

RIVM rapport 500003003/2004

**Bronnen en bronbeken van Zuid-Limburg;**  
Kwaliteit van grondwater, bronwater en beekwater

W.P.A.M. Hendrix <sup>1)</sup>,  
C.R. Meinardi (kees.meinardi@rivm.nl)

<sup>1)</sup> Rijkswaterstaat Directie Limburg/ Universiteit Utrecht

Dit onderzoek werd verricht in opdracht en ten laste van het Directoraat-Generaal Milieubeheer van het Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke ordening en Milieubeheer, Directie Bodem, Water en Landelijk Gebied, project Monitoring en Diagnose grondwater (nummer 714801) en het project Duurzaam Nutriëntenbeheer (nummer 500003) Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), Postbus 1, 3720 BA Bilthoven, telefoon: 030 - 274 91 11, fax: 030 - 274 29 71



**Rapport in het kort:****Bronnen en bronbeken van Zuid-Limburg**

Het doel van het onderzoek aan bronnen in Zuid-Limburg was de waterkwaliteit te bepalen als gevolg van de belasting aan maaiveld door landbouw en atmosferische depositie. De bronnen voeren grondwater af. Nutriënten in water bepalen mede de ecologische toestand die voor het waterbeheer van belang is. In meerderheid zijn de nitraatconcentraties in grond- en bronwater hoger dan 50 mg/l en afhankelijk van reistijden in de bodem.

In Zuid-Limburg zijn eenmalig 79 bronnen en 12 bronbeken onderzocht in najaar 2001. Het onderzoek omvatte veldmetingen en laboratoriumanalyses van de hoofcomponenten, van 49 spoorelementen en van de isotopen  $^3\text{H}$  en  $^{18}\text{O}$ . Uit een onderlinge vergelijking bleek dat sommige bepalingen minder betrouwbaar waren, zodat ze ingrijpend moesten worden bewerkt. De concentraties in bronwater hangen samen met een veranderende belasting aan maaiveld en reistijden van het water in de bodem, die zijn bepaald met tritium. Limburgse lössgronden blijken een met zandgronden vergelijkbare uitspoeling van nitraat te hebben. Denitrificatie in de diepere bodem is van weinig betekenis. Voor veel spoorelementen komen de concentraties overeen met de basiswaarden voor zoet grondwater. De bodem draagt praktisch niet bij aan de concentraties. De concentraties van ammonium- en fosfaat zijn relatief laag in het bronwater. De resultaten zijn vergeleken met eerder onderzoek. De toename van de gemiddelde concentraties van diverse stoffen hangt samen met een toegenomen bemesting.

Trefwoorden: bronnen, waterkwaliteit, reistijden, nitraat, spoorelementen

**Abstract****Springs and small streams in southern Limburg, the Netherlands**

The southernmost part of the Netherlands consists of plateaus, covered by loamy soils and intersected by deep valleys. The streams are fed by numerous springs. The investigation documented here evaluated the relationship between spring water quality and loads at land surface, caused mainly by fertilisation and aerial deposition. Spring surveying, well suited to determining groundwater quality, was used.

Investigations at 79 springs and 12 brooks consisted of field measurements and water sampling for analysing major components, 49 trace elements and the isotopes  $^3\text{H}$  and  $^{18}\text{O}$ . Evaluation of results showed some determinations to be not very reliable and in need of substantial adaptations. Studying concentrations in groundwater and springs involved travel times in the soil to be derived from tritium concentrations. The relationship established here enabled surficial loads to be compared with spring water concentrations. Loamy soils in Limburg show similar trends to sandy soils where nitrate is concerned. Nitrate concentrations in groundwater and springs of more than 50 mg/l occur in a majority of cases, depending on travel times in the soil. Denitrification in deeper layers was found to have a minor impact. Concentrations for many trace elements correspond to basic values derived for fresh groundwater, implying a negligible dissolution of soil minerals. Concentrations of phosphate and ammonium are relatively low. Elaboration of previous measurements supported the modelled relationship between increasing loads at land surface and spring water quality.

Key words: Springs, water quality, travel times, nitrates, trace elements

**INHOUD**

<b>1. Inleiding</b>	<b>7</b>
<b>2. Uitvoering van het onderzoek, methoden en instrumenten</b>	<b>9</b>
<b>3. Landschappelijke en hydrogeologische situatie van de bronnen</b>	<b>11</b>
3.1. Beknopt overzicht van de geologie van Zuid-Limburg	11
3.2. Landschap, hydrografie en hydrogeologische aspecten	14
<b>4. Resultaten van de veldbepalingen</b>	<b>19</b>
4.1. Algemene kenmerken van de Zuid-Limburgse Plateaus	19
4.2. Onderscheiden deelgebieden	20
4.3. De metingen in het veld	21
<b>5. Reistijden in de bodem van grondwater en bronwater</b>	<b>23</b>
5.1. Tritium en chloride als tracers	23
5.2. Stroming in de onverzadigde en in de verzadigde zone	25
5.3. Westelijke terrasrand van het Centraal Plateau (noordwesten)	28
5.4. Terrasranden nabij Ulestraten (zuidwesten)	30
5.5. Noordoostelijke rand van het Centraal Plateau (noordoost)	31
5.6. Bronnen bij Valkenburg (zuidoosten)	33
5.7. Bronnen van de Noor	34
5.8. Het zuidelijke dal van de Geul	36
5.9. Het dal van de Gulp	37
5.10. Noordelijke bronnen aan de zuidoever van de Geul (Geul-noord)	38
5.11. Afwijkingen en overeenkomsten tussen bronnen en beken; conclusies	39
<b>6. Vergelijking van gemeten en verwachte nitraatconcentraties</b>	<b>41</b>
6.1. Infiltrerende nitraatconcentraties	41
6.2. Terrasranden van het Centraal Plateau	43
6.3. Bronnen van de Noor	45
6.4. De dalen van de Geul en de Gulp	46
6.5. Processen in bodem en open water; conclusies	47
<b>7. Variatie naar tijd en plaats in de waterkwaliteit</b>	<b>49</b>
7.1. Het verloop in de tijd voor nitraat	49
7.2. Overige componenten	51
7.3. Verschillen in de onderscheiden gebieden	53
<b>8. Ecologisch belangrijke parameters</b>	<b>57</b>
<b>9. Sporelementen</b>	<b>59</b>
<b>10. Samenvattende opmerkingen, discussie</b>	<b>63</b>
<b>Literatuur</b>	<b>65</b>
Bijlage 1 Onderzoek bij de Noor	67
Bijlage 2 Vergelijking van metingen aan dezelfde parameters	71
Bijlage 3 Resultaten van de veldmetingen	77
Bijlage 4 Analyseresultaten van RIVM-LAC	79
Bijlage 5 Tritiummetingen door CIO	80
Bijlage 6 Resultaten met de Hydrion-10 door de WUR	81

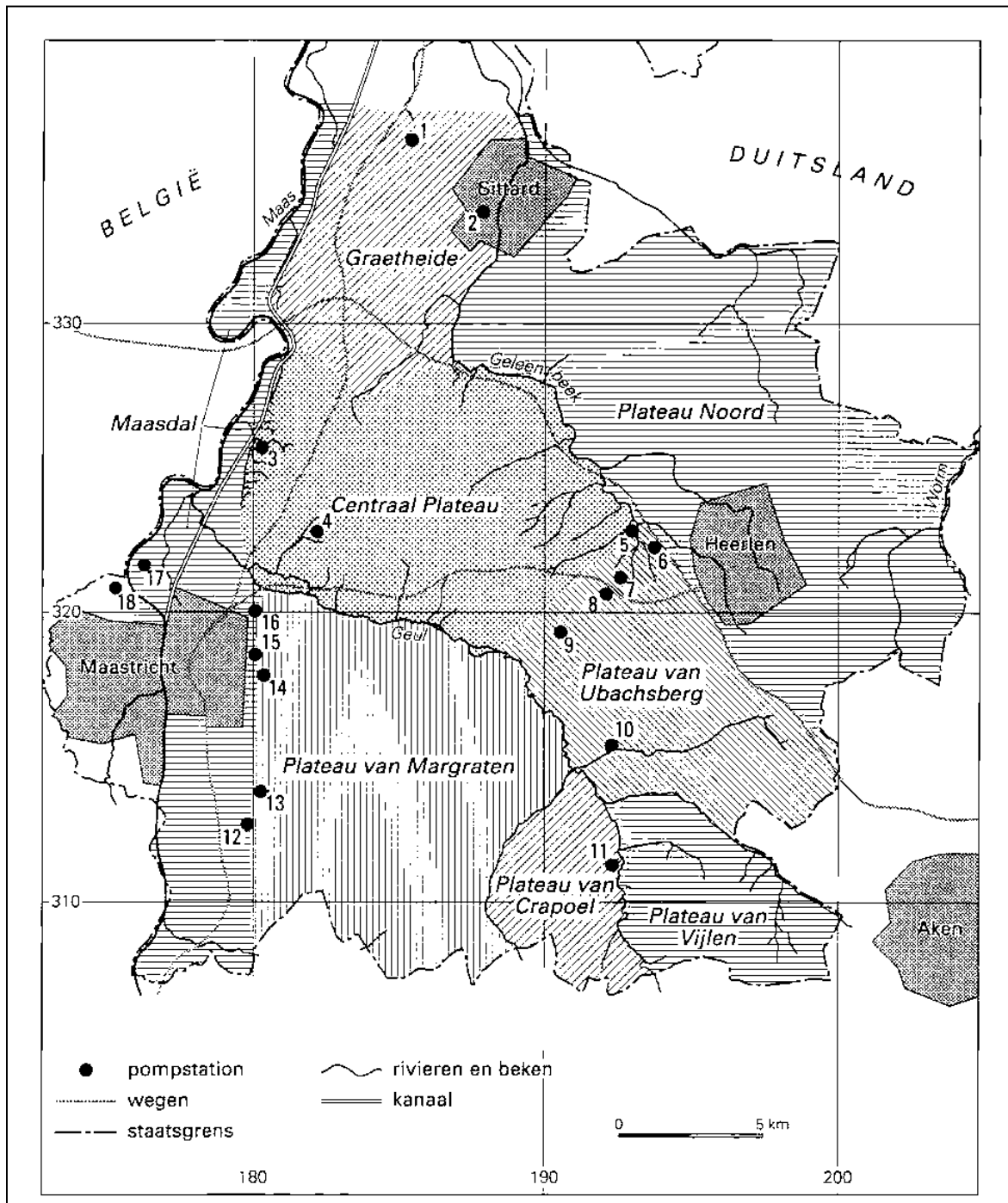


Fig.1 Situatie Zuid-Limburg; plateaus, beken, grondwaterwinplaatsen

## 1. INLEIDING

Het landschap van Zuid-Limburg bestaat uit een aantal kleinere en grotere plateaus waartussen diepe beekdalen liggen (Fig.1). Het gebied is van grote betekenis wat betreft landschappelijke aspecten en de aanwezigheid van bijzondere ecologische waarden. De onderzochte bronbeken, die vaak ontspringen langs met loofbossen begroeide hellingen, zijn een belangrijk element van het landschap. Een oppervlakkige drainage door sloten of beken ontbreekt veelal op de plateaus. Het neerslagoverschot infiltreert en stroomt daarna als grondwater door de bodem af naar kwelzones en de talrijke bronnen van kleine en grotere beken. De landbouw en de daarmee gepaard gaande belasting van de bodem vormen een bedreiging voor het milieu van Zuid-Limburg. Sinds eeuwen worden de lössbodems van Zuid-Limburg gebruikt voor de landbouw. Veeteelt en akkerbouw zijn nog steeds belangrijke activiteiten, nu echter in moderne vorm met de bijbehorende bemesting en het gebruik van chemicaliën. Bodem en water ondervinden bovendien de gevolgen van andere activiteiten zoals industrie en verkeer in en rond het gebied.

De uitspoeling van stoffen als gevolg van de bodembelasting heeft invloed op het grondwater dat een bron is voor de openbare drinkwatervoorziening (Fig.1) en voor particuliere winningen. De nitraatconcentraties in het gewonnen water waren rond 1960 al relatief hoog (Meinardi, 1980). Een tweede gevolg is dat de talrijke bronnen, die het grondwater van de plateaus draineren, voedselrijker water zijn gaan afvoeren. De eutrofiëring van het water in de brongebieden heeft geleid tot een verandering in vegetatie. Na 1960 zijn de concentraties nog toegenomen.

De hydrologische situatie van het Centraal Plateau is onderzocht door de Universiteit van Utrecht (UU) in de jaren 1980 en daarna (Hendrix, 1985). De kwaliteit van het grondwater en de bronnen zal na 1985 opnieuw zijn veranderd. Delen van de zuidelijke plateaus zijn in later jaren onderzocht (Van Lanen et al., 1995) door de Universiteit Wageningen (WUR). Beide studies hebben veel aandacht geschonken aan natuurlijke bronnen, waardoor gegevens uit vroegere perioden beschikbaar zijn. Een overzicht van de ligging en de karakteristieken van de Zuid-Limburgse bronnen wordt gegeven in Hendrix (1990).

De doelstelling van het onderzoek van de bronnen is om het verloop in de tijd van de kwaliteit van het water in de bronnen van Zuid-Limburg te beschrijven als een functie van de belasting van de bodem. De kwaliteit van het bronwater is opgevat als het geheel van de fysische en chemische eigenschappen van het water. De hoofdcomponenten in het bronwater zijn geanalyseerd en tevens 49 verschillende spoorelementen. De afvoer van de bronnen bestaat uit grondwater en de daarin meegevoerde stoffen uit een relatief groot intrekgebied. Met het onderzoek wordt inzicht verkregen in de kwaliteit van het grondwater en de veranderingen daarin. Op enkele plaatsen is ook het water in de benedenloop van de beken onderzocht, met name om te bezien of de onderzochte bronnen representatief waren voor de beken waarin ze uitstromen.

Het onderzoek van bronnen en bronbeken heeft als voordeel dat ze goed bereikbaar zijn en relatief eenvoudig kunnen worden bemonsterd. Het bronwater geeft een beeld van de gemiddelde situatie in het intrekgebied en van het grondwater in de bodem. Het grondwater zelf is moeilijk bereikbaar doordat het meestal diep onder maaiveld staat. Bovendien zal het grondwater uit een boring vooral de naaste omgeving representeren. De herkomst van het bronwater en de reistijd van het grondwater in de bodem moeten echter bekend zijn om het bemonsterde bronwater te duiden. Hydrologisch onderzoek naar deze eigenschappen vormde een belangrijk onderdeel van de bepalingen.

Achtereenvolgens komen de volgende onderdelen van het onderzoek aan de orde:

- de uitvoering van het onderzoek;
- landschap en hydrogeologische situatie;
- resultaten van de veldmetingen;
- reistijden van het grondwater in de bodem volgens de tritiummetingen;
- vergelijking van gemeten en berekende nitraatconcentraties als gevolg van bemesting;
- gemeten en berekende verloop in de tijd van de concentraties van hoofdcomponenten;
- ecologisch belangrijke parameters;
- spoorelementen in het bronwater.

De eerste bijlage van het rapport betreft het verslag van een meer gedetailleerd onderzoek dat is gedaan aan de bronnen van de Noor. Andere bijlagen bevatten de diverse meetgegevens. Bijlage 2 geeft de vergelijking van waarden die door verschillende laboratoria zijn bepaald voor dezelfde eigenschap. Hieruit blijkt dat de meetwaarden in een aantal gevallen aanzienlijk moeten worden aangepast om de verschillen te verklaren. Dit maakt dat de concentraties van een aantal stoffen minder betrouwbaar zijn.



## 2. UITVOERING VAN HET ONDERZOEK, METHODEN EN INSTRUMENTEN

Het onderzoek in 2001 aan de bronnen en beken van Zuid-Limburg was relatief eenvoudig van opzet maar gecompliceerd in uitwerking. Bij het Centraal Plateau en de Plateaus van Crapoel en Margraten zijn 79 bronnen en op 12 plaatsen de benedenlopen van bronbeken eenmalig onderzocht in najaar 2001.

Aan de bronnen, de beken en aan het afgevoerde water zijn de volgende bepalingen gedaan:

- Veldmetingen (plaatsbepaling, EC, pH, debiet en temperatuur van het bronwater), waarvan de resultaten zijn gegeven in Bijlage 3.
- Uit het water zijn monsters genomen voor onderzoek aan tritium ( $^3\text{H}$ ) en bij de Noor tevens aan  $^{18}\text{O}$  (Bijlage 1) door het Centrum voor Isotopenonderzoek (CIO) te Groningen. De tritiumwaarden zijn gegeven in Bijlage 5.
- In monsters van het bronwater zijn de concentraties van de nutriënten  $\text{NH}_4$  en P bepaald (Hoofdstuk 9) door RIVM-LAC (Laboratorium voor Anorganische Chemie).
- De hoofdcomponenten (Ca, Mg, Na, K, Cl,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{HCO}_3$  en  $\text{CO}_2$ ) en ook EC en pH zijn aan de monsters bepaald door de Universiteit Wageningen, Vakgroep Waterhuishouding (WUR) met de Hydrion-10, zie Bijlage 6.
- Bij een selectie van 9 bronnen zijn de hoofdcomponenten en een drietal spoorelementen door RIVM-LAC geanalyseerd ter bevestiging van de WUR analyses (Bijlage 4).
- Van elke bron is eveneens een monster genomen voor de bepaling van 49 verschillende spoorelementen door NITG-TNO. De metingen zijn gedaan met ICP-MS en daarbij zijn ook de concentraties van een aantal hoofdcomponenten bepaald (Hoofdstuk 10).

De plaats van de bronnen is bepaald met een GPS-instrument (Silva Multi-Navigator). Daarnaast zijn veldkenmerken genoteerd zoals de vegetatie. De metingen in het veld aan geleidbaarheid (EC) en temperatuur zijn uitgevoerd met een WTW-instrument dat is geijkt volgens RIVM-standaarden. De metingen van de zuurgraad (pH) zijn met een WTW-instrument gedaan volgens vastgestelde en gevalideerde procedures (Standard Operating Procedures). Het debiet is gemeten met drijvertjes (meting van het natte profiel en van de stroomsnelheid met drijvertjes). Op plaatsen waar dat niet mogelijk was, is het debiet geschat.

Geofysische metingen aan de bodem waaruit de bronnen hun water krijgen, zijn gedaan in het dal van de Noor (elektromagnetische metingen met een Geonics EM-31). Deze metingen geven inzicht in de bodemopbouw. Geofysisch onderzoek was ook voorzien bij de andere locaties maar is vanwege praktische problemen nagelaten. Over de bodem en de hydrologie is echter veel bekend door eerder uitgevoerd onderzoek. De metingen van Hendrix (1985) zijn gebruikt voor een vergelijking met de huidige kwaliteit van het bron- en beekwater.

Een aantal van de metingen in het veld en in de laboratoria betreft dezelfde parameters. Zo zijn de pH en de geleidbaarheid (EC) zowel in het veld bepaald als met de Hydrion-10 door de WUR. Een tweede vergelijking is mogelijk voor een selectie van 9 bronnen waar monsters

zijn geanalyseerd door RIVM-LAC op de hoofdcomponenten en drie spoorelementen. De waarden kunnen worden vergeleken met de resultaten van de Hydrion-10 en met die van NITG. Bijlage 2 bevat een vergelijking van de verschillende bepalingen en de conclusies die daaruit volgen ten aanzien van de meest waarschijnlijke waarden van de diverse parameters.

Twee voorbeelden betreffen het geleidingsvermogen EC van de bemonsterde bronnen en de zuurgraad. De metingen van EC van monsters uit de bronnen die gedaan zijn in het veld en door WUR zijn vergeleken in Fig.2. De metingen komen goed overeen, behalve dat de waarden uit het veld systematisch ongeveer 10% hoger zijn dan de metingen door WUR. Dit verschil is verklaarbaar door het gebruik van een verschillende referentietemperatuur.

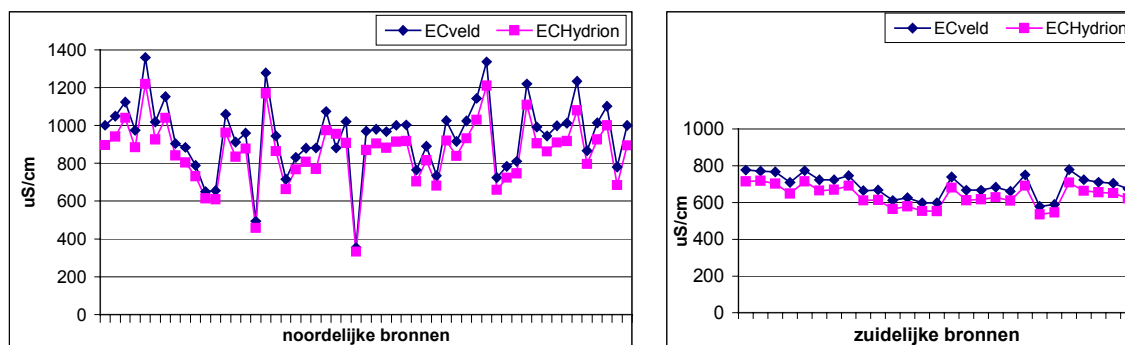


Fig.2 Vergelijking van EC-waarden gemeten in het veld en met de Hydrion-10

De vergelijking van beide typen metingen voor de pH is afgebeeld in Fig.3. De overeenkomst is ook voor de pH relatief goed, maar soms treden afwijkingen op, waarvoor in Bijlage 2 een verklaring wordt gegeven (minder nauwkeurige veldmetingen). De gemeten waarden zijn relatief hoog, ze liggen vaak tussen pH=7 en pH=8.

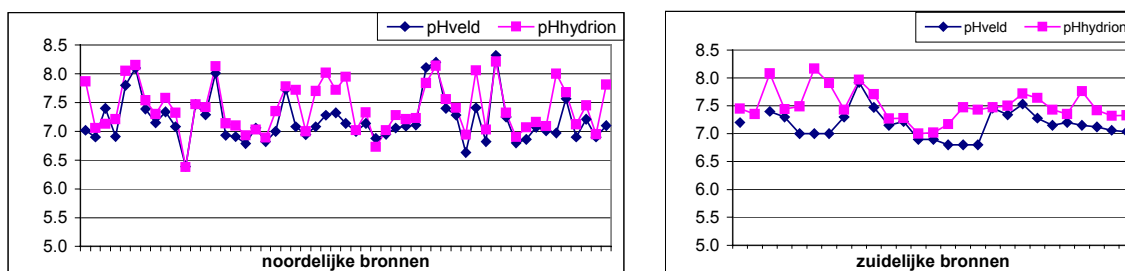


Fig.3 Vergelijking van pH-waarden gemeten in het veld en met de Hydrion-10

Uit de beschouwingen van Bijlage 2 volgt dat de resultaten van de Hydrion-10 relatief betrouwbaar zijn voor Cl, K, Na, NO<sub>3</sub> en na bewerking voor Ca, HCO<sub>3</sub>, Mg, en SO<sub>4</sub>. Met de door NITG bepaalde concentraties van de spoorelementen is na een benodigde correctie verder gewerkt. Bij de beschouwingen in de volgende hoofdstukken moet worden bedacht dat de betrouwbaarheid van de waarden niet steeds even groot is. Waar nodig zal dit aspect bij de bespreking van de concentraties van de verschillende stoffen worden besproken.

### 3. LANDSCHAPPELIJKE EN HYDROGEOLOGISCHE SITUATIE VAN DE BRONNEN

#### 3.1. Beknopt overzicht van de geologie van Zuid-Limburg

In geologische termen uitgedrukt ligt Zuid-Limburg in de noordelijke uitlopers van de Ardennen en Eifel, een paleozoïsch gebergte, op de overgang van de Benedenrijnse Laagvlakte naar het Noordzeebekken. In dat laatste gebied ligt de Centrale Slenk waarbij langs de randen een aantal belangrijke breuken ligt, die ook in Zuid-Limburg al invloed hebben (Fig.4).

De oudste afzettingen in Zuid-Limburg dateren uit het Carboon en dazomen in het Geuldal nabij de Belgische grens. In het Carboon maakte Zuid-Limburg deel uit van een dalend gebied waarin zand en klei werden afgezet en veel veenvorming optrad. Deze veenlagen vormden het basismateriaal voor omvangrijke steenkoolvelden. De daling van Zuid-Limburg nam toe en het landoppervlak werd door de zee geïnundeerd. De in het Boven-Carboon ontstane afzettingen zijn marien gevormd in de vorm van lei- en zandsteen. Tijdens de Hercynische plooingsfase in het Boven-Carboon werd het Ardennen-Eifelgebied opgeheven waardoor aan de afzetting van mariene sedimenten een eind kwam. In Zuidoost-Nederland ontstonden tijdens de Hercynische plooingsfase talrijke breuken waarlangs horizontale en verticale verschuivingen optraden die de basis legden voor tektonische bewegingen in het Jong-Tertiair. Zo ontstond het horsten- en slenkengebied van Brabant en Limburg. Na de plooing en opheffing van de Ardennen begon de erosie op het gebied in te werken en gedurende het Perm, Trias en Jura lag Zuid-Limburg boven zeeniveau. Afzettingen uit deze perioden worden in Zuid-Limburg vrijwel niet aangetroffen.

Tijdens het Boven-Krijt (Senoon) drong de zee vanuit het noordwesten Zuid-Limburg binnen. In het begin werden kust- en strandafzettingen gevormd met een afwisseling van fijne zanden en klei. Deze afzettingen behoren tot de Formatie van Aken (Akens Zand) en de Formatie van Vaals (Vaalser groenzand). De transgressie zette door en in een diepere zee vormden zich dikke pakketten tufkrijt. Dit tufkrijt bestaat uit de Formatie van Gulpen (Gulpens krijt) en de Formatie van Maastricht (Maastrichts Krijt). Tot deze laatste rekent men het Kunrader Krijt. Deze krijtafzettingen dazomen, van nature en kunstmatig (groeven), op vele plaatsen in Zuid-Limburg. Tijdens het Tertiair werden zowel terrestrische als mariene afzettingen gevormd. Uit het Paleoceen dateert zachte kalksteen die onder andere tussen Valkenburg en Maastricht langs de Geul aan te treffen is. Deze kalksteen behoort tot de Formatie van Houthem. In het Oligoceen werden kleihoudende glauconietzanden en zandige kleien afgezet in een marien milieu. De miocene afzettingen in Zuid-Limburg zijn deels marien en deels continentaal. Ze bestaan uit kustnabije zanden afgewisseld met bruinkoollagen en rivierafzettingen van zand, klei en grind. In het Plioceen heerste in Zuid-Limburg een terrestrisch milieu, waarin rivieren afzettingen vormden, zoals het Kiezeloëlietgrind. Deze rivierafzettingen behoren tot de Kiezeloëliet Formatie die stratigrafisch van het Boven-Mioceen tot het Onder-Pleistoceen reikt. Uit de verspreiding van de tertiaire afzettingen kan men de schollenopbouw van Zuid-Limburg goed aflezen. De afzettingen worden van zuidwest naar noordoost per schol jonger.

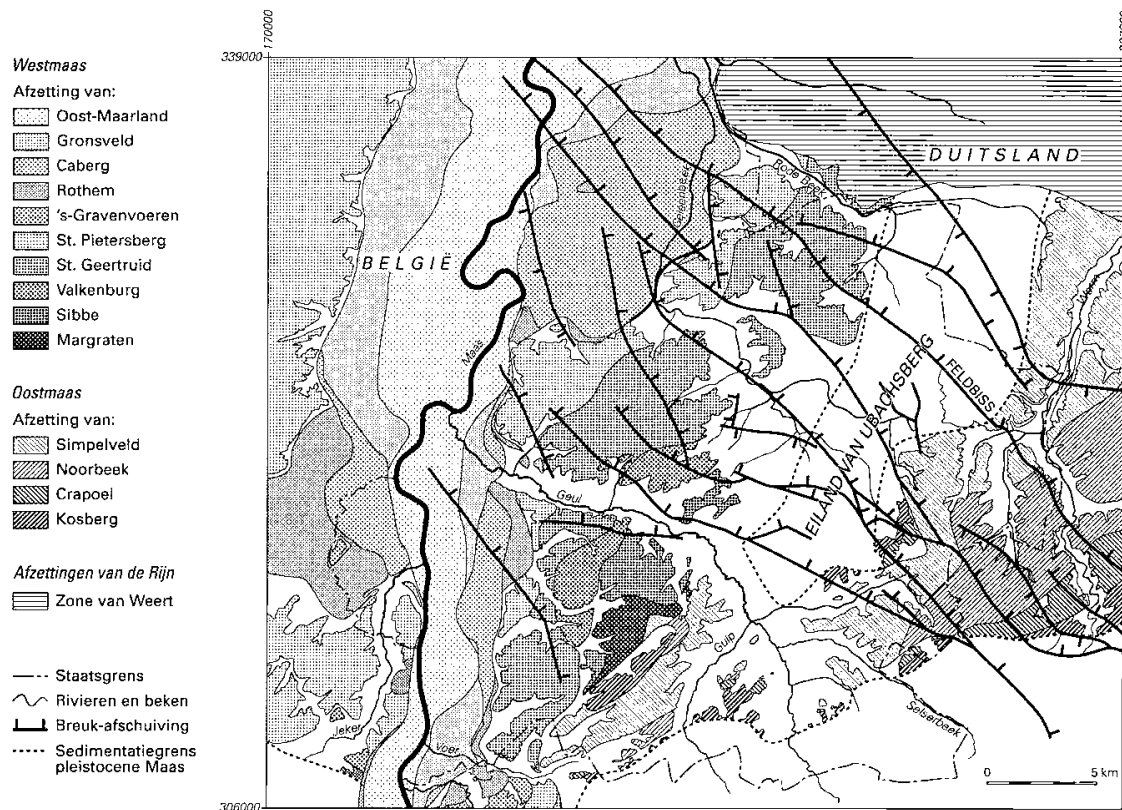


Fig.4 Vereenvoudigde geologische kaart van de Maasafzettingen volgens RGD (1989)

Tijdens het Tertiair trad sterke verwerking op onder invloed van een vrij warm en vochtig klimaat. Er vond afvoer van kiezelzuur plaats (desilificatie) dat in zandlenzen op grotere diepte neersloeg waardoor daar grotere zandstenen werden gevormd. Ten gevolge van chemische verwerking ontstond fijn materiaal dat door hevige slagregens gemakkelijk werd weggespoeld. Tevens kon er hierdoor op terreinen met geringe helling reeds solifluctie optreden. De dalflanken werden minder steil en uiteindelijk ontstond er een schiervlakte of peneplain. Door een sterke chemische verwerking veranderden grote delen van de goed oplosbare kalk tot op meters diepte in een roodachtige klei en bleven alleen de in deze afzettingen voorkomende vuurstenen over. Deze oude verweringsgronden van de kalksteen uit het Krijt worden vuursteeneluvium genoemd. Onder wisselend droge en vochtige omstandigheden verweerde het nabij het oppervlak aanwezige gesteente. Alleen het in deze gesteenten aanwezige gangkwarts materiaal bood hiertegen goede resistentie.

Toen in het Jong-Tertiair het Ardennengebied werd opgeheven ontstonden dalen en werd een deel van het verweringsdek van de peneplain naar het brede en ondiepe toenmalige Maasdal gespoeld. Zo ontstond omstreeks de overgang van Pliocen naar Kwartair een brede gordel bestaande uit grind met een hoog kwartsgehalte in het gebied ten noorden van het Ardennen-Leisteenplateau. Ofschoon er in die periode wel enige dalvorming was, werd door de rivier hoofdzakelijk materiaal uit het puindek van de schiervlakte vervoerd. De laat-pliocene en vroegkwartaire Keizeloölietafzettingen zijn tot in Zuidoost-Nederland en de Benedenrijnse Laagvlakte

te vervolgen. In het Kwartair ging de opheffing van de Ardennen verder waardoor de rivieren een sterke erosie veroorzaakten. In Zuid-Limburg werd een dik pakket grind afgezet. Men neemt aan dat de opheffing niet geleidelijk maar min of meer schoksgewijs verliep. Door de verlaging van de erosiebasis en de in het Pleistoceen wisselende klimatologische omstandigheden gingen de rivieren, waaronder de Maas, zich in fasen insnijden. Daar waar de rivier zich in zijn oorspronkelijke bedding had ingesneden bleven de resten van deze bedding als terrassen over. Resten van oude rivierbeddingen vormen een groot gedeelte van het Zuid-Limburgse landschap. In Zuid-Limburg is het hoogste terras het oudste terras. Enkele gebieden, zoals de uiterste zuidoosthoek van Zuid-Limburg werden niet door de pleistocene Maas beïnvloed. Hier is de peneplain die tot 200 à 300 m boven NAP reikt, bewaard gebleven.

De klimatologische omstandigheden in het Pleistoceen brachten een verandering in waterhoeveelheid en puinlast te weeg. In koude tijden trad een sterke mechanische verwerking (vorstwerking) in het achterland op, maar er was te weinig water voor het transport van het vele puin. Dit leidde tot accumulatie in de middenloop. In warmere tijden was er meer smeltwater en meer neerslag waardoor het rivierwater zich in zijn eigen accumulatie insneed.

Tektonische bewegingen veroorzaakten opwelling en scheefstelling van de schollen. Door deze bewegingen onstonden insnijdingen van de rivieren en scheefstelling of verbuiging van de oude riviervlakte. Tevens trad er door de opheffing een verlaging van de erosiebasis op, hetgeen weer gevolgen had voor het sedimentaire en erosieve karakter van de rivier. De Zuid-Limburgse Maasterrassen vallen uiteen in hoogterras, middenterras en laagterras. Deze terrasgroepen worden onderverdeeld in verschillende terrasniveaus. De niveaus kunnen worden onderscheiden aan de hand van de hoogteligging van de terrasbasis (Brueren, 1945), de samenstelling van het grind (Van Straaten, 1946) en de samenstelling van de zware fractie van het zand (Zonneveld 1948-49). De verschillende onderzoeken hebben tot ongeveer hetzelfde verspreidingsbeeld van de terrassen geleid.

Zoals eerder vermeld vormden rivieren fluviatiele grind- en zandafzettingen in het Pleistoceen. De dikte van de grindpakketten in Zuid-Limburg overschrijdt slechts zelden 10 meter; vaak is de dikte niet groter dan 7 m. De Zuid-Limburgse terrassen kan men aanduiden als erosieterrassen. Het sedimentpakket heeft namelijk een dikte die de normale diepte van de Maas niet of slechts weinig overtreft (Zonneveld, 1955). In veel gevallen blijft de top van de fluviatiele afzettingen van het lager gelegen terras onder de terrasbasis van het naastliggende hoger gelegen terras. De afzettingen die in de Maasterrassen worden aangetroffen, bestaan overwegend uit tamelijk grof en goed afgerond grind, soms uit zand en zelden uit klei- en leemlenzen. In het grind worden keien tot zeer grote blokken aangetroffen, soms van enige tonnen gewicht. Deze abnormaal grote stenen zijn waarschijnlijk op ijsschotsen getransporteerd. De kleur van deze afzettingen is dikwijls door ingespoelde löss of ijzeroxiden donkerbruin. De stenen bestaan uit kwartsiet, conglomeraat, zandsteen, vuursteen, enkele stollingsgesteenten en soms kalksteen.

Verschuiving van schollen langs breuken verliep niet uitsluitend verticaal maar vond vaak in een kantelende beweging plaats. Het is haast onmogelijk de toestand van voor de kanteling te reconstrueren omdat we te weinig afweten over de aard van deze kanteling (Brueren, 1945). Zuid-Limburg heeft in zijn geheel een rijzende beweging doorgemaakt waarbij de scharnieras samenviel met de westelijke breukzone van de Centrale Slenk. De meestal vlakke ligging en soms zelfs zwakke helling van de terrasbases tegen de stroomrichting in getuigen hiervan. Tevens wijst de verschuiving van de Maas uit een oorspronkelijk zuidwest-noordoost gerichte loop naar een ongeveer zuid-noord verlopende stroomrichting op een kanteling om een ongeveer westzuidwest-oostnoordoost lopende as.

Onder periglaciaire omstandigheden werden in het Zuid-Limburgse terrassenlandschap diepe erosiedalen gevormd waaronder de huidige droge dalen. Ook verweerde waarschijnlijk in het Pleistoceen de kalksteen tot zware montmorilloniehoudende klei, de zogenaamde kleefaarde. Tijdens de laatste twee ijstijden, Saale en Weichsel, werd vrijwel geheel Zuid-Limburg met löss bedekt. Deze lössdeken, die een dikte van enkele decimeters tot meer dan 15 m heeft, deed het reliëf van het landschap vervlakken. Later erodeerde de löss van de plateaus en hellingen en vormde in de dalen het colluvium. Dit colluvium is vrij homogeen van textuur en structuur, vaak met een gelaagde opbouw die ontstaan is door periodieke afzetting van het erosiemateriaal. De erosie van löss had ook invloed op de holocene afzettingen van de Maas en haar zijbeken. Deze bezitten namelijk een hoog leemgehalte hetgeen aan lössbijmenging wordt toegeschreven.

