

Geologische Dienst NederlandPrincetonlaan 6
3584 CB Utrecht
Postbus 80015
3508 TA Utrechtwww.tno.nl

T +31 88 866 42 56

TNO-rapport**TNO 2023 R10270****Synthese van de resultaten van het GeoERA
RESOURCE project CHAKA: karakterisatie
van Karst en Chalk in het pilotgebied Zuid-
Limburg**

Datum	1 februari 2023
Auteur(s)	H.P. Broers M.E. van Vliet R.W. Vernes T.E. Kivits
Aantal pagina's	118
Aantal bijlagen	-
Opdrachtgevers	EU HORIZON 2020, met cofinanciering door Provincie Noord-Brabant Provincie Limburg Brabant Water Waterleiding Maatschappij Limburg
Projectnaam	RESOURCE CHAKA NL Synthese
Projectnummer	060.30740/01.07

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2023 TNO

Inhoudsopgave

	Opzet van de rapportage	4
	Samenvatting van deel 1	5
	DEEL 1 SYNTHESE VAN DE NEDERLANDSE RESULTATEN	15
1	Inleiding	16
2	Geologische setting van de bronnen in Zuid-Limburg	18
2.1	Introductie op de regionale geologische setting	18
2.2	Positie van de bronnen in relatie tot de geologische structuren.....	24
3	Dateringsonderzoek in 14 bronnen	33
3.1	Inleiding	33
3.2	Methodiek dual porosity modelling	35
3.3	Reistijdverdelingen van de 14 bronnen	37
3.4	Hydrogeologische positie en reistijdenverdeling	38
3.5	Nitraatconcentraties en de reistijdenverdeling	40
3.6	Aanwijzingen voor denitrificatie in de Formatie van Vaals en stijgend sulfaat	42
3.7	Haalbaarheidsstudie radon.....	45
3.8	Reistijdenverdeling en nitraat bij ps. Roodborn	47
4	De St. Brigidabron als Nederlandse pilot.....	50
4.1	Inleiding	50
4.2	Resultaten van de St. Brigidabron in de internationale vergelijking	50
4.3	Samenvatting eerder onderzoek naar de St. Brigidabron in Nederland.....	52
4.4	Extrapolatie van het debiet van de St. Brigidabron over de periode 1990-2021	60
4.5	Nitraat in relatie tot het debiet van de bron	62
4.6	De relatie tussen reistijdverdeling en nitraat voor de St. Brigidabron	64
5	Resultaten veldonderzoek opkomende stoffen.....	66
5.1	Veldonderzoek 2021	66
5.2	Eerdere onderzoeken in bronnen	70
5.3	Inventarisatie stoffen uit de Brede Screening.....	72
5.4	Introductie op de presentatie van de data in de factsheet	74
6	Introductie op de factsheets.....	75
7	Conclusies en aanbevelingen	76
7.1	Conclusies	76
7.2	Aanbevelingen & suggesties	78
8	Referenties	86
9	Ondertekening	89

	DEEL 2 RELEVANT PARTS FROM THE GEOERA RESOURCE CHAKA DELIVERABLES	90
1	Detailed conceptual hydrogeological models for pilot areas and case studies: Mergelland, the Netherlands (D5.2)	91
1.1	Overview	91
1.2	Geology	92
1.3	Geomorphology	93
1.4	Climate	94
1.5	Hydrogeology	94
1.6	Hydrodynamic characteristics of the springs (and river)	95
1.7	Data available for the project	95
1.8	Summary	97
1.9	References	98
1.10	Appendix 1: Short presentation of the case study	99
2	Karst aquifer typology tool (D5.3).....	100
2.1	Results of the karst system classification using the Mangin (1975) method.....	100
2.2	Method 1: Classification of karst aquifer intrinsic vulnerability to pollution: Application to CHAKA case study springs.....	101
2.3	Method 2: Mixed classification using the method 1 plus a discharge time series: Application to the CHAKA dataset	103
2.4	Method 3: (V-RC classification): quantitative classification based on monitoring data - discharge and other time series: Application to case studies: results.....	114
2.5	References	117
3	Groundwater management recommendations for karst and chalk aquifers: Summary (D5.4)	118

Opzet van de rapportage

Dit rapport beschrijft de synthese van de resultaten van het GeoERA RESOURCE deelproject *CHAKA: karakterisatie van Karst en Chalk in het pilotgebied Zuid-Limburg*.

Deel 1 van het rapport betreft een Nederlandstalige synthese van het werk dat is uitgevoerd in het Nederlandse pilotgebied. De nadruk ligt op de hydrogeologie van het Krijt en boven- en ondergelegen formaties in relatie tot de grondwaterstroming en de bronnen in het Limburgse Mergelland. In het rapport staan de 14 bronnen uit het provinciale meetnet centraal en wordt voor elk van die bronnen een reistijdverdeling afgeleid en wordt de ontwikkeling van de nitraatconcentraties besproken in relatie tot die reistijdverdeling en de hydrogeologische situatie.

Naast dit rapport zijn voor 14 bronnen *factsheets* vervaardigd die voor elk van de bronnen een overzicht geven van de topografische positie, de hydrogeologische opbouw, de reistijdenverdeling van het grondwater, de concentraties van nitraat in de tijd en het voorkomen van microverontreinigingen, zoals de metabolieten van bestrijdingsmiddelen.

Deel 2 van het rapport omvat alle Engelstalige rapportages die in het project CHAKA zijn gemaakt, voor zover van belang voor de situatie in het Nederlandse pilotgebied. De Nederlandse pilotstudie wordt daarin vergeleken met ander pilotgebieden in Europese Karst- en Chalk-gebieden.

Samenvatting van deel 1

Dit Nederlandstalige syntheserapport beschrijft de synthese van de resultaten van het GeoERA RESOURCE project *CHAKA: karakterisatie van Karst en Chalk in het pilotgebied Zuid-Limburg*. Het Europese project richtte zich op aquifers die bestaan uit kalksteen waarin door oplossingsprocessen karstverschijnselen zijn ontstaan die leiden tot een secundaire permeabiliteit die belangrijk is voor het transport van grondwater en daarin opgeloste stoffen. Onder de verzamelterm *Chalk* wordt een speciaal type kalksteen aangeduid, die in het algemeen zachter is ontwikkeld en een hogere porositeit heeft (Hancock, 1975). Chalk is prominent in Zuid-Limburg, maar vormt ook de beroemde kliffen bij Dover en Calais. In dit rapport wordt het werk dat is uitgevoerd in het Nederlandse pilotgebied beschreven. De nadruk ligt op de hydrogeologie van het Krijt en boven- en ondergelegen formaties in relatie tot de grondwaterstroming en de bronnen in het Limburgse Mergelland. In het rapport staan de 14 bronnen uit het provinciale meetnet centraal en wordt voor elk van die bronnen een reistijdverdeling afgeleid en wordt de ontwikkeling van de nitraatconcentraties besproken in relatie tot die reistijdverdeling en de hydrogeologische situatie.

Het project beoogde een hydrogeologische karakterisatie te maken van het Krijt en boven- en ondergelegen formaties, voor zover die van belang zijn voor de stroming van zoet grondwater naar bronnen en waterwinplaatsen. Het project had de volgende concrete doelstellingen:

- 1 Vergelijken van het Nederlandse Chalk-systeem met de Karst- en Chalk-systemen van de andere partners in CHAKA;
- 2 Beschrijven van de positie van 14 bronnen in het regionale hydrogeologische systeem van Zuid-Limburg;
- 3 Ontwikkelen van een manier om de reistijdverdelingen van de 14 bronnen te bepalen op een manier waarop het duale permeabiliteitsysteem in de Chalk goed wordt verdisconteerd;
- 4 Via de afgeleide reistijdverdelingen meer grip krijgen op de ontwikkeling van nitraat- en sulfaat trends in de 14 bronnen en daarmee prognoses te maken van de toekomstige ontwikkeling in die bronnen;
- 5 Het maken van een eerste inventarisatie van diergeneesmiddelen in het water dat uittreedt in de bronsystemen;
- 6 Reconstrueren van de debietreeks van de St. Brigidabron aan de hand van eerder aangetoonde relaties tussen brondebiet en grondwaterstijghoogte op het kalkplateau.

Om deze doelstellingen te bereiken, bundelen we bestaande kennis, voegen we die samen met kennis uit de andere CHAKA-pilotgebieden en combineren we verschillende soorten hydrologische, hydrochemische en geologische informatie.

Vergelijking van het Nederlandse Chalk-systeem met de Karst- en Chalk-systemen van de andere partners in CHAKA

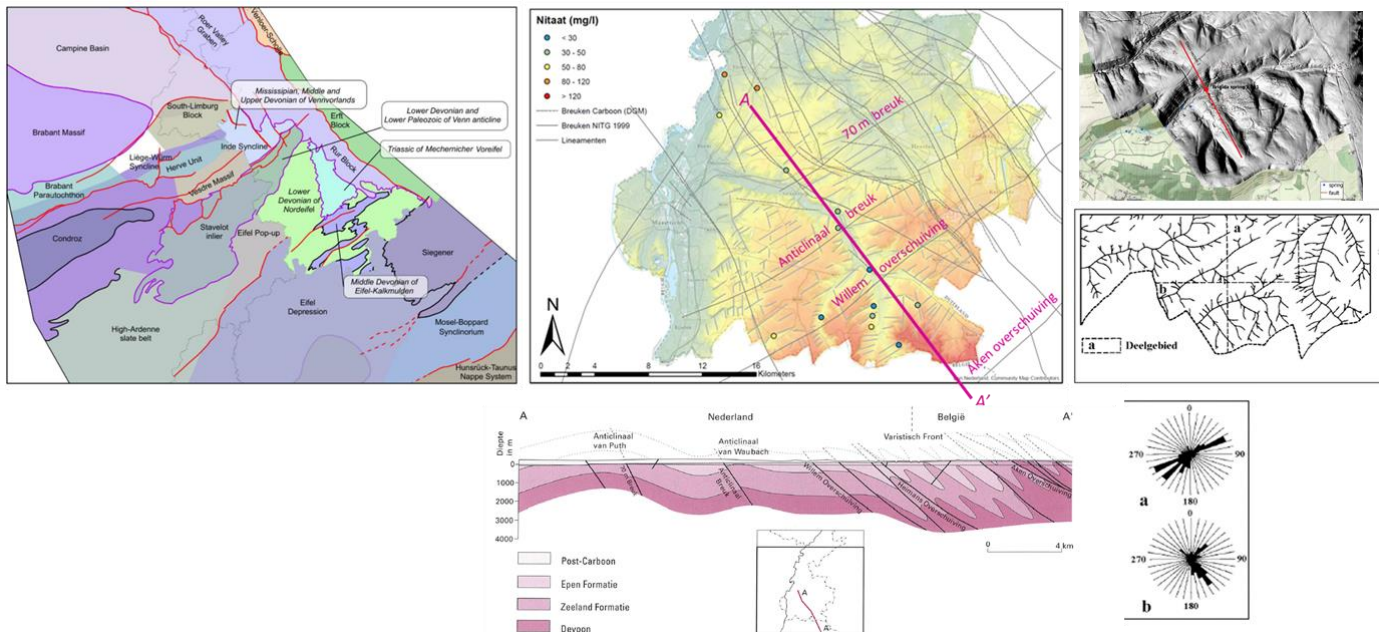
De St. Brigidabron vormde één van de 15 pilots in het project CHAKA. De bron, die als Nederlandse pilot gekozen werd vanwege de relatief grote hoeveelheid informatie en metingen, blijkt een heel ander hydrologisch en hydrochemisch regime te vertonen dan de andere 14 pilots. Het debiet van de bron reageert veel trager op neerslag dan het debiet van de andere bronnen en de debietsvariëaties zijn om die reden gedempt (Figuur S.1). Ook de ontwikkeling van de nitraatconcentraties blijkt meer gedempt te zijn dan bij de onderzochte buitenlandse bronnen. De St. Brigidabron werd daarom binnen het EU-project als de minst kwetsbare bron beschouwd, omdat ze niet binnen een tijdstermijn van dagen tot maximaal weken reageert op mogelijke verontreinigingsgebeurtenissen. Dat de St. Brigidabron en de andere Nederlandse bronnen op een langere tijdstermijn wel degelijk kwetsbaar zijn voor een scala aan diffuse verontreinigingen blijkt uit de rest van de rapportage.



