

32/446(63) 200.

BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW

De invloed van wateraanvoer op de grondwaterstroming in
een verticale doorsnede door de Empese en Tondense heide
berekend met het model STRELIN

P. Groenendijk

Rapport 63

STARING CENTRUM, Wageningen, 1990.



28 SEP. 1990

Wsn 521921 *

REFERAAT

Groenendijk, P., 1990. De invloed van wateraanvoer op de grondwaterstroming in een verticale doorsnede door de Empese en Tondense heide berekend met het model STRELIN. Wageningen, Staring Centrum. Rapport 63.
36 blz.; 9 afb.; 4 tab.; 2 aanh.

Met het stroomlijnenprogramma STRELIN zijn berekeningen uitgevoerd voor de vierde fase van de studie "Modellerings Ca^{++} in grondwater" die door het Waterloopkundig Laboratorium wordt uitgevoerd. De berekeningen hebben betrekking op een verticale doorsnede door het gebied van de Empese en Tondense heide. Voor 12 tweemaandelijke tijdvakken in de periode 1985/1986 zijn met STRELIN berekeningen uitgevoerd voor de bestaande situatie en voor een scenario met wateraanvoer naar het droogtegevoelige landbouwgebied van de ruilverkaveling Brummen-Voorst. Gebiedsvreemd water dat aan de westelijke zijde van het natuurgebied infiltrereert, kan op lange termijn de van kwelwater afhankelijke vegetatiezone in het terrein bereiken.

Trefwoorden: grondwaterstroming, kwelgebied, natuurgebied, stroomlijnen, wateraanvoer.

ISSN 0924-3070

Copyright 1990.
STARING CENTRUM Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied Postbus 125,
6700 AC Wageningen
Tel.: 08370-19100; telefax: 08370-24812; telex: 75230 VISI-NL

Het Staring Centrum is een voortzetting van: het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding (ICW), het Instituut voor Onderzoek van Bestrijdingsmiddelen, afd. Milieu (IOB), de Afd. Landschapsbouw van het Rijksinstituut voor Onderzoek in de Bos- en Landschapsbouw "De Dorschkamp" (LB), en de Stichting voor Bodemkartering (STIBOKA).

Het Staring Centrum aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm en op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van het Staring Centrum.

Project nr. 7169

299HM-MK/06.90

INHOUD	Blz.
WOORD VOORAF	7
SAMENVATTING	9
1 INLEIDING	11
1.1 Doel van de studie	11
1.2 Achtergrond van het onderzoek	11
1.3 Opzet van de rapportage	12
2 MODELLEN EN MODELGEBIED	13
2.1 Modellen	13
2.1.1 SIMGRO	13
2.1.2 STRELIN	14
2.2 Het modelgebied	15
3 SCHEMATISERING EN INVOERGEGEVENS	19
3.1 Schematisering voor de STRELIN-berekeningen	19
3.2 Berekening van de randdebieten	20
4 RESULTATEN VAN DE BEREKENINGEN	23
4.1 Scenario's	23
4.2 Stroomlijnen en verblijftijden	23
5 CONCLUSIES	27
LITERATUUR	29
AANHANGSELS	31
1 Geohydrologische gegevens zoals gebruikt in het invoerbestand STRELIN-DAT	31
2 Infiltratie- en drainagefluxen, berekend aan de hand van door SIMGRO berekende waterbalansen	33

WOORD VOORAF

Het Waterloopkundig Laboratorium (WL) verricht onderzoek naar het gedrag van Ca^{++} in de bodem met het rekenmodel CHARON. In het kader van de vierde fase van het onderzoeksproject wordt het model CHARON toegepast op een praktijksituatie.

Voor deze toepassing zijn gegevens van een reële veldsituatie nodig. Het gebied van de Empese en Tondense heide was een proefgebied voor de SWNBL dat zich goed te lenen voor toepassing van het model CHARON.

Het ICW heeft in het kader van de SWNBL-studie de regionale grondwaterstroming gesimuleerd met het model SIMGRO. Een relatief grote hoeveelheid gegevens is bekend van de waterkwaliteit en de bodem van het gebied.

Het WL voert het onderzoek in samenwerking met het Staring Centrum uit. De werkverdeling in dit project is als volgt:

- Het SC voert de hydrologische berekeningen uit met het model STRELIN. De invoergegevens en de resultaten van de SWNBL-studie dienen als uitgangspunt voor de berekeningen. De resultaten worden aan het WL geleverd.
- Het WL maakt een schematisering van de geochemische configuratie van de modeldoorsnede en verzamelt invoergegevens. Vervolgens worden geochemische berekeningen uitgevoerd met het model CHARON voor een reeks jaren.

Het hydrologische gedeelte van de studie is door het Staring Centrum uitgevoerd. Het WL voert deze modelstudie uit als project T108.04.

Dit rapport geeft de opzet en de resultaten van de hydrologische berekeningen.

SAMENVATTING

Voor de vierde fase van de WL-studie "Modellering Ca⁺⁺ in grondwater" zijn hydrologische gegevens van een dwarsdoorsnede door een natuurgebied nodig. De resultaten van de berekeningen met het model STRELIN vormen geschikte informatie voor de WL-studie.

In het Staring Centrum-gedeelte van het onderzoek wordt eveneens nagegaan of met het stroomlijnenmodel STRELIN (Groenendijk 1990) inzicht te verkrijgen is in het mechanisme van de grondwaterstroming en de invloed waterhuishoudkundige ingrepen op de kwaliteit van het grondwater onder een natuurgebied.

De modelberekeningen zijn uitgevoerd voor een geschematiseerde verticale doorsnede door het gebied van de Empese en Tondense heide. De waterbalanstermen dienen als invoer voor de praktijktoepassing van het model CHARON (Kroot 1990).

Voor dit onderzoek zijn de resultaten van de hydrologische berekeningen voor het gebied van de Empese en Tondense heide (Hendriks 1988) gebruikt. In het gebied van de Empese en Tondense heide komt een infiltratiezone en een periodieke kwelzone voor. In het centrale gedeelte van de kwelzone stijgt periodiek diep kwelwater op. De randen van de kwelzone staan onder invloed van een lokale kwelstroom.

De gegevens van de Empese en Tondense heide zijn bewerkt tot invoer voor het model STRELIN (Groenendijk 1990). Met STRELIN zijn voor 12 tweemaandelijke tijdvakken in de periode 1985/1986 berekeningen uitgevoerd voor de bestaande situatie en voor een scenario met wateraanvoer naar het droogtegevoelige landbouwgebied van de ruilverkaveling Brummen-Voorst.

STRELIN levert behalve de waterbalanstermen ook verblijftijden van het grondwater. Een stroomlijnenfiguur en een figuur met lijnen van gelijke verblijftijden geeft globaal inzicht in het lot van geïnfiltrerd gebiedsvreemd water en de herkomst van kwelwater.

Het grootste gedeelte van het geïnfiltrerde water wordt in het winterseizoen via de waterlopen afgevoerd. Water dat aan de westelijke kant van het natuurgebied infiltrert, kan op lange termijn de van kwelwater afhankelijkke vegetatiezone in het natuurgebied bereiken.

Aan de hand van een stroomlijnenfiguur kan niet worden vastgesteld of diep kwelwater en gebiedsvreemd water de kwelzone bereikt. Hiervoor is een dynamische simulatie van de deeltjesverplaatsing nodig.

1 INLEIDING

1.1 Doel van de studie

Het Waterloopkundig Laboratorium voert sinds 1985 het project "Modellering Ca^{++} in grondwater" in verschillende fasen uit, (zie o.a. Wesseling & Bril 1985). In het kader van dit project is het model CHARON ontwikkeld en getoetst aan de hand van enkele laboratorium- en veldexperimenten. De nadruk in de laatste fase van het project ligt op het vaststellen van de bruikbaarheid van het model CHARON voor veldsituaties, waarbij de dynamiek van de grondwaterstroming een rol speelt, zowel in de uitgangssituatie als na de eventuele waterhuishoudkundige ingrepen.

