
Geofysisch en hydrologisch onderzoek op de stuwwallen bij het Montferland voor de kartering van hydrogeologische eenheden

B.J.M. Goes
R.G.B.M. Tank

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Verdroging en verontreiniging zijn twee belangrijke thema's van het huidige grondwaterbeheer in Nederland. Om effectieve beheersmaatregelen te kunnen nemen worden scenario's doorgerekend op basis van grondwaterstromingsmodellen. De betrouwbaarheid van deze modellen hangt onder andere af van de kennis van de opbouw van de ondergrond. De grotendeels grofzandige stuwwallen behoren tot de belangrijkste grondwaterreservoirs van Nederland. Doeltreffend grondwaterbeheer is hier uiterst moeilijk omdat de door de stuw-
wing ontstane hellende kleilagen in het watervoerende pakket de hydrogeologische opbouw zeer complex maken. Er is dus behoefte aan een methode om de hydrogeologie, en met name de laterale grondwaterstromingsbarrières, in gestuwde gebieden te karteren. Een eenvoudige manier om de complexiteit van de ondergrond in kaart te brengen is er niet. Boringen geven een weinig representatief beeld omdat de lithologie binnen de gestuwde afzettingen over een zeer korte afstand kan variëren en omdat ze weinig zeggen over de helling en strekking van de lagen. Een oplossing van dit probleem kan worden gezocht in een combinatie van een grondige analyse van hydrogeologische gegevens en geofysische onderzoek.

In 1997 is het project Ontwikkeling Ondiepe Data Acquisitie Methoden (OODAM III) van start gegaan. Het project is een samenwerking tussen NUON Water, Waterbedrijf Gelderland (WG) en TNO – het Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen (TNO-NITG). Het belangrijkste doel van het project is de ontwikkeling van een methode die gebruik maakt van geofysische technieken en hydrologische data-analyse om hydrogeologische eenheden in de stuwwallen te karteren. In het kader van dit project is een studie verricht op het Montferland (Goes en Tank, 2000). Parallel aan dit onderzoek is, in opdracht van WG, een eerste aanpassing gedaan van het lokale grondwatermodel om een indicatie te krijgen van de gevolgen van de herziene hydrologische indeling (Arcadis, 1999). Dit artikel presenteert de belangrijkste resultaten uit bovenstaande twee rapporten.

Bart Goes is werkzaam bij TNO-NITG, e-mail b.goes@nitg.tno.nl en **René Tank** is werkzaam bij Arcadis, e-mail r.g.b.m.tank@arcadis.nl.

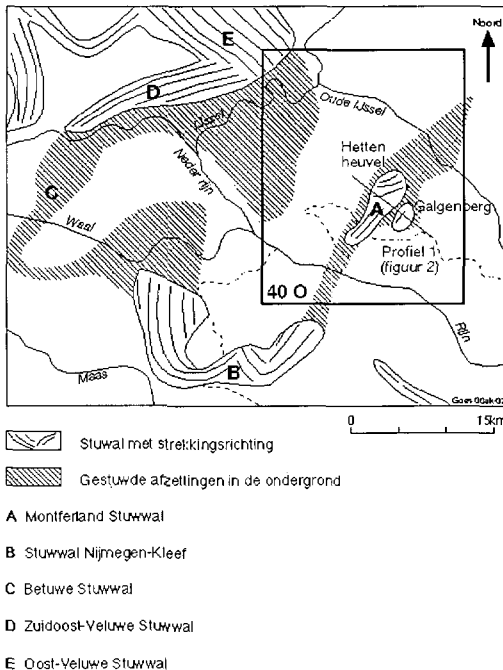
1.2 Onderzoeksgebied en probleemstelling

GEOLOGIE

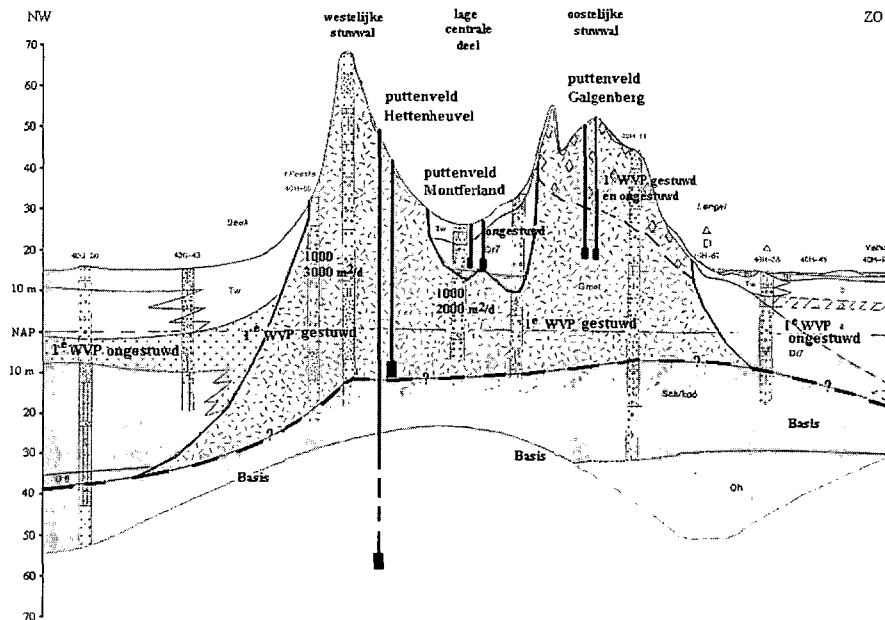
Het Montferland is een stuwwallencomplex in het oosten van Nederland. Het stuwwallencomplex, dat door het in het Saalien aanwezige landijs gevormd is, bestaat uit een grote westelijke stuwwal (van Hettenheuvel tot Eltenberg) en een kleinere oostelijke stuwwal (Galgenberg, figuur 1). In het dal tussen de twee stuwwallen liggen fluvioglaciale sedimenten op de begraven gestuwde afzettingen. Tussen de fluvioglaciale afzettingen en de gestuwde afzettingen ligt hier plaatselijk keileem. De oostelijke stuwwal bestaat behalve uit een kern van gestuwde afzettingen ook uit fluvioglaciale sedimenten. De exacte verbreding van de fluvioglaciale sedimenten op de oostelijke stuwwal is niet bekend. In het dal en aan de randen van de stuwwal zijn gedurende het Weichselien lokaal ook fijne eolische sedimenten afgezet (RGD, 1977). De top van de Hettenheuvel ligt op circa 90 m +NAP. Het dal tussen de stuwwallen ligt op circa 25 m +NAP. Het landgebruik op de stuwwal is voornamelijk bos, aan de flanken is vooral akkerbouw te vinden terwijl weidegronden in het vlakke landschap domineren.