Holocene afzettingen spelen in Zuid-Limburg een ondergeschikte rol. De belangrijkste zijn de recente Maaszanden met overgangen naar rivierklei, die soms op een dun laagje holocene grind liggen. De verwante beekafzettingen langs de Geul en andere zijrivieren en -beken van de Maas behoren ook hiertoe. Een dikte van enige betekenis hebben deze afzettingen nergens; ze bedragen hoogstens enkele meters.

### **3.2. Landschap, hydrografie en hydrogeologische aspecten**

#### 3.2.1. Landschap en hydrografie

Het landschap van Zuid-Limburg wordt in sterke mate bepaald door de geologische opbouw. Het bestaat uit licht glooiende hoogvlakten waarin beken en de rivier de Maas diepe en brede dalen hebben ingesneden. De overgangen van beekdalen naar hoogvlakten en de terraswanden hebben vaak een steile helling. De ondiepe bodem van de hoogvlakten bestaat uit löss die van oudsher voor de landbouw is gebruikt evenals de beekdalen. Op de hoogvlakten lag de nadruk op akkerbouw en in de dalen op veeteelt. Er kwamen veel gemengde bedrijven voor. Tegenwoordig is meer specialisatie opgetreden, maar ook nu nog ligt ongeveer de helft van het landbouwareaal in akkers en de andere helft in grasland. Daarnaast komt in het gebied relatief veel fruitteelt voor. De steile dalwanden zijn vaak met loofbos en soms met gemengd bos begroeid. Dorpen en steden kwamen vooral tot ontwikkeling in de beekdalen of langs de terrasranden vanwege de aanwezigheid van water. De bevolking leefde in het recente verleden echter niet uitsluitend van de landbouw. Met de kolenmijnbouw zijn grote en kleine industrieën

ontstaan die deels nog steeds aanwezig zijn. Tegenwoordig is het toerisme ook een belangrijke bron van bestaan. Het gebied heeft een goed ontwikkelde infrastructuur.

Het hydrologisch karakter van Zuid-Limburg is afwijkend van de rest van Nederland. Vanwege de bijzondere geologische opbouw van de bodem en de aanwezigheid van hellingen kent dit gebied verschillende typen waterlopen. De beken worden gevoed door uittredend grondwater, veelal in de vorm van bronnen en ze voeren continu water. Bij hevige of langdurige regenval treedt afstroming van water over de oppervlakte op dat via grubben, vloedgraven en holle wegen naar de beken wordt gevoerd. Dit type waterlopen staat meestal droog. Het waterhuishoudkundig belang van grubben, vloedgraven en holle wegen is aanzienlijk en vele van dergelijke tijdelijke waterlopen worden daarom beheerd door het waterschap. Een bekend verschijnsel van recente jaren is het oppervlakkig afstromen van water over hellende gronden in Zuid-Limburg met verlies van landbouwgrond en water- en modderoverlast in de dalen.

Zuid-Limburg maakt onderdeel uit van het stroomgebied van de Maas. Deels watert dit gebied via relatief korte lopen rechtstreeks af op deze rivier, deels verloopt de afvoer naar de Maas via kleine rivieren en beken. De belangrijkste riviertjes en beken in Zuid-Limburg zijn de Jeker, Geul, Worm en Geleenbeek. Door oppervlakkige afstroming en een groot oppervlakte verhard gebied kennen de beken een hoge afvoerdynamiek. In Tabel 1 zijn afvoercharacteristieken van de Geul en van de Geleenbeek weergegeven. De meetstations in beide beken zijn gesitueerd in de bovenloop (Cotessen en Brommelen), de middenloop (Hommerich en Munstergeleen) en in de benedenloop (Papierfabriek en Oud-Roosteren). In beide beeksystemen komen hoge afvoeren voor in vergelijking met de gemiddelde jaarafvoer en ze hebben een hoge afvoerdynamiek. Vanwege grote verschillen in de duur van de meetperioden op de vermelde meetstations kunnen de in tabel 1 weergegeven waarden niet zonder meer met elkaar worden vergeleken.

*Tabel 1 Afvoercharacteristieken van de Geul en de Geleenbeek (waterschap Roer & Overmaas).*

<b>Beek meetstation</b>	<b>periode</b>	<b>gemiddelde jaarafvoer (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>minimum jaarafvoer (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>maximum jaarafvoer (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>aantal metingen</b>
<i>GEUL:</i>					
Cotessen	1991-1993	1.61	0.36	25.83	659
Hommerich	1971-1993	1.57	0.16	44.91	7452
Papierfabriek	1972-1993	3.38	0.81	45.07	7672
<i>GELEENBEEK:</i>					
Brommelen	1989-1993	0.20	0.07	14.56	1590
Munstergeleen	1911-1993	1.62	0.71	23.51	818
Oud-Roosteren	1972-1993	2.82	0.67	44.45	7071

### 3.2.2. Hydrogeologische aspecten van Zuid-Limburg

De langjarig gemiddelde neerslag varieert van circa 750 mm/jaar in het noordwesten tot meer dan 900 mm/jaar bij de Vaalserberg in het zuidoosten. De referentiegewasverdamping (= de

potentiële verdamping van grasland) bedraagt circa 560 mm/jaar. De verdamping van bouwland is een factor 0.8 lager dan van grasland. Verdampingsreductie zal vrijwel niet optreden bij löss. Het neerslagoverschot varieert tussen 200 en 400 mm/jaar (van noordwest naar zuidoost).

Zowel in verticale als in horizontale zin kent Zuid-Limburg verschillende grondwatereenheden. Een belangrijke aquifer wordt gevormd door kalksteenpakketten uit het Krijt, die in het zuidelijk deel van Zuid-Limburg freatisch grondwater voeren. De ondergrond heeft een opbouw in scheefliggende schollen, zodat het in het zuiden dagzomende kalksteenpakket even ten noorden van de Geul naar de diepere ondergrond duikt. De kalksteen onder het Centraal Plateau wordt bedekt door dikke pakketten tertiaire en kwartaire afzettingen, waarvan de zanden en grinden als aquifer fungeren met een praktisch ondoorlatende basis in de vorm van kleilagen op de overgang met de kalksteen. Op grotere diepte stroomt het grondwater in het kalksteenpakket in noordwestelijke richting. In het noordelijk deel van Zuid-Limburg is een derde watervoerend pakket aanwezig in het Carboon. Ten tijde van de mijnbouwperiode heeft men het mijnwater in het Carboon in kwantitatief en kwalitatief opzicht onderzocht (Kuyt, 1980). Zandsteenlagen, kwarsietlagen en breuken bepalen de hydrogeologische karakteristiek van het Carboon. De hellende zandsteen- en kwarsietlagen liggen ingeklemd tussen weinig doorlatende schalies en koollagen. Jongmans et al. (1941) geven een indruk van de totale hoeveelheid van het eertijds opgepompte mijnwater: in 1927 30.4 miljoen m<sup>3</sup>/jaar en in 1939 27.9 miljoen m<sup>3</sup>/jaar. Na het sluiten van de mijnen werden de pompen grotendeels stilgezet. Ten behoeve van de aangrenzende Duitse mijnen werd in oostelijk Zuid-Limburg later nog grondwater opgepompt en geloosd op de Worm. Sinds de beëindiging van het oppompen van mijnwater wordt het verloop in de stijghoogte van grondwater in het Carboon met regelmaat gemeten en de mogelijke gevolgen voor de bovenliggende aquifers bepaald, met name die in de kalksteen. Overigens vindt in het zuidelijkste deel van het Geuldal uitstroom van grondwater uit zandsteen in het Carboon plaats in de vorm van bronnen. In het zuidwestelijk deel van Zuid-Limburg komen in het Maasdal artesische bronnen voor die gevoed worden door water uit het Carboon.

Het stromingspatroon van het freatisch grondwater in Zuid-Limburg is in de vorm van een isohypsenbeeld in Fig.5 weergegeven. In het gebied ten zuiden van de lijn Maastricht-Heerlen vindt stroming van het freatisch grondwater hoofdzakelijk plaats in de kalksteen. De Geul en de Benzenrade Breuk begrenzen dit gebied in het noorden. In het gebied ten noorden van de lijn Maastricht-Heerlen is het freatisch grondwater voornamelijk aanwezig in tertiaire en kwartaire zanden en grinden. De hoofdrichting van de grondwaterstroming in Zuid-Limburg is noordwestelijk georiënteerd, richting naar de Maas. De Geul en de Geleenbeek met zijbeken draineren het freatische grondwaterpakket van het Centraal Plateau. Het Julianakanaal dat tussen Maastricht en Maasbracht parallel aan de Maas is aangelegd heeft vanwege haar hoge ligging geen invloed op de grondwaterstroming. Het grondwater stroomt er vrijelijk onder door. De Maas en de Feldebiss zijn grenzen voor het freatisch grondwatersysteem onder het Centraal Plateau. Bij de zuidelijke plateaus spelen de beekdalen van de Geul en de Gulp een zelfde rol. In het zuidoosten vindt toestroming van grondwater uit het aangrenzende België en Duitsland plaats, zowel in het kalksteenpakket als in tertiaire afzettingen.



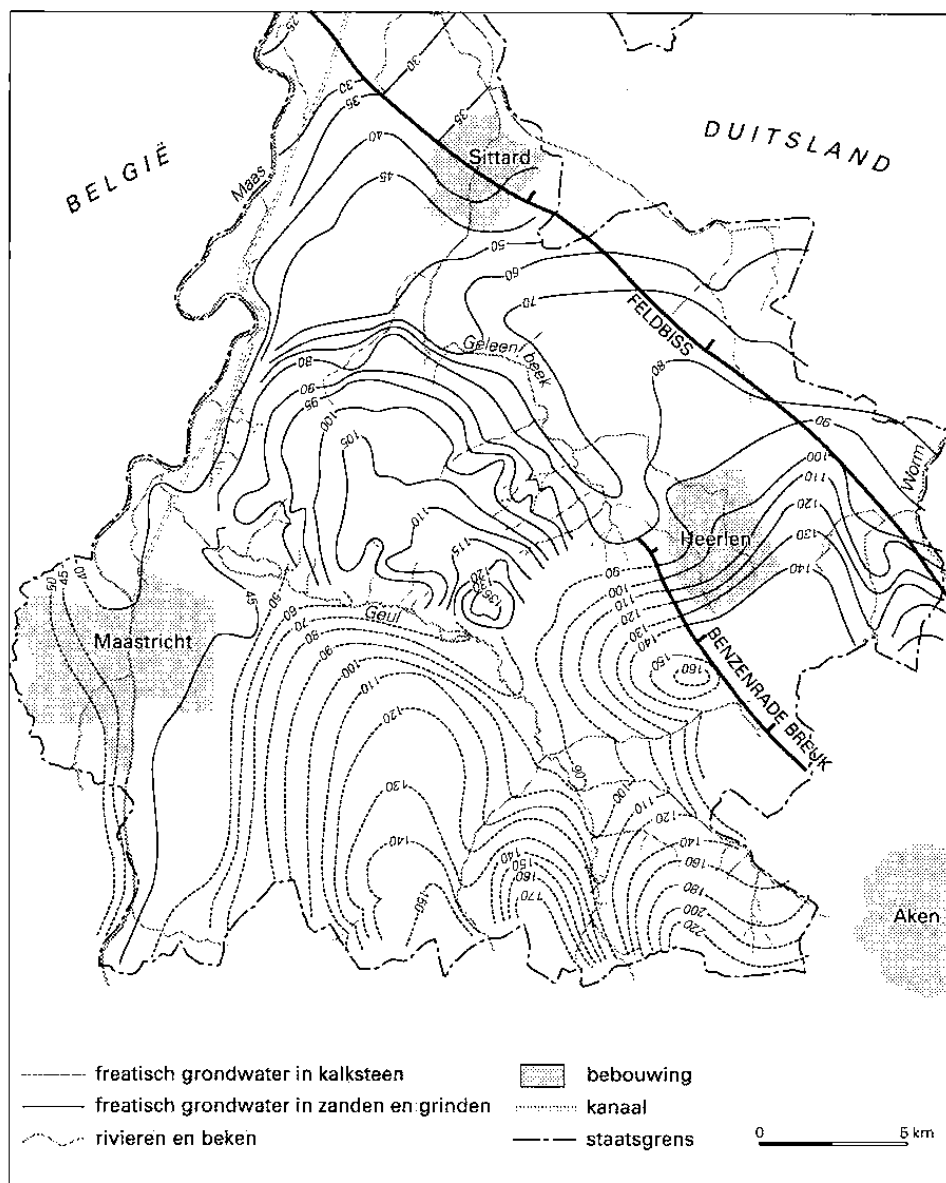


Fig.5. Isohypsenvoorspatroon van het freatische grondwater in Zuid-Limburg

Het belangrijkste grondwaterpakket in Zuid-Limburg voor de winning van drinkwater wordt gevormd door de kalksteen. De onttrekking van freatisch grondwater voor de bereiding van drinkwater bedroeg in 1990 circa 23 miljoen m<sup>3</sup> (zie Fig.1). Daarnaast wordt circa 10 miljoen m<sup>3</sup> freatisch grondwater per jaar gewonnen voor industriële doeleinden, waaronder brouwerijen. Eveneens wordt freatisch grondwater onttrokken in het kader van bemaling van terreinen, zoals groeven en voor recreatieve voorzieningen.

Een bijzonder aspect van het grondwater is dat het op tien en meer meters onder maaiveld staat onder de plateaus. Voor winning is dat geen onoverkomelijk probleem maar voor het installeren en bemonsteren van waarnemingsputten is dat lastig. Het grondwater in de beekdalen staat soms ondiep onder maaiveld, maar dat is niet representatief voor geheel Zuid-Limburg.

In Fig.1 is Zuid-Limburg ingedeeld in een aantal plateaus die ook hydrogeologische eenheden zijn. In de zuidelijke plateaus van Vijlen, Crapoel, Margraten en Ubachsberg, is het freatisch grondwater voornamelijk aanwezig in dikke kalksteenpakketten. Stroming van grondwater in deze kalksteenpakketten vindt voornamelijk plaats door (verkarste) scheuren, spleten en zones van gespleten harde kalksteen. De Geul en haar zijbeken worden grotendeels gevoed door grondwater uit de kalksteen. In het dal van de Gulp en het zuidelijk deel van het Geuldal zijn gescheurde, zandige kalksteenbanken (Vaalser Groenzand) aanwezig die het bovenliggende kalksteenpakket draineren. Op deze plaatsen treft men veelal bronnen aan. Op pompstation De Landeus, in het Geuldal bij Mechelen, wordt door middel van een captering water uit deze laag gewonnen ter plaatse van een natuurlijk broncomplex.

In vergelijking met de andere hydrogeologische eenheden kent het Centraal Plateau een relatief gesloten grondwaterhuishouding en vormt het een goed te begrenzen hydrogeologische eenheid. In het Centraal Plateau heeft men te maken met drie verticaal van elkaar gescheiden watervoerende pakketten. Het eerste of bovenste watervoerend pakket bestaat naast kwartaire sedimenten voornamelijk uit tertiaire afzettingen. Het tweede watervoerend pakket wordt gevormd door kalkafzettingen uit het Paleoceen en Krijt. Het derde watervoerend pakket bestaat uit de op grote diepte gelegen afzettingen uit het Carboon. Het bovenste grondwaterpakket van het Centraal Plateau is als een hydrogeologische eenheid voor de grondwaterstroming te beschouwen. Instroming van grondwater van buiten het gebied vindt niet plaats. Alleen het neerslagoverschot in het gebied zelf zorgt voor de voeding van het bovenste grondwaterpakket. De wegzijging naar diepere pakketten mag worden verwaarloosd. In het uitgebreide grondwaterlichaam in de onderliggende kalksteen vindt wel instroming van grondwater van buiten het gebied plaats.

De volgende slecht doorlatende afzettingen zijn aanwezig in de tertiaire pakketten:

- Afzettingen van Goudsberg (Cerithiën- of Cerithiumklei) van de Formatie van Tongeren;
- Nuculaklei van de Rupel Formatie;
- Klei van Boom (Septariënklei) van de Rupel Formatie;
- Afzettingen van Kakert van de Formatie van Breda; fijne kleihoudende zanden.

Ten zuiden van de Geullebreuk bestaan de watervoerende lagen uit middenoligocene afzettingen en vormen de Nuculaklei en de Cerithiënklei scheidende lagen. Het gebied ten noorden van de breuk van Geulle is ten gevolge van afschuiving circa 25 m lager komen te liggen. Ten noorden van de breuk bestaan de watervoerende lagen uit tertiaire en kwartaire zanden en vormt de Septariënklei een slecht doorlatende basislaag.

Door de hydrogeologische situatie van Zuid-Limburg zijn op veel plaatsen bronnen ontstaan waar het grondwater op geconcentreerde wijze aan de dag komt en als oppervlaktewater verder stroomt. Belangrijke factoren zijn de aanwezigheid van steile hellingen waardoor het grondwater wordt aangetapt en sterke overgangen in doorlatendheid van de bodem waardoor het water gedwongen moet afstromen naar bronnen. Aan de westzijde van het Plateau van Margraten liggen vrijwel geen bronnen. Deels komt dat doordat in de bodem een goed doorlatende aquifer aanwezig is. Deels wordt het grondwater echter ook afgevangen door pompstations.

## 4. RESULTATEN VAN DE VELDBEPALINGEN

### 4.1. Algemene kenmerken van de Zuid-Limburgse Plateaus

De plaatsbepalingen van de bemonsteringspunten (Fig.6) zijn gedaan met een GPS-instrument en daarna gecontroleerd aan de hand van topografische kaarten. In slechts enkele gevallen heeft dat aanleiding gegeven tot een correctie. De coördinaten van alle onderzochte bronnen zijn gegeven in Bijlage 3. De bronnen langs en op het Centraal Plateau zijn vrijwel dezelfde als die door Hendrix (1985) zijn onderzocht. Slechts in enkele gevallen waren de eerder bemonsterde bronnen niet terug te vinden en in een paar gevallen zijn extra bronnen gevonden. Voor de zuidelijke plateaus is aangesloten bij het onderzoek van de WUR. Langs de Noor is op die manier een relatief groot aantal bronnen onderzocht. In het overige gebied zijn bronnen gevonden met behulp van topografische kaarten en oudere gegevens.

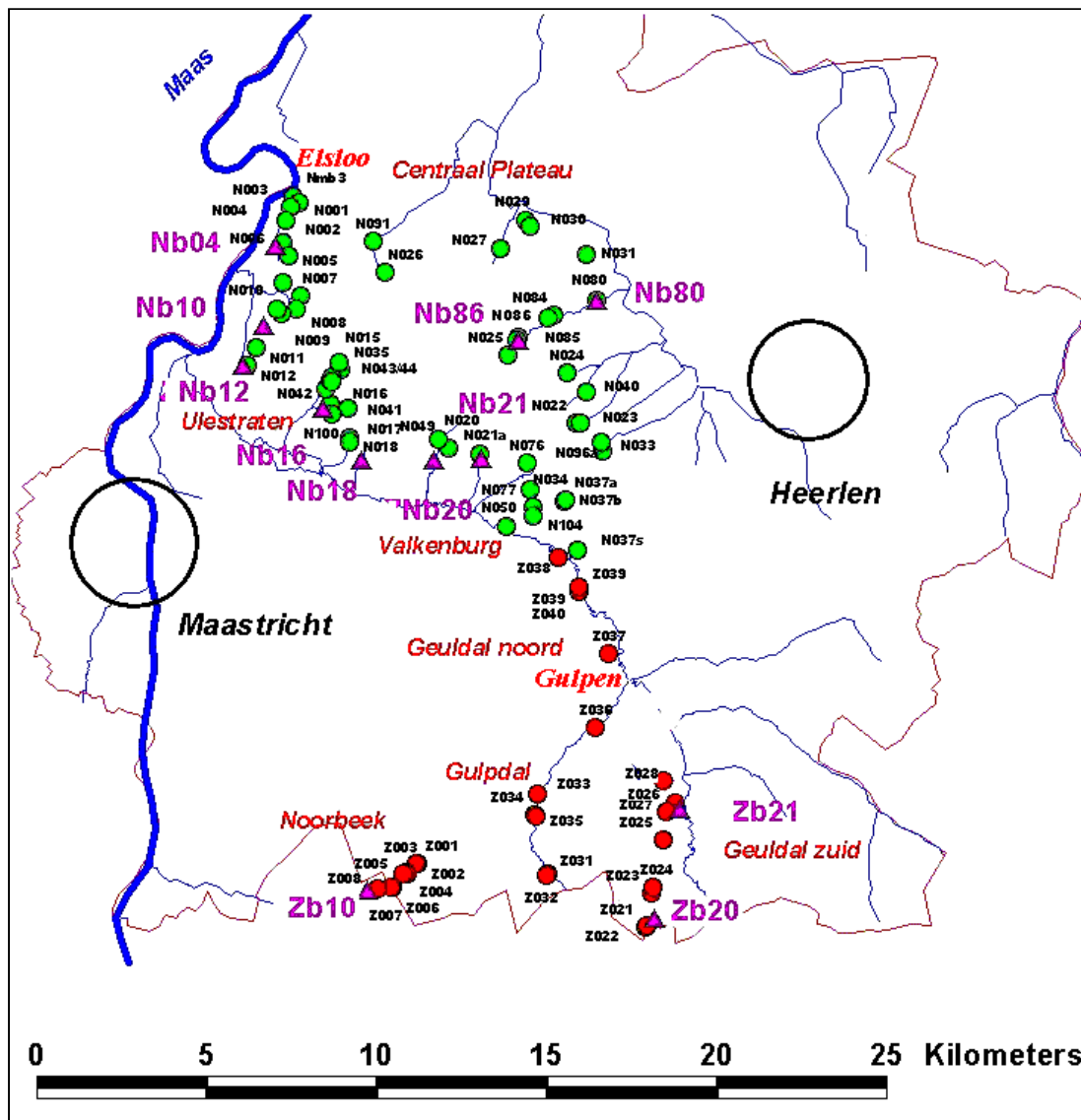


Fig.6 Situatie van de onderzochte bronnen (o) en bronbeken (∇) in Zuid-Limburg

Het is opvallend dat langs en op het Centraal Plateau vele tientallen bronnen aanwezig zijn, terwijl het aantal bij de zuidelijke plateaus geringer is. Dit hangt vermoedelijk samen met de hydrogeologische situatie, zoals hiervoor is aangegeven. De vele bronnen langs de Noor (Bijlage 1) zijn een uitzondering, de reden is de relatief lage topografische ligging en de geologische opbouw van de bodem (een relatief gering doorlaatvermogen). Langs de westrand van het Plateau van Margraten zijn op sommige plaatsen terreinkenmerken aanwezig die op bronnen duiden, maar die zijn in dat gebied niet aangetroffen.

De aard van de aangetroffen bronnen is verschillend. Bronnen met een grote afvoer en nabij bewoond gebied zijn vroeger gebruikt voor de watervoorziening. Ze zijn gecapteerd en ze dragen vaak een naam (St Jansbron, Paulusbron, Brigidabron). Op andere plaatsen lijkt de bron meer op een kwelplaats bij de oorsprong van een waterloop. Ook de omgeving van de bronnen kan verschillend van aard zijn. De westrand van het Centraal Plateau en de terrasrand bij Ulestraten hebben steile hellingen aan de voet waarvan bronnen ontspringen. Het terrein langs de noordoostrand is vlakker, zodat hier wat langere beken zijn ontstaan die gevoed worden door kleinere bronnen of kwelplekken langs zijtakken in vrij vlak land. De dalwanden van de Geul, de Gulp en de Noor zijn minder steil dan de terraswanden in het noorden met als gevolg dat bronnen zijn ontstaan op relatief lage plaatsen. Het bronwater stroomt via een korte loop naar die beken. De veldkenmerken van de brongebieden zijn wel steeds genoteerd (opgenomen in het veld dossier) maar in deze eigenschappen zit te weinig structuur voor een algemene beschrijving.

De vegetatie in het gebied rond de bronnen is eveneens opgenomen tijdens de veldbezoeken. Veel bronnen liggen in bos aangezien de hellingen van dalwanden en terrassen vaak met (essen)bomen zijn begroeid, de zogenoemde hellingbossen. Brandnetels vormen in veel gevallen de overheersende plant in de kruidlaag, wat duidt op een voedselrijk milieu.

## **4.2. Onderscheiden deelgebieden**

Het gebied waarin de onderzochte bronnen liggen (Fig.6) omvat in hydrogeologisch opzicht een aantal deelgebieden. Naar verwachting zal de verblijftijd van het water in de bodem tussen maaiveld en bronnen verschillend zijn voor de volgende deelgebieden.

### 4.2.1. Randen van het Centraal Plateau (noordwest, zuidwest, noordoost en zuidoost)

Voortbouwend en aanvullend op paragraaf 3.2 kunnen de deelgebieden als volgt worden beschreven. Onder het Centraal Plateau zal de top van de onverzadigde zone in veel gevallen uit löss bestaan met een dikte die varieert van nul tot meer dan 15 m. Daaronder is vooral in het westelijk gedeelte grof zand en grind aanwezig dat door de Maas is afgezet in het kwartaair. Meer naar het oosten toe zijn deze lagen dunner en fijnzandiger of ontbreken ze zelfs geheel. De grofzandige lagen liggen veelal op zandige rivierafzettingen uit het boven-tertiair die relatief fijner zijn. Het zandige pakket rust op relatief dikke tertiaire kleilagen. Slechts weinig water zal door de kleilagen naar de diepere kalksteenlagen doordringen. De stroming van grondwater vindt hoofdzakelijk plaats door het onderste deel van de zandlagen

boven de tertiaire kleilagen. Dit water stroomt naar de bronnen aan de randen van het Centraal Plateau. De dikte van de watervoerende laag is afhankelijk van de stand van het grondwater en dus variabel. De genoemde opbouw is moeilijk in schema te brengen. De lagen zijn hellend en het gebied wordt doorsneden door een aantal breuken waarvan de geohydrologische effecten nog onvoldoende bekend zijn. Bij het Centraal Plateau zijn de noordwestelijke, de zuidwestelijke en de noordoostelijke rand apart onderscheiden. De bronnen langs de zuidoostelijke rand van het Centraal Plateau, nabij Valkenburg, liggen in een overgangsgebied naar het Plateau van Ubachsberg.

Ten oosten van Valkenburg ligt het Plateau van Ubachsberg (zie Fig.1) waar de bodem geen of nauwelijks ongeconsolideerde sedimenten van de Maas bevat. De löss die is afgezet, ligt direct op afzettingen van kalksteen. Het bovenste deel van de kalksteen is beter doorlatend en vormt een watervoerende laag die aan de onderzijde wordt afgesloten door minder goed doorlatende afzettingen. De onverzadigde zone bestaat hier dus uit een lösslaag en daaronder kalksteen. Zowel de laag löss als de laag kalksteen hebben een variabele dikte. De bronnen ten oosten van Valkenburg hoeven niet het hele watervoerende pakket te draineren. Mogelijk stroomt een (groot) deel van het grondwater verder in noordwestelijke richting.

#### 4.2.2. Zuidelijke plateaus met de dalen van de Noor, de Gulp en de Geul

In het gebied van het Plateau van Margraten zijn plaatselijk kwartaire sedimenten afgezet, maar die liggen hoog in de bodem. Ze vormen samen met de löss het bovenste deel van de onverzadigde zone. Het onderste deel van de onverzadigde zone bestaat uit kalksteen en daarin stroomt ook het grondwater. De watervoerende laag kan tientallen meters dik zijn. De kalksteen van het watervoerende pakket ligt op oudere formaties die slechter doorlatend zijn en die een basis vormen voor de stroming van het grondwater erboven. Het grondwater stroomt door openingen in de kalksteen die vermoedelijk veel groter zijn dan de poriën in zandige lagen zodat de stroomsnelheid groter kan zijn. De effectieve porositeit zal echter kleiner zijn en ongeveer 10% (Van der Aa et al., 2002) bedragen. Het Plateau van Margraten wordt aan de zuidzijde begrensd door de dalen van de Voer en de Noor. De Noor stroomt alleen in het westelijk deel van het dal. Meer naar het oosten ligt een uitgestrekt droog dal. De Noor wordt gevoed door talrijke bronnen.

Tussen de rivieren Geul en Gulp ligt het Plateau van Crapoel met een bodem die vergelijkbaar is met die van het Plateau van Margraten. Gezien de algemene structuur van de bodem van Zuid-Limburg met lagen die hellen naar het noordwesten mag worden verwacht dat de watervoerende lagen minder dik zijn in dat gebied dan meer naar het westen.

### **4.3. De metingen in het veld**

De hoeveelheid van het afgevoerde water is steeds gemeten of geschat, in sommige gevallen is dat gedaan met drijvertjes, soms was een volumetrische meting mogelijk en van de rest is de afvoer op het oog geschat. De gemiddelde afvoer van de bronnen en de beken is voor een aantal onderscheiden gebieden weergegeven in Fig.7. De afvoeren waren betrekkelijk laag

met gemiddelden rond 1 tot 2 l/s. De afvoer van vele bronnen was echter minder dan een liter per seconde. Bij een afvoer minder dan 0.1 l/s is de "bron" overgeslagen. De afvoer van de bronnen langs het Centraal Plateau is nauwkeuriger bepaald door Hendrix (1985), soms met een meetschot. Hij heeft echter vooral in bronbeken gemeten waardoor een vergelijking niet goed mogelijk is. De twee meest rechtse waarden in de linkerhelft van Fig.7 betreffen de afvoeren door bronbeken die veelal het water van meerdere bronnen afvoeren.

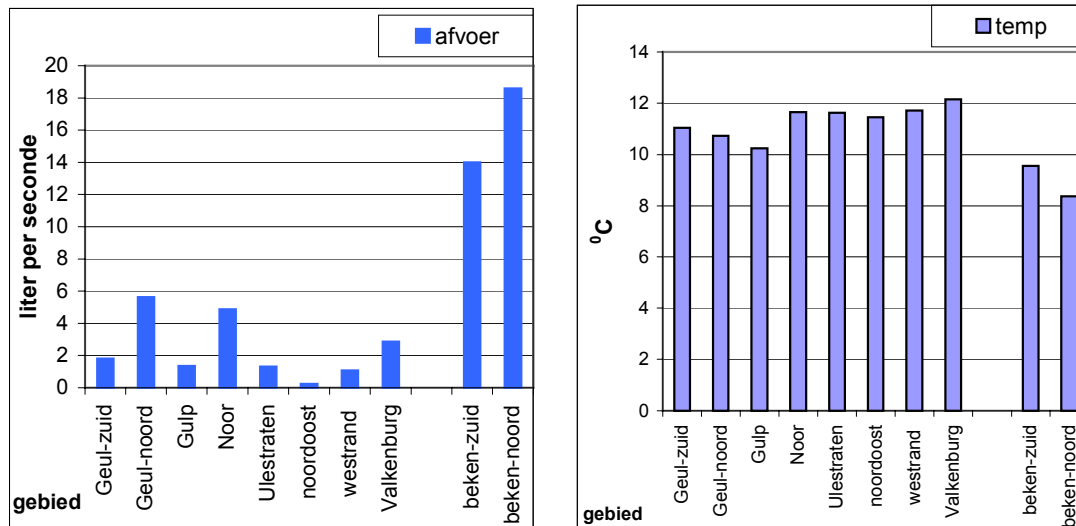


Fig.7 Gemiddelde afvoer en temperatuur van groepen bronnen en bronbeken

Steeds is ook de temperatuur van het bronwater gemeten. Gemiddelde waarden zijn gegeven in Fig.7. De gemiddelde luchttemperatuur aan de oppervlakte van Zuid-Limburg bedraagt ongeveer 10 °C en de temperatuur in de bodem zal daar enigszins boven liggen door de geothermische gradiënt (ongeveer 0.027 °C per m). De niet verrassende conclusie is dat het door de bronnen afgevoerde water overwegend uit relatief ondiep (minder dan 100 m) grondwater bestaat. Bij de bronnen nabij Valkenburg, met een relatief hoge temperatuur, komt mogelijk een niet verwaarloosbare bijdrage van de afvoer uit diepere lagen. De temperaturen van het beekwater (de twee meest rechtse waarden) zijn beïnvloed door de temperatuur bij monsterneming die lager was dan het jaargemiddelde.

De waarden voor EC en pH zijn gegeven in Fig.2 en 3. De pH varieert veelal tussen pH=7 en pH=8. Het afgevoerde water is neutraal tot basisch. Vooral bij de bronnen bij het Centraal Plateau is het toestromende grondwater met kalk verzadigd, zoals blijkt uit de neerslag van vaste kalkverbindingen bij de bronnen. Hierbij horen relatief hoge pH-waarden. Deze vaste neerslag wordt brontuf genoemd. Bij de bronnen langs de zuidelijke plateaus komt dit verschijnsel minder vaak voor. De EC is bij de zuidelijke bronnen in het algemeen ongeveer 200 uS/cm lager dan bij de bronnen op en langs het Centraal Plateau als gevolg van verschillen in de concentraties van opgeloste stoffen.

## 5. REISTIJDEN IN DE BODEM VAN GRONDWATER EN BRONWATER

### 5.1. Tritium en chloride als tracers

Het onderzoek van de bronnen en bronbeken van Zuid-Limburg hield metingen in van de tritiumconcentraties van het bemonsterde water om de reistijden in de bodem te bepalen. Deze zijn van belang om het verband te kunnen leggen tussen de belasting aan maaiveld waar het overschot aan neerslag infiltreert in de bodem en de samenstelling van de bronnen waar het grondwater weer voor de dag komt. Het bronwater is een mengsel van het grondwater dat toestroomt door de watervoerende lagen. In dat water zal een reistijdverdeling aanwezig zijn die wordt bepaald door de aanvulling van het grondwater en de dikte en porositeit van de watervoerende laag. Tussen maaiveld en de top van de watervoerende laag heeft het water eerst een bepaalde tijd in de onverzadigde zone doorgebracht. De reistijd in de onverzadigde zone is afhankelijk van de dikte van die zone en van de aard van de lagen waaruit die is opgebouwd. Voor iedere bron zal deze reistijd variabel zijn gezien de verschillen in dikte en aard van de lagen in het intrekgebied.

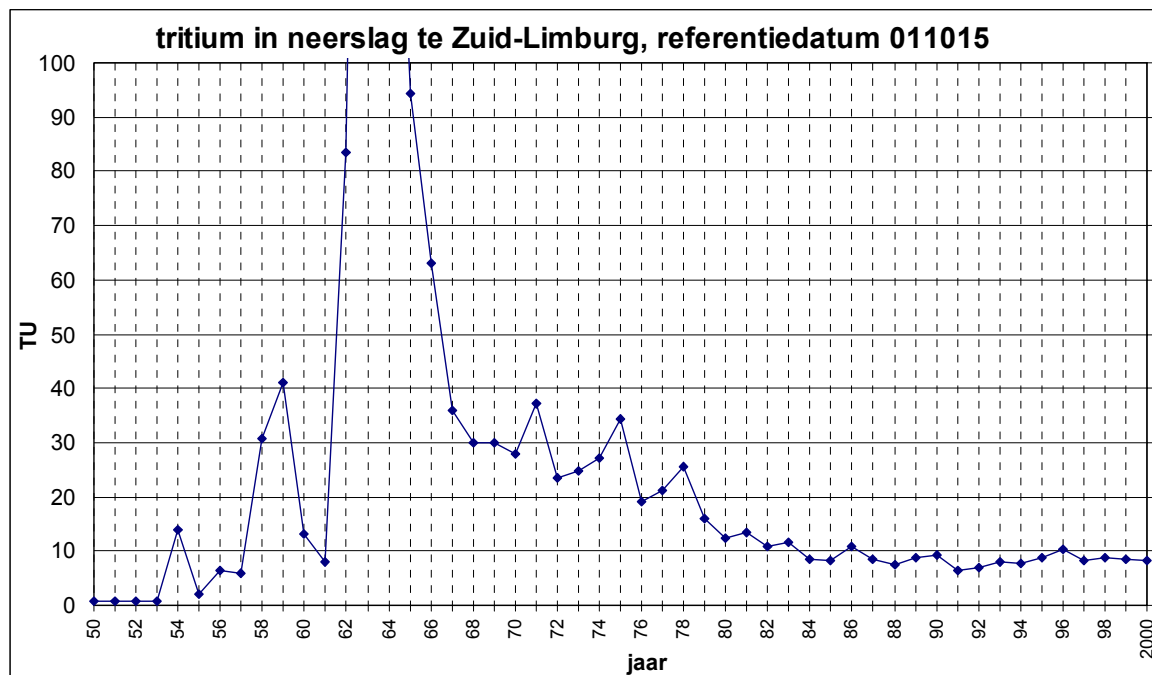


Fig.8 Aangehouden concentraties van tritium in de neerslag van Zuid-Limburg

De gemeten waarde van de tritiumconcentratie in een bron is een functie van de reistijd in de onverzadigde zone en de reistijdverdeling in de aquifer. Aangenomen mag worden dat de concentraties van tritium in de bodem alleen veranderen door radioactief verval, waarvan de vervalsnelheid bekend is. Voor de interpretatie van het bronwater moeten de concentraties in de neerslag worden gereduceerd met het tijdstip van bemonsteren als referentiedatum. Vanaf 1980 zijn de concentraties van tritium in de neerslag gemeten op het vliegveld Beek. In de periode daarvoor kunnen ze worden afgeleid uit metingen elders (Meinardi, 1994). De

desbetreffende waarden zijn verkregen van het Centrum voor Isotopen Onderzoek (CIO) in Groningen. De aangehouden waarden in de neerslag zijn weergegeven in Fig.8. In de jaren 1963 en 1964 zijn relatief hoge waarden gemeten die in Fig.8 overeenkomen met 302 TU voor 1963 en 179 TU voor het jaar 1964 (laatste bovengrondse kernproeven in 1963).