Het SWNBL proefgebied de Empese en Tondense heide lijkt zich goed voor dit doel te lenen. In de terreindepressies van dit natuurgebied is sprake van een periodieke kwelstroom. De eventuele waterhuishoudkundige ingrepen in het landbouwgebied zijn eveneens seizoensgebonden. De opstuwings van aangevoerd gebiedsvreemd water in de waterlopen en eventuele infiltratie van dit water vindt alleen in de zomer plaats.

Het doel van het Staring Centrum gedeelte van de studie is het aanleveren van waterbalanstermen voor het model CHARON. Een afgeleide vraag is of met het stroomlijnenmodel STRELIN inzicht kan worden verkregen in de lotgevallen van geïnfiltreerd gebiedsvreemd water en de ouderdom en herkomst van het water dat in het natuurgebied opkwelt.

1.2 Achtergronden van het onderzoek

Inzicht in de herkomst van water dat opkwelt in natuurgebieden en het lot van geïnfiltreerd gebiedsvreemd water zijn essentieel voor de afweging van belangen in landrichtingsprojecten. Peilveranderingen in landbouwgebieden kunnen tot veranderingen leiden in de stofconcentraties in de wortelzone van half-natuurlijke vegetaties in aangrenzende natuurgebieden. Vooral de kwelwaterafhankelijke vegetatietypen zijn gevoelig voor dergelijke ingrepen. Het tijdsinterval tussen het instellen van een ander peilbeheer in landbouwgebieden en het effect hiervan op terrestrische ecosystemen kan groot zijn.

Bij aanvoer van gebiedsvreemd water kunnen de gewijzigde verhoudingen tussen de stofconcentraties in het infiltrerende water leiden tot veranderde concentraties in het water dat in natuurgebieden opkwelt.

Het tijdsinterval tussen deze ingreep en het effect is afhankelijk van de verblijftijd van het grondwater en de buffercapaciteit van de bodemmatrix. De verblijftijd is afhankelijk van de stromingsintensiteit, de afstand tussen de "bron" (instromingspunt) en de "put" (uitstromingspunt), en de dikte van de watervoerende lagen.

Een geohydrologische dwarsdoorsnede vormt een eenvoudig

instrument om een globaal inzicht te verwerven in de herkomst en de ouderdom van het kwelwater. Om het concentratieverloop in het grondwater onder natuurgebieden te voorspellen zal echter gebruik moeten worden gemaakt van een rekenmodel waarin ook de geohydrochemische reacties zijn gemodelleerd.

De verificatie en validatie van een dergelijk instrument voor deze toepassing is echter niet mogelijk, aangezien de lengte van de meetreeksen in het meest gunstige geval veel korter is dan de tijd tussen de ingreep en het effect.

1.3 Opzet van de rapportage

In dit rapport worden de waterbalansberekeningen met het model STRELIN (Groenendijk 1990) verantwoord.

In hoofdstuk 2 wordt enige achtergrondinformatie gegeven over de modellen SIMGRO (Querner & Van Bakel 1989) en STRELIN (Groenendijk 1990). Tevens wordt een beschrijving gegeven van het modelgebied.

De schematisering van de verticale doorsnede en de invoergegevens voor de modeldoorsnede worden in hoofdstuk 3 behandeld. In hoofdstuk 4 worden de resultaten van de berekeningen voor de uitgangssituatie en een scenario met wateraanvoer worden voor de gemiddelde situatie van 1985/-1986 en de zomersituatie van 1986 gegeven. De conclusies staan in hoofdstuk 5.

2 MODELLEN EN MODELGEBIED

2.1 Modellen

Een eenduidige definitie van het woord "model" ontbreekt. In dit rapport wordt onder een "model" verstaan: het stelsel wiskundige vergelijkingen en de uitwerking daarvan in een computercode, waarmee een proces of een aantal samenhangende processen kan worden beschreven. Als gevolg hiervan worden de computerprogramma's SIMGRO, STRELIN en CHARON modellen genoemd. Onder modelleren wordt verstaan het opstellen en oplossen van het genoemde stelsel wiskundige vergelijkingen en het programmeren van de computercode.

Het opstellen van de invoerbestanden aan de hand van de gemaakte schematisering en het runnen van de computerprogramma's worden "modeltoepassingen" genoemd.

Voor deze studie is gebruik gemaakt van de invoergegevens en de resultaten van het model SIMGRO (Hendriks 1988). De bewerkte gegevens hebben gediend als invoer voor het model STRELIN (Groenendijk 1990). In de volgende paragrafen wordt een korte beschrijving gegeven van het concept van deze modellen.

2.1.1 SIMGRO

SIMGRO is een afkorting van SIMulation of GROundwater flow and surface waterlevels. Met dit quasi 3-dimensionale model kan de regionale waterhuishouding worden gesimuleerd. In fig. 1 wordt een schematisch overzicht van de waterhuishouding van een gedeelte van het modelgebied gegeven, zoals dat binnen SIMGRO wordt beschouwd.

Het model werkt met een netwerk van eindige elementen waarvan de hoekpunten de knooppunten vormen. Een of meer knooppunten kunnen een subregio vormen. De indeling in subregio's gebeurt naar bodemtype of naar afwateringseenheid.

De verzadigde zone wordt in het model beschreven door watervoerende en weerstandbiedende lagen. Aangenomen wordt dat water in de watervoerende lagen in horizontale richting stroomt en in weerstandbiedende lagen in verticale richting.

De onverzadigde zone/wortelzone wordt in het model opgevat als twee reservoirs. Vocht kan in het reservoir van de wortelzone worden geborgen tot een bepaalde evenwichtsvochtvoorraad is bereikt. Wordt deze voorraad overschreden, dan zal het overtollige water naar het reservoir van de ondergrond percoleren. Als de voorraad kleiner is dan de evenwichtsvoorraad, kan capillaire opstijging vanuit de verzadigde zone optreden. In de ondergrond wordt uit de waterbalans de hoogte van het freatisch vlak berekend met behulp van een freatische bergingscoëfficiënt, waarvan de grootte afhankelijk is van de grondwaterstand.

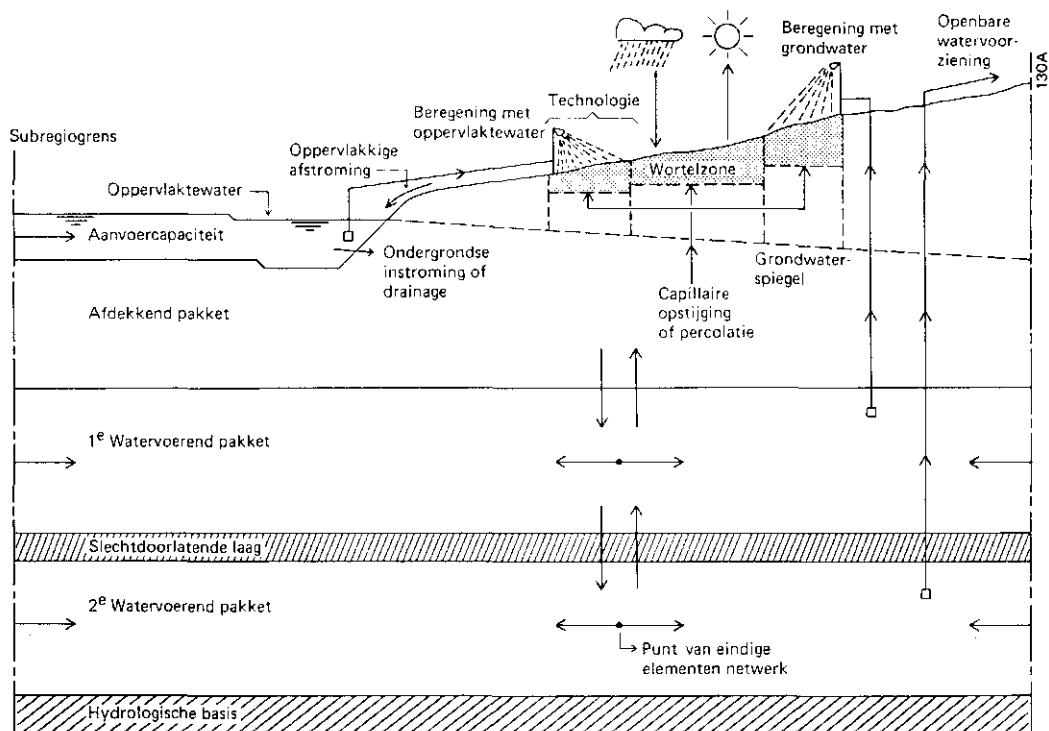


Fig. 1 Processen in de waterhuishouding die met SIMGRO kunnen worden gesimuleerd (Naar Querner en Van Bakel 1989).