Figuur S1: De St. Brigidabron als één van de pilots in het project CHAKA. Ten opzichte van een andere pilot in een typisch Chalk-gebied (de Cardener spring in het VK) vertoont het debiet van de St. Brigida een veel tragere reactie (rechter diagrammen).

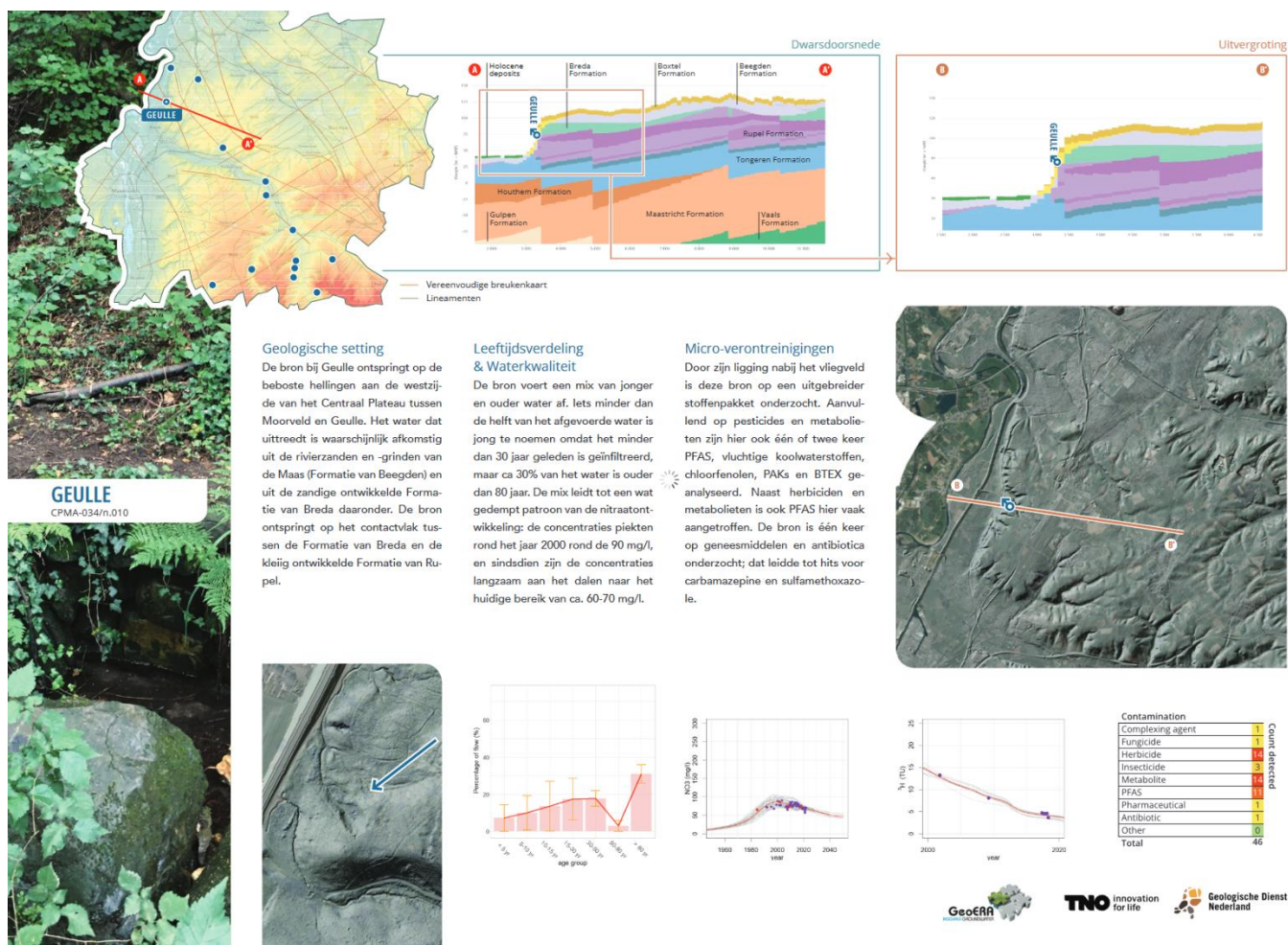
Positie van 14 bronnen in het regionale hydrogeologische systeem

De positie van de bronnen in het landschap van Mergelland is gerelateerd aan de hydrogeologische opbouw en de onderliggende, oude tektonische structuur. De oude tektonische structuur is herkenbaar aan de NW-ZO en ZW-NO oriëntaties van beekdalen en droogdalen (zie Figuur S2). De positie van de bronnen wordt daarbij bepaald door de hellingrichtingen van laagvlakken in het gesteente en zwaktezones die door de tektonische processen zijn ontstaan en daarmee de lokale permeabiliteit hebben vergroot door splijting van het gesteente en oplossing van kalk naderhand. De bronnen bevinden zich vaak halverwege de droogdalen of op plaatsen waar een duidelijke hellingknik optreedt in het landschap of een breuk of zwaktezones dagzoomt.



Figuur S2: In het Mergelland zijn de relictten van de oude tektonische opbouw van het gebied in het landschap herkenbaar via de richtingen van droge dalen: de richtingen ZW-NO en NW-ZO oriëntatie zijn zowel op grotere schaal waarneembaar (midden) als op kleinere schaal in de deelgebieden zoals de omgeving van de Noorbeek (rechter afbeeldingen). De ZW-NO oriëntatie hangt samen met compressie en overschuivingen in de Varistische fase (Laat-Carboon en Perm). De NW-ZO oriëntatie komt overeen met die van de latere rekzone van de Roerdalslenk. Beide richtingen kruisen in het gebied van het Mergelland (linker figuur).

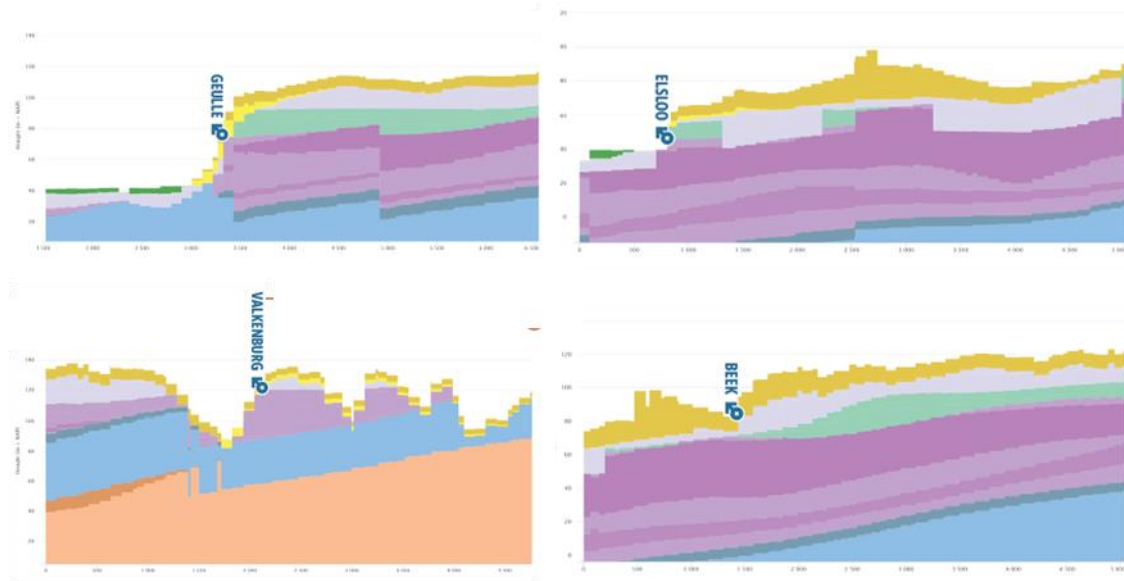
De hydrogeologische setting en topografische positie van elk van de 14 onderzochte bronnen is weergegeven in factsheets (zie Figuur S3). De getoonde dwarsdoorsnedes zijn ook zelf te creëren in de webapplicatie “Grondwaterkwaliteit in Beeld” die is te vinden op de Grondwatertoolswebpagina (<https://www.grondwatertools.nl/gw atlas/>).



Figuur S3: Voorbeeld van een factsheet van één van de 14 bronnen waarin de topografische positie en de hydrogeologische setting zijn weergegeven, samen met de afgeleide reistijdverdeling en de nitraat- en tritiumreconstructie. Bij elk van de factsheets is daarbij een beknopte beschrijving gegeven van de aangetroffen organische microverontreinigingen

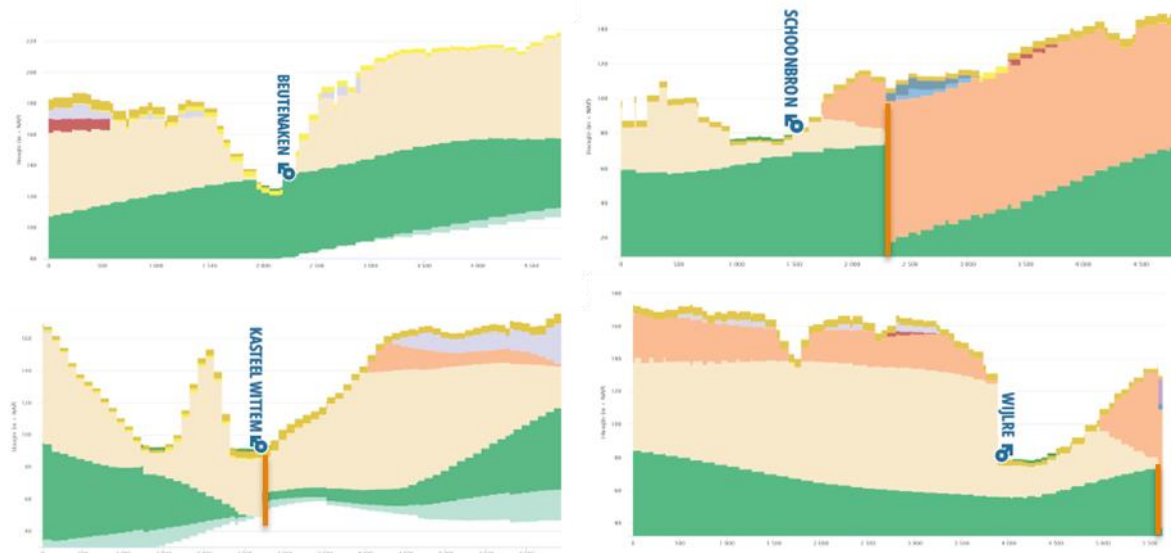
De 14 bronnen zijn grofweg in drie groepen in te delen op basis van de hydrogeologische setting.

