De effecten van grondwateronttrekkingen aan de westrand van het Plateau van Margraten op de hydrogeologie van het Noordal

Samenvattend rapport

H.A.J. van Lanen, R. Dijksma en B. van de Weerd

RAPPORT 58

Maart 1995

Vakgroep Waterhuishouding
Nieuwe Kanaal 11, 6709 PA Wageningen

ISSN 0926-230X

907050

Inhoud

Voorwoord

Samenvatting

1. Inleiding 1

2. Gebiedsbeschrijving 3

2.1. Algemeen 3
2.2. Geologie 3
2.3. Hydrogeologie 5
2.3.1. Algemeen 5
2.3.2. Grondwateraanvulling 6
2.3.3. Grondwater 7
2.3.4. Oppervlaktewater-afvoer 10

3. Grondwaterstromingsmodel 15

3.1. Model MODFLOW 15
3.1.1. Beschrijving 15
3.1.2. Invoergegevens 17
3.2. Simulatie van de werkelijk opgetreden situatie 21
3.2.1. Stijghoogten 21
3.2.2. Oppervlaktewater-afvoer 24

4. Effecten van grondwaterwinning en de invloed van de meteorologische omstandigheden 27

4.1. Stijghoogten 28
4.2. Oppervlaktewater-afvoer 30

5. Conclusies en aanbevelingen 35

Literatuur

Bijlagen

Lijst met figuren

Figuur 1 Topografische vanggebied van de Noor
Figuur 2 Geologische lengtedoorsnede van stroomgebied van de Noor die loopt van de Gulp naar de Voer bij 's-Gravenvoeren
Figuur 3 Dwarsdoorsnede door het stroomgebied van de Noor iets bovenstrooms van de Nederlandse-Belgische rijksgrens
Figuur 4 Het potentieel neerslagoverschot voor grasland in district 15 (Zuid-Limburg)
Figuur 5 Het verloop van de stijghoogte van freatische grondwater onder het plateau in waarnemingspunt WP98
Figuur 6 Het verloop van de stijghoogte van freatische grondwater en het diepe grondwater in het natte dal in waarnemingspunt B9
Figuur 7 Het verloop van de afvoer van de Sint-Brigidabron en van de stijghoogte van het grondwater onder het plateau in peilput WP98
Figuur 8 Geschematiseerde dwarsdoorsnede over de Sint-Brigidabron
Figuur 9 Geschematiseerde lengtedoorsnede over de Sint-Brigidabron
Figuur 10 Isohypsenkaart van het stroomgebied van de Noor met daarin aangegeven de gesimuleerde stijghoogte ter plaatse of in de omgeving van een buis of put
Figuur 11 Isohypsenkaart van het natte dal van het stroomgebied van de Noor met daarin aangegeven de gesimuleerde stijghoogte ter plaatse van een buis of put
Figuur 12 De gesimuleerde en waargenomen dagafvoer bij het meetpunt Molenhoeve te Altembroek (M6)
Figuur 13 De verandering van de stijghoogten (- verlaging en + verhoging) in de Formatie van Vaals ten gevolge van de verschillende waterwinningsvarianten
Figuur 14 De verandering van de stijghoogten van het freatische grondwater (- verlaging en + verhoging) in het beekdal ten gevolge van de verschillende waterwinningsvarianten
Figuur 15 De relatie tussen de afvoer van de Sint-Brigidabron en de stijghoogte van het grondwater onder het plateau bij punt WP98
Figuur 16 Berekende afvoer van de Sint-Brigidabron berekend uit regressievergelijkingen en WP98 voor verschillende waterwinningsvarianten.

Lijst met tabellen

Tabel 1 De afvoer van de Noor ter hoogte van de Molenhoeve voor de periode 1992-1994
Tabel 2 Bijdrage van de bronafvoer en de beekafvoer aan de totale afvoer van de Noor op 1 april 1994
Tabel 3 Bijdrage van de bronafvoer en de beekafvoer aan de totale afvoer van de Noor in 1992 en 1993
Tabel 4 Permeabiliteit en porositeit van de afzettingen of formaties in het stroomgebied van de Noor zoals gebruikt met MODFLOW
Tabel 5 Berekende grondwateraanvulling voor de verschillende combinaties bodemgebruik en grondwaterstandsdiepte
Tabel 6 Verandering van de afvoer van de Noor ten gevolge van de verschillende waterwinningsvarianten

Bijlagen

Bijlage I	Topografische kaart van het stroomgebied van de Noor met de omgeving en de locatie van de waarnemingspunten van het diepe grondwater en de neerslag
Bijlage II	Lokatiekaart piëzometers en afvoermeetpunten in het dal van de Noor
Bijlage III	Modelgebied van het stroomgebied van de Noor
Bijlage IV	Berekende grondwateraanvulling voor MODFLOW
Bijlage V	Waargenomen en gesimuleerde tijd-stijghoogtelijnen

Voorwoord

Dit samenvattend rapport is gebaseerd op omvangrijk onderzoek wat alleen maar mogelijk was door de ondersteuning van vele instanties en personen. Wij willen de opdrachtgever de N.V. Waterleiding Maatschappij Limburg bedanken voor de verstrekte gegevens en de financiële ondersteuning, het Waterschap Roer en Overmaas voor de gegevens en de plaatsing van een meetstuw in de Noor, de Vereniging Natuurmonumenten, in het bijzonder Dhr. L.Bakker en Dhr. J. Knols, voor de gegevens en de toestemming om onderzoek te mogen verrichten in het terrein De Noorbeemden en de Provincie Limburg voor de gegevens en de ondersteuning bij het uitvoeren van enkele putproeven. De Fam. Haesen (Noorbeek) verstrekte welwillend neerslaggevens. Medewerkers van de Belgische Geologische Dienst te Brussel en van de Rijks Geologische Dienst in Heerlen verstrekte gegevens en advies. De Provincie Limburg te Hasselt leverde toestemming om een meetstuw in het Belgische gedeelte van de Noor te plaatsen. Wij zijn ook dank verschuldigd aan de personen in het stroomgebied voor de toestemming hun land te mogen betreden, voor de opslag van materiaal en voor het mogen waarnemen van hun diepe putten, in het bijzonder de Fam. Born Jr., Fam. Born Sr., Fam. Castermans, Fam. Geele, Fam. Kallen, Fam. Kleine, Fam. Lemmens en Fam. Rompelberg en de Fam. Warrimont.

De chemische analyses van de watermonsters werd uitgevoerd door Mw. N. Nakken-Brameyer en Dhr. E.J. Velthorst (Vakgroep Bodemkunde en Geologie). Een deel van het tekenwerk is verzorgd door Dhr. A. van 't Veer (Vakgroep Ruimtelijke Planvorming).

Veel van de bouwstenen van dit onderzoek zijn aangedragen door studenten van de Landbouwuniversiteit, die in het kader van hun afstudeeronderzoek Hydrogeologie onderzoek hebben gedaan in het Noordal of naaste omgeving. Hiervan kon dankbaar gebruik worden gemaakt. Daarnaast verleende verschillende collega's, met name Ing. G. Bier en Ir. H.J. ten Dam, ondersteuning

Samenvatting

In de periode 1991-1994 is in opdracht van de N.V. Waterleiding Maatschappij Limburg (WML) onderzocht welk effect de waterwinning voor de openbare watervoorziening aan de westrand van het Plateau van Margraten heeft op het hydrogeologische systeem van het stroomgebied van de Noor.

De geologische opbouw van het stroomgebied tot aan de Belgische-Nederlandse rijksgrens is vergelijkbaar met die van andere kalkstroomgebieden. Min of meer doorlatende Krijtafzettingen (Formaties van Gulpen en Vaals) worden aangetroffen op ondoorlatende schalies en zandstenen uit het Boven-Carboon. Ten westen van de rijksgrens verandert de geologische opbouw door de waarschijnlijk aanwezige verlengde Eckelrade breuk en de Visé-Puth opwelving. Dit houdt in dat in het dal benedenstrooms van de grens de Formatie van Gulpen op de meeste plaatsen nog voorkomt en dat ten westen van Altembroek de ondoorlatende basis van Boven-Carboon schalies en zandstenen verdwijnt. Dit heeft als gevolg dat de ondoorlatende basis dieper dan 800 m beneden maaiveld ligt en dat de hydrologische waterscheiding moeilijk aan te geven is.

De afvoer van de Sint-Brigidabron is duidelijk gerelateerd aan de stijghoogten van het grondwater onder de plateaus. Tot 1993 was de afvoer zeer laag en viel de bron soms droog. In het winterhalfjaar van 1993/1994 nam de afvoer toe tot meer dan 2500 m^3/dag. De Noor draineert het grondwater tot aan de rijksgrens, daarna treedt er plaatselijk infiltratie op. Benedenstrooms van Altembroek ligt het freatische vlak duidelijk onder de beekbodem en neemt de afvoer niet meer significant toe of af. Het in- en effluente gedrag van de Noor hangt nauw samen met de geologische opbouw. Tot 1993 bedroeg de afvoer van de Noor 2500 a 4000 m^3/dag om in het winterhalfjaar van 1993/1994 toe te nemen tot ongeveer 7500 m^3/dag.

De stijghoogten van het grondwater in het stroomgebied en de oppervlaktewater-afvoer zijn gesimuleerd met het verzadigd grondwaterstromingsmodel voor de periode 1991-1994. De gesimuleerde waarden komen redelijk overeen met de waargenomen waarden.

Kleine veranderingen in de grondwaterwinningen op Heer-Vroendaal en De Dommel (uitbreiding met 1 miljoen m^3/jaar of zwaartepuntverschuiving van De Dommel naar Heer-Vroendaal) leveren in het natte dal nauwelijks een verandering van de stijghoogten van het freatische grondwater op (< 1 cm). Ook de afvoer van de Noor wordt nauwelijks beïnvloed (verandering < 0.5% van de gemiddelde afvoer). Zelfs het effect van alle grondwaterwinningen ten behoeve van de openbare watervoorziening aan de westzijde van het Plateau van Margraten (13.5 miljoen m^3/jaar) op het stroomgebied van de Noor is klein. Aan de noordrand van het natte dal worden de stijghoogten van het freatische grondwater met maximaal 5 cm beïnvloed, terwijl in de directe omgeving van de Noor de verandering terugloopt tot 1 cm. De veranderingen bedragen slechts een fractie van de natuurlijke variatie. De gemiddelde afvoer van de Noor is met minder dan 2% afgenomen ten gevolge van alle winningen. Uit een statistisch model blijkt dat de afvoer van de Sint-Brigidabron slechts marginaal wordt beïnvloed door alle winningen en dat de verandering slechts een fractie bedraagt van de natuurlijke variatie in de afvoer.

Het is waarschijnlijk dat insnijding van de Noor ten gevolge van de rioolovertstort bij Noorbeek een groter effect heeft op de stijghoogten van het freatische grondwater in het natte dal dan de waterwinning op het Plateau van Margraten.

1. Inleiding

Op 18 december 1990 heeft de Provincie Limburg aan de N.V. Waterleiding Maatschappij Limburg (WML) voor de winplaats Heer-Vroendaal, een vergunning voor een grondwateronttrekking van 4 miljoen m^3/jaar verleend. In de vergunningsvoorschriften was onder punt 8 opgenomen, dat het effect op de afstroming van het grondwater naar de beekdalen, o.a. de Noor en het effect op de oppervlaktewater-afvoer van de Noor, moesten worden onderzocht. Dit deel van het door de vergunningsverlener vereiste onderzoek, is in de periode 1992-1994, door de Vakgroep Waterhuishouding van de Landbouwuniversiteit Wageningen verricht in opdracht van de N.V. Waterleiding Maatschappij Limburg.

Het onderzoek naar de effecten van de grondwateronttrekking maakte onderdeel uit van een omvangrijk onderzoek dat als doel had:
- een beschrijving te geven van het hydrogeologische systeem van het stroomgebied van de Noor, en
- de hydrologische effecten (verandering van de stijghoogten en de afvoer van de Noor) te bepalen van de grondwaterwinningen voor de openbare watervoorziening aan de westkant van het Plateau van Margraten en deze te vergelijken met natuurlijke variatie die door de meteorologische gesteldheid wordt veroorzaakt.

De beschrijving van het hydrogeologisch systeem is gebaseerd op uitgebreid veldonderzoek in de periode 1992-1994, dat vervolgens naar modelstudies is vertaald. Aan de hand van dit onderzoek zijn de hydrologische effecten bepaald van de wateronttrekking. Het onderzoek is voor een deel uitgevoerd door studenten van de Landbouwuniversiteit in het kader van hun afstudeeronderzoek Hydrogeologie. Het onderhavige rapport is een samenvatting van het uitgevoerde onderzoek (Van Lanen et al., 1995). De resultaten van dit onderzoek moeten samen met de conclusies uit de regionale modelstudie en de stijghoogte-analyse van Witteveen+Bos (1995), een basis vormen voor de oorspronkelijk aangevraagde en mogelijk in de toekomst gewenste zwaartepuntverschuiving van de winningen langs de westrand van het Plateau van Margraten.

In het rapport komen de volgende aspecten aan de orde. In hoofdstuk 2 wordt een beschrijving van het stroomgebied van de Noor gegeven. Hierbij wordt ingegaan op algemene kenmerken, de geologie en de hydrogeologie. In dit hoofdstuk komen, uitgaande van de metingen, de grondwateraanvulling, het grondwater en het oppervlaktewater aan de orde.

Het verzadigd grondwaterstromingsmodel dat voor het stroomgebied van de Noor met behulp van de MODFLOW programmatuur is ontwikkeld, wordt behandeld in hoofdstuk 3. Na een korte beschrijving van het model, wordt beschreven hoe het grondwaterstromingsmodel de werkelijk opgetreden situatie in 1992-1994 heeft gesimuleerd.

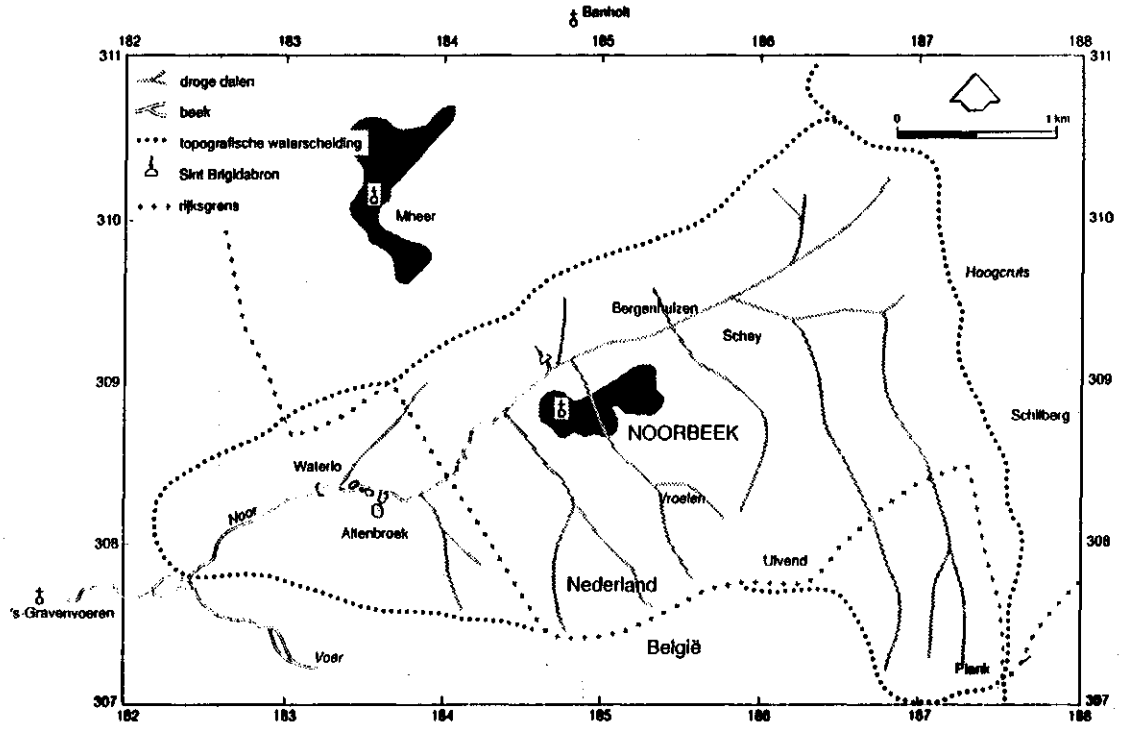
In hoofdstuk 4 worden tenslotte de met het model gesimuleerde hydrologische effecten besproken van de wateronttrekkingen voor de openbare watervoorziening aan de westrand van het Plateau van Margraten. De effecten worden vergeleken met de variatie in de stijghoogten en de afvoer van de Noor, zoals die worden veroorzaakt door de meteorologische gesteldheid.

Het rapport wordt afgesloten met conclusies en aanbevelingen (hoofdstuk 5).

2. Gebiedsbeschrijving

2.1 Algemeen

Het stroomgebied van de Noor ligt in de driehoek Aken, Luik en Maastricht in het uitersten zuiden van Limburg (figuur 1 en bijlage I). De Noor stroomt in zuidwestelijke richting en mondt uiteindelijk in 's-Gravenvoeren uit in de Voer. De lengte van de Noor



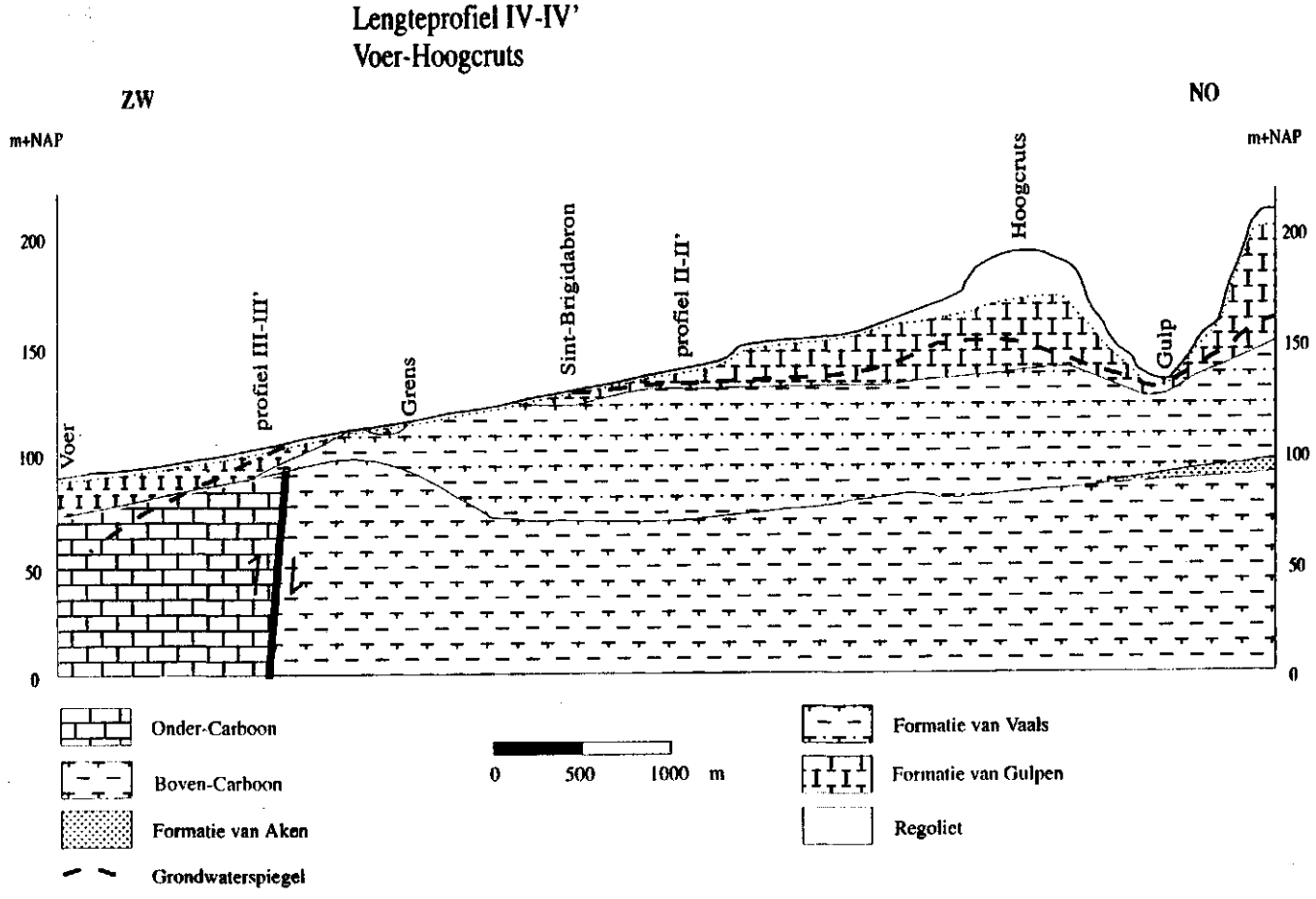
Figuur 1 Topografische vanggebied van de Noor

is 3 km, waarvan 2 km in België ligt. De oppervlakte van het stroomgebied bedraagt 1056 ha. Van het stroomgebied van de Noor ligt 30% in België. Het stroomgebied wordt voor 62% in beslag genomen door grasland en voor 32% door akkerbouw. Het natte natuurterrein 'De Noorbeemden', dat in Nederland in het centrum van het dal ligt, neemt slechts enkele procenten van de oppervlakte in. Het hoogste punt van het stroomgebied ligt in het zuidoosten bij De Planck op 240 m +N.A.P. De Noorbeek begint bij de Sint-Brigidabron op 138 m +N.A.P. en de uitmonding ligt op 91 m +N.A.P. Het dal van de Noor heeft een asymmetrisch vorm. De hellingen aan de noordzijde zijn steil (gemiddeld 20%) en flauw aan de zuidkant (gemiddeld 7%).

2.2 Geologie

De ondergrond van het stroomgebied van de Noor bestaat uit schalies en zandstenen uit het Boven-Carboon. Op deze ondergrond liggen afzettingen uit het Boven-Krijt (figuur 2). De oudste Krijt afzetting in het grootste gedeelte van het stroomgebied is de Formatie van Vaals. De formatie heeft een dikte van 40 à 50 m. De Formatie van Vaals is fijnkorrelig

van aard en is afgezet in een ondiep marien, waarschijnlijk lagunair milieu. De siltrijke afzettingen worden afgewisseld door geulen en platen, die zandiger van karakter zijn. De platen zijn later verkit en gebroken door tectonische activiteit, wat leidt tot 10 à 20 cm dikke, verbrokkelde zandsteenbanken.