Het oppervlaktewatersysteem wordt per subregio beschouwd als een reservoir met een stuw aan de uitstroomzijde. Voor elk reservoir wordt rekening gehouden met wateraan- of afvoer, drainage of infiltratie, oppervlakkige afstroming en onttrekking voor beregening. Voor de winterperiode wordt een stuwpeil opgegeven en voor de zomerperiode wordt een streefpeil opgegeven. In een droge periode met infiltratie en onttrekking voor beregening, kan het water onder het stuwpeil zakken als de aanvoer niet voldoende is om het streefpeil te handhaven. In dat geval speelt de bergingscapaciteit van het systeem een rol bij de berekening van de waterstand.

2.1.2 STRELIN

Het model STRELIN berekent stroomlijnen, potentialen en verblijftijden in een twee-dimensionaal verticaal bodemprofiel. Als voorwaarde voor de toepassing van het model geldt dat de stroming in de richting loodrecht op het beschouwde vlak gelijk aan 0 moet zijn. Het model is gebaseerd op een schematisering van de doorsnede in eindige differenties. De afmetingen van de rechtehoekige compartimenten kunnen verschillen. De stijghoogte wordt in het model berekend voor het middelpunt van een compartiment.

De waterbalanstermen hebben betrekking op de zijden van een compartiment. Per compartiment wordt de horizontale en verticale doorlatendheid opgegeven. Ten behoeve van de verblijftijd-berekeningen wordt ook per compartiment de porositeit opgegeven. Voor de aan de rand van de doorsnede gelegen compartimenten worden stijghoogten of debieten opgegeven. Uit deze randvoorwaarden berekent het programma op iteratieve wijze voor ieder compartiment de stijghoogte en de waterbalans. De waterbalanstermen worden berekend uit de stijghoogteverschillen. De berekeningen worden voortgezet totdat de waterbalans per compartiment sluitend is.

Aan de hand van de berekende debieten wordt de stroomfunctie vastgesteld. Stroomlijnen worden getekend door interpolatie in het stroomfunctieveld. Aan de hand van de waterbalanstermen wordt per compartiment met een analytische vergelijking de verblijftijd van een deeltje berekend. Door de punten met een gelijke verblijftijd in de doorsnede met elkaar te verbinden worden isochronen verkregen.

2.2 Het modelgebied

In het studiegebied vindt de hoofdafwatering plaats door middel van een aantal beken die afwateren op de IJssel. Op ca. 1400 m ten oosten van het Apeldoorns kanaal loopt een zijtak van de Loenense beek die een belangrijke functie heeft voor de afwatering van het landbouwgebied dat is gelegen tussen het kanaal en het natuurgebied. Fig. 2 geeft een bovenaanzicht van het modelgebied en de ligging van de verticale doorsnede.

De detailontwatering van het landbouwgebied is plaatselijk wisselend en is gerelateerd aan de bodemsoort en de grondwater-trap. De Oude Voorstondense beek die in westelijke richting langs het natuurterrein loopt is een snel reagerende beek die met name een functie heeft bij hoge neerslagintensiteiten. In de periode april tot en met oktober staat deze beek meestal droog. Het natuurgebied wordt aan de oostelijke kant begrensd door de Veldbeek. Deze beek heeft een vrij belangrijke functie voor de ontwatering van het natuurgebied. Deze beek staat in de zomer meestal gedurende 2 tot 3 maanden droog. Langs het natuurgebied lopen in west-oostelijke richting greppels.

Het Apeldoorns kanaal heeft een eigen peil. Dit kanaal heeft geen functie voor de afwatering van het gebied. Hoewel de weerstand van de kanaalbodem groot is, bestaat er wel een interactie tussen het kanaalwater en het grondwater in de directe omgeving (Hendriks 1988).

De eventuele wateraanvoer naar het droogtegevoelige landbouwgebied in de ruilverkaveling zal plaats vinden vanuit dit kanaal. In de situatie waarin geen wateraanvoer plaats vindt wordt het kanaal voor het grootste gedeelte gevoed met water uit de sprengen, die ontspringen aan de oostelijke zijde van het Veluwemassief. Bij wateraanvoer zal nabij Loenen IJsselwater in het kanaal moeten worden gebracht (DHV 1985).

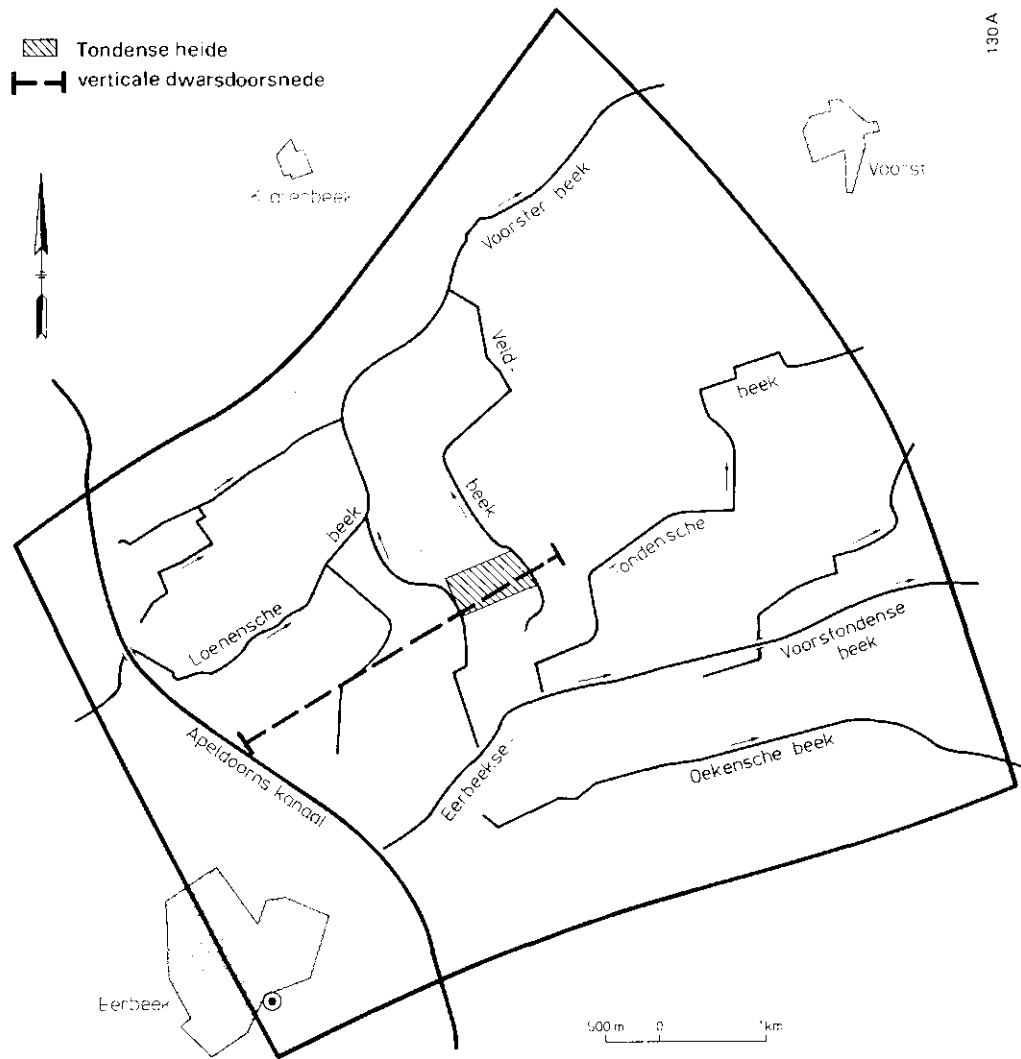


Fig. 2 Ligging van het modelgebied en de verticale doorsnede.

