De hydrochemie van het toekomstig waterwingebied Hammervlier

Samenvatting

Ten behoeve van de dimensionering van een te bouwen zuiveringsinstallatie is er door de WMO en de VU in het Hammervlier een hydrochemisch onderzoek uitgevoerd. Hierbij is een systeemanalytische benadering toegepast om processen die bepalend zijn voor de waterkwaliteit in het Hammervlier te onderscheiden.
Voor wat betreft het centrale deel van het Hammervlier hangen deze processen nauw samen met de lage redox-potentialen en pH-waarden in de ondergrond.
Het grondwater is oud en heeft een natuurlijke ontwikkeling gehad. Hoge ijzer- en methaangehaltes zijn karakteristiek voor dit grondwatertype. De hoger gelegen gebieden aan de randen van het Hammervlier daarentegen vormen systemen die door menselijke activiteiten beïnvloed zijn. Het grondwater is jong en bevat relatief veel sulfaat en chloride.
Bij grondwaterwinning wordt voor de pompput in het centrum van het Hammervlier conservatieve menging verwacht. In de omgeving van de pompput aan de rand van het Hammervlier kunnen echter veranderingen optreden door reacties (ijzersulfidevorming) bij menging van verschillende watertypes. Putverstopping kan hiervan het gevolg zijn. Een exacte voorspelling van de te verwachten waterkwaliteit is in dat geval zeer moeilijk te maken omdat er onvoldoende gegevens zijn omtrent de mengverhouding van de verschillende watertypes en de snelheid waarmee reacties optreden.

Inleiding

Het Hammervlier is een laag gelegen weidegebied in het oosten van Overijssel (afb. 1). Het is een kwelgebied met 's winters wateroverlast. Aan de noord- en zuidzijde van het Hammervlier bevinden zich hoger gelegen natuurgebieden; het Beerzerzand en de Zandstuwe. Tussen deze natuurgebieden en het Hammervlier liggen akkerbouwgebieden. Ten westen van het Hammervlier bevindt zich een bosgebied, aan de oostzijde wordt het gebied begrensd door het Overijssels kanaal.



DRS. J. F. M. VAN BRUSSEL
Vrije Universiteit*

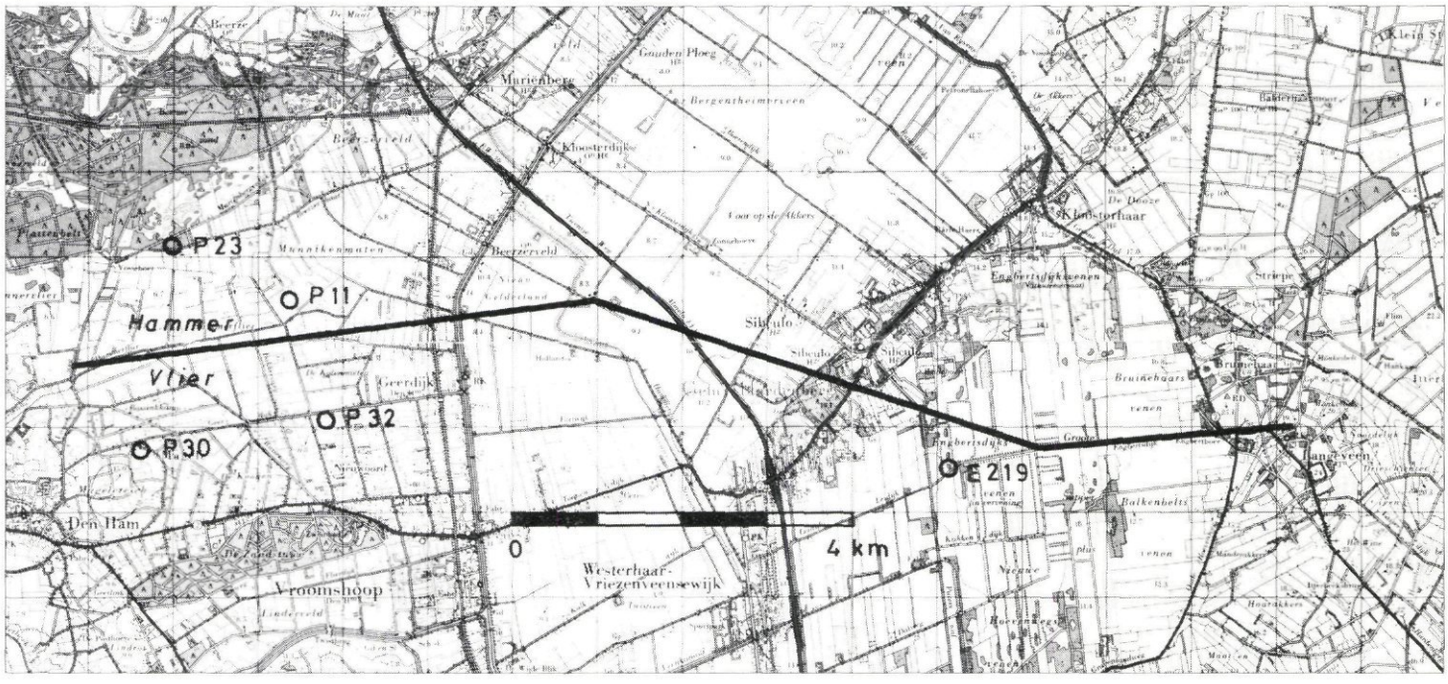
Samen met de Dienst Landinrichting heeft de Waterleiding Maatschappij 'Overijssel' onderzocht in hoeverre grondwaterwinning een positieve bijdrage aan de waterbeheersing in dit gebied kan hebben [lit. 3 en 5]. Tijdens dit onderzoek zijn in een ten behoeve van een pompproef gemaakte pompput hoge ijzer-, methaan- en ammoniumgehalten gemeten. Dit vormde de aanleiding tot een onderzoek door de WMO en de Vrije Universiteit naar de chemische eigenschappen van het grondwater in het Hammervlier. Hierbij is gekozen voor een systeemanalytische benadering van de nulsituatie (de situatie zonder grondwaterwinning) waarin de samenhang tussen grondwaterstromingssystemen, de geologische opbouw van het gebied en de grondwaterkwaliteit bestudeerd werd. Vervolgens is, met behulp van het inzicht in de processen die actief zijn, getracht om hydrochemische veranderingen bij grondwaterwinning te voorspellen waarna tenslotte een ontwerp voor de proefzuiveringsinstallatie is gemaakt.