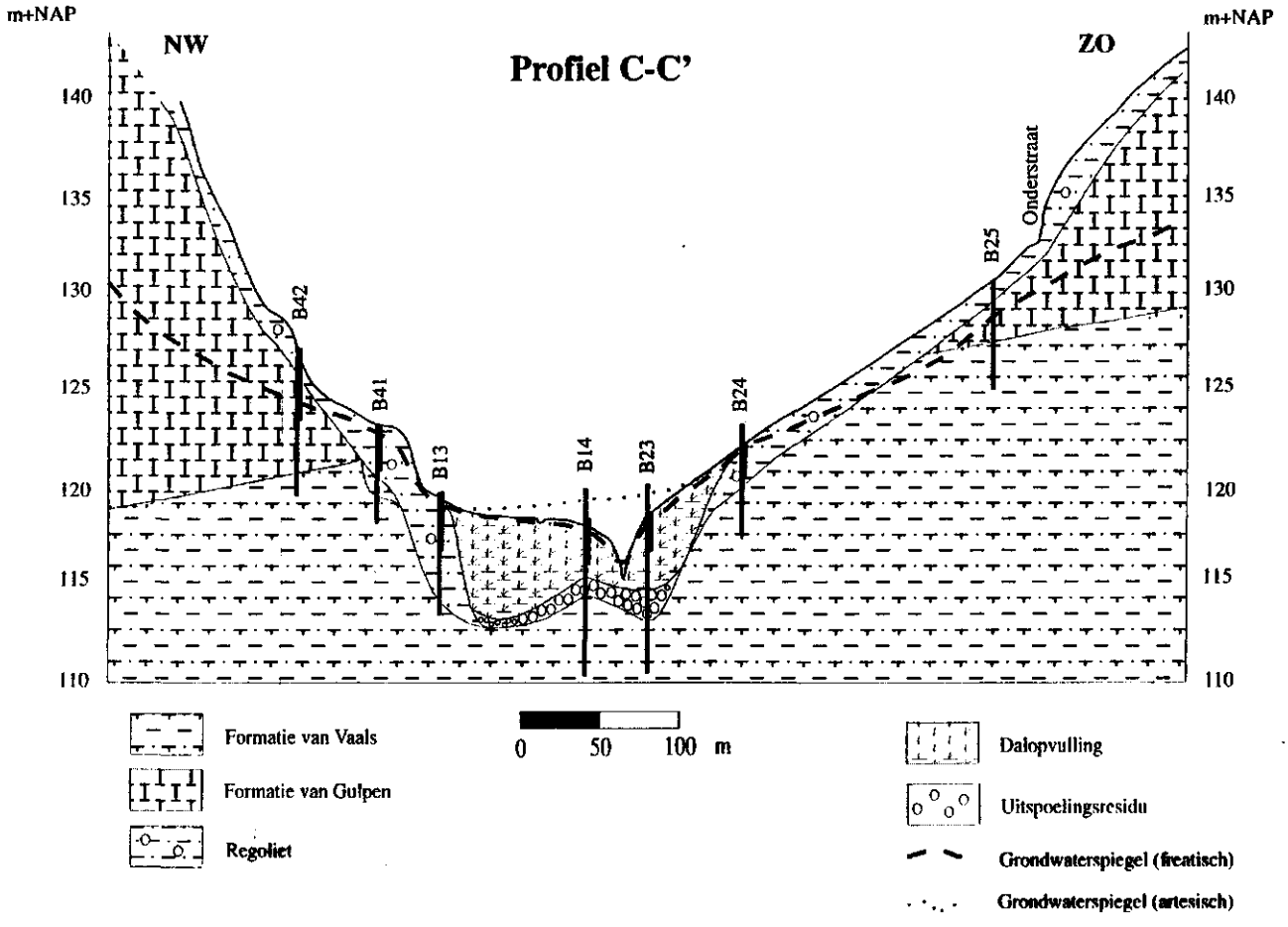


Figuur 2 Geologische lengtedoorsnede van stroomgebied van de Noor die loopt van de Gulp naar de Voer bij 's-Gravenvoeren

Op de Formatie van Vaals komt de kalksteen van de Formatie van Gulpen voor, die eveneens uit het Boven-Krijt dateert. De Formatie van Gulpen is een fijnkorrelige, zwak verkitte kalksteen. Onder de plateaus bedraagt de dikte van de kalksteen 40 à 50 m. In de dalen is dikte geringer en benedenstrooms van Noorbeek is de kalksteen door erosie zelfs verdwenen (figuur 3).

Boven op de Krijt afzettingen liggen aan de rand van het stroomgebied op de plateaus Laat-Tertiaire en Vroeg-Pleistocene grove zanden en grinden, die door de Maas zijn afgezet. Op de zanden en grinden is in het Laat-Pleistoceen löss afgezet. In het zuidoosten worden vanwege de hoogte geen Maasafzettingen meer aangetroffen. Langs de hellingen worden echter geen Maasafzettingen en löss in situ aangetroffen, maar regoliet (hellingafzettingen). De regoliet, dat van Midden-Pleistocene tot Holocene ouderdom is, is slecht gesorteerd en bestaat uit een mengsel van löss, Maasafzettingen en verweringsklei en vuurstenen van de kalksteen. In het dal liggen op de Krijtafzettingen achtereenvolgens een Laat-Pleistoceen uitspoelingsresidu en Holocene beekafzettingen (figuur 3). De beekafzettingen zijn overwegend fijnkorrelig met grindhoudende beekbedafzettingen en ingeschakel-

de veenafzettingen.



Figuur 3 Dwarsdoorsnede door het stroomgebied van de Noor iets bovenstrooms van de Nederlandse-Belgische rijksgrens

Benedenstrooms van de rijksgrens, waar de verlengde Eckleradebreuk dwars op het dal ligt, verandert de geologische opbouw. In het centrum van het dal komt daar onder de dalopvulling de Formatie van Gulpen weer voor. De Formatie van Vaals ligt daar dieper in de ondergrond. Nog verder benedenstrooms ter hoogte van Altembroek komen geen schalies en zandstenen uit het Boven-Carboon meer voor (figuur 2). Deze zijn door erosie verdwenen, hetgeen impliceert dat de Krijtafzettingen direct op de kalksteen uit het Onder-Carboon liggen. De lengtedoorsnede laat zien dat in het zuidwesten bij de uitmonding ook de Formatie van Vaals is verdwenen, waardoor daar de zwak verkitte kalksteen van de Formatie van Gulpen op de sterk verkitte kalksteen uit het Onder-Carboon ligt.

2.3 Hydrogeologie

2.3.1 Algemeen

De oppervlakte-afvoer (overland flow) in het stroomgebied is ten gevolge van de goede infiltratiecapaciteit van de bodems, zeer klein. Slechts een zeer beperkt deel van de neerslag wordt snel afgevoerd (riooloverstort in Noorbeek en wegen). Praktisch alle

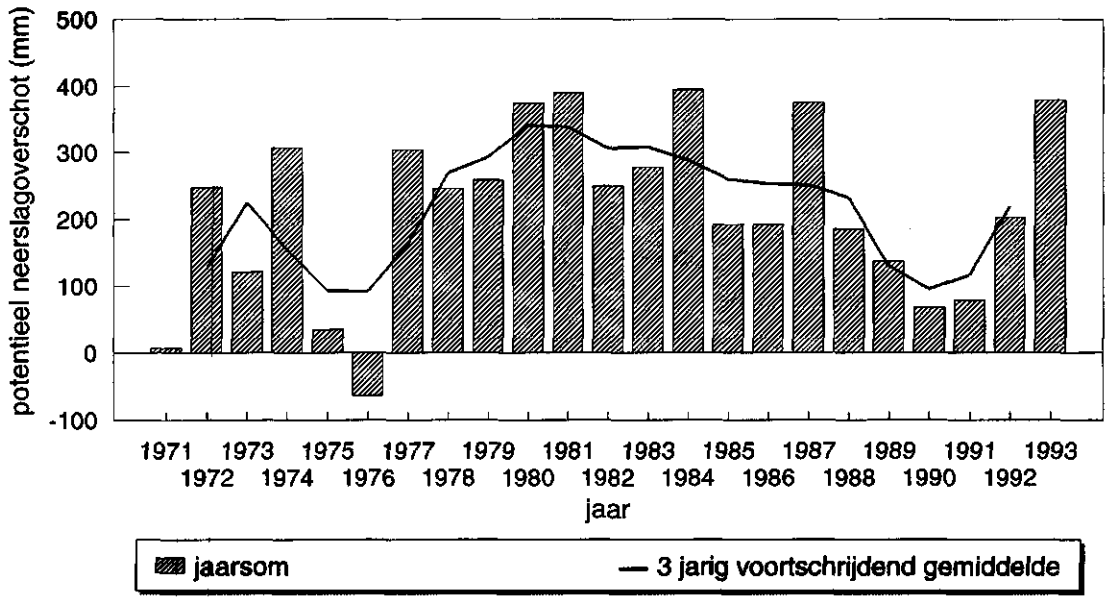
neerslag, die niet verdampt, vult uiteindelijk het grondwater aan. In het grootste gedeelte van het gebied zit het grondwater zeer diep (30 à 40 m). Dit houdt in dat de löss en de Maasafzettingen op de plateaus en de regoliet op de hellingen voldoende doorlatend zijn, waardoor ze in de onverzadigde zone liggen. Ook het grootste gedeelte van de kalksteen van de Formatie van Gulpen ligt nog boven het freatische vlak (figuren 2 en 3). In de verzadigde zone gaat het grondwater in de richting van het Noordal stromen. Dit gebeurt door het onderste gedeelte van de kalksteen en door de Formatie van Vaals. De schalies en zandstenen uit het Boven-Carboon kunnen als ondoorlatende basis worden beschouwd. De Formatie van Gulpen is redelijk doorlatend (onderste gedeelte) tot goed doorlatend (bovenste gedeelte en in de droge dalen). De doorlatendheid van de Formatie van Vaals wisselt sterk. De silthoudende matrix is slechtdoorlatend, terwijl de geulen en de verkitte zandsteenbanken nog een redelijke doorlatendheid hebben. Waarschijnlijk bestaan er hydraulische contacten tussen de geulen en de verkitte zandsteenbanken, waardoor de Formatie van Vaals nog een zeker doorlaatvermogen heeft (kD = 40 m^2/dag, Nota et al., 1987). Het grondwater treedt in het dal op drie verschillende manieren uit, namelijk in de vorm van bronnen aan de onderkant van de steilrand, diffuus naar de oppervlakte door de maar matig doorlatende dalopvulling (drassige kwelstroken langs de Noor) en direct op de Noor. Het water uit de bronnen en van de kwelstroken verenigd zich meestal tot zogenaamde bronbeekjes, die uiteindelijk uitmonden in de Noor. Het grootste gedeelte van de afvoer van de Noor bestaat uit grondwaterafvoer (> 90%).

Het hiervoor beschreven systeem verandert ten westen van de verlengde Eckelradebreuk. Onder de dalopvulling komt daar op de meeste plaatsen de redelijk doorlatende Formatie van Gulpen voor. Dit houdt in dat de Noor plaatselijk niet meer draineert, maar juist water verliest. Bovenstrooms van Altembroek (figuur 1) treedt er netto gezien nog wel drainage op, omdat onder de Formatie van Gulpen de slechterdoorlatende Formatie van Vaals en het ondoorlatende Boven-Carboon nog voorkomen. Ten westen van Altembroek ligt echter de redelijk doorlatende Formatie van Gulpen op de soms goed doorlatende kalksteen uit het Onder-Carboon (doorlatendheid plaatselijk 20 m/dag). In het westen van het gebied wordt geen ondoorlatende basis aangetroffen binnen 500 m, en verliest de Noor water naar de ondergrond.

2.3.2 Grondwateraanvulling

De grondwateraanvulling wordt bepaald door de meteorologische gesteldheid, het bodemgebruik, de bodemgesteldheid en de grondwaterstandsdiepte. Aan de grondwateraanvulling is in dit onderzoek relatief veel aandacht besteed, omdat de invloed van de meteorologische gesteldheid op het hydrogeologische systeem van het Noordal moest worden vergeleken met het effect van waterwinning. De grondwateraanvulling voor de periode 1990-1994 is uiteindelijk bepaald met de neerslag van het station Bergenhuizen (R6, bijlage I) en de openwater- of referentieverdamping van Beek (L). Voor de langere periode van 1971-1994 is voor de neerslag gebruik gemaakt van de cijfers van district 15, Zuid-Limburg (KNMI, 1971-1994).

Voordat de grondwateraanvulling wordt bepaald, wordt het potentieel neerslagoverschot (neerslag - potentiële verdamping) berekend. De potentiële verdamping is via gewasfactoren (Feddes, 1987) berekend uit de openwater- of referentieverdamping. Het potentieel neerslagoverschot is alleen afhankelijk van de meteorologische gesteldheid en het bodemgebruik. In figuur 4 wordt het potentieel overschot gegeven voor grasland.



Figuur 4 Het potentieel neerslagoverschot voor grasland in district 15 (Zuid-Limburg)

In figuur 4 is behalve de jaarsom ook het 3-jarig voortschrijdend gemiddelde gegeven. Het verschil tussen de extreme jaren 1976 en 1984 bedraagt liefst 500 mm. Uit het voortschrijdend gemiddelde valt af te leiden dat de tachtiger jaren relatief nat zijn geweest en dat het midden van de zeventiger jaren en het begin van de negentiger jaren droog zijn geweest.

Uit het potentieel neerslagoverschot kan de grondwateraanvulling worden berekend als de beschikbare hoeveelheid bodemvocht bekend is. Uitgaande van een beschikbare hoeveelheid bodemvocht van 100 mm, varieerde de grondwateraanvulling voor grasland in de periode 1971-1994 tussen ongeveer 130 mm/jaar (1976) en 450 mm/jaar (1993). In hoofdstuk 3.3.2 zal nader worden teruggekomen op de grondwateraanvulling, zoals die in het model is ingevoerd.

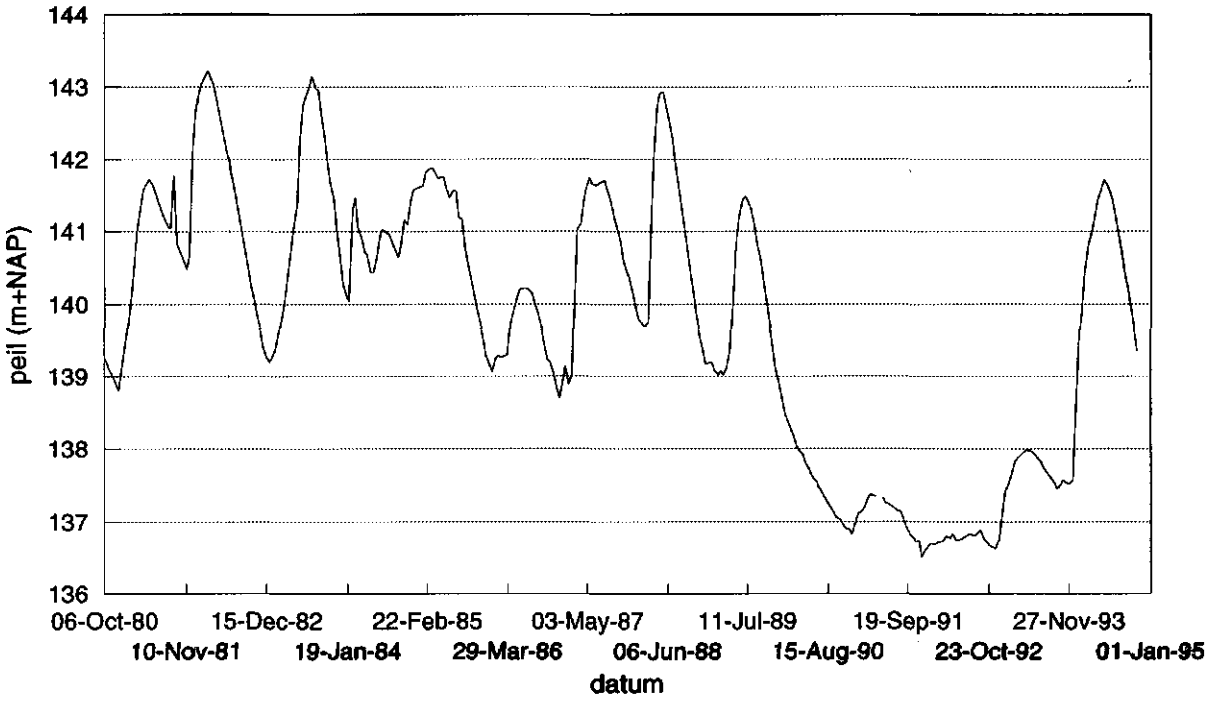
2.3.3 Grondwater

De stijghoogten van het grondwater variëren in het stroomgebied van de Noor van 180 m +N.A.P. in het zuidoosten bij de Planck tot iets meer dan 90 m +N.A.P. in het westen (figuur 10). Het grondwater in het stroomgebied stroomt globaal gesproken in (noord)westelijk richting. Alleen in de omgeving van het natte dal van de Noor treden ten gevolge van de drainage afwijkingen in de richting op. De grondwatergradiënten zijn vrij groot, namelijk ongeveer 0.025 m/m in het oosten op de hellingen, tot 0.15 m/m plaatselijk in het natte dal.

Wat betreft het verloop van de stijghoogten van het grondwater in het stroomgebied moet onderscheid worden gemaakt tussen twee gebieden, namelijk het plateau en het natte dal van de Noor.

Stijghoogten onder het plateau

De grondwaterstandsdiepte op de plateaus is groot, zodat maar weinig waarnemingspunten voorhanden zijn in het stroomgebied. Daarom zijn ook waarnemingspunten in de directe omgeving van het stroomgebied in de beschouwing betrokken (bijlage I). In figuur 5 wordt geïllustreerd hoe het stijghoogteverloop er onder de plateaus uitziet.



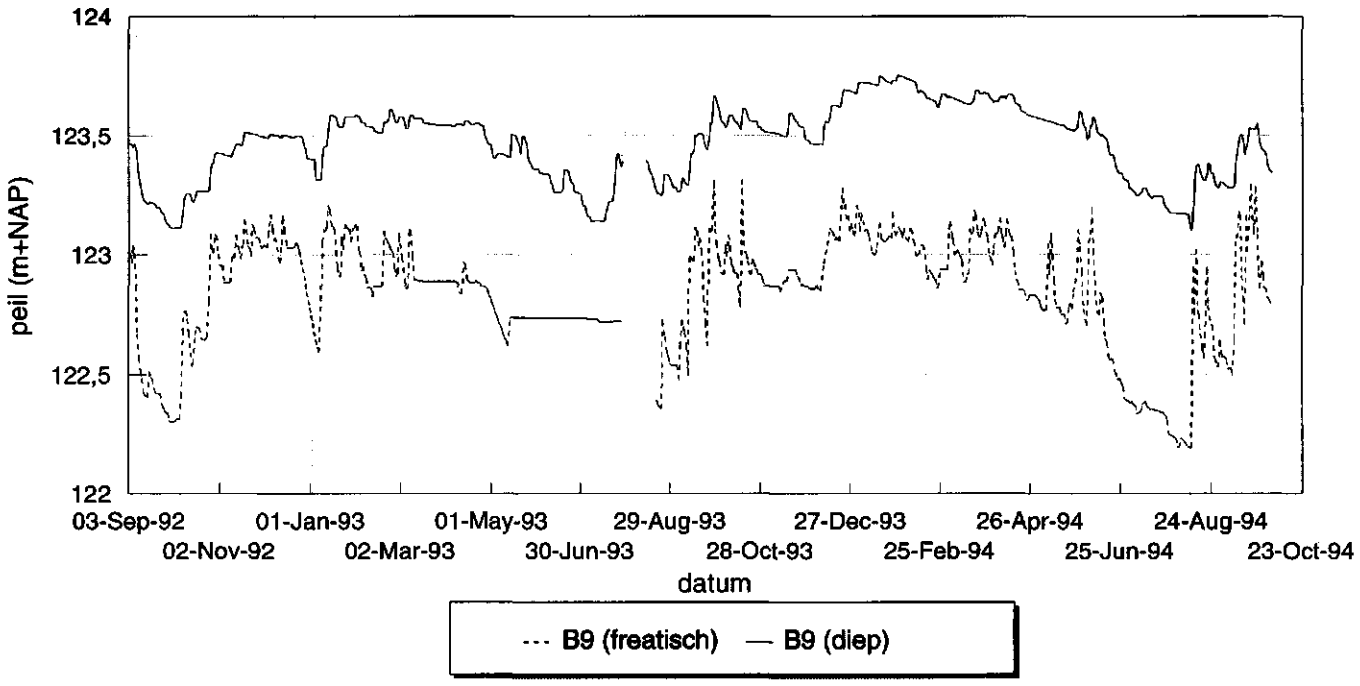
Figuur 5 Het verloop van de stijghoogte van freatische grondwater onder het plateau in waarnemingspunt WP98 (maaiveldshoogte: ca. 170 m +N.A.P.)

Alle waarnemingspunten op het plateau vertonen een uitgesproken seizoensfluctuatie (soms meer dan 3 meter). Als de amplitude van de fluctuatie wordt vergeleken met de grondwateraanvulling is duidelijk dat de grondwaterstanden onder het plateau reageren op relatief natte en droge jaren, en niet op een enkelvoudige bui. Als de stijghoogte bij de peilputten wordt vergeleken met het potentieel neerslagoverschot (figuur 4) blijkt dat de overeenkomst groot is. De terugval in de nuttige neerslag na 1988 levert een sterke daling van de stijghoogten onder het plateau. Er is ook bij alle putten sprake van het ontbreken van een duidelijke seizoensfluctuatie in die periode. De ommekeer in het jaar 1993-1994 is fors te noemen (meer dan 450 mm grondwateraanvulling voor gebieden met een bodemvochtvoorraad van 100 millimeter). Alle putten stijgen weer meters.