Ook andere eigenschappen van het grondwater zijn een functie van de reistijd in de bodem. De concentraties van chloride en nitraat in het infiltrerende water zijn toegenomen in de tijd als gevolg van een toegenomen belasting van de bodem in de intrekgebieden. De concentraties zijn lager, maar zeker niet verwaarloosbaar, in gebieden met natuurlijke begroeiing. Deze stoffen zijn minder goede indicatoren aangezien de variatie in tijd en plaats groot is en bovendien omdat ze een rol kunnen spelen in diverse processen in de bodem. Die processen zijn vooral bij nitraat van belang, chloride gedraagt zich conservatief. Daarentegen is de belasting met chloride variabel doordat het op verschillende manieren door de mens wordt gebruikt, bijvoorbeeld als wegzout. Chloride is in het volgende gebruikt als een ondersteunend gegeven bij de bepaling van de reistijden met behulp van tritium.

Voor chloride in het landelijk gebied is aangehouden dat de gemiddelde belasting aan maaiveld exponentieel is toegenomen van een lage waarde omstreeks 1900 (invoering van de kunstmest) tot de waarden omstreeks 1950 en dat de bijdrage van kunstmest daarna relatief constant is gebleven (Henkens, 1994). Aangenomen is echter dat de belasting van het landelijk gebied vanuit andere bronnen (strooizout op wegen en in bebouwde kommen) groter is geweest na 1950, zodat de concentraties daarna nog met ongeveer 10 mg/l zijn toegenomen. De gemiddelde chlorideconcentraties in het grondwater (dicht onder maaiveld) en berekend onder die aannamen zijn weergegeven in Fig.9.

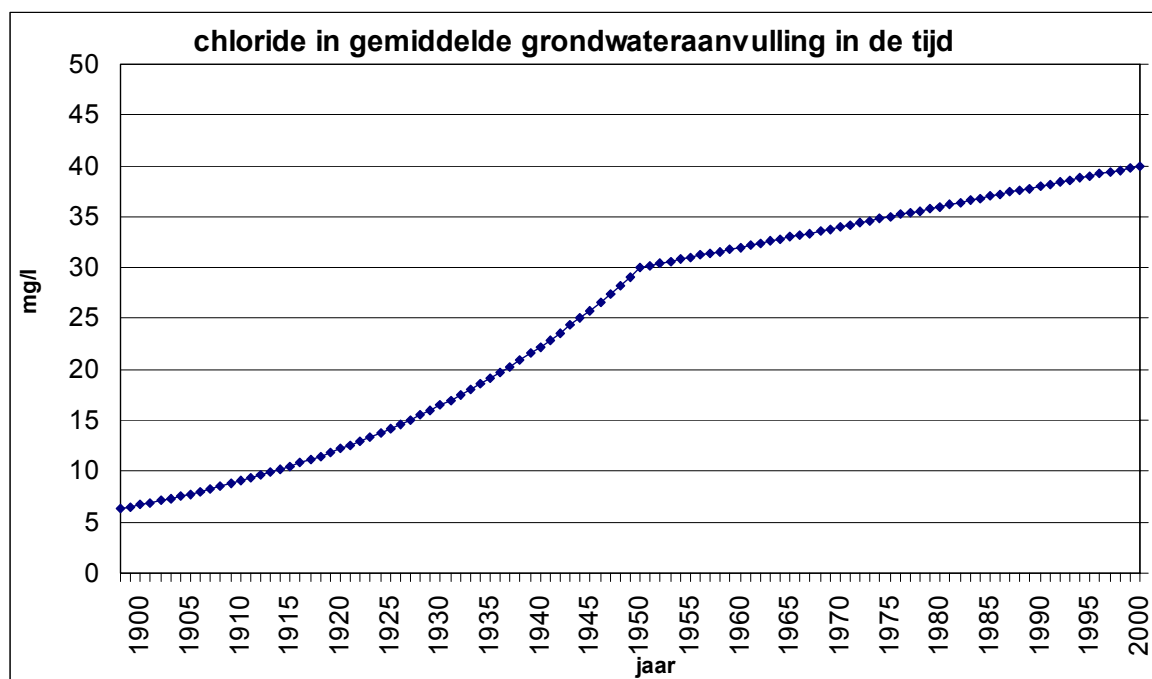


Fig.9 Veronderstelde chlorideconcentraties in de grondwateraanvulling



## 5.2. Stroming in de onverzadigde en in de verzadigde zone

De snelheid van de verticale stroming door de onverzadigde zone hangt af van de effectief doorstroomde porositeit. Voor grof zand en grind zal die niet meer dan circa 5% bedragen, maar voor fijn zand zal de effectieve porositeit bij veldcapaciteit circa 15 tot 20% zijn. Löss heeft een relatief grote totale porositeit en daarmee een groot vochthoudend vermogen. Bij veldcapaciteit ligt de vochthoudendheid boven 30%, de effectief doorstroomde porositeit zal circa 25% zijn (mondelinge mededeling Dijkma, WUR). Voor Zuid-Limburg geeft Hendrix (schriftelijke mededeling) de volgende waarden op: de reistijd in löss per meter dikte is 0.8 jaar, in grof zand en grind 0.08 en in tertiair zand 0.55 jaar. Bij een grondwateraanvulling van 300 mm/jaar, zoals bij eerste benadering geldt voor het noordelijke Centraal Plateau in Zuid-Limburg, komt dit neer op een doorstroomde porositeit van 0.25 voor löss, 0.024 voor grind en grof zand en 0.17 voor matig grof zand. Met deze waarden kan de totale reistijd in de onverzadigde zone worden geschat als de dikten van de desbetreffende lagen bekend zijn.

De reistijdverdeling in watervoerende lagen kan worden benaderd met vergelijkingen die zijn ontwikkeld door Ernst en Bruggeman en uitgewerkt in Meinardi (1994):

$$z/D = 1 - \exp(-I \cdot t) / (p \cdot D) \quad \text{en} \quad t = (p \cdot D / I) \cdot \ln(D / (D - z))$$

met  $z$  = diepte onder grondwaterstand (m)

$D$  = dikte aquifer (m)

$p$  = porositeit

$I$  = grondwateraanvulling (m/a)

$t$  = reistijd (a) in de aquifer op diepte  $z$

Een schematische weergave van de stroming in een vertikaal profiel is afgebeeld in Fig.10. De reistijden in het door een bron afgevoerde mengsel zijn opgevat als de som van een vaste reistijd in de onverzadigde zone en van variabele reistijden in de aquifer.

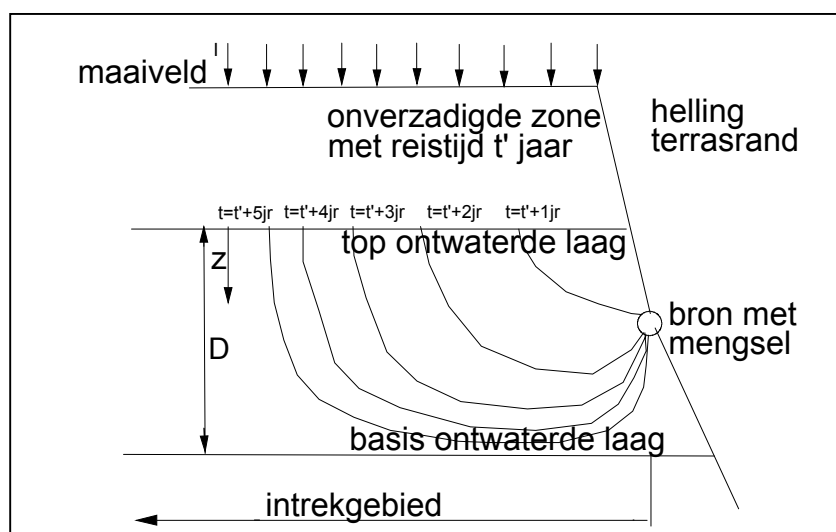


Fig.10 Schema van de reistijdverdeling in het bronwater in een vertikaal profiel

Bij een waterloop loodrecht op het vlak van tekening die de aquifer over de volle hoogte ontwatert, zou het grondwater horizontaal toestromen. Bij een puntbron (zoals getekend) buigen de stroombanen naar het punt. Dit effect is merkbaar tot tientallen meters van de bron. In het praktische geval van een kilometers lang intrekgebied mag daarom met de formule worden gerekend die uitgaat van een volledige insnijdende waterloop.

De waarde  $z/D$  representeert het deel van de aquifer met reistijden minder dan  $t$  jaar. Met de vergelijking kan voor elke aquifer een reistijdverdeling worden bepaald als de waarden van de parameters bekend zijn. Daarmee kan een schatting worden gemaakt voor de verschillende deelgebieden. Voor de noordwestelijke rand van het Centraal Plateau kan bijvoorbeeld worden aangehouden (Meinardi, 1994):

Aanvulling van het grondwater:  $I=300$  mm/jaar

Porositeit:  $p=0.35$

Dikte zandige aquifer: 2-15 m.

De uitwerking van de vergelijking levert voor verschillende dikten het beeld op van Fig.11. De tijdschaal op de horizontale as geeft de maatgevende tijd ( $t=0$ ) van de voeding van de aquifer aan. Als bijvoorbeeld de reistijd in de onverzadigde zone van het Centraal Plateau 10 jaar bedraagt, dan geldt bij monsterneming in 2001 het jaar 1991 als maatgevend jaar. De reistijdverdelingen van de formule leveren bij bepaalde dikten van de aquifer (in meter) de waarden van Fig.11 op. Bij gegeven aanvulling en porositeit zal bij een dikte van 7.5 m dus een concentratie van 17 TU aanwezig zijn in de afvoer van de bron bij bemonstering in 2001.

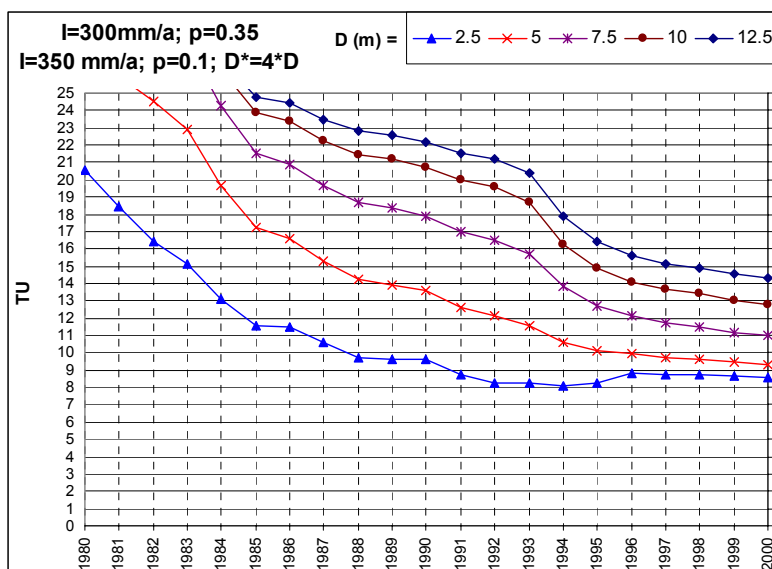


Fig.11 Tritium in de bronnen als gevolg van de belasting door de neerslag

Fig.11 geldt ook voor andere combinaties van grondwateraanvulling, dikte en porositeit. De vergelijking zal bij een porositeit van  $p=0.1$  (kalksteen) dezelfde waarde opleveren voor een dikte die 3.5 keer zo groot is. Bij een grondwateraanvulling van 350 mm/jaar en  $p=0.1$  moet de dikte ( $D^*$ ) vier keer zo groot zijn (Fig.10). Ook voor chloride kan een beeld worden

gegeven (Fig.12), weer op basis van de formule en met behulp van Fig.9. De variatie in de concentraties is hier veel minder groot door de geringere verschillen in de belasting.

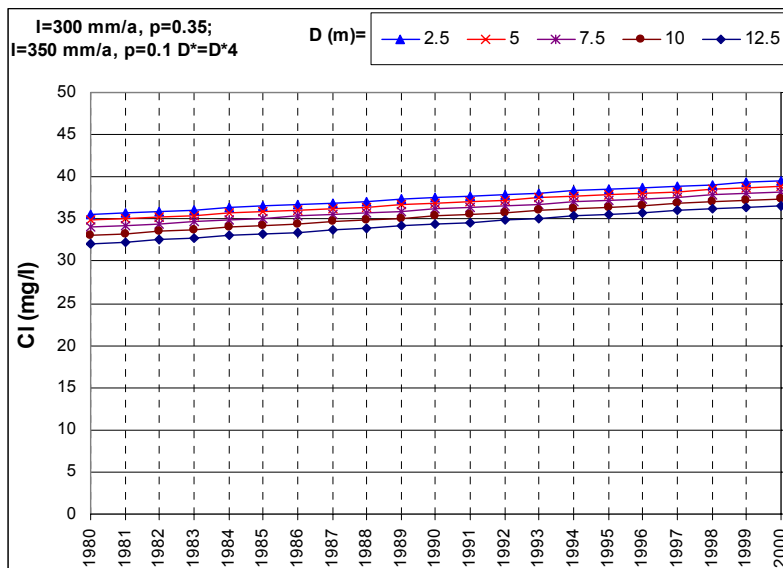


Fig.12 Chloride in de bronnen als gevolg van een belasting aan maaiveld

Voor iedere willekeurige dikte zijn beelden af te leiden uit de vergelijking. Dit is relevant voor de zuidelijke gebieden waar de aquifer uit lagen kalksteen bestaat met een grotere dikte dan in het noorden maar met een geringere porositeit. De aanvulling van het grondwater is in het zuiden groter dan in het noorden vanwege een hogere neerslag. De te verwachten tritium- en chlorideconcentraties voor dikten ( $D^*$ ) van 10, 20, 30, 40 en 50 m zijn gegeven in Fig.11 en Fig.12. Voor dezelfde waarden van porositeit en aanvulling van het grondwater levert de uitwerking van de vergelijking voor nog grotere dikten de Fig.13 en Fig.14 op.

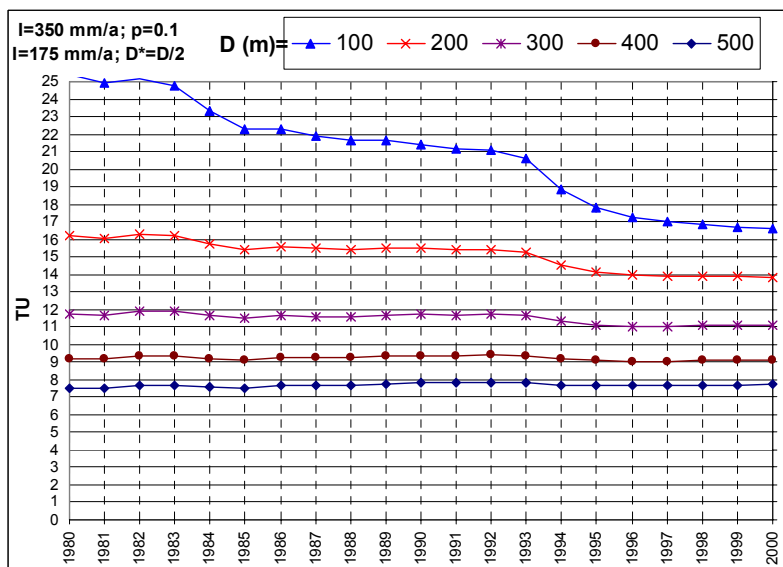


Fig.13 Tritium in de bronnen als gevolg van de belasting door de neerslag

Het effect van grotere dikten komt in Fig.13 duidelijk tot uiting als een (veel) grotere bijdrage van grondwater met langere reistijden die hogere (jaren 1960) en lagere (voor 1950) concentraties meebrengen. Voor chloride treedt een vergelijkbaar verschijnsel op (Fig.14).

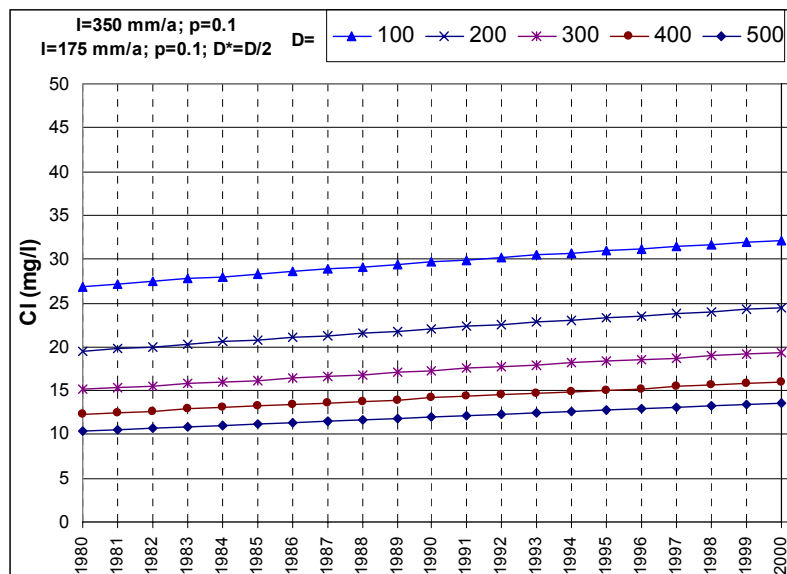


Fig.14 Chloride in de bronnen als gevolg van een belasting aan maaiveld

Vooral in het zuiden kan een deel van het grondwater in de aquifers naar diepere lagen stromen. Dit water komt niet in de nabije bronnen terecht maar stroomt door die lagen verder in de richting van de Maas. Het effect op de concentraties in de bronnen kan met de eerder gegeven figuren worden bepaald. Het effect van een geringere voeding van de bronnen is volgens de formule namelijk gelijk aan de situatie waarbij de doorstroomde dikte evenredig afneemt. In gevallen dat grondwater uit diepere lagen niet volledig in de bronnen komt, kunnen Fig.13 en Fig.14 daarom eveneens worden gebruikt.

### 5.3. Westelijke terrasrand van het Centraal Plateau (noordwesten)

De bronnen en bronbeken rond en op het Centraal Plateau (Fig.6) liggen in een aantal groepen langs de randen. De bronnen bij Ulestraten liggen er deels zelfs op. De meest westelijke bronnen liggen aan de voet van of in een terrasrand die aan het dal van de huidige Maas grenst. De westelijke groep kan verder worden onderverdeeld op basis van de geologische opbouw, maar uiteindelijk is daarvan een samenhangend geheel gemaakt.

De bronnen n001t/m n005 en nmb3 nabij Elsloo liggen in een gebied waar de onverzadigde zone dikker is dan 20 m en de lössdikte meer dan 5 m (Van der Aa et al., 2002). Het zandige pakket bestaat gezien de ligging nabij de huidige Maas waarschijnlijk uit grind en grof zand.

Dikte löss:	5 m	reistijd onverzadigde zone:	6 jaar
<u>Dikte grind en grof zand:</u>	<u>18 m</u>	<u>reistijd onverzadigde zone:</u>	<u>2 jaar</u>
Dikte onverzadigde zone:	23 m	reistijd onverzadigde zone:	8 jaar

Een eerste schatting van de reistijd in de onverzadigde zone is 8 jaar. Het in 2001 bemonsterde grondwater zal op zijn laatst omstreeks 1993 de aquifer hebben bereikt (maatgevend jaar, tijdstip  $t=0$ ). De gemeten concentraties van tritium en chloride zijn weergegeven in Fig.15. Deze concentraties moeten passen bij de lijnen van Fig.11 en 22.

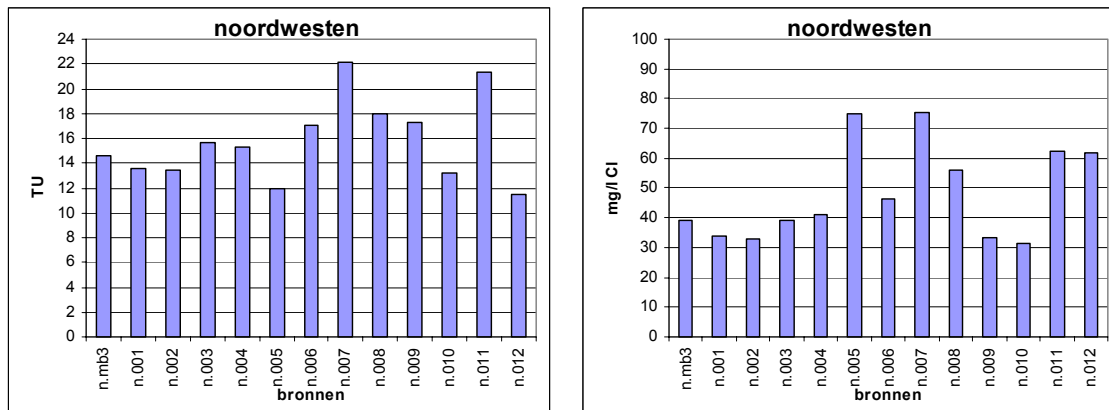


Fig.15 Gemeten  $^3\text{H}$ - en  $\text{Cl}$ -concentraties, westelijke rand

De vergelijking is afgebeeld in Fig.16 voor de bronnen n001t/m n005 en nmb3, waarvan de tritiumconcentraties tussen 12 en 16 TU liggen en die van chloride meestal tussen 30 en 40 mg/l. In Fig.16 is de zone gemarkeerd waarin de tritiumconcentraties in de bronnen in het noordwesten liggen. De vergelijking wijst uit dat voeding voor 1989-1993 en een dikte van de aquifer van 5 tot 10 m kunnen leiden tot de waargenomen concentraties. Ook een dikte van de aquifer van  $D=2.5$  m zou een concentratie van 12 TU opleveren. In dat geval moet de reistijd in de onverzadigde zone langer zijn, namelijk 16 jaar. Bron n005 bevat een relatief hoge concentratie aan chloride die vermoedelijk het gevolg is van een extra belasting.

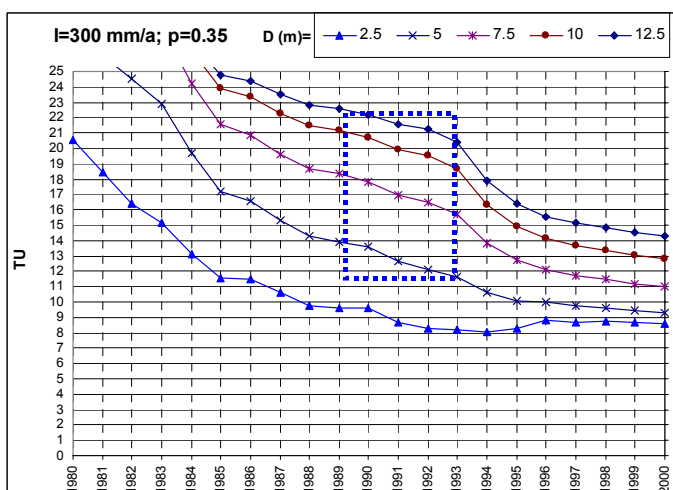


Fig.16 Tritiumconcentraties in bronnen langs het Centraal Plateau; interpretatieruimte

De bronnen n006 tot n010 liggen in een iets ander gebied dan die bij Elsloo. De concentraties van tritium in n006, n008 en n009 zijn circa 18 TU en die van n007 is 22 TU. Deze

concentraties wijzen erop dat de reistijd in de onverzadigde zone ongeveer 12 jaar heeft bedragen (maatgevend jaar is 1989) hoewel de onverzadigde zone ongeveer even dik is. Dit verschil zou verklaard kunnen worden door een aanwezigheid van een fijnzandige laag in de onverzadigde zone. De dikte van de aquifer is in dit geval tussen 7.5 en 12.5 m. Een concentratie van 18TU zou (behalve door lange reistijden in de onverzadigde zone) ook het gevolg kunnen zijn van een iets grotere dikte van de aquifer (de geologische opbouw is bepaald door de Breuk van Geulle, zie Hoofdstuk 3). De concentraties van chloride geven geen uitsluitsel want die zijn relatief hoog behalve voor n009 waar andere bronnen (vliegveld) vermoedelijk een rol spelen. Ook de waarden van de tritiumconcentratie in n010, n011 en n012 variëren. Aanvulling van de aquifer in 1991 en een dikte die varieert tussen 5 en 12.5 m zouden tot de gemeten concentraties van tritium leiden. De relatief lage concentraties van chloride in n009 en n010 geven aan dat een instroom van water uit de onverzadigde zone naar de aquifer omstreeks 1990 waarschijnlijk is.

Indien de gegevens voor de gehele noordwestelijke rand worden samengevat dan lijkt het waarschijnlijk dat de reistijd in de onverzadigde zone ongeveer 10 jaar heeft bedragen en dat de dikte van de aquifer tussen 5 en 12.5 m ligt. Als we aannemen dat die dikte gemiddeld 7.5 m bedraagt dan kan de gemiddelde reistijd in de bodem van het bronwater langs de noordwestelijke rand worden bepaald. Voor individuele bronnen kan die reistijd afwijken.

Bij benadering is de gemiddelde reistijdverdeling (met inbegrip van de reistijd in de onverzadigde zone) als volgt:

- 70% heeft een reistijd gehad van minder dan  $(10+10=)$  20 jaar;
- 20% heeft een reistijd tussen  $(10+10=)$  20 en  $(10+20=)$  30 jaar;
- 7% heeft een reistijd tussen 30 en 40 jaar;
- 3% heeft een reistijd tussen 40 en 60 jaar;
- minder dan 1% heeft een reistijd van meer dan 60 jaar.

#### 5.4. Terrasranden nabij Ulestraten (zuidwesten)

De plaats Ulestraten ligt aan de zuidwestrand van het Centraal Plateau. Hier liggen net zoals bij de westrand van het Centraal Plateau vele bronnen die zijn samengevoegd tot een groep. Bij die groep zijn ook de bronnen n017 en n018 gevoegd, hoewel die eigenlijk bij een ander gebied horen omdat ze rechtstreeks op de Geul afwateren. De dikte van de onverzadigde zone is relatief gering, tussen 10 en 20 m, maar daarvan bestaat meer dan 5 m uit löss. Misschien zijn de zandlagen in de onverzadigde zone in het algemeen fijner dan verder naar het westen en zullen ze ook minder grind bevatten. Dit leidt tot de volgende schatting:

Dikte löss:	7.5 m	reistijd onverzadigde zone:	9 jaar
Dikte grind en grof zand:	5 m	reistijd onverzadigde zone:	<0.5 jaar
<u>Dikte matig grof zand:</u>	<u>2.5 m</u>	<u>reistijd onverzadigde zone:</u>	<u>2 jaar</u>
Dikte onverzadigde zone:	15 m	reistijd onverzadigde zone:	11 jaar

De reistijd langs de zuidwestelijke randen bedraagt in eerste benadering dus ongeveer 11 jaar, dat betekent dat de instroom naar de aquifer omstreeks 1990 heeft plaatsgevonden. De verdere interpretatie moet daar nader uitsluitsel over geven. De concentraties van tritium en chloride in het bronwater zijn weergegeven in Fig.17.

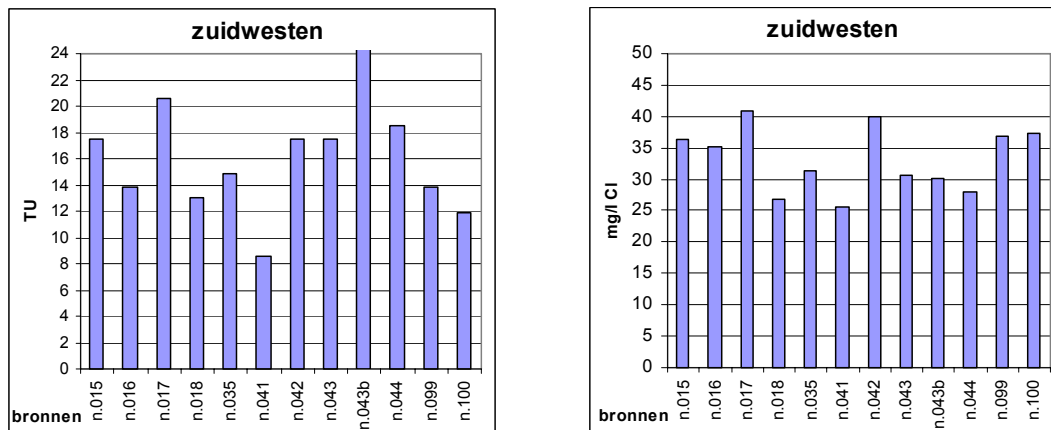


Fig.17 Gemeten <sup>3</sup>H- en Cl-concentraties, zuidwestelijke rand

De tritiumconcentraties langs de zuidwestelijke rand liggen tussen 12 en iets meer dan 18 TU, behalve n017 met 21 TU, n043b met 24.8 TU en bron n041, die met een concentratie van 8.6 TU relatief weinig tritium bevat. De concentraties leiden tot een interpretatie van een gemiddelde dikte van de aquifer van 7.5 m en een voeding van de aquifer voor 1988 tot 1994. De waargenomen concentraties van chloride bevestigen dat beeld (zie Fig.12). Ook bron n041 zou bij een geringe dikte van de aquifer van 2.5 m uit dezelfde periode kunnen stammen, maar de concentratie van chloride (26 mg/l) geeft een aanwijzing dat een deel van het water langer in de bodem heeft verbleven. Hierop wordt nader terug gekomen.

De conclusie is dat de gemiddelde reistijdverdeling langs de zuidwestelijke rand van het Centraal Plateau in eerste benadering vergelijkbaar is met die langs de noordwestelijke rand.

### 5.5. Noordoostelijke rand van het Centraal Plateau (noordoost)

In het noordoostelijk deel van het Centraal Plateau ontspringt een aantal bronnen die afwateren op de Geleenbeek. Ze zijn tot een groep samengevoegd hoewel de opbouw van de bodem variabel is. De dikte van de onverzadigde zone is relatief gering, van minder dan 10 tot iets meer dan 20 m. Ook de dikte van de löss is vaak minder dan 5 m. Vermoedelijk zullen de zandlagen in de onverzadigde zone in het algemeen echter fijner zijn dan verder naar het westen en ook minder grind bevatten zodat de reistijd langer zal zijn. Door de relatief grote variatie in de dikte van de onverzadigde zone zal een schatting van de reistijden daarin zeer onzeker zijn. Dit leidt tot de volgende schatting:

Dikte löss:	2.5 m	reistijd onverzadigde zone:	3 jaar
Dikte grind en grof zand:	5 m	reistijd onverzadigde zone:	<0.5 jaar
<u>Dikte matig grof zand:</u>	<u>5 m</u>	<u>reistijd onverzadigde zone:</u>	<u>3 jaar</u>
Dikte onverzadigde zone:	10 m	reistijd onverzadigde zone:	6 jaar

De reistijd langs de zuidwestelijke randen bedraagt in eerste benadering dus ongeveer 6 jaar, dat betekent dat de instroom naar de aquifer omstreeks 1995 heeft plaatsgevonden. De verdere interpretatie zal daar nader uitsluitsel over moeten geven. De concentraties van tritium en chloride in het bronwater zijn weergegeven in Fig.18 en Fig.19.

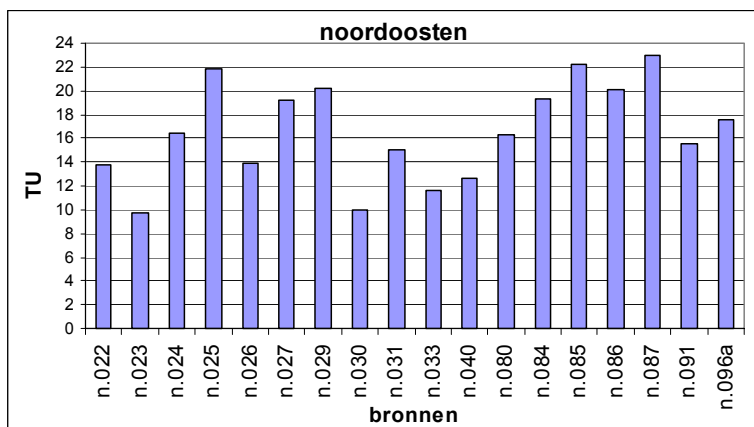


Fig.18 Gemeten <sup>3</sup>H concentraties, noordoostelijke rand

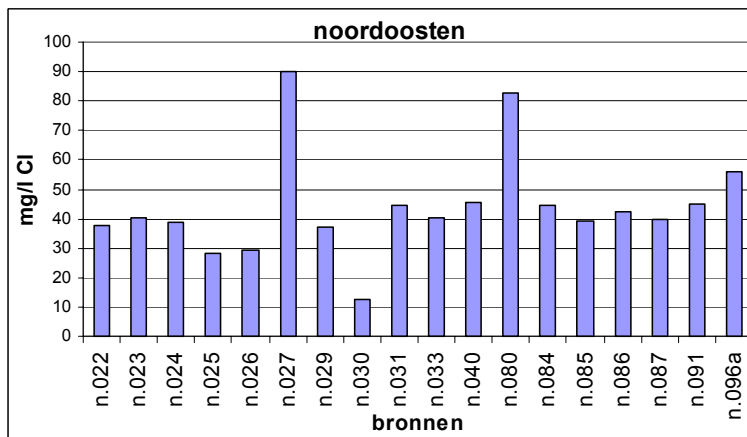


Fig.19 Gemeten Cl concentraties, noordoostelijke rand

De concentraties van tritium en chloride in het noordoosten van het Centraal Plateau (Fig.19) zijn vergelijkbaar met die van de rest van het Centraal Plateau. Er is echter wel een grotere variatie in de waarden. De tritiumconcentraties liggen tussen 12 en iets meer dan 20 TU, met uitzondering van n023 en vooral n030 die relatief laag zijn. De concentraties leiden in dit geval tot een interpretatie van een dikte van de aquifer tussen 5 en 12.5 m en een voeding van de aquifer omstreeks 1990. De chlorideconcentraties bevestigen dat beeld, met uitzondering van enkele uitschieters naar boven (lokale verontreiniging). Bron n023 past eveneens in het beeld als een kleinere dikte van de aquifer wordt aangehouden. Voor bron n030 is echter een



afwijkende interpretatie wenselijk die hierna nog aan de orde zal komen. De reistijdverdeling in het noordoosten is eveneens vergelijkbaar met die aan de westrand.

Bij benadering geldt voor het water uit de bronnen langs de westelijke, noordelijke en oostelijke randen van het Centraal Plateau:

70% heeft een reistijd in de bodem gehad van minder dan 20 jaar;  
20% heeft een reistijd in de bodem tussen 20 en 30 jaar;  
7% heeft een reistijd in de bodem tussen 30 en 40 jaar;  
3% heeft een reistijd in de bodem tussen 40 en 60 jaar;  
minder dan 1% heeft een reistijd in de bodem van meer dan 60 jaar.

### **5.6. Bronnen bij Valkenburg (zuidoosten)**

De bronnen bij Valkenburg behoren deels tot het systeem van het Centraal Plateau en deels tot het systeem van het plateau van Ubachsberg. Het Plateau van Ubachsberg ligt ten zuidoosten van het Centraal Plateau. De geologische opbouw verschilt in beide gebieden en ook staan de situaties van het grondwater los van elkaar. De dikte van de lösslagen is minder dan 5 m en de lösslagen liggen op kalksteen. De onverzadigde zone die deels uit löss en deels uit kalksteen bestaat, is relatief dik. De dikte is meestal meer dan 40 m. De stroming door de kalksteen in de onverzadigde zal relatief snel gaan aangezien de porositeit betrekkelijk gering zal zijn. Bij een doorstroomde porositeit van 0.05 (een relatief hoge waarde), hoort een snelheid van 7 meter per jaar. De totale reistijd in de onverzadigde zone zal rond 10 jaar zijn.