* Tegenwoordig Grondmechanica Delft.

De geohydrologische opbouw van het gebied

In het Hammervlier zijn twee watervoerende pakketten te onderscheiden die gescheiden zijn door een semi-doorlatende laag en die aan de onderzijde begrensd worden door een ondoorlatende basis, de formatie van Breda. Het ondiepe watervoerende pakket bestaat uit grove fluviatiele zanden behorende tot de formatie van Kreftenheye met daarop eolische zanden van de formatie van Twente. De totale dikte van het ondiepe watervoerende pakket bedraagt 8 - 10 meter. De scheidende laag bestaat uit klei- en veenafzettingen behorende tot de formatie van Asten. De dikte van deze formatie varieert in het Hammervlier van 0 tot 6 meter. Het diepe watervoerende pakket heeft een dikte van ca. 70 meter. Aan de onderzijde bestaat deze watervoerende laag uit een pakket (ca. 30 m dik) fijne fluviatiele zanden (formatie van Scheemda). Hierboven bevinden zich grove fluviatiele zanden die behoren tot de Kiezeloölietformatie en/of de formatie van Scheemda (ca. 20 m) en slecht gesorteerde uiterst grove fluvioglaciele

Afb. 1 - Overzichtskaart van het gebied met aangegeven het geohydrologisch profiel (afb. 3).

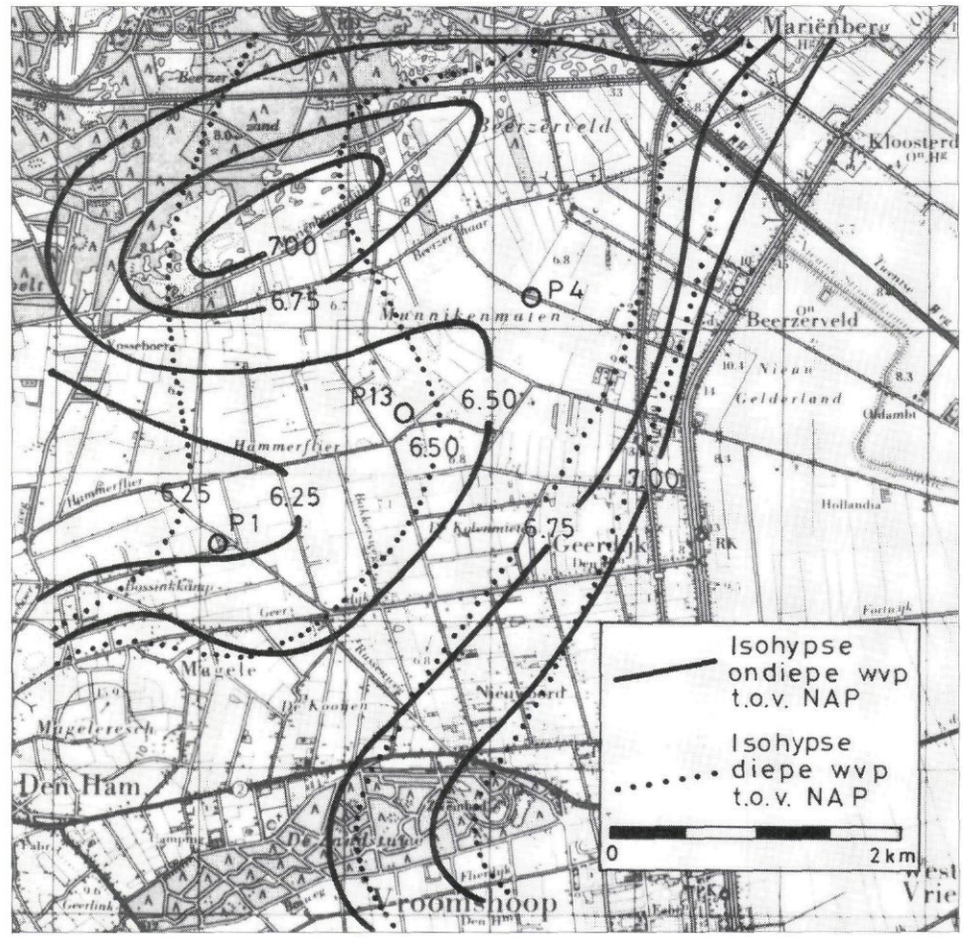


zanden van de formatie van Drente (ca. 15 m). Afwijkingen van het hiervoor beschreven profieltype worden in het noordelijk (langs de Vecht) en zuidelijk (rond Den Ham) gedeelte van het gebied veroorzaakt door de aanwezigheid van keileem (formatie van Drente). Plaatselijk is de dikte van de keileem meer dan 10 meter waardoor de grondwaterstroming aanzienlijk beïnvloed kan worden.

