordt niet afgebroken, maar de gebruiker moet zich ervan bewust zijn dat in de koppeling niet aan de opgegeven nauwkeurigheid wordt voldaan.

Tot slot is het mogelijk dat de volgende boodschap op het scherm verschijnt:

/BEREKENING AFGEBROKEN IVM FOUTMELDINGEN
BEKIJK DE FILE ERR0UT.DAT VOOR DEZE FOUTMELDING

De file ERROUT.DAT wordt aangemaakt in de rekenmodule LYMPHA indien er bepaalde fouten in de invoergegevens van het openwatersysteem worden geconstateerd of wanneer tijdens de berekening van de openwaterstroming bepaalde fouten worden gedetecteerd. Een verklaring van de foutmeldingen die naar de file ERROUT.DAT kunnen zijn weggeschreven wordt gegeven in Kors en Promes (1990).

Helemaal aan het einde van het programma PROCES.EXE verschijnt deze mededeling op het scherm:

GEZIEN? DRUK RETURN

A.3 De in- en uitvoerfiles

De gegevens die nodig zijn voor de berekening van de grondwater- en openwaterstroming met het gekoppelde rekenmodel worden ingelezen vanuit invoerfiles. De berekende gegevens worden weggeschreven naar één of meerdere uitvoerfiles. De in- en uitvoerfiles zijn ASCII-files (American Standard Code for Information Interchange). Zij worden geformatteerd ingelezen en weggeschreven.

Voor de organisatie van de in- en uitvoerfiles is de directory-structuur overgenomen van het rekenmodel GELDYM (Reit 1988b en 1989). De programma's PREONV.EXE, PREVER.EXE en PROCES.EXE staan op de huidige directory (/WD/) en worden van daaruit opgestart. Daarna moet de gebruiker een gebiedsnaam opgeven bijvoorbeeld GBN. De invoerfiles die hierbij horen moeten nu op de directory /WD/GBN/IN/ staan. De uitvoerfiles van PREONV.EXE en PREVER.EXE komen op de directory /WD/GBN/TUSSEN/ te staan en de uitvoerfiles van PROCES.EXE op de directory /WD/GBN/UIT/.

Hieronder worden kort de benodigde invoerfiles beschreven. Voor de volledigheid is daarbij steeds vermeld op welke directory de files behoren te staan. Hoe de files moeten worden aangemaakt staat beschreven in Reit (1988b en 1989), Kors en Promes (1990) en De Laat (1985).

A.3.1 De invoerfiles

De stuurfile

De keuze van de modellering en enkele rekengrootheden worden ingelezen vanuit een stuurfile: (/WD/GBN/IN/) KEUMOD.DAT. Deze file heeft de volgende inhoud: (Steeds wordt na drie regels commentaar (die alleen ten dienste staan van de gebruiker en niet worden ingelezen) het vereiste format gegeven).

C*****

Berekening van het grondwatersysteem met
bergingsveranderingen in de onverzadigde zone (y/n)?

A1

Berekening van de onverzadigde zone met MUST (0) of
met een constante bergingscoëfficiënt (1)?

A1

Bergingscoëfficiënt?

F10.6

C*****

Berekening van het grondwatersysteem gekoppeld
aan het openwatersysteem (y/n)?

A1

Berekening van het openwatersysteem
stationair (0) of niet stationair (1)?

A1

Welke berekeningsmethode (1/2/3) voor de flux tussen
openwater en grondwater voor $t=0$?

I3

Welke berekeningsmethode (1/2/3) voor de flux tussen
openwater en grondwater voor $t>0$?

I3

Maximale aantal iteraties bij koppelingsalgoritme?

I3

C*****

Startwaarde stijghoogten [m tov NAP] ten behoeve van
de eerste iteratie van de grondwaterberekening?

F10.6

Maximale toelaatbare onnauwkeurigheid grondwater [m]?

F10.6

Maximale aantal iteraties grondwater?

I3

Grootte relaxatiefactor grondwater (tussen 0 en 2)?