De gronden van het landbouwgebied bestaan voor het grootste gedeelte uit leemarme en zwaklemige veldpodzolgronden met grondwatertrap V/VI. Nabij de genoemde zijtak van de Loenense Beek zijn de gronden natter. De bodem bestaat hier uit lemige fijnzandige beekoordgronden met Gt II/III. De bodem van het natuurterrein bestaat voornamelijk uit veldpodzolgronden met grondwatertrap V op de hogere delen en uit beekoordgronden en broekoordgronden met grondwatertrap II/III in de terrein-depressies.

De verticale bodemdoorsnede is gesitueerd in het zuidelijke gedeelte van de IJsselvallei, in de ruilverkaveling Brummen-Voorst. De verticale doorsnede beslaat een gedeelte van het gebied dat in beschouwing is genomen in de modelstudie van Hendriks (1988).

De orientatie verloopt globaal in noord-oost-oostelijke richting, loodrecht op het regionale isohypsenpatroon. Het gebied helt van het westen naar het oosten; de gemiddelde helling bedraagt ca. 1:1000. De lengte van de doorsnede bedraagt 3000 m.

De westrand van de modeldoorsnede is gesitueerd in het Apeldoorns kanaal. De oostrand is ca. 100 m ten oosten van de Veldbeek gelegd.

Op 2100 m ten westen van het Apeldoorns kanaal begint het natuur-gebied de Empese en Tondense heide. De afstand van de oostelijke begrenzing van het natuurgebied tot de Westrand van de model-doorsnede bedraagt 2900 m. In fig. 3 is de geohydrologische schematisering weergegeven.

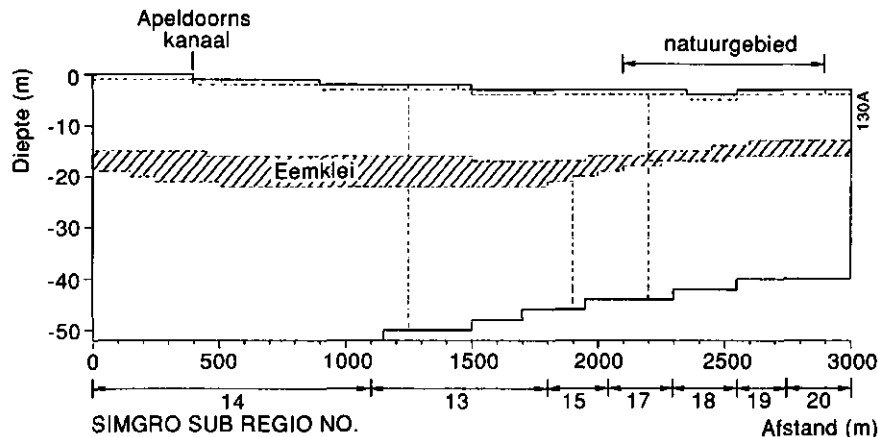


Fig. 3 Schema van de geohydrologie.

De stippellijnen in fig. 3 geven de begrenzingen weer van de gedeelten met een verschillende doorlatendheid. De geohydrologische configuratie van het modelgebied is geschematiseerd in 3 lagen:

1. eerste watervoerende pakket;
2. weerstandbiedende Eemlaag;
3. tweede watervoerende pakket;

Het eerste watervoerende pakket bestaat uit fijn- tot matig fijnzandige afzettingen van de formatie van Twente. Het doorlaatvermogen bedraagt $150-500 \text{ m}^2/\text{d}$. Ter plaatse van het natuurgebied bedraagt de kD -waarde ca. $120 \text{ m}^2/\text{dag}$. Deze waarde is afgeleid uit een pompproef die door het ICW in het kader van de SWNBL-studie is uitgevoerd (Hendriks 1986).

De dikte van de laag Eemklei bedraagt 2-5 m. De gemiddelde waarde voor de weerstand bedraagt 100-300 d (Aelmans 1983). Het verloop van deze laag is grillig. Op enkele plaatsen in het gebied is de laag geperforeerd. Uit de genoemde pompproef bleek dat de weerstand van de laag ter plaatse van het natuurgebied 70 dagen bedraagt.

Het tweede watervoerende pakket wordt gevormd door de Formatie van Kreftenheije. De grofzandige afzettingen hebben een dikte van ca. 40 m. Het doorlaatvermogen bedraagt $1000-3000 \text{ m}^2/\text{dag}$. Ter plaatse van het natuurgebied bedraagt de kD -waarde $900 \text{ m}^2/\text{dag}$. De bodem van het tweede watervoerende pakket wordt als de basis van de doorsnede beschouwd. Volgens een door IWACO (1986) uitgevoerde studie vindt er door de laag die hier als basis wordt beschouwd wel enige opwaartse stroming plaats. De orde van grootte bedraagt $0-0,08 \text{ mm/d}$. De stroming, die nauwelijks fluctueert over de seizoenen, is in het model ingevoerd.

3 SCHEMATISERING EN INVOERGEGEVENS

De benodigde gegevens voor de stromingsberekeningen met het model STRELIN kunnen worden onderverdeeld in de volgende categorieën:

- * gegevens betreffende de geohydrologische configuratie die constant zijn in de tijd. Deze categorie heeft betrekking op de geometrie van de doorsnede, de doorlatendheden en de porositeiten. Deze informatie wordt in het rekenprogramma STRELIN ingevoerd via het bestand STRELIN.DAT.
- * randvoorwaarden die fluctueren in de tijd. Voor alle aan de rand gelegen compartimenten moet een potentiaal of een debiet worden opgegeven voor betreffende periode.

3.1 Schematisering voor de STRELIN-berekeningen

De benodigde informatie voor het samenstellen van het invoerbestand STRELIN.DAT is ontleend aan Aelmans (1983) en aan de studie van Hendriks (1988).

De verticale doorsnede is loodrecht op het regionale isohypsen-patroon gekozen. De isohypsen vertonen een flauwe kromming. De grondwaterstroming divergeert enigszins in oostelijke richting. Deze divergentie is slechts gering, zodat de twee-dimensionale schematisering toelaatbaar mag worden geacht.

De diepte van de doorsnede bedraagt aan de westkant maximaal 52 m. Aan de oostkant is de dikte kleiner: 38 m. De doorlatendheden van de in de watervoerende lagen gesitueerde compartimenten zijn berekend aan de hand van de KD waarden. De doorlatendheid ter plaatse de Eemkleilaag is berekend aan de hand van de waarde voor de weerstand. Voor de horizontale en verticale doorlatendheden zijn dezelfde waarden gebruikt, aangezien geen informatie over eventuele anisotropie beschikbaar was. Er is vanuit gegaan dat de waarde voor de doorlatendheid van het eerste watervoerende pakket niet representatief is voor de doorlatendheid op het niveau van de laagste grondwaterstand, omdat hier waarschijnlijk enige bodemvorming zal hebben plaats gevonden.