Stijghoogten in het natte dal

De stijghoogten van het grondwater in het natte dal wordt in een aantal raaien loodrecht op de Noor gemeten (bijlage II). Het verloop van de stijghoogten in het dal verschilt zeer sterk van het verloop onder de plateaus, ondanks dat ze interactief verbonden zijn. In het dal moet onderscheid worden gemaakt tussen de stijghoogten van het freatische grondwater (grondwater in de dalopvulling) en de stijghoogten van het diepe grondwater (grondwater in de Formatie van Vaals), dat getypeerd moet worden als spanningswater. Plaatselijk is het diepe grondwater zelfs artesisch. In figuur 6 wordt aangegeven hoe het stijghoogteverloop in het dal er uit kan zien. De stijghoogte van het

diepe grondwater ligt permanent hoger dan de stijghoogte van het freatische grondwater, hetgeen continu kwel veroorzaakt. De stijghoogte van het diepe grondwater ligt soms



Figuur 6 Het verloop van de stijghoogte van freatische grondwater en het diepe grondwater in het natte dal in waarnemingspunt B9

zelfs boven het maaiveld (maaiveldshoogte 123.4 m +N.A.P.). De stijghoogte van het ondiepe grondwater in het dal fluctueert veel meer dan het diepe grondwater. De fluctuatie staat echter in geen enkele verhouding tot de fluctuatie van de grondwaterstand onder de plateaus (figuur 5). In het dal is wel duidelijk het effect van enkelvoudige regenbuien te zien. Hetzelfde geldt voor het effect van enkele droge zomermaanden (juni-juli 1994). Daarentegen is de jaarlijkse en meerjaarlijkse amplitude van de stijghoogten in het dal veel geringer dan onder de plateaus.

Het verloop van de stijghoogte in waarnemingspunt B9 is een voorbeeld van een relatief drogere plek in het natte dal. De stijghoogten op natte lokaties vertonen door de kwel en de oppervlakte-afvoer een veel geringere fluctuatie. Aan de randen van het natte dal treedt niet meer continu kwel op. In neerslagrijke perioden kan daar de kwel omslaan naar wegzijging.

Chemische samenstelling van het grondwater

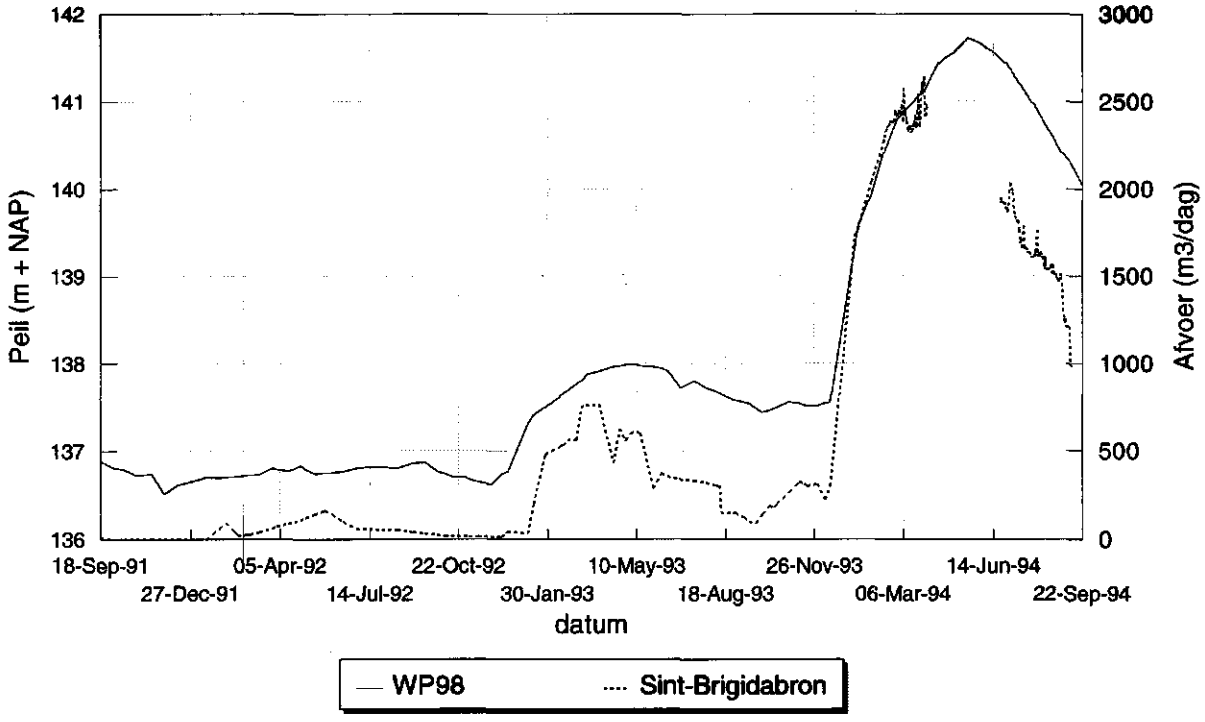
In he grondwater zijn vanwege de grondwaterstroming door de kalksteen Ca^{2+} en HCO_3^- de belangrijkste ionen met een gemiddelde concentratie van 120 en 323 mg/l. Ook SiO_2 en SO_4^{2-} komen in redelijke hoeveelheden voor (respectievelijk 39 en 51 mg/l). De gemiddelde NO_3^- concentratie bedraagt 13.2 mg/l, maar varieert sterk (minimum: 0, maximum: 131, 25 percentiel: 0 en 75 percentiel: 25 mg/l). Uit de analyses blijkt dat het grondwater buiten het dal meer is verontreinigd dan in het natte dal.

2.3.4 Oppervlaktewater

De afvoer van het oppervlaktewater wordt op drie plaatsen in het lengteprofiel van de Noor continu gemeten. Daarvan zijn de meetstuwen NA (30 m benedenstrooms van de Sint-Brigidabron) en M6 (Altembroek) de belangrijkste punten. Meetstuw M6 ligt ongeveer op de lokatie waar benedenstrooms de Noor water verliest ten gevolge van de geologische opbouw. Naast meetstuwen in de Noor zelf, wordt ook nog op een aantal plaatsen de afvoer van de bronbeken gemeten (bijvoorbeeld NB, NC en NG). In bijlage II worden de lokaties van de meetstuwen gegeven.

Afvoer van de Sint-Brigidabron

De afvoer van de Sint-Brigidabron werd tot 1994, voor zover dat deze watervoerend was, maandelijks gemeten bij de meetstuw NA. Daarna is overgegaan tot continue registratie. Het verloop van de afvoer van de Sint-Brigidabron is gegeven in figuur 7. In de figuur is ook het verloop van de stijghoogte onder het plateau aangegeven.



Figuur 7 Het verloop van de afvoer van de Sint-Brigidabron en van de stijghoogte van het grondwater onder het plateau in peilput WP98

Ofschoon de meetreeks nog steeds een relatief korte periode omvat kan worden gesteld dat de bronafvoer een seizoenfluctuatie vertoont. Zeer opvallend is het geringe debiet in 1992 (gemiddeld nauwelijks 100 m^3/dag); de bron viel zelfs af en toe droog. Ook in 1991 is de bron drooggevallen. De grondwateraanvulling nam in 1993 toe, wat terug te zien is in het debiet van deze bron. Het debiet nam in december 1993 zeer snel toe tot maximaal 2500 m^3/dag om vervolgens gedurende de zomer van 1994 weer te dalen naar 1000 m^3/dag. De bron voornamelijk gevoed wordt met grondwater van het plateau en

vertoont praktisch geen reactie op regenbuien. Wanneer de variatie in de grondwaterstanden onder het plateau vergeleken wordt met de afvoer van de Sint-Brigidabron, dan valt op dat de gelijkenis treffend is. Er bestaat blijkbaar een drempelwaarde voor het grondwaterpeil onder het plateau waaronder de bron niet meer wordt gevoed. De gradiënt van het freatisch vlak wordt dan kennelijk te klein. Als de drempel in positieve zin wordt overschreden komt de afvoer van de Sint-Brigidabron weer op gang. Een stijging van de grondwaterspiegel van meerdere meters ter hoogte van WP98 levert dan onmiddellijk een zeer sterke toename van de afvoer op.

Afvoer van de Noor

De dagafvoer van de Noor, die bij het meetpunt Altembroek (M6) wordt gemeten, staat vermeld in figuur 12. Van de periode 26 januari 1994 tot en met 8 april 1994 is de continue registratie onbetrouwbaar, als gevolg van een storing in de peilrecorder. Deze metingen zijn, om het beeld niet te vertroebelen, dan ook weggelaten. Er zijn evenwel enige handwaarnemingen beschikbaar. In de figuur staan deze handwaarnemingen aangegeven met een plusteken.

De afvoer van de Noor wordt gekenmerkt door een basisafvoer van zo'n 2500 tot 4000 m^3/dag tijdens de periode mei 1992 tot december 1993. Daarna neemt het debiet ten gevolge van de grote grondwateraanvulling toe tot zo'n 7500 m^3/dag. In het zomerhalfjaar van 1994 is het debiet weer gedaald tot ongeveer 5000 m^3/dag. In tabel 1 staat de gemeten afvoer voor enkele hydrologische jaren gegeven.

Tabel 1 De afvoer van de Noor ter hoogte van de Molenhoeve voor de periode 1992-1994

PERIODE	Afvoer meetpunt M6 (Molenhoeve)	
	Totaal m^3	m^3/dag
1 april 1992 t/m 31 maart 1993	$1,04 * 10^6$	2840
1 april 1993 t/m 31 maart 1994	$1,56 * 10^6$	4250
1 april 1992 t/m 31 maart 1994	$2,60 * 10^6$	3545

Verdeling oppervlaktewater-afvoer in het Noordal

De oppervlaktewater-afvoer van de Noor bestaat praktisch volledig uit bronafvoer en grondwater dat direct de Noor voedt (beekafvoer). Bij de bronafvoer kan nog onderscheid worden gemaakt tussen bronnen aan de zuidkant van de Noor en bronnen aan de noordkant. Ten gevolge van de geologische opbouw van het stroomgebied en de ligging van het stroomgebied ten opzichte van de grondwaterwinningen is het zeer waarschijnlijk dat de bronafvoer en de beekafvoer niet in dezelfde mate wordt beïnvloed. In tabel 2 wordt een overzicht gegeven van de bijdrage van de verschillende componenten aan de oppervlaktewater-afvoer bij het meetpunt Molenhoeve bij Altembroek (M6). In de tabel is de bijdrage van de Sint-Brigidabron afzonderlijk opgenomen.

Tabel 2 Bijdrage van de bronafvoer en de beekafvoer aan de totale afvoer van de Noor op 1 april 1994

Component	Debiet (m^3/dag)	Relatief aandeel (%)
Sint-Brigidabron	2480	32
bronnen noordkant	1085	14
bronnen zuidkant	1122	14
beekafvoer[1)]	3133[2)]	40[2)]
Noor (M6)	7820	100

1) beekafvoer omvat ook de afvoer van kleine, onbemeten bronnetjes
2) verschil tussen afvoer van de Noor (M6) en de totale bronafvoer.

Het procentuele aandeel van de bronafvoer en beekafvoer van ongeveer 60 en 40% (tabel 2) wordt bevestigd door eerdere metingen in 1992 en 1993 (tabel 3).

Tabel 3 Bijdrage van de bronafvoer en de beekafvoer aan de totale afvoer van de Noor in 1992 en 1993

Component	27 februari 1992		3 november 1994	
	Debiet (m^3/d)	Aandeel (%)	Debiet (m^3/d)	Aandeel (%)
Sint-Brigidabron	26	1	285	10
bronnen noordkant	640	24	640	22
bronnen zuidkant	870	32	812	28
beekafvoer[1)]	1151[2)]	43[2)]	1174[2)]	40[2)]
Noor (M6)	2687	100	2911	100

1) beekafvoer omvat ook de afvoer van kleine, onbemeten bronnetjes
2) verschil tussen afvoer van de Noor (M6) en de totale bronafvoer.

De verhouding tussen bronafvoer en beekafvoer wordt dus nauwelijks beïnvloed door de debiettoename in het winterhalfjaar 1993/1994. Wel verandert de bijdrage van de Sint-Brigidabron duidelijk. Ook was de verdeling van de afvoer over de bronnen aan de noordkant en de zuidkant in deze jaren niet gelijk zoals in 1994. De bronnen aan de zuidkant namen meer afvoer voor hun rekening dan de bronnen aan de noordkant.

Chemische samenstelling van het oppervlaktewater

De chemische samenstelling van het oppervlaktewater is uiteraard een afspiegeling

van die van het grondwater, omdat de Noor primair een grondwater gevoed systeem is. Het oppervlaktewater behoort duidelijk tot het $Ca(HCO_3)_2$ type. De chemische samenstelling van het oppervlaktewater kent een geringere spreiding dan het grondwater. Het nitraatgehalte van het oppervlaktewater (gemiddeld 44 mg/l) is beduidend hoger dan van het grondwater. Veel van de bronnen, inclusief de Sint-Brigidabron, hebben een NO_3^- concentratie van boven de 50 mg/l. Het NO_3^- van de Noor neemt af in benedenstroomse richting. Bij de uitmonding lag de gemiddelde concentratie in 1991-1994 beneden de 40 mg/l.

3. Grondwaterstromingsmodel

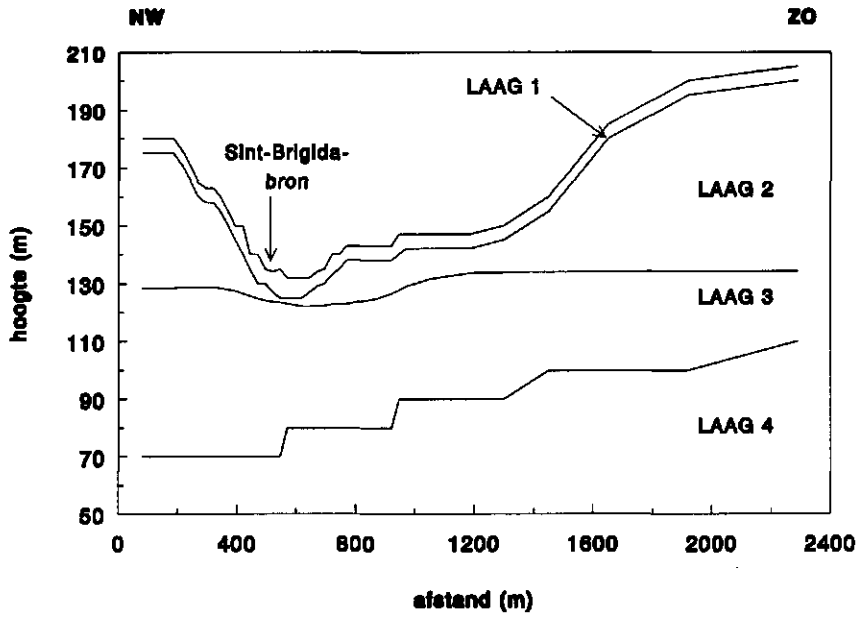
3.1. Model MODFLOW

De computercode MODFLOW is in dit onderzoek gebruikt om een verzadigd grondwaterstromingsmodel te bouwen van het stroomgebied van de Noor. Het model zal worden gebruikt om de effecten van verschillende waterwinningsvarianten te simuleren. In dit hoofdstuk zal allereerst een korte beschrijving van het model worden gegeven, waarna de belangrijkste invoergegevens worden behandeld. Tenslotte zal nader worden ingegaan op hoe het model de in 1992-1994 opgetreden hydrologische situatie heeft gesimuleerd.

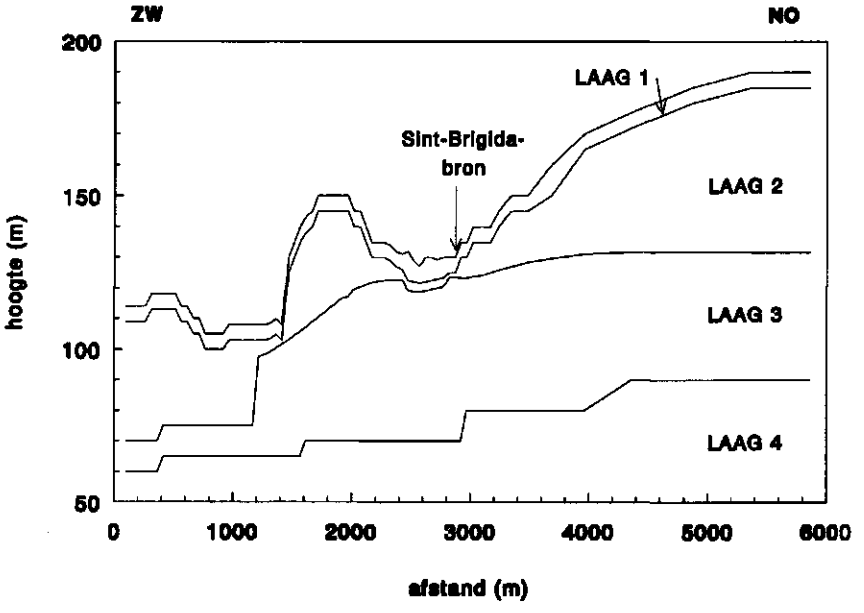
3.1.1 Beschrijving

Met MODFLOW (McDonald & Harbaugh, 1988) is een verzadigd grondwaterstromingsmodel ontwikkeld dat de drie-dimensionale grondwaterstroming zowel stationair als niet-stationair beschrijft in het stroomgebied van de Noor (Kroon & Weerts, 1995). Aan het basispakket zijn deelmodellen toegevoegd, die de grondwateraanvulling regelen, de bronafvoer en de beekafvoer simuleren. In MODFLOW wordt de differentiaalvergelijking, die de verzadigde grondwaterstroming beschrijft, numeriek opgelost met behulp van de eindige differentie methode. Hiertoe wordt het stroomgebied onderverdeeld in rechthoekige cellen. In het kaartvlak moet worden aangegeven hoeveel kolommen en rijen worden onderscheiden. Voor dit onderzoek is het stroomgebied onderverdeeld in 71 kolommen en 47 rijen (zie bijlage III). De kolommen en rijen mogen in breedte c.q. hoogte verschillen. Van deze optie is gebruik gemaakt om kleine cellen te krijgen ter plaatse van het natte dal. De kleinste cellen zijn 50 * 25 m en de grootste 500 * 500 m. In totaal zijn 3337 cellen onderscheiden. Het rechthoekige modelgebied meet 5680 * 4290 m. Overigens is niet het gehele modelgebied actief, met andere woorden dit deel van het modelgebied doet niet mee in de berekeningen. De grens van het actieve modelgebied is gelegd ter plaatse van de topografische waterscheiding (figuur 1 en bijlage III). Het actieve modelgebied beslaat een oppervlakte van 1073 ha en heeft 2592 cellen.

Behalve een schematisering in het kaartvlak, moet in het verticale vlak ook worden geschematiseerd. Met andere woorden hoeveel cellen moeten worden onderscheiden. In dit gebied zijn 4 cellen, dus 4 lagen, onderscheiden. In figuur 8 wordt voor een dwarsdoorsnede over de Sint-Brigidabron aangegeven hoe de laagindeling er uitziet. Hetzelfde is in figuur 9 gedaan voor een lengtedoorsnede over de Sint-Brigidabron. Voor elke laag moet de hoogte van de bovenkant worden opgegeven en wordt de hoogte van de onderkant berekend aan de hand van de hoogte van de daaronderliggende laag. Met deze gegevens berekend MODFLOW de dikte van de lagen. De onderscheiden lagen vallen bij benadering samen met de geologische lagen (hoofdstuk 2.2). Zo stelt in de dwarsdoorsnede (figuur 8) laag 1 op de hellingen de regoliet voor. In het natte beekdal vertegenwoordigt laag 1 de dalopvulling. Laag 2 representeert de kalksteen van de Formatie van Gulpen. Omdat deze kalksteen in het beekdal door erosie verdwenen is, worden daar aan laag 2 de hydraulische eigenschappen van de Formatie van Vaals toegekend. Laag 3 stelt de Formatie van Vaals voor. Dit impliceert dat in het natte beekdal zowel laag 2 als laag 3 de Formatie van Vaals vormen. Laag 4 vertegenwoordigt in de dwarsdoorsnede het Boven-Carboon, dat uit ondoorlatende schalies en zandstenen bestaat.



Figuur 8 **Geschematiseerde dwarsdoorsnede over de Sint-Brigidabron**



Figuur 9 Geschematiseerde lengtedoorsnede over de Sint-Brigidabron

In de lengtedoorsnede (figuur 9) vertegenwoordigen tot ongeveer 1200 à 1400 m van de uitmonding van de Noor, de lagen dezelfde geologische lagen als hiervoor behandeld bij de dwarsdoorsnede. Benedenstrooms van dit punt wordt de kalksteen van de Formatie van Gulpen (laag 2) dikker en ligt de dalopvulling (laag 1) op deze kalksteen en komt de Formatie van Vaals niet meer in de ondergrond voor. Dus laag 2 en 3 wordt daar ingenomen door de kalksteen van de Formatie van Gulpen Ook laag 4 heeft in het benedenstroomse gedeelte van de Noor een ander karakter. De ondoorlatende schalies uit het Boven-Carboon zijn door erosie verdwenen. In plaats daarvan wordt de doorlatende,

verkarste kalksteen uit het Onder-Carboon aangetroffen (hoofdstuk 2.2). Voor dit gebied is arbitrair gesteld dat de ondoorlatende basis op 500 m -N.A.P voorkomt. De simulatie van de verzadigde grondwaterstroming in dit gebied is slechts indicatief omdat de geologische opbouw slechts globaal bekend is.

Niet alle lagen in het modelgebied zijn overal en altijd verzadigd. De regoliet (laag 1) is vrijwel altijd onverzadigd. Datzelfde geldt op de hellingen ook voor het grootste gedeelte van de Formatie van Gulpen (laag 2). In het westen van het stroomgebied is zelfs in het dal de dalopvulling (laag 1) en het bovenste gedeelte van de Formatie van Gulpen (laag 2) onverzadigd (figuur 2).