De dikte van de watervoerende laag is ongewis omdat onduidelijk is welke delen van de kalksteen en de onderliggende Zanden van Vaals ertoe behoren. Volgens Van der Aa et al. (2002) is de dikte slechts gering, maar een veel grotere dikte is ook mogelijk. De bronnen bij Valkenburg liggen in een overgangszone tussen de plateaus van Schimmert en Ubachsberg. Mogelijk zijn de watervoerende zandlagen relatief dik doordat de tertiaire klei relatief dun is. Deels krijgen ze ook grondwater uit de bodem van het Plateau van Ubachsberg. Dit houdt in dat de belasting aan maaiveld anders kan zijn dan bij de overige bronnen langs het Plateau van Schimmert. Een onzekerheid betreft ook de mate van voeding van de bronnen. Bij een dikke watervoerende laag is het mogelijk dat een deel van het grondwater niet naar de bronnen stroomt maar door de watervoerende laag verder stroomt in westelijke richting. De waargenomen tritium- en chlorideconcentraties zijn weergegeven in Fig.20.

In Fig.20 is opvallend dat de twee meest westelijk gelegen bronnen (n020 en n049) de hoogste concentraties in het water hebben, die voor tritium rond 12 TU liggen en voor Cl rond 60 mg/l. Deze situatie leidt tot een interpretatie die aansluit bij die van de meer westelijk gelegen bronnen. De reistijd in de onverzadigde zone zal circa 10 jaar zijn en de dikte van de zandige watervoerende laag ongeveer 7.5 m. De meest oostelijke bronnen n037s en n050 hebben concentraties van tritium van respectievelijk 9 en 10.6 TU en concentraties van

chloride van rond 20 mg/l. Dit wijst op lange reistijden in de bodem, die vermoedelijk samenhangen met de toestroming van grondwater vanaf het Plateau van Ubachsberg. De overige bronnen hebben tritiumconcentraties van circa 9 à 10 TU en chlorideconcentraties van rond 20 of 30 mg/l. Bijbehorende waarden volgen niet eenvoudig uit Fig.11 tot Fig.14. Het is mogelijk dat de desbetreffende bronnen een mengsel afvoeren dat deels afkomstig is van het Plateau van Ubachsberg en deels van het Centraal Plateau. Nadere uitspraken zouden een meer gedetailleerd onderzoek vereisen.

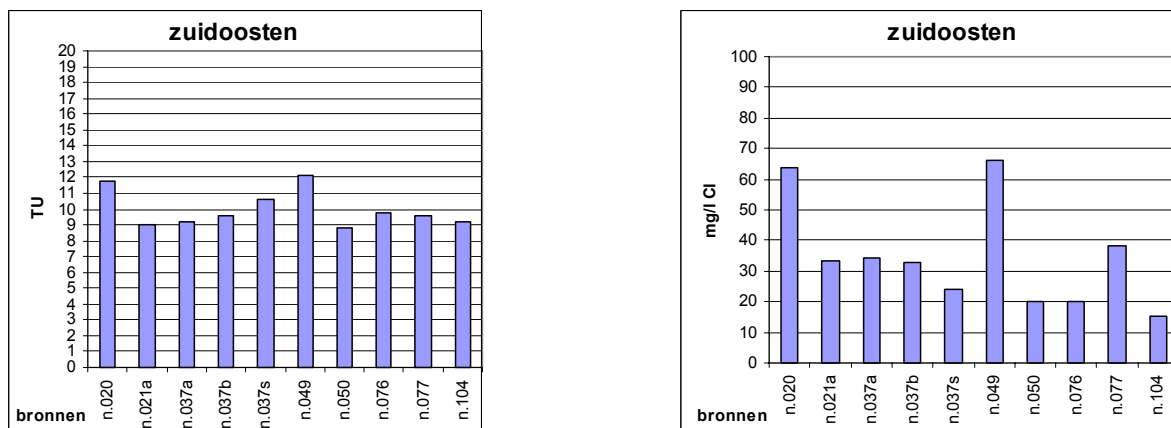


Fig.20 Gemeten  $^3\text{H}$ - en Cl-concentraties ten noorden van de Geul bij Valkenburg

Bij een reistijd in de onverzadigde zone van circa 10 jaar, een dikte van zandige watervoerende lagen van ongeveer 10 m, of van kalksteenlagen met een dikte van circa 2.5 m en een voeding van 350 mm/jaar hoort een reistijdverdeling in het bronwater die vergelijkbaar is met de eerder voor het Centraal Plateau bepaalde verdeling. Bij een dikte van de watervoerende lagen van 400 m (of evenredig minder bij een geringere aanvulling dan 350 mm/jaar) geldt de volgende verdeling van de reistijden in de bodem bij een reistijd van 10 jaar in de onverzadigde zone:

- 8% heeft een reistijd gehad van minder dan 20 jaar;
- 15% heeft een reistijd gehad tussen 20 en 40 jaar;
- 12% heeft een reistijd gehad tussen 40 en 60 jaar;
- 23% heeft een reistijd gehad tussen 60 en 110 jaar;
- 42% heeft een reistijd gehad van meer dan 110 jaar.

### 5.7. Bronnen van de Noor

De zuidelijke plateaus verschillen van de noordelijke doordat aquifers van kwartaire en tertiaire zandlagen ontbreken. Pleistocene Maasafzettingen zijn plaatselijk aanwezig en ze maken dan deel uit van de onverzadigde zone. Over bijna 90% van de oppervlakte is de dikte van de löss minder dan 10 m (Van der Aa et al., 2002). De bovenste watervoerende lagen bestaan steeds uit pakketten van kalksteen die overigens wel verschillende doorlatendheden hebben. De dikte van de kalksteenlagen is wisselend. Ze liggen op fijnzandige en deels

verkitte lagen uit het Krijt (Vaalser groenzand) die soms als een praktisch ondoorlatende basis fungeren, maar soms ook als aquifer indien ze gescheurd zijn. De totale dikte van de aquifer is moeilijk aan te geven. Deze algemene beschrijving is ook van toepassing op het stroomgebied van de Noor. De dikte van de onverzadigde zone is meer dan 40 m onder de plateaus en terrassen aan weerszijden van de beek, maar minder onder het droge dal bovenstrooms van de watervoerende beek. De stroming door de kalksteen zal relatief snel zijn met een reistijd in de onverzadigde zone van circa 10 jaar en wellicht nog iets minder in het droge dal bovenstrooms van de beek. Opvallend is de relatieve constantheid van de tritium- en chlorideconcentraties (Fig.21).

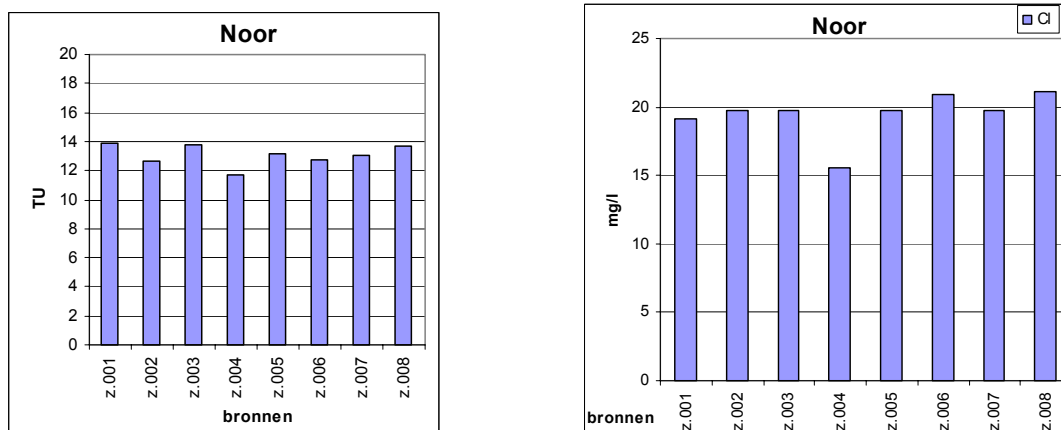


Fig.21 Gemeten  $^3\text{H}$ - en Cl-concentraties, bronnen langs de Noor

De gemiddelde grootte van het neerslagoverschot is circa 325 mm/jaar. De interpretatie van de tritiumconcentraties levert een dikte op van  $D=250$  m bij een zelfde grondwateraanvulling. Mogelijk stroomt echter een deel van het grondwater onder het stroomgebied van de beek verder door naar het westen. Dit lijkt waarschijnlijk gezien de dikte van ongeveer  $D=100$  m die door Van Lanen et al. (1995) is gegeven. Hieruit volgt dat de drainage door de beek eerder circa 160 mm/dag bedraagt (bij  $D=125$  m) of nog minder. De geringe onderlinge variaties kunnen zowel toegeschreven worden aan wisselende reistijden in de onverzadigde zone als aan variaties in de dikte van de watervoerende lagen of aan een combinatie. In dit geval komen de chlorideconcentraties van gemiddeld circa 20 mg/l goed overeen met de verwachting van ongeveer 20 mg/l (Fig.14). Dit gegeven ondersteunt het veronderstelde schema. De verdeling van de reistijden is als volgt:

- 13% heeft een reistijd gehad van minder dan 20 jaar;
- 21% heeft een reistijd gehad tussen 20 en 40 jaar;
- 16% heeft een reistijd gehad tussen 40 en 60 jaar;
- 25% heeft een reistijd gehad tussen 60 en 110 jaar;
- 25% heeft een reistijd gehad van meer dan 110 jaar.

## 5.8. Het zuidelijke dal van de Geul

In de omgeving van Eperheide is een aantal bronnen onderzocht, onder andere langs een zijbeek van de Geul, de Terzieterbeek. Het intrekgebied behoort tot het plateau van Crapoel (zie Fig.1). De opbouw van de onverzadigde zone en van de watervoerende lagen zijn vergelijkbaar met die van de Noor, alleen de dikten van de diverse lagen kunnen anders zijn. Een deel van de intrekgebieden van de twee meest zuidelijke bronnen zal in België liggen. De tritiumconcentraties (Fig.22) zijn in dit geval relatief constant, alleen bron z025 heeft een concentratie van  $^3\text{H}$  van meer dan 14 TU.

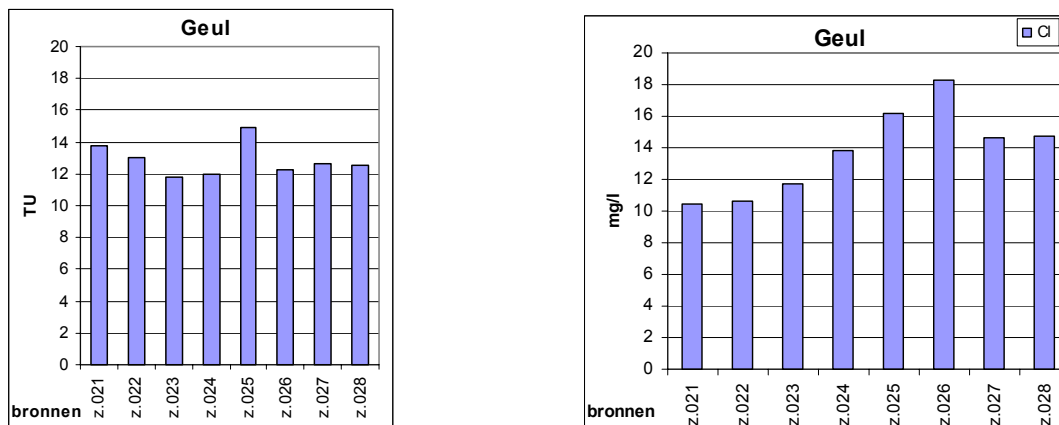


Fig.22 Gemeten  $^3\text{H}$ - en Cl-concentraties, zuidelijke tak van de Geul

De interpretatie van de tritiumconcentraties levert een dikte op van  $D=260$  m bij een grondwateraanvulling van 350 mm/jaar. Mogelijk stroomt ook hier een deel van het grondwater onder de stroomgebieden verder door naar het westen. Dit lijkt waarschijnlijk gezien de dikte en de algemene geohydrologische situatie waarbij de lagen hellen naar het noordwesten. De drainage door de beek is vermoedelijk minder dan 175 mm/dag bij een geringere dikte van de voedende lagen dan  $D=130$  m. De totale dikte van de watervoerende lagen zal groter zijn.

In dit geval zijn de chlorideconcentraties van circa 10 tot 20 mg/l iets lager dan overeenkomt met de verwachting van ongeveer 18 mg/l (Fig.14). De relatief lage concentraties van de meest zuidelijke bronnen (10 mg/l) zijn misschien een gevolg van de situatie van de intrekgebieden in België. De verdeling van de reistijden is vrijwel dezelfde als bij de Noor is aangegeven. Overigens geldt wel dat de verdeling van de reistijden afhangt van de waarde van  $I/(p \cdot D)$ . Een schatting van de afzonderlijke parameters volgt uit de opbouw van de ondergrond waarvan de gegevens slecht bekend zijn.

## 5.9. Het dal van de Gulp

De bronnen die zijn onderzocht in het dal van de Gulp liggen zowel aan de westelijke als aan de oostelijke oever. De opbouw van de onverzadigde zone en van de watervoerende lagen zijn weer vergelijkbaar met die van de Noor, maar de dikten van de diverse lagen kunnen anders zijn. Een deel van de intrekgebieden van de twee meest zuidelijke bronnen zal in België liggen. Vooral de chlorideconcentraties (Fig.23) zijn in dit geval constant, maar de tritiumconcentraties variëren wel.

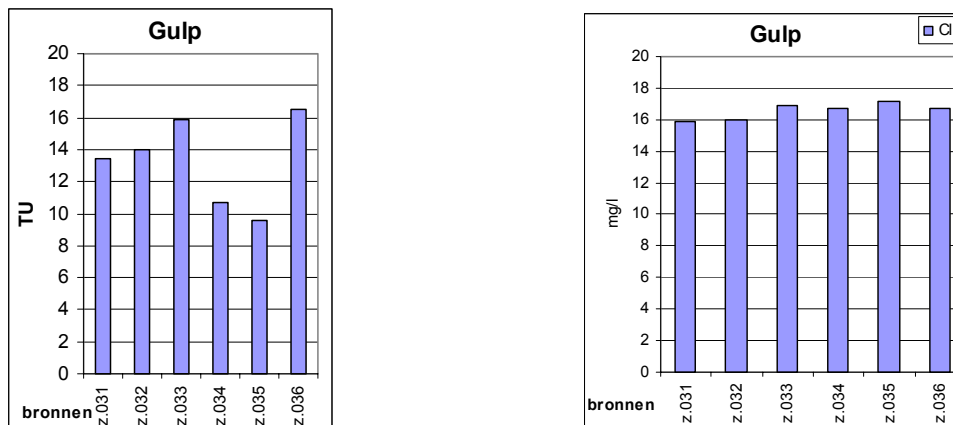


Fig.23 Gemeten  $^3\text{H}$ - en Cl-concentraties, dal van de Gulp

De bronnen z031 en z032 (kerkbron Slenaken) hebben een  $^3\text{H}$ -concentratie van bijna 14 TU. Op basis van de metingen komt de interpretatie overeen met die van de bronnen van de Noor. De bronnen z034 en z035 hebben een  $^3\text{H}$ -concentratie van ongeveer 10 TU. De interpretatie wijst op een dikte van  $D=350$  m bij een voeding van het grondwater van 350 mm/jaar, of evenredig minder bij een geringere voeding. Vermoedelijk zal in die gevallen een aanzienlijk deel van dit water aan de bronnen voorbij stromen. De bronnen z033 en z036 hebben een  $^3\text{H}$ -concentratie van circa 16 TU. De interpretatie geeft een dikte van  $D=180$  m, bij een voeding van het grondwater van 350 mm/jaar. Waarschijnlijk zal ook in deze gevallen een deel van het grondwater niet in de bronnen terechtkomen. De gemeten chlorideconcentraties geven geen uitsluitsel. Volgens de interpretatie variëren de berekende concentraties van 17 tot 23 mg/l. De gemeten concentraties (Fig.23) liggen blijkbaar aan de onderzijde van dit traject.

De verdeling van de reistijden is uiteraard afhankelijk van de variabele combinaties voor  $I/(p \cdot D)$  die uit de interpretatie volgen. Voor de aangegeven combinaties  $D=180/250/350$  m zijn de verdelingen van de verblijftijden als volgt:

- 18/13/10 % heeft een reistijd gehad van minder dan 20 jaar;
- 27/21/17 % heeft een reistijd gehad tussen 20 en 40 jaar;
- 18/16/13 % heeft een reistijd gehad tussen 40 en 60 jaar;
- 24/25/24 % heeft een reistijd gehad tussen 60 en 110 jaar;
- 14/25/37 % heeft een reistijd gehad van meer dan 110 jaar.

Uit het overzicht blijkt dat het aandeel van het water met langere verblijftijden in de bodem aanzienlijk kan variëren voor de bronnen langs de Gulp.

### 5.10. Noordelijke bronnen aan de zuidoever van de Geul (Geul-noord)

Van Gulpen tot Valkenburg zijn langs de zuidelijke oever van de Geul vier bronnen bezocht. In het Geuldal westelijk van Valkenburg zijn bronnen gevoed uit kalksteen zeldzaam. In het intrekgebied van deze bronnen, op het zuidelijk gelegen plateau van Margraten, ligt de stand van het grondwater diep onder maaiveld. De dikte van de lösslagen is vaak tussen 5 en 10 m. De reistijden in het onverzadigde grondwater zijn vermoedelijk meer dan 10 maar minder dan 15 jaar. De stroming van het grondwater vindt plaats in lagen kalksteen waarvan de dikte niet precies bekend is. De waarnemingen aan de bronnen zijn uitgezet in Fig.24. De variaties zijn relatief gering.

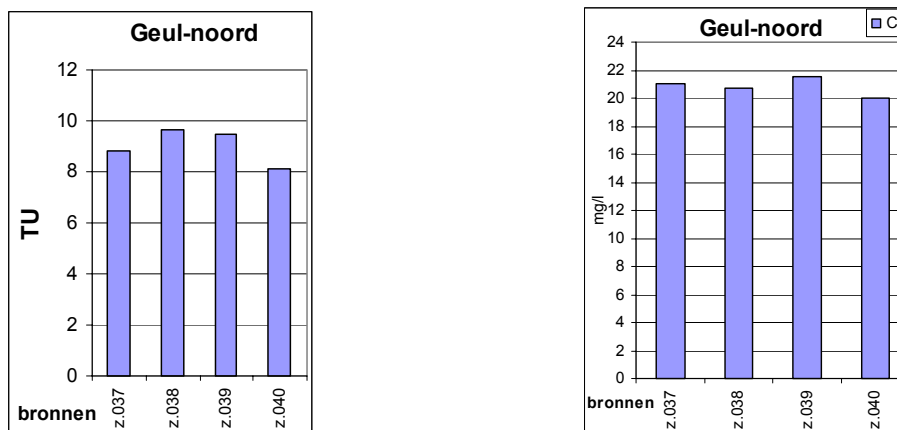


Fig.24 Gemeten  $^3\text{H}$ - en Cl-concentraties, zuidoever van de noordelijke Geul

De interpretatie van de tritiumconcentraties levert een dikte op van circa  $D=400$  m bij een grondwateraanvulling van 350 mm/jaar. De werkelijke dikte van de watervoerende lagen is waarschijnlijk (veel) geringer en wellicht zal een aanzienlijk deel van het grondwater onder de bronnen verder doorstromen naar het westen. De drainage door de beken zal vermoedelijk minder dan 175 mm/dag bedragen bij een dikte van de watervoerende lagen van 100 tot 200 m. Voor de verblijftijden in de bodem maakt dat echter niet uit want die volgen uit de combinatie van  $(I/(p \cdot D))$  waarvan de waarden volgen uit de interpretatie. In dit geval zijn de gemeten chlorideconcentraties van circa 20 mg/l iets hoger dan overeen komt met de verwachting van ongeveer 15 mg/l (zie Fig.14). De geschatte verdeling van de reistijden is:

- 7 % heeft een reistijd gehad van minder dan 25 jaar;
- 13 % heeft een reistijd gehad tussen 25 en 45 jaar;
- 11 % heeft een reistijd gehad tussen 45 en 65 jaar;
- 22 % heeft een reistijd gehad tussen 65 en 115 jaar;
- 46 % heeft een reistijd gehad van meer dan 115 jaar.

### 5.11. Afwijkingen en overeenkomsten tussen bronnen en beken; conclusies

Het water uit de bronnen n023, n030 en n041 rond het Centraal Plateau heeft lagere tritiumconcentraties dan de overige bronnen in het noordelijke gebied. Vooral bij bron 30 is ook de concentratie van chloride lager dan verwacht. De gemeten waarden komen eerder overeen met de waarden die voorkomen in de zuidelijke bronnen. Toch ligt een interpretatie op basis van een grotere dikte van de watervoerende lagen niet voor de hand gezien de geologische opbouw van het Centraal Plateau. Eerder zou gedacht moeten worden aan een bijmenging met een deel relatief oud grondwater dat door een plaatselijke opening in de onderliggende afsluitende lagen naar boven kwelt. De mengverhoudingen zijn in dat geval eenvoudig af te leiden uit de vergelijking van de gemeten en de verwachte waarden. Tenslotte is ook het gevaar van een niet correcte monsterneming of van mismetingen niet uit te sluiten (met name bij bron n030). Gedetailleerd nader onderzoek zou mogelijk uitsluitsel kunnen geven over de oorzaken van de afwijkende waarden.

De monsters water uit de bronnen zijn genomen op de plaatsen waar veel grondwater uittrad. Behalve in deze eigenlijke bronnen kwelde vaak diffuus ook water op langs de oever van de beek waarin het bronwater afstroomde. Bovendien waren verder benedenstrooms en soms ook bovenstrooms nog kleinere bronnen en diffuse kwelzones aanwezig. De vraag is hoe representatief de onderzochte bronnen zijn voor het totaal in de beek opkwellend grondwater. Om die reden zijn ook monsters uit het beekwater onderzocht op plaatsen die verder benedenstrooms lagen. In sommige gevallen lagen langs dergelijke beken meerdere bij dit onderzoek bemonsterde bronnen. De waarden van de tritium- en chlorideconcentraties die bepaald zijn in het beekwater zijn weergegeven in Fig.25.

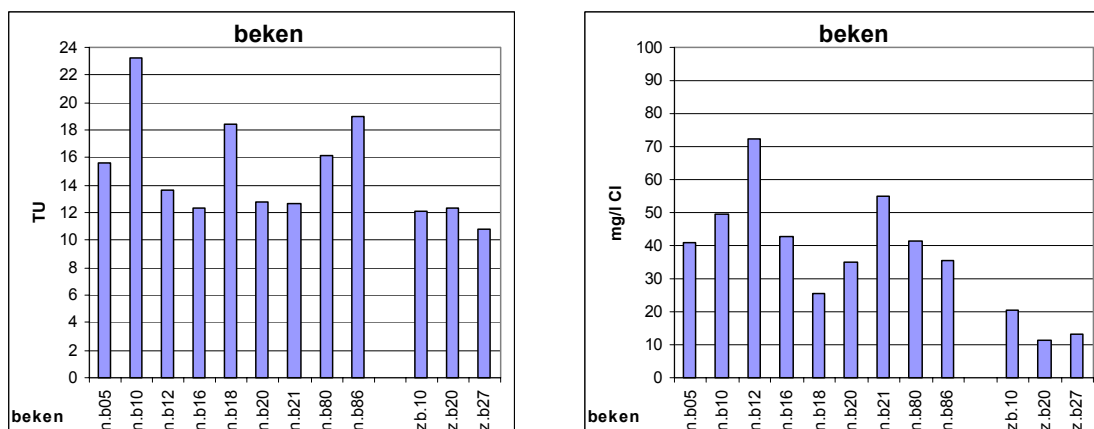


Fig.25 Gemeten  $^3\text{H}$ - en Cl-concentraties benedenstrooms in de beken

- Het beekmonster nb05 met 15.6 TU is benedenstrooms genomen van de bronnen n004 en n005 met tritiumconcentraties van respectievelijk 15.4 en 11.9 TU. De beek lijkt op monster n004 dat genomen is in een krachtig uitstromende bron; bron n.005 geeft beduidend minder water.

- Monster nb10 met 23.2TU komt uit de beek waarin n008, n009 en n010 instromen met waarden van respectievelijk 18, 17.3 en 13.3 TU. Het beekwater heeft hogere concentraties.
- Monster nb12 met 13.7 TU komt uit de beek waarin bron n12 stroomt met tritiumconcentraties van 11.5 TU. Het verschil is niet groot.
- Monster nb16 met 12.3 TU komt uit de beek waarin n016, n041 en n100 instromen met concentraties van respectievelijk 13.8, 8.6 en 11.9 TU. De concentraties komen overeen.
- Monster nb18 met 18.5 TU komt uit de beek waaraan geen onderzochte bronnen liggen.
- Monster nb20 met 12.8 TU komt uit de beek waarin n020 uitkomt met concentraties van 11.9 TU. Het verschil is niet groot.
- Monster nb21 met 12.7 TU komt uit de beek waaraan n021a ligt met concentraties van 9 TU. Het beekwater heeft een hogere concentratie. N21a is echter een kleine bron in de westhelling van de Kattebeek.
- Monster nb80 met 16.2 TU komt uit de beek waarin n025, n080, n084, n085, n086 en n087 uitstromen met concentraties van respectievelijk 21.8, 16.3, 19.3, 22.1, en 23 TU. Het beekwater heeft iets lagere concentraties dan het bronwater.
- Monster nb86 met 19 TU komt uit de beek waaraan n025 en n086 liggen met concentraties van respectievelijk 21.8 en 22.1 TU. De concentraties in de bronnen zijn iets hoger dan in de beek.
- Het beekwater dat langs de zuidelijke plateaus is bemonsterd heeft in alle drie de gevallen goed met het bronwater vergelijkbare tritiumconcentraties. Ook de chlorideconcentraties in het beekwater komen steeds redelijk goed overeen met de concentraties die in de bijbehorende bronnen zijn gemeten.

*De eerste conclusie* is dat de bemonsterde bronnen in het algemeen representatief zijn voor het water in de beken die ze voeden, hoewel specifieke bronnen dat niet hoeven te zijn.

*De tweede conclusie* is dat de verblijftijdverdelingen voor de onderscheiden delen van het Centraal Plateau grote overeenkomst vertonen. Voor dat gebied kan praktisch met een gemiddelde verblijftijdverdeling worden gerekend. De verblijftijdverdelingen voor de zuidelijke plateaus zijn zodanig verschillend dat steeds met een specifieke verdeling rekening moet worden gehouden.

*De derde conclusie* is dat de verblijftijdverdelingen voor het Centraal Plateau en die voor de zuidelijke plateaus verschillend zijn. Het bronwater van het Centraal Plateau heeft vrijwel steeds relatief korte verblijftijden in de bodem gehad. Vrijwel al dat grondwater heeft minder dan 60 jaar door de bodem gereisd. Bij de zuidelijke plateaus heeft ongeveer de helft van het grondwater meer dan 60 jaar door de bodem gestroomd.



## 6. VERGELIJKING VAN GEMETEN EN VERWACHTE NITRAATCONCENTRATIES

### 6.1. Infiltrerende nitraatconcentraties

De Plateaus van Zuid-Limburg zijn van oudsher gebruikt voor een gemengde landbouw van vee­teelt, akkerbouw en fruitteelt. Een enigszins betrouwbare schatting van de mestgiften is mogelijk voor de laatste tientallen jaren. De atmosferische depositie was circa 35 kg/ha/jaar als N. Het model STONE gebruikt als gemiddelde waarden voor de periode 1985-1995:

Lösslandschap (het Centraal Plateau):	$219+35 = 254$ kg/ha/jaar als N
Krijtlandschap (de zuidelijke plateaus)	$298+35 = 333$ kg/ha/jaar als N

De gemiddelde belastingen aan maaiveld zullen verschillen voor de diverse vormen van landgebruik. De gebieden verschillen onder andere doordat in het lösslandschap meer infrastructurele elementen aanwezig zijn zoals een vliegveld, industrieterrein en bebouwing.

Elke bron voert water af uit een meer of minder groot intrekgebied waarvan de ligging niet in detail bekend is. Een eerste benadering is om de belasting aan maaiveld gelijk te stellen aan de gemiddelde waarden voor de plateaus waarlangs de bronnen liggen. Voor specifieke bronnen zijn afwijkingen mogelijk. Een deel van de belasting zal door het gewas worden opgenomen en ermee afgevoerd en een ander deel zal door processen in de toplaag van de bodem verdwijnen. Een eerste schatting is dat 25% van de opgebrachte stikstof uitspoelt naar het grondwater. Deze schatting volgt de benadering van Kolenbrander (1981) en Boumans et al. (1989) voor half grasland en half bouwland op zand. De relatieve uitspoeling uit löss zal wellicht vergelijkbaar zijn met de uitspoeling uit zandige bodems.

De concentraties in het naar de diepere bodem stromende water volgen uit belasting en het gemiddelde neerslagoverschot. Het neerslagoverschot varieert doordat de neerslag (P) van noordwest naar zuidoost toeneemt en ook door een verschillend landgebruik. De gemiddelde neerslag bij Elsloo bedroeg 775 mm/jaar over 1961-1990 en die op de zuidelijke Plateaus circa 850 mm/jaar (Meinardi, 1994). De referentiegewasverdamping ( $E_r$ ) is circa 560 mm/jaar in Zuid-Limburg. Het neerslagoverschot van grasland is in dit geval vrijwel gelijk aan  $(P-E_r)$ , want in löss zal nauwelijks een verdampingsreductie optreden. Voor bouwland zal de verdamping circa  $0.8 \cdot E_r$  zijn, zodat het neerslagoverschot groter is.

Voor de afvoer naar de bronnen kunnen langjarige gemiddelden worden gebruikt. De gemiddelde concentraties in het naar de aquifers stromende bodemwater zijn hiermee als volgt geschat voor de periode 1985-1995:

Noordwesten (bouwland)	$(0.25 \cdot 254 \cdot 1000) / 3250$ mg/l als N = 86 mg/l als $\text{NO}_3^-$
Noordwesten (grasland)	$(0.25 \cdot 254 \cdot 1000) / 2150$ mg/l als N = 129 mg/l als $\text{NO}_3^-$
Zuidelijke plateaus (bouwland)	$(0.25 \cdot 333 \cdot 1000) / 4000$ mg/l als N = 92 mg/l als $\text{NO}_3^-$
Zuidelijke plateaus (grasland)	$(0.25 \cdot 333 \cdot 1000) / 2900$ mg/l als N = 127 mg/l als $\text{NO}_3^-$

De gemiddelde nitraatconcentratie van het naar het grondwater percolerend bodemwater bedraagt circa 110 mg/l voor het Centraal Plateau en de zuidelijke plateaus bij een gemiddeld neerslagoverschot van 270 mm/jaar voor het Centraal Plateau en van 345 mm/jaar voor het zuidelijk gebied. Er is geen rekening gehouden met een reductie voor de grondwatertrap (Gt). De stand van het grondwater ligt diep onder maaiveld, hoewel de bodemkaart veelal Gt7 en zelfs Gt6 aangeeft voor Zuid-Limburg. Voor de percolerende nitraatconcentraties geldt eveneens in sterke mate dat ze langjarige gemiddelden over grote gebieden representeren. Metingen van de concentraties op een bepaald tijdstip en op een bepaalde plaats in de bodem kunnen afwijken van de afvoer van nitraatconcentraties door de bronnen.

De afvoer van nitraat door de bronnen zal niet gelijk zijn aan de concentraties in het bovenste bodemwater doordat het in de bronnen bemonsterde water steeds een bepaalde reistijd door de bodem heeft gehad. Ook in de diepere bodem kunnen processen optreden met invloed op de concentraties, met name denitrificatie. Denitrificatie kan ontbreken, maar het effect van de reistijdverdelingen in het door de bronnen afgevoerde grondwater zal altijd een rol spelen. De reistijden zijn hiervoor bepaald, daarnaast is het echter nodig om ook de stikstofbelasting in het verleden te kennen of de concentraties in het uit de wortelzone stromende water. De nitraatconcentraties in het water dat de aquifers voedt, zijn benaderd als een exponentiële toename vanaf een lage waarde van 5 mg/l als  $\text{NO}_3$  omstreeks 1880 tot de gemiddelde waarden voor de periode 1985-1995. Voor het Centraal Plateau en ook de zuidelijke plateaus levert dat Fig.26 op.

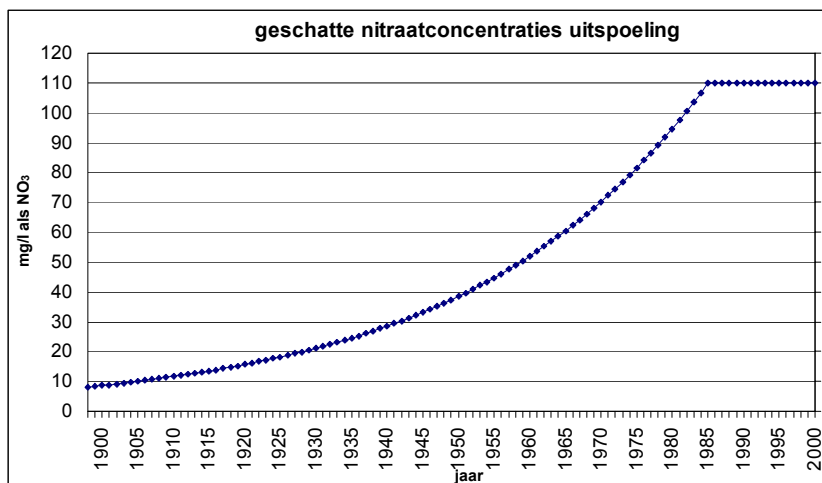


Fig.26 Veronderstelde gemiddelde nitraatconcentraties van de uitspoeling

Op basis van de voor de verschillende groepen van bronnen aangegeven verdelingen van de reistijden in de bodem en historische nitraatconcentraties kunnen de verwachte concentraties in de bronnen worden geschat zoals eerder is gedaan voor chloride (par.5.1). Dit levert beelden op die vergelijkbaar zijn met Fig.12. Een benadering voor het Centraal Plateau en de zuidelijke gebieden (grotere voeding van de aquifers met water en stikstof en grotere dikten, maar een kleinere porositeit) is weergegeven in Fig.27.

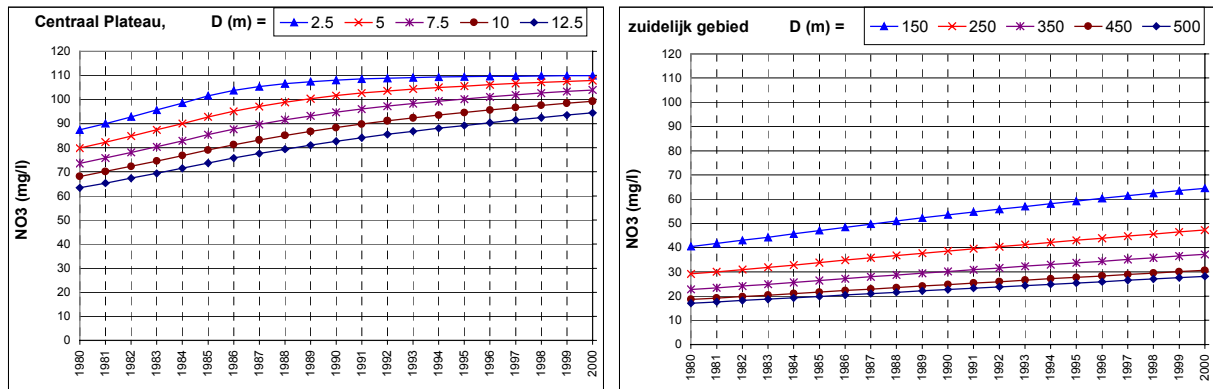


Fig.27 Verwachte nitraatconcentraties in de bronnen, zuidelijke plateaus

De vergelijking is verder zodanig opgezet dat voor het Centraal Plateau gerekend is met een gemiddelde dikte van de aquifer van 7.5 m en een reistijd in de onverzadigde zone van 10 jaar. Voor het Plateau van Ubachsberg en de overige zuidelijke plateaus is de reistijd in de onverzadigde zone eveneens 10 jaar genomen maar is steeds met de hiervoor bepaalde reistijdverdelingen in de aquifer gerekend, die afhankelijk zijn van de doorstroomde dikten.

## 6.2. Terrasranden van het Centraal Plateau

### 6.2.1. Westelijke terrasrand

De vergelijking voor de westelijke bronnen van gemeten en de uit Fig.27 berekende waarde voor de nitraatconcentraties is weergegeven in Fig.28. De overeenkomst tussen berekende en gemeten waarden is verrassend goed voor veel bronnen. In drie bronnen zijn iets hogere waarden gemeten, misschien als gevolg van van puntbronnen van stikstof aan maaiveld (bebouwing). In bron n012 is een lagere concentratie gemeten.