Het grondwaterstromingspatroon

Ten behoeve van de toekomstige waterwinning in het Hammervlier zijn er door de WMO in dit gebied een groot aantal peilbuizen geplaatst. Op de meeste locaties bevinden zich twee filters, een boven en een onder de semi-permeabele laag. In het centrale gedeelte van het Hammervlier zijn op een aantal locaties 5 of 6 filters geplaatst zodat het diepe watervoerende pakket op verschillende dieptes bestudeerd kan worden. In afb. 2 is het gemiddelde isohypsenpatroon van het ondiepe en het diepe watervoerende pakket in het voorjaar van 1985 weergegeven. Aan de noord- en zuidzijde van het Hammervlier bevinden zich infiltratiegebieden; het Beerzerzand in het noorden, de Zandstuwe en de Mageler Esch in het zuiden. In deze gebieden is de stroming in het ondiepe watervoerende pakket min of meer radiaal naar buiten gericht. In het diepe watervoerende pakket is de grondwaterstroming in het gehele gebied overwegend in westelijke richting. Vooral 's winters en in het voorjaar is de kwelstroom in het Hammervlier als gevolg van de drainerende werking van de Hammerwetering aanzienlijk. In de zomer en in het najaar is de kwelstroom gering.

Het herkomstgebied van het diepe grondwater in het Hammervlier bevindt zich ten oosten van het Overijssels kanaal. Om de hydrochemie van het grondwater in het Hammervlier te kunnen verklaren is ook dit gebied in de studie betrokken. Hierbij is gebruik gemaakt van door TNO en het RIVM geplaatste peilbuizen. Met behulp van het computerprogramma FLOWNET [lit. 2] is de grondwaterstroming gemodelleerd (afb. 3). FLOWNET is een twee-dimensionaal model dat stijghoogtes en doorlatendheden als invoer gebruikt en grondwaterfluxen en stroomlijnen als uitvoer berekent en tekent. Doorlatendheden zijn in deze studie verkregen uit de resultaten van pompproeven en boorprofielbeschrijvingen, stijghoogtes uit de archieven van de WMO en van TNO (landelijk meetnet). Bij het ijken van het model bleek dat grondwaterstroomsnelheden uiteraard sterk veranderen met variatie in doorlatendheden maar dat de stroomrichtingen van het grondwater nagenoeg hetzelfde blijven. Infiltratie en kwelgebieden kunnen dus nauwkeurig



Afb. 2 - Gemiddeld isohypsenpatroon in het voorjaar van 1985.

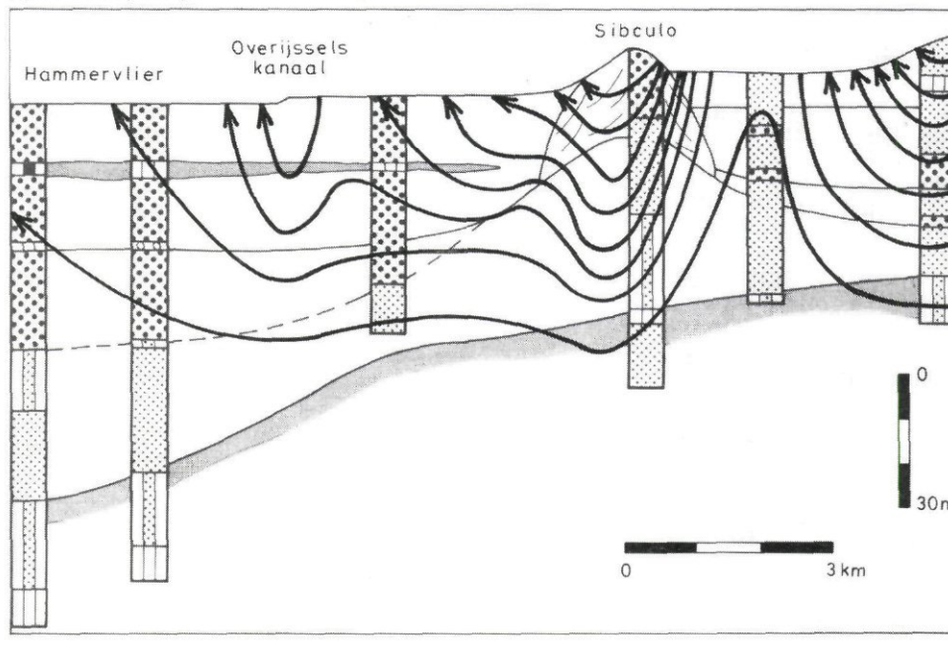
begrensd worden. Uit de modellering kwam naar voren dat het diepe grondwater in het Hammervlier twee voedingsgebieden heeft: de Engbertdijksvenen en een infiltratiegebied dat zich in Duitsland bevindt; waarschijnlijk gevormd door de stuwwal bij Uelsen.