Aan de randen van het model moeten, zoals al eerder is gesteld, randvoorwaarden worden opgegeven. Het modelgebied is zodanig gekozen dat het samenvalt met de topografische waterscheiding, waarvan wordt aangenomen wordt dat deze ook samenvalt met de hydrologische waterscheiding. Het feit dat de modelgrenzen samenvallen met waterscheidingen impliceert dat met ondoorlatende zijranden (flux=0 rand) kan worden gerekend. In het westen van het modelgebied, waar laag 4 de Onder-Carboon kalksteen voorstelt, kan deze randvoorwaarde echter niet worden gebruikt. In deze kalksteen treedt waarschijnlijk een westelijk gerichte grondwaterstroming op. In dit gebied zijn voor laag 4 de ondoorlatende zijranden vervangen door randen met vaste stijghoogten en wel zodanig dat het grondwater in westelijke richting stroomt.

3.1.2 Invoergegevens

De invoergegevens worden vaak onderverdeeld in tijdsonafhankelijke en tijdsafhankelijke gegevens.

Tijdsonafhankelijke gegevens

De tijdonafhankelijke gegevens omvatten de permeabiliteit, de porositeit en de eigenschappen van het oppervlaktewaterstelsel. Deze gegevens zijn afgeleid uit metingen en schattingen, waarna sommige gegevens verder zijn verfijnd door modelcalibratie.

Permeabiliteit en porositeit

De permeabiliteits- en porositeitsgegevens die voor de simulatie van de grondwaterstroming met MODFLOW zijn gebruikt, staat gegeven in tabel 4. Belangrijk voor de simulatie van de verzadigde grondwaterstroming in het stroomgebied zijn met name de **permeabiliteits**gegevens van de Formaties van Gulpen en Vaals en van de dalopvulling. De range in de doorlaatfaktor die voor de Formatie van Gulpen wordt gegeven, is ontleend aan Nota et al. (1987). De laagste waarde van 2.5 m/dag is toegekend aan het onderste, verzadigde gedeelte van de kalksteen, op plaatsen waar de formatie nog dik is en het grondwater diep zit (boven op helling en plateaus). Deze waarde is ook toegekend aan het gebied in het westen van het stroomgebied waar de Formatie van Gulpen voorkomt op de Onder-Carboon kalksteen. De hoogste waarde van 10 m/dag is ingevoerd voor cellen waar het grondwater door het bovenste gedeelte van de kalksteen stroomt. Dit is op plaatsen waar de kalksteen dun is (< 10 m, onder aan de helling). De hoge waarden zijn ook toegekend aan de kalksteen, die voorkomt in de droge dalen (extra diaklazen). In het overgangsgebied tussen de lage en hoge permeabiliteit is een zone gedefinieerd met een doorlaatfaktor van 5 m/dag. Aan de Formatie van Vaals is in grote

delen van het gebied een relatief hoge permeabiliteit van 1.5 m/dag toegekend. Dit is grotendeels gebeurd op grond van modelcalibratie. Door de grote heterogeniteit en anisotropie van de Formatie van Vaals (hoofdstuk 2.2) is het moeilijk één doorlaatfaktor voor de formatie aan te geven. Uit het gemiddeld doorlaatvermogen (inclusief zandsteenbankjes) kan rekening houdend met de dikte van de formatie een zogenaamde "effectieve" doorlaatfaktor worden berekend van ruim 1 m/dag.

Tabel 4 Permeabiliteit en porositeit van de afzettingen of formaties in het stroomgebied van de Noor zoals gebruikt met MODFLOW

Afzetting/Formatie	Permeabiliteit horizontaal k_h (m/dag)	Permeabiliteit verticaal k_v (m/dag)	Porositeit[1)] (-)
Formatie van Gulpen	2.5-10	2.5	0.04-0.1
Formatie van Vaals	1.5	1	2.10^{-4}
Boven-Carboon schalies	10^{-4}	10^{-6}	10^{-5}
Onder-Carboon kalksteen	20	20	10^{-5}
dalopvulling	1	1	0.02
regoliet	2	1	0.02

[1)] specifieke porositeit voor de dalopvulling, de regoliet en de Formatie van Gulpen en de elastische bergingscoëfficiënt voor de lagen met spanningswater (de Formatie van Vaals en de onderliggende lagen)

Voor de verticale doorlaatfaktor k_v is aangenomen dat deze gelijk of lager is dan de horizontale doorlaatfaktor (tabel 4).

De verlengde Eckelradebreuk is in het model geïntroduceerd door in laag 2 en 3 de permeabiliteit te verlagen. De breuk ligt in het model iets ten westen van de rijksgrens. De horizontale permeabiliteit in de breukzone is over het algemeen op 0.1 m/dag.

De **porositeit** (tabel 4), die de grondwaterberging bepaalt, speelt uiteraard alleen maar een rol voor de simulatie van de niet-stationaire conditie. Voor de simulatie van de grondwaterstroming in het stroomgebied van de Noor is de grootte van de effectieve porositeit van de Formatie van Gulpen het belangrijkst. Aanvankelijk was gekozen voor één waarde voor de effectieve porositeit voor de kalksteen. Op grond van modelcalibratie is deze verder verfijnd. In het oosten en zuiden van het gebied heeft de kalksteen uiteindelijk een effectieve porositeit gekregen van 0.10, terwijl in het noorden met een lagere waarde moest worden volstaan, namelijk 0.05. In het centrale gedeelte van het modelgebied en in het westen is voor de kalksteen een waarde van 0.04 ingevoerd.

Eigenschappen van het oppervlaktewater-stelsel

Wat betreft de afvoer van grondwater naar het oppervlaktewater-stelsel wordt er in het model onderscheid gemaakt tussen de afvoer naar de Noor (beekafvoer) en de afvoer naar

bronnen en greppels (bronafvoer).

De tijdonafhankelijke gegevens die voor de Noor moesten worden ingevoerd, omvatten: de cellen waar de beek loopt, en vervolgens voor elke beekcel de beekbodemhoogte en de beekgeleidbaarheid. In bijlage III wordt aangegeven waar de geschematiseerde Noorbeek loopt. De beekgeleidbaarheid is in de beekcellen waar drainage naar de beek optreedt, op 100 m^2/dag gesteld, hetgeen bij de gekozen celgrootte uitkomt op een beekweerstand van 0.5 dag. In de beekcellen waar infiltratie van oppervlaktewater optreedt (ten westen van Altembroek), is de geleidbaarheid op 1 m^2/dag gesteld. Dit impliceert een vrij grote beekweerstand van 50 dagen.

Voor de bronafvoer moeten de cellen waar bronnen en greppels voorkomen, worden aangegeven. Vervolgens moet voor elk van die cellen de hoogte en de geleidbaarheid van de bronnen of greppels. De geleidbaarheid van de bronnen en greppels is op 250 m^2/dag gesteld. Dit houdt in dat de drainageweerstand zeer klein is, namelijk 5 dagen.

Tijdsafhankelijke invoergegevens

Met MODFLOW is de grondwaterstroming in de periode januari 1990 tot oktober 1994 gesimuleerd. De invoer gebeurt voor tijdstappen met een lengte van 10 dagen. Voor deze tijdstaplengte is gekozen vanwege de beschikbare meteorologische gegevens. Overigens deelt MODFLOW de tijdstappen weer op kleinere stappen (lengte: 1 dag voor het onderzoek in het Noordal). Dit impliceert dat de rekenperiode is verdeeld in 173 tijdstappen en 1730 stappen. In dit onderzoek is aangenomen dat alleen de grondwateraanvulling tijdsafhankelijk is. De randstijghoogten (laag 4 in het westen) en de beekpeilen worden verondersteld niet te veranderen gedurende de rekenperiode.

Grondwateraanvulling

De grondwateraanvulling moet per tijdstap voor elke bovenste, actieve cel in het kaartvlak in het model worden ingevoerd. Bij de berekening van de grootte van de grondwateraanvulling moet allereerst verschil worden gemaakt tussen het beekdal met ondiepe grondwaterstanden en het overige gebied met matig diepe en diepe grondwaterstanden. In het beekdal treedt behalve toevoer van nuttige neerslag naar de verzadigde zone (grondwateraanvulling positief) ook afvoer van grondwater op naar de plantenwortels gedurende droge perioden (capillaire opstijging, grondwateraanvulling negatief).

In het **natte beekdal** (ca. 2% van oppervlakte) komen gras en bos voor. Voor deze gewassen is voor elke tijdstap het potentieel neerslagoverschot (hoofdstuk 2.3.1) berekend, waarbij rekening is gehouden met verschillende gewasfaktoren *f* (Feddes, 1987). Voor de cellen in het natte beekdal is aangenomen dat de grondwateraanvulling gelijk is aan het potentieel neerslagoverschot. Dit houdt in dat aangenomen wordt dat de verdamping altijd potentieel is en dat geen bergingsveranderingen in de dunne onverzadigde zone optreden. In bijlage IV wordt de aldus berekende grondwateraanvulling voor grasland en bos gegeven. De berekende grondwateraanvulling varieert van ongeveer -40 mm/10 dagen (zomers van 1990 en 1991) tot ca. 80 mm/10 dagen (natte najaar van 1993). In tabel 5 staat de berekende grondwateraanvulling per hydrologisch halfjaar voor de verschillende combinaties bodemgebruik en grondwaterstandsdiepte gegeven.

Tabel 5 Berekende grondwateraanvulling (mm) voor de verschillende combinaties bodemgebruik en grondwaterstandsdiepte

Bodemgebruik/ grondwaterstands-diepte	1990[1]		1991		1992		1993		1994	Totaal
	z[2]	w	z	w	z	w	z	w	z	
gras-ondiep	-145	205	-137	253	-50	227	21	360	-105	630
gras-matig diep	0	210	0	203	2	223	64	377	58	1137
gras-diep	97	185	24	156	49	188	40	365	83	1187
akkerbouw-matig diep	0	104	0	144	2	222	47	351	6	875
akkerbouw-diep	26	96	7	119	27	217	14	344	51	904
bos-ondiep	-204	183	-204	231	-111	208	-29	340	-153	261
bos-matig diep	0	63	0	82	2	123	5	296	12	583
bos-diep	32	39	24	35	49	87	40	225	83	615

[1] hydrologisch jaar
[2] z: zomerhalfjaar (april t/m september), en w: winterhalfjaar (oktober t/m maart)

Uit de tabel kan worden afgeleid dat de gemiddelde aanvulling voor bos en gras 104 en 131 mm/jaar bedraagt voor de hydrologische jaren 1990-1994.

De grondwateraanvulling in **gebieden met matig diepe en diepe grondwaterstanden** is berekend met een eenvoudig niet-stationair waterbalansmodel (Van Lanen et al., 1995). De gebieden met matig diepe en diepe grondwaterstanden nemen ca. 5% en 93% van de oppervlakte van het modelgebied in. Voor de berekening van de grondwateraanvulling voor percelen met akkerbouw is gekozen voor het gewas maïs. De gewasfaktoren f voor het gras, de maïs en bos zijn ontleend aan Feddes (1987). Voor de cellen met akkerbouw is voor het winterhalfjaar uitgegaan van een bedekking met groenbemester ($f = 0.8$). De beschikbare hoeveelheid bodemvocht voor deze gewassen op de in het Noordal voorkomende bodems is respectievelijk op 75, 250 en 175 mm gesteld. In bijlage IV wordt ter illustratie de berekende grondwateraanvulling gegeven voor grasland. De grotere vertraging van de grondwateraanvulling bij de zeer diepe grondwaterstanden is duidelijk te zien. Op grond van het stijghoogteverloop van de waarnemingspunten met diepe grondwaterstanden en modelcalibratie is gekozen voor een vertraging van 4 dagen voor de cellen met matig diepe grondwaterstanden, en een vertraging van 70 dagen voor die met diepe grondwaterstanden. Van de optie om de grondwateraanvulling af te vlakken (Van Lanen et al., 1995) is geen gebruik gemaakt na vergelijking van gesimuleerde en waargenomen stijghoogten.

De berekende grondwateraanvulling per hydrologische halfjaar staat in tabel 5 voor de verschillende combinaties bodemgebruik en grondwaterstandsdiepte gegeven. Allereerst valt op dat de grondwateraanvulling in gebieden met diepe grondwaterstanden beduidend groter is dan in het natte beekdal. Bij eenzelfde grondwaterstandsdiepte neemt de berekende grondwateraanvulling in grootte af in de volgorde grasland, akkerbouw en bos. Op jaarbasis bedraagt de gemiddelde aanvulling bij gras, bouwland en bos voor gebieden met zeer diepe grondwaterstanden respectievelijk 276, 213 en 133 mm over de hydrologische jaren 1990-1994.

3.2. Simulatie van werkelijk opgetreden situatie

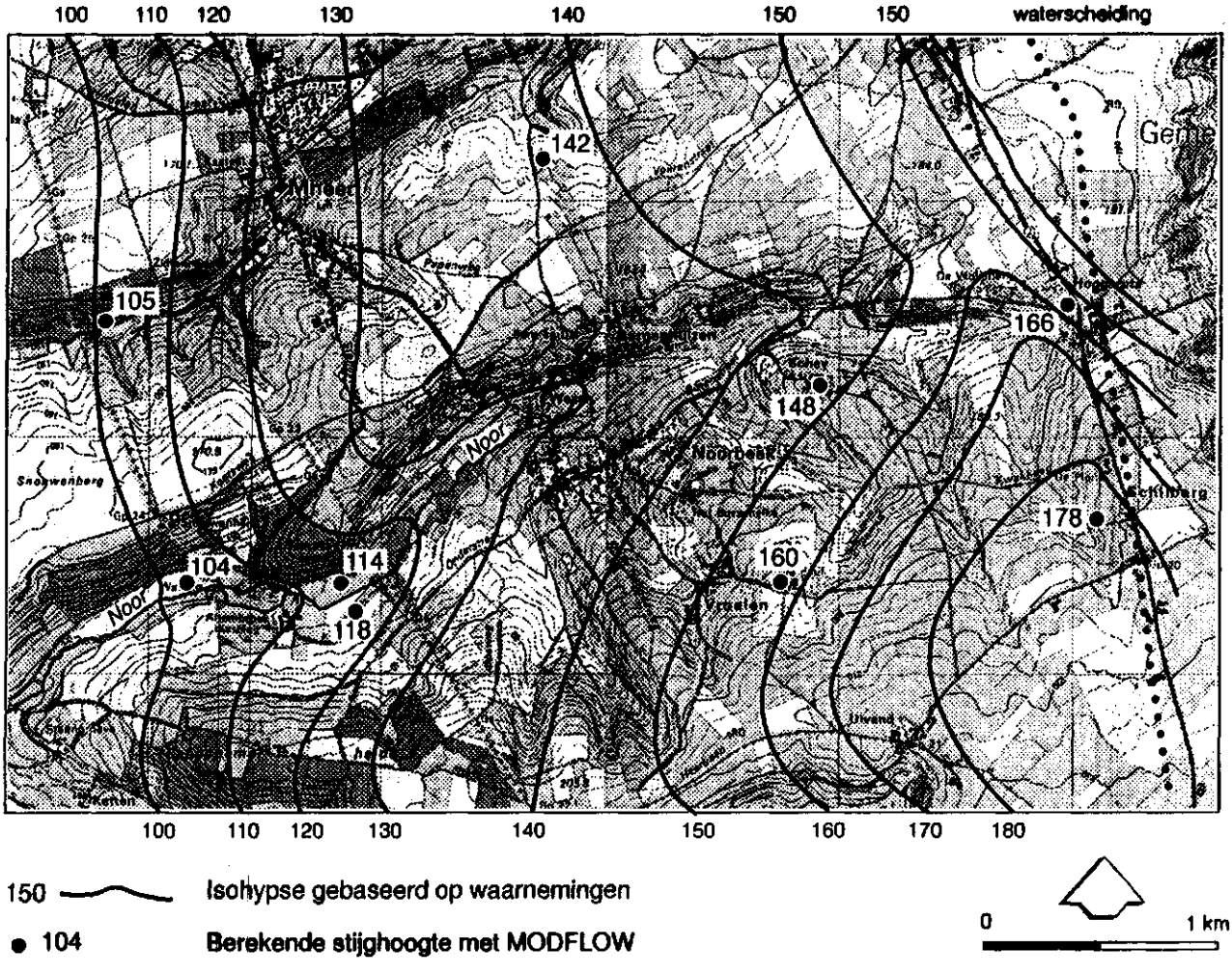
Met het verzadigd grondwaterstromingsmodel MODFLOW is getracht de hydrologische situatie, zoals die in 1992-1994 is opgetreden, te simuleren. Een stationaire analyse was onmogelijk omdat deze voor de genoemde periode niet te definiëren is, omdat de grondwaterstanden onder de plateaus in de periode 1992-1994 sterk stijgen (figuur 5).

Hierna zullen achtereenvolgens de waargenomen en de gesimuleerde stijghoogten en oppervlaktewater-afvoer worden vergeleken.

3.2.1 Stijghoogten

Isohypsenkaarten

In figuur 10 wordt een isohypsenkaart gegeven van het freatische grondwater in het gehele stroomgebied, waarin de berekende stijghoogte ter plaatse van de waarnemingsbuizen is aangegeven. Omdat het aantal buizen of putten met een diepe grondwaterstand in

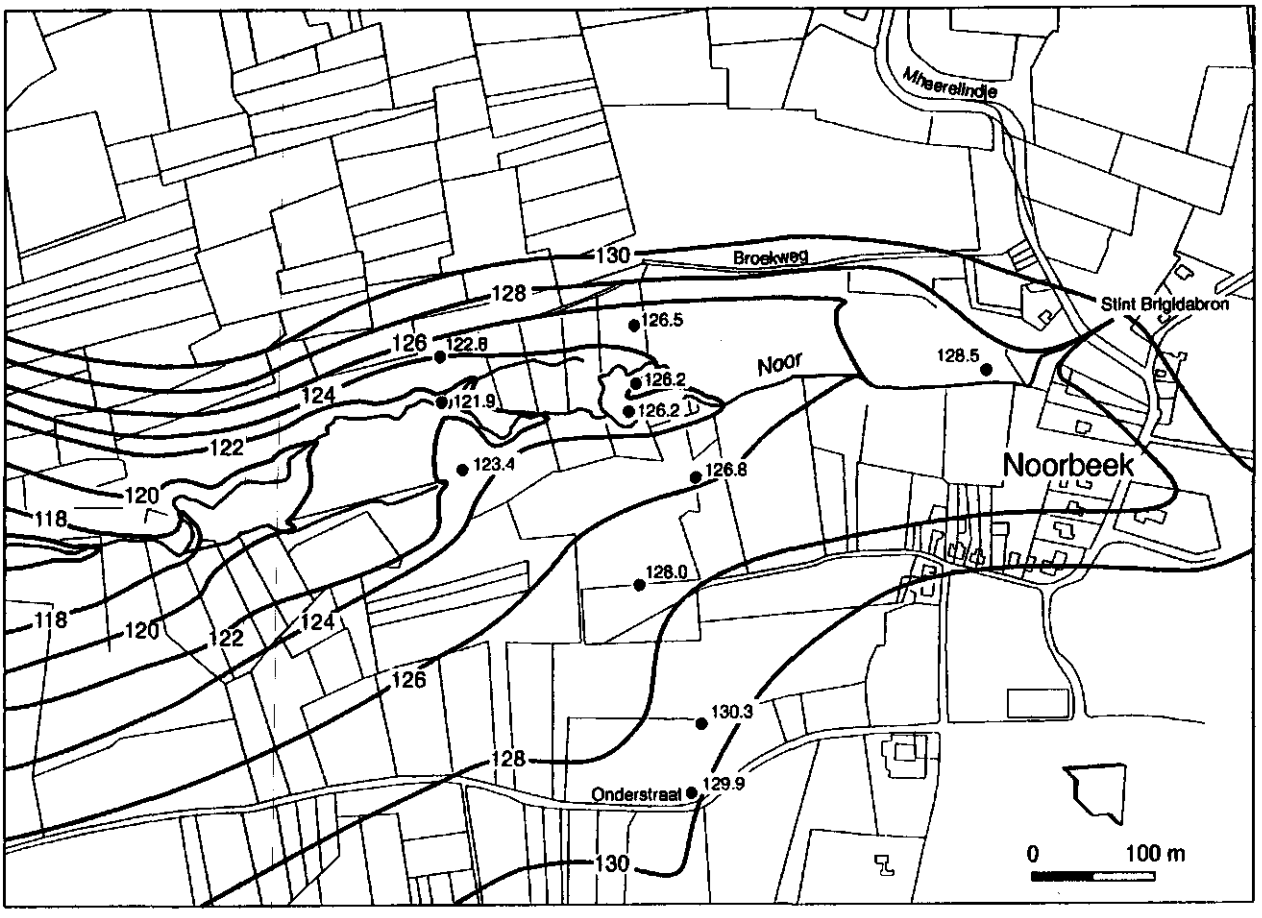


Figuur 10 Isohypsenkaart van het stroomgebied van de Noor met daarin aangegeven de gesimuleerde stijghoogte ter plaatse of in de omgeving van een buis of put

het stroomgebied zeer gering is, zijn ook de berekende standen voor vier lokaties van buizen of putten, die net buiten het stroomgebied liggen, in de kaart opgenomen. Uit

figuur 10 kan worden afgeleid dat de berekende stijghoogten redelijk in het stijghoogtebeeld passen, dat gebaseerd is op waarnemingen.

Het aantal waarnemingsbuizen in het natte dal is groot, daarom is ook een isohypsenkaart van het freatische grondwater (figuur 11) gegeven van het bovenstroomse deel van het natte dal. Ook in deze kaart zijn de berekende stijghoogten ter plaatse van waarnemingsbuizen aangegeven.



Figuur 11 Isohypsenkaart van het natte dal van het stroomgebied van de Noor met daarin aangegeven de gesimuleerde stijghoogte ter plaatse van een buis of put

De berekende stijghoogten blijken ook in het natte dal redelijk in het isohypsenbeeld te passen, temeer als rekening wordt gehouden met het feit dat de isohypsen op interpolatie zijn gebaseerd en gelden voor een gebied met steile grondwatergradiënten.

Tijd-stijghoogtelijnen

Voor een aantal lokaties in het stroomgebied van de Noor zijn de gesimuleerde en waargenomen tijd-stijghoogtelijn vergeleken. Het betreft hier lokaties met uiteenlopende grondwatercondities.