Voor de doorlatendheid van de bovenste meter van het profiel is de waarde 1,0 - 0,5 m/dag ingevoerd. De waarde 1,0 voor de hogere gronden en de waarde 0,5 voor de lagere gronden. De doorlatendheden per compartiment staan vermeld in aanhangsel 1. Dit heeft als consequentie dat het model STRELIN voornamelijk een verticale stroming in de bovenste meter van het profiel berekent. De effectieve dikte voor horizontale verplaatsing wordt met 1 meter verkleind. De horizontale afmeting van de compartimenten bedragen in het algemeen 50 m. De afmeting ter plaatse van een waterloop is op 1 m gesteld, om de reële stromingssituatie rondom de sloten zo goed mogelijk te benaderen. De verticale afmeting van de compartimenten varieert van 1 tot 4 m. De slechtdoorlatende Eemkleilaag is in het model inge-

voerd met laagdikten van 1 m. In bijlage 1 wordt het gedeelte van het invoerbestand voor het model STRELIN gegeven dat betrekking heeft op de schematisering van de verticale doorsnede.

Behalve de genoemde beken bevat het landbouwgebied ook een aantal greppels en kleinere waterlopen. Deze zijn in het stroomlijnenmodel STRELIN geschematiseerd tot een aantal waterlopen op relatief grote afstand. Het stromingspatroon onder het natuur-gebied wordt slechts in geringe mate beïnvloed door de afstand van deze waterlopen. Het debiet dat door deze waterlopen wordt afgevoerd is van veel groter belang.

3.2 Berekening van de randdebieten

De verticale doorsnede doorkruist 7 subregio's van het modelgebied dat met het grondwaterstromingsmodel SIMGRO in de SWNBL-studie is beschouwd.

Het landbouwgebied van de STRELIN-doorsnede omvat de SIMGRO-subregio's 14, 13 en 17. Het natuurgebied beslaat de subregio's 17, 18, 19 en 20. In fig. 3 is aangegeven op welk gedeelte van de modeldoorsnede de SIMGRO-subregio's betrekking hebben. De randdebieten zijn afgeleid uit de resultaten van de model-studie van Hendriks (1988). Het model SIMGRO geeft per subregio waterbalanstermen voor de onverzadigde zone en de verzadigde zone. Uit deze termen kunnen per subregio infiltratiefluxen en drainagefluxen worden berekend.

De SIMGRO simulaties hebben betrekking op de jaren 1985 en 1986. Het jaar 1985 had een natte zomer, waarin de aanvoerbehoefte klein was. Het jaar 1986 had een droge zomer met een relatief grote aanvoerbehoefte.

De simulatieperiode is onderverdeeld in 12 tijdvakken van 2 maanden. Op deze wijze kan de dynamiek van de grondwaterstroming op redelijke wijze worden benaderd.

Bij de fluxberekeningen wordt uitgegaan van de veronderstelling dat de bovenrand van het modelprofiel zich bevindt op het niveau van de laagste grondwaterstand. Het grondwater dat zich boven dit niveau bevindt wordt niet in beschouwing genomen.

De drainagefluxen worden ontleend aan de door SIMGRO berekende drainagefluxen. In dit model worden 3 verschillende ontwateringssystemen onderscheiden: greppels, sloten/beken en kanalen. Greppels hebben een lage drainageweerstand en hebben een ondiepe drainagebasis. Greppels voeren alleen af bij hoge grondwaterstanden. Kanalen hebben een hoge weerstand en een diepe drainagebasis. Sloten en beken vormen een intermediair van de greppels en de kanalen.

Langs het natuurgebied lopen greppels in de lengterichting van het modelprofiel. De veronderstelling van parallelle drains is hier niet geldig. Voor het natuurgebied zijn de fluxen op iets andere wijze berekend dan voor het landbouwgebied.

- landbouwgebied:

De infiltratieflex wordt berekend als de som van de percolatieflex (- capillaire opstijging) en het bergingsverschil van de watervoorraad die zich boven het niveau van de laagste grondwaterstand bevindt.

De drainageflux wordt berekend als de som van de greppel-, sloot- en kanaalflux.

- Natuurgebied:

De infiltratieflex wordt op dezelfde manier berekend als voor het Landbouwgebied. De greppelflux wordt hierop in mindering gebracht. De drainageflux wordt berekend als de som van de sloot- en kanaalflux.

Het debiet wordt berekend als het produkt van de flux en de horizontale compartimentlengte.

In bijlage 2 is het resultaat van de fluxberekeningen gegeven. Twee subregio's hebben afwijkende waarden: subregio 13 en subregio 20. Subregio 13 is voor het grootste gedeelte langs de Loenensche beek gelegen. De gemiddelde fluxwaarden van subregio 13 zijn daarom niet representatief voor het gedeelte dat wordt doorkruist door de modeldoorsnede. Daarom zijn voor deze subregio nieuwe waarden berekend. De aangepaste fluxen worden berekend als het rekenkundige gemiddelde van de fluxen van de subregio's 14, 13 & 15.

Subregio 20 vertoont eveneens een opvallend gedrag. Deze subregio wordt in sterke mate beïnvloed door het niveau van de Veldbeek. Door een combinatie van factoren zoals de lage infiltratieweerstand en het geringe bergingsvermogen van de Veldbeek berekent het model SIMGRO voor deze subregio een oscillerende grondwaterstand. De voor subregio 20 berekende waterbalans termen worden als niet-realistisch beschouwd. Voor deze subregio zijn volgens een andere benadering waterbalans-termen afgeleid. Subregio 20 wordt gekenmerkt door goor- en beekerdgronden. Het grondwaterstandsverloop ligt tussen het verloop van subregio 18 (lagere broek- en beekerdgronden) subregio 19 (hogere veldpodzolgronden) en het verloop van in. Subregio 17 wordt gekenmerkt door veldpodzol- en gooreerdgronden en heeft een grondwaterstandsregiem dat tussen het verloop van subregio 18 en subregio 19 in ligt. In bijlage 2 zijn de oorspronkelijke waarden gegeven.

Voor de STRELIN berekeningen zijn de fluxen van subregio 20 opnieuw berekend als het gewogen gemiddelde van de fluxen van de subregio's 17, 18 en 19.

De debieten voor de linkerrand zijn berekend aan de hand van het doorlaatvermogen en de helling van de grondwaterspiegel op deze rand. Voor de kD -waarde is de waarde van beide watervoerende pakketten gezamenlijk genomen. De slechtdoorlatende laag is in werkelijkheid ten westen van de linkerrand afwezig. Voor alle tijdvakken is het debiet over deze linkerrand constant gehouden. Het niveau van de grondwaterspiegel varieert door de seizoenen aanzienlijk, de helling van de grondwaterspiegel is door de tijd heen nagenoeg constant. De debieten voor de onderrand zijn afgeleid van de gegevens van Hendriks (1988).

De debieten over de rechterrand zijn berekend uit de waterbalans van de gehele doorsnede.

Hierbij is er van uit gegaan dat door de slechtdoorlatende Eemlaag geen horizontale stroming optreedt. De berekende uitstroming is gelijkmatig verdeeld over de diepte. Ten oosten van de modeldoorsnede is de Eemlaag niet aanwezig.