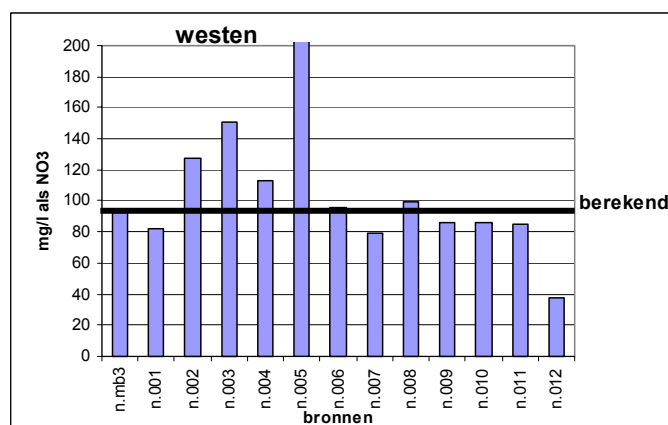


Fig.28 Gemeten en berekende nitraatconcentraties westelijke terrasrand

### 6.2.2. Terrasranden nabij Ulestraten

De vergelijking voor de bronnen bij Ulestraten van gemeten en de berekende waarden (Fig.27) voor de nitraatconcentraties in het bronwater is weergegeven in Fig.29.

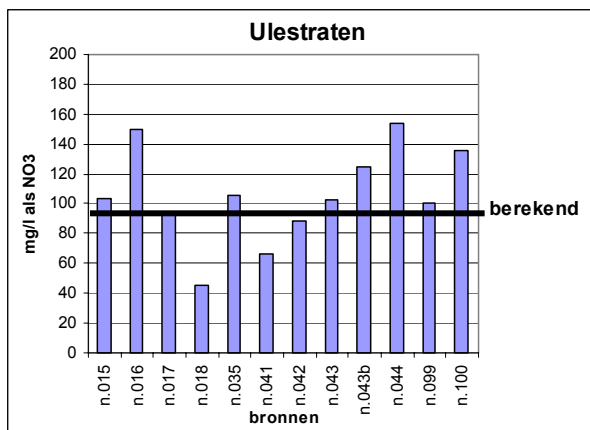


Fig.29 Gemeten en berekende nitraatconcentraties bij Ulestraten

Van de 12 bronnen langs de zuidwestelijke rand van het Centraal Plateau bij Ulestraten wijkt de gemeten nitraatconcentraties minder dan 20% af van de verwachting in de helft van de bronnen. De afwijkingen van het gemiddelde zijn even groot als bij de noordwestelijke rand.

### 6.2.3. Noordoostelijke rand van het Centraal Plateau

De vergelijking van gemeten en de berekende waarde voor de nitraatconcentraties in het bronwater voor de bronnen langs de noordoostelijke rand van het Centraal Plateau is weergegeven in Fig.30.

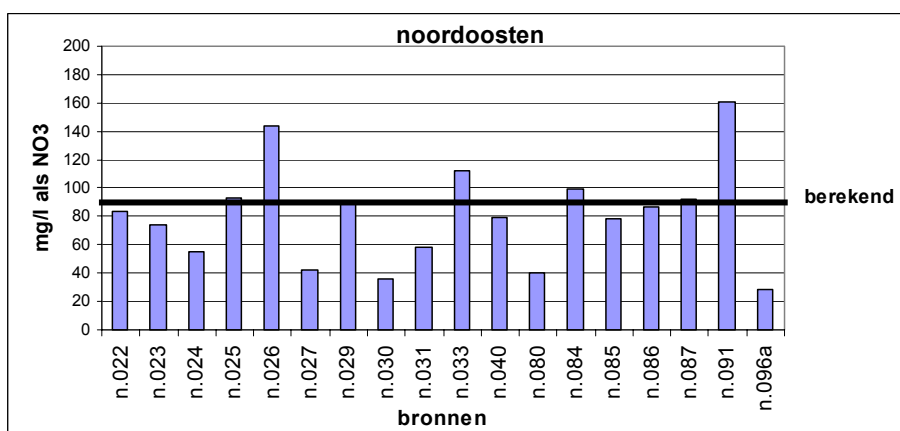


Fig.30 Gemeten en berekende nitraatconcentraties noordoostelijke terrasrand

Van de 18 bronnen langs de noordoostelijke rand van het Centraal Plateau voldoet eveneens de helft aan de verwachting in de zin dat de gemeten nitraatconcentraties minder dan 20% afwijken van de verwachte waarde. In twee bronnen zijn hogere concentraties gemeten en in zes bronnen lagere concentraties dan overeenkomt met de verwachte gemiddelde waarde. Een mogelijke verklaring voor de lagere waarden is dat het landgebruik overwegend akkerbouw is in het gebied, waarvoor de bemesting in het algemeen lager is dan van grasland en bovendien het neerslagoverschot groter. Beide factoren veroorzaken lagere concentraties bij bouwland dan bij grasland.

### 6.2.4. Bronnen bij Valkenburg

De hydrologische situatie van de bronnen bij Valkenburg is niet eenduidig, evenmin als de reistijdverdeling in de bodem van het bemonsterde bronwater (par.5.6). De berekende waarden voor de nitraatconcentraties (Fig.31) kunnen verschillen. Doordat een deel van de bronnen grondwater afvoert met slechts korte reistijden in de bodem zullen de verwachte nitraatconcentraties relatief hoog zijn. Bij de bronnen die water afvoeren met lange reistijden zijn de concentraties lager. Overigens is voor de bronnen bij Valkenburg ook gerekend met een belasting aan maaiveld die overeenkomt met de stikstofbelasting van de zuidelijke plateaus van 333 kg/ha/jaar. De gemeten nitraatconcentraties komen redelijk goed overeen met de verwachting bij een belasting aan maaiveld van 330 kg/ha/jaar en afstroming vanuit het Centraal Plateau, behalve bij de bronnen n037s en n050 (Ubachsberg). Hiervoor zijn langere reistijden aangehouden die beter passen bij de situatie van de zuidelijke gebieden, De daarbij berekende (lagere) concentraties zijn gegeven in Fig.31.

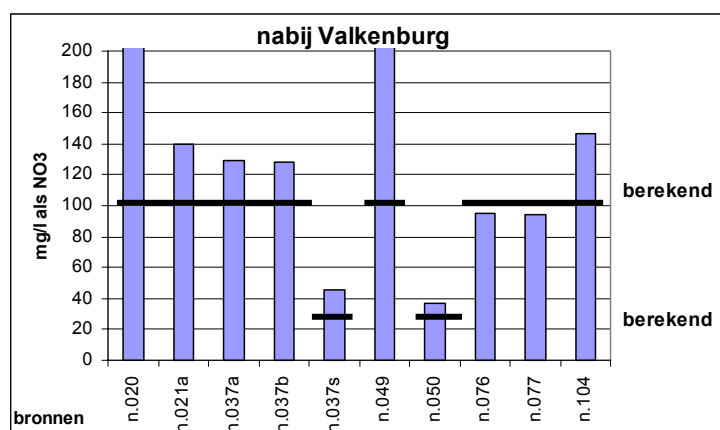


Fig.31 Gemeten en berekende nitraatconcentraties bronnen bij Valkenburg

### 6.3. Bronnen van de Noor

Het dal van de Noor ligt in de grensstreek. De landbedekking is overwegend grasland. De onverzadigde zone bestaat uit löss en kalksteen. Kalksteenlagen vormen ook de aquifer. De gemeten en berekende nitraatconcentraties zijn gegeven in Fig.32.

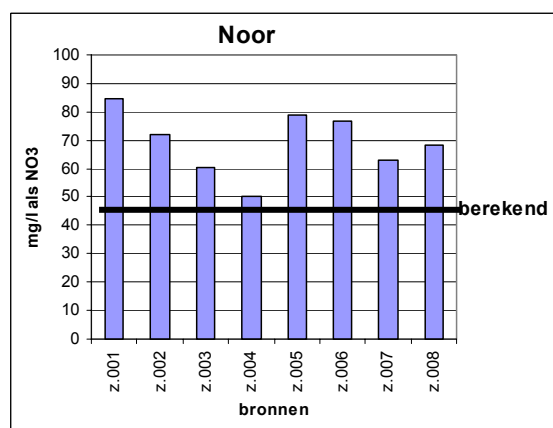


Fig.32 Gemeten en berekende nitraatconcentraties, Noor

De gemeten concentraties zijn hoger dan is berekend op basis van de bepaalde verdeling van de reistijd door de bodem van het water in de bronnen en de veronderstelde belasting aan maaiveld. De afwijking is mogelijk veroorzaakt door een hogere belasting aan maaiveld in het intrekgebied dan gemiddeld voor de zuidelijke plateaus (krijtlandschap). Gemeten en berekende concentraties komen beter overeen als het grasland bij Noor een bemesting heeft gekregen van circa 450 kg/ha/jaar in de periode na 1985. Dit is goed mogelijk, de gemiddelde belasting van Nederlands grasland had ongeveer die waarde in dezelfde tijd.

#### 6.4. De dalen van de Geul en de Gulp

Ook in zuidelijk gelegen stroomgebied van de Geul is het landgebruik overwegend grasland. Het intrekgebied van de twee meest zuidelijke bronnen (Z021 en Z022) ligt voor meer dan de helft in België (lagere bemesting). De gemeten concentraties zijn weergegeven in Fig.33. De nitraatconcentraties zijn zowel hoger als lager dan werd verwacht. Hogere concentraties kunnen het gevolg zijn van een hogere bemesting. Bij de lagere bestaat het intrekgebied voor een deel uit bos dat voor de twee meest zuidelijke bronnen deels in België ligt.

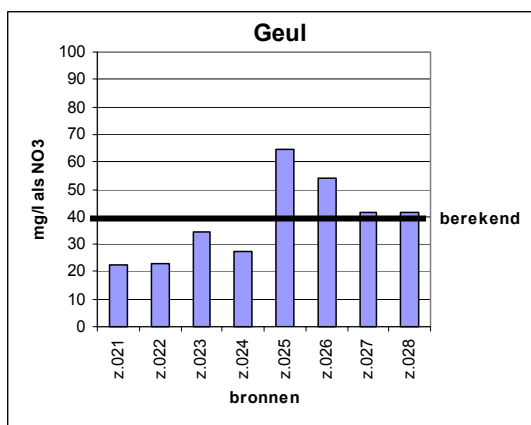


Fig.33 Gemeten en berekende nitraatconcentraties, zuidelijke tak van de Geul

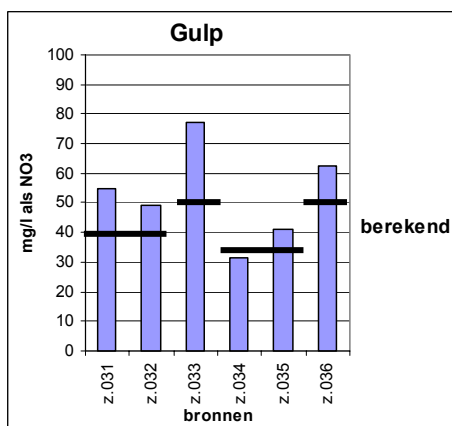


Fig.34 Gemeten en berekende nitraatconcentraties in de bronnen langs de Gulp

De bronnen langs de Gulp (Fig.34) liggen aan weerszijden van de beek. De gemeten nitraatconcentraties komen redelijk goed overeen met de berekende waarden, zeker als wordt bedacht dat de geohydrologische situatie van de diverse bronnen niet eenvormig is.

De gemeten concentraties in de noordelijke bronnen aan de zuidzijde van de Geul zijn gegeven in Fig.35. De gemeten nitraatconcentraties zijn licht hoger dan overeenkomt met de verwachting, misschien weer vanwege een hogere belasting aan maaiveld dan gemiddeld voor het krijtgebied.

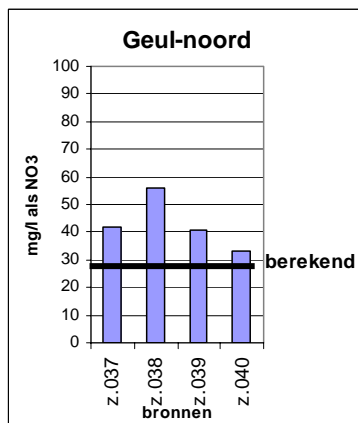


Fig.35 Gemeten en berekende nitraatconcentraties, zuidoever van de Geul

## 6.5. Processen in bodem en open water; conclusies

De nitraatconcentraties die gemeten zijn in benedenstroomse delen van de beken (Fig.36) zijn vaak ongeveer 10 mg/l lager dan de concentraties in de bronnen die het water toevoeren. In bronnen n005 en n020 waren hoge concentraties aanwezig en in bron n012 lage en in de bijbehorende beken zijn vergelijkbare waarden gemeten. Ook de waarden voor de zuidelijke beken komen goed overeen met die in de voedende bronnen. Denitrificatie in het open beekwater of in de sedimenten van de beekbodem kan niet worden uitgesloten maar is waarschijnlijk van weinig betekenis (reductie van circa 10 mg/l). De overeenkomst betekent ook dat in het open water van de beek vrijwel geen andere nitraatbronnen aanwezig zijn en dat processen waardoor de concentraties veranderen een relatief geringe invloed hebben.

De relatief goede overeenkomst tussen de nitraatconcentraties in de beken en die in de voedende bronnen houdt in dat de bemonsterde bronnen representatief zijn voor de beken waarin ze uitstromen. Dit betekent ook dat de waterkwaliteit van de kleinere bronbeken volgt uit de diffuse belasting aan maaiveld die afkomstig is van landbouw en atmosferische depositie. Pas bij de grotere waterlopen zal de toevoeging van huishoudelijk en eventueel ook industrieel afvalwater een rol gaan spelen.

*Conclusie 1: De nitraatconcentraties in de kleinere waterlopen van Zuid-Limburg volgen rechtstreeks uit de bemesting van de landbouwgronden in het voedingsgebied.*

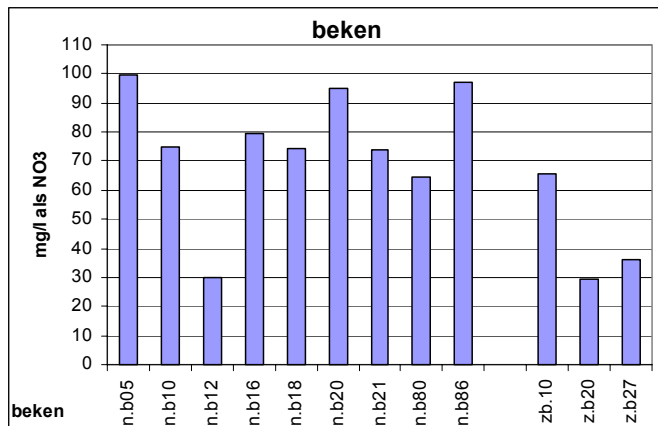


Fig.36 Gemeten nitraatconcentraties in benedenstroomse beken

Het uitgangspunt voor de berekening van de verwachte nitraatconcentraties was een uitspoeling uit lössgronden die gelijk werd gesteld aan die uit zandgronden. Gemeten en verwachte waarden komen in het algemeen goed overeen.

*Conclusie 2: De uitspoeling van nitraat uit de lössbodems van Zuid-Limburg is bij goede benadering vergelijkbaar met die uit de zandgronden in de rest van Nederland.*

De gemeten nitraatconcentraties in bronnen en bronbeken rond het Centraal Plateau komen in het algemeen goed overeen met de resultaten van berekeningen op basis van conservatief transport. De gemeten concentraties zijn bij de zuidelijke plateaus vaak licht hoger dan de gemiddelde concentraties die zijn berekend. De oorzaak kan zijn dat de belasting aan maaiveld hoger is dan was aangenomen. In het oostelijk deel van het krijtlandschap is meer bos en bebouwd gebied aanwezig, terwijl de intrekgebieden van de bemonsterde beken overwegend uit grasland bestaan waarop intensieve veeteelt wordt toegepast. Het is daarom waarschijnlijk dat de bemesting in het westelijk deel van het gebied hoger is (geweest) dan de 300 kg/ha/jaar die hiervoor is genoemd. Een andere mogelijkheid is dat de atmosferische depositie in het verleden hoger is geweest dan tegenwoordig (meer industrie in de naaste omgeving). Bij gebrek aan gegevens zijn echter geen harde conclusies te trekken.

Een tweede uitgangspunt was om uit te gaan van conservatief transport door de ondergrond. Uit de overeenkomst tussen metingen en berekende waarden volgt dat denitrificatie in het algemeen geen rol van betekenis speelt in het grondwater van Zuid-Limburg. De relatief lage concentraties in enkele bronnen zijn vermoedelijk eerder het gevolg van een iets lagere belasting aan maaiveld dan de gemiddeld belasting in het omringende gebied dan dat ze door denitrificatie zijn veroorzaakt. Ook de grotere verblijftijd kan van invloed zijn.

*Conclusie 3: Denitrificatie van nitraat, dat vanuit bemeste lössgronden uitspoelt naar de bodem, is vrijwel afwezig in het grondwater van Zuid-Limburg.*



## 7. VARIATIE NAAR TIJD EN PLAATS IN DE WATERKWALITEIT

### 7.1. Het verloop in de tijd voor nitraat

Voor de bronnen van het Centraal Plateau is het mogelijk om de concentraties, die in het jaar 1984 (Hendrix, 1985) zijn gemeten, te vergelijken met de recente metingen. Vrijwel exact dezelfde locaties zijn bemonsterd. De reistijden in de bodem zullen niet sterk zijn veranderd. Het in 2001 bemonsterde water had op zijn laatst ( $t=0$ ) omstreeks 1990 de aquifer bereikt. Ook voor 1984 kan een schatting gemaakt worden van de concentraties in de beken toen het water voor 1974 (maatgevend jaar) in de aquifer terecht moet zijn gekomen (Fig.37).

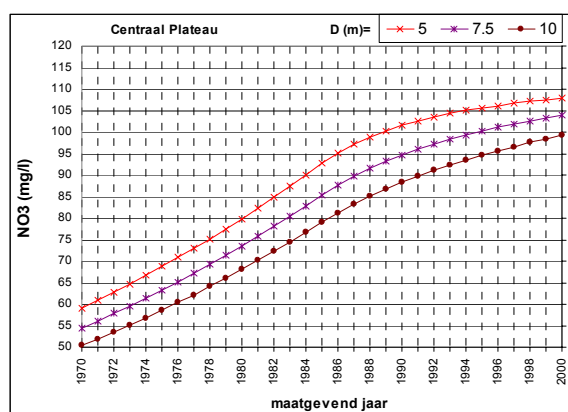


Fig.37 Verwachte verloop van de nitraatconcentraties, bronnen Centraal Plateau

De gemiddelde nitraatconcentratie in de bronnen rond het Centraal Plateau bedroeg 78 mg/l bij de metingen in 1984. Ze zijn vijf keer bemonsterd in dat jaar. De resultaten van maart 1984 zijn echter buiten beschouwing gelaten omdat het aantal monsters nog beperkt was. Het gemiddelde van de in 2001 gemeten concentraties was 95 mg/l. De bronnen bij Valkenburg zijn niet meegerekend omdat de resultaten niet in alle gevallen representatief zijn voor het Centraal Plateau (par.7.2.4). De berekende concentraties voor 1984 en voor 2001 zijn respectievelijk circa 63 en 97 mg/l volgens Fig.37. De overeenkomst voor 2001 is goed, maar voor 1984 zijn de gemeten waarden hoger dan berekend. De gemiddelden zijn toegenomen, maar voor de concentraties in individuele bronnen hoeft dat niet op te gaan (Fig.38).

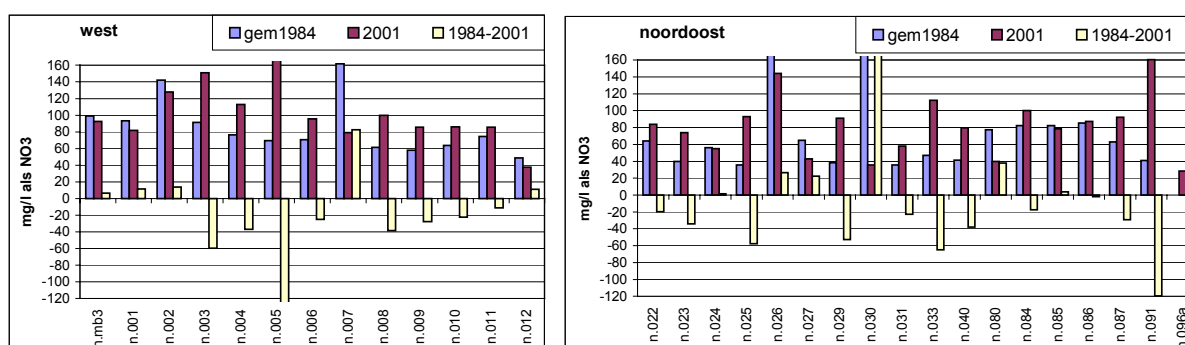


Fig.38 Nitraatconcentraties in twee meetperioden, Centraal Plateau

De bronnen langs de zuidelijke plateaus zijn niet systematisch bemonsterd in eerder tijden, met uitzondering van de bronnen van de Noor die vanaf 1990 zijn bemonsterd door WUR. Voor de Brigidabron aan het begin van de Noor is een tijdreeks bepaald met de metingen van de provincie Limburg van 1990 tot 2002 als laatste. De verwachte concentraties in de Noor volgen uit de verdeling van de reistijden in de bodem van het bronwater, waarbij uitgegaan is van een hogere belasting rond 1990 van in totaal 500 kgN/ha/jaar aan maaiveld (Fig.39). Deze belasting is iets hoger dan gemiddeld voor het zuidelijk gebied.

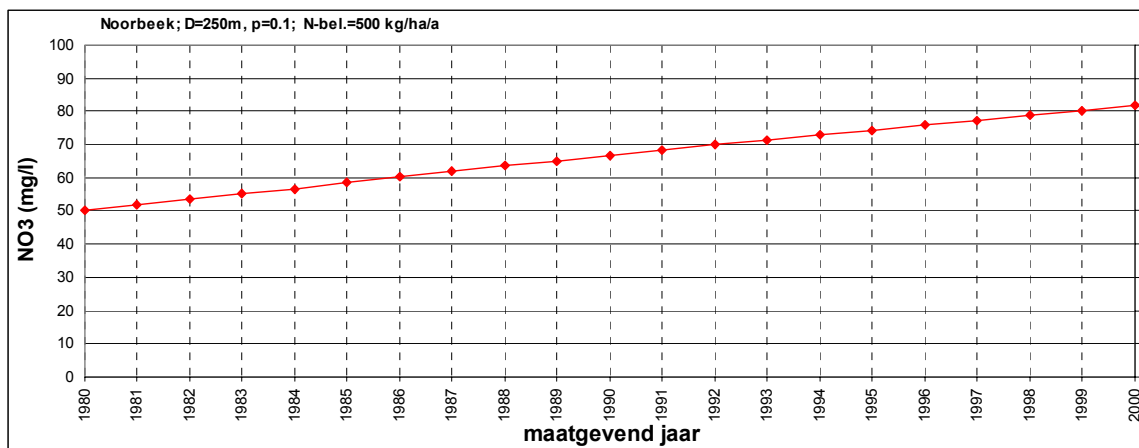


Fig.39 Het verwachte verloop van de nitraatconcentraties voor  $t=0$ , bronnen Noor

De gemeten nitraatconcentraties in de Brigidabron zijn weergegeven in Fig.40. Uit de figuur blijkt dat de toename van 20 tot 25 mg/l over 10 jaar goed overeenkomt met de verwachte stijging die volgens Fig.39 bijna 20 mg/l bedraagt in de periode 1982-1992 ( $t=0$ ).

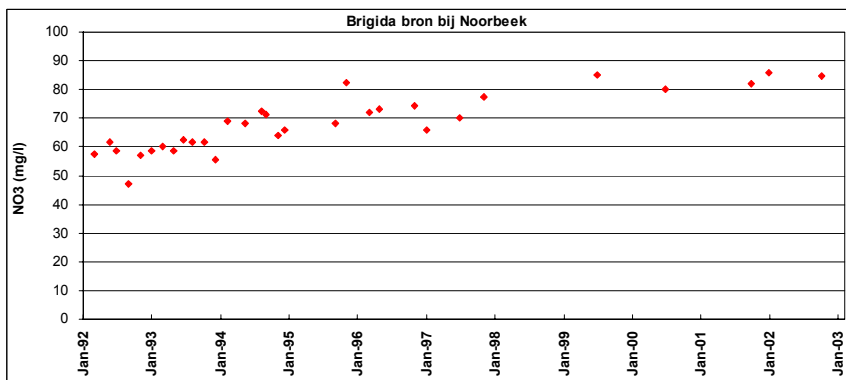


Fig.40 Gemeten nitraatconcentraties in de Brigidabron aan de Noor over 10 jaar

Fig.39 geeft een mogelijke verklaring voor de relatief hogere concentraties in de Brigidabron in vergelijking tot de overige bronnen van de Noor. Deze bron ligt benedenstrooms van een droog dal, waarvoor mag worden aangenomen dat de dikte van de onverzadigde zone nabij de bron relatief klein is. De reistijden in de onverzadigde zone bedragen daar misschien eerder 2 dan 10 jaar. Doordat de Brigidabron relatief meer water met korte reistijden in de onverzadigde zone afvoert, zullen de nitraatconcentraties gemiddeld hoger zijn dan bij de andere bronnen (volgens de aannamen waarop Fig.39 berust).

## 7.2. Overige componenten

### 7.2.1. Chloride

De chlorideconcentraties in het bronwater zijn naar verwachting gestegen in de periode van 1980 tot 2000. Voor het Centraal Plateau (zonder de bronnen bij Valkenburg) zou die stijging volgens Fig.12 ongeveer 3 mg/l bedragen tussen 1984 en 2001. Dit komt overeen met het gemiddelde verschil van 2 mg/l in de metingen over die periode. Individuele bronnen (Fig.41) wijken echter af van het gemiddelde en soms zelfs sterk.

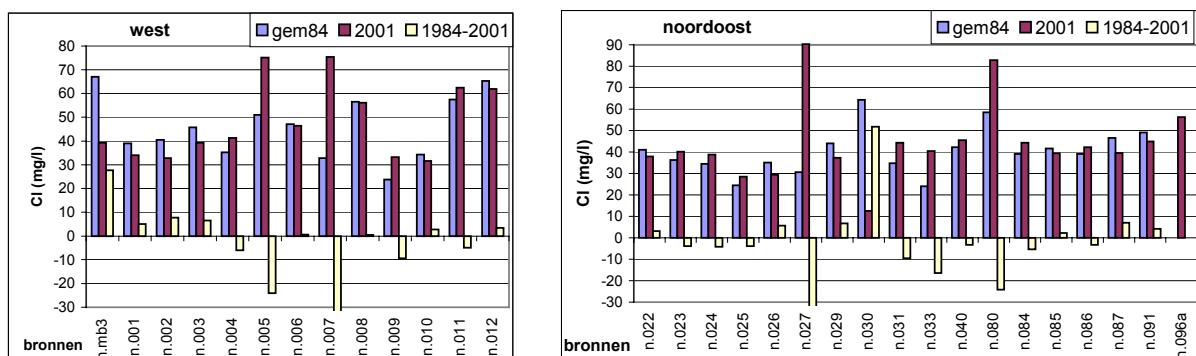


Fig.41 Chlorideconcentraties in twee meetperioden, Centraal Plateau

Voor de zuidelijke plateaus is een vergelijking mogelijk voor de bronnen langs de Noor. De Brigidabron is sinds het begin van de jaren 1990 bemeaten (Fig.42). Volgens Fig.12 zou in dit geval een geringe stijging van circa 3 mg/l op kunnen treden. De metingen (Fig.42) laten inderdaad licht hogere concentraties zien in de laatste jaren.

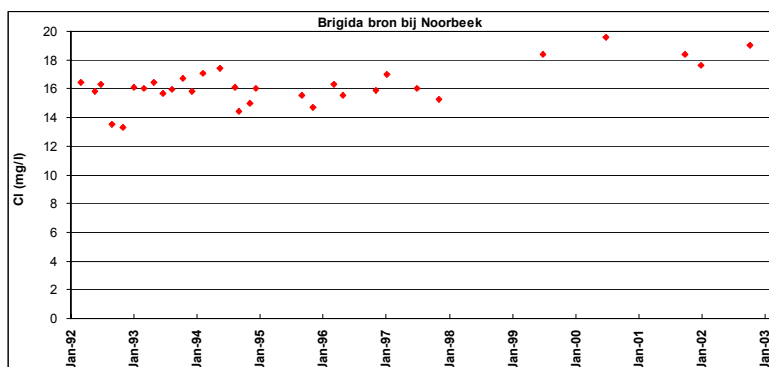


Fig.42 Gemeten chlorideconcentraties in de Brigidabron aan de Noor

### 7.2.2. Kalium

Kalium is een meststof die sinds 1950 in toenemende mate is gebruikt. De toediening door kunstmest is gedaald, maar de hoeveelheden uit dierlijke mest zijn gemiddeld over Nederland gestegen (Henkes, 1994). Dezelfde tendens zal gelden voor de plateaus van Zuid-Limburg. Bij doorstroming van de löss in Limburg zal kalium vermoedelijk deels worden vastgehouden door de bodem. Mogelijk zou een lichte stijging van de kaliumconcentraties in het bronwater kunnen optreden. In de metingen in de bronnen langs het Centraal Plateau is daarentegen een

gemiddelde daling van 0.3 mg/l geconstateerd over 1984-2001. De metingen vertonen grote onderlinge verschillen (Fig.43) die ook samen zullen hangen met processen in de bodem.

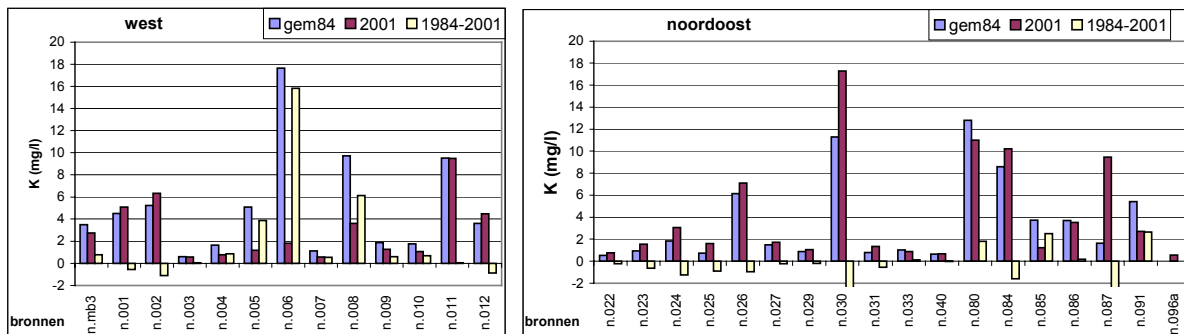


Fig.43 Kaliumconcentraties in twee meetperioden, Centraal Plateau

De waarnemingen aan de Brigidabron suggereren eveneens dat de kaliumconcentraties in het bronwater licht zijn gestegen (Fig.44), echter met een vrij grote spreiding rond een trendlijn.

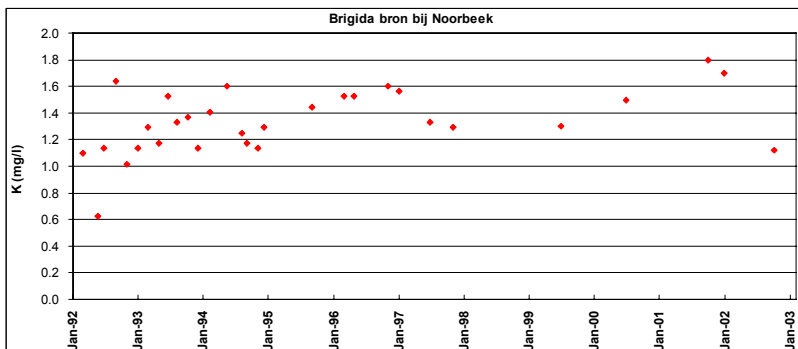


Fig.44 Gemeten kaliumconcentraties in de Brigidabron aan de Noor

### 7.2.3. Calcium

De belangrijkste bron van calcium in grondwater is de oplossing van kalkhoudende mineralen uit de bodem onder zure omstandigheden (in de toplaag). Meststoffen en zeker dierlijke mest bevatten echter ook calcium. De oplossing van mineralen is toegenomen doordat de neerslag tegenwoordig meer zuurvormende bestanddelen bevat. De specifieke gevolgen die de verschillende factoren hebben op de samenstelling van het grondwater zijn moeilijk te bepalen. Het gemiddelde verschil tussen de metingen in bronnen langs het Centraal Plateau in 1984 en in 2001 is 7 mg/l (Fig.45). De relatief hoge waarden van de calciumconcentraties (gemiddeld 154 mg/l in 2001) beduiden dat ze relatief weinig zijn veranderd in die periode, maar stijgende concentraties zijn wel in de meerderheid. Het beeld is tamelijk gelijkmatig. Grote uitschieters komen vrijwel niet voor. Dit geeft aan dat de vorming van calcium door “natuurlijke” processen in de toplaag van de bodem de overheersende factor is. Onderlinge verschillen zijn echter niet afwezig. De waarnemingen aan de Brigidabron (Fig.46) bevestigen het beeld dat naar voren kwam bij de noordelijke bronnen. De concentraties van calcium zijn vrijwel constant circa 140 mg/l en iets stijgend in de tijd.

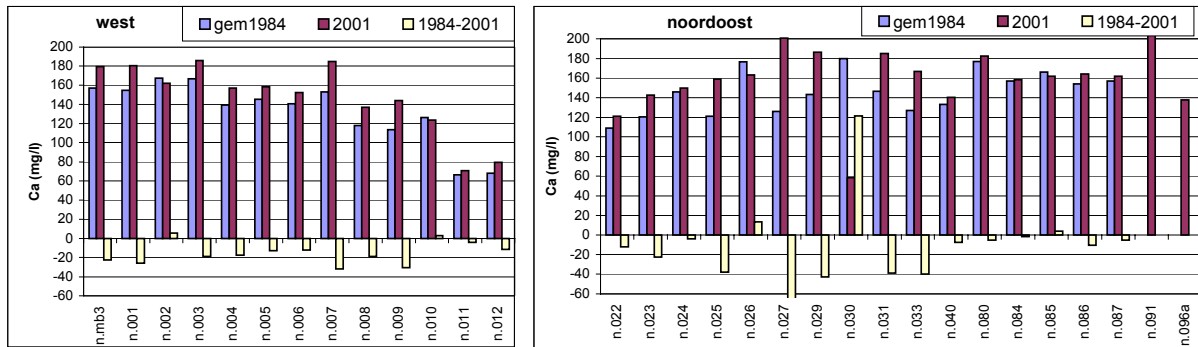


Fig.45 Calciumconcentraties in twee meetperioden, Centraal Plateau

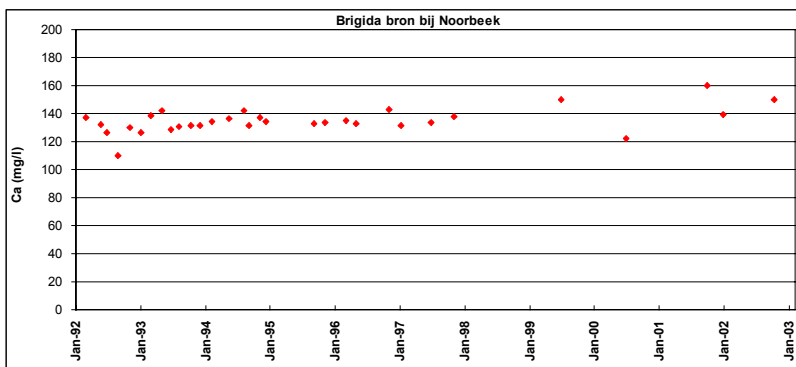


Fig.46 Gemeten calciumconcentraties in de Brigidabron van de Noor

### 7.3. Verschillen in de onderscheiden gebieden

#### 7.3.1. Fysisch-chemische eigenschappen (EC en pH)

De elektrische geleidbaarheid (EC, in uS/cm) en de zuurgraad (pH) zijn bij alle bronnen in het veld bepaald en aan de monsters met de Hydrion-10 door WUR. De resultaten zijn weergegeven in Fig.47 als gemiddelden (ook voor de pH) voor de verschillende gebieden.