De eerste groep omvat de bronnen op en rond het Centraal Plateau. De bronnen hebben gemeen dat ze ontspringen uit Pleistocene en Tertiaire lagen (zie Figuur S4), zoals de rivierafzettingen van de Maas (Formatie van Beegden, licht-violet), de mariene zanden uit de Formatie van Breda (groen) en/of zandige lagen in de daaronder gelegen Rupel Formatie (paars). De kalksteenpakketten liggen op het Centraal Plateau relatief diep en worden door de bronnen niet aangetapt. Uit de reistijdverdelingen (zie verder) blijkt dat deze bronnen gekenmerkt worden door relatief jong water van de laatste 30 jaar en daardoor hoge nitraatconcentraties vertonen en ook kwetsbaar zijn voor pesticiden en opkomende stoffen.



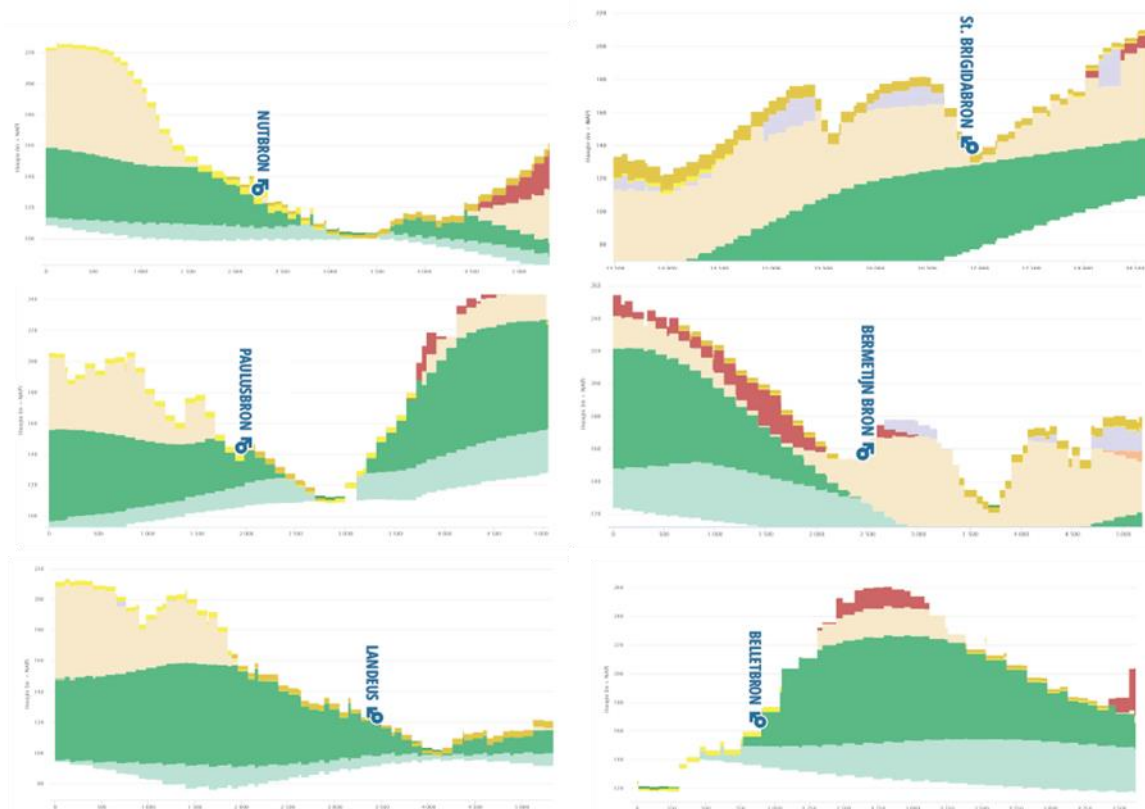
Figuur S4: Hydrogeologische setting van de 4 onderzochte bronnen op en rond het Centraal Plateau. Loess = okergeel, F. van Beegden is licht violet, F. van Breda is groen, Rupel F. is paars. Bron: www.grondwaterkwaliteitinbeeld.nl.

De tweede groep bronnen ligt in de grote beekdalen in het Mergelland en ontspringt vanuit de kalksteenformaties. Deze bronnen bevinden zich dicht bij het laagste topografische punt in hun gebied, in het diep ingesneden beekdal van de Geul of de Gulp. Meestal ontspringen de bronnen op een hellingknik of zoals in het geval van de bron bij Kasteel Wittem ter hoogte van een dagzomende breuk in de onderliggende kalksteen. Gemiddeld hebben deze bronnen duidelijk lagere nitraatconcentraties en minder organische microverontreinigingen, wat wordt verklaard door een relatief grote bijdrage van water dat ouder is dan 80 jaar (zie verderop).



Figuur S5: Hydrogeologische setting van de 4 onderzochte bronnen in de dalen van de Gulp en de Geul. Loess = okergeel, F. van Maastricht is roze-bruin, F. van Gulpen is beige, F. van Vaals is groen. De positie van een aantal breuken die volgens REGIS II v2.2 een duidelijk verzet te zien gegeven is geaccentueerd met een verticaal oranjebruin lijnelement. Bron: grondwaterkwaliteitinbeeld.nl.

De derde groep bronnen bevindt zich in de uitlopers van de droge dalen van de zuidelijke kalksteenplateaus (Figuur S6). Ze ontspringen vaak halverwege de droge beekdalen in ZW-NO gerichte zwaktezones. De bronnen lijken een duidelijk karakter van duale permeabiliteit te kennen met een relatief snelle (5-30 jaar) en een relatief langzame component (>80 jaar, zie verder). Qua nitraatconcentraties nemen ze een tussenpositie in: duidelijk lagere concentraties dan op het Centraal Plateau, maar wel een dalend verloop door de bijdrage van de jongere component (zie verderop). Veel van de bronnen lijken niet alleen door de kalksteenformaties te worden gevoed, maar ook vanuit de dieper gelegen Formatie van Vaals.



Figuur S6: Hydrogeologische setting van de 6 onderzochte bronnen in de droge dalen van de zuidelijke kalksteenplateaus. Loess = okergeel, F. van Beegden = licht violet, F. van Gulpen is beige, F. van Vaals is groen, F. van Heyenrath is roodbruin. Bron: www.grondwaterkwaliteitinbeeld.nl.

Reistijdverdelingen 14 bronnen op basis van secundaire permeabiliteit/porositeit

De reistijdverdeling van de 14 bronnen is in dit onderzoek afgeleid met een nieuwe methode die de mogelijkheid van een bimodale verdeling van de reistijden toelaat. Voor de 14 bronnen was eerder een reistijdverdeling afgeleid op basis van een gecombineerd exponentieel en piston flow model (Broers & van Vliet, 2018, Van Vliet & Broers 2019) dat met name voor de laatstgenoemde 6 bronnen niet goed leek te voldoen. De nieuwe methode gaat uit van een zogenaamde “free-shape” ofwel verdelingsvrije methode, waarmee in eerdere onderzoeken goede ervaringen waren opgedaan (zie bijv. Broers et al., 2021, Visser et al. 2013). Net als in de eerdere onderzoeken naar de reistijdverdeling is de methode gebaseerd op de aanwezigheid van een beperkte tijdreeks van tritiumconcentraties over de laatste 20 jaar, met metingen in 2001, 2008/2009 en 2017/2018. Via een convolutie op tritium en nitraatmetingen in de bronnen werd de meest waarschijnlijke reistijdverdeling afgeleid op basis van de reistijdklassen 0-5, 5-10, 10-15, 15-30, 30-50, 50-80 en > 80 jaar.

Figuur S7 geeft drie voorbeelden van de afgeleide reistijdverdelingen in de vorm van histogrammen en de daarmee afgeleide reconstructie van de ontwikkeling van de nitraatconcentraties voor elk van de drie hierboven genoemde groepen van bronnen.



Figuur S7: Histogram van de afgeleide reistijdverdeling (links) en ontwikkeling en reconstructie nitraatontwikkeling in 3 bronnen die representatief zijn voor de 3 genoemde groepen. Boven: bron Elsloo (Centraal Plateau), midden: bron Wijlre (bronnen in grote beekdalen) en beneden: St. Brigidabron (bronnen zuidelijke kalksteenplateaus).

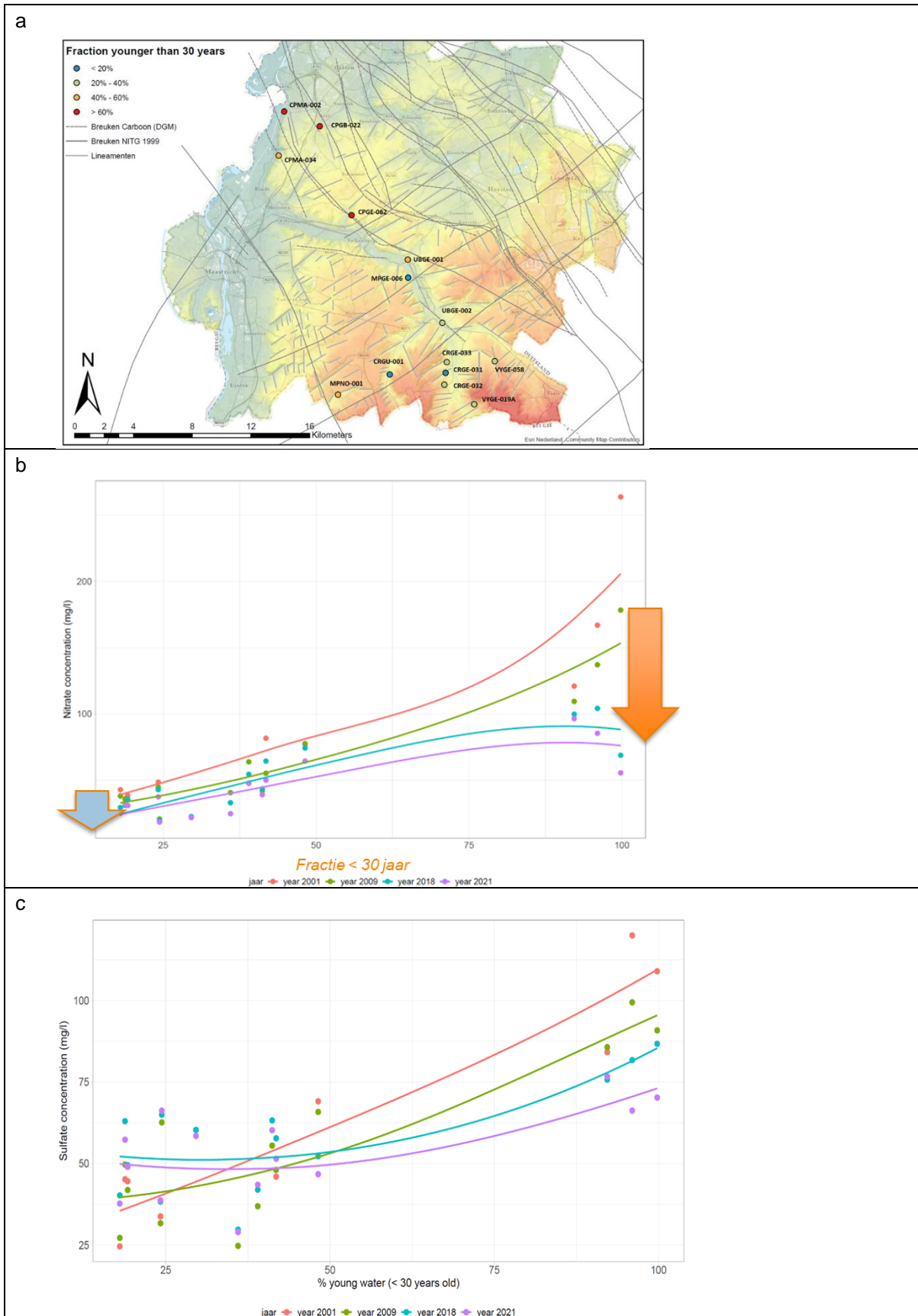
Figuur S7 illustreert de grote verschillen tussen deze bronnen:

- relatief jong water in de bronnen op het Centraal Plateau wat zich uit in hoge nitraatconcentraties ten gevolge van de piek in mestbelasting rond 1995 en een snelle daling nadien, met concentraties die zich ook nu nog ruim boven de 50 mg/l bevinden;
- relatief oud water in de bronnen in de grote beekdalen, met duidelijke lagere concentraties nitraat door de bijmenging van ouder nitraatloos water met een stabilisatie van de nitraatconcentraties sinds ca. 2010;
- een bimodaal karakter van de reistijdverdeling bij de bronnen op de zuidelijke plateaus, met nitraatconcentraties die rond 2000 op een lager niveau piekten dan op het Centraal Plateau, maar met een duidelijke, maar langzamer afname van de nitraatconcentraties sinds die tijd.

Begrijpen van nitraat- en sulfaat trends in 14 bronnen inclusief prognose

In Figuur S8 is het verband tussen de reistijdverdeling en de ontwikkeling van de nitraatconcentraties voor alle 14 onderzochte bronnen verder geïllustreerd aan de hand van de fractie water die jonger is dan 30 jaar. Bronnen met een hoge fractie jong water liggen dus met name op het Centraal Plateau (Figuur S8a) en bronnen met een kleine fractie jong water met name in de grote beekdalen. De ontwikkeling van de nitraatconcentraties is in Figuur S8b geschetst door de fractie jong water op de X-as uit te zetten en de gemiddelde nitraatconcentraties in 2001, 2009, 2018 en 2021 in verschillende kleuren op de Y-as. Uit de figuur blijkt dat de nitraatconcentraties in bronnen met een grote fractie jong water hoog zijn, maar ook relatief snel dalen tussen 2001 en 2021. In bronnen met een kleine fractie jong water zijn de concentraties juist laag, maar dalen ze ook veel minder snel. Dit patroon komt overeen met de nitraatontwikkeling zoals die is geschetst aan de hand van de drie voorbeelden uit Figuur S7.

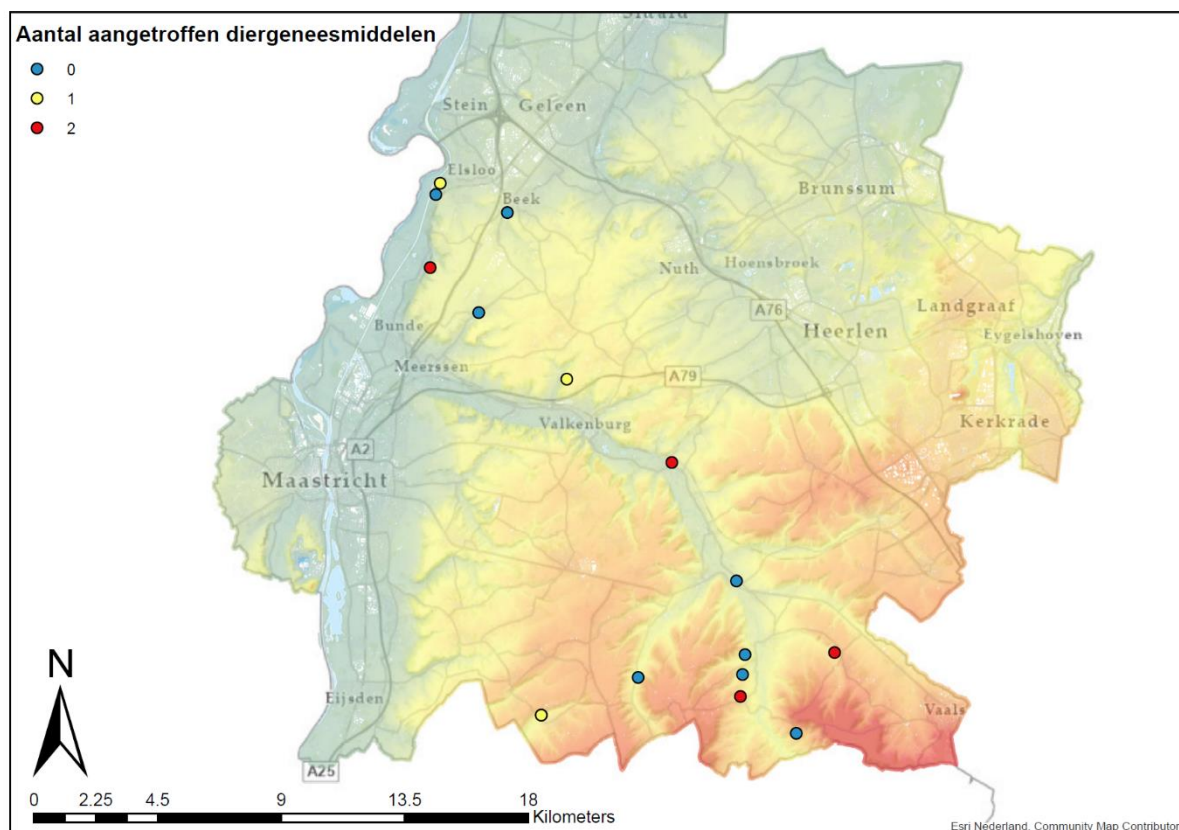
In Figuur S8c is de ontwikkeling van de sulfaatconcentraties in beeld gebracht in relatie tot de fractie jong water. In de bronnen met een grote fractie jong water volgt de afname van de sulfaatconcentraties tussen 2001 en 2021 de afname van de nitraatconcentraties. Dat is logisch, omdat in water dat uitspoelt onder landbouwgebieden niet alleen nitraat verhoogd is, maar ook sulfaat. Bovendien zijn in de laatste 30 jaar ook de sulfaatconcentraties in de atmosfeer en het regenwater verder afgenomen. In bronnen met een kleine fractie jong water is echter iets bijzonders aan de hand, daar beginnen de sulfaatconcentraties op te lopen, met name sinds 2010. Dit langzaam oplopen van de sulfaatconcentraties relateren wij aan het voor het eerst bereiken van geologische formaties met daarin pyriet, van via bemesting beïnvloed, nitraathoudend water. Het oplopen van de sulfaatconcentraties is dan waarschijnlijk vooral bepaald door het doorstromen van de Formatie van Vaals, waarvan de minder goed doorstroomde delen nog pyriet bevatten. Dit pyriet reageert met een deel van het langsstromende nitraat. De concentraties sulfaat zijn weliswaar nog relatief laag (30-50 mg/l), en de veranderingen zijn traag maar gestaag, maar mogelijk heeft deze toename op termijn ecologische consequenties voor de betrokken bronsystemen en beekdalen.



Figuur S8. Relaties tussen de fractie jong water in de bronnen (water van minder dan 30 jaar oud) en de concentraties nitraat en sulfaat in de bronnen in de jaren 2001, 2009, 2018 en 2021.

Inventarisatie van diergeneesmiddelen in het water van de bronnen

Uit eerder onderzoek (Kivits et al., 2018) is gebleken dat diergeneesmiddelen en antibiotica in het Nederlandse grondwater tot op grote diepte kunnen doordringen, en vooral onder omstandigheden waarin nog weinig omzetting van nitraat heeft plaatsgevonden. Dat is bij uitstek het geval in het Mergelland waarin in alle onderzochte bronnen nitraat aanwezig is. Mergelland lijkt daardoor kwetsbaar voor het uitspoelen van deze stoffen naar bronnen en het ontvangend oppervlaktewater. Vandaar dat we binnen GeoERA CHAKA tussen 2018 en 2021 een inventarisatie hebben uitgevoerd van het voorkomen van opkomende stoffen en met name diergeneesmiddelen. Figuur S9 geeft een overzicht van het aantal aangetroffen diergeneesmiddelen in het water van de in 2021 binnen GeoERA bemonsterde bronnen. In 7 van de 15 bemonsterde bronnen werden daadwerkelijk diergeneesmiddelen aangetroffen, waaronder de antibiotica sulfadiazine (in de St. Brigidabron, de Schoonbron en de bron bij Vijlen) en sulfamethoxazole (in de bron bij Geulle).



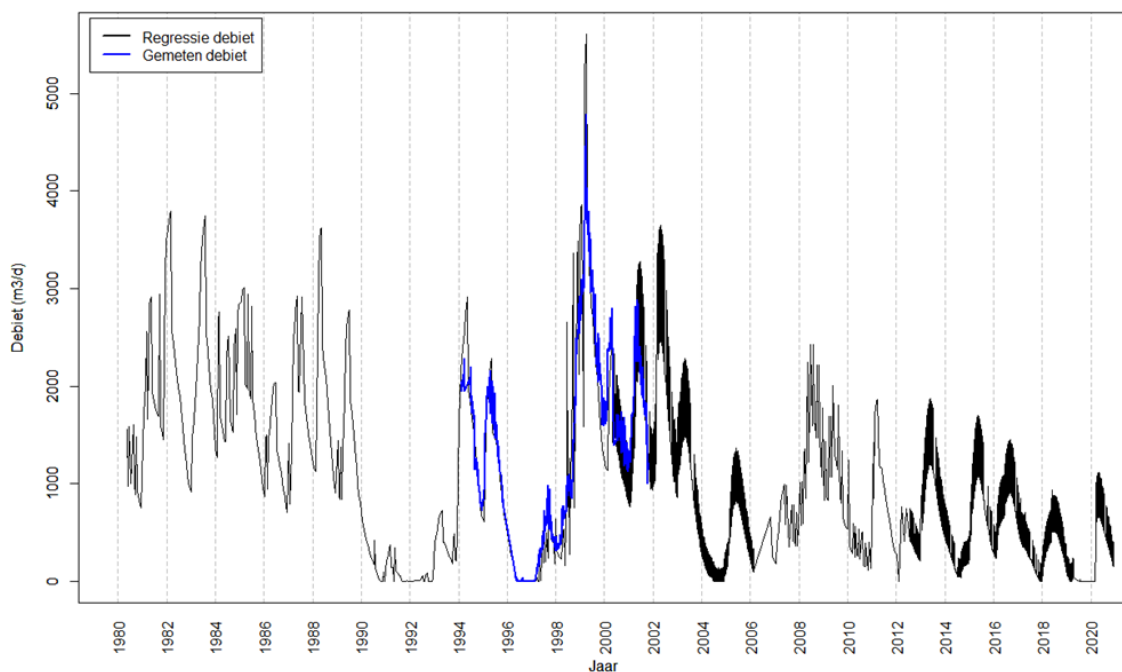
Figuur S9. Het aantal aangetroffen diergeneesmiddelen in de in 2021 bemonsterde bronnen.