4 RESULTATEN VAN DE BEREKENINGEN

4.1 Scenario's

Met SIMGRO zijn door Hendriks (1988) effecten van veronderstelde ingrepen in de regionale waterhuishouding op de waterhuishouding van het natuurgebied gesimuleerd. De twee scenario's die voor deze studie van belang zijn:

1. een scenario waarin de huidige situatie wordt gesimuleerd. In feite betreft dit de verificatie van het model SIMGRO voor de genoemde modelstudie.
2. een scenario met wateraanvoer naar het droogtegevoelige gebied in de ruilverkaveling Brummen-Voorst ten behoeve van de landbouw. In dit scenario wordt water aangevoerd vanuit het Apeldoorns kanaal via de Eerbeekse en Voorstondense beek naar het ten westen en ten oosten van het natuurterrein gelegen landbouwgebied. Het aangevoerde water wordt in het landbouwgebied gestuwd door het opzetten van zomer- en winterpeilen. Door deze ingreep in de waterhuishouding stijgen de grondwaterstanden in het landbouwgebied 0,3 tot 0,5 m in het landbouwgebied. Door deze stijging zal er meer bodemvocht capillair kunnen opstijgen en is er een verminderde behoefte aan beregening vanuit het grondwater. In het natuurgebied stijgen de grondwaterstanden 0,15 tot 0,25 m.

De beregening kan worden opgevat als een diffuus verspreide neerslag op het maaiveld. De beregeningsonttrekking uit het eerste watervoerende pakket vindt eveneens diffuus plaats. In de STRELIN berekeningen wordt de grondwateronttrekking ten behoeve van beregening aan de bovenrand gerealiseerd. In de balanstermen zitten impliciet in de berekende infiltratiefluxen.

4.2 Stroomlijnen en verblijftijden

Met het programma STRELIN zijn per tijdvak waterbalanstermen berekend voor de 1650 compartimenten van de modeldoorsnede. Tevens is een berekening uitgevoerd voor de gemiddelde situatie van 1985/1986. De invoer voor deze situatie is verkregen door de randdebieten van de 12 tijdvakken te middelen. In fig. 4a en 4b zijn de stroomlijnenpatronen weergegeven van de gemiddelde hydrologische situatie van de jaren 1985 en 1986 voor zowel de uitgangssituatie als het scenario met wateraanvoer. Het debietsinterval tussen de stroomlijnen in fig. 4b bedraagt $0,073 \text{ m}^3/\text{dag/m}$. In de figuren is te zien dat de Eemkleilaag functioneert als een scheiding tussen een lokaal stromingssysteem en een regionaal stromingssysteem. Het in het landbouwgebied infiltrerende water wordt bijna geheel door de waterlopen afgevoerd. Gemiddeld vindt er wegzijging plaats in het natuurgebied. De Veldbeek ten oosten van het terrein heeft een belangrijke drainerende werking voor het gebied.

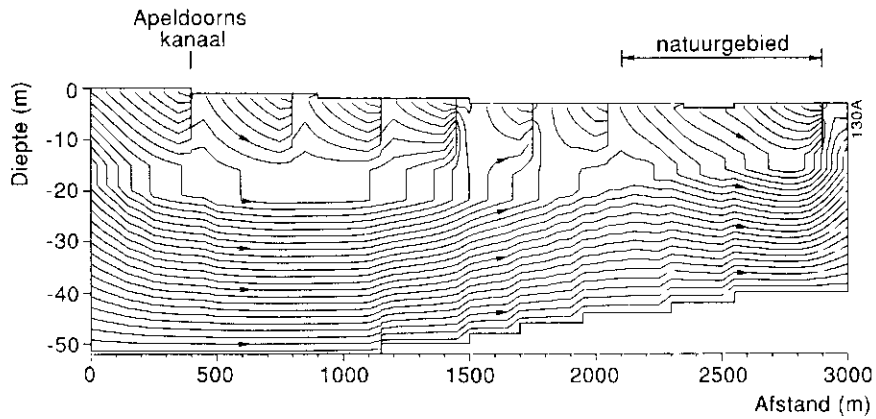


Fig. 4a Stroomlijnenpatroon voor '85/'86 in de uitgangssituatie.

Het debietsinterval tussen de stroomlijnen in fig. 4a bedraagt $0,064 \text{ m}^3/\text{dag}/\text{m}$.

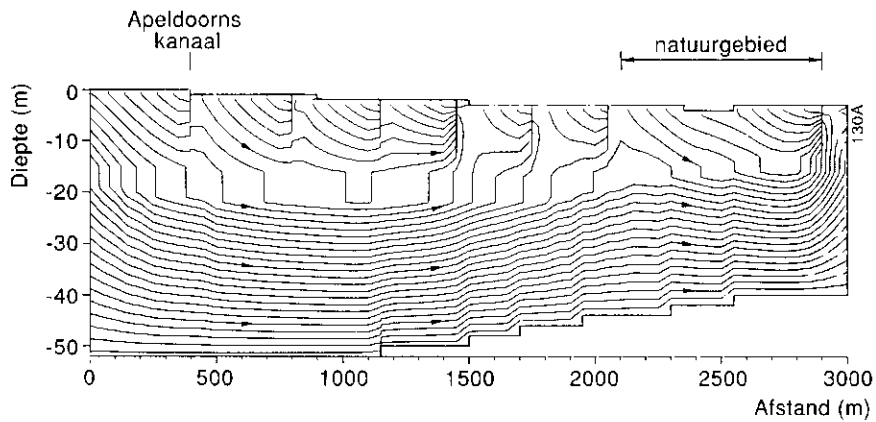


Fig. 4b Stroomlijnenpatroon voor '85/'86 bij het scenario met wateraanvoer.

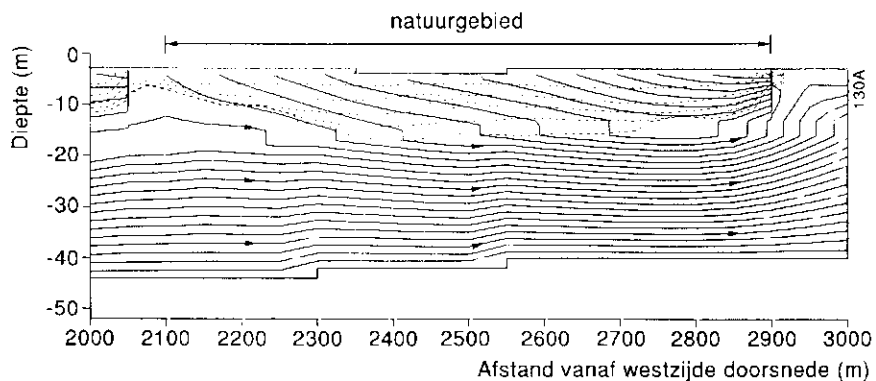


Fig. 5a Stroomlijnen en verblijftijden van het grondwater van het natuurgebied in '85/'86 voor de uitgangssituatie.

In fig. 5a en 5b zijn de figuren uitvergroot voor het natuurgebied en zijn tevens lijnen van gelijke verblijftijd na infiltratie weergegeven. Het debietsinterval tussen de stroomlijnen (dichte lijnen) bedraagt in fig. 5a $0,064 \text{ m}^3/\text{dag}/\text{m}$ en het tijdsinterval tussen de lijnen van gelijke verblijftijd (stippellijnen) bedraagt 3 jaar.

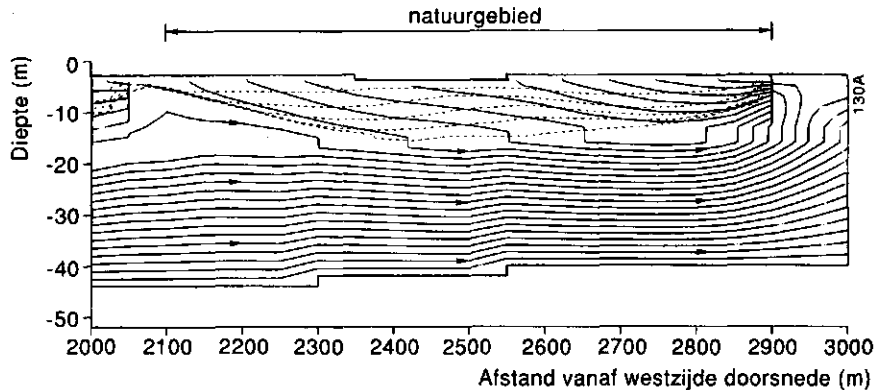


Fig. 5b Stroomlijnen en verblijftijden van het grondwater van het natuurgebied in '85/'86 bij wateraanvoer.