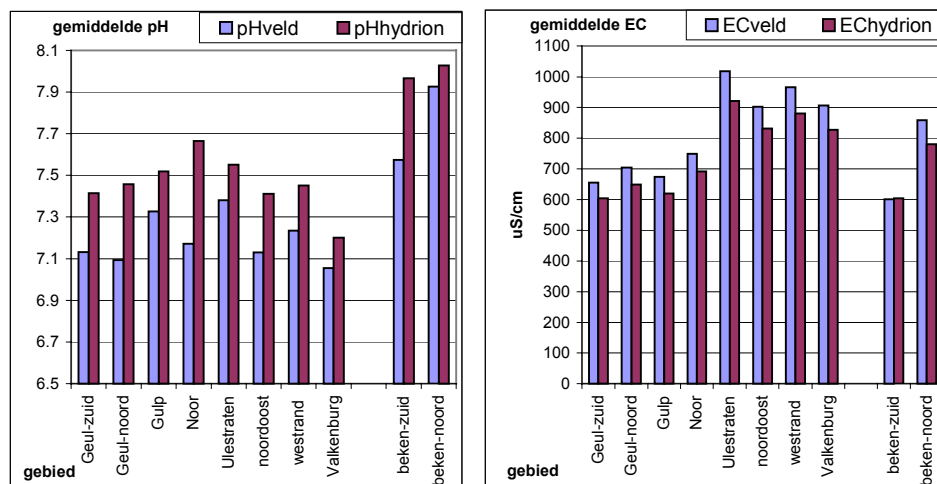


Fig.47 Vergelijking veld- en laboratoriummetingen

De resultaten van de veldmetingen van EC blijken steeds ongeveer 10% hoger te zijn dan die van de bepalingen met de Hydrion-10. De verschillen worden vrijwel volledig veroorzaakt door de verschillende referentietemperaturen (25 °C voor de veldmetingen en 20 °C voor de metingen door WUR). Het verschil tussen de bronnen bij het Centraal Plateau en die bij de zuidelijke plateaus komt tot uiting in hogere waarden voor het Centraal Plateau als gevolg van hogere concentraties van stoffen in het grondwater. De bronnen van het Centraal Plateau voeren water af dat relatief korter door de bodem heeft gestroomd.

Het systematische verschil in de waarden van de pH voor beide series metingen is minder eenvoudig te verklaren. Ook bij deze metingen zijn verschillende referentietemperaturen gehanteerd maar die kunnen niet de oorzaak zijn. Het verschijnsel dat veldmetingen lagere waarden voor de pH opleveren dan latere laboratoriummetingen komt overigens vaker voor bij grondwater. Tussen monsterneming en analyse kunnen gassen uit het monster ontwijken, wat vaak een verhoging van de pH tot gevolg heeft. Wellicht is dat ook hier het geval geweest. De onderlinge verschillen tussen de verschillende groepen bronnen zijn niet groot, maar ook niet afwezig. Ze hangen waarschijnlijk samen met de aard van de bodem, maar daar is bij gebrek aan gedetailleerde gegevens weinig over te zeggen. Wel kan worden opgemerkt dat er nauwelijks systematische verschillen aanwezig zijn tussen de bronnen van het Centraal Plateau en de zuidelijke bronnen.

Ruimtelijke variatie in de samenstelling van het bronwater in de verschillende gebieden van Zuid-Limburg kan een gevolg zijn van verschillen in bodemopbouw en van verschillen in de belasting aan maaiveld in de tijd dat het water in de bodem kwam. De ruimtelijke variaties in de chloriden- en nitraatconcentraties zijn hiervoor besproken. Verschillen bleken samen te hangen met de belasting aan maaiveld en de reistijden van het grondwater in de bodem en nauwelijks met de aard van de bodem. Voor de hoofdcomponenten kan een vergelijking worden gemaakt door gemiddelde waarden van de concentraties in de bronnen (Fig.48) te beschouwen. De volgende opmerkingen zijn te maken:

De gemiddelde waarden voor calcium en magnesium zijn voor het Centraal Plateau in het algemeen hoger dan voor de zuidelijke plateaus. Dit is merkwaardig omdat de zuidelijke bronnen vanuit kalksteenaquifers worden gevoed. Grofweg bevatten de noordelijke bronnen van het Centraal Plateau 0.5 mmol/l minder Ca en ook 0.5 mmol/l minder Mg dan de bronnen in het zuiden. De reistijden in de bodem zijn voor de noordelijke bronnen korter en daardoor is de belasting met zuurvormende stoffen groter. Mogelijk heeft dat hogere concentraties van Ca en Mg tot gevolg gehad. Het is opvallend dat de concentraties in de beken voor de zuidelijke plateaus overeenkomen met die in de bronnen, maar dat ze voor de beken van het Centraal Plateau gemiddeld lager zijn dan in de voedende bronnen.

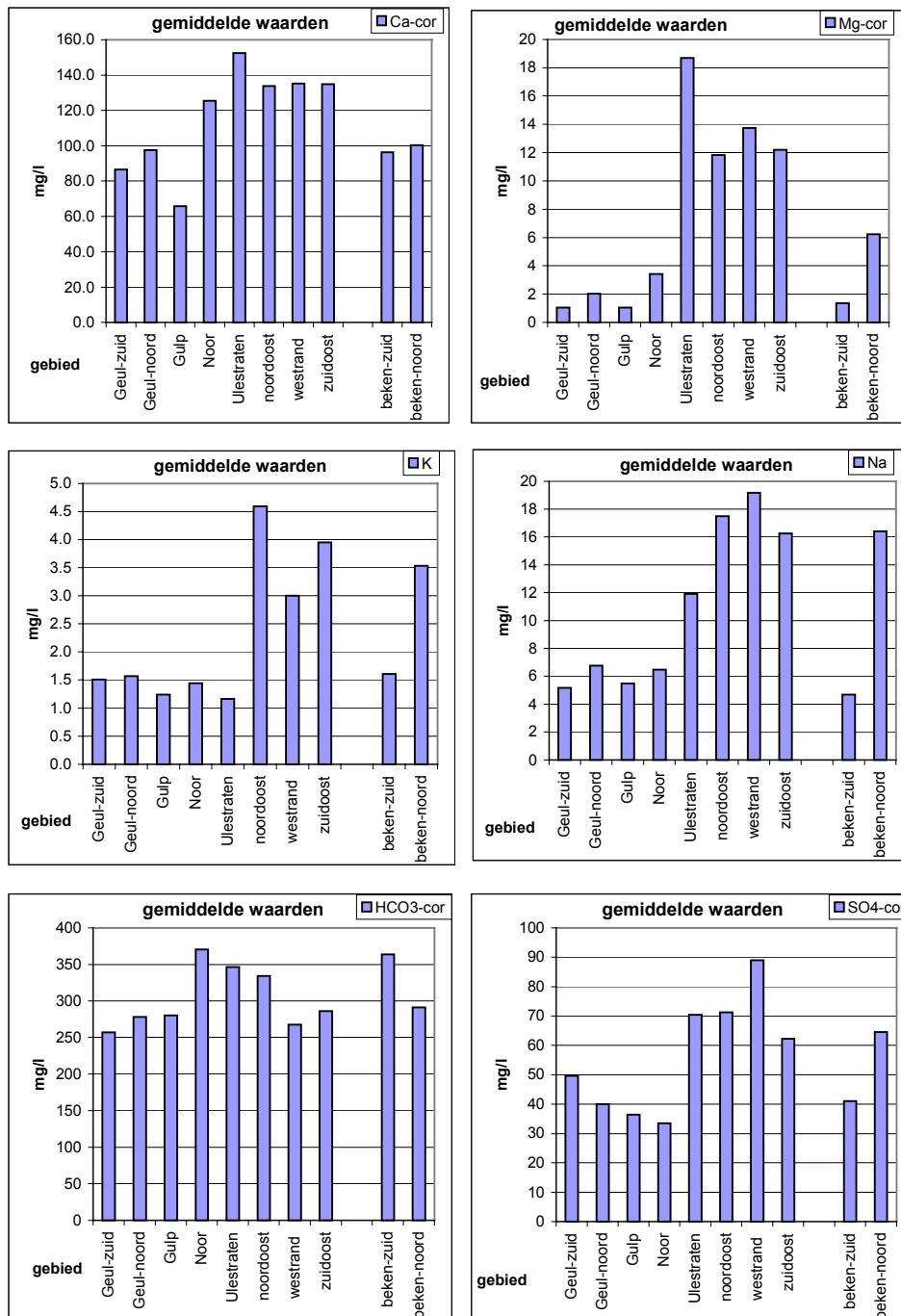


Fig.48 Gemiddelde waarden voor de diverse gebieden

\*NB De waarden voor Ca-cor, Mg-cor, HCO<sub>3</sub>-cor en SO<sub>4</sub>-cor zijn het resultaat van een bewerking van de meetgegevens (zie Hoofdstuk 2); ze kunnen minder betrouwbaar zijn

Kalium en natrium ondervinden invloed van een verhoogde belasting aan maaiveld en deels in gelijke mate. Kalium is een meststof die als kunstmest wordt toegediend maar die ook in dierlijke mest aanwezig is. Kaliumkunstmest bevat steeds ook Na. In dierlijke mest zit relatief minder Na dan K (Henkes, 1994). De K-belasting is door bemesting toegenomen maar die met Na is praktisch gelijk gebleven na 1950. Anderzijds zal de Na-belasting na 1950 wel zijn toegenomen door het gebruik van wegzout. De toename zal vergelijkbaar zijn met

van chloride. De concentraties in de noordelijke bronnen (Fig.48) zijn aanzienlijk hoger dan in de zuidelijke, met uitzondering van de relatief lage kaliumconcentraties in de bronnen op het Centraal Plateau bij Ulestraten. De verschillen hangen vermoedelijk samen met de reistijden in de bodem van het bronwater. Het oudere water voert lagere concentraties mee naar de bronnen. De kalium- en natriumconcentraties in de zuidelijke bronnen komen vrijwel overeen met de concentraties die verwacht worden als gevolg van een natuurlijke atmosferische depositie na de invloed van indamping (Meinardi, 1999). Dit betekent dat de aard van de bodem nauwelijks invloed heeft gehad op de concentraties.

De  $\text{HCO}_3^-$ -concentraties hangen samen met de concentraties van Ca en Mg. De lagere concentraties in de zuidelijke bronnen zijn vermoedelijk vooral een gevolg van de verschillen in reistijden in de bodem waardoor het zuidelijke bronwater nog niet de gevolgen heeft ondervonden van het zuurder worden van de neerslag. De bronnen langs de Noor vormen een uitzondering die moeilijk te verklaren is. Ook voor Mg geldt dat de gemiddelden van de in de zuidelijke bronnen gemeten concentraties relatief weinig verschillen van de waarden die volgen uit de indamping van de samenstelling van “natuurlijk” regenwater. In al deze gevallen heeft de aard van de bodem blijkbaar geen of nauwelijks invloed gehad op de samenstelling van het grondwater dat de bemonsterde bronnen heeft gevoed.

Sulfaatconcentraties in het bronwater staan onder invloed van een toegenomen belasting aan maaiveld door een grotere toepassing van dierlijke mest en een verhoogde atmosferische depositie, vooral na 1950. Dit geeft een verklaring voor het verschil tussen de noordelijke en de zuidelijke bronnen, waar het voedende grondwater verschillende reistijden in de bodem heeft gehad. De hogere concentraties in de bronnen langs het Centraal Plateau zijn vooral het gevolg van een hogere belasting aan maaiveld in recente tijden en kortere verblijftijden van het water in de bodem. De sulfaatconcentraties gemeten in de zuidelijke bronnen zijn iets hoger dan de concentratie die verwacht zou worden op basis van de indamping van de natuurlijke neerslag. Hierbij moet worden bedacht dat de atmosferische depositie van zwavelverbindingen ook voor 1950 (mijnen) niet verwaarloosbaar klein zal zijn geweest.

Uit het voorgaande volgt dat de waarnemingen in eerder tijden en die in 2001 relatief goed met elkaar overeenkomen. Dit geeft vertrouwen in de methoden van monsterneming en van de chemische analyses die in de beschouwde gevallen gevolgd zijn. Dit is van belang omdat de metingen in 2001 niet in alle gevallen betrouwbaar zijn. Bron n030 vormt een uitzondering. De waarden, die in 2001 zijn bepaald, wijken sterk af van de metingen in 1984 en daardoor zijn de verschillen ook steeds relatief groot. De in 2001 gemeten waarden passen verder ook slecht in het algemene beeld van de kwaliteit van het bronwater uit bronnen in de omgeving. Het lijkt er haast op dat in dit geval niet het bronwater is bemonsterd, maar misschien leidingwater dat ergens anders is gewonnen. Het onderhavig bemonsteringspunt betreft de watervoorziening van een boerderij die slechts gedeeltelijk uit een plaatselijke particuliere winning bestaat.



## 8. ECOLOGISCH BELANGRIJKE PARAMETERS

Bij de verschillende bronnen zijn steeds ook monsters genomen die zijn geanalyseerd door RIVM-LAC op de concentraties van  $\text{NH}_4$  en P. Opgelost  $\text{NH}_4$  kan in bepaalde gevallen en bij hogere concentraties ecotoxische eigenschappen hebben en P is een voedingsstof die ook invloed heeft op de ecologische toestand van het water.

Voor  $\text{NH}_4$  (Fig.49) is een vergelijking mogelijk. De concentraties van  $\text{NH}_4$  zijn op dezelfde plaatsen eveneens met de Hydrion-10 bepaald. Uit die vergelijking blijkt echter dat de waarden bepaald met de Hydrion-10 zeer waarschijnlijk niet betrouwbaar zijn. De door WUR gemeten waarden liggen veelal op een niveau van ongeveer 1 mg/l en de gemiddelden voor de bronnen van het Centraal Plateau en van de zuidelijke bronnen zijn respectievelijk 1.09 en 1.12 mg/l. Dergelijke waarden zijn onwaarschijnlijk voor bronnen (grondwater) waarin ook relatief hoge nitraatconcentraties aanwezig zijn.

De bepalingen door het RIVM zijn waarschijnlijk meer betrouwbaar. Uit de metingen blijkt dat de concentraties van  $\text{NH}_4$  in alle bronnen relatief zeer lage waarden hebben. De waarden liggen vaak nabij de aantoonbaarheidsgrens en voor de bronnen langs de Gulp zelfs eronder (geen waarden in Fig.49). Dit is overigens wel in overeenstemming met de metingen in de jaren 1980 (Hendrix, 1985) toen de aantoonbaarheidsgrens (toen 0.2 mg/l) ook vrijwel nooit werd overschreden in de monsters uit de bronnen. De hoogste waarde is aangetroffen in bron n030 (noordoosten) waarvan hiervoor is beredeneerd dat de monsterneming vermoedelijk niet correct is geweest. De concentraties in de beken zijn soms iets hoger dan in de bronnen maar ook in dat water zijn de concentraties relatief laag.

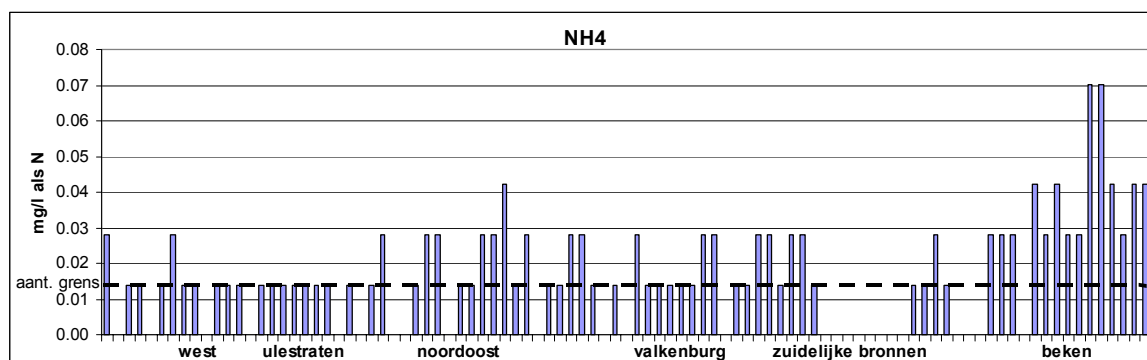


Fig.49 Door RIVM gemeten concentraties van  $\text{NH}_4$

Van de fosforverbindingen zijn uitsluitend de concentraties van opgelost ortho-fosfaat (oP) bepaald (Fig.50). De bepaling van totaal-fosfaat is niet gedaan omdat de concentraties in deze gevallen naar alle waarschijnlijkheid vrijwel gelijk zullen zijn aan die van ortho-fosfaat. In dit geval is een vergelijking mogelijk met de waarnemingen in de jaren 1980 (Hendrix, 1985). De waarden in die tijd lagen, evenals in 2001, veelal tussen 0.05 en 1.5 mg/l, zodat een verdere uitwerking geen aanvullende informatie geeft.

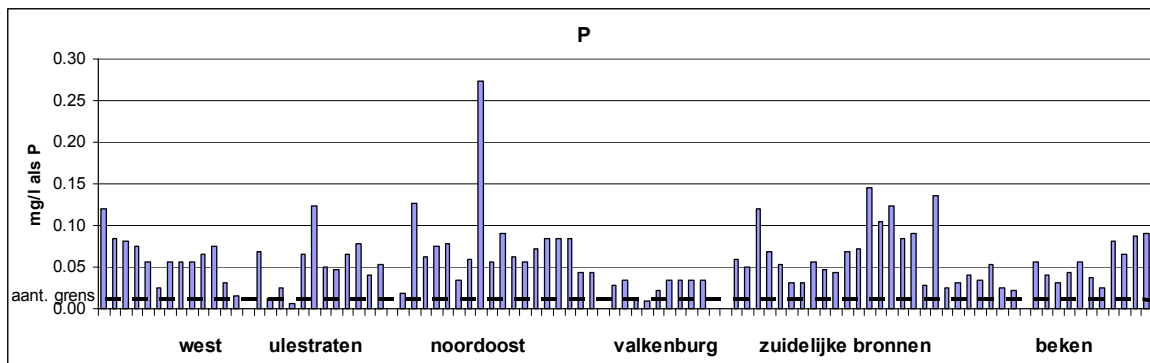


Fig.50 Gemeten concentraties van ortho-fosfaat (als P)

De concentraties van ortho-fosfaat in de bronnen van Zuid-Limburg zijn in het algemeen relatief laag (Tabel 2) en bovendien wijken ze weinig af van de gemiddelde waarde van 0.06 mg/l (als P). Bron n030 heeft ook in dit geval een afwijkende waarde, vermoedelijk eveneens door foute monsterneming. De concentraties in de bronbeken zijn volledig vergelijkbaar met het water uit de bronnen. Opmerkelijk is in Fig.50 dat de concentraties in de bronnen bij Valkenburg relatief laag zijn. Bovendien liggen de bronnen met lage concentraties in de andere gebieden ook vaak in de omgeving van Valkenburg (Ulestraten en het noordelijk Geuldal). Deze overeenkomst wijst op een geologische oorsprong van het verschijnsel. Een mogelijke relatie is bij gebrek aan gegevens echter niet verder uitgewerkt.

Tabel 2 Gemiddelde waarden van de gemeten concentraties van ortho-fosfaat

Groep	alle bronnen	nrd. br.	nrd.-beken	zd. br.	zd.-beken
mg/l als P	0.060	0.058	0.046	0.063	0.081

De relatief grote uniformiteit in de waarden leidt ertoe om ze te vergelijken met de basiswaarde (Meinardi, 2003), die 0.1 mg/l (als P) bedraagt voor ortho-fosfaat in het grondwater van de zandgebieden van Nederland. De overeenkomst is al relatief goed maar die wordt nog beter als wordt bedacht dat basiswaarden voor Zuid-Limburg waarschijnlijk lager zullen zijn door een gemiddeld iets groter neerslagoverschot dan in de zandgebieden en wellicht ook iets lagere waarden van de atmosferische depositie (door een grotere afstand tot de kust). De conclusie moet zijn dat de gemeten waarden in de bronnen van Zuid-Limburg relatief goed overeenkomen met de basiswaarden voor P in het zoete grondwater van Nederland. Deze conclusie is opmerkelijk omdat de geologie van Zuid-Limburg afwijkt van de aard van de bodem in overig Nederland. Het betekent bovendien dat de invloed van bemesting in de intrekgebieden van het bronwater niet terug te vinden is in de fosfaatconcentraties van het bronwater.

## 9. SPOORELEMENTEN

NITG-TNO heeft van elke bron een monster geanalyseerd op de concentraties van circa 50 verschillende sporelementen (zie Tabel 3). Uit een vergelijking voor de elementen Al, Ba en Zn met de selectie van negen monsters die door het RIVM zijn geanalyseerd, blijkt dat de gemeten waarden (na correctie, zie par.2.2) redelijk overeenkomen. Concentraties van de afzonderlijke elementen zijn daarna vergeleken met basiswaarden die zijn vastgesteld voor de natuurlijke neerslag en het "oude" grondwater in de zandgebieden van Nederland (Meinardi, 2003). De hogere neerslag in Zuid-Limburg is verwerkt door de basiswaarden (BW) in de neerslag met een factor 3 in plaats van 4 te vermenigvuldigen. In Fig.51-63 zijn de waarden voor een aantal zware metalen en overige sporelementen gegeven.

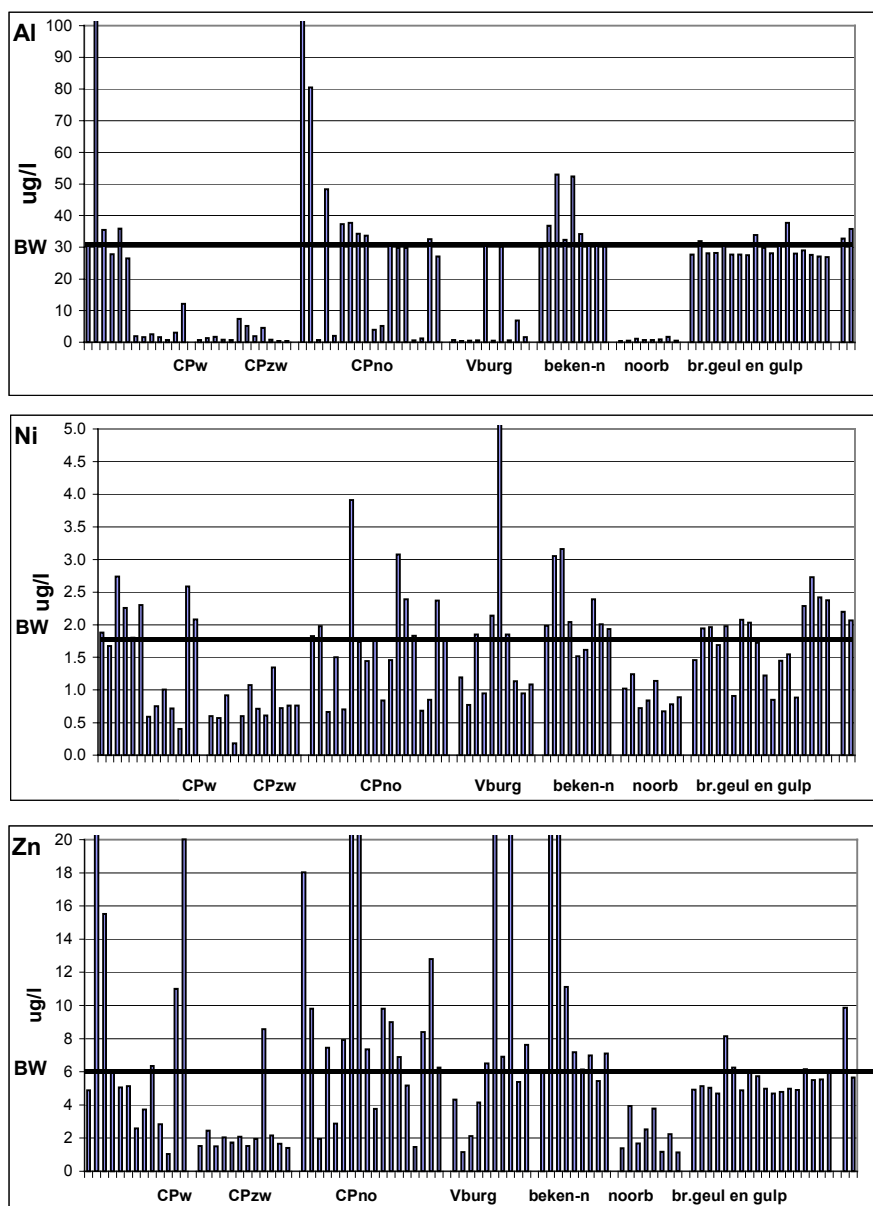


Fig.51 Concentraties van zware metalen

Bij de vergelijking van de gemeten concentraties met de basiswaarden moet rekening worden gehouden met de volgende, mogelijke versturende, factoren:

1. De doorstroomde bodem is (zeer) kalkrijk, het is mogelijk dat de bodem niet in evenwicht is met het grondwater en nog steeds spoorelementen afgeeft;
2. Het water uit de bronnen van het Centraal Plateau heeft relatief kort door de bodem gestroomd, in het bronwater kunnen gevolgen van een hogere belasting merkbaar zijn;
3. Het bronwater heeft veelal een hoge pH, die deels samenhangt met het neerslaan van  $\text{CaCO}_3$ , met name de metalen kunnen daardoor ook verdwijnen uit de oplossing.

Uit Fig.51 blijkt dat vermoedelijk vooral de derde factor een rol speelt. De concentraties liggen bij de zuidelijke bronnen op het niveau van de basiswaarden terwijl ze bij de bronnen van het Centraal Plateau vaak lager zijn. Sommige concentraties zijn (veel) hoger dan de basiswaarden, waarschijnlijk als gevolg van een hogere belasting aan maaiveld.

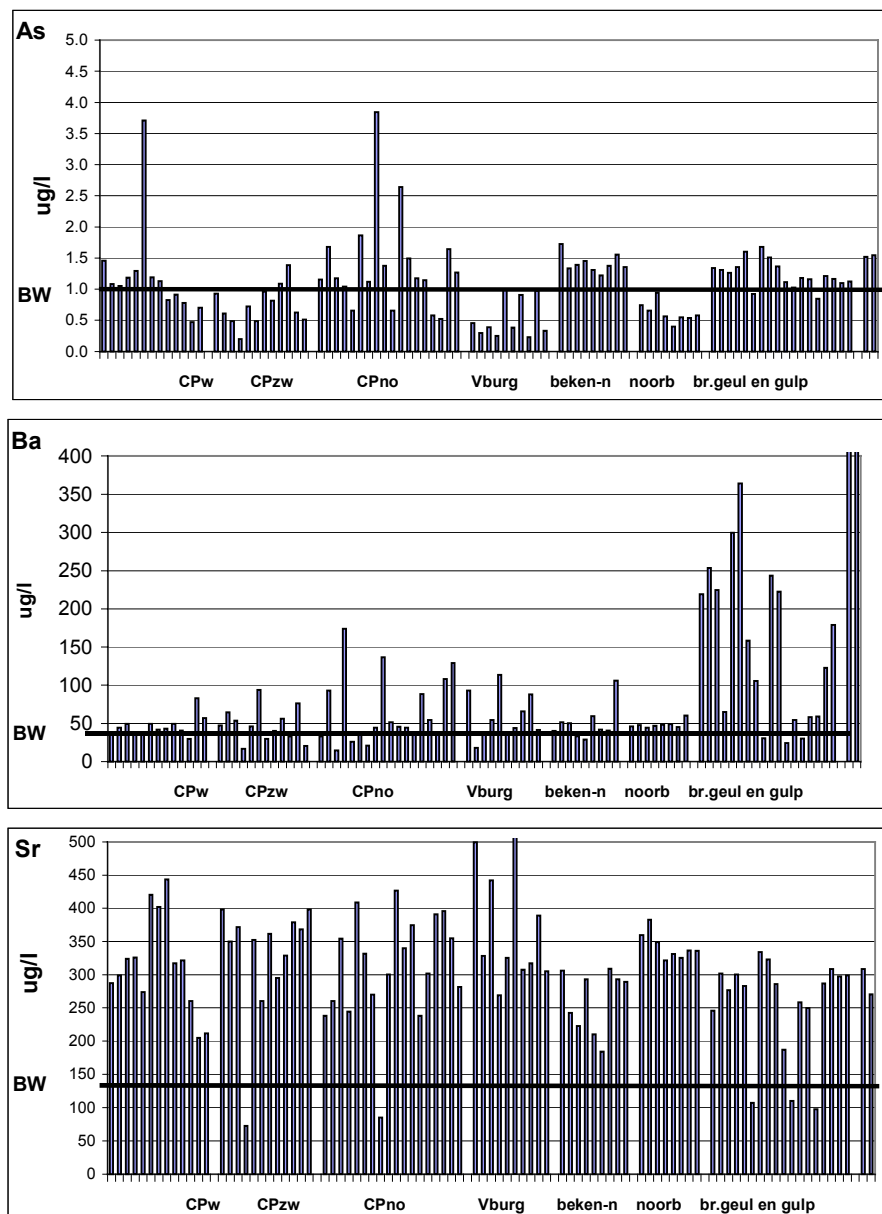


Fig.52 Concentraties van spoorelementen die geen metalen zijn

De concentraties van minder voor veranderingen van de pH gevoelige elementen vertonen vaak een regelmatig patroon (Fig.52). De basiswaarde voor Sr is iets hoger genomen dan volgens Tabel 3. De gekozen waarde stemt overeen met die voor LMG in de zandgebieden. Desalniettemin lijkt het erop alsof de aangehouden basiswaarde nog te laag is. Het onderzoek van de bronnen geeft mogelijk aanleiding tot een herziening van de basiswaarde voor Sr.

De concentraties van weinig voorkomende elementen, zoals de lantaniden (Fig.53), verschillen meestal aanzienlijk van de basiswaarden. Vaak zijn de gemeten concentraties lager maar soms ook hoger. De basiswaarden zijn in deze gevallen slechts op één onderzoek (Meinardi, 1999b) gebaseerd. De Zuid-Limburgse waarden kunnen tot een nadere precisering leiden. In Tabel 3 is de vergelijking weergegeven voor alle sporelementen. De gemiddelde concentraties van de metalen komen steeds relatief goed overeen met hun basiswaarden.

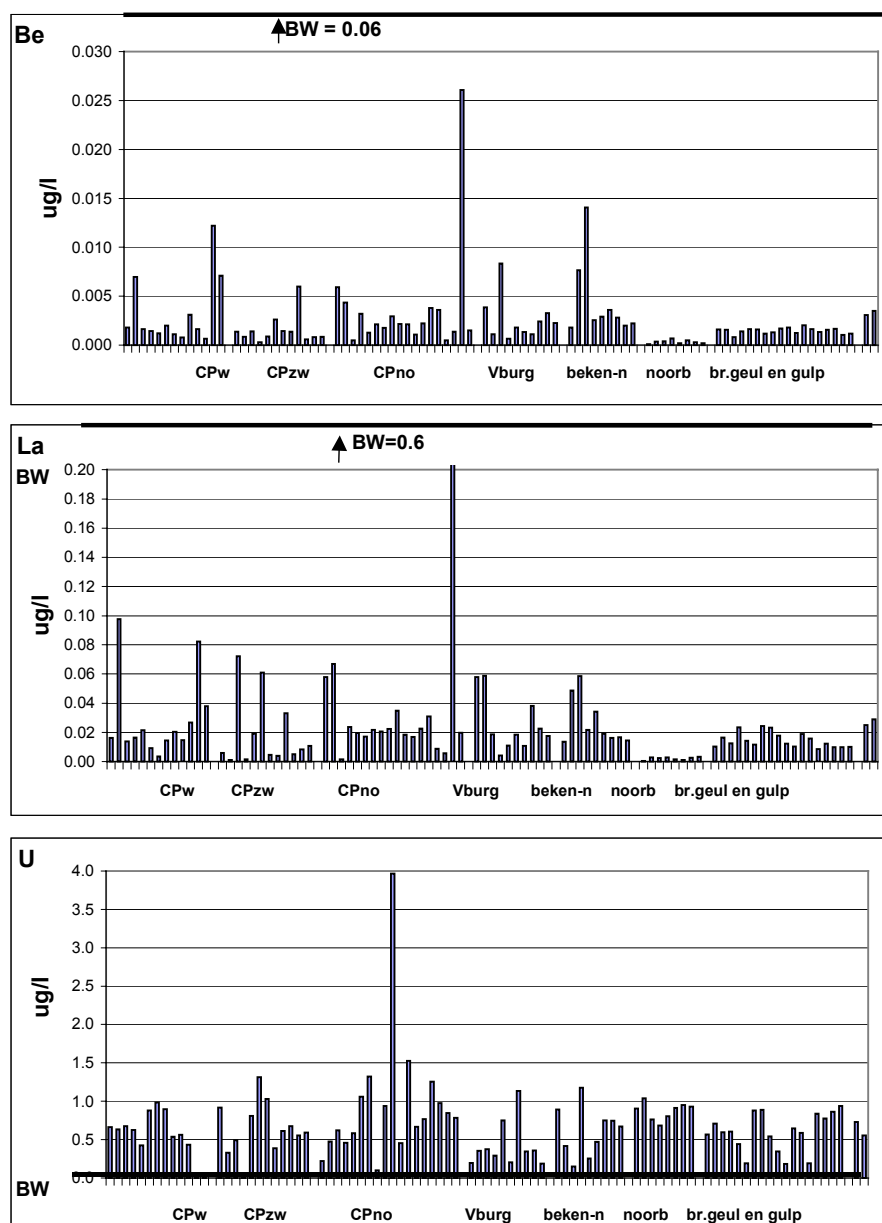


Fig.53 Concentraties van weinig voorkomende sporelementen

Tabel 3 Gemiddelde concentraties (ppb) in vergelijking tot de basiswaarden (BW)

	Basiswaarden		Bronnen Zuid-Limburg				Opmerkingen
	Neerslag Nederland	Grondw. zandgeb.	alle	noord	zuid	zuid min de Noor	
Ag	<0.0001	<0.0001	0.001	0.001	0.001	0.002	conc. 10*BW
Al	10	40	23	22	21	29	circa BW
As	0.6	1.0	1.1	1.0	1.0	1.2	circa BW
Au	0.0003	0.001	0.017	0.016	0.015	0.020	conc. 10*BW
B	2	7.0	36	43	11	13	circa BW
Ba	10	40	85	55	119	151	circa BW, zd hoger
Be	0.02	0.06	0.003	0.003	0.001	0.001	conc. BW/10
Bi	0.0005	0.002	0.001	0.001	0.000	0.001	circa BW
Cd	0.02	0.05	0.036	0.042	0.021	0.015	circa BW
Ce	0.25	1.0	0.026	0.029	0.014	0.020	conc. BW/10
Co	0.15	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	circa BW
Cr	0.2	0.85	1.0	1.3	0.6	0.7	circa BW
Cs	0.0015	0.005	0.020	0.006	0.054	0.064	circa BW
Cu	0.6	0.85	1.6	2.3	0.6	0.6	circa BW
Dy	0.04	0.13	0.005	0.007	0.002	0.002	conc. BW/10
Er	0.02	0.08	0.0037	0.0047	0.0011	0.0014	conc. BW/10
Eu	0.007	0.03	0.002	0.002	0.001	0.002	conc. BW/10
Ga	0.09	0.35	0.8	0.5	1.3	1.7	circa BW, zd hoger
Gd	0.025	0.1	0.005	0.007	0.002	0.002	conc. BW/10
Hf	0.0005	0.0015	0.0012	0.0011	0.0010	0.0014	circa BW
Ho	0.01	0.03	0.0012	0.0016	0.0004	0.0005	conc. BW/10
La	0.2	0.75	0.024	0.030	0.011	0.015	conc. BW/10
Li	0.7	2.4	3.9	3.5	4.1	4.3	circa BW
Lu	0.002	0.0075	0.0007	0.0009	0.0003	0.0003	conc. BW/10
Mo	0.03	0.12	0.19	0.23	0.13	0.15	circa BW
Nb	0.0005	0.0015	0.02	0.01	0.02	0.03	conc. 10*BW
Nd	0.16	0.65	0.023	0.028	0.008	0.011	conc. BW/10
Ni	0.6	2.6	1.6	1.5	1.5	1.8	circa BW
Pb	0.1	0.25	0.33	0.39	0.20	0.26	circa BW
Pr	0.04	0.15	0.005	0.007	0.003	0.003	conc. BW/10
Rb	0.3	1.2	1.6	1.1	2.5	2.6	circa BW
Sb	0.01	0.045	0.054	0.053	0.039	0.037	circa BW
Sc			1.2	0.9	1.7	1.8	
Se	0.15	0.6	1.1	1.0	1.2	1.5	circa BW
Sm	0.03	0.12	0.005	0.006	0.003	0.004	conc. BW/10
Sn	0.002	0.006	0.013	0.011	0.015	0.021	circa BW
Sr	25	100	307	328	281	253	circa BW, hoger
Ta	0.00005	0.0002	0.013	0.011	0.014	0.019	conc. 10*BW
Tb	0.005	0.02	0.0009	0.0011	0.0004	0.0006	conc. BW/10
Th	0.0006	0.0025	0.002	0.002	0.001	0.002	circa BW
Ti	1.0	4.0	1.0	0.8	1.3	1.4	circa BW
Tl			0.009	0.009	0.007	0.009	
Tm	0.0025	0.01	0.0006	0.0007	0.0002	0.0003	conc. BW/10
U	0.005	0.02	0.68	0.68	0.68	0.60	conc. 10*BW
V			1.3	1.3	1.2	1.5	
Y	0.3	1.1	0.05	0.07	0.01	0.02	conc. BW/10
Yb	0.015	0.05	0.0038	0.0048	0.0012	0.0016	conc. BW/10
Zn	2.0	8.0	9.3	11.1	4.5	5.5	circa BW
Zr	0.02	0.07	0.16	0.07	0.37	0.53	circa BW

Voor 46 spoorelementen komen de gemiddelde concentraties in 25 gevallen overeen met de basiswaarden. De concentraties van weinig voorkomende elementen wijken vaak af.