In het rapport zijn ook eerdere meetrondes, zoals die van de brede screening, op zowel bestrijdingsmiddelen als opkomende stoffen nader geanalyseerd. Uit het onderzoek kan worden geconcludeerd dat de bronnen in Mergelland niet alleen kwetsbaar zijn voor nitraat, maar ook voor bestrijdingsmiddelen, diergeneesmiddelen en andere opkomende stoffen die uitspoelen naar het grondwater onder de plateaus. In 12 van de 14 in detail onderzochte bronnen werden één of meer van deze stoffen aangetroffen in de meetrondes van de Brede Screening en/of het GeoERA CHAKA onderzoek.

Reconstructie van de debietreeks van de St. Brigidabron

In de CHAKA-studie is de St. Brigidabron in meer detail beschouwd, omdat van deze bron de meeste waarnemingen beschikbaar zijn. Eén van de aspecten die daarbij is beschouwd is het verloop van het debiet van de bron over de tijd; lange-termijndebitgegevens ontbreken voor zover wij kunnen overzien voor alle andere bronnen in Mergelland.

Door onderzoek van de WUR is er voor de St. Brigidabron over de periode 1994 tot 2001 een debietreeks beschikbaar via een meetstuw die ca. 100 m stroomafwaarts van de bron was gesitueerd. In het WUR-onderzoek werd al geconcludeerd dat er een grote correlatie is tussen een stijghoogtemeetpunt op het plateau en het debiet van de bron. In het WUR-onderzoek zijn regressiecoëfficiënten afgeleid die de relatie beschrijven onder stijgende en dalende delen van de curves van stijghoogtemetingen en brondebiet. Deze regressiecoëfficiënten hebben we toegepast om een reconstructie te maken van het debiet van de bron over de periode 1980 tot en met 2020 (Figuur S10). Uit die reconstructie blijkt dat het debiet van de bron over die periode een dalende tendens vertoont. We kennen de precieze oorzaken van die trend op dit moment nog niet. Er kan een verband zijn met de effecten van een veranderend klimaat en een daardoor veranderde voeding, maar ook effecten door meer directe menselijke ingrepen zoals een trage doorwerking van het effect van waterwinningen aan de westzijde van het Plateau van Margraten, toenemende verstedelijking maar wellicht ook een toenemend gebruik van grondwater onder de plateaus ten behoeve van de beregening van gewassen. Nader onderzoek naar deze mogelijke trend is aanbevolen en in het rapport doen we suggesties voor mogelijke onderzoeksrichtingen.



Figuur S10. Reconstructie van het debiet van de St. Brigidabron op basis van de regressierelatie met een stijghoogtemeetpunt op het Plateau van Margraten.

In het rapport worden op basis van de resultaten aanbevelingen gedaan en suggesties voor het gebruik van de kennis en data die in dit onderzoek is verzameld. Het gaat daarbij om:

- 1 Het gebruik van de afgeleide reistijdverdelingen voor de validatie van modellen waarmee nitraatprognoses worden opgesteld voor diverse bronsystemen in Limburg;
- 2 Integreren van de kennis uit dit rapport met werk aan de intrekgebieden van bronnen in het kader van Natura2000 beleid;
- 3 Het afleiden van reistijden bij de waterwinningen;
- 4 De reconstructie en trend van de St. Brigidabron in relatie tot klimaat en gebruik van de ondergrond;
- 5 Vergroten van het inzicht in de doorwerking van de diepe tektonische structuren op de permeabiliteit in de kalksteen en de Formatie van Vaals;
- 6 Inzet van het Limburgse bronnenmeetnet voor inventarisatie van het transport van opkomende stoffen in de ondergrond van Limburg;
- 7 Nader onderzoek naar de oorzaak van de toenemende sulfaatconcentraties in de bronnen op de zuidelijke plateaus.

DEEL 1 SYNTHESE VAN DE NEDERLANDSE RESULTATEN

1 Inleiding

Dit Nederlandstalige syntheserapport beschrijft de synthese van de resultaten van het GeoERA RESOURCE project *CHAKA: karakterisatie van Karst- en Chalk in het pilotgebied Zuid-Limburg*. Het Europese project richtte zich op aquifers die bestaan uit kalksteen waarin door oplossingsprocessen karstverschijnselen zijn ontstaan die leiden tot een secundaire permeabiliteit die belangrijk is voor het transport van grondwater en daarin opgeloste stoffen. Onder de verzamelterm *Chalk* wordt een speciaal type kalksteen aangeduid, die in het algemeen zachter is ontwikkeld en een hogere porositeit heeft (Hancock, 1975). Chalk is prominent in Zuid-Limburg, maar vormt ook de beroemde kliffen bij Dover en Calais. In dit rapport wordt een samenvatting gegeven van het werk dat is uitgevoerd in het Nederlandse pilotgebied. De nadruk ligt op de hydrogeologie van het Krijt en boven- en ondergelegen formaties in relatie tot de grondwaterstroming en de bronnen in het Limburgse Mergelland. In het rapport staan de 14 bronnen uit het provinciale meetnet centraal en wordt voor elk van die bronnen een reistijdverdeling afgeleid en wordt de ontwikkeling van de nitraatconcentraties besproken in relatie tot die reistijdverdeling en de hydrogeologische situatie.

Het project beoogde een hydrogeologische karakterisatie te maken van het Krijt en boven- en ondergelegen formaties, voor zover die van belang zijn voor de stroming van zoet grondwater naar bronnen en waterwinplaatsen. Het project had de volgende concrete doelstellingen:

- 1 Vergelijken van het Nederlandse Chalk-systeem met de Karst- en Chalk-systemen van de andere partners in CHAKA;
- 2 Beschrijven van de positie van 14 bronnen in het regionale hydrogeologische systeem van Zuid-Limburg;
- 3 Ontwikkelen van een manier om de reistijdverdelingen van de 14 bronnen te bepalen op een manier waarop het duale permeabiliteitsysteem in de Chalk goed wordt verdisconteerd;
- 4 Via de afgeleide reistijdverdelingen meer begrip krijgen van de ontwikkeling van nitraat- en sulfaat trends in de 14 bronnen en daarmee prognoses te maken van de toekomstige ontwikkeling in die bronnen;
- 5 Het maken van een eerste inventarisatie van diergeneesmiddelen in het water dat uittreedt in de bronssystemen;
- 6 Reconstrueren van de debietreeks van de St. Brigidabron aan de hand van eerder aangetoonde relaties tussen brondebiet en grondwaterstijghoogte op de kalkplateaus.

Om deze doelstellingen te bereiken, bundelen we bestaande kennis, voegen we die samen met kennis uit de andere CHAKA-pilotgebieden en combineren we verschillende soorten hydrologische, hydrochemische en geologische informatie.

In deze synthese komen achtereenvolgens aan de orde:

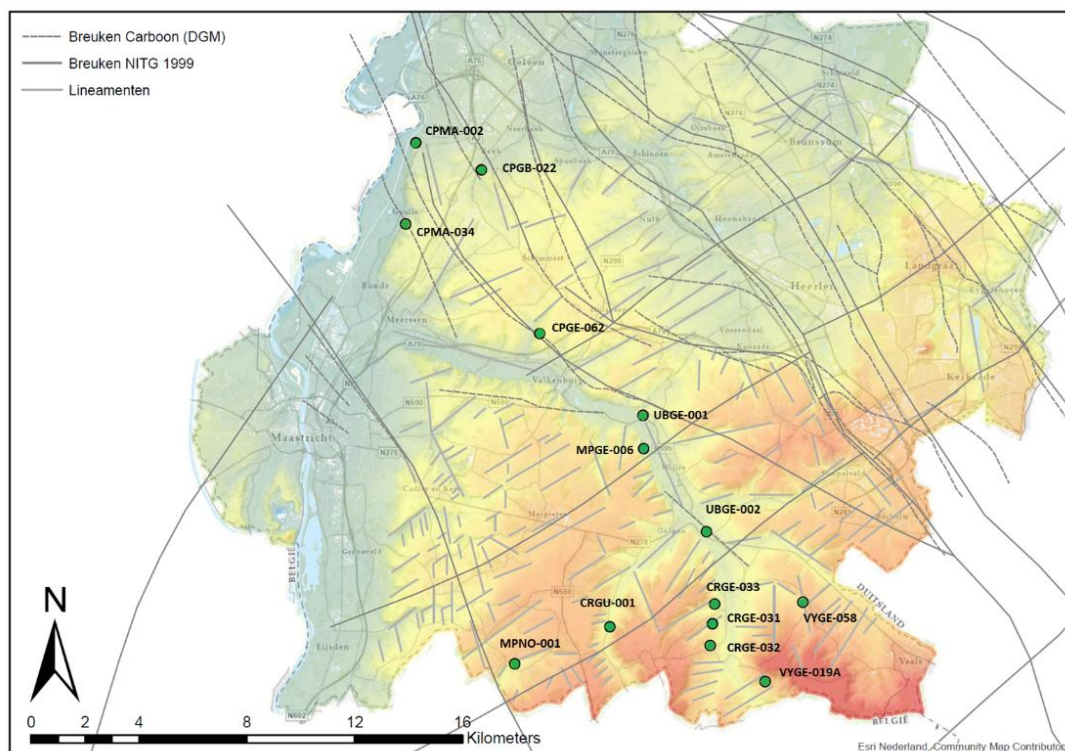
- 1) De geologische setting van de bronnen in Zuid-Limburg;
- 2) Dateringsonderzoek in 14 bronnen van het KRW-meetnet in Krijt-Maas waarmee de reistijdverdelingen en prognoses van de nitraatconcentratie worden opgesteld;
- 3) De St. Brigidabron als Nederlandse pilot: geologische setting, hydrochemische patronen en debietsontwikkeling;
- 4) De resultaten van beknopt veldonderzoek naar opkomende stoffen in de bronnen;
- 5) Een introductie op de factsheets van de 14 bronnen;
- 6) Conclusies en aanbevelingen voor nader onderzoek.

Naast dit rapport zijn voor 14 bronnen **factsheets** vervaardigd die voor elk van de bronnen een overzicht geven van de topografische positie, de hydrogeologische opbouw, de reistijdverdeling van het grondwater, de concentraties van nitraat in de tijd en het voorkomen van microverontreinigingen, zoals de metaboliëten van bestrijdingsmiddelen. De factsheets worden in een aparte pdf beschikbaar gesteld (Broers et al., 2022).

Tabel 1-1 geeft de namen van de 14 voor dit onderzoek geselecteerde bronnen met de provincie-code en RIVM-code. De provincie-code heeft betrekking op de naam van de bron in het provinciale bronnenmeetnet zoals die ook voor het KRW-meetnet Krijt-Maas is gebruikt (Broers et al., 2005). De RIVM-code is gebaseerd op werk van Hendrix & Meinardi (2004) en wordt veel gebruikt in rapportages over het Landelijk Meetnet Mestbeleid (Van Vliet et al., 2019). De locatie van de bronnen is weergegeven in Figuur 1.1.