Bij de vergelijking van de waargenomen en gesimuleerde tijd-stijghoogtelijnen dient gerealiseerd te worden dat een verticale verschuiving van de lijnen ten opzichte van elkaar nodig kan zijn. Op deze noodzaak wordt bij de behandeling van de specifieke buizen niet

meer teruggekomen. De volgende redenen kunnen worden gegeven voor de noodzaak tot verticale verschuiving:
- het stijghoogteverschil over een modelcel kan groot zijn (hoofdstuk 2.3.3), zodat niet zondermeer de stijghoogte van de cel vergeleken kan worden met de waargenomen stijghoogte in een buis die in de cel ligt. Bijvoorbeeld een gradiënt van 0.15 impliceert dat de over een cel van 25 m nog een stijghoogteverschil van 3.75 m optreedt;
- de maaiveldshoogte of de hoogte van de bovenkant buis of put zijn incorrect ingemeten of ingeschat van de topografische kaart, en
- aan een waarnemingsbuis is een incorrecte cel toegekend.

Plateau met diepe grondwaterstanden

In bijlage V worden de gesimuleerde tijd-stijghoogtelijn gegeven voor lokaties die representatief zijn voor dat deel van het modelgebied, waar diepe grondwaterstanden voorkomen. De eerste tijdstijghoogtelijn ligt in de omgeving van buis WP98 (bijlage I). In 1992 en 1993 is de gesimuleerde amplitude beperkt (ca. 2 m), terwijl in 1994 de stijging, overeenkomstig de werkelijkheid, ruim 4 m bedraagt. De tweede gesimuleerde en waargenomen tijd-stijghoogtelijnen komt van de put Scheij (OW1, bijlage I). In droge perioden valt deze put droog. De amplitude van de stijghoogte bij deze put wordt goed gesimuleerd. De verticale verschuiving bedraagt ca. 5 m.

Rand van het plateau met matig diepe grondwaterstanden

In bijlage V worden ook de gesimuleerde tijd-stijghoogtelijnen gegeven voor een put (OW7) en een buis (B17), die representatief zijn voor de rand van het plateau met matig diepe grondwaterstanden. De gesimuleerde stijghoogten voor put OW7 (bijlage II) liggen gemiddeld ca. 2 m hoger dan de waargenomen. De amplitude komt goed overeen. De waargenomen stijghoogten reageren iets eerder op het neerslagoverschot dan de gesimuleerde hoogten met MODFLOW. Dit verschil kan worden teruggevoerd op de eenvoudige modellering van de onverzadigde zone en verdamping voor de bepaling van de grondwateraanvulling. In de buis B17 komt het niveau van de gesimuleerde stijghoogten goed overeen met de waargenomen hoogten. Ditzelfde geldt voor de amplitude. In tegenstelling tot put OW7 reageren de gesimuleerde stijghoogten in B17 (bijlage II) iets trager op het neerslagoverschot dan de waargenomen hoogten.

Dal met ondiepe grondwaterstanden (freatisch)

In bijlage V worden ook de gesimuleerde tijd-stijghoogtelijnen gegeven voor drie buizen (B3, B13 en B10, bijlage II), die representatief zijn voor het dal met ondiepe grondwaterstanden (freatisch). In bijlage V wordt als eerste de tijd-stijghoogtelijnen gegeven die representatief is voor een natte plek in het dal (B3), waar de amplitude bij zowel de waargenomen als de gesimuleerde stijghoogten zeer klein (minder dan 0.50 m). Het absolute niveau verschilt iets (0.4 à 0.5 m). Het verschil is echter zeer klein als de gradiënten in het dal in de beschouwing worden betrokken. Als tweede wordt de tijdstijghoogtelijn gegeven die representatief is voor een iets drogere plek in het dal (B13), waar de amplitude bij zowel de waargenomen als de gesimuleerde stijghoogten groter is dan bij de natte plekken. De drogere plekken komen over het algemeen aan de rand van het natte dal voor, alsmede op sommige lokaties vlakbij de Noor (drainage door de diepingesneden Noor). De berekende tijd-stijghoogtelijn voor buis B13 komt zeer goed overeen met de waargenomen hoogten. Bij de buis B10 is dat echter duidelijk niet het geval (derde lijn in bijlage V). De gesimuleerde stijghoogten vertoont een zeer geringe amplitude, hetgeen

behalve bij natte plekken ook voorkomt bij de zogenaamde beekcellen (cellen waar de Noor doorstroomt). De waargenomen stijghoogten vertonen een veel grotere amplitude, die typisch is voor een drogere plek. Buis B10 ligt inderdaad op een iets hogere (oever)wal op ca. 10 m van de Noor. Dit is een duidelijk voorbeeld van een situatie die zelfs met de huidige, gedetailleerde ruimtelijke modelschematisering (cellen van 50 * 25 m in het dal) nog niet gesimuleerd kan worden. Bij de schematisering moet voor de cel waar B10 in ligt, gekozen worden òf voor een beekcel òf voor een cel waarin geen beek ligt en die dus drogere condities vertegenwoordigt.

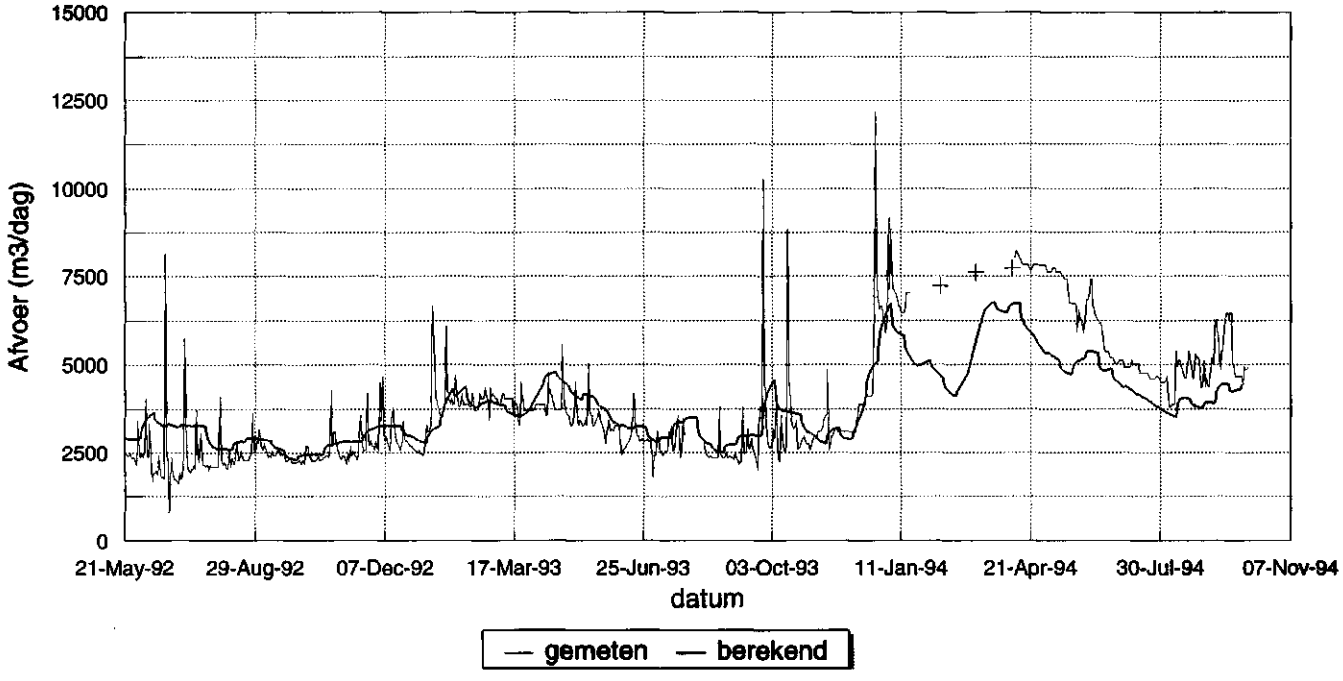
Diep grondwater in het dal (spanningswater)

In de bijlage V worden ook de gesimuleerde tijd-stijghoogtelijnen gegeven voor drie buizen (B9a, B10a en B13a, bijlage II), die representatief zijn voor de voor de stijghoogten van het diepe grondwater in het dal (spanningswater). Afgezien van een gemiddeld verschil van ca. 0.5 m komen de gesimuleerde stijghoogten in de buizen B9a en B10a goed overeen met de waargenomen stijghoogten. In buis B9a wordt de amplitude van de waargenomen stijghoogten iets overschat, terwijl in B10a het tegenovergestelde optreedt. Buis B13a is een voorbeeld van een buis waar de overeenkomst tussen waargenomen en gesimuleerd veel minder goed is. In de droge periode 1992 en 1993 is de overeenkomst nog goed, maar in 1994 wordt de reactie van de waargenomen stijghoogten (waargenomen stijging van ca. 1.5 m) duidelijk onderschat. Een dergelijke stijging is niet kenmerkend voor het diepe grondwater en kan mogelijk voorkomen uit een lokaal hogere hydraulische weerstand van de dalopvulling, die met een dergelijke mate van detail niet in het model is opgenomen.

3.2.2 Oppervlaktewater-afvoer

De gesimuleerde afvoer van de Noor bestaat uit grondwaterafvoer direct op de Noor (beekafvoer) en drainage van grondwater in een reeks van cellen aan weerszijden van de Noor (bronafvoer). In figuur 12 wordt per dag de som van de gesimuleerde beekafvoer en bronafvoer gegeven. Daarnaast wordt in deze figuur de waargenomen gemiddelde dagafvoer gegeven bij het meetpunt Molenhoeve te Altembroek (M6). Voor de jaren 1992 en 1993 komt het niveau van de gesimuleerde en waargenomen dagafvoer goed overeen. De waargenomen afvoer vertoont echter een piekiger karakter dan de berekende afvoer. Dit komt omdat in MODFLOW de oppervlakte-afvoer en de riooloverstort (snelle afvoercomponent) niet kan worden opgenomen. In het natte winterhalfjaar van 1993/1994 wordt de afvoer door het model enigszins onderschat. Vanaf mei 1994 komt de gesimuleerde afvoer weer redelijk overeen met het waargenomen debiet.

Uit de resultaten van MODFLOW kan ook de beekafvoer en de bronafvoer worden afgeleid. In de droge jaren varieert de gesimuleerde beekafvoer tussen de 1000 en 1500 m^3/dag. In het natte winterhalfjaar van 1993/1994 neemt de beekafvoer toe tot 2500 m^3/jaar. De berekende bronafvoer ligt steeds hoger dan de beekafvoer. In droge jaren varieert de bronafvoer tussen de 1500 en 3000 m^3/dag, terwijl deze in het natte winterhalfjaar toeneemt tot 4500 m^3/dag. De bronafvoer bedraagt 60 à 70% van de totale afvoer van de Noor. Dit percentage komt goed overeen met de waargenomen verdeling van de oppervlaktewater-afvoer (tabellen 2 en 3).



Figuur 12 De gesimuleerde en waargenomen dagafvoer bij het meetpunt Molenhoeve te Altembroek (M6)

4. Effecten van grondwaterwinning en de invloed van de meteorologische omstandigheden

In dit hoofdstuk worden de effecten van de grondwaterwinning aan de westrand van het Plateau van Margraten beschreven. Dit zal gebeuren aan de hand van de gemeten stijghoogten van het grondwater en de oppervlaktewater-afvoer (hoofdstuk 2), alsmede met het verzadigd grondwaterstromingsmodel (hoofdstuk 3).

De veranderingen van de stijghoogten op de randen van gedetailleerde model zijn bepaald met een regionaal verzadigd grondwaterstromingsmodel (Juhász-Holterman & Pronck, 1984). De volgende varianten werden onderscheiden voor het detailmodel:

- **variant 1**: vermindering van de grondwateronttrekking op de winplaats De Dommel van 3 miljoen m^3/jaar naar 2 miljoen m^3/jaar en vermeerdering van de onttrekking op de winplaats Heer-Vroendaal van 3 miljoen m^3/jaar naar 4 miljoen m^3/jaar. Dit resulteert volgens het regionale model in een verhoging van de randstijghoogte met 2 cm op de noordrand van het model. Overigens heeft een recent onderzoek met een regionaal model uitgewezen dat er zeer waarschijnlijk geen veranderingen (< 1 cm) op de noordrand van het detailmodel optreden (Witteveen+Bos, 1995);
- **variant 2**: extra grondwateronttrekking op de winplaats De Dommel (van 3 miljoen m^3/jaar naar 4 miljoen m^3/jaar) bij gelijkblijvende onttrekking op de winplaats Heer-Vroendaal (3 miljoen m^3/jaar). Dit resulteert volgens het regionale model in een verlaging van de randstijghoogte met 3.5 cm op de noordrand van het model.
- **variant 3**: effect van alle grondwateronttrekkingen voor de openbare watervoorziening aan de westrand van het Plateau van Margraten (13.5 miljoen m^3/jaar). Deze variant leidt volgens het regionale model tot een verhoging van 20 cm op de noordrand van het detailmodel.

Gezien de onzekerheden in het regionale model is ook gerekend met veranderingen van de stijghoogten die twee keer zo groot zijn. Dit houdt de volgende varianten in:

- **variant 4**: verhoging van de randstijghoogte op de noordrand met 4 cm;
- **variant 5**: verlaging van de randstijghoogte op de noordrand met 7 cm, en
- **variant 6**: verhoging van de randstijghoogte op de noordrand met 40 cm.

De effecten van verandering van de randstijghoogten zijn met het detailmodel uitgerekend voor een stationaire stromingsconditie. Een niet-stationaire analyse is namelijk onnodig voor de effectvoorspelling. Onderzoek van Aarnink en Heijnen (1992) heeft aangetoond dat in dit gebied het verloop van de stijghoogte weliswaar niet-stationair moet worden gesimuleerd, maar dat een verandering van de stijghoogte ten gevolge van een grondwateronttrekking met een stationair model kan worden berekend omdat de stijghoogteverandering constant is. Het constant zijn van de stijghoogteverandering op een bepaalde plaats wordt veroorzaakt door het oppervlaktewater-systeem (Van Lanen & Heij, 1978), dat in dit gebied in zijn geheel permanent watervoerend blijft.

Met het detailmodel is eerst een stationaire simulatie uitgevoerd met de gemiddelde grondwateraanvulling over de periode 1971-1994. In eerste instantie zijn voor de zijranden dezelfde randvoorwaarden gebruikt als in het vorige hoofdstuk (referentie 1)

beschreven. Dit impliceert dus, dat met uitzondering van het westen van het modelgebied, met een ondoorlatende rand is gerekend. Daarna zijn de berekende stijghoogten op de rand van het model van referentie 1 als randvoorwaarden ingevoerd op de noordrand van het model (referentie 2). De oost- en zuidrand zijn nog steeds ondoorlatend. De simulatie van referentie 2 is noodzakelijk omdat de varianten pas kunnen worden doorgerekend als de verlagingen of verhogingen kunnen worden afgetrokken of opgeteld bij de randstijghoogten. De effecten van de wateronttrekking (varianten 1 tot en met 6) zijn steeds vergeleken met referentie 2. Voor een uitgebreide beschrijving van de gesimuleerde effecten van de waterwinningen wordt verwezen naar Kroon & Weerts (1995).

Achtereenvolgens zal worden ingegaan op het effect van de meteorologische omstandigheden en van de grondwaterwinningsvarianten op de stijghoogten van het grondwater en de oppervlaktewater-afvoer.

4.1. Stijghoogten

Meteorologische omstandigheden

De meteorologische omstandigheden in de periode 1990-1994 hebben geleid tot grote verschillen in de grondwateraanvulling (tabel 5 en bijlage IV). Dit heeft een groot effect gehad op de stijghoogten. De stijghoogten ter plaatse van de noordrand van het model (WP96 en WP98) zijn met 5 à 6 m gestegen. Het zal duidelijk zijn dat de stijghoogteveranderingen ten gevolge van de voorgestelde veranderingen van de waterwinningen op De Dommel en Heer-Vroendaal slechts een fractie bedragen (max. 1%) van de natuurlijke variatie ten gevolge van wisselingen in de meteorologische omstandigheden. Zelfs de stijghoogteveranderingen bij variant 6 (maximale variant), bedragen minder dan 10% van de natuurlijke variantie ter plaatse van de noordrand van het stroomgebied.

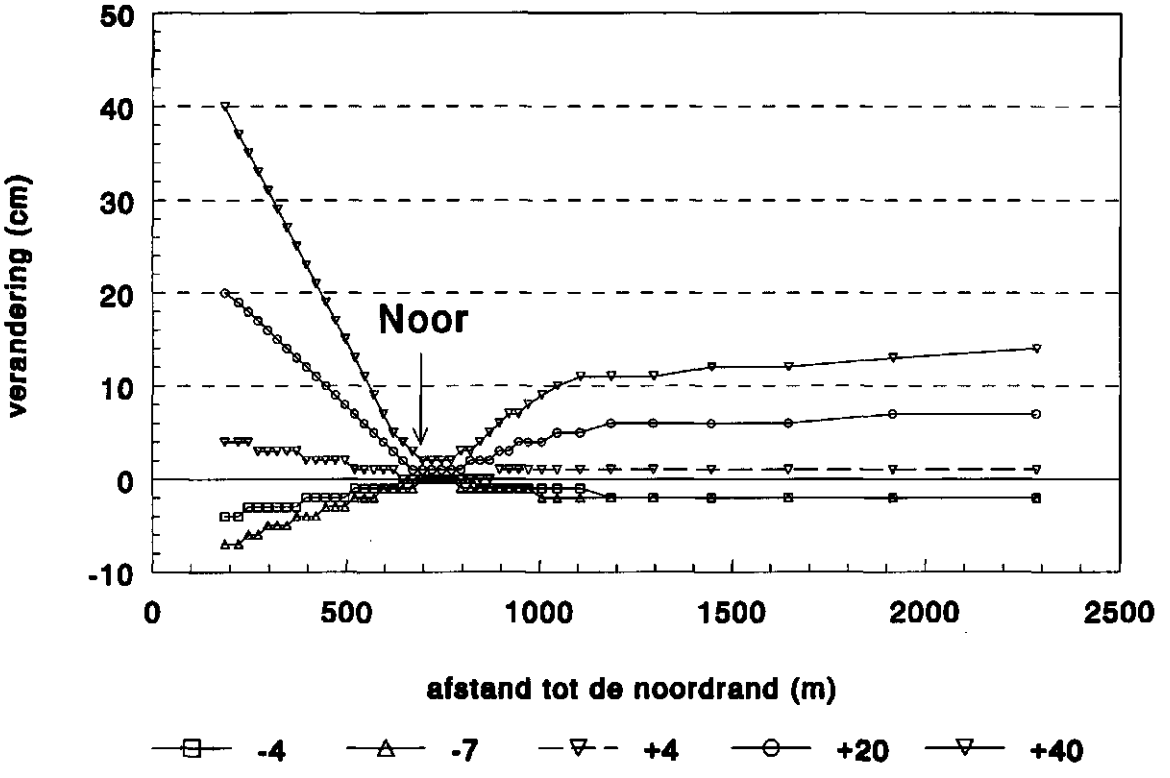
Grondwaterwinning

Het effect van de verandering van de randstijghoogten op de stijghoogten in het stroomgebied wordt in figuur 13 gegeven voor een dwarsraai. De dwarsraai ligt ongeveer midden tussen de Sint-Brigidabron en de rijksgrens en loopt dus dwars door de Noorbeemden. Aangezien laag 3, die de Formatie van Vaals vertegenwoordigt, de eerste laag is die in de gehele dwarsdoorsnede verzadigd is, zijn de verandering van de stijghoogten in eerste instantie voor deze laag gegeven.

Een verlaging van 3.5 cm (variant 2) kan niet in MODFLOW worden ingevoerd, daarom is voor een verlaging van 4 cm op de noordrand gekozen. Uit figuur 13 kan worden afgeleid dat de veranderingen ten zuiden van de Noor duidelijk geringer zijn dan ten noorden van de Noor, waar de randstijghoogten zijn aangepast. De kleinste veranderingen worden aangetroffen in natte beekdal. Op de noordrand van het model (na 160 m begint het actieve modelgebied) is de verandering van de stijghoogte gelijk aan de ingevoerde verandering (randknooppunt). Daarna neemt de verandering snel af. Bij een verlaging van 7 cm op de rand (variant 5), bedraagt de verlaging aan de noordelijke rand van het natte dal nog maar ongeveer 3 cm. Deze verlaging is zeer klein indien die wordt vergeleken met de natuurlijke variatie van de stijghoogte van het grondwater in de Formatie van Vaals (bijvoorbeeld figuur 6, B9 diep). Iets zuidelijker in het natte dal treedt er ten gevolge van de waterwinning geen verlaging op. Ten zuiden van de Noor is de verlaging bij variant 5 buiten het natte dal ongeveer 2 cm. De modelresultaten voor de variant 1 zijn niet meer weergegeven in figuur 13 omdat deze, met uitzondering van

vlakbij de noordrand, zo klein zijn dat ze binnen de onnauwkeurigheid van het model vallen.