## 10. SAMENVATTENDE OPMERKINGEN, DISCUSSIE

Het onderzoek aan de bronnen van Zuid-Limburg had tot doel om inzicht te verkrijgen in de kwaliteit van bronnen en grondwater. De transformatie van de belasting aan maaiveld naar concentraties in het grondwater en daarmee het bronwater is een functie van processen in de bodem en van de reistijden van het grondwater (bepaald met tritiummetingen). Het onderzoek omvatte een eenmalige bemonstering van 79 bronnen en 12 bronbeken en de analyse van het water op de hoofdcomponenten en 49 sporelementen. Het geheel van de bronnen langs een plateau representeert het grondwater onder het gebied. De gegevens van de bemonstering geven aldus een beeld van de kwaliteit van grondwater, bronnen en beken in Zuid-Limburg. Het onderzoek heeft een relatie opgeleverd voor het verband tussen de belasting aan maaiveld en de kwaliteit van het bronwater. De reistijdverdelingen in de bodem van het bronwater resulteren in een eenduidig verband tussen de gemiddelde belasting aan maaiveld in kg/ha/jaar, het neerslagoverschot en de concentraties van chloride en nitraat in het bronwater.

De opzet van het onderzoek was relatief eenvoudig. De hoofdcomponenten in het bronwater zijn bepaald met de Hydrion-10 en gecontroleerd met metingen in een selectie van de monsters door het RIVM-LAC. Bepalingen van de sporelementen zijn uitgevoerd door NITG-TNO in het kader van een experimenteel onderzoek. Daarnaast zijn metingen gedaan in het veld. Uit een vergelijking van metingen aan dezelfde parameters bleek dat de analyses met de Hydrion-10 en van de sporelementen niet steeds betrouwbaar waren. Het was nodig om bewerkingen uit te voeren aan beide series metingen voor het verkrijgen van een beeld van de werkelijke kwaliteit van het bronwater. De betrouwbaarheid van individuele bepalingen is niet steeds gegarandeerd. Het algemene beeld is na de bewerking echter in grote lijnen representatief voor de kwaliteit van de bronnen en het grondwater. De conclusies ten aanzien van reistijden en hoofdcomponenten zijn relatief robuust. Voor een bevestiging van de conclusies ten aanzien van de sporelementen zou nader onderzoek gewenst zijn.

De reistijden van het grondwater bleken betrekkelijk kort (tientallen jaren) te zijn voor de bronnen die het Centraal Plateau ontwateren en langer (honderden jaren) voor die bij de zuidelijke plateaus. Dit verschil komt tot uiting in de gemeten concentraties voor chloride en nitraat die relatief hoog zijn in de bronnen langs het Centraal Plateau en laag in de zuidelijke bronnen. De concentraties van nitraat zijn vrijwel steeds hoger dan 50 mg/l bij de bronnen langs het Centraal Plateau. In de bronnen langs de zuidelijke plateaus zijn ze lager, behalve voor de bronnen langs de Noor door een vermoedelijk iets afwijkende hydrogeologische situatie. Opmerkelijk is dat de concentraties in het bronwater rechtstreeks volgen uit de gemiddelde belasting aan maaiveld, na een reductie volgens Kolenbrander (1981) voor diepe standen van het grondwater en een zandige bodem. De lössbodems van Zuid-Limburg reageren op een belasting met stikstof die blijkbaar vergelijkbaar is met zandige bodems. Het betekent ook dat er in de diepere bodem nauwelijks sprake is van verdere denitrificatie.

Het zichtbaar voorkomen van vaste neerslag (brontuf), vooral bij de bronnen van het Centraal Plateau is een intrigerend verschijnsel. Het is waarschijnlijk dat die afzettingen geologisch gezien recent zijn. Als de vorming van vaste neerslag al miljoenen jaren aan de gang zou zijn dan zou de bodem er vermoedelijk anders uitzien bij de bronnen. De biologische activiteit in de toplaag van de bodem (de teeltlaag) zal sterk zijn toegenomen sinds het land in cultuur is gebracht, met als gevolg een hogere productie van CO<sub>2</sub>. Hierdoor is meer CaCO<sub>3</sub> uit de diepere bodem in oplossing gegaan zodat het grondwater verzadigd is geraakt met Ca en HCO<sub>3</sub>. Bij het uittreden in de bronnen ontwijkt CO<sub>2</sub> en slaat onder andere CaCO<sub>3</sub> neer, samen met bijvoorbeeld spoorelementen. Mogelijk is dit proces versterkt in de afgelopen vijftig jaar (toegenomen verzuring en vermesting). Sommige bronnen bevatten ook nu nog veel CO<sub>2</sub> (Bijlage 6). Het verschijnsel is duidelijker merkbaar bij het Centraal Plateau omdat daar jonger water voor de dag komt. Het geeft een verklaring voor:

- Het voorkomen van de vaste neerslag (calciet) op het Centraal Plateau en veel minder in de zuidelijke bronnen;
- Hogere concentraties van Ca in bronnen dan in de daardoor gevoede beken, vooral op en rond het Centraal Plateau;
- Het plaatselijk voorkomen van relatief heel hoge pH-waarden (pH>8) en ook de lagere waarden gemeten in het veld ten opzichte van de metingen met de Hydrión;
- Lagere concentraties van spoorelementen dan overeenkomt met een natuurlijke situatie.

De neerslag van vaste brontuf houdt ook verband met de waargenomen concentraties van fosfaat en de spoorelementen, met name de metalen. In relatief veel gevallen zijn lagere concentraties bepaald dan de basiswaarden voor de zandgebieden, die gelijk zijn aan de natuurlijke atmosferische depositie na indamping (Meinardi, 2003). In sommige gevallen kan echter een deel van de meegevoerde stoffen zijn neergeslagen vóór het moment van de monsterneming bij de bronnen van Zuid-Limburg. Daarnaast is het ook mogelijk dat neerslag in de monsterfles is opgetreden voor het moment van analyse.

De in het bronwater gemeten concentraties van fosfaat en van 25 van 46 spoorelementen stemmen overeen met de basiswaarden die gelden voor de rest van Nederland. Dat betekent dat de bodem van Zuid-Limburg geen bijdrage heeft geleverd aan de concentraties van deze stoffen. Een toegenomen belasting aan maaiveld is voor deze stoffen nog niet merkbaar in het bronwater, ook niet voor het Centraal Plateau. De afgifte door de bodem is nul of verwaarloosbaar voor de desbetreffende stoffen. Voor andere spoorelementen, die in relatief lage concentraties voorkomen, zijn hogere concentraties dan de veronderstelde basiswaarden bepaald. Hierbij zou afgifte door de bodem kunnen zijn opgetreden, maar ook is het mogelijk dat de aangehouden basiswaarden niet correct zijn en nadere precisering behoeven. Bij lagere waarden dan de basiswaarden heeft de neerslag van vaste brontuf wellicht een rol gespeeld. De bronnen van Zuid-Limburg geven informatie over de natuurlijke achtergrondconcentraties in het grondwater van Nederland. De reistijden van het water in de bodem zijn soms zodanig lang dat een invloed van recente verontreiniging relatief gering is.



**LITERATUUR**

- Aa N.G.F.M. van der, J. Griffioen, B. van der Grift (2002), Uitspoelingsgevoeligheid van lössgronden, TNO rapport NITG 02-083-B
- Boumans L.J.M., C.R. Meinardi, G.J. Krajenbrink, (1989), Nitraatgehalten en kwaliteit van het grondwater onder grasland in de zandgebieden, RIVM rapport 728472013
- Brueren, J.W.R. (1945) Het terrassenlandschap van Zuid-Limburg. Meded. Geol. Stichting serie C-VI-nr. 1 Maastricht
- Cleven R.F.M.J., L.Fokkert (1998), Prestatiekenmerken sonde Hydrion-10, RIVM rapport 722601003
- Hendrix W.P.A.M. (1985), Het grondwater van het Centraal Plateau (Zuid-Limburg), Geografisch Instituut der Rijksuniversiteit Limburg
- Hendrix, W.P.A.M. (1990), Bronnen in Zuid-Limburg, Natuurhistorisch Maandblad 79/3-4, pp 50-63, Maastricht
- Henkes Ch.H. (1994), Daling van het Cl- en Na-gehalte in ondiep grondwater een gevolg van veranderde minerale bemesting, Meststoffen
- Jongmans, W.J., W.F.J.M. Krul, J.J.H. Vos (1941), Waterwinning in Zuid-Limburg. Uitgave van de N.V. Waterleiding Maatschappij voor Zuid-Limburg Maastricht
- Klonowski M, H.A.J. van Lanen, R. Dijkema (2001), Groundwater flow and nitrate migration in a Dutch-Belgian chalk catchment; observed and future concentrations, Geological Quaterly, 45(1); 5365
- Kolenbrander G.J. (1981), Leaching of nitrate in agriculture, in J.G. Brogan, Nitrogen losses and surface runoff, Nijhof/ Junk, Den Haag
- Kuyl, O.S., (1980), Toelichting bij de geologische kaart van Nederland, blad Heerlen, Rijks Geologisch Dienst Haarlem
- Lanen H.A.J. van, B. van de Weerd, R. Dijkema H.J. ten Dam, B. de Gier (1995), Hydrogeologie van het stroomgebied van de Noor en de effecten van grondwateronttrekkingen aan de westrand van het Plateau van Margraten, Rapport 57, Vakgroep waterhuishouding, LUW
- Maas, F.M. (1959), Bronnen, bronbeken en bronbossen van Nederland, in het bijzonder die van de Veluwezoom. Meded. LH 59 (12) Wageningen
- Meinardi C.R. (1980), Schets van de natuurlijke samenstelling van het zoete grondwater in Nederland, RID-mededeling 80-9
- Meinardi C.R., (1994), Groundwater recharge and travel times in the sandy regions of the Netherlands, Ph.D. Thesis VU Amsterdam, RIVM report no. 715501004
- Meinardi C.R., G. Klaver, B. van Os, A. Rolf, (1999a), Resultaten van de metingen aan de sprengen en het grondwater van de Veluwe, RIVM rapport 714851003
- Meinardi C.R., (1999b), Stroming en samenstelling van de sprengen en het grondwater van de Veluwe, RIVM rapport 714851004
- Meinardi C.R., (2003), Basiswaarden voor sporelementen in het zoete grondwater van Nederland, RIVM rapport 714801028

- Mook W.G. (1989), Principles of isotope hydrology, Introductory course on Isotope Hydrology, Dep. of Hydrogeology and Geographical Hydrology, VU Amsterdam
- Patijn, R.J.H. (1966), Waterwinning in Zuid- en Midden-Limburg nu en in de toekomst. Meded. Geol. Stichting serie C-VI nr. 8. Maastricht
- RGD (1989), Geologische kaart van Zuid-Limburg en omgeving. Afzettingen van de Maas, Rijksgeologische Dienst, Haarlem-Heerlen
- Straaten, L.M.J.U. van (1946), Grindonderzoek in Zuid-Limburg. Meded. Geol. Stichting serie C-VI-nr.2 Maastricht
- Teuling A.J. (2001), Een studie naar de afvoercharacteristieken van de Sint-Brigida bron en de invloed van tektoniek op de hydrogeologie van het Nederlandse deel van het stroomgebied van de Noor met behulp van MODFLOW, Afstudeerverslag LUW
- Zonneveld, J.I.S. (1948-49), Zand-petrologische onderzoekingen in de terrassen van Zuid-Limburg, Meded.Geol.Sticht., N.S.3, p103-123
- Zonneveld, J.I.S. (1955), De kwartaire rivierterrassen van Zuid-Limburg. Tijdschrift KNAG Tweede reeks deel LXXII nr. 4. Leiden

## BIJLAGE 1 ONDERZOEK BIJ DE NOOR

Het stroomgebied van de Noor is een onderzoeksgebied van de WUR. Aansluitend aan het WUR-onderzoek heeft het RIVM aanvullend onderzoek gedaan bij de Noor. De monsters uit bronnen van de Noor zijn onderzocht op concentraties van de natuurlijke isotoop  $^{18}\text{O}$ . In een deel van het gebied is de bodem nader onderzocht met elektromagnetische methoden (met de EM-31 van Geonics). In dat gebied ligt wellicht een breukzone. Het EM-onderzoek en de resultaten van de bepaling van de isotoopconcentraties komen hierna aan de orde.

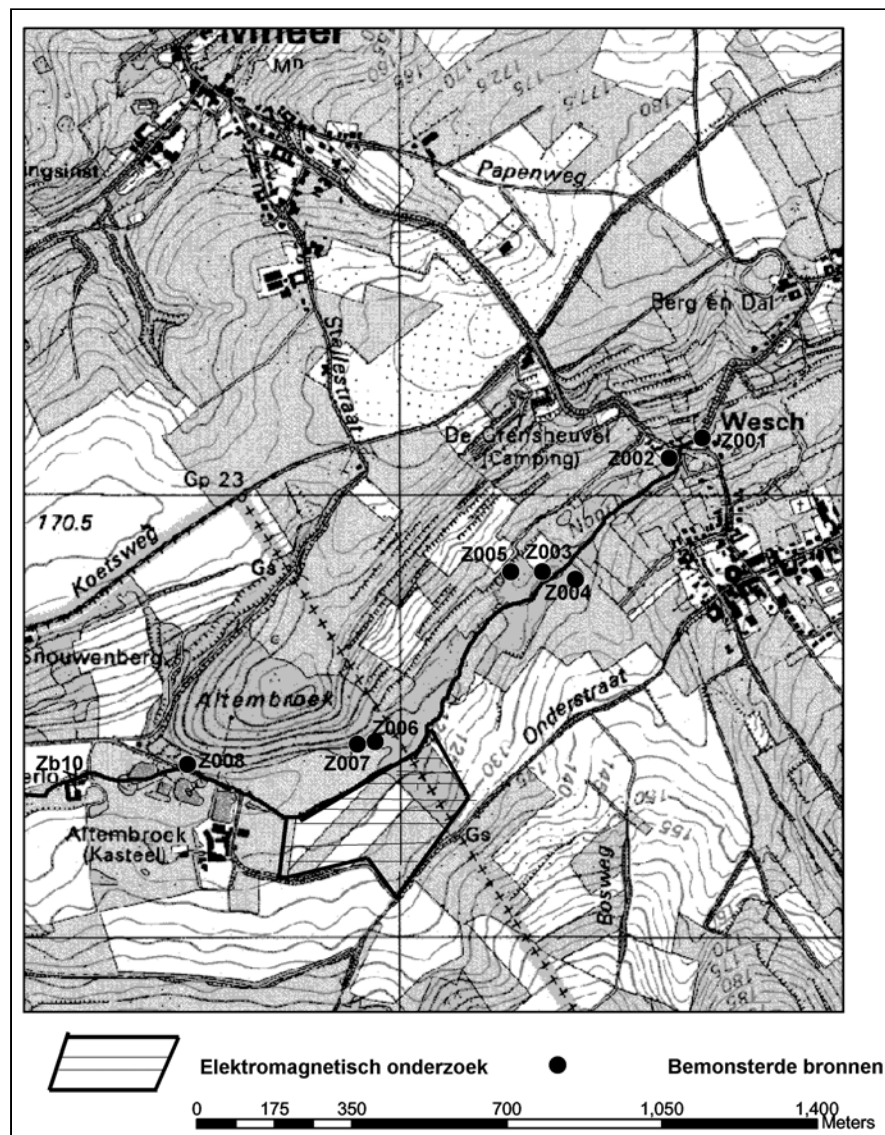


Fig.B1.2 Situatie Noor

### Landschap en hydrogeologie

De Noor (Fig.B1) is een ongeveer drie km lange zijbeek van de Voer, die van noordoost naar zuidwest stroomt. De oorsprong van de Noor is de Brigidabron (bron Z001), in de buurtschap Wesch bij het dorp Noorbeek. Het dal van de Noor zet zich stroomopwaarts nog vele

kilometers voort, maar is daar meestentijds een droog dal. De noordflank van het dal is het steilst. Over het traject waar de beek wel water voert, ontspringt vooral aan de noordkant een aantal bronnen die de Noor voeden. Ongeveer halverwege de loop van de Noor kruist de beek de Rijksgrens in een bosje, waarin aan de noordzijde, maar ook aan de zuidzijde bronnen liggen. In die omgeving heeft een nader onderzoek met de EM-31 plaats gevonden. De bodem van het bosje is plaatselijk drassig. Het bos aan de noordzijde van de beek ligt in Altembroek. Aan de westzijde van het bosje liggen (in België) weilanden waarin ten zuiden van de beek een langgerekte drassige plek aanwezig is. Overigens is het land goed beloopbaar. De Noor loopt door de weilanden. Verder stroomafwaarts liggen bijna geen bronnen meer (behalve de Lambertusbron, Z008). De Noor heeft daar eerder het karakter van een afvoergoot. Ongeveer 2 km verder naar het westen stroomt de Noor in de Voer.

De bodemopbouw van de onderzochte locatie is dat een lössdek aan maaiveld rust op kalksteenlagen uit het Krijt. Deze lagen zijn meer dan 100 m dik (zie par.6.5). De lösslagen zullen relatief slecht doorlatend zijn in vergelijking tot de onderliggende kalksteen. De topografie geeft aanwijzingen dat de bodem onder het bos en het weiland vooral aan de zuidoever gedaald is. De Noor buigt daar iets naar het zuiden (zelfs met een scherpe knik) en een paar honderd meter stroomafwaarts weer naar het noorden (Fig.B1). Van een daling is in het terrein weinig te zien, behalve dat aan de zuidoever een steilrand aanwezig is bij de overgang aan de noordoostkant van het weiland naar het bosje. Nabij de beek is die het hoogst, maar verder naar het zuiden is de rand minder uitgesproken. Een mogelijkheid is ook dat de beekloop geblokkeerd is geraakt door een grondverschuiving vanaf de noordelijke helling. Gevolgen van de daling zijn vermoedelijk de scherpe knik in de beekloop, de aanwezigheid van de steilrand en het feit dat ook verder naar het noorden vergelijkbare structuren zijn te herkennen in het landschap (zoals de dalvormen nabij Mheer, zie Fig.B1). De EM-metingen geven hierover mogelijk nadere aanwijzingen (Fig.B2).

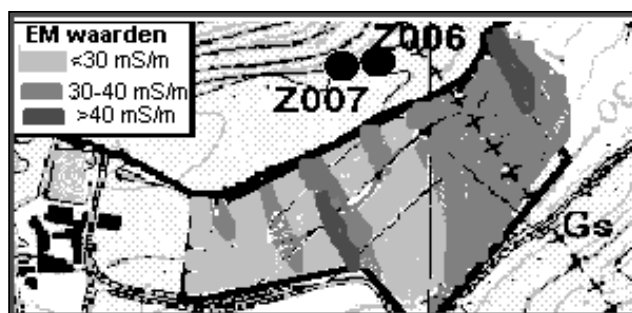


Fig.B1.2 Gemeten EM-31 waarden in mS/m

#### Interpretatie van de EM metingen

Het patroon van de EM metingen (Fig.B1.2) vertoont structuren. Een element daarin wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van een aardgasleiding die instabiele waarden veroorzaakt. De ligging van deze leiding is in het terrein aangegeven. De overige waarden zijn eveneens interessant. De overheersende waarden in het weiland zijn lager dan 30 mS/m, terwijl die in het bosje overwegend iets hoger zijn. Daarnaast zijn twee zones waargenomen waar de EM

waarden hoger zijn dan 40 mS/m (plaatselijk in het noordoosten zijn ze zelfs hoger dan 50 mS/m). Hogere EM waarden kunnen verschillende oorzaken hebben, zoals:

1. Verschillen in de textuur van de bodem.
2. Verschillen in het watergehalte van de ondiepe bodem.
3. Verschillen in de geleidbaarheid van het grondwater.

De derde oorzaak is minder waarschijnlijk aangezien een meting in een bron in het zuidelijke bosje geen afwijkende geleidbaarheid van het water aangaf. Ook de mogelijkheid dat verschillen in het watergehalte van de ondiepe bodem de enige oorzaak vormen, is minder waarschijnlijk doordat de grootste afwijking van de EM waarden niet optreedt bij de drassige plekken, waar de ondiepe bodem met water verzadigd zal zijn, maar juist ernaast. In het algemeen blijkt zelfs dat verschillen in de diepte van de grondwaterstand weinig invloed hebben, anders waren de hoogteverschillen in het terrein wel duidelijker uit de metingen naar voren gekomen. Hieruit volgt dat afwijkende (hogere) EM waarden waarschijnlijk vooral moeten worden toegeschreven aan een afwijkende structuur van de bodemlagen.

De metingen geven twee smalle zones (circa 20 m breed) aan met verhoogde EM waarden. Een interpretatie is dat deze zones op de plaats van breukzones liggen, waar de lösslagen dikker zijn over de breedte van die zone en waar ze deels versmeerd zijn. De grotere dikte zal in hogere EM waarden resulteren. De grotere dikte en de versmering leiden eveneens tot een slechtere doorlatendheid van de bodem, waarschijnlijk zelfs tot grote diepte. De breuken fungeren in dat geval als barrières voor de grondwaterstroming, die in het algemeen onder een hoek naar de beek gericht zal zijn. Het grondwater zal bij de barrières enigszins worden opgestuwd. Dit verklaart de aanwezigheid van de drassige plekken juist bovenstrooms van de breuken, maar in het algemeen ook het veelvuldig voorkomen van bronnen en drassige condities verder naar het oosten. De bronnen in het bosje ten zuiden van de beek, waar de bodem ook drassig is, zijn vermoedelijk een gevolg van een lagere ligging van het maaiveld.

*Conclusie: Het elektromagnetisch onderzoek en de topografie geven aanwijzingen voor de aanwezigheid van breukzones nabij en ongeveer in de richting van de Rijksgrens, waardoor het maaiveld plaatselijk is gedaald. De gegevens laten geen meer precieze uitspraken toe.*

#### De stabiele isotoop $^{18}\text{O}$

De concentraties van  $^{18}\text{O}$  wijken weinig af van een gemiddelde van -7.615‰ ten opzichte van SMOW (= Standard Mean Ocean Water, zie Mook, 1989). De waarden zijn opmerkelijk in de zin dat ze lager zijn dan het langjarige gemiddelde bij Vliegveld Beek (circa -7.0‰).

Blijkbaar verschilt de neerslag bij de Noor enigszins van de neerslag bij Vliegveld Beek (relatief iets koudere regen bij de Noor). De oorzaak zou kunnen liggen in de asymmetrische vorm van het dal van de Noor, waarbij de op het noorden geëxponeerde helling groter is dan de helling die op het zuiden ligt (aan de noordkant). Andere factoren spelen echter mogelijk ook een rol (zoals bos versus grasland in het intrekgebied).

*Tabel B1 Concentraties van <sup>18</sup>O in bronnen van de Noor*

<b>Bron</b>	<b>‰ tov SMOW</b>	<b>Bron</b>	<b>‰ tov SMOW</b>
Z001	-7.61	Z005	-7.62
Z002	-7.63	Z006	-7.68
Z003	-7.60	Z007	-7.62
Z004	-7.54	Z008	-7.62

Het aantal waarden is te gering voor een verdere uitvoerige bespreking.

## BIJLAGE 2 VERGELIJKING VAN METINGEN AAN DEZELFDE PARAMETERS

In het veld en in de laboratoria zijn in een aantal gevallen dezelfde parameters bepaald. De pH en de geleidbaarheid (EC) zijn zowel in het veld bepaald als met de Hydrion-10 door de WUR. Eveneens is een vergelijking mogelijk voor een selectie van 9 bronnen waar monsters zijn geanalyseerd door RIVM-LAC op hoofdcomponenten en drie sporelementen. De waarden kunnen worden vergeleken met de resultaten van WUR en van NITG. Tenslotte is ook een vergelijking mogelijk voor de waarden van de kationen van de hoofdcomponenten die zowel door WUR als door NITG zijn bepaald bij alle monsters.

### B2.1 Geleidbaarheid (EC) en pH

De metingen van EC van monsters uit de bronnen die gedaan zijn in het veld en daarnaast door WUR zijn vergeleken in Fig.B2.1. Het systematische verschil van ongeveer 10% is verklaarbaar doordat de referentietemperatuur voor de veldmetingen 25 °C is en 20 °C voor de metingen van de WUR.

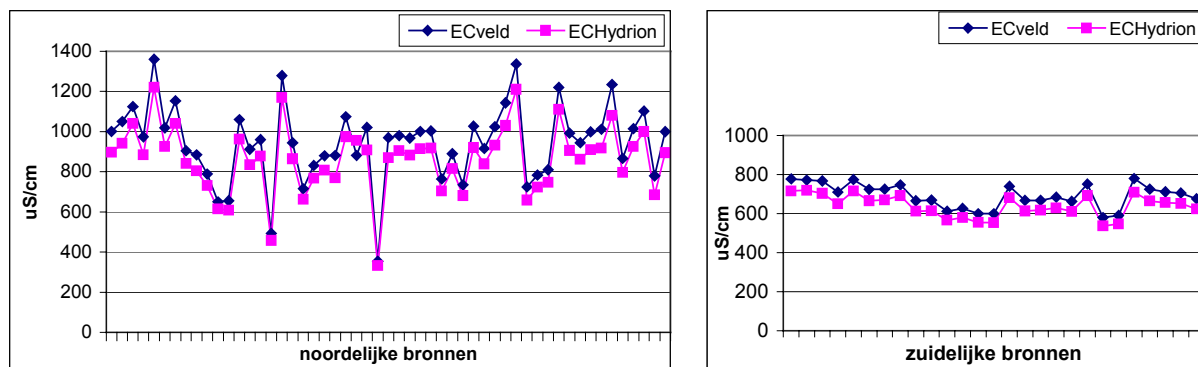


Fig.B2.1 Vergelijking van EC-waarden gemeten in het veld en met de Hydrion-10

De overeenkomst tussen de twee series metingen van de pH is relatief goed met enkele afwijkingen (Fig.B2.2). Grotere afwijkingen zijn te verklaren doordat het WTW-instrument het soms liet afweten, zodat de pH moest worden bepaald met behulp van een eenvoudiger methode (pH-papier). In veel gevallen geven de veldmetingen iets lagere waarden dan de Hydrion-10. Een mogelijke verklaring is gegeven in paragraaf 7.3.

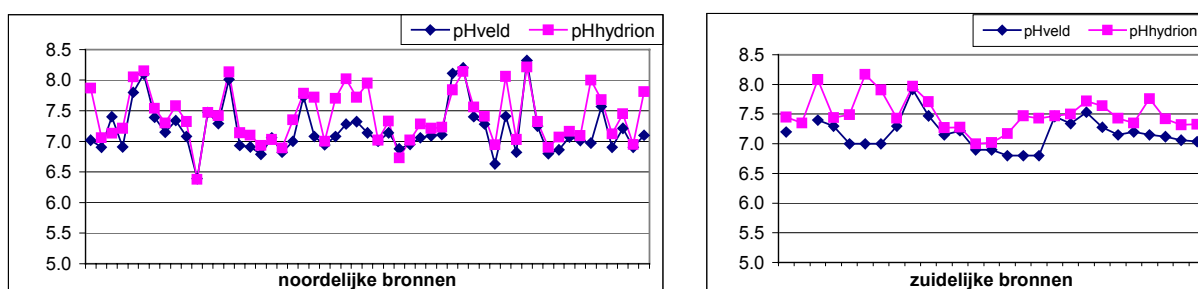


Fig.B2.2 Vergelijking van pH-waarden gemeten in het veld en met de Hydrion-10

### B2.2 Chemische analyses door RIVM-LAC en met de Hydrion-10

Voor 9 bronnen is een vergelijking mogelijk van de metingen door WUR met de Hydrion-10 en de analyses door RIVM-LAC van monsters die op dezelfde plaats en tijd zijn genomen. De laboratoriumbepalingen door het RIVM zijn onder gestandaardiseerde omstandigheden uitgevoerd met gevalideerde methoden ter controle van de WUR-metingen. Aangehouden is dat de door RIVM bepaalde waarden het meest betrouwbaar zijn. De concentraties van Ca, Na, K, Cl, NO<sub>3</sub> en HCO<sub>3</sub> zijn direct gemeten door beide laboratoria. Die van Mg en SO<sub>4</sub> zijn door RIVM bepaald en door WUR uit de ionenbalans berekend. Dit leverde problemen op doordat afwijkingen zijn geconstateerd tussen de resultaten van RIVM en WUR voor Ca en HCO<sub>3</sub>, wat dus eveneens invloed heeft op de berekende concentraties van Mg en SO<sub>4</sub>. De vergelijkingen voor Na, K, Cl, NO<sub>3</sub> zijn weergegeven in de Fig. B2.3, Fig.B2.4 en Fig.B2.5. In deze vier gevallen is steeds een relatief goede overeenkomst aanwezig. De volledige serie van de Hydrion-10 metingen is waarschijnlijk betrouwbaar voor Na, K, Cl en NO<sub>3</sub>.

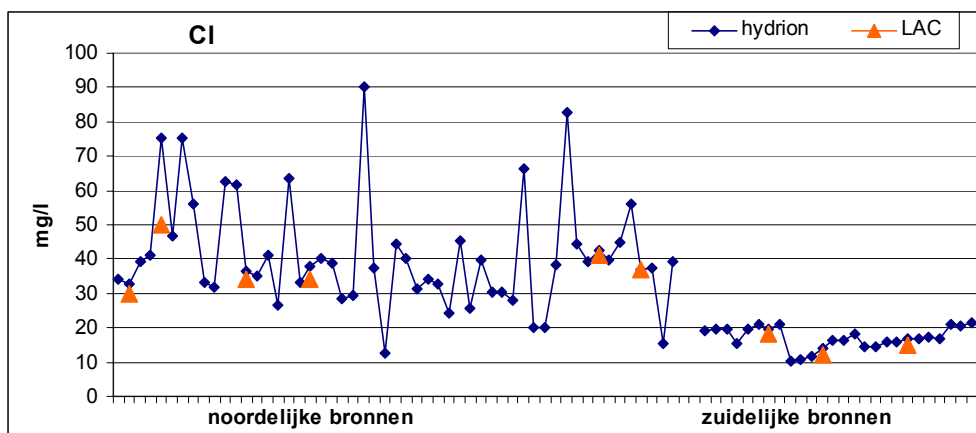


Fig.B2.3 Vergelijking voor Cl van de metingen door LAC en met de Hydrion-10

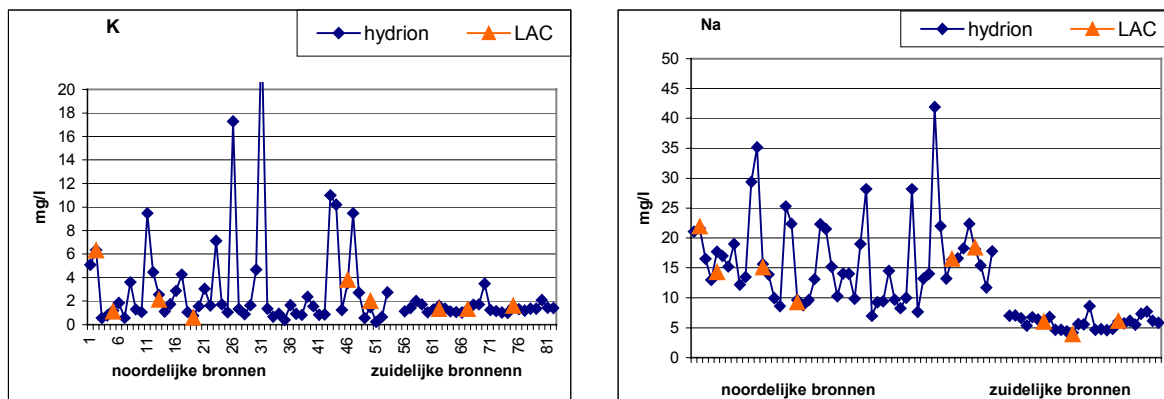


Fig.B2.4 Vergelijking voor Na en K van de metingen door LAC en met de Hydrion-10



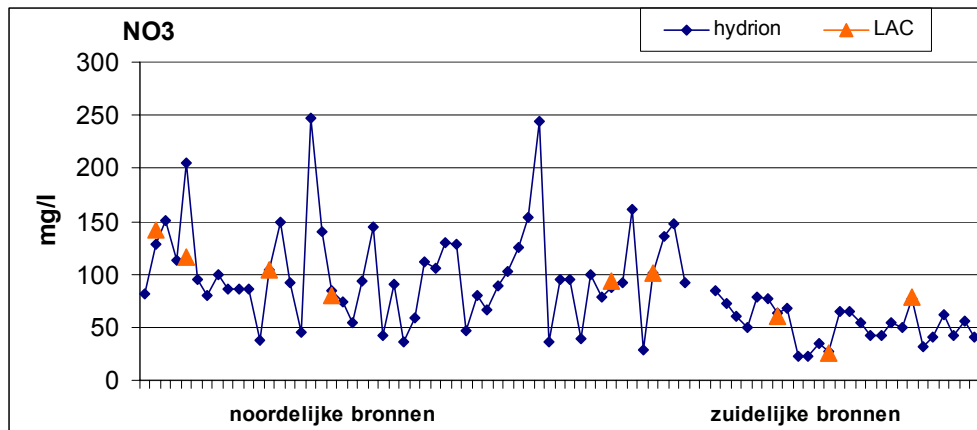


Fig.B2.5 Vergelijking voor NO<sub>3</sub> van de metingen door LAC en met de Hydriion-10

De gemiddelde concentraties van Ca bepaald door RIVM, zijn systematische circa een factor 1.20 hoger dan de WUR resultaten. Aangehouden is dat de bepalingen door RIVM het meest betrouwbaar zijn. Daarom zijn alle resultaten van WUR met een factor 1.20 verhoogd. Eenzelfde redering geldt voor HCO<sub>3</sub>, de vermenigvuldigingsfactor bedraagt in dat geval 1.15. Na deze bewerkingen is er een relatief goede overeenkomst tussen de bepalingen (Fig.B2.6), door WUR en RIVM. De gevolgde procedure vindt steun in de consistentie van de hiermee berekende waarden en de eerdere bepalingen, zoals besproken in Hoofdstuk 7.

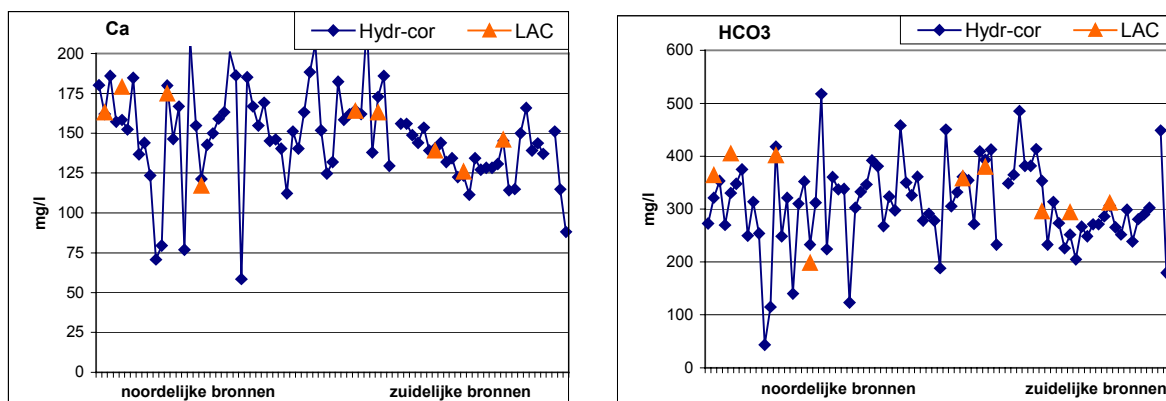


Fig.B2.6 Vergelijking voor Ca en HCO<sub>3</sub> door LAC en gecorrigeerde Hydriion-10 metingen

De berekende waarden voor Mg en SO<sub>4</sub> uit de bepalingen met de Hydriion-10 behoeven een correctie als gevolg van de aanpassingen voor Ca en HCO<sub>3</sub>. Voor Mg is aangehouden dat de verhoging van de concentraties van Ca in mmol/l heeft geleid tot een verlaging van de concentraties van Mg met eenzelfde waarde in mmol/l. In Fig.B2.7 zijn de gecorrigeerde waarden aangegeven. De overeenkomst na aanpassing is aanvaardbaar, maar niet echt goed. Evenzeer zijn voor SO<sub>4</sub> de concentraties bepaald met de Hydriion-10 met een factor verlaagd die overeenkomt met de verhoging van de HCO<sub>3</sub>-concentraties in mmol/l (Fig.B2.8). De met de Hydriion-10 bepaalde waarden geven na deze aanpassing een relatief aanvaardbare indicatie van de concentraties van SO<sub>4</sub> in bronnen en beken. Deze waarden blijven echter wel minder betrouwbaar.