Tabel 1-1 De namen van de 14 geselecteerde bronnen met codes (RIVM-code uit Hendrix & Meinardi, 2004).

Naam	Provincie code	RIVM code
Elsloo	CPMA-002	n.002
Beek	CPGB-022	n.091
Geulle	CPMA-034	n.010
Valkenburg	CPGE-062	n.020
Schoonbron	UBGE-001	n.037s
Wijlre	MPGE-006	z.039
Kasteel Wittem	UBGE-002	Z.203
St. Brigidabron	MPNO-001	z.001
Beutenaken	CRGU-005	z.035
Landeus	CRGE-033	z.028
Nutbron	CRGE-031	z.027
Paulusbron	CRGE-032	z.025
Bermetijn bron	VYGE-058	Z.205
Belletbron	VYGE-019A	Z.210

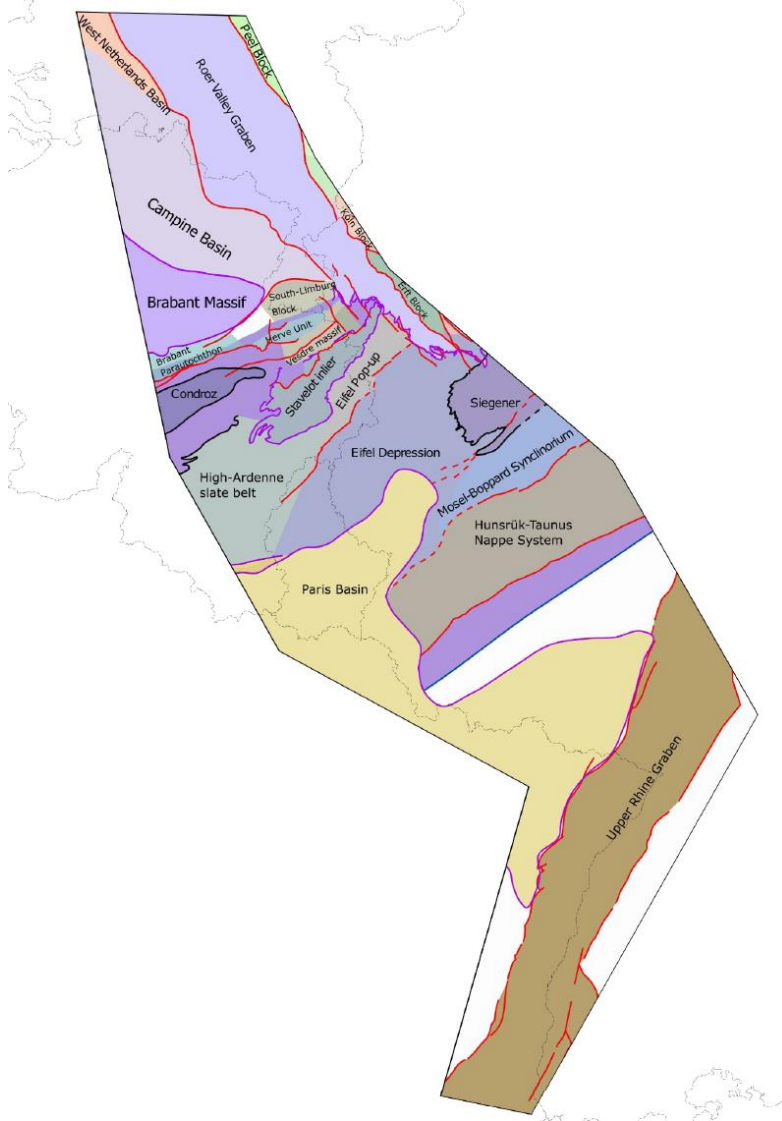


Figuur 1.1 Geselecteerde bronnen met provincie-code uit het bronnenmeetnet zoals dat ook voor de KRW-rapportage gebruikt wordt.

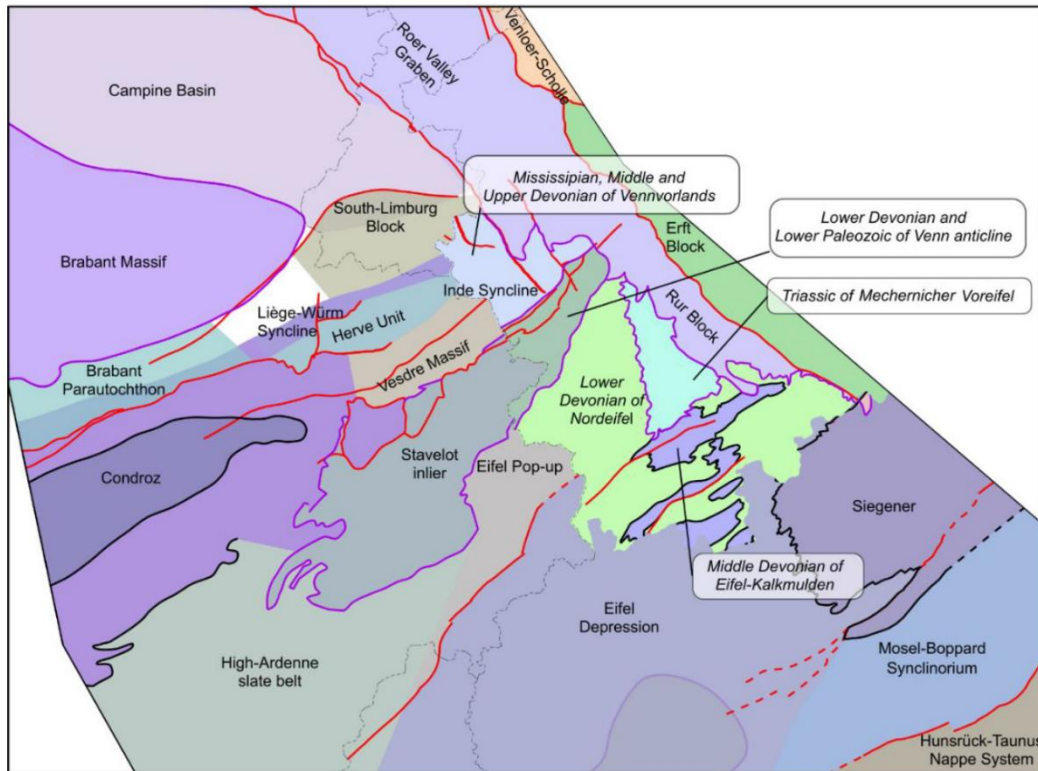
2 Geologische setting van de bronnen in Zuid-Limburg

2.1 Introductie op de regionale geologische setting

De kalksteenplateaus in het zuiden van Limburg vormen een voor Nederland begripven geologisch bijzonder gebied dat ligt ingeklemd tussen een aantal geologische structuren: het Kempisch bekken en de Roerdalslenk ten noorden en oosten, het Brabants Massief ten westen, de overschuivingszone van Aken ten zuiden en het geplooid gebied van de Condroz ten zuidwesten en de Ardennen en Eifel ten zuidoosten (Figuur 2.1). In het GeoERA-project Geoconnect^{3D} zijn deze geologische structuren uitgebreid beschreven in de Case Study Roer-to-Rhine (R2R, Van Daele et al. 2021), waarbij gebruik is gemaakt van bestaande geologische rapporten en 3D karteringen in Nederland en België. Uit de R2R-overzichtskaart in Figuur 2.1 blijkt al dat in de belangrijkste breukstructuren twee richtingen zijn te onderscheiden: breuken met een ZW-NO-oriëntatie die samenhangen met overschuivingen uit de Varistische fase van gebergtevorming, en breuken met een NW-ZO-oriëntatie die samenhangen met een jongere fase van rek, waaruit onder andere de Roerdalslenk is ontstaan. De Limburgse kalksteenplateaus bevinden zich in een gebied waar beide structuren elkaar kruisen. In Figuur 2.2 is dat in meer detail weergegeven.

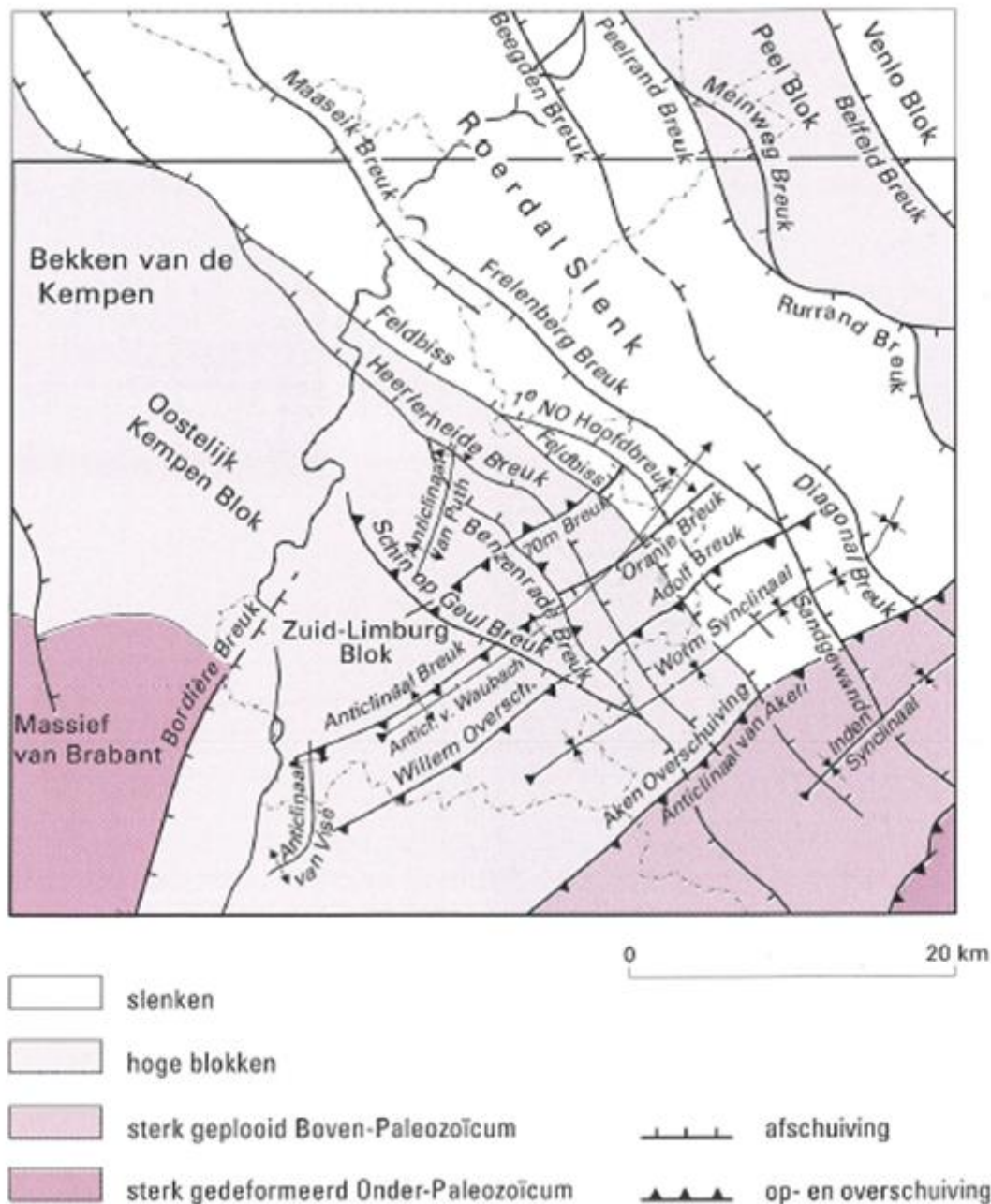


Figuur 2.1 Overzichtskaart uit de GeoERA Geoconnect^{3D} R2R case study, waarin de landsgrenzen in grijs zijn weergegeven en belangrijkste breuksystemen in rood (naar van Daele et al. , 2021).