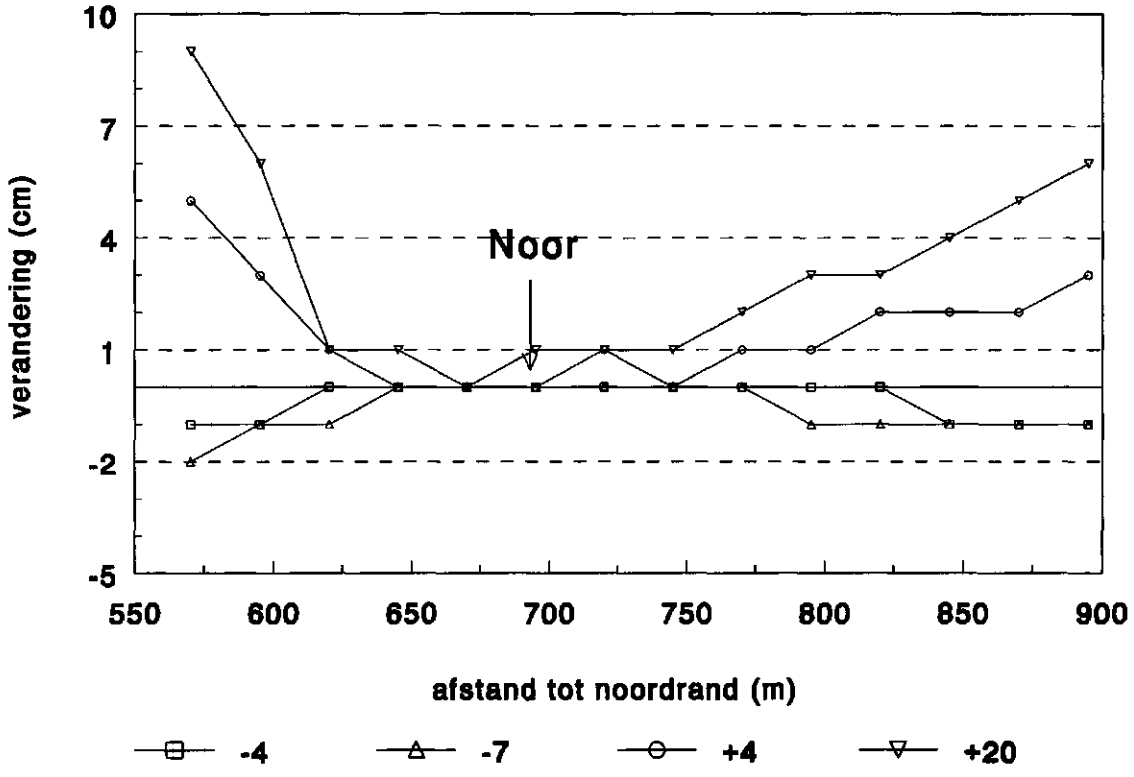
De verandering van de stijghoogten ten gevolge van alle winningen (varianten 3 en 6) zijn uiteraard groter dan voor variant 5. Aan de randen van het natte dal blijven de veranderingen in de Formatie van Vaals echter beperkt tot 5 cm (variant 3) en 10 cm (variant 6). In het natte dal zelf nemen de veranderingen af tot ongeveer 2 cm.



Figuur 13 De verandering van de stijghoogten (- verlaging en + verhoging) in de Formatie van Vaals ten gevolge van de verschillende waterwinningsvarianten

In figuur 14 wordt aangegeven hoe groot de verandering van de stijghoogte van het freatische grondwater in het beekdal is ten gevolge van de waterwinningsvarianten. Bij een verlaging van de randstijghoogte met 7 cm (variant 5), bedraagt de verlaging van de grondwaterstand maximaal 2 cm (noordelijk rand van het dal). Meestal is de verlaging echter kleiner (0-1 cm). Deze verlagingen kunnen worden vergeleken met de natuurlijke variatie, die optreedt in het centrum van het natte dal (figuur 6, B9 freatisch). In het zuiden van het natte dal bedraagt de verlaging 1 cm. Het feit dat de verlaging aan de zuidkant kleiner is, is belangrijk omdat de bronafvoer aan de zuidkant wat groter is dan aan de noordkant van de Noor (tabellen 2 en 3). De modelresultaten van variant 1 zijn ook in figuur 14 niet weergegeven omdat deze zo klein zijn dat ze binnen de onnauwkeurigheid van het model vallen.

De verandering van de stijghoogten van het freatische grondwater ten gevolge van alle winningen levert aan de noordrand van het dal een verandering op van 5 cm (variant 3) en 9 cm (variant 6). In de directe omgeving van de Noor lopen de veranderingen terug naar 0 à 1 cm. Ten zuiden van de Noor in het natte beekdal nemen de veranderingen toe tot 3 cm (variant 3) en 6 cm (variant 6).



Figuur 14 De verandering van de stijghoogten van het freatische grondwater (- verlaging en + verhoging) in het beekdal ten gevolge van de verschillende waterwinningsvarianten

4.2. Oppervlaktewater-afvoer

Meteorologische omstandigheden

De effecten van de meteorologische omstandigheden op de oppervlaktewater-afvoer in de periode 1992-1994 zijn al besproken in hoofdstuk 2 (figuren 7 en 12). Het is duidelijk dat de verschillen in de grondwateraanvulling tot een variatie in de afvoer van de Noor kunnen leiden die 200 à 300% bedraagt. Zo bedroeg de basisafvoer van de Noor in 1992 ongeveer 2500 m^3/dag, terwijl deze in het voorjaar van 1994 opliep tot 7500 m^3/dag. De variatie in de afvoer van de Sint-Brigidabron is nog veel groter. In het voorjaar 1992 bedroeg de bronafvoer nog geen 100 m^3/dag, terwijl deze in dezelfde periode van 1994 was opgelopen tot meer dan 2000 m^3/dag. Zoals al eerder is beschreven, bestaat er een duidelijke relatie tussen de grondwateraanvulling, de stijghoogte van het grondwater onder het plateau en de afvoer van de bronnen (hoofdstuk 2). In figuur 7 wordt de relatie gegeven tussen de afvoer van het meetpunt NA (ca. 30 m benedenstrooms van de Sint-Brigidabron) en de stijghoogte van het grondwater onder het plateau bovenstrooms van de bron bij het waarnemingspunt WP98. De Sint-Brigidabron valt droog als de stijghoogte onder het plateau bij WP98 137 m +N.A.P. wordt of lager. Daarboven neemt de afvoer vrij sterk toe. Uit het verloop van de stijghoogte in WP98 kan worden geconcludeerd dat de Sint-Brigidabron in de periode 1980-1994 alleen in het begin van de

negentiger jaren is drooggevallen. Op grond van het stijghoogteverloop van WP99 (bijlage VI) en de overeenkomst tussen het verloop in WP98 en WP99 kan worden afgeleid dat de Sint-Brigidabron in de periode 1962-1994 waarschijnlijk 2 of 3 maal is drooggevallen, namelijk eind 1964, in het midden van de zeventiger jaren en in het begin van de negentiger jaren. Wat betreft 1964 is het niet helemaal duidelijk. Het droogvallen van de Sint-Brigidabron in het midden van de zeventiger en het begin van de negentiger jaren wordt ook aangegeven door het verloop van het potentieel neerslagoverschot (figuur 4), dat in sterke mate de grondwateraanvulling bepaalt.

Grondwaterwinning

Uit de berekende waterbalans voor het stroomgebied van de Noor, kan het effect van de waterwinningsvarianten op de afvoer van de Noor worden afgeleid (tabel 6). De gesimuleerde gemiddelde Noorafvoer zonder stijghoogteveranderingen over de periode 1971-1994 (referentie 2) bedroeg 4722 m^3/dag.

Uit de tabel 6 blijkt dat de voorgestelde veranderingen van de grondwateronttrekking op de winplaatsen De Dommel en Heer-Vroendaal tot maar zeer geringe veranderingen in de afvoer van de Noor leiden, namelijk een verandering van 0.6% of minder. Al de grondwaterwinningen samen op het Plateau van Margraten hebben overigens vanwege de lokalisering ook maar een geringe invloed op de afvoer van de Noor (maximaal 3.5%).

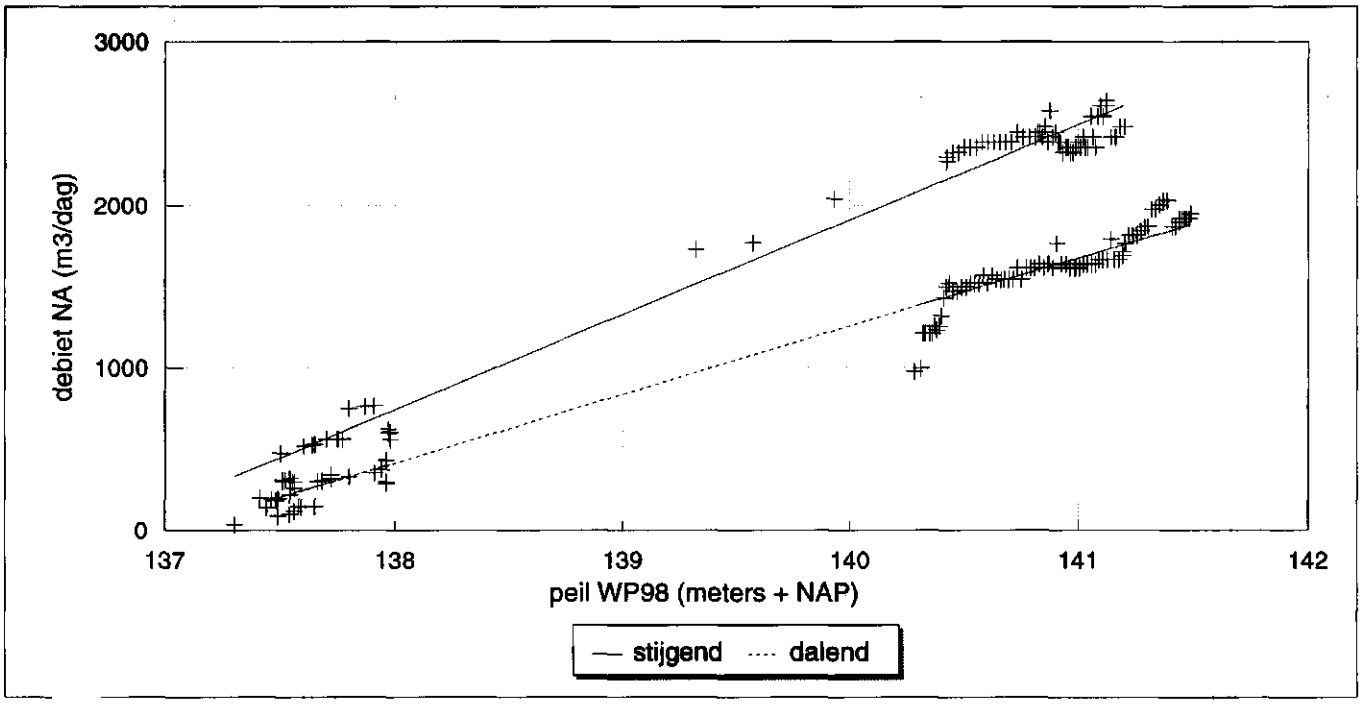
De met detailmodel berekende afvoerverandering bij de varianten 1 en 2 is iets minder dan Witteveen+Bos (1995) heeft berekend voor de Noor met een regionaal model. Zij komen uit op een afvoerverandering bij de Noor, die 1.8% bedraagt van het voor de Noor in 1992 berekende debiet (2500 m^3/dag). Dit impliceert een afvoerverandering van 45 m^3/dag.

Tabel 6 Verandering van de afvoer van de Noor ten gevolge van de verschillende waterwinningsvarianten

Waterwinningsvarianten	Verandering van de afvoer	
	m^3/dag	%
1	8.6	0.2
2	17.7	0.4
3	83.4	1.8
4	16.5	0.4
5	29.8	0.6
6	166.4	3.5

Het detailmodel is te grof om de afvoerverandering van een specifieke bron, zoals de Sint-Brigidabron, te berekenen. Uit de relatie tussen de afvoer van de Sint-Brigidabron en de stijghoogte van het grondwater onder het plateau bovenstrooms van de bron bij het

waarnemingspunt WP98 (figuur 7) kan het volgende worden opgemerkt. In figuur 15 wordt nogmaals deze relatie geïllustreerd.



Figuur 15 De relatie tussen de afvoer van de Sint-Brigidabron en de stijghoogte van het grondwater onder het plateau bij punt WP98

In figuur 15 worden twee lijnen gegeven; de bovenste lijn geeft de relatie tussen het debiet en de stijghoogte voor de situatie dat de bron watervoerend is en dat de grondwaterstanden stijgen. De onderste lijn geeft de relatie voor dalende grondwaterstanden. De lijnen zijn gebaseerd op een regressie-analyse.

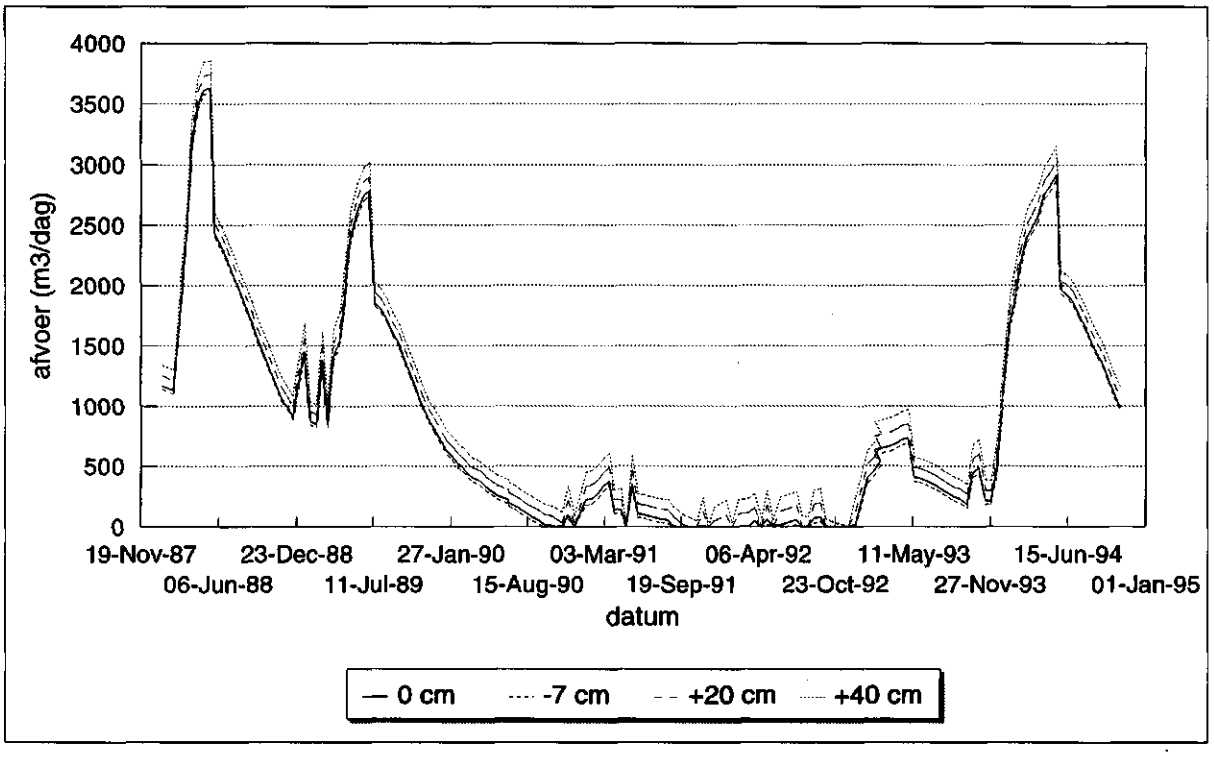
$$Q = -79916.9 + 584.49\varphi_{WP98} \qquad R^2 = 0.97$$

$$Q = -57423.2 + 419.13\varphi_{WP98} \qquad R^2 = 0.79$$

De bovenste vergelijking geldt voor de stijgende lijn en de onderste voor de dalende lijn. Uit de vergelijking voor de dalende lijn kan worden afgeleid dat de bron droogvalt bij een stijghoogte van 137 m +N.A.P.. De correlatie voor de dalende lijn is echter beperkt. Volgens de stijgende lijn valt de Sint-Brigidabron droog bij een grondwaterstand van 136.7 m +N.A.P.. Indien de grondwaterstanden van WP98 in de vergelijkingen worden ingevuld, wordt figuur 16 verkregen. Behalve de afvoerlijn voor de nulsituatie worden ook de berekende afvoeren gegeven voor de varianten 3, 5 en 6.

Uit het bovenstaande kan worden geconcludeerd dat de afvoer van de Sint-Brigidabron, zoals die in het voorjaar van 1994 is gemeten, helemaal niet uitzonderlijk hoog is. In de tweede helft van de tachtiger jaren was de afvoer zelf nog hoger (ca. 3500 m^3/dag). Verder valt op dat geringe verlagingen van de stijghoogte van het grondwater onder het plateau aan de noordkant van stroomgebied de afvoer van de Sint-Brigidabron nauwelijks zullen beïnvloeden. Een verlaging van de stijghoogten op de noordrand met 7 cm (variant 5) leidt tot een afname van de afvoer van de Sint-Brigidabron van gemiddeld

28 m^3/dag. Het effect van alle winningen op de afvoer van de Sint-Brigidabron (variant 3) bedraagt volgens deze benadering 86 m^3/dag. Ofschoon de voorspelde afvoerverandering volgens deze benadering iets groter is dan volgens het verzadigd grondwaterstromingsmodel (tabel 6), kan worden gesteld dat gedurende natte perioden het effect minimaal zijn. Gedurende uitzonderlijke droge perioden, zoals het begin van de negentiger jaren, zal de bronafvoer relatief wel wat meer worden beïnvloed en zal de bron iets eerder droogvallen en wat later weer watervoerend worden. Bij de varianten 1, 2, 4 en 5 zijn de verschillen echter minimaal. Volgens de benadering met de regressievergelijkingen zou de Sint-Brigidabron bij de huidige onttrekkingen (nulsituatie) in totaal op 22 peildata (frequentie: ongeveer 14-daags) in de periode 1990-1992 droog zijn geweest. Dit is dus ongeveer 11 maanden. Bij variant 5 zou dit aantal gestegen zijn tot 30 peildata (in totaal dus 15 maanden). Bij de varianten 1,2 en 4 is dit aantal dus geringer.



Figuur 16 Afvoer van de Sint-Brigidabron berekend uit regressievergelijkingen en de stijghoogten van WP98 voor verschillende waterwinningsvarianten.

De primaire oorzaak van de lage afvoeren of het droogvallen van de Sint-Brigidabron moet echter niet gezocht worden bij de verdroging door grondwateronttrekking, maar in de variatie in grondwateraanvulling en de daarmee samenhangende fluctuatie van de stijghoogten onder de plateaus met vele meters.

5. Conclusies en aanbevelingen

Het onderzoek naar de effecten van waterwinning op het hydrogeologische systeem van de Noor heeft geleid tot de volgende conclusies en aanbevelingen.

Conclusies

- In de periode 1991-1994 varieerde de afvoer van de Sint-Brigidabron zeer sterk. In de droge tijd tot het najaar van 1993 was de afvoer laag en de bron viel zelfs af en toe droog, terwijl in het winterhalfjaar van 1993/1994 de afvoer opliep tot iets boven de 2500 m^3/dag. De Sint-Brigidabron reageert niet op afzonderlijke regenbuien. Wel vertoont de bronafvoer een duidelijke relatie met de stijghoogten van het grondwater onder het plateau. De afvoer van het stroomgebied varieerde tussen de 2500 en 4000 m^3/dag in de droge jaren van 1991 en 1992 en nam toe tot ongeveer 7500 m^3/dag in het natte winterhalfjaar van 1993/1994. De toename werd veroorzaakt door een toename van de bronafvoer.
- De simulatie van de verzadigde grondwaterstroming in het stroomgebied wordt bemoeilijkt door de steile grondwatergradiënten en de complexe geologie (verlengde Eckelrade breuk, Visé-Puth opwelving en de lithologie van de afzettingen).
- De gesimuleerde stijghoogten van het grondwater en oppervlaktewater-afvoer in de periode 1991-1994 komen redelijk overeen met de waargenomen waarden. Ook de verdeling van de gesimuleerde afvoer over bronnen en grondwaterafvoer direct op de beek komt goed overeen met de metingen.
- Een uitbreiding van de grondwaterwinning op de winplaats Heer-Vroendaal (van 3 naar 4 miljoen m^3/jaar) met tegelijkertijd een afname van de onttrekking op de winplaats De Dommel (van 3 naar 2 miljoen m^3/jaar) levert nauwelijks een verhoging op van de stijghoogten van het freatische grondwater in het natte dal (< 1 cm). De afvoer van de Noor neemt met minder dan 10 m^3/dag toe (0.2% van de gemiddelde Noorafvoer). Zelfs indien de verhoging op de noordrand van het stroomgebied met een factor 2 zou zijn onderschat, zijn de veranderingen verwaarloosbaar klein.
- Een uitbreiding van de grondwaterwinning op de winplaats De Dommel (van 3 naar 4 miljoen m^3/jaar) bij een gelijkblijvende onttrekking op de winplaats Heer-Vroendaal (3 miljoen m^3/jaar) levert een verlaging van de stijghoogten van het freatische grondwater aan de rand van het natte dal op van maximaal 1 cm. In het natte dal is de verlaging verwaarloosbaar klein. De afvoer van de Noor neemt met ongeveer 18 m^3/dag af (0.4% van de gemiddelde Noorafvoer). Zelfs indien de verlaging op de noordrand van het detailmodel met een factor 2 is onderschat, zijn de veranderingen in het natte dal verwaarloosbaar klein. De afvoer van de Noor zou met minder dan 1% afnemen. De verandering van de stijghoogten en de afvoer bedragen slechts een fractie van de natuurlijke variatie in stijghoogten door verschillen in grondwateraanvulling van jaar tot jaar.
- Het effect van alle grondwaterwinningen ten behoeve van de openbare watervoorziening aan de westzijde van het Plateau van Margraten (13.5 miljoen m^3/jaar) op de stijghoogten van het freatische grondwater aan de noordrand van het natte dal van de Noor bedraagt 5 cm. In de directe omgeving van de Noor loopt het effect terug naar 1 cm. Al deze grondwaterwinningen veroorzaken een vermindering van de Noorafvoer van 83 m^3/dag (1.8% van de gemiddelde Noorafvoer). Dit komt overeen met de resultaten van eerdere onderzoeken. Indien de effecten op de noordrand van het

stroomgebied met een factor 2 zouden zijn onderschat, dan nemen de effecten binnen het stroomgebied globaal met een factor 2 toe. Zelfs het effect van alle winningen op de stijghoogten van het grondwater en de oppervlaktewater-afvoer in het stroomgebied van de Noor is verwaarloosbaar klein ten opzichte van de natuurlijke variatie.

- De met het verzadigd grondwaterstromingsmodel gesimuleerde invloed van de waterwinningen op de oppervlaktewater-afvoer worden bevestigd door een statistisch model. Dit model, dat gebaseerd is op de relatie tussen de afvoer van de Sint-Brigidabron en de stijghoogte van het grondwater onder het plateau, geeft aan dat de verandering van de afvoer van de Sint-Brigidabron ten gevolge van de waterwinning slechts marginaal is ten opzichte van de natuurlijke variatie.
- Waarschijnlijk heeft de versnelde insnijding van de Noor ten gevolge van de riooloverstort in Noorbeek een groter effect op de stijghoogten van het freatische grondwater in het natte dal dan de totale waterwinning op het Plateau van Margraten.