De verschillende watertypes in het gebied

1. De Engbertdijksvenen

In het studiegebied is een aantal watertypes te onderscheiden waarvan de verspreiding duidelijk samenhangt met het grondwaterstromingspatroon, de geologie en de ligging

Afb. 3 - Geohydrologische dwarsdoorsnede.



TABEL I – *Resultaten van de grondwateranalyses.*

Locatie	e219	e219	p11	p11	p11	p11	p11	p11	p23	p23	p30	p30	p32	p32
Diepte	10,5	25	7	23	37	55	75	88	12,5	24,5	8	27	8	24
Temp	10,0	10,5	10,0	11,0	11,0	11,5	11,5	11,5	9,5	10,0	10,5	10,5	10,0	10,5
pH-veld	5,53	5,56	6,96	6,50	6,54	6,78	6,96	7,24	7,25	7,30	7,34	7,18	7,24	7,21
EG-veld (microS/cm)	140	102	598	282	355	445	532	746	284	292	778	491	878	558
Na (mg/l)	8,7	8,5	15	8,8	10	11	13	54	9,1	7,1	21	8,9	29	19
K	0,9	1,1	1,5	1,1	1,1	1,4	4,0	10	0,9	0,8	7,4	0,6	0,6	0,8
Mg	1,4	0,7	4,5	1,6	1,7	3,0	5,7	16,2	3,0	2,4	18,1	5,6	10,7	4,7
Ca	2,3	2,5	99,0	29,0	43,5	68,0	88,5	89,0	32,5	45,5	117	84,5	121	76,0
NH_4	1,5	0,35	6,0	4,0	3,3	2,9	2,2	1,6	0,75	1,3	0,04	1,0	3,6	4,9
Fe	12,7	6,4	16,7	21,7	28,7	19,9	11,6	6,9	5,8	1,7	0,21	3,1	17,4	10,4
Mn	0,14	0,08	0,73	1,5	2,1	4,7	3,9	6,6	0,36	0,32	0,29	0,16	0,82	0,73
Cl (mg/l)	16	8	25	12	15	13	14	17	14	8	56	19	100	47
HCO_3	20	28	351	147	198	275	328	458	84	154	220	250	189	153
SO_4	16	6	11	11	6	5	8	31	41	14	161	24	135	103
NO_3	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	8,3	<0,1	<0,1	<0,1
NO_2	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,01	0,01	0,03	0,01	0,03	0,02
PO_4	0,90	0,60	1,8	2,5	2,5	1,6	1,4	2,6	0,30	0,80	0,13	0,75	0,55	0,75
CODMn (mg/l)	25	17	56	48	40	28	21	24	2,9	5,7	9,0	7,3	12	26
TOC	2,1	4,4	9,8	9,7	6,3	6,7	8,1	0,7	4,7	1,1	4,8	8,9	8,9	7,8
CH_4	0,83	0,01	7,9	9,6	14,0	20,0	20,0	15,0	0,02	0,03	<0,01	0,01	0,04	0,04
Sompos. (meq/l)	1,18	0,83	6,96	3,04	4,06	5,20	6,23	8,96	2,55	2,94	8,45	5,25	9,05	5,70
Somneg.	1,11	0,81	6,69	2,98	3,79	4,98	5,94	8,63	2,63	3,04	8,67	5,14	8,73	5,98
Balans	+3%	+2%	+2%	+1%	+3%	+2%	+2%	+2%	−2%	−2%	−1%	+1%	+2%	−2%
Calciet log IAP/K(T)	−4,39	−4,14	−0,20	−1,49	−1,16	−0,60	−0,25	0,14	−0,96	−0,49	0,00	−0,17	−0,16	−0,43
Sideriet log IAP/K(T)	−1,85	−1,94	0,82	0,19	0,46	0,68	0,68	0,84	0,09	−0,12	−0,94	0,20	0,80	0,51

van infiltratie- en kwelgebieden. In de omgeving van de Engbertdijksvenen wordt het grondwater gekenmerkt door zeer lage pH-waarden en door lage calcium- en bicarbonaat gehaltes. Het grondwater is sterk onderverzadigd met calciumcarbonaat. IJzerconcentraties zijn soms aanzienlijk maar de hoeveelheid methaan is gering. In tabel I zijn de analyseresultaten van twee grondwatermonsters uit het gebied van de Engbertdijksvenen gegeven (e219).
De locaties van monstername zijn aangegeven in afb. 1.