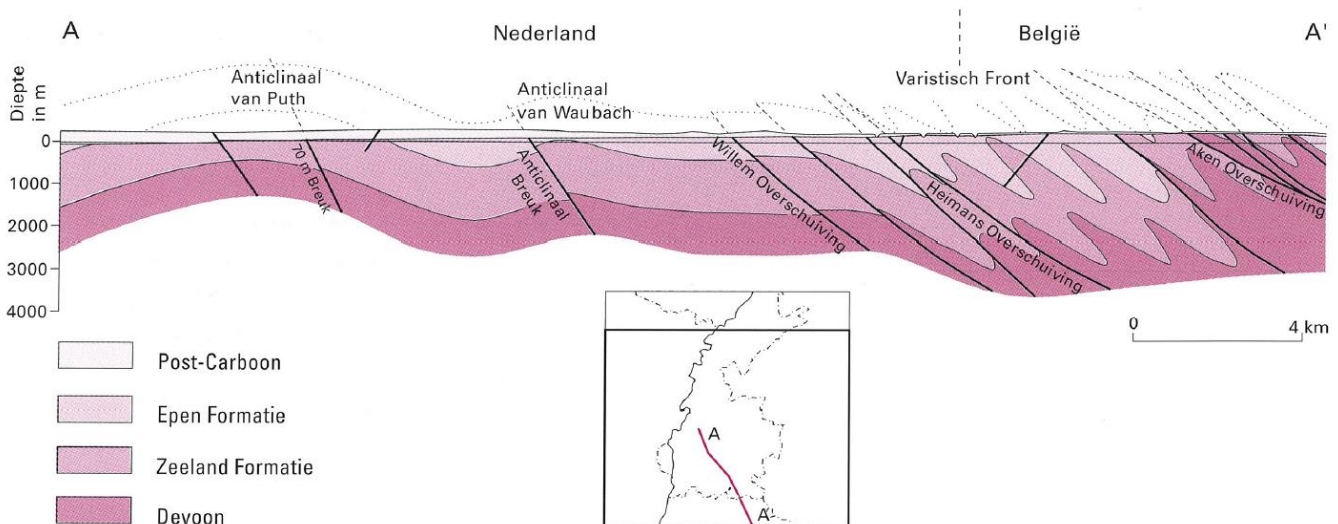
Figuur 2.2 Regionale kaart uit de GeoERA Geoconnect3D R2R case study, waarin het gebied van de Limburgse kalksteenplateaus als South-Limburg Block is weergegeven (naar van Daele et al. , 2021).

Die twee breukoriëntaties, die dus bij de grootschalige geologische structuur behoren, zijn nog duidelijker in de kaart van Figuur 2.3 die afkomstig is uit de Geologische Atlas van de Diepe Ondergrond van Nederland, Toelichting op kaartblad XV (Doornenbal et al., 1999). De diepe geologie van het noordelijke deel van Zuid-Limburg is relatief goed onderzocht in verband met de kolenmijnen in het gebied en de posities van de ZW-NO breuksystemen konden in de mijngebieden nauwkeurig in beeld worden gebracht. Ten zuiden van de mijnstreek is de ligging van de belangrijkste breuken echter onzeker door de geringe hoeveelheid gegevens, en moet de kaart indicatief worden opgevat.



Figuur 2.3 Overzicht van de diepe breukstructuren in Zuid-Limburg (bron: Doornenbal et al., 1999).

De ZW-NO georiënteerde breuken zijn gerelateerd aan de Varistische gebergtevorming in het Laat-Carboon en het Perm ten tijde van de vorming van het supercontinent Pangea (Van Daele et al, 2021). Deze structuren zijn dus al heel oud; ze bestaan uit overschuivingen in een periode van compressie en plooiing van aardlagen. De Aken-overschuiving, die net ten zuidoosten van Zuid-Limburg ligt, is daarbij de belangrijkste (zie Figuur 2.3). Ten noordwesten daarvan gaat de plooiing nog door en zijn achtereenvolgens de Heimans overschuiving en de Willem-Adolf overschuiving te herkennen en ten noordwesten daarvan de Anticlinaal breuk en de “70 m breuk” (Figuur 2.4).

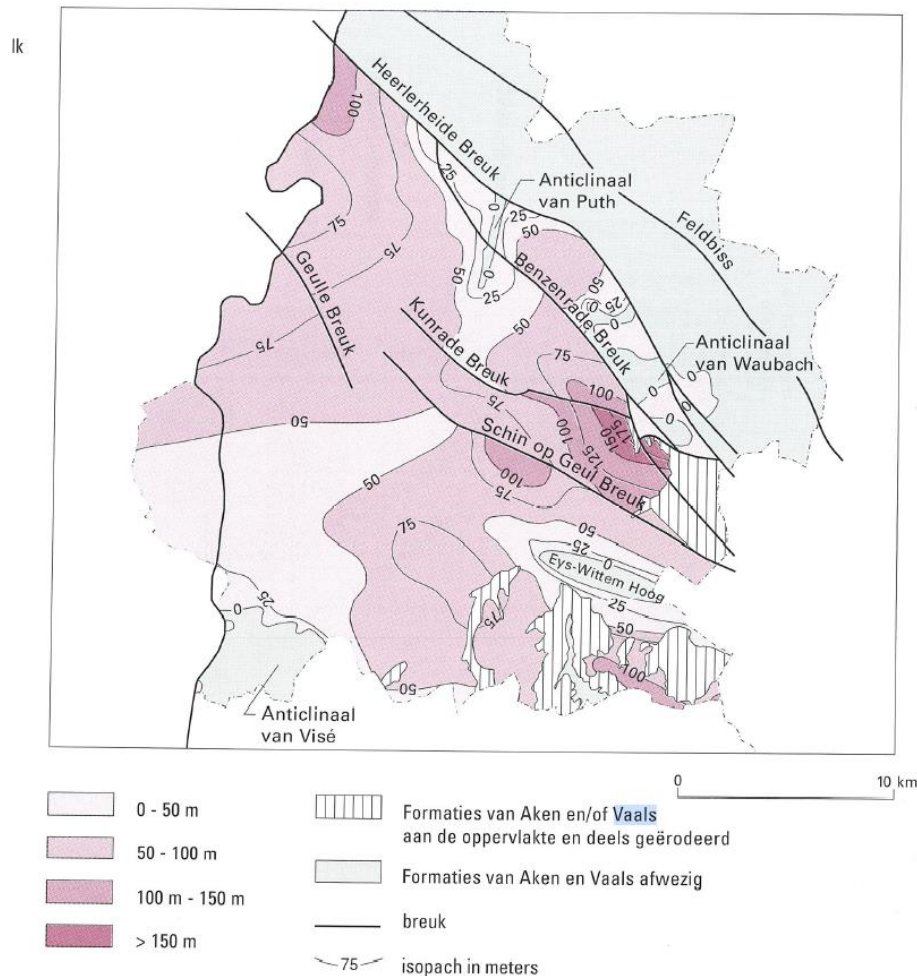


Figuur 2.4 Dwarsdoorsnede door de diepe ondergrond van Zuid-Limburg met daarin de belangrijkste overschuivingen die ook in Figuur 2.3 zichtbaar zijn, waar echter de Heimans Overschuiving ontbreekt. (bron: Doornenbal et al., 1999).

Vanaf de Jura periode werd de basis gelegd voor de NW-ZO structuren in het gebied die uiteindelijk de Roerdalslenk tot gevolg hadden. De voor grondwaterstroming belangrijkste geologische formaties die in Zuid-Limburg aanwezig zijn, zijn na die tijd gevormd, met name in het Krijt en in het Tertiair.

In het Krijt werden de Formaties van Aken en Vaals gevormd, die bestaan uit siliklastische sedimenten die in een randzone van het Massief van Brabant zijn ontstaan. De Formatie van Aken bestaat uit een afwisseling van zand, silt en klei die in een kustnabij milieu zijn afgezet. De basale eenheid in de Formatie (de Hergenrath Klei) werd in een fluviatiel milieu afgezet, waarna het Aken Zand in een ondiep marien milieu werd afgezet. Het Hauset zand werd tenslotte door rivieren afgezet die houtfragmenten en plantenresten aanvoerden.

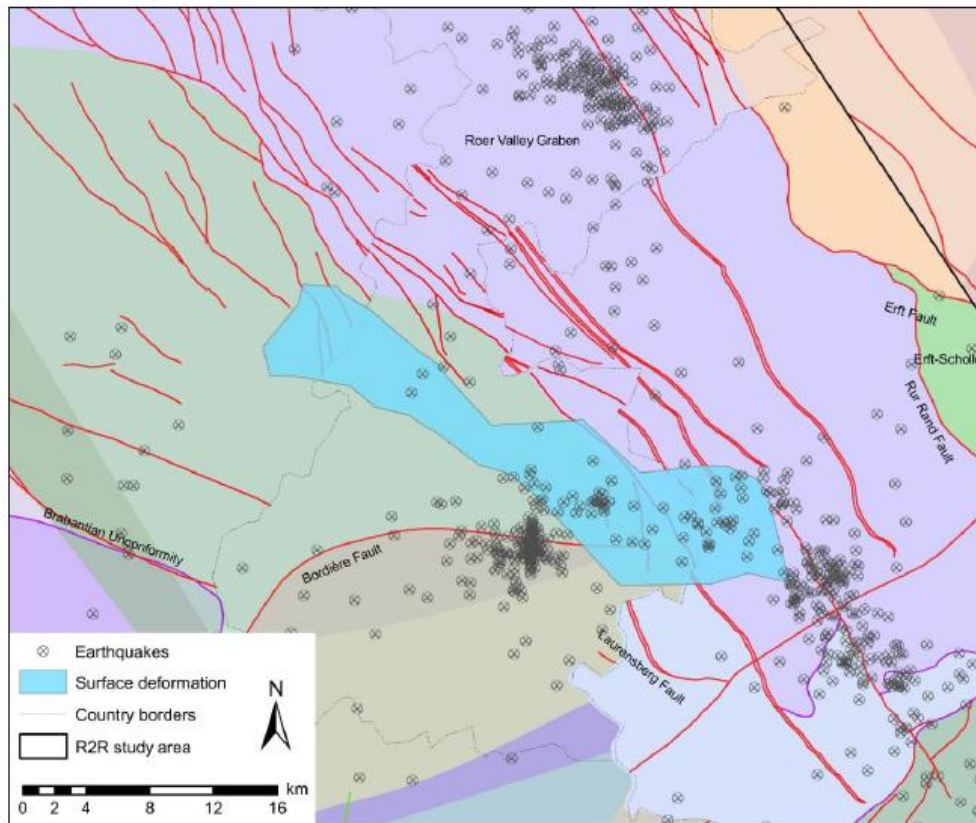
De Formatie van Vaals bestaat uit cyclische afwisseling van glauconiethoudende groenzanden en kleiige zandstenen; door het glauconiet hebben de afzettingen een groene kleur. Deze formatie omvat mariene afzettingen. In de formatie komen ook harde zandsteenbanken voor. Het voorkomen van deze formaties en de diktes van de sedimenten zijn sterk gestuurd door de complexe breukenstructuur in het gebied, die ook in de afzettingenfase al invloed had op de sedimentatie (Doornenbal et al., 1999, Figuur 2.5).