Aanbevelingen

- De betrouwbaarheid van de isohypsenkaart van het stroomgebied en omgeving zou duidelijk toenemen indien het aantal waarnemingspunten in gebieden met diepe grondwaterspiegels zou worden vergroot. De boringen voor deze waarnemingspunten zouden tevens relevante informatie opleveren over de complexe geologische opbouw.
- Het is raadzaam dat de Provincie Limburg met het Zuiveringschap, het Waterschap Roer en Overmaas en de gemeente Margraten in overleg treedt om de gevolgen van de riooloverstort te beperken.
- Om het effect van de riooloverstort in Noorbeek te onderzoeken zou men, behalve het debiet van de overstort, ook het sedimenttransport moeten meten. Daarnaast kan een gedetailleerde en regelmatig terugkerende waterpassing van de beekbodemhoogte op vaste punten meer informatie kunnen leveren over de insnijding.
- Omdat de dynamiek in een gebied met diepe grondwaterspiegels groot is en samenhangt met de grondwateraanvulling in reeksen van droge en natte jaren, moet de monitoring van de stijghoogten van het grondwater, de oppervlaktewater-afvoer en de chemische samenstelling van het (grond)water nog een aantal jaren worden voortgezet.

Literatuur

Aarnink, W.H.B. & M. Heijnen, 1992. Verkenning van mogelijke invloeden van grondwateronttrekking aan de westzijde van het Plateau van Margraten op de waterhuishouding van het Noordal. Scriptie, Vakgroep Waterhuishouding, Landbouwuniversiteit, Wageningen.

Feddes, R.A., 1987. Crop factors in relation to Makkink reference-crop evapotranspiration. In: J.C. Hooghart (Ed.). Evaporation and Weather. Proceedings and Information No. 39, CHO-TNO, The Hague, pg. 33-45.

Juhász-Holterman, M.H.A. & P.M.N.M. Pronck, 1984. Effecten van de grondwaterwinningen aan de westrand van het Plateau van Margraten. NV Waterleiding Maatschappij Limburg, Maastricht en Gemeentebedrijven Maastricht.

KNMI, 1971-1994. Maandoverzichten van de neerslag en de weersgesteldheid. De Bilt.

Kroon, T. & A.H. Weerts, 1995. Niet-stationaire modellering van het stroomgebied van de Noor met MODFLOW en de effecten van waterwinning. Scriptie, Vakgroep Waterhuishouding, Landbouwuniversiteit, Wageningen.

Lanen, H.A.J. van & G.J. Heij, 1978. De tijdsafhankelijkheid van de verlagingen als gevolg van de grondwaterwinningen nabij Glindhorst (Gelderse Vallei). RID mededeling 78-5, Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening.

Lanen, H.A.J. van, B. van de Weerd, R. Dijksma, H.J. ten Dam & G. Bier, 1995. Hydrogeologie van het stroomgebied van de Noor en de effecten van grondwateronttrekkingen aan de westrand van het Plateau van Margraten. Rapport No. 57, Vakgroep Waterhuishouding, Landbouwuniversiteit Wageningen.

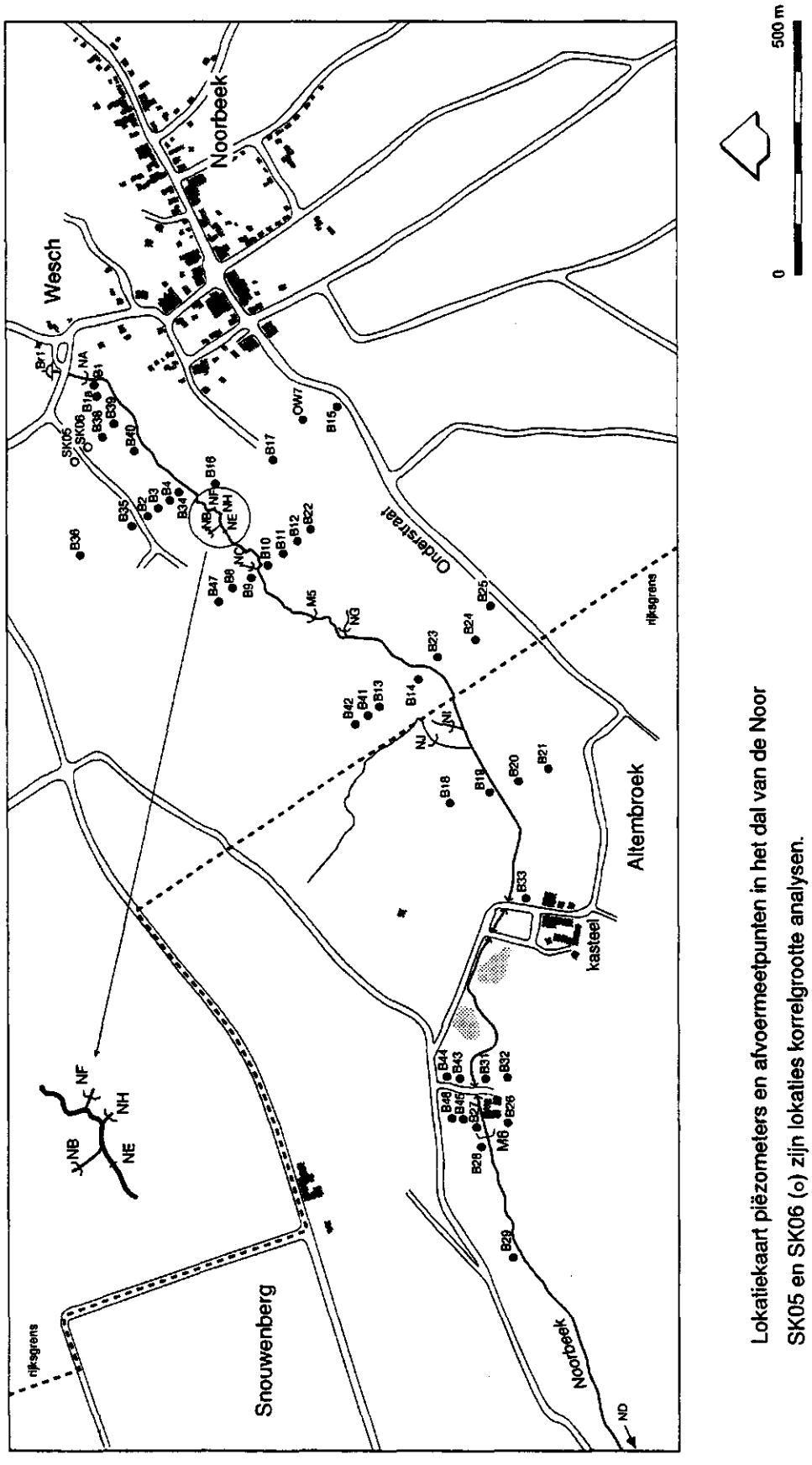
McDonald, M.G. & Harbough, A.W., 1988. A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model. United States Geological Survey.

Nota, D.J.G., A.M.G. Bakker, B. van de Weerd & G. Halma, 1987. A hydrogeological study in the basin of the Gulp creek - 3. Chemistry of surface and ground water. Agricultural University Wageningen Papers 87-7, 46 pg.

Witteveen+Bos (1995). Berekening van de effecten van de winningen Heer-Vroendaal en De Dommel. Rapport Witteveen+Bos B.V.

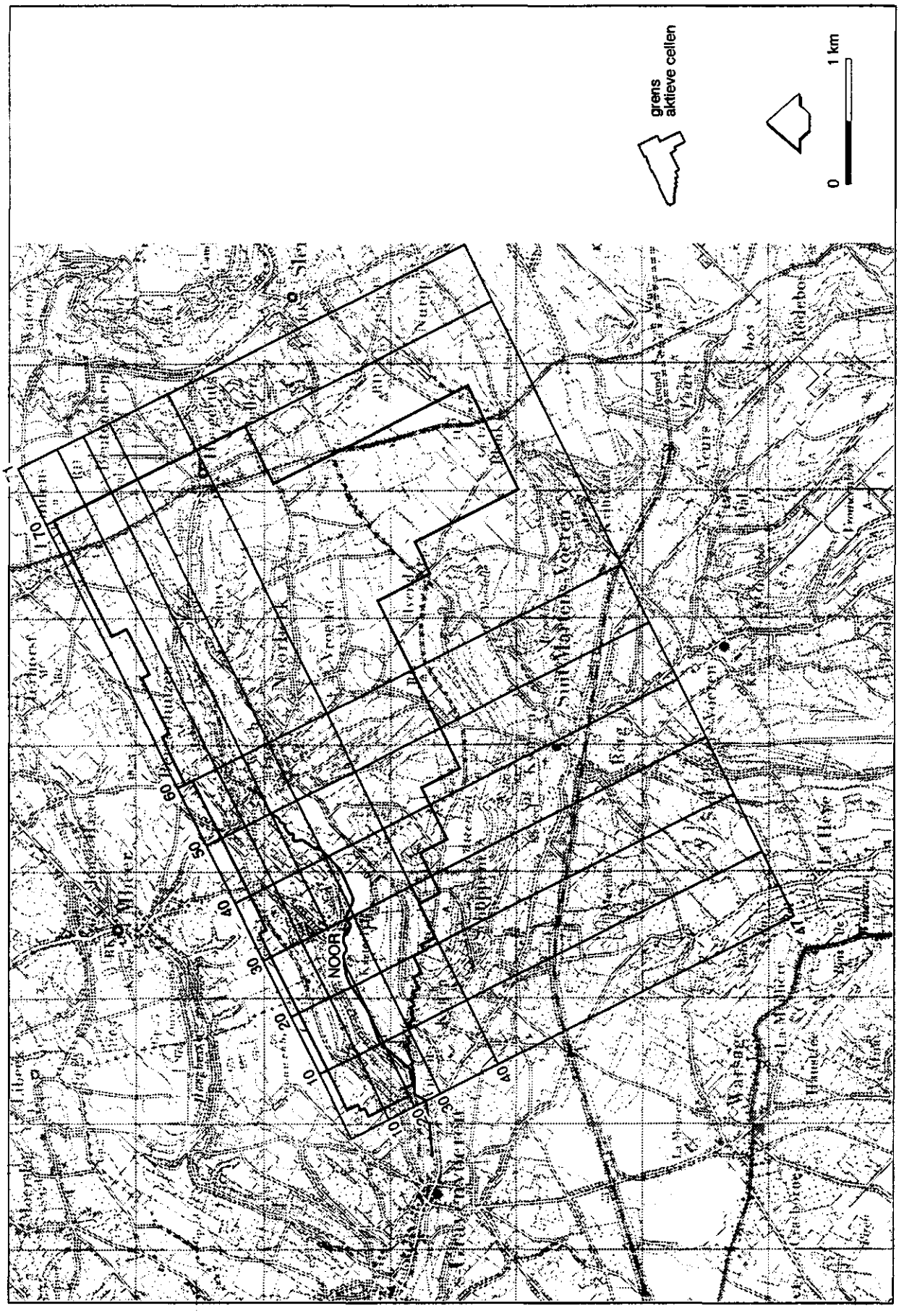
Bijlage I Topografische kaart van het stroomgebied van de Noor met de omgeving en de locatie van de waarnemingspunten van het diepe grondwater en de neerslag

Bijlage II Lokatiekaart piëzometers en afvoermeetpunten in het dal van de Noor

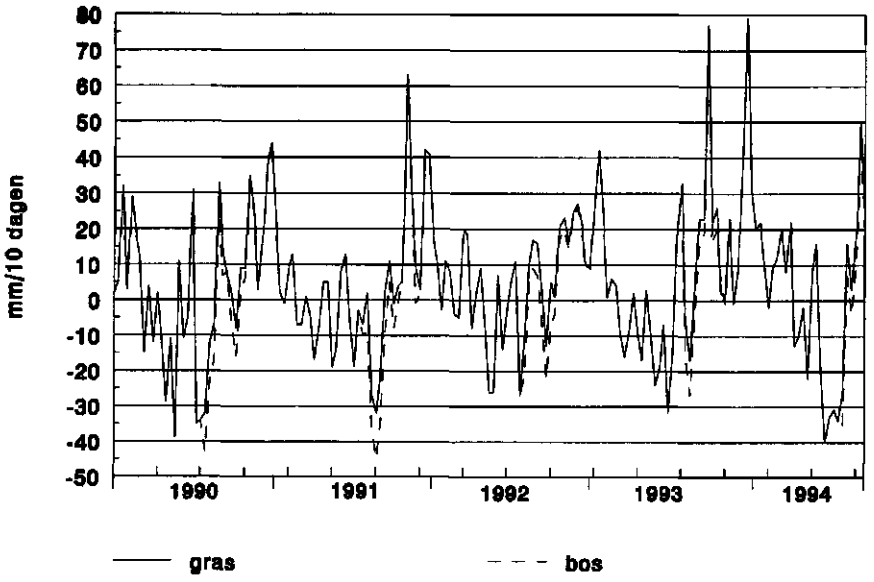


Lokatiekaart piëzometers en afvoermeetpunten in het dal van de Noor
SK05 en SK06 (o) zijn lokaties korrelgrootte analysen.

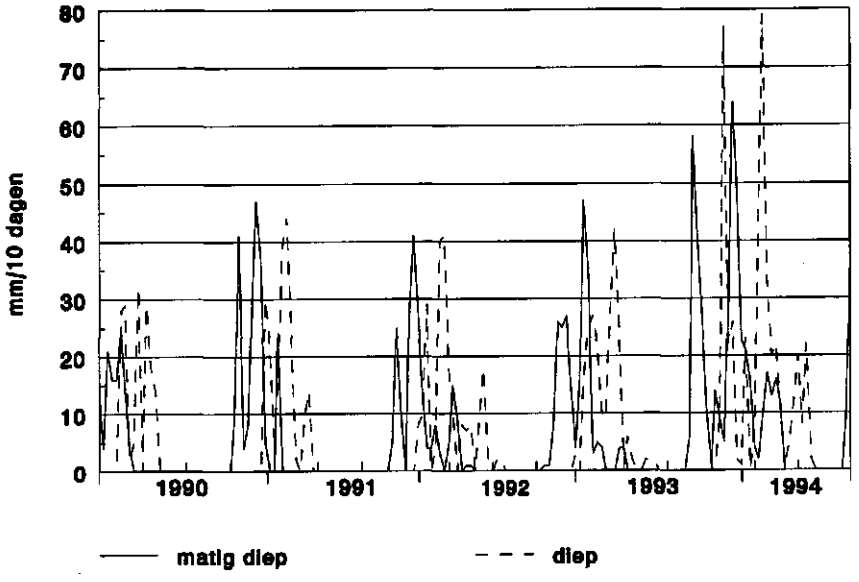
Bijlage III Modelgebied van het stroomgebied van de Noor



Bijlage IV Berekende grondwateraanvulling voor MODFLOW

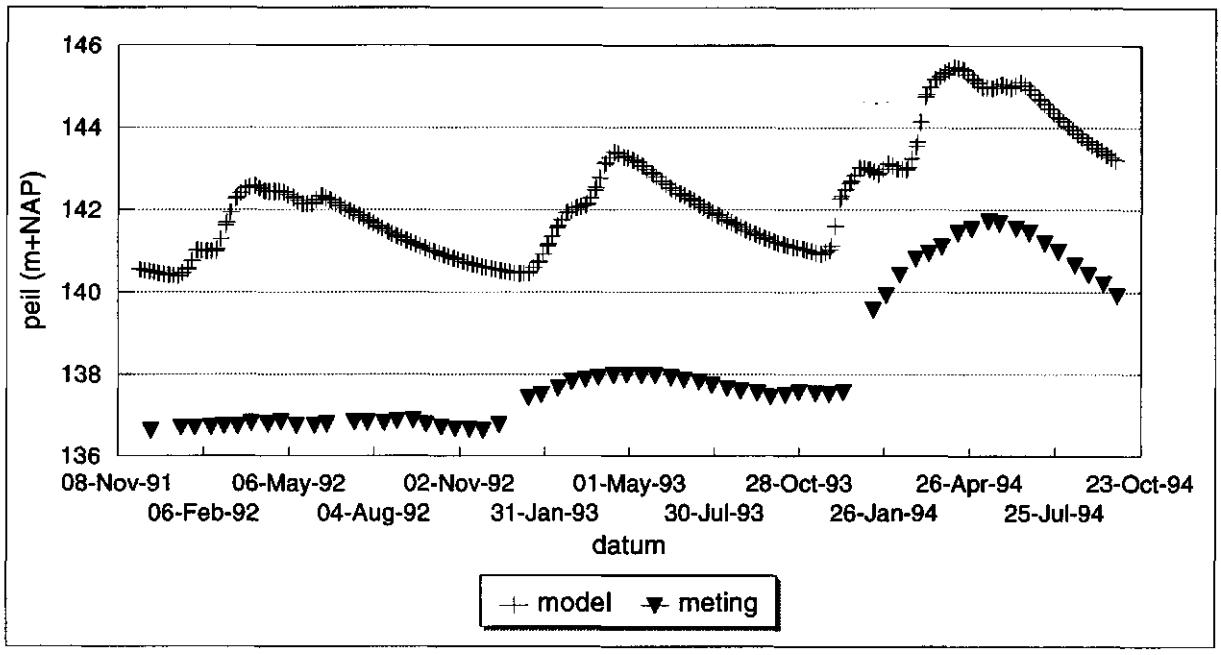


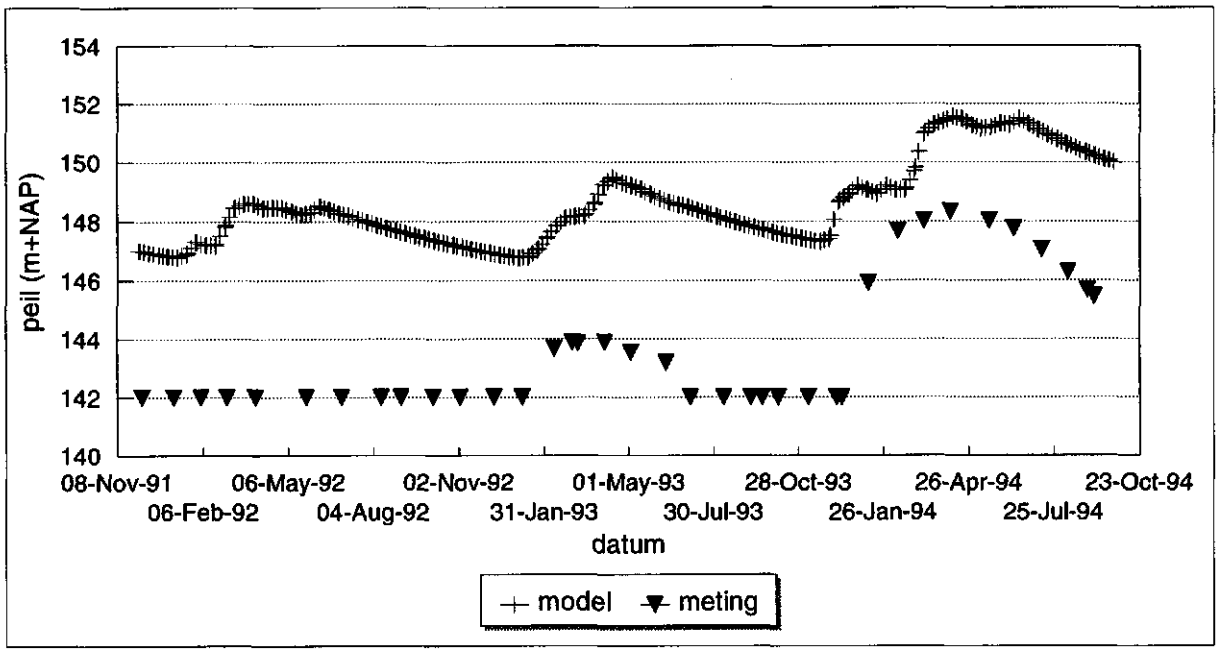
Berekende grondwateraanvulling voor grasland en bos in het natte beekdal voor enkele hydrologische jaren



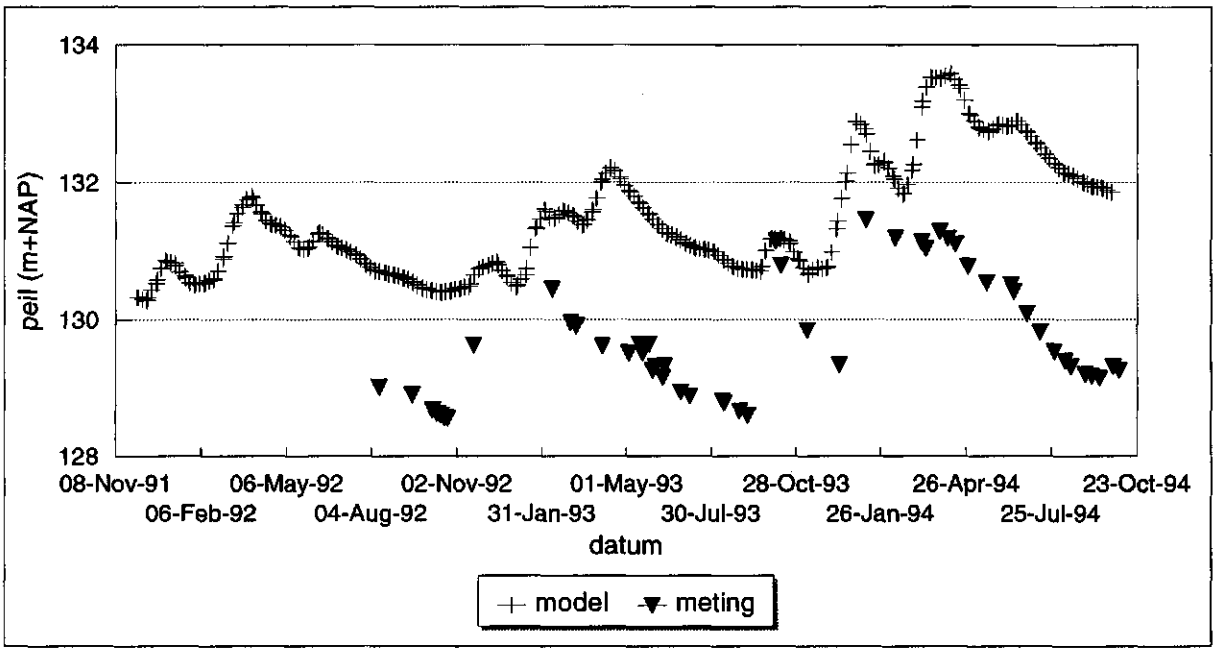
Berekende grondwateraanvulling voor grasland in gebieden met matige diepe en diepe grondwaterstanden voor enkele hydrologische jaren