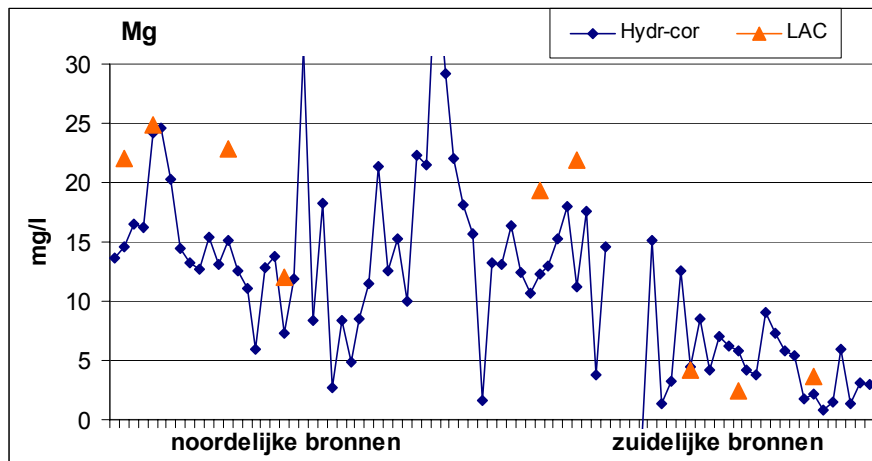
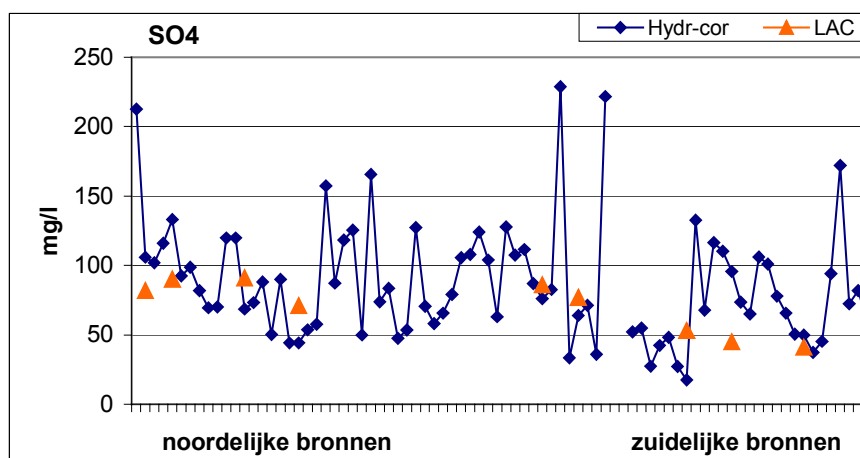


Fig.B2.7 Vergelijking voor Mg van de metingen door LAC en met de Hydrion-10



FigB2.8 Vergelijking voor SO<sub>4</sub> van de metingen door LAC en met de Hydrion-10

### B2.3 Vergelijking van de metingen door RIVM, NITG en WUR

De analyses door NITG-TNO betreffen 49 verschillende spoorelementen, maar ook zijn de concentraties van Ca, K, Na en Mg bepaald. RIVM heeft in een selectie van 10 monsters de spoorelementen Al, Ba en Zn bepaald naast de hoofdcomponenten. WUR heeft voor alle monsters de hoofdcomponenten bepaald. In al deze gevallen is een vergelijking mogelijk. De vergelijking van de resultaten van WUR en NITG voor Na en K is weergegeven in Fig.B2.9. Deze figuren bevatten een lijn met helling (1:1), waarvoor de concentraties even groot zijn en ook de (2:1) lijn, waar de waarden van de Hydrion twee keer zo groot zijn als die van NITG. De twee vergelijkingen van Fig.B2.9 geven aan dat de resultaten van de analyses in twee groepen uiteenvallen. Ongeveer de helft van de concentraties van Na en K die door NITG zijn gemeten komt relatief goed overeen met de waarden gemeten met de Hydrion-10 en dus ook met de metingen door RIVM. De andere helft van de door NITG gemeten waarden is circa twee keer zo laag. De helft van de meetwaarden van NITG lijkt dus twee keer lager te zijn dan de werkelijke concentraties, als aangehouden wordt dat de resultaten van RIVM en WUR het meest betrouwbaar zijn.

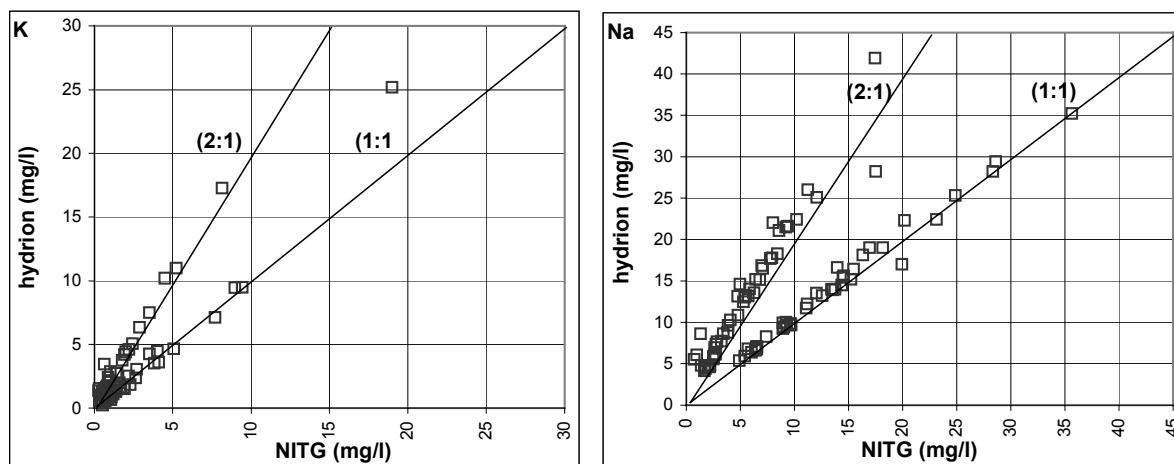


Fig.B2.9 Vergelijking van de verschillende analyses van K en Na (in mg/l)

De systematische verschillen tussen de twee groepen waarden voor Na en K maken het aannemelijk dat de oorzaak van de afwijkingen ligt in de bewerking van de resultaten (verdunningsfactor). De analyses met afwijkende waarden blijken inderdaad tot een zelfde serie metingen te behoren (aaneengesloten reeks labcodes). Dit leidt ertoe om de afwijkende waarden steeds met een factor 2 te vermenigvuldigen (persoonlijke mededeling Bertil van Os, NITG). De resultaten zijn opnieuw gebruikt voor een vergelijking voor K en Na. Met de aangepaste waarden ontstaat een reeks waarbij de metingen van NITG en WUR relatief goed overeenkomen (Fig.B2.10). De resultaten van de Hydrion-10 blijken na correlatie gemiddeld circa 10% hoger zijn dan de waarden van NITG. Hierop is geen verdere correctie toegepast.

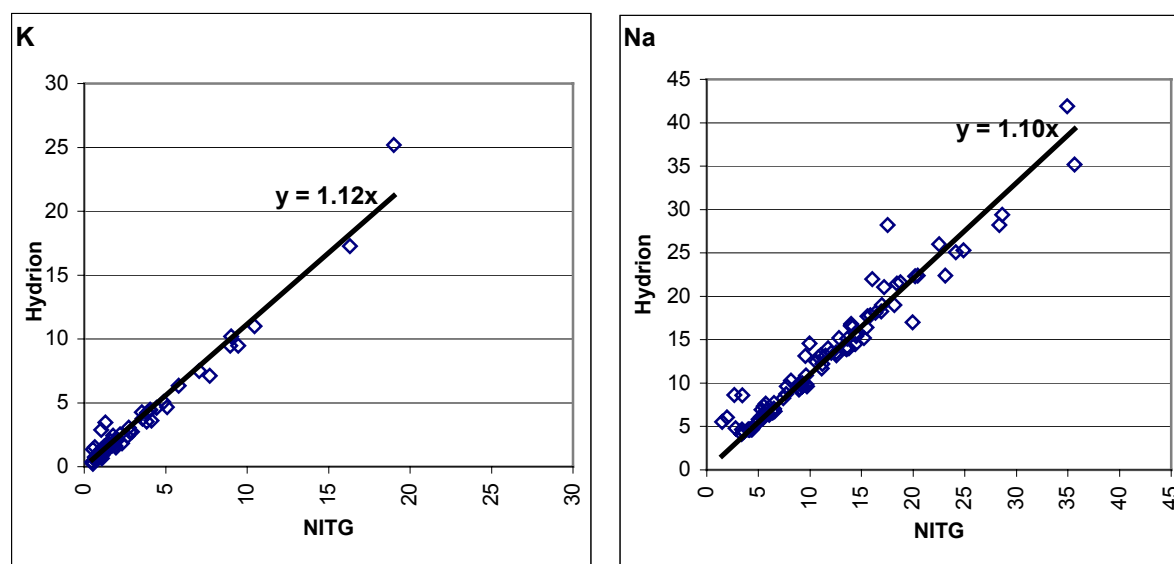


Fig.B2.10 Vergelijking van de gecorrigeerde waarden voor K en Na (in mg/l)

De waarden voor alle andere parameters (ook voor de sporelementen) zijn met een factor 2 vermenigvuldigd bij dezelfde monsters waarvoor Na en K afwijkingen vertoonden. De aangepaste waarden voor Ca en Mg zijn vergeleken met de gecorrigeerde waarden bepaald met de Hydrion-10 (Fig.B2.11). Er is sprake van een aanvaardbare overeenkomst, die niet

echt goed is. Een systematische afwijking is dat de waarden van NITG in beide gevallen overwegend lager lijken te zijn dan die van WUR. Dit kan samenhangen met een neerslag van vast  $\text{CaCO}_3$  bij de NITG monsters (lange bewaartijd). Het leidt ertoe om de door WUR bepaalde waarden aan te houden als meest representatieve waarden voor Ca en Mg.

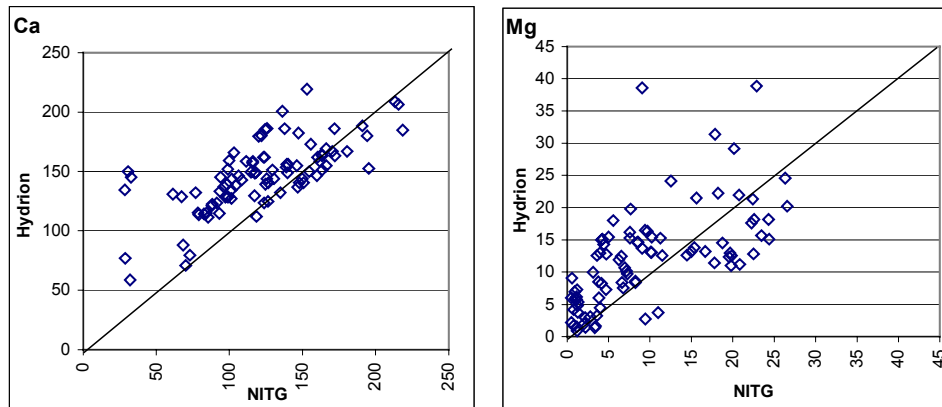


Fig.B2.11 Vergelijking van de verschillende analyses van Ca en Mg (in mg/l)

Tenslotte is een vergelijking mogelijk tussen de waarden van de sporelementen Al, Ba en Zn die door RIVM-LAC en NITG (na correctie) zijn bepaald. De vergelijking (Fig.B2.12) bevat relatief weinig gegevens. Bovendien heeft RIVM voor Al en Zn een relatief hoge detectiegrens aangehouden waardoor de gemeten concentraties er weinig van afwijken. De in Fig.B2.12 gegeven waarden zijn een veelvoud van die detectiegrens. De overeenkomst is beter voor Ba dan voor Al en Zn. De overeenkomst voor Na en K en voor de sporelementen is goed genoeg om vertrouwen te hebben in de door NITG bepaalde concentraties, na correctie op de wijze zoals hiervoor is aangegeven, ook voor de overige sporelementen.

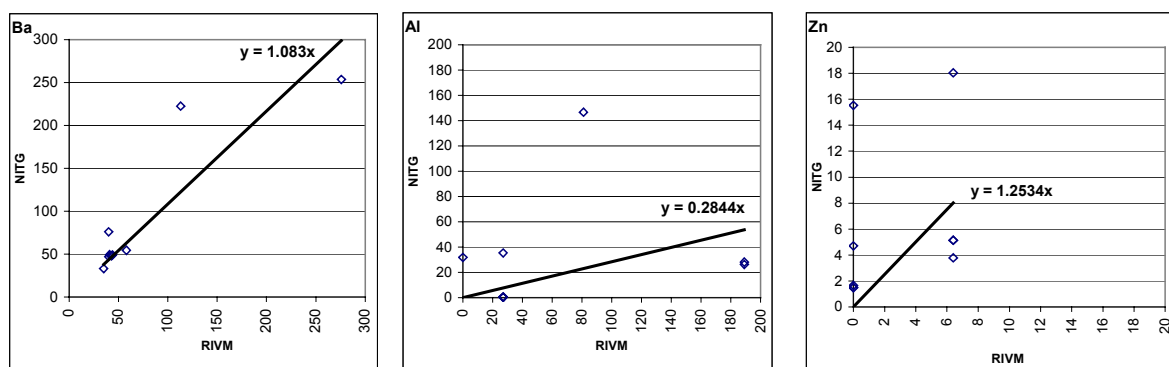


Fig.B2.12 Vergelijking van de verschillende analyses van sporelementen (in  $\mu\text{g/l}$ )

Voor de kwaliteit van het bronwater is aangehouden dat de resultaten van WUR betrouwbaar zijn voor Cl, K, Na,  $\text{NO}_3$  en na bewerking voor Ca,  $\text{HCO}_3$ , Mg, en  $\text{SO}_4$ . Voor de door NITG bepaalde concentraties van de sporelementen is aangehouden dat de waarden na eventuele correctie een aanvaardbare indicatie geven van de werkelijke concentraties.

**BIJLAGE 3 RESULTATEN VAN DE VELDMETINGEN***Tabel B3a Resultaten van de veldmetingen (NB laatste meters coördinaten onnauwkeurig)*

<b>bron</b>	<b>Datum monster</b>	<b>x-coord m</b>	<b>y-coord m</b>	<b>EC uS/cm</b>	<b>Temp °C</b>	<b>pH</b>	<b>Afvoer l/s</b>
<b>n.mb3</b>	20011107	181044	328711	1000	11.9	7.10	0.90
<b>n.001</b>	20011207	181221	328537	1001	11.5	7.02	3.00
<b>n.002</b>	20011018	180960	328420	1050	10.8	6.90	5.00
<b>n.003</b>	20011018	180801	328011	1124	10.9	7.40	0.40
<b>n.004</b>	20011018	180733	327376	974	10.5	6.91	0.50
<b>n.005</b>	20011018	180894	326990	1360	13.5	7.80	0.05
<b>n.006</b>	20011018	180719	326170	1019	13.3	8.10	0.60
<b>n.007</b>	20011025	181235	325796	1153	11.3	7.39	1.50
<b>n.008</b>	20011025	181135	325392	904	11.5	7.15	0.50
<b>n.009</b>	20011024	180681	325265	884	11.7	7.34	0.35
<b>n.010</b>	20011024	180556	325397	789	10.7	7.08	0.20
<b>n.011</b>	20011019	179930	324280	650	11.3	6.39	0.60
<b>n.012</b>	20011019	179690	323760	656	13.4	7.47	0.20
<b>n.015</b>	20011019	182375	323779	1060	11.3	7.29	12.00
<b>n.016</b>	20011019	182095	322636	912	12.8	8.01	0.50
<b>n.017</b>	20011019	182672	321644	960	10.9	6.93	0.40
<b>n.018</b>	20011019	182680	321506	493	11.8	6.91	0.20
<b>n.020</b>	20011025	185581	321321	1279	11.0	6.79	0.80
<b>n.021a</b>	20011025	186506	321160	944	12.7	7.06	0.10
<b>n.022</b>	20011031	189337	322043	716	11.4	6.82	0.82
<b>n.023</b>	20011031	189448	322058	831	10.5	7.00	0.25
<b>n.024</b>	20011029	189080	323528	880	12.2	7.73	0.25
<b>n.025</b>	20011107	187308	324067	881	10.7	7.08	0.20
<b>n.026</b>	20011029	183730	326477	1074	10.7	6.94	0.01
<b>n.027</b>	20011107	187104	327180	881	10.7	7.08	0.37
<b>n.029</b>	20011107	187843	328017	1021	11.8	7.28	**
<b>n.030</b>	20011107	187995	327855	354	12.4	7.32	**
<b>n.031</b>	20011107	189629	326996	970	10.7	7.14	0.20
<b>n.033</b>	20011029	190092	321222	980	12.1	7.00	0.08
<b>n.034</b>	**	188080	319591	**	**	**	**
<b>n.035</b>	20011025	182425	323606	968	10.7	7.14	0.10
<b>n.037a</b>	20011026	188974	319777	1001	12.4	6.88	0.20
<b>n.037b</b>	20011026	189042	319801	1003	13.1	6.95	0.70
<b>n.037s</b>	20011206	189383	318321	765	10.7	7.06	23.00
<b>n.040</b>	20011029	189635	322965	890	11.2	7.09	0.10
<b>n.041</b>	20011019	182653	322500	735	12.3	7.11	0.10
<b>n.042</b>	20011025	181972	323058	1027	12.9	8.11	0.01
<b>n.043</b>	20011025	182115	323338	916	12.8	8.20	0.15
<b>n.043b</b>	20011025	182172	323291	1024	11.6	7.40	0.10
<b>n.044</b>	20011025	182167	323418	1143	10.8	7.28	0.10
<b>n.049</b>	20011025	185281	321586	1337	14.9	6.63	0.80
<b>n.050</b>	20011107	187283	319035	724	10.9	7.41	5.00
<b>n.076</b>	20011025	187902	320895	783	14.2	6.82	**
<b>n.077</b>	20011025	188003	320094	810	12.2	8.32	0.15
<b>n.080</b>	20011031	189945	325683	1220	12.5	7.25	0.10
<b>n.084</b>	20011031	188680	325241	992	11.2	6.80	0.20
<b>n.085</b>	20011031	188508	325145	944	11.3	6.86	0.10
<b>n.086</b>	20011105	187644	324578	999	11.0	7.07	0.10
<b>n.087</b>	20011026	187589	324501	1012	11.5	7.01	0.10

Tabel B3b Resultaten van de veldmetingen (NB laatste meters coördinaten onnauwkeurig)

<b>bron</b>	<b>Datum monster</b>	<b>x-coord m</b>	<b>y-coord m</b>	<b>EC uS/cm</b>	<b>Temp °C</b>	<b>pH</b>	<b>Afvoer l/s</b>
<b>n.091</b>	20011107	183386	327409	1235	10.6	6.97	0.20
<b>n.096a</b>	20011031	190064	321509	867	12.2	7.57	0.50
<b>n.099</b>	20011025	182394	323864	1014	11.8	6.90	2.00
<b>n.100</b>	20011019	182150	322338	1102	11.3	7.21	0.50
<b>n.104</b>	20011026	188061	319309	780	11.0	6.90	0.10
<b>z.001</b>	20011017	184661	309113	777	10.8	7.2	23.8
<b>z.002</b>	20011017	184624	309102	772	11.2		1.0
<b>z.003</b>	20011017	184333	308832	767	12.5	7.4	6.3
<b>z.004</b>	20011017	184378	308796	710	11.4	7.3	1.0
<b>z.005</b>	20011017	184237	308797	774	11.9	7.0	1.5
<b>z.006</b>	20011017	183936	308434	723	12.6	7.0	2.5
<b>z.007</b>	20011017	183907	308416	725	11.8	7.0	2.0
<b>z.008</b>	20011017	183495	308380	746	11.0	7.3	1.0
<b>z.021</b>	20011101	191362	307250	665	10.6	7.92	0.10
<b>z.022</b>	20011101	191427	307303	669	10.5	7.47	0.50
<b>z.023</b>	20011101	191557	308219	611	10.9	7.15	1.50
<b>z.024</b>	20011101	191590	308414	626	10.7	7.22	0.75
<b>z.025</b>	20011101	191873	309793	599	11.0	6.90	0.75
<b>z.026</b>	20011101	192255	310911	740	13.1	6.80	0.10
<b>z.027</b>	20011101	191970	310621	668	10.7	6.80	0.80
<b>z.028</b>	20011101	192078	311280	667	10.8	6.80	10.00
<b>z.031</b>	20011102	188484	308791	683	9.9	7.46	0.20
<b>z.032</b>	20011102	188470	308755	662	9.2	7.34	0.05
<b>z.033</b>	20011102	188205	311147	751	10.8	7.53	0.20
<b>z.034</b>	20011102	188122	310546	579	10.5	7.28	6.00
<b>z.035</b>	20011102	188146	310510	590	10.5	7.15	0.80
<b>z.036</b>	20011102	189891	313118	780	10.5	7.20	0.80
<b>z.037</b>	20011108	190300	315287	725	10.8	7.15	12.00
<b>z.038</b>	20011206	188821	318086	711	10.7	7.12	2.50
<b>z.039</b>	20011206	189430	317093	705	10.7	7.06	5.00
<b>z.040</b>	20011206	189400	317236	675	10.7	7.04	3.00
<b>beken</b>							
<b>n.b05</b>	20011206	180526	327285	1009	9.3	8.18	60.00
<b>n.b10</b>	20011207	180155	324928	784	8.6	7.70	3.00
<b>n.b12</b>	20011207	179556	323741	724	6.6	7.91	1.50
<b>n.b16</b>	20011206	181891	322517	973	9.9	7.87	11.00
<b>n.b18</b>	20011206	183023	320983	688	9.1	7.90	3.00
<b>n.b20</b>	20011207	185157	320970	792	5.7	8.35	12.00
<b>n.b21</b>	20011206	186526	321006	948	6.9	8.16	5.00
<b>n.b80</b>	20011206	189922	325685	899	9.2	7.94	50.00
<b>n.b86</b>	20011206	187646	324487	915	10.0	7.33	22.00
<b>z.b10</b>	20011218	183209	308346				
<b>z.b20</b>	20011206	191633	307501	629	9.8	7.24	17.00
<b>z.b21</b>	20011206	192387	310736	574	9.3	7.91	11.00

**BIJLAGE 4 ANALYSERESULTATEN VAN RIVM-LAC***Tabel B4a Resultaten van de analyses van de hoofdcomponenten (in mg/l)*

<b>bron</b>	<b>Ca</b>	<b>K</b>	<b>Mg</b>	<b>Na</b>	<b>Cl</b>	<b>HCO<sub>3</sub></b>	<b>NO<sub>3</sub></b>	<b>SO<sub>4</sub></b>
<b>n.002</b>	163	6.3	32	22	30	364	142	82
<b>n.005</b>	179	1.1	31	14	50	405	116	90
<b>n.015</b>	175	2.1	35	15	34	402	104	91
<b>n.022</b>	117	0.6	32	9	34	198	81	71
<b>n.086</b>	164	3.8	40	17	41	358	93	86
<b>n.099</b>	163	2	40	18	37	380	101	77
<b>z.007</b>	139	1.3	39	6	18	296	61	53
<b>z.024</b>	126	1.3	28	4	12	294	26	45
<b>z.033</b>	146	1.6	28	6	15	312	78	41

*Tabel B4b Resultaten van de analyses van de spoorelementen (in µg/l)*

<b>bron</b>	<b>Al</b>	<b>Ba</b>	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>	<b>Zn</b>
<b>n.002</b>	27	44	56	2.8	0
<b>n.005</b>	189	41	319	5.5	6.4
<b>n.015</b>	27	40	6	0.0	0
<b>n.022</b>	81	35	73	4.4	6.4
<b>n.086</b>	27	58	11	0.6	0
<b>n.099</b>	27	40	22	1.1	0
<b>z.007</b>	27	43	22	6.1	6.4
<b>z.024</b>	0	276	17	0.6	6.4
<b>z.033</b>	189	113	342	16.0	0

**BIJLAGE 5 TRITIUMMETINGEN DOOR CIO***Tabel B5 De gemeten concentraties van tritium in de bronnen (in Tritium Units)*

<b>bron</b>	<b>Datum monster</b>	<b><sup>3</sup>H TU</b>	<b>bron</b>	<b>Datum monster</b>	<b><sup>3</sup>H TU</b>
<b>n.mb3</b>	20011107	15	<b>n.091</b>	20011107	16
<b>n.001</b>	20011207	14	<b>n.096a</b>	20011031	18
<b>n.002</b>	20011018	13	<b>n.099</b>	20011025	14
<b>n.003</b>	20011018	16	<b>n.100</b>	20011019	12
<b>n.004</b>	20011018	15	<b>n.104</b>	20011026	9
<b>n.005</b>	20011018	12	<b>z.001</b>	20011017	14
<b>n.006</b>	20011018	17	<b>z.002</b>	20011017	13
<b>n.007</b>	20011025	22	<b>z.003</b>	20011017	14
<b>n.008</b>	20011025	18	<b>z.004</b>	20011017	12
<b>n.009</b>	20011024	17	<b>z.005</b>	20011017	13
<b>n.010</b>	20011024	13	<b>z.006</b>	20011017	13
<b>n.011</b>	20011019	21	<b>z.007</b>	20011017	13
<b>n.012</b>	20011019	11	<b>z.008</b>	20011017	14
<b>n.015</b>	20011019	17	<b>z.021</b>	20011101	14
<b>n.016</b>	20011019	14	<b>z.022</b>	20011101	13
<b>n.017</b>	20011019	21	<b>z.023</b>	20011101	12
<b>n.018</b>	20011019	13	<b>z.024</b>	20011101	12
<b>n.020</b>	20011025	12	<b>z.025</b>	20011101	15
<b>n.021a</b>	20011025	9	<b>z.026</b>	20011101	12
<b>n.022</b>	20011031	14	<b>z.027</b>	20011101	13
<b>n.023</b>	20011031	10	<b>z.028</b>	20011101	13
<b>n.024</b>	20011029	16	<b>z.031</b>	20011102	13
<b>n.025</b>	20011107	22	<b>z.032</b>	20011102	14
<b>n.026</b>	20011029	14	<b>z.033</b>	20011102	16
<b>n.027</b>	20011107	19	<b>z.034</b>	20011102	11
<b>n.029</b>	20011107	20	<b>z.035</b>	20011102	10
<b>n.030</b>	20011107	10	<b>z.036</b>	20011102	17
<b>n.031</b>	20011107	15	<b>z.037</b>	20011108	9
<b>n.033</b>	20011029	12	<b>z.038</b>	20011206	10
<b>n.035</b>	20011025	15	<b>z.039</b>	20011206	10
<b>n.037a</b>	20011026	9	<b>z.040</b>	20011206	8
<b>n.037b</b>	20011026	10			
<b>n.037s</b>	20011206	11			
<b>n.040</b>	20011029	13	<b>beken</b>		
<b>n.041</b>	20011019	9	<b>n.b05</b>	20011206	16
<b>n.042</b>	20011025	17	<b>n.b10</b>	20011207	23
<b>n.043</b>	20011025	18	<b>n.b12</b>	20011207	14
<b>n.043b</b>	20011025	25	<b>n.b16</b>	20011206	12
<b>n.044</b>	20011025	19	<b>n.b18</b>	20011206	18
<b>n.049</b>	20011025	12	<b>n.b20</b>	20011207	13
<b>n.050</b>	20011107	9	<b>n.b21</b>	20011206	13
<b>n.076</b>	20011025	10	<b>n.b80</b>	20011206	16
<b>n.077</b>	20011025	10	<b>n.b86</b>	20011206	19
<b>n.080</b>	20011031	16			
<b>n.084</b>	20011031	19	<b>z.b10</b>	20011218	12
<b>n.085</b>	20011031	22	<b>z.b20</b>	20011206	12
<b>n.086</b>	20011105	20	<b>z.b21</b>	20011206	11
<b>n.087</b>	20011026	23			



**BIJLAGE 6 RESULTATEN MET DE HYDRION-10 DOOR DE WUR***Tabel B6a Resultaten van de analyses van de hoofdcomponenten (in mg/l)*

<b>bron</b>	<b>Ca corr.</b>	<b>K</b>	<b>Mg corr.</b>	<b>Na</b>	<b>NH<sub>4</sub></b>	<b>Cl</b>	<b>HCO<sub>3</sub> corr.</b>	<b>NO<sub>3</sub></b>	<b>SO<sub>4</sub> corr.</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>
<b>n.mb3</b>	180	2.7	15	18	0.07	39	232	92	222	8
<b>n.001</b>	180	5.1	14	21	0.12	34	273	82	213	8
<b>n.002</b>	162	6.3	15	22	1.26	33	321	128	106	57
<b>n.003</b>	186	0.6	17	17	1.71	39	353	151	102	54
<b>n.004</b>	157	0.8	16	13	1.59	41	270	113	116	34
<b>n.005</b>	158	1.2	24	18	1.58	75	331	205	133	6
<b>n.006</b>	152	1.8	25	17	1.35	47	348	96	92	5
<b>n.007</b>	185	0.6	20	15	1.52	75	375	79	99	22
<b>n.008</b>	137	3.6	15	19	1.19	56	250	100	82	26
<b>n.009</b>	144	1.3	13	12	1.32	33	314	86	70	17
<b>n.010</b>	124	1.1	13	14	1.28	32	254	86	70	25
<b>n.011</b>	71	9.5	15	29	0.63	62	43	86	120	36
<b>n.012</b>	79	4.5	13	35	1.06	62	115	38	120	8
<b>n.015</b>	180	2.5	15	16	1.48	36	418	104	69	33
<b>n.016</b>	146	1.1	13	14	1.26	35	249	150	73	4
<b>n.017</b>	167	1.7	11	10	1.27	41	321	92	88	49
<b>n.018</b>	77	2.9	6	9	0.86	27	140	45	50	24
<b>n.020</b>	209	4.3	13	25	1.22	64	310	247	90	77
<b>n.021a</b>	155	1.1	14	22	1.31	33	352	140	44	69
<b>n.022</b>	121	0.8	7	10	1.20	38	233	84	44	63
<b>n.023</b>	143	1.6	12	9	1.21	40	312	74	54	30
<b>n.024</b>	150	3.1	31	10	1.12	39	518	55	58	18
<b>n.025</b>	159	1.6	8	13	0.06	28	224	93	157	9
<b>n.026</b>	163	7.1	18	22	1.19	29	360	144	87	74
<b>n.027</b>	201	1.7	3	21	0.07	90	337	43	118	15
<b>n.029</b>	186	1.1	8	15	0.05	37	338	91	125	7
<b>n.030</b>	59	17.3	5	10	0.14	13	123	36	50	5
<b>n.031</b>	185	1.3	9	14	0.06	44	302	58	166	7
<b>n.033</b>	167	0.9	11	14	1.59	40	333	112	74	67
<b>n.034</b>	155	1.6	21	10	1.51	31	347	106	84	34
<b>n.035</b>	169	4.7	13	19	1.35	34	392	129	48	151
<b>n.037a</b>	145	25.2	15	28	<ag	33	381	128	54	75
<b>n.037b</b>	146	1.3	10	7	0.07	24	268	46	127	29
<b>n.037s</b>	140	0.7	22	9	1.51	46	324	79	71	41
<b>n.040</b>	112	0.9	21	9	1.38	26	298	66	58	36
<b>n.041</b>	151	0.4	39	15	1.55	40	458	89	66	14
<b>n.042</b>	140	1.7	29	10	1.29	31	350	103	79	5
<b>n.043</b>	163	0.9	22	8	1.39	30	326	125	105	19
<b>n.043b</b>	188	0.8	18	10	1.65	28	361	154	108	29
<b>n.044</b>	206	2.4	16	28	1.63	66	278	244	124	66
<b>n.049</b>	152	1.6	2	8	0.05	20	291	37	104	5
<b>n.050</b>	125	0.8	13	13	1.43	20	278	95	63	54
<b>n.076</b>	132	0.9	13	14	1.37	38	188	95	128	2
<b>n.077</b>	182	11.0	16	42	0.96	83	450	40	107	45
<b>n.080</b>	158	10.2	12	22	0.88	44	306	100	111	79
<b>n.084</b>	162	1.2	11	13	1.46	39	332	79	87	57
<b>n.085</b>	164	3.5	12	16	1.35	42	361	87	76	52
<b>n.086</b>	162	9.5	13	17	0.95	40	355	92	83	59
<b>n.087</b>	219	2.7	15	18	0.07	45	272	161	229	6

Tabel B6b Resultaten van de analyses van de hoofdcomponenten (in mg/l)

bron	Ca corr.	K	Mg corr.	Na	NH <sub>4</sub>	Cl	HCO <sub>3</sub> corr.	NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub> corr.	CO <sub>2</sub>
<b>n.096a</b>	138	0.6	18	22	1.47	56	409	28	33	18
<b>n.099</b>	173	1.5	11	18	1.43	37	393	101	64	62
<b>n.100</b>	186	0.2	18	15	1.54	37	413	136	71	31
<b>n.104</b>	130	0.7	4	12	1.36	15	233	147	36	55
<b>z.001</b>	156	1.1	13	7	1.38	19	349	85	52	26
<b>z.002</b>	156	1.4	15	7	1.36	20	365	72	55	34
<b>z.003</b>	149	2.0	15	7	1.31	20	486	60	27	8
<b>z.004</b>	144	1.7	1	5	1.29	16	382	50	42	28
<b>z.005</b>	154	1.1	3	7	1.37	20	382	79	48	25
<b>z.006</b>	139	1.3	13	6	1.31	21	414	77	27	6
<b>z.007</b>	140	1.6	4	6	1.30	20	353	63	18	9
<b>z.008</b>	144	1.4	9	7	1.32	21	233	68	133	17
<b>z.021</b>	132	1.1	4	5	1.30	11	314	23	68	7
<b>z.022</b>	134	1.1	7	5	1.31	11	274	23	117	11
<b>z.023</b>	122	1.0	6	4	1.26	12	226	35	110	24
<b>z.024</b>	124	1.3	6	4	1.28	14	252	27	96	26
<b>z.025</b>	111	1.7	4	6	1.23	16	205	65	65	39
<b>z.026</b>	134	3.5	9	9	1.17	18	267	54	106	36
<b>z.027</b>	127	1.3	7	5	1.29	15	249	42	101	17
<b>z.028</b>	128	1.1	6	5	1.30	15	271	42	78	20
<b>z.031</b>	128	1.0	5	5	1.30	16	271	55	66	18
<b>z.032</b>	131	1.0	2	5	1.35	16	286	49	50	18
<b>z.033</b>	145	1.5	2	6	1.35	17	307	77	50	11
<b>z.034</b>	114	1.3	1	6	1.28	17	266	31	37	12
<b>z.035</b>	115	1.2	2	6	1.28	17	252	41	45	18
<b>z.036</b>	150	1.4	6	6	1.37	17	299	63	94	26
<b>z.037</b>	166	1.3	1	7	0.05	21	239	42	172	9
<b>z.038</b>	139	2.1	3	8	0.09	21	281	56	72	20
<b>z.039</b>	144	1.4	3	6	0.08	22	290	41	82	27
<b>z.040</b>	137	1.4	2	6	0.07	20	302	33	59	27
<b>beken</b>										
<b>n.b05</b>	151	1.1	39	14	0.09	41	449	100	60	62
<b>n.b10</b>	115	1.6	15	13	0.09	49	179	75	100	31
<b>n.b12</b>	88	4.4	14	26	0.12	72	161	30	80	55
<b>n.b16</b>	149	4.2	20	17	0.13	43	348	79	83	26
<b>n.b18</b>	115	2.2	13	11	0.10	25	297	74	27	9
<b>n.b20</b>	129	2.4	8	15	0.13	35	250	95	57	17
<b>n.b21</b>	149	7.5	8	25	0.15	55	329	74	57	7
<b>n.b80</b>	150	4.6	10	15	0.14	41	322	64	75	11
<b>n.b86</b>	158	3.7	10	12	0.11	36	286	97	102	24
<b>z.b20</b>	133	1.7	13	5	0.08	11	320	30	69	12
<b>z.b21</b>	114	1.5	14	5	0.07	13	408	36	13	6