Figuur 2.5 Dikte en voorkomen van de formaties van Aken en Vaals (bron: Doornenbal et al., 1999). Inmiddels zijn diktes en breuksystemen geactualiseerd in het DGM v2.2 model dat is te raadplegen via dinoloket.nl.

Boven de formaties van Aken en Vaals liggen de in het Krijt gevormde zachte kalkstenen van de formaties van Gulpen, Maastricht en Houthem die grotendeels in een ondiep marien milieu zijn afgezet. De Formatie van Gulpen bestaat uit fijnkorrelige witte kalkstenen met bovenin ook lagen met vuursteenknollen. De kalkstenen uit de Formatie van Maastricht zijn lichtgeel tot lichtgrijs/geel waarin vaak een afwisseling van lage harde en zachte kalksteen voorkomt en ook een serie *hardgrounds* en lagen met glauconietrijke kalk en fossielen. Ook in de Formatie van Maastricht komen lagen met vuursteenknollen voor, vooral in het westen. In het zuidoostelijke deel van Zuid-Limburg komen minder vuursteenlagen voor in de zachte, lichtgrijze kalk die daar de Kunrader kalksteen wordt genoemd (Doornenbal et al., 1999). In de noordwesthoek van het studiegebied komt ook de Formatie van Houthem voor: die formatie bestaat uit eveneens uit zachte, lichtgrijs/gele fijn- tot grofkorrelige kalkstenen, met inschakelingen van *hardgrounds* en fossielgruislagen.

Het oude NW-ZO georiënteerde breuksysteem werd in het Laat-Oligoceen weer geactiveerd, waarbij de Roerdalslenk werd opgevuld met mariene en later fluviatiele sedimenten. Die afzettingen bestaan uit afwisselingen van fijne en matig grove zanden en klei, waarbij met name de tertiaire mariene kleilagen van de formaties van Rupel en Tongeren serieuze barrières kunnen vormen voor verticale grondwaterstroming. Deze twee formaties zijn prominent aanwezig op het Centraal Plateau in het midden van Zuid-Limburg, waar ze kalksteenlagen uit het Krijt en Paleoceen afdekken. Het breuksysteem dat de Roerdalslenk zijdelings begrenst, is ook in het heden nog actief, waardoor geregeld kleine aardbevingen voorkomen, ook in het Zuid-Limburgse deel van het gebied (zie Figuur 2.6).

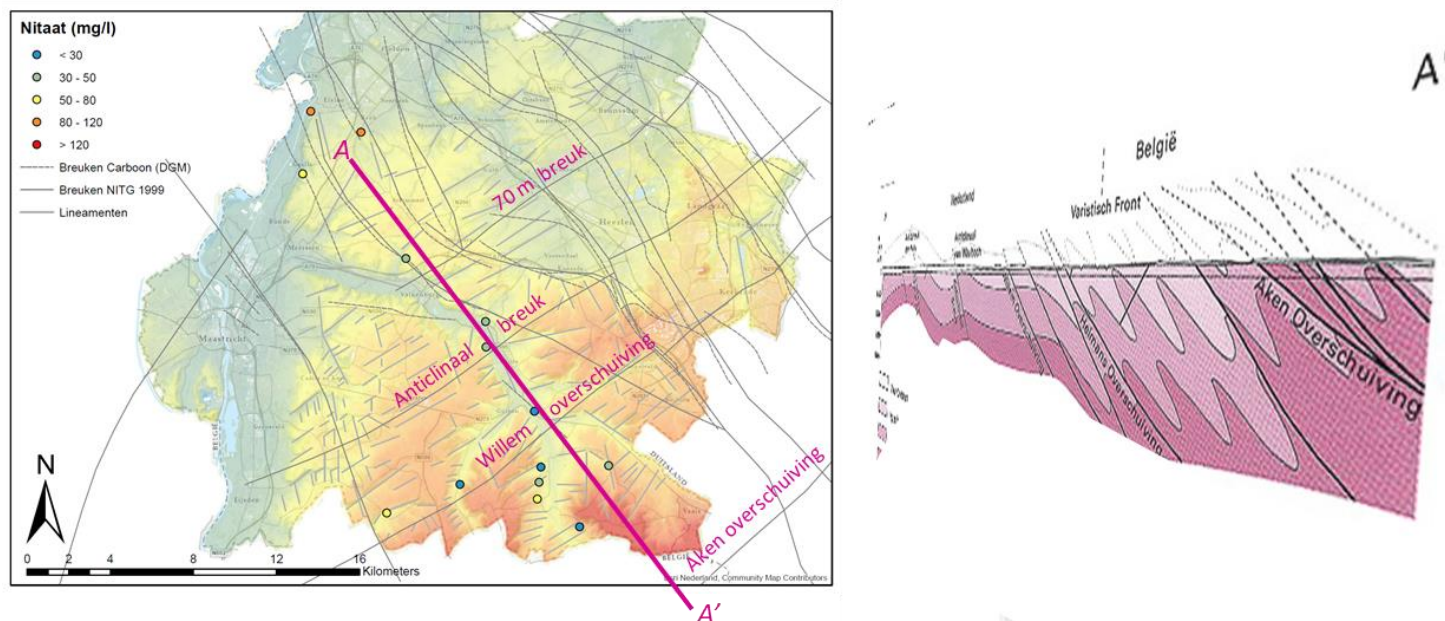


Figuur 2.6 Locaties van bekende aardbevingen in Zuid-Limburg en omstreken (bron: Van Daele et al., 2021).

De complexe geologische structuur van het gebied met een kruiselingse structuur van diepe ZW-NO georiënteerde oude breuken, en recentere NW-ZO georiënteerde breuksystemen die in het verleden ook inversies te zien gaven, maakt de interpretatie van de hydrogeologie ingewikkeld. In de volgende paragraaf brengen we de positie van de bronnen in kaart in relatie tot die complexe structuur.

2.2 Positie van de bronnen in relatie tot de geologische structuren

In dit onderzoek zijn 14 bronnen in Zuid-Limburg onderzocht. De bronnen zijn weergegeven in Figuur 2.7 in relatie tot de maaiveldhoogte en diepe geologische structuur.

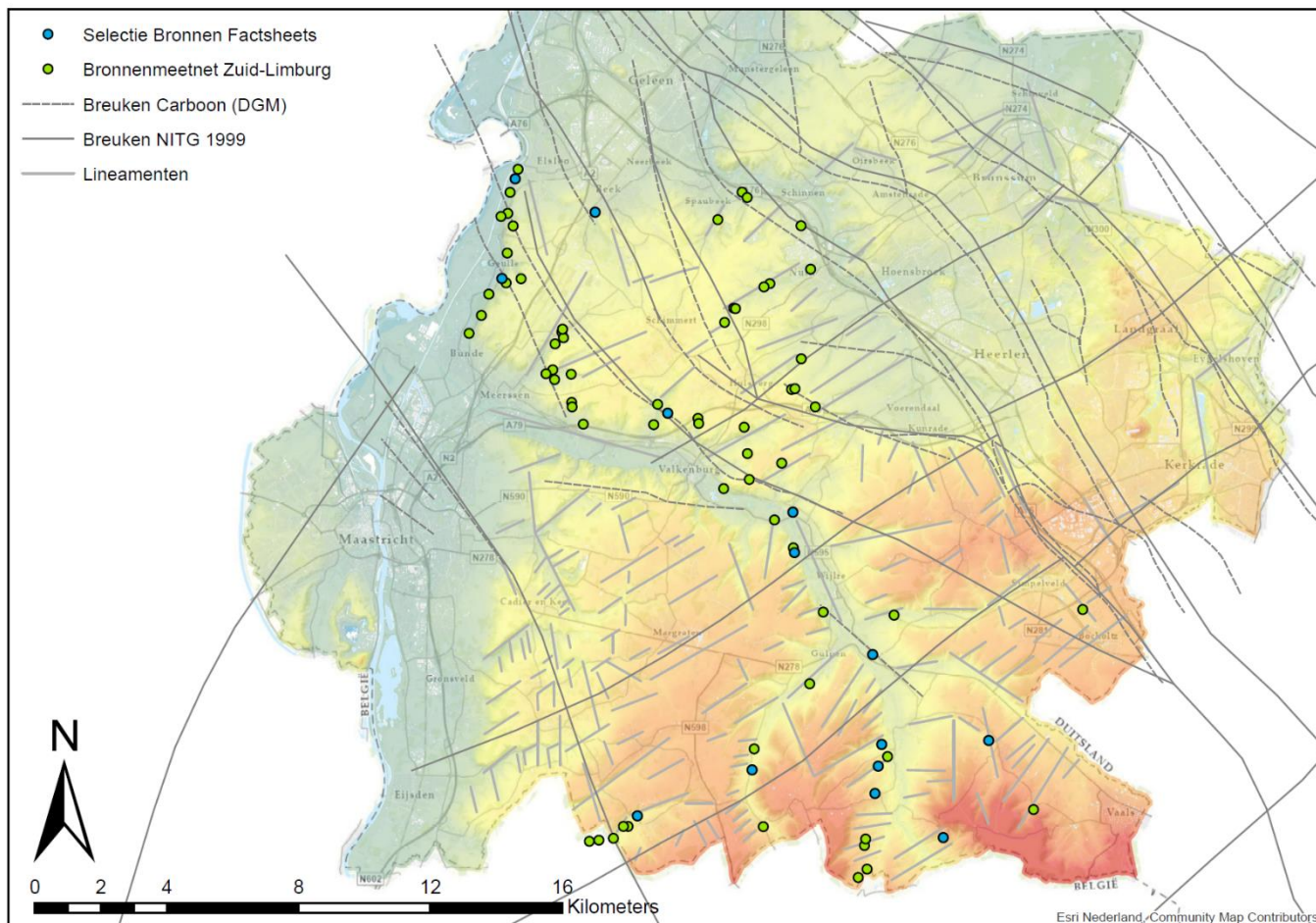


Figuur 2.7 Locatie van de in dit onderzoek onderzochte bronnen in relatie tot topografie (kleuren volgens het AHN) en de belangrijkste breuksystemen. De diepe ZW-NO georiënteerde overschuivingen zijn in de kaart opgenomen waar ze in de diepte zijn gekarteerd. Omdat deze breukvlakken naar het zuiden hellen (zie dwarsdoorsneden) zullen ze in de ondiepere formaties verder naar het noorden aan maaiveld dagzomen dan op de kaart aangegeven.

In de topografie van Zuid-Limburg komen zowel de ZW-NO- als de NW-ZO-structuur duidelijk tot uiting. In Figuur 2.8 zijn lineamenten aangegeven zoals die uit het Actueel Hoogtebestand Nederlands (AHN) konden zijn uitgelezen voor deze studie. Die lineamenten tonen de