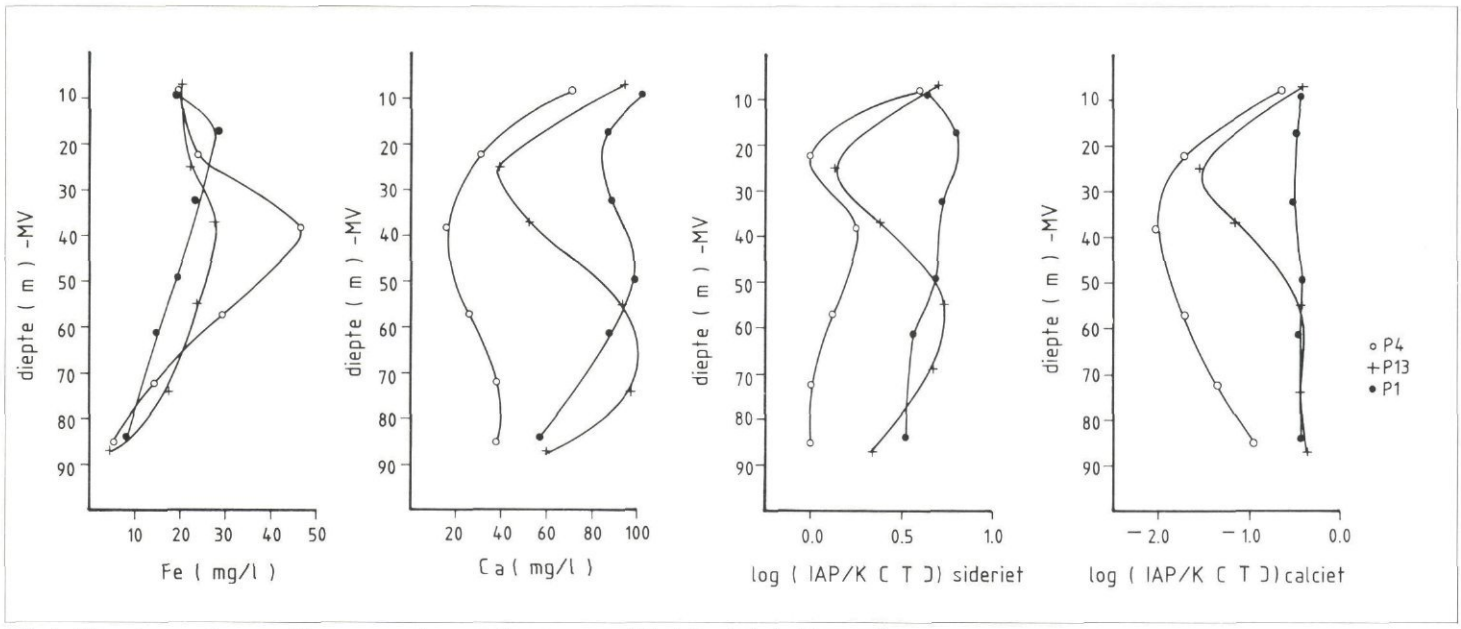
2. Het Hammervlier

Wanneer de ontwikkeling van de chemische samenstelling van het grondwater volgens de grondwaterstroomrichting naar het westen vervolgd wordt dan blijkt dat de hoeveelheden ijzer, calcium en bicarbonaat geleidelijk toenemen. Het grondwater blijft echter sterk onderverzadigd met calciumcarbonaat omdat de formatie van Scheemda, de Kiezeloölietformatie en de formatie van Drenthe (vrijwel) geen kalk bevatten. De pH van het grondwater blijft hierdoor laag en omdat het sediment rijk is aan organische stof (veenlaagjes) kunnen grote hoeveelheden ijzer oplossen. De oxydatie van organische stof gaat gepaard met reductie van ijzerhydroxydes. Daarnaast begint er methaangisting op te treden.
De grondwatermonsters genomen op locatie p11 (tabel I) geven een gemiddeld beeld van de verticale variatie van de chemische samenstelling van het grondwater in het Hammervlier. Het grondwatermonster genomen op 7 m diepte is afkomstig uit het ondiepe watervoerende pakket, het monster genomen op 88 m diepte is afkomstig uit de fijnzandige top van de formatie van Breda, en de overige monsters zijn afkomstig uit het diepe watervoerende pakket. Voor de dimensionering van de te bouwen zuiveringsinstallatie zijn vooral het verloop van het ijzer-, methaan-, en ammomiumgehalte interessant.