F10.6

C*****

Tijdstapgrootte van het grondwater (Δt_g) indien ongekoppeld of van
het gekoppelde systeem (ΔT) indien gekoppeld aan het openwater [d]?

I3

Aantal tijdstappen van het grondwater indien ongekoppeld of van
het gekoppelde systeem indien gekoppeld aan het openwater?

I3

Indien gekoppeld, hoeveel malen is de tijdstap van het gekop-
pelde systeem groter dan de tijdstap van het grondwater? ($\Delta T : \Delta t_g$)

I3

Indien gekoppeld, hoeveel malen is de tijdstap van het gekop-
pelde systeem groter dan de tijdstap van het openwater? ($\Delta T : \Delta t_o$)

I3

C*****

N.B. Gekoppeld betekent hier het grondwatersysteem gekoppeld aan openwater-
systeem.

De invoerfiles ten behoeve van GELDYM:

De tijdsafhankelijke gegevens met betrekking tot het verzadigd grondwatersysteem worden ingelezen en voorbewerkt met het programma PREVER:

(/WD/GBN/IN/)

	<u>filenaam</u>
- C-weerstanden per element en scheidende laag	ELMCWS.PRN
- KDmax per element en watervoerend pakket	ELMKD1.PRN
- KDmin per element en watervoerend pakket	ELMKD2.PRN
- KDhoek per element en watervoerend pakket	ELMKD3.PRN
- per element drie knooppuntnummers	ELMKNP.PRN
- de x- en y-coördinaat per knooppunt	KNPXY.PRN
- netwerkspecificaties (aantal knooppunten, aantal elementen en aantal watervoerende pakketten)	NETWRK

De resultatenfiles (direct access files, ongeformatteerd met een recordlengte van 4) van de module PREVER worden ingelezen door het programma PROCES. Het betreft de volgende files:

(/WD/GBN/TUSSEN/)

	<u>filenaam</u>
- b en c coëfficiënt van de weerstandsmatrix per element en knooppunt ten behoeve van het berekenen van de stroomsnelheden per element	DLCOEF
- KDxx, KDyy, KDxy per element en watervoerend pakket	ELMKDX
- C-weerstanden per knooppunt en scheidende laag	KCWSTD
- diagonaalcoëfficiënten per knooppunt en watervoerend pakket	KDIACF
- aantal omringende knooppunten per knooppunt	KNROMR
- de omringende knooppuntnummers per knooppunt	KOMR
- "overige" coëfficiënten per knooppunt en watervoerend pakket	KOMRCF
- invloedsoppervlakte per knooppunt	KOPP

Voorts zijn de volgende geformatteerde files die door de gebruiker worden aangemaakt nodig ten behoeve van GELDYM:

(WD/GBN/IN/)

	<u>filenaam</u>
- per knooppunt de maaiveldshoogte (tov NAP)	MAAIVL.PRN
- netwerkspecificaties	NETWRK
- per knooppunt van het grondwater het nummer van de openwaterknoop waar het grondwaterknooppunt mee samenvalt (deze file wordt alleen ingelezen indien het openwater met behulp van LYMPHA wordt doorgerekend)	KOPVER.DAT

*Tijdsafhankelijke gegevens:

(WB/GBN/IN/)

	<u>filenaam</u>
- brondebieten per knooppunt en watervoerend pakket	BRN???.PRN
- randdebieten per knooppunt en watervoerend pakket	RND???.PRN
- vrije danwel vaste stijghoogte per knooppunt en watervoerend pakket	STY???.PRN
- neerslag en verdamping per knooppunt van het eerste watervoerend pakket	KLM???.PRN
- de coëfficiënten a_1 en b_1 van de q_1 - ϕ -relatie per knooppunt van het eerste watervoerend pakket (deze file is niet nodig indien het openwater met behulp van LYMPHA wordt doorgerekend)	OPW???.PRN

Voor iedere tijdstap in het grondwater moeten deze invoerfiles met tijdsafhankelijke gegevens worden aangemaakt. Op de plaats van "???" moet in de naam het nummer worden opgegeven dat correspondeert met het tijdstapnummer.