Het debietsinterval tussen de stroomlijnen (dichte lijnen) bedraagt in fig. 5b $0,073 \text{ m}^3/\text{dag}/\text{m}$ en het tijdsinterval tussen de lijnen van gelijke verblijftijd (stippellijnen) bedraagt 3 jaar.

De verplaatsingstijd van grondwater dat in de zone met broekeerdgronden en beekerdgronden van het terrein infiltrert en in de Veldbeek uitstroomt bedraagt slechts enkele jaren. De gemiddelde verplaatsingssnelheid van het grondwater onder de Eemkleilaag bedraagt ca. $40 \text{ m}/\text{jaar}$. In fig. 6a en 6b is het stroomlijnenpatroon gegeven voor de zomersituatie van 1986.

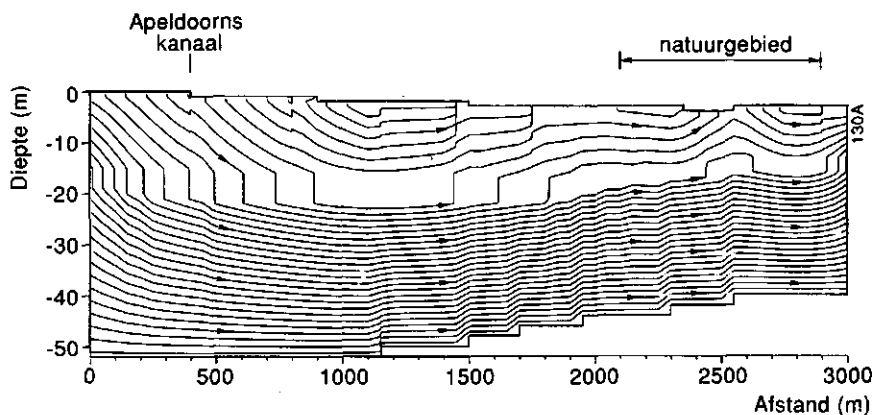


Fig. 6a Stroomlijnenpatroon van de modeldoorsnede voor de zomersituatie van '86 voor de uitgangssituatie.

Het debietsinterval tussen de stroomlijnen in fig. 6a bedraagt $0,075 \text{ m}^3/\text{dag}/\text{m}$.

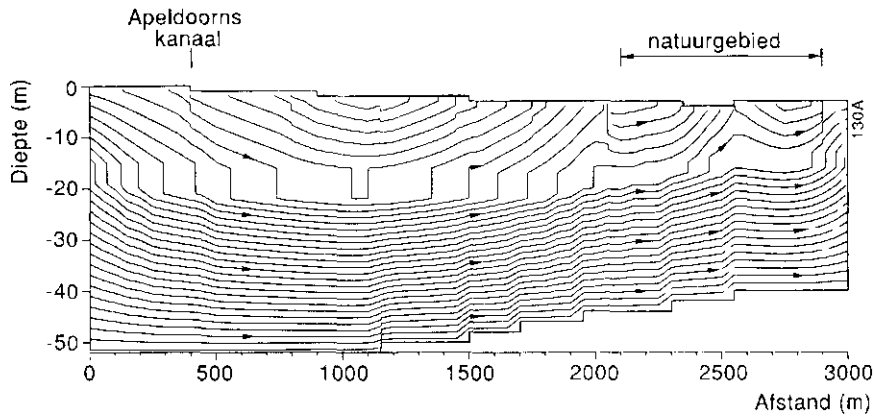


Fig. 6b Stroomlijnenpatroon van de modeldoorsnede voor de zomersituatie van '86 bij wateraanvoer.

Het debietsinterval tussen de stroomlijnen in fig. 6b bedraagt $0,062 \text{ m}^3/\text{dag}/\text{m}$.

Het centrale gedeelte van de terreindepressie ontvangt kwelwater van grotere ouderdom. De kwelstroom in de flanken van de terreindepressie heeft een lokale herkomst. Deze conclusies zijn in overeenstemming met de gemeten chemische samenstelling van het grondwater (Van den Toorn & Pankow 1987) en (Pankow & Van den Toorn 1988). De hogere grondwaterstanden in het landbouwgebied bij wateraanvoer leiden tot een grotere kwelstroom in het genoemde terreingedeelte.

De kwelstroom voor de uitgangssituatie in de terreindepressie is kleiner dan bij het scenario met wateraanvoer. In de figuur van de 'wateraanvoersituatie' wordt gesuggereerd dat het kwelwater voor een groot gedeelte afkomstig uit de ten westen van het terrein gelegen Oude Voorstondense beek.

Het water uit de Veldbeek zal de kwelzone van het terrein niet bereiken. Dit kan worden verklaard doordat de Veldbeek lager is gelegen dan het terrein. De fig. 6a en 6b geven echter een stationair beeld dat de gemiddelde situatie gedurende 2 maanden beschrijft. Voor een meer dynamisch beeld zouden verplaatsings-berekeningen moeten worden uitgevoerd. Door het volgen van een aantal waterdeeltjes door de verschillende tijdvakken heen kan worden bepaald of het aangevoerde water ook werkelijk de kwelzone van het natuurterrein bereikt.

5 CONCLUSIES

Aan de hand van de resultaten van het grondwaterstromingsmodel SIMGRO zijn de invoergegevens berekend voor het stroomlijnenmodel STRELIN. Voor 2 subregio's zijn de gegevens minder betrouwbaar en zijn de waterbalansen vanuit de gegevens van de omliggende subregio's berekend. De Eemkleilaag functioneert als een scheiding tussen een lokaal stromingssysteem en een regionaal stromingssysteem. De verschillen tussen de gemiddelde stromingsbeelden van de uitgangssituatie en het wateraanvoerscenario zijn minimaal. Gemiddeld vindt er wegzijging plaats in het natuurgebied. Het geïnfiltreerde gebiedsvreemde water wordt bijna geheel door de waterlopen afgevoerd. Alleen het water dat direct ten westen van het terrein infiltreert kan een bedreiging voor het natuurgebied vormen. Het centrale gedeelte van de terreindepressie ontvangt kwelwater van grotere ouderdom. De kwelstroom in de flanken van de terreindepressie heeft een lokale herkomst.

Met het model STRELIN kan een globaal inzicht worden verkregen in de lotgevallen van gebiedsvreemd water en de herkomst van het kwelwater. Concentratieveranderingen ten gevolge van de hydrologische ingrepen dienen te worden berekend met een dynamisch simulatiemodel.

LITERATUUR

Aelmans, F.G., 1983. Grondwaterkaart van Nederland; Apeldoorn-Oost. D.G.V.-T.N.O.

DHV, 1985. Onderzoek Waterhuishouding IJsselvallei III, Rapport fase 1; Verkenning.

Groenendijk, P. 1990. The calculation of streamlines, potentials and travel times in ground water systems. Wageningen, THE WINAND STARING CENTRE. Report in preparation.

Hendriks R.F.A., 1986. Onderzoek naar de effecten van wateraanvoer en peilveranderingen in agrarische gebieden op de waterkwaliteit in natuurgebieden. Deel 4. Enkele hydrologische, bodemfysische en bodemchemische parameters uit twee SWNBL-proefgebieden. Wageningen, ICW. Nota 1743.

Hendriks R.F.A., 1988. Onderzoek naar de effecten van wateraanvoer en peilveranderingen in agrarische gebieden op de waterkwaliteit in natuurgebieden. Deel 10. Berekeningen van de regionale grondwaterstroming rondom de Tondense heide met behulp van het model SIMGRO. Wageningen, ICW. Nota 1810.

IWACO, 1986. Infiltratie-onderzoek IJsselvallei. Eindrapport. Boxtel, IWACO, Rapport nr. 30.278-3.