2.1. IJzer

De hoogste ijzerconcentraties zijn gemeten in het diepe watervoerende pakket op ca. 40 m beneden maaiveld. Locaal zijn er zelfs concentraties van 47 mg/l gemeten!
Het grondwater op deze diepte is afkomstig uit de Engbertdijksvenen (afb. 3). De afname van de ijzerconcentratie in de richting van de formatie van Breda kan samenhangen met een toename van de pH in deze richting waardoor de oplosbaarheid van ijzer geringer wordt maar ook door de vorming van ijzersulfides. Op het contactvlak van het sulfaatrijke, diepe brakke grondwater en het zich erboven bevindende zoete, sterk gereduceerde grondwater (vanaf ca. 85 m) beneden maaiveld) worden namelijk door sulfaatreductie ijzersulfides gevormd waardoor de ijzerconcentraties sterk dalen. Ook de afname van de ijzerconcentraties in de richting van het maaiveld kan samenhangen met een pH-toename. Daarnaast kan in deze richting een toename van de redoxpotentiaal een rol spelen.
Voor de kwaliteit van het grondwater in een aquifer zijn vaak evenwichten met (reactieve) mineralen een belangrijke factor.
Met behulp van het computerprogramma WATEQF [lit. 4] is van alle monsters de verzadigingsgraad van het water voor een groot aantal mineralen berekend.
De belangrijkste van deze mnineralen zijn in het Hammervlier calciet ($CaCO_3$), sideriet ($FeCO_3$), pyriet (FeS_2), mackinawiet (FeS) en goethiet ($Fe(OH)_3$). Onder de heersende pH en redoxcondities is goethiet overal in het watervoerende pakket in het Hammervlier goed oplosbaar. IJzersulfides daarentegen zouden thermodynamisch gezien overal in het diepe watervoerende pakket gevormd moeten worden. De reductie van sulfaat vindt echter plaats door micro-organismen zodat dit proces pas op zal gaan treden zodra het sulfaatgehalte een bepaalde drempelwaarde overschrijdt. In het Hammervlier konden ijzersulfides alleen in de mengzone van brak en zoet grondwater aangetoond worden; blijkbaar wordt sulfaat alleen op deze diepte gereduceerd. Als gevolg van de concentratiegradiënt die hierdoor ontstaat zal er diffusie van ijzer in de richting van deze mengzone plaatsvinden waardoor concentratieveranderingen binnen het diepe watervoerende pakket toch geleidelijk zullen verlopen.

De variatie van het ijzergehalte en de verzadigingsgraad van het grondwater voor sideriet in het Hammervlier wordt geïllustreerd in afb. 4 aan de hand van een drietal locaties; p4 in het oosten, p1 in het westen en p13 in het centrum van het Hammervlier. Deze locaties zijn aangegeven in afb. 2. Ook het verloop van het calciumgehalte en de verzadigingsgraad voor calciumcarbonaat zijn in deze afb. weergegeven. De verzadigingsgraad van het grondwater wordt hier uitgedrukt als de logarithme van het quotiënt van het ionactiviteitsprodukt (IAP) en de evenwichtsconstante (K(T)). Indien IAP>K(T) dan is het water oververzadigd voor calciet of



Afb. 4 - Het verloop van ijzer- en calciumconcentraties met de diepte voor verschillende locaties in het Hammervlier.

sideriet, indien IAP = K(T) dan heerst er evenwicht, en in het geval dat IAP < K(T) is het water onderverzadigd en dus agressief voor calciet of sideriet. Ten opzichte van sideriet is het grondwater vrijwel overal oververzadigd. Alleen in het oosten van het Hammervlier is de oververzadiging zeer gering of is het water in evenwicht met sideriet. In westelijke richting neemt de oververzadiging sterk toe ten gevolge van het oplossen van calciumcarbonaat. Weliswaar neemt het ijzergehalte in deze richting af maar blijkbaar wordt sideriet niet of slechts in geringe mate gevormd. De oorzaak van deze oververzadiging kan zijn dat de vorming van sideriet, zeker wanneer dit mineraal nog niet in het aquifermateriaal aanwezig is, pas bij een zekere mate van oververzadiging zal plaatsvinden. Bij het berekenen van de verzadigingsgraad van het grondwater voor sideriet dient echter opgemerkt te worden dat in de literatuur een groot aantal verschillende evenwichtsconstanten te vinden zijn. De gevonden logarithmen van het oplosbaarheidsprodukt van sideriet ($FeCO_3 <=> Fe^{2+} + CO_3^{2-}$) variëren van −9,60 tot −10,60. Bij de berekeningen in deze studie (met WATEQF) is een log(K)-waarde van −10,55 gebruikt en de oververzadiging zou dus ook (gedeeltelijk) door de keuze van deze constante verklaard kunnen worden.

2.2. Methaan

Het methaangehalte in het grondwater in het Hammervlier neemt toe met de diepte (tabel I - p 11). Methaangisting vormt de laatste fase in de opeenvolging van verschillende redoxreacties. Het vindt pas plaats bij zeer lage redox-potentialen. Uit organische verbindingen wordt CO_2 en CH_4 gevormd. Door de geringe oplosbaarheid kan methaan omhoog diffunderen; methaan in het ondiepe watervoerende pakket en bovenin het diepe watervoerende pakket hoeft niet op deze dieptes gevormd te zijn. De redoxpotentiaal van het grondwater bovenin het diepe watervoerende pakket kan dus hoger zijn dan op basis van het voorkomen van methaan geschat zou worden. Boven de formatie van Breda is het methaangehalte laag door de aanwezigheid van brak, sulfaatrijk water. Sulfaat wordt gereduceerd tot sulfide voordat methaangisting plaatsvindt.

2.3. Ammonium

Ammonium wordt gevormd bij de anaërobe afbraak van organisch materiaal.
Het ammoniumgehalte in het Hammervlier neemt geleidelijk af met de diepte. In het ondiepe watervoerende pakket bedraagt de concentratie 5 tot 7 mg/l. Bovenin het diepe watervoerende pakket varieert het gehalte van 2,5 tot 5 mg/l en onderin het diepe watervoerende pakket is de concentratie gedaald tot 1 à 2 mg/l. Het concentratieverloop duidt op een afname van de ammoniumproduktie met toenemende diepte.