De invoerfiles ten behoeve van LYMPHA:

(WB/GBN/IN/)

	<u>filenaam</u>
- netwerkgegevens	SYSTEM.DAT
- tijdsfuncties	TIMESR.DAT
- beginvoorwaarden	LYMINI.DAT

De inhoud en het vereiste format van deze files worden uitvoerig beschreven in Kors en Promes (1990). Bij de koppeling van de modules GELDYM en LYMPHA is voor de beschrijving van de flux tussen het grondwater- en openwater-

systeem gebruik gemaakt van de zijdelingse toe- of afvoerfuncties in de module LYMPHA. In de file met netwerkgegevens moet de gebruiker per kanaalvak opgeven in welke parameterregel het type zijdelingse toe- of afvoer en de bijbehorende coëfficiënten gespecificeerd zijn. Indien gebruik gemaakt wordt van de module LYMPHA gekoppeld aan GELDYM moet op de parameterregels het volgende staan: het juiste regelnummer, het typenummer "5", het tijdsfunctienummer "0" en als eerste parameter de reciproke drainageweerstand c_{dr} . De eenheid van de reciproke drainageweerstand is $[l/s]$. Voor de overige parameters moet de waarde "0" worden opgegeven. Deze worden binnen de programmatuur echter gebruikt om gegevens over de grondwaterstijghoogten danwel over de flux tussen grondwater en openwater op te slaan. Het is daarom van belang dat per kanaalvak een andere parameterregel wordt gebruikt. Deze beperking geldt niet voor LYMPHA als zelfstandig programma (zie verder Kors en Promes (1990)).

De invoerfiles ten behoeve van MUST:

Enkele algemene gegevens met betrekking tot het onverzadigd grondwatersysteem worden ingelezen en voorbewerkt met het programma PREONV:

/WD/BASIS.OND

/WD/GBN/IN/BODEM.OND

De resultatenfile (direct access file, ongeformatteerd met een recordlengte van 4) van de module PREONV wordt ingelezen door het programma PROCES. Het betreft de file /WD/GBN/TUSSEN/CURVES met per bodemtype:

*vochttekort-curve

*drukprofiel-curve

*gemiddelde doorlatendheid voor 13 pF-waarden van de bovenste 100 cm

*coëff. a_w * en b_w * ter bepaling van de bergingscoëfficiënt

Voorts zijn de volgende geformatteerde files die door de gebruiker worden aangemaakt nodig ten behoeve van MUST:

(/WD/)

BASIS.BOV

(/WD/GBN/IN/)

ALGEMN

ALGKNP

BODEM.BOV

INTYD1

INTYD2

INTYD3

Voor de inhoud van deze files wordt verwezen naar De Laat (1985) en Reit (1989).

A.3.2 De uitvoerfiles

De extensie van de uitvoerfiles is afhankelijk van de gekozen modellering. Indien niet aan het openwatersysteem wordt gekoppeld is de extensie "OG" (OnGekoppeld). Indien stationaire openwaterstroming mee wordt berekend is de extensie "S?", waarbij op de plaats van het vraagteken het nummer van de gekozen methode voor de bepaling van q_1 staat (1/2/3). Indien niet-stationaire openwaterstroming mee wordt berekend is de extensie "N?".

Voor het verzadigd grondwatersysteem wordt een file aangemaakt voor de volgende rekenresultaten:

- de stijghoogten per tijdstap Δt_g per knooppunt en
wervoerend pakket PHIKNP.??

Afhankelijk van de gekozen koppeling worden uitvoerfiles met de volgende rekenresultaten aangemaakt:

- berekende afvoeren en waterhoogten in het openwatersysteem
per openwaterrekenpunt QHOPWA.??
- berekende fluxen tussen openwater en grondwater per grond-
waterknooppunt in het eerste wervoerend pakket FLUXQL.??
(deze files worden alleen aangemaakt indien het openwater-
systeem met behulp van LYMPHA wordt doorgerekend)
- de coëfficiënten a_w en b_w van de q_w - ϕ -relatie ONVZON.??
(deze file wordt alleen aangemaakt indien het onverzadigd
grondwatersysteem met behulp van MUST wordt doorgerekend)