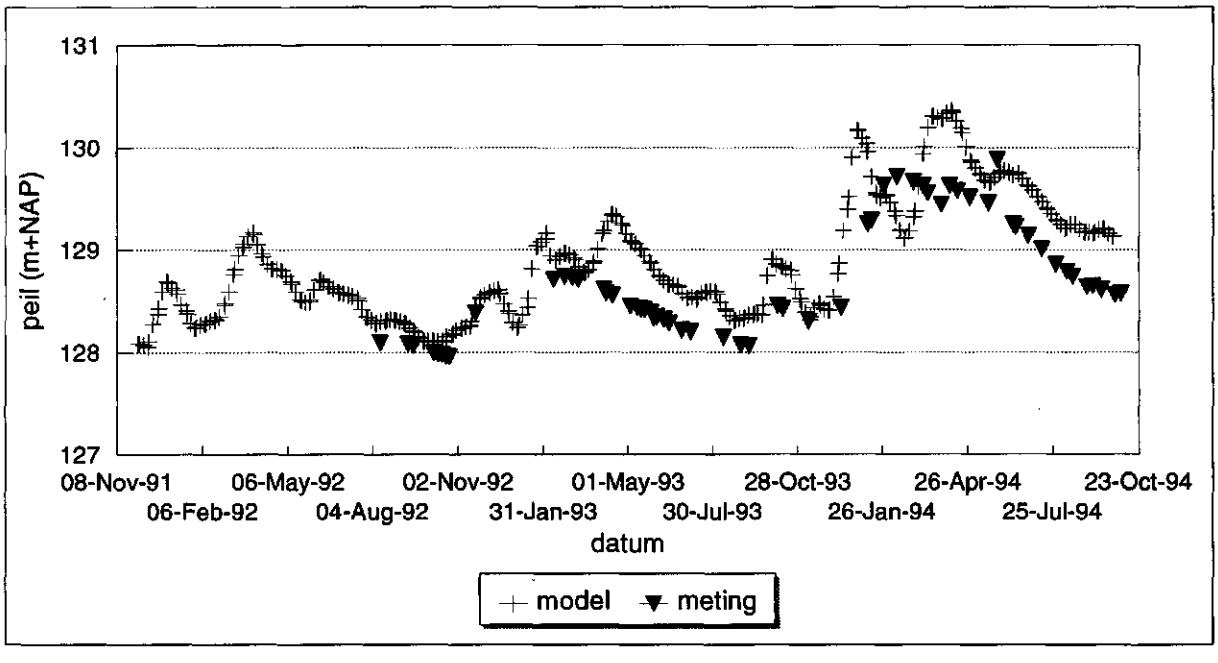
Bijlage V Waargenomen en gesimuleerde tijd-stijghoogtelijnen voor waarnemingspunten op het plateau met diepe grondwaterstanden. Boven: WP98 en onder: OW1



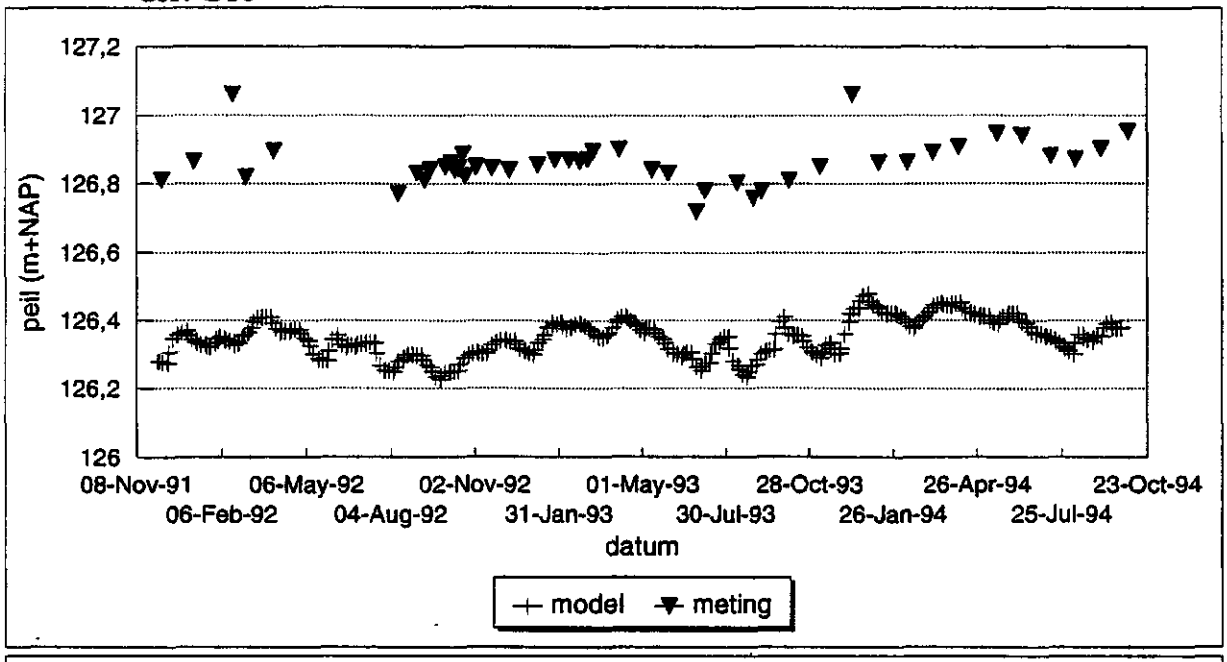


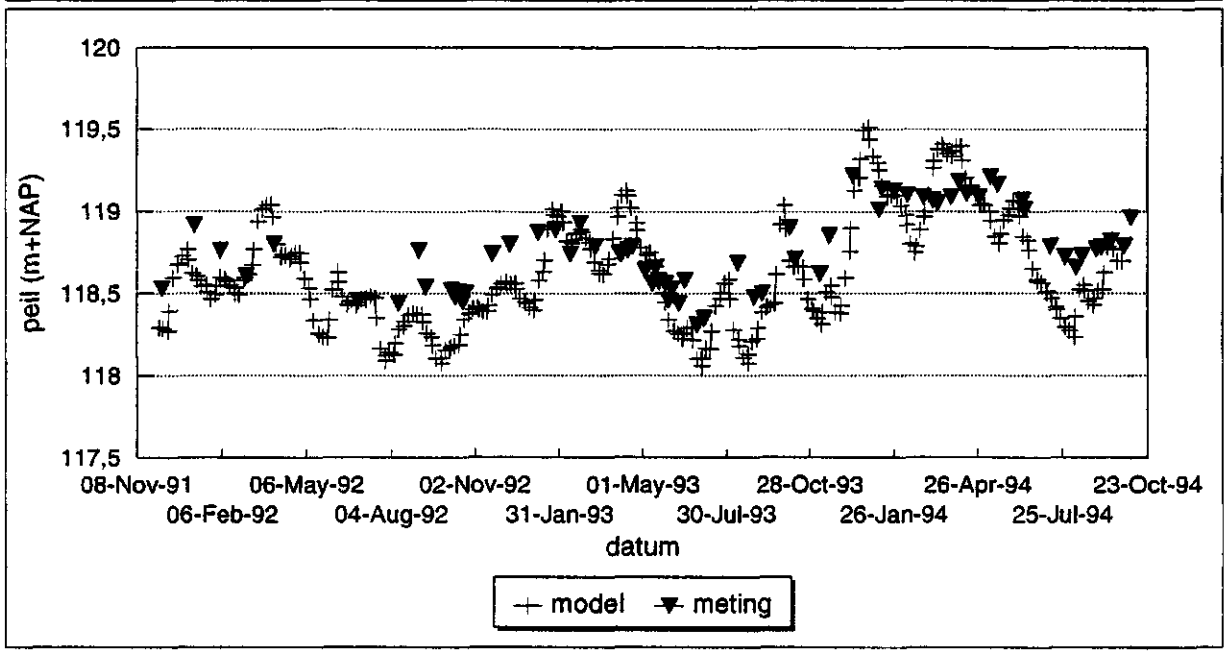
Bijlage V (vervolg) Waargenomen en gesimuleerde tijd-stijghoogtelijnen voor waarnemingspunten aan de rand van het plateau met matig diepe grondwaterstanden. Boven: OW7 en onder: B17

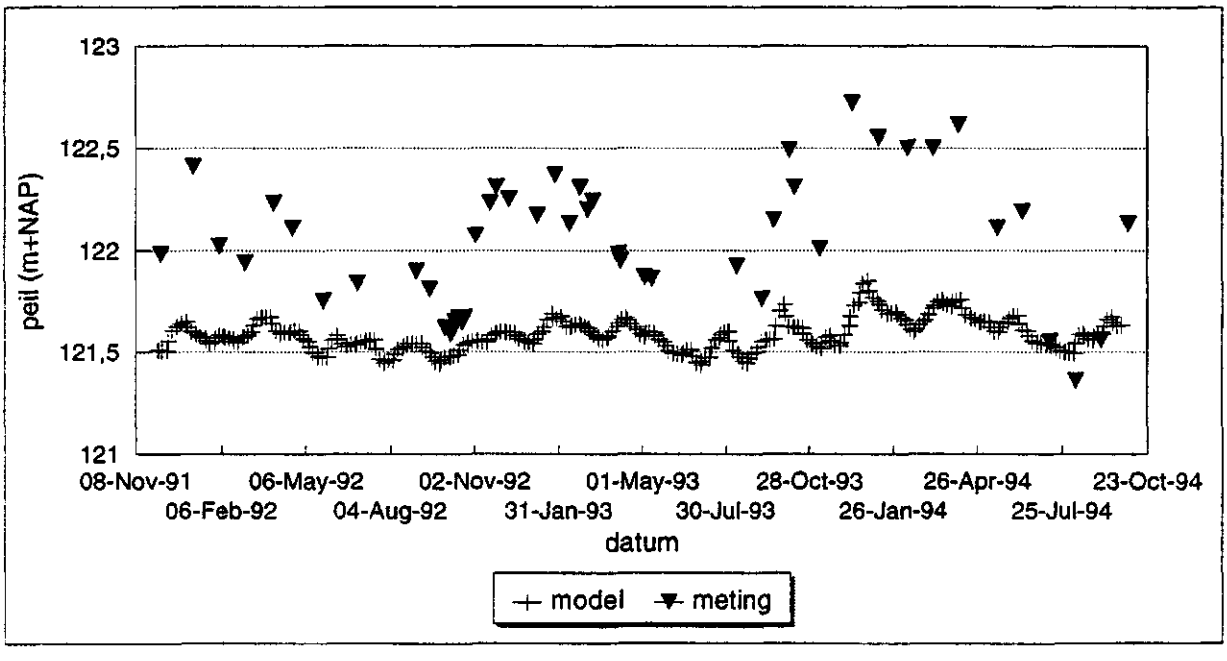




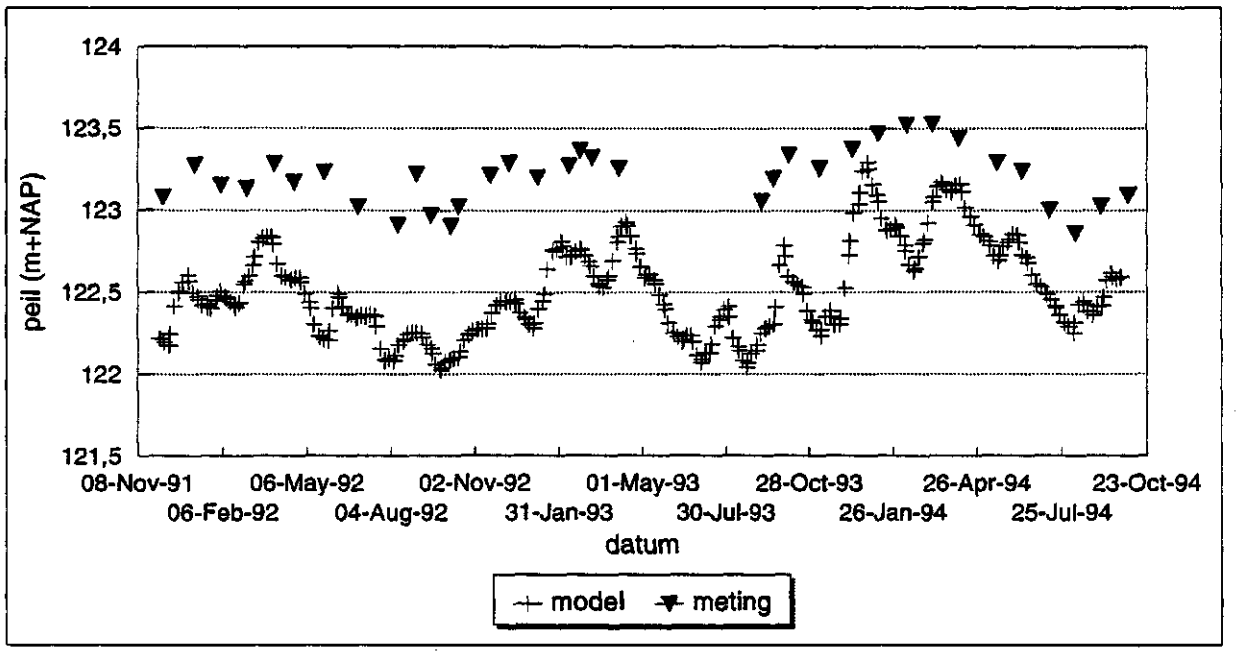
Bijlage V (vervolg) Waargenomen en gesimuleerde tijd-stijghoogtelijnen voor waarnemingspunten in het dal met ondiepe grondwaterstanden. Boven: B3, midden: B13 en onder: B10

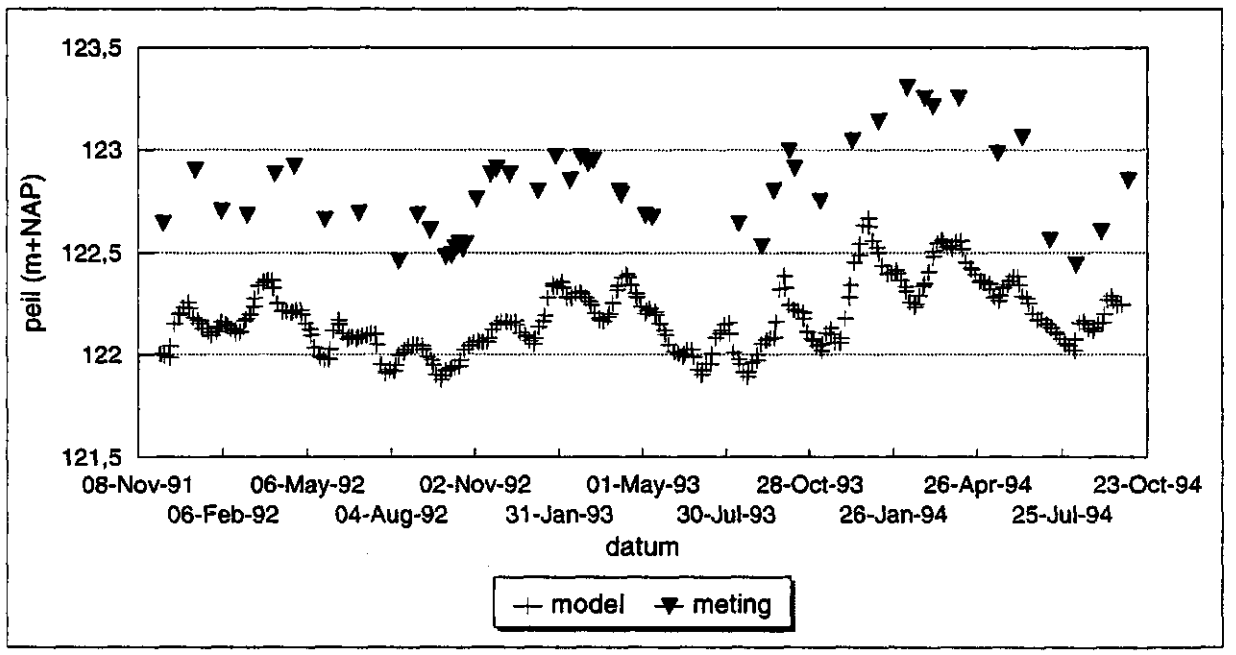


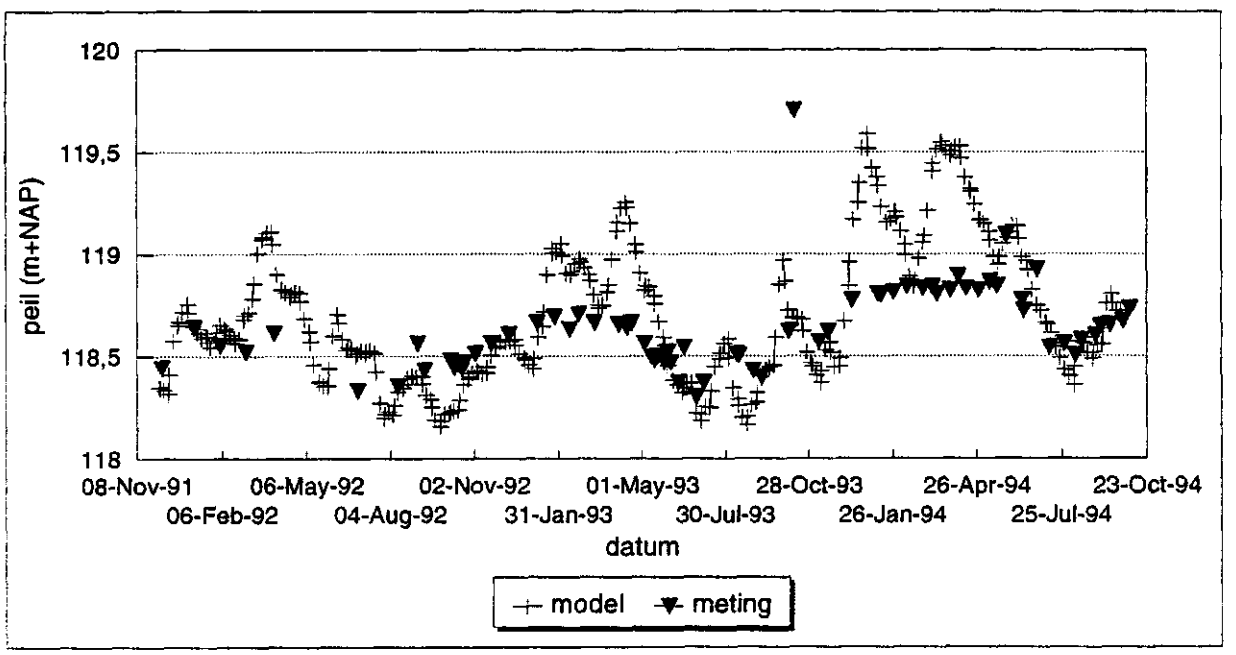
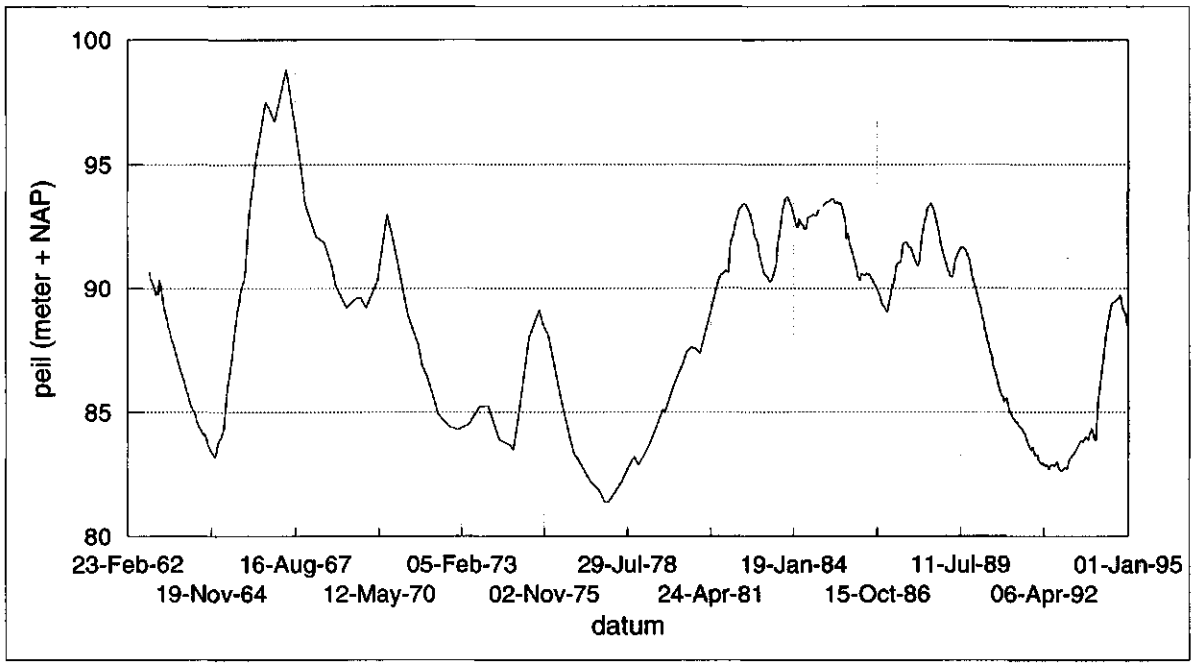




Bijlage V (vervolg) Waargenomen en gesimuleerde tijd-stijghoogtelijnen voor waarnemingspunten in het dal met diep grondwater. Boven: B9a, midden: B10a en onder: B13a







Bijlage VI Waargenomen stijghoogten onder het plateau in Libeek (WP99)