3. De infiltratiegebieden aan de rand van het Hammervlier

Aan de noord- en zuidzijde van het Hammervlier wordt de grondwaterkwaliteit beïnvloed door de infiltratiegebieden de Zandstuwe en het Beerzerzand met de aangrenzende landbouwgronden.
Het grondwater in deze gebieden heeft een relatief geringe ouderdom. Als voorbeelden van karakteristieke grondwateranalyses zijn de resultaten van grondwateranalyses van monsters genomen op de locaties p23, p30 en p32 in tabel I opgenomen. Het grondwater in deze gebieden bevat minder ijzer en geen of nauwelijks methaan. Verhoogde chloride- en sulfaatgehaltes zijn het gevolg van verontreiniging uit neerslag en bemesting. Vooral ten zuidoosten van het Hammervlier zijn tot op aanzienlijke dieptes hoge chloride- en sulfaatgehaltes gemeten. In dit deel van het gebied heeft de formatie van Asten een geringe dikte of ontbreekt deze scheidende laag zelfs.
Het enige monster in het studiegebied waarin nitraat aanwezig is, is afkomstig uit het ondiepe grondwater aan de rand van de Mageler Esch. Het ijzergehalte is hier vrijwel nihil. Bemesting en een relatief geoxydeerd milieu verklaren de waterkwaliteit op deze locatie.

Hydrochemische aspecten van de grondwaterwinning

De WMO heeft voor een proefgrondwaterwinning twee pompputlocaties op het oog. Deze locaties zijn aangegeven in afb. 5.
De noordelijke pompput bestaat al en een uitgebreide pompproef [lit. 5] is er hier uitgevoerd. De zuidelijke pompput daarentegen moet nog gemaakt worden. In afb. 5 is de grondwaterstroming in het diepe watervoerende pakket bij een winning van 2.000 m³/dag (de begrote proefonttrekking) op beide locaties weergegeven. De WMO gaat grondwater onttrekken aan filters die zich in het grofzandige gedeelte van het diepe watervoerende pakket bevinden (van ca. 20-55 m beneden maaiveld).
Wanneer er bij menging van verschillende watertypes geen reacties optreden dan zal de samenstelling van het opgepompte water

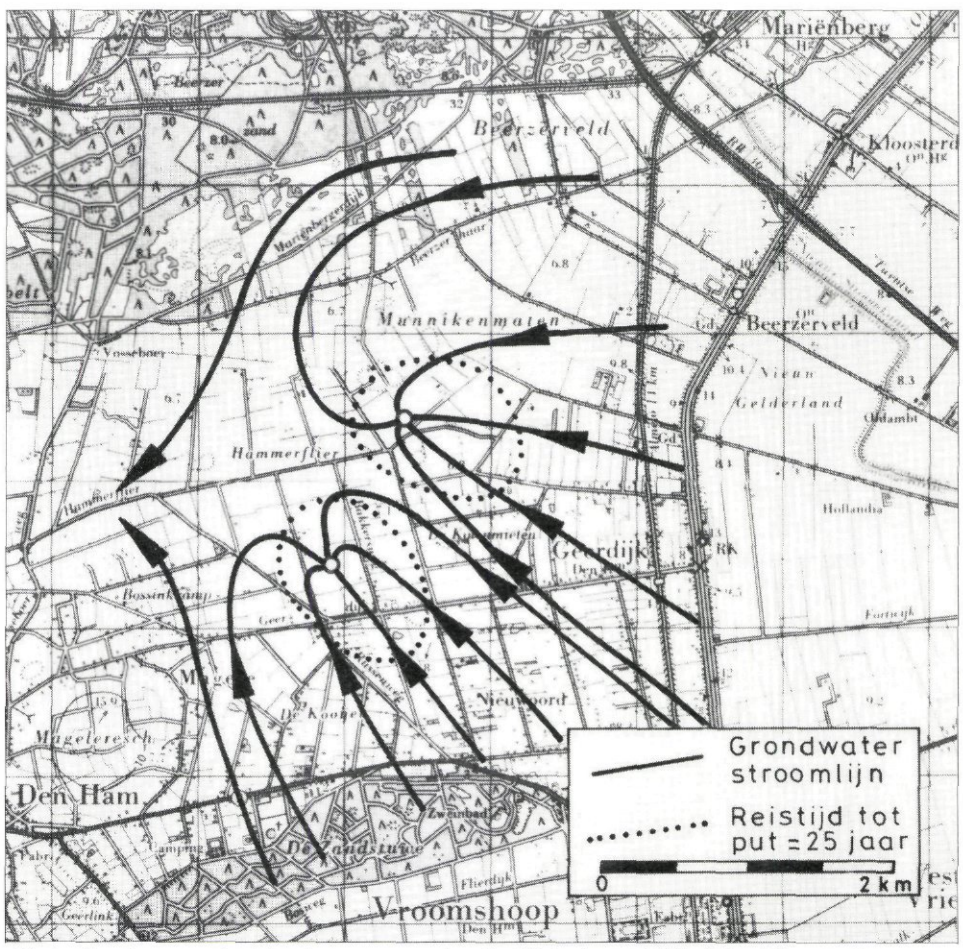
volgen uit een optelsom van de fracties uit de verschillende delen van het diepe watervoerende pakket en uit het ondiepe watervoerende pakket (rondom de pompput ontstaat een inzijgsituatie). Er vindt in dat geval alleen conservatieve menging plaats. Vaak echter zullen er wanneer er door een pompput verschillende watertypes aangetrokken worden reacties optreden waardoor de watersamenstelling verandert ten opzichte van de conservatieve optelsom. In het Hammervlier zullen deze reacties vooral samenhangen met verschillende redox-processen. Bij menging van gereduceerd ijzerrijk grondwater met zuurstofhoudend water kunnen ijzerhydroxydes gevormd worden terwijl bij menging van ijzerrijk en sulfaatrijk water onder gereduceerde condities ijzersulfides kunnen ontstaan. Beide processen kunnen behalve tot een verandering van de watersamenstelling ook leiden tot putverstopping waardoor de putopbrengst zal dalen.