HYDROGEOLOGIE EN GRONDWATERONTTREKKINGEN

Het eerste watervoerende pakket (WVP1) op het Montferland bestaat uit gestuwde en ongestuwde grove grindhoudende zanden. In de gestuwde afzetting komen hellende kleilagen voor. Hoeveel en waar vermeldt de literatuur niet. In de ongestuwde afzettingen in het dal is lokaal tussen 10 en 20 m –mv een scheidende kleilaag (keileem) aanwezig. De



Figuur 1: Ligging van het Montferland en omliggende stuwwallen (gebaseerd op RGD, 1977).



Figuur 2: Schematisch hydrogeologisch profiel Montferland met de drie puttenvelden (locatie profiellijn in figuur 1, gebaseerd op RGD 1977).

hydrologische basis van het eerste watervoerend pakket bestaat uit slecht doorlatende Tertiaire afzettingen (figuur 2).

WG heeft drie puttenvelden in het gebied: Hettenheuvel, Montferland en Galgenberg. Het grootste deel van het water (> 90%) wordt onttrokken uit WVP1. Van begin jaren 70 tot begin jaren '90 schommelde de totale onttrekking tussen de 3 en 4 miljoen m³/j. Sinds begin jaren '90 is de totale onttrekking gereduceerd naar minder dan 1 miljoen m³/j omdat het nitraatgehalte in een aantal putten (Montferland en Galgenberg, tabel 1) de drinkwaternorm (50 mg/l) overschrijdt. Om de onttrekkingen weer te kunnen verhogen is een beter inzicht in de grondwaterstroming en dus de hydrogeologische opbouw van het gebied nodig.

2 Hydrogeologische data-analyse

Het doel van de hydrogeologische data-analyse is het bepalen van hydrologische eenheden. Deze voorlopige indeling is gebruikt voor de planning van de aansluitende geofysische metingen.

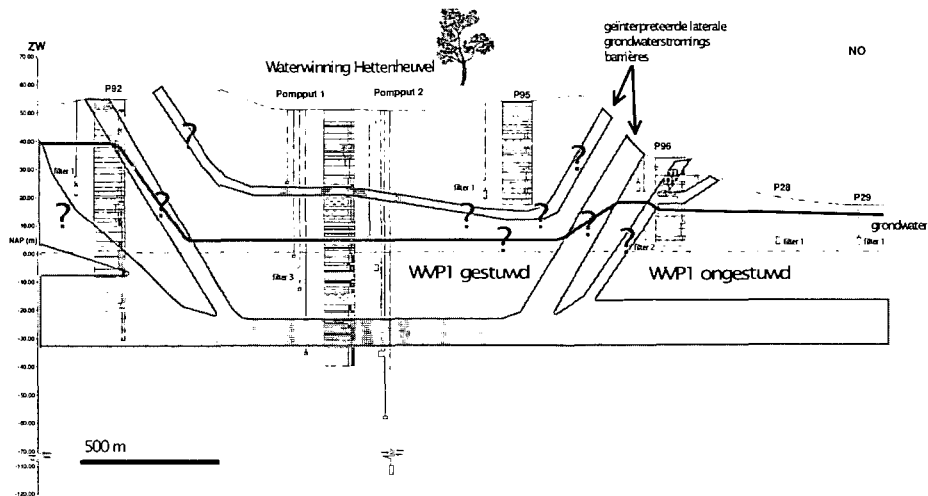
2.1 Grondwaterstanden en boorbeschrijvingen

Figuur 3 presenteert het isohypsenpatroon van WVP1 voor het Montferland en omgeving. Met uitzondering van de westelijke stuwwal (Hettenheuvel) liggen de waargenomen stijghoogtes tussen de 11 en 14 m +NAP. Op de westelijke stuwwal is een aantal grondwaterstanden gemeten die veel hoger zijn dan de omgeving (18 tot 39 m +NAP). De gemeten freatische grondwaterstand op de oostelijke stuwwal ligt tussen de 12 en 13 m +NAP.

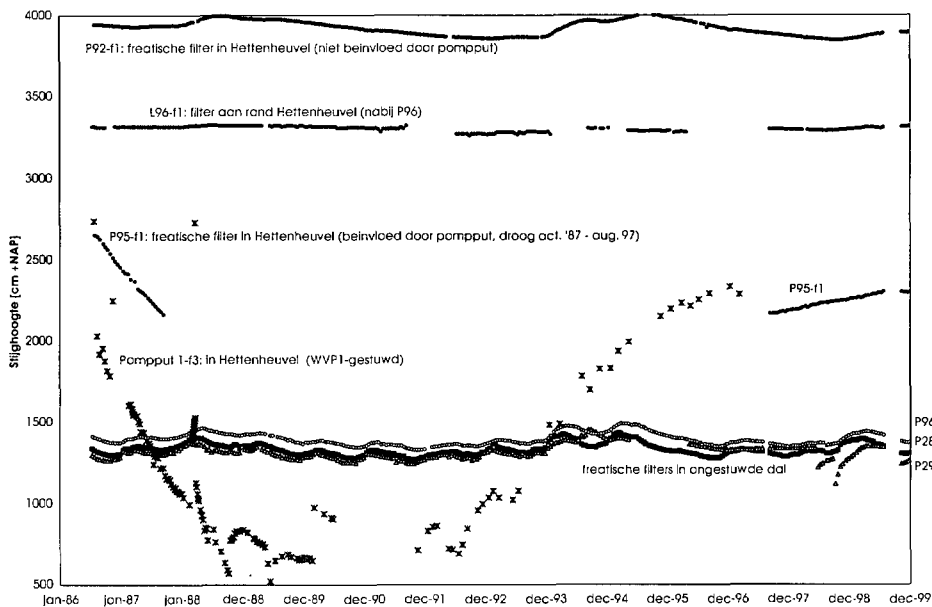
De hoge grondwaterstanden op de westelijke stuwwal duiden op laterale grondwaterstromingsbarrières en/of schijnspiegels. Figuur 4 presenteert een mogelijke hydrogeologische interpretatie, op basis van boringen en grondwaterstanden, van een profiel door de weste-



Figuur 3: Gemeten grondwaterstanden en isohypsenpatroon WVP1.



Figuur 4: Een mogelijke hydrogeologische interpretatie van een profiel door de Hattenheuvel met actieve pompputten (profiellijn 2, figuur 3) op basis van boorbeschrijvingen en grondwaterstanden (1989-91).



Figuur 5: Tijdreeksen van de peilbuizen op het profiel door de Hattenheuvel (locaties: figuur 4).

lijke stuwwal. De interpretatie bestaat uit de ingetekende locaties van mogelijke laterale grondwaterstromingsbarrières. Het grote stijghoogteverschil tussen de peilbuis in de buurt van de grondwaterwinning (P95-1) en peilbuis P92-1 (verschil is minimaal 18 m, figuur 5) duidt erop dat peilbuis P92-1 niet beïnvloed wordt door de grondwaterwinning op de Hattenheuvel. Dit is ook zichtbaar in de gelijkmatige tijdreeks van peilbuis P92-1 (figuur

5). Eén of meer laterale grondwaterstromingsbarrières tussen de waterwinning en peilbuis P92-1 zijn dus waarschijnlijk. Wanneer het niveau in de pompput 1 (filter 3) daalt (1987) laat P95-1 ook een daling zien en P95-1 stijgt weer nadat het niveau in de pompput ook gestegen is (1997/8). Tussen deze peilbuis en de waterwinning is dus een goed hydrologisch contact. De grote daling van het waterniveau in de filters van pompputten 1 en 2 (~20 m) en in peilbuis P95 (filter 1) is een sterke aanwijzing dat het hydrologische compartiment waaruit gepompt wordt een beperkte afmeting heeft. De tijdreeksen van de drie peilbuizen in het ongestuwde laagland (P96-2, P28-1 en P29-1) hebben een ander, maar onderling vrijwel identiek, patroon. Alleen hoe verder de peilbuis van de stuwwal ligt, hoe lager de grondwaterstand is. Ook de tijdreeksen van deze peilbuizen worden niet beïnvloed door de grondwaterwinning uit WVP1 op de Hettenheuvel (pompput 1).

Het feit dat de gemeten freatische grondwaterstanden op de oostelijke stuwwal niet verhoogd zijn (de Galgenberg, figuur 3) duidt er op dat er hier niet of nauwelijks laterale grondwaterstromingsbarrières aanwezig zijn. Een verklaring hiervoor is de aanwezigheid van ongestuwde fluvioglaciale afzettingen op deze stuwwal (figuur 2).

2.2 Hydrochemie

De grondwaterkwaliteit van de puttenvelden op de Galgenberg en in het Montferlanddal (beide WVP1, figuur 2) onderscheidt zich door hoge nitraat- en zuurstofconcentraties en een lage ijzerconcentratie van het puttenveld op de Hettenheuvel (WVP1 en WVP2) waar lage nitraat- en zuurstofconcentraties en een hoge ijzerconcentratie gemeten zijn (tabel 1). De grondwaterchemie bevestigt dus het op grond van de gemeten grondwaterstanden gevonden onderscheid tussen de grondwatersystemen Hettenheuvel en Galgenberg/Montferland. Vanwege het hoge nitraatgehalte valt te concluderen dat het intrekgebied voor de puttenvelden Galgenberg en Montferland (deels) uit landbouwgrond bestaat. Het monster uit WVP1 op de Hettenheuvel heeft een hogere ijzer- en sulfaatconcentratie dan de twee monsters uit WVP2, hetgeen mogelijk duidt op twee verschillende grondwatersystemen.

Tabel 1: Chemische kenmerken van het grondwater van de drie puttenvelden op het Montferland.

Locatie pompputten	Aantal putten of monsters	NO ₃ ⁻ [mg/l]	HCO ₃ ⁻ [mg/l]	O ₂ [mg/l]	Fe [mg/l]	SO ₄ [mg/l]
WVP1 Montferland	11	19–85	32–107	5,9–8,6	0,01–0,07	26–131
WVP1 Galgenberg	4	17–84	34–113	7,8–10	0,005–0,0	30–40
WVP1 Hettenheuvel	1	0,5	149	0,6	2,6	67
WVP2 Hettenheuvel	2	0,5	163	0,5	0,5	0,5–76–0,96

Bron: Beek en Beekman (1998).

3 Geofysisch onderzoek

Het doel van het geofysische onderzoek is het bepalen en verifiëren van locaties van laterale grondwaterstromingsbarrières.

3.1 Achtergrond gebruikte technieken

GEORADAR

In het studiegebied is in totaal 20 km radarprofiel (figuur 6) opgenomen met pulseEKKO IV-apparatuur van de Canadese firma Sensors & Software (Davis en Annan, 1989; Sensors & Software (1996)).

Radargolven zijn elektromagnetische golven. De door de zendantenne uitgezonden golf-energiepuls wordt op ondergrondse grensvlakken met een contrasterende diëlektrische constante ϵ voor een deel gereflecteerd, de rest wordt doorgelaten en kan deels weer door een dieper grensvlak worden gereflecteerd. De diëlektrische constante houdt verband met het opbouwen van een polarisatielading in een medium bij het aanbrengen van een elektrisch veld. De gereflecteerde golven worden aan het oppervlak door een ontvangstantenne gemeten en vervolgens opgeslagen in een computer. Het resultaat is een radarprofiel met op de x-as de positie op het profiel waarin, op een regelmatige afstand (iedere 0,5 m bij de gebruikte frequentie van 50 MHz), een 'trace' die de gemeten reflecties in de tijd weergeeft op de negatieve y-as. De reflecties kunnen verduidelijkt worden door bepaalde verwerkings-technieken toe te passen, zoals versterking en middeling van traces. De twee bovenste horizontale signalen in het radarprofiel ('zwarte banden') worden veroorzaakt door de snelle directe golf door de lucht en de iets langzamere directe golf door de bodem. Door de aanwezigheid van deze signalen geeft het radarprofiel bij een frequentie van 50 MHz geen informatie over ongeveer de bovenste twee meter van de ondergrond. Het maaiveld in het radarprofiel ligt binnen de bovenste reflector (figuur 6). Met behulp van zogenaamde snelheidsmetingen en/of correlatie met gemeten grondwaterstanden worden de aankomsttijden van de reflecties omgezet in een diepte.

De voortplantingssnelheid van radargolven is het grootst in (droge) media met een kleine diëlektrische constante (droog zand). De mate van reflectie (duidelijkheid van de reflector in het radarprofiel) hangt af van het verschil in diëlektrische constanten; veen geeft een goed contrast met alle media, ook een grondwaterspiegel binnen een zandpakket geeft een duidelijke reflectie. Belangrijk voor dit project is dat de diëlektrische constante van waterverzadigd zand binnen de brede range van klei valt; kleilagen zijn dus niet altijd goed detecteerbaar met georadar. Wanneer een reflectie wordt waargenomen op het radarprofiel dan is correlatie met boringen en/of sonderingen nodig om met zekerheid vast te stellen of een bepaalde reflectie veroorzaakt wordt door een kleilaag binnen een zandpakket of bijvoorbeeld door een overgang van grof zand naar fijn (vaak iets vochtiger) zand. Een met de radar waargenomen sprong in de grondwaterspiegel is wel een éénduidige aanwijzing voor een scheefstaande kleilaag (bijvoorbeeld Van Overmeeren (1994)).

Hoe lager de elektrische weerstand van de bodem, des te geringer is de doordringingsdiepte van de elektromagnetische golven van de GPR (Ground Penetrating Radar). In de praktijk is GPR niet geschikt in gebieden met een kleiige toplaag of in afzettingen met brak en zout water. In de gestuwde afzettingen van het studiegebied is de doordringing van de radar (50 MHz) 15 tot 25 m –mv.

MECHANISCHE SONDERINGEN

In het studiegebied zijn, in het kader van het onderzoek, 20 mechanische sonderingen ('Cone Penetration Tests') uitgevoerd door Fugro Ingenieursbureau B.V. De sonderingen zijn gedaan om de georadarmetingen (zie hieronder) beter te kunnen interpreteren.

Bij een mechanische sondering wordt een conus de grond ingedrukt waarbij de druk op de conus (conusweerstand) en de weerstand op de mantel van de conus (kleef of wrijvingsweerstand) continu gemeten wordt. Wanneer de conus door een kleilaag gedrukt wordt dan is, in verhouding tot een zandlaag, de conusweerstand laag en de wrijvingsweerstand hoog. Het wrijvingsgetal is het quotiënt van de wrijvingsweerstand en de conusweerstand vermenigvuldigd met een factor 100. Het wrijvingsgetal is een goede indicatie voor de grondsoort. Typische waarden zijn gepresenteerd in tabel 2.

Tabel 2: Literatuurwaarden van wrijvingsgetal voor diverse grondsoorten

Grondsoort	Wrijvingsgetal [%]
Grind, grof zand	0,2–0,6
Zand	0,6–1,2
Silt, leem, loss	1,2–4,0
Klei	3,0–5,0
Potklei	5,0–7,0
Veen	5,0–10,0

Bron: Fugro Ingenieursbureau B.V.

Tevens is op sommige locaties met de sondeerconus de waterspanning gemeten. Een constant (met de diepte) oplopende waterspanning duidt op de grondwaterspiegel. Boven slecht permeabele lagen (klei) kan de waterspanning lokaal verhoogd zijn.

3.2 Resultaten

DE STUWALLEN (HETTENHEUVEL EN GALGENBERG)

De meeste radarprofielen op de westelijke stuwwal (Hettenheuvel tot Huizenberg) laten een hoogfrequente afwisseling zien van scheefstaande reflectoren (figuur 6). In de twee radarprofielen evenwijdig aan de verwachte strekking (figuur 1, NO–ZW) is de gelaagdheid overwegend horizontaal. Hieruit is afgeleid dat de laaggrenzen inderdaad NW (het noordelijke deel van de stuwwal) en WNW (het zuidelijke deel) hellen. De lagen hellen de stuwwal in omdat de grootste ijsmassa die de stuwing veroorzaakt ten noordwesten van de Hettenheuvel heeft gelegen. De locaties van de scheve sterke reflectoren zijn weergegeven in

figuur 7. Vanwege het grote aantal scheefstaande reflectoren in de radarprofielen is het lastig individuele reflectoren van naast elkaar liggende profielen aan elkaar te correleren. In het gestuwde gebied is een vijftal sondeerparen gezet om te onderzoeken of de hellende sterke reflectoren in de radarprofielen veroorzaakt worden door scheefstaande kleilagen. De afstand tussen twee sonderingen binnen een paar is 4 of 5 m. In vier sondeerparen zijn hellende kleilagen aangetoond door een stijging van het wrijvingsgetal (tabel 2) van < 2% naar 2% tot 7%. In de sondeerparen ligt het kleipakket in de zuidoostelijke sondering ongeveer 3 m ondieper dan in de noordwestelijke sondering. De schijnbare hellingshoek (het is namelijk niet met zekerheid te zeggen dat de sonderingen precies loodrecht op de strekking staan) in de sondeerparen varieert tussen de 25 en 45 graden. De voor de hellingshoek gecorrigeerde dikte van de kleilagen in de sondeerparen is 1,5 tot 3,5 m. In het radarprofiel in figuur 6 zijn twee sondeerparen (S5/6 en S7/8) in het gestuwde gebied gezet. In sonderingen S5 en S6, die beide precies hetzelfde patroon hebben, is de hellende kleilaag goed te correleren met een uitgesproken scheve reflector op het radarprofiel. In sondeerpaar S7/S8 is de correlatie minder duidelijk. Zowel in het radarprofiel als in de sondeerparen is te zien dat de kleilagen naar het NNW hellen.

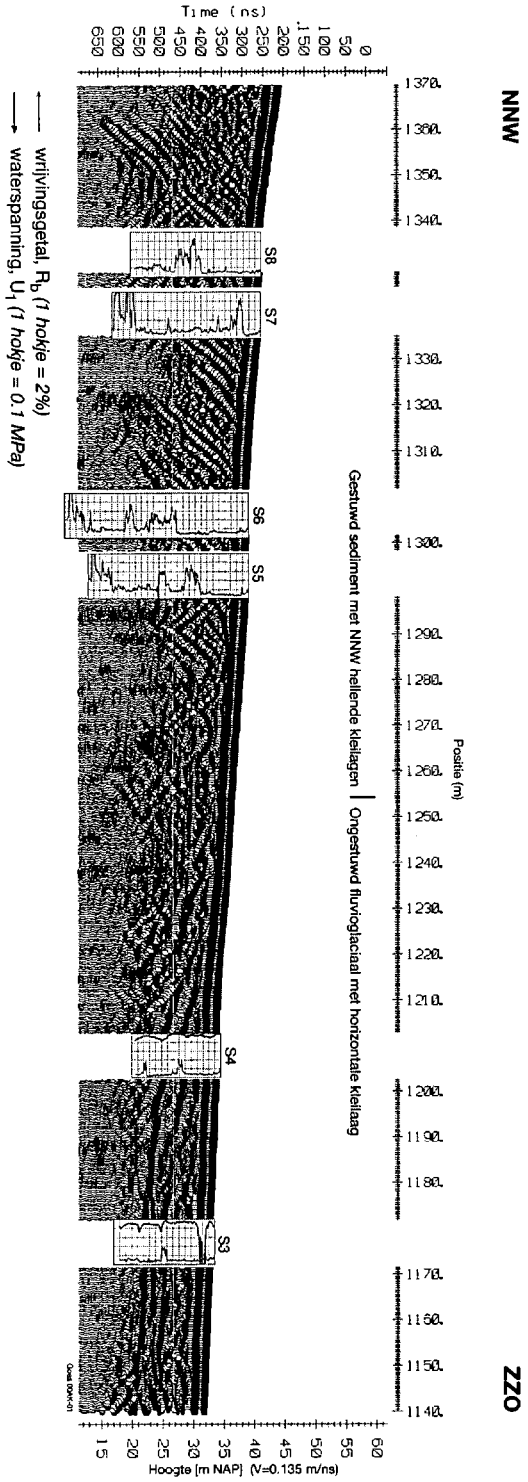
De twee radarprofielen op de Galgenberg (totale lengte ~1,5 km) laten op een klein stuk na (~150 m) een rommelig en horizontaal gelaagd patroon zien (Goes en Tank, 2000). De doordringingsdiepte van de radar is hier ongeveer 20 m –mv. Aangevuld met de lokale geologische kennis (RGD, 1977) zijn deze afzettingen geïnterpreteerd als niet gestuwde fluvio-glaciale afzettingen. Hieronder zit een niet meer voor de radar zichtbare kern van gestuwde afzettingen. Op grond van de radarprofielen kan gesteld worden dat de fluvio-glaciale afzettingen het grootste deel van de Galgenberg bedekken en dat het pakket minstens 20 m dik is. Doordat het grondwaterniveau op de stuwwallen relatief diep zit (> 20 m –mv) zijn er maar weinig zekere grondwaterstandswaarnemingen gedaan met de radar.

HET DAL (DE LAAGTE VAN ZEDDAM)

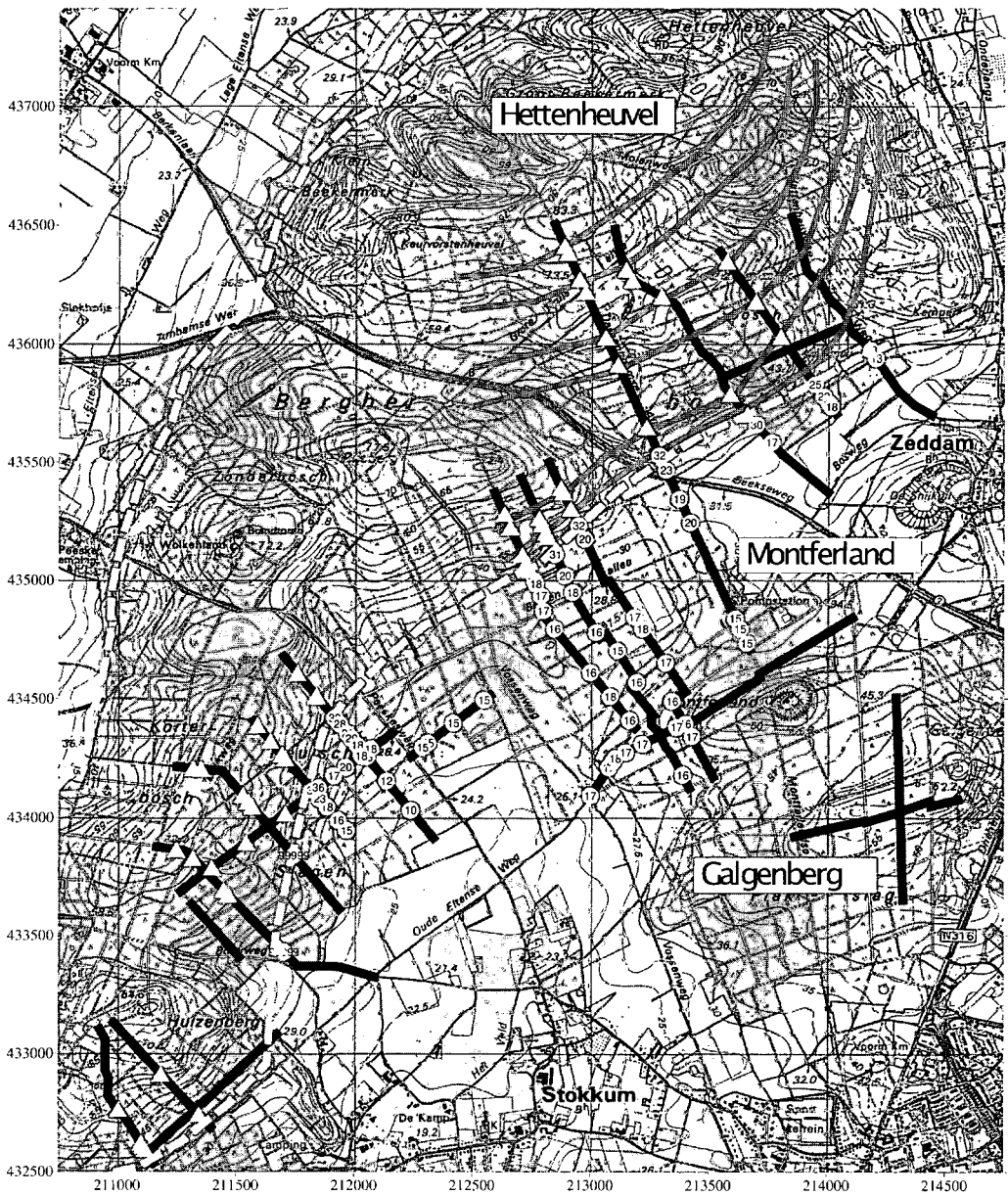
De grens aan het oppervlak tussen de gestuwde en ongestuwde afzettingen is duidelijk zichtbaar op de radarprofielen (figuur 6). Op de meeste (9 van de 12) radarprofielen bestaat de grens uit één of twee naar het dal (ZO) wegduikende reflectoren. Sonderingen S3 en S4 hebben aangetoond dat de wegduikende reflector een kleilaag is. Op de kaart (figuur 7) is op basis van de op de radarprofielen waargenomen overgangen tussen gestuwd en ongestuwd sediment de grens zo nauwkeurig mogelijke ingetekend.






In de ongestuwde afzetting in het dal is op een aantal plaatsen op een diepte van 10–20 m –mv een uitgesproken horizontale reflector waargenomen. De NAP hoogtes van de reflectoren zijn aangegeven op figuur 6. De reflectoren zijn te ondiep om als grondwaterspiegel (verwachte grondwaterstand ~13 m NAP, figuur 3) te worden geïnterpreteerd en op een aantal radarprofielen lijkt de reflector, met onderbrekingen, verbonden met de reflector van de hierboven beschreven hellende kleilaag tussen de gestuwde en ongestuwde afzettingen. Twee sonderingen (Goes en Tank, 2000), waarin ook de waterspanning is gemeten, tonen aan dat de reflector een kleilaag is. Aangevuld met de lokale geologische kennis (RGD, 1977) is deze laag geïnterpreteerd als keileem. De kleilaag in het dal is niet continu omdat hij niet in alle boringen en niet in alle radarprofielen is aangetroffen. De laag is daarom slechts een beperkte barrière voor verticale grondwateraanvulling.

Figuur 6: Geordarprofiel met gestuwde en ongestuwde sedimenten en sonderingen. Wrijvingsgetal: 0-as zit rechts; waterspanning: 0-as zit links.



getal: 0-as zit rechts; waterspanning: 0-as zit links.

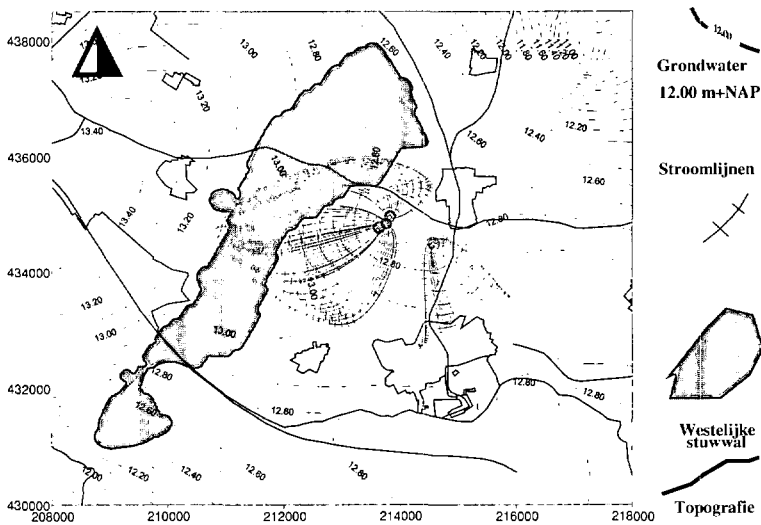


-  georadarprofiel
-  grens gestuwd ongestuwd
-  mogelijke locatie laterale grondwater stromingsbarrières
-  uitgesproken scheve reflector op radarprofiel
-  15 uitgesproken horizontale reflector op 15 m +NAP (geïnterpreteerd als keileem)

Figuur 7: Georadarprofielen met de volgende interpretaties: grens gestuwd–ongestuwd sediment aan het oppervlak, locaties scheve sterke reflectoren in de gestuwde afzettingen en diepte horizontale reflectoren in het ongestuwde dal.

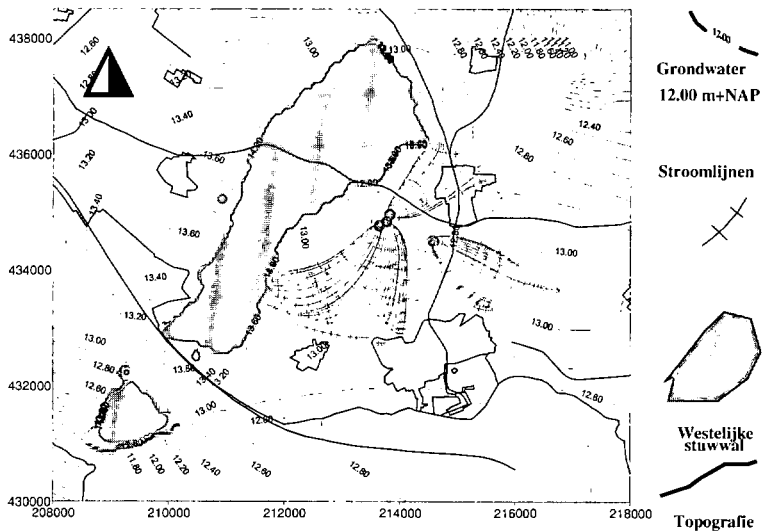
4 Eerste aanpassing grondwatermodel

Op basis van het regionale Oost-Gelderlandmodel (SIMGRO, Grontmij (1995)) is voor het onderzoek een lokaal model (in MicroFEM) gemaakt van het onderzochte stuwwallencomplex en de directe omgeving. In dit model zijn de oostelijke en de westelijke stuwwal als goed doorlatende eenheden ingebracht. Lokaal verhoogde freatische grondwaterstanden, uitgesproken scheve reflectoren op radarprofielen en een viertal sondeerparen hebben echter aangetoond dat er laterale grondwaterstromingsbarrières aanwezig zijn op de westelijke stuwwal. Vanwege de talrijkheid van de scheve sterke reflectoren op de radarprofielen is het niet goed mogelijk scheefstaande reflectoren van naburige meetlijnen aan elkaar te koppelen voor de kartering van individuele laterale grondwaterstromingsbarrières. Op basis van deze onderzoeksresultaten is een tweede lokaal model gemaakt (het aangepaste MicroFEM-model) waarin, als verandering ten opzichte van het oorspronkelijk lokale model, de westelijke stuwwal als een dichte bak is ingebracht. De met behulp van de georadar nauwkeurig gekarteerde oppervlakkige grens tussen gestuwd en ongestuwd sediment is ook in het aangepaste grondwatermodel ingebracht. De oostelijke stuwwal is (conform het oorspronkelijke model) als goed doorlatend in het aangepaste model gebracht omdat de freatische grondwaterstand hier niet verhoogd is ten opzichte van de omgeving en omdat georadar metingen hebben aangegeven dat waarschijnlijk minstens de bovenste 20 m van de ondergrond ongestuwd is.



Figuur 8: Grondwatermodellering Montferland conform het Oost-Gelderlandmodel met de westelijke stuwwal als goed doorlatend.

Er zijn voorlopige berekeningen uitgevoerd met behulp van de twee lokale modellen. In het aangepaste lokale model is het intrekgebied van de pompputten in het Montferland/Galgenberg verschoven ten opzichte van het oorspronkelijke model. Het intrekgebied is naar het zuiden en noorden groter geworden (figuren 8 en 9). In deze gebieden is relatief veel akkerbouw en veeteelt hetgeen verklaart waarom de pompputten in het dal van het Montferland een relatief hoge concentratie nitraat bevatten (tabel 1). De pompputten op de



Figuur 9: Grondwatermodellering Montferland met de westelijke stuwwal als grotendeels een dichte bak.

westelijke stuwwal (Hettenheuvel), waarvoor het intrekgebied in het aangepaste model alleen de beboste stuwwal zelf is, bevatten niet of nauwelijks nitraat (tabel 1).

5 Samenvatting en conclusies

De combinatie van hydrogeologische data analyse (grondwaterstanden, nitraatgehalte grondwater en de geologische kaart) met georadarmetingen, die deels geverifieerd zijn met sonderingen, hebben geleid tot een onderscheid in twee hydrogeologische eenheden binnen WVP1. Dit zijn: (1) de westelijke stuwwal (de Hettenheuvel) met vele laterale grondwaterstromingsbarrières en (2) de goed doorlatende Laagte bij Zeddam en de oostelijke stuwwal die bedekt is met een dikke laag (> 20 m) goed doorlatende ongestuwde fluvioglaciale sedimenten (de Galgenberg). Dit inzicht heeft geleid tot een voorlopig aangepast lokaal grondwater model. Ten opzichte van het oorspronkelijke model is in het aangepaste lokale model het intrekgebied van het puttenveld Montferland/Galgenberg, dat het hoogste nitraatgehalte heeft, verschoven van een gebied met veel bossen, weide en landbouw naar een gebied met minder bossen en veel weide en akkerbouwgrond. Het intrekgebied van de nitraatarme pompput in WVP1 op de westelijke stuwwal (Hettenheuvel) heeft, vanwege de vele laterale grondwaterstromingsbarrières, maar een zeer beperkte (onbekende) afmeting.

De georadarmetingen geven vooral inzicht in de precieze grens aan het oppervlak tussen de gestuwde afzettingen en de meer horizontaal gelaagde fluvioglaciale afzettingen. Verder geeft de radar een duidelijk inzicht in de structuur (hellingsrichting) van het gestuwde materiaal en de locaties van mogelijke laterale grondwaterstromingsbarrières. De grondwaterspiegel zit meestal te diep (> 20 m -mv) om goed te worden waargenomen.

Verificatie van een aantal scheve sterke reflectoren op de radar met sondeerparen laat zien dat ze, in het studiegebied, meestal (vier van de vijf sondeerparen) uit kleilagen bestaan. De oorsprong van minder duidelijke scheve reflectoren is echter onzeker. Het kunnen kleilagen zijn die, in verband met het grote bereik van de diëlektrische constante van klei, wei-

nig of geen contrast hebben met die van het zand. Wanneer zekerheid gewenst is over de oorsprong van scheve reflectoren zijn sonderingen dus vooral nodig op deze minder uitgesproken reflectoren.

Op basis van het grote aantal scheve reflectoren in de radarprofielen kan gesteld worden dat het aantal laterale grondwaterstromingsbarrières op de westelijke stuwwal veel groter is dan het aantal dat op basis van de hydrogeologische data analyse bepaald is. Vanwege deze talrijkheid van de scheefgestelde reflectoren op de radarprofielen is het niet goed mogelijk individuele reflectoren van naburige meetlijnen aan elkaar te koppelen voor de kartering van individuele kleischotten, maar vast staat dat de stuwwal een grote laterale hydrologische weerstand heeft. De meetlijnen dichter naast elkaar leggen is niet mogelijk omdat in bosrijke gebieden niet of nauwelijks met radar buiten de paden gemeten kan worden. In andere gestuwde studiegebieden, waar de laterale grondwaterstromingsbarrières veel minder talrijk zijn, wordt onderzocht of de barrières van de verschillende profielen met elkaar verbonden kunnen worden.

Dankzij dit onderzoek hebben we een beter inzicht in de geologische structuur verkregen. We weten nu dat er vele barrières zijn en niet slechts enkele, zoals deze op andere locaties (Epe) wel gevonden zijn. Daarnaast is een exacte kartering van het anisotrope gebied mogelijk geworden.

Dankwoord

Het onderzoek is in diverse stadia van commentaar voorzien door Sjef Meekes (TNO-NITG) en Mariette van Vlerken (WG). De redactie van STROMINGEN wordt bedankt voor haar opmerkingen en de adviezen omtrent de figuren.

Referenties

- Arcadis (1999)** Nitraatonderzoek Montferland Fase II, Grondwaterstroming van de puttenvelden pompstation Dr van Heek. Arcadis Heidemij Advies, Waterbedrijf Gelderland.
- Beek, C.G.M. van en W. Beekman (1998)** Ontwikkeling nitraatconcentratie ruwwater ps. Dr. van Heek, oriënterende voorspelling. KIWA Nieuwegein, KO 98.118, Waterbedrijf Gelderland.
- Davis, J.L. en Annan, A.P. (1989)** Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy; in: Geophysical Prospecting 37, pag 531–551.
- Goes, B.J.M. en R.G.B.M. Tank (2000)** Hydrologisch en geofysisch onderzoek op het Montferland; Stichting Ontwikkeling van Ondiepe Data Acquisitie Methoden, TNO-rapport NITG 00-111-b.
- Grontmij (1995)** Modellerings watersysteem Oost-Gelderland, ecohydrologische effecten drinkwaterwinning; Grontmij, Waterbedrijf Gelderland.
- Overmeeren, R.A. van (1994)** Georadar for hydrogeology: First Break Vol 12, NO 8, August 1994/401.
- RGD (1977)** Kaartblad Arnhem Oost (40 O). Rijks Geologische Dienst, Haarlem.
- Sensors & Software (1996)** User's guide, version 4.2. Sensors & Software Inc., Mississauga, Ontario, Canada.