Kroot, M.P.J.M., 1990. Ca⁺⁺ modellering in grondwater, fase IV, Delft, WL. Rapport in voorbereiding.

Pankow J. & A. Van den Toorn, 1988. Onderzoek naar de effecten van wateraanvoer en peilveranderingen in agrarische gebieden op de waterkwaliteit in natuurgebieden. Deel 11. In 1987 bepaalde waterkwantiteits- en waterkwaliteitsparameters in de 2 SWNBL proefgebieden. Wageningen, ICW. Nota 1845.

Querner, E.P. & P.J.T. VAN BAKEL, 1989. Description of the regional groundwater flow model SIMGRO. Wageningen, THE WINAND STARING CENTRE, Report 7.

SWNBL, 1988. Water boven water, Studieresultaten 1983-1987 van de Studiecommissie Waterbeheer-, Natuur, Bos en Landschap. Utrecht, SWNBL.

Toorn, A. van den, A. & J. Pankow, 1987. Onderzoek naar de effecten van wateraanvoer en peilveranderingen in agrarische gebieden op de waterkwaliteit in natuurgebieden. Deel 6. In 1986 bepaalde waterkwantiteits- en waterkwaliteitsparameters in de 2 SWNBL proefgebieden. Wageningen, ICW. Nota 1787.

Wesseling J.W. & J. Bril, 1985. Modellering Ca⁺⁺ in grondwater. Delft, WL. Verslag onderzoek R2134.

AANHANGSEL 2. Infiltratie- en drainagefluxen, berekend aan de hand van door SIMGRO berekende waterbalansen.

Tabel 1a. Infiltratiefluxen (mm/dag) in de uitgangssituatie voor de verticale doorsnede door de Empese en Tondense heide in het jaar 1985.

SIMGRO sub- gebied no.	periode					
	dec/jan	feb/mrt	apr/mei	jun/jul	aug/sep	okt/nov
14	1.790	0.752	0.873	0.217	0.323	0.633
13	2.749	1.005	1.600	0.203	0.340	0.643
15	2.314	0.828	1.275	0.302	0.377	0.677
17	1.981	0.942	0.978	0.498	0.320	0.582
18	0.960	0.730	1.535	0.863	0.365	0.732
19	1.805	0.912	1.363	1.077	0.932	0.640
20	0.695	0.510	0.520	0.227	-0.187	-0.040

Tabel 1b. Infiltratiefluxen (mm/dag) in de uitgangssituatie voor de verticale doorsnede door de Empese en Tondense heide in het jaar 1986.

SIMGRO sub- gebied no.	periode					
	dec/jan	feb/mrt	apr/mei	jun/jul	aug/sep	okt/nov
14	2.856	1.413	0.630	0.921	2.147	0.812
13	2.818	1.648	0.785	-0.970	-0.430	1.083
15	2.934	1.765	0.822	0.019	1.027	0.503
17	2.702	1.662	0.905	0.179	-0.040	0.283
18	0.811	0.682	0.813	-0.995	-0.233	1.025
19	2.519	1.732	1.255	1.160	0.283	0.477
20	1.161	0.870	0.645	0.546	-0.185	-0.642

Tabel 2a. Drainagefluxen (mm/dag) in de uitgangssituatie voor de verticale doorsnede door de Empese en Tondense heide in het jaar 1985.

SIMGRO sub- gebied no.	periode					
	dec/jan	feb/mrt	apr/mei	jun/jul	aug/sep	okt/nov
14	2.094	1.378	1.527	0.925	0.815	0.862
13	4.487	3.028	3.486	2.303	2.205	2.328
15	2.854	1.023	1.570	0.395	0.192	0.288
17	0.459	0.107	0.181	0.028	0.013	0.010
18	3.446	2.230	2.897	1.370	0.812	0.925
19	0.192	0.043	0.063	0.012	0.010	0.002
20	2.219	1.043	1.041	-0.575	-1.288	-1.313

Tabel 2b. Drainagefluxen (mm/dag) in de uitgangssituatie voor de verticale doorsnede door de Empese en Tondense heide in het jaar 1986.

SIMGRO sub- gebied no.	periode					
	dec/jan	feb/mrt	apr/mei	jun/jul	aug/sep	okt/nov
14	2.442	1.873	1.347	0.192	-0.127	0.510
13	4.492	3.768	3.103	1.068	0.694	2.007
15	2.519	2.307	1.360	0.017	-0.051	0.130
17	0.600	0.400	0.200	-0.044	-0.097	-0.038
18	3.413	3.192	2.720	0.208	-0.028	0.438
19	0.324	0.242	0.097	-0.033	-0.093	-0.048
20	2.356	2.290	1.240	-2.459	-4.247	-3.027

Tabel 3a. Infiltratiefluxen (mm/dag) bij het wateraanvoerscenario voor de verticale doorsneden door de Empese en Tondense heide in het jaar 1985.

SIMGRO sub- gebied no.	periode					
	dec/jan	feb/mrt	apr/mei	jun/jul	aug/sep	okt/nov
14	2.275	0.809	1.146	0.217	0.458	0.733
13	2.654	1.233	2.040	1.317	0.238	0.797
15	2.444	0.990	1.517	0.720	0.427	0.802
17	1.986	1.008	1.203	0.668	0.483	0.727
18	0.003	0.547	1.544	1.255	0.440	0.732
19	1.897	0.960	1.456	1.145	0.897	0.708
20	0.379	0.260	0.083	0.025	0.0	0.078

Tabel 3b. Infiltratiefluxen (mm/dag) bij het wateraanvoerscenario voor de verticale doorsnede door de Empese en Tondense heide in het jaar 1986.

SIMGRO sub- gebied no.	periode					
	dec/jan	feb/mrt	apr/mei	jun/jul	aug/sep	okt/nov
14	2.897	1.772	0.802	0.342	1.365	0.925
13	2.874	1.828	1.170	-1.130	-0.572	1.275
15	3.100	1.918	0.835	-0.830	0.182	0.832
17	2.719	1.758	1.008	-0.259	-0.343	0.610
18	-0.024	0.267	0.907	-1.203	-0.402	1.457
19	2.553	1.932	1.358	0.762	0.012	0.678
20	0.939	0.590	0.145	0.248	-0.420	-0.438

Tabel 4a. Drainagefluxen (mm/dag) bij het wateraanvoerscenario voor de verticale doorsnede door de Empese en Tondense heide in het jaar 1985.

SIMGRO sub- gebied no.	periode					
	dec/jan	feb/mrt	apr/mei	jun/jul	aug/sep	okt/nov
14	1.763	0.802	1.103	0.470	0.452	0.645
13	4.714	3.402	3.989	3.067	2.597	2.692
15	3.433	1.563	2.359	1.172	0.633	0.778
17	0.641	0.198	0.330	0.138	0.032	0.078
18	3.751	2.805	4.015	2.697	2.003	1.783
19	0.416	0.108	0.198	0.070	0.015	0.027
20	3.013	1.852	2.402	1.092	0.633	0.565

Tabel 4b. Drainagefluxen (mm/dag) bij het wateraanvoerscenario voor de verticale doorsnede door de Empese en Tondense heide in het jaar 1986.

SIMGRO sub- gebied no.	periode					
	dec/jan	feb/mrt	apr/mei	jun/jul	aug/sep	okt/nov
14	2.058	1.513	0.867	-0.135	-0.077	0.633
13	4.827	4.040	3.548	1.295	0.948	2.298
15	3.944	2.853	2.048	-0.748	-0.620	0.413
17	0.774	0.530	0.342	-0.030	-0.072	0.025
18	3.856	3.597	3.502	0.435	-0.002	1.007
19	0.519	0.378	0.230	-0.017	0.067	-0.010
20	3.326	2.833	2.387	-1.608	-3.462	-1.825