In de omgeving van de noordelijke pompput is het niet te verwachten dat dergelijke reacties op zullen treden. Het grondwater dat uit het ondiepe watervoerende pakket door de formatie van Asten naar het pompfilter getrokken wordt zal in een dergelijk milieu dat rijk is aan organisch materiaal al snel geen zuurstof meer bevatten waardoor er geen ijzerhydroxides gevormd worden. Tevens is de hoeveelheid sulfaat zeer gering zodat er ook geen ijzersulfides gevormd zullen worden. De verwachting van de samenstelling van het water dat door deze pompput gewonnen wordt komt dus overeen met een conservatieve optelsom en is weergegeven in tabel II.

Voor de zuidelijke pompput is de verwachting dat het niveau van de voor waterzuivering belangrijke parameters lager is. Een exacte voorspelling is voor deze locatie echter moeilijk te geven omdat er in de directe omgeving (binnen de 25-jaars zone) van deze pompput nog geen observatiefilters zijn.

TABEL II – *Voorspelling van de watersamenstelling voor de noordelijke pompput.*

	Concentratie mg/liter
calcium	60–70
magnesium	3–5
natrium	10–15
kalium	1,5–2,5
ijzer	20–25
mangaan	1,0–2,0
ammonium	3,0–3,5
bicarbonaat	250–275
chloride	15–20
sulfaat	15–20
(ortho)fosfaat	1,5–2,5
nitraat	< 1,0
methaan	13–17
TOC	7–11
CODMn	30–35
pH	6,4–6,6



Afb. 5 - Grondwaterstroming in het diepe watervoerende pakket bij winning van 2.000 m³/dag uit 2 pompputten.

In de ongeving van deze pompput kunnen bij grondwaterwinning echter wel belangrijke veranderingen optreden als gevolg van reacties bij menging van verschillende watertypes. vanuit het zuiden zal er ijzer- en sulfaatrijk water dat geen of nauwelijks methaan bevat (vergelijk tabel I - p32) aangetrokken worden terwijl vanuit het oosten ijzer- en methaanrijk water (vergelijk tabel I - p11) naar de pompput zal stromen.

Bij menging zal CH_4 geoxydeerd en zal sulfaat gereduceerd worden waardoor ijzersulfides kunnen ontstaan. In reactievorm is dit als volgt voor te stellen:

- pyrietvorming:

$$H^+ + 4Fe^{2+} + 8SO_4^{2-} + 7CH_4 \rightarrow 4FeS_2 + 7HCO_3^- + 11H_2O$$

- of mackinawietvorming:

$$Fe^{2+} + SO_4^{2-} + CH_4 \rightarrow FeS + 2H_2O + CO_2$$

Theoretisch zal al het methaan geoxydeerd worden en zal het opgepompte water aanzienlijk minder ijzer en methaan bevatten dan uit conservatieve menging zou volgen. Het zal echter van de reactiesnelheid en de intensiteit van menging afhangen hoe de uiteindelijke waterkwaliteit ten opzichte van deze beide uitersten zal worden.

De concentraties in tabel II kunnen als maximale waarden voor deze put beschouwd worden.

Als gevolg van de activiteit van sulfaatreducerende bacteriën (slijmvorming) en het neerslaan van ijzersulfides kan er putverstopping optreden in de zuidelijke pompput. De problemen die zo ontstaan kunnen in de toekomst, na de periode van de proefonttrekking, verkleind worden door de puttenconfiguraties zo in te richten dat uit een aantal putten sulfaatrijk water uit het zuiden opgepompt wordt terwijl uit andere putten methaanrijk water uit het oosten gewonnen wordt.

Literatuur

1. Brussel, J. F. M. van (1987). *De hydrochemie van het Hammervlier.* VU - IvA, Amsterdam en WMO, Zwolle.
2. Elburg, H. van (1986). *FLOWNET – een eindig differentiemodel voor twee-dimensionale grondwaterstroming.* VU - IvA, Amsterdam.
3. Landinrichtingsdienst Zwolle (1986). *Grondwateronttrekking in het Hammervlier.* Landinrichtingsdienst, Zwolle.
4. Plummer, L. N., Jones, B. F. and Truesdall, A. H. (1976). *WATEQF-A Fortran 4 version of WATEQF, a computer program for calculating chemical equilibrium of natural waters.* US Geol. Surv. Water Res. Inv. 76-13.
5. WMO (1985). *Waterwingebied Hammervlier, inventarisatie-onderzoek.* WMO, Zwolle.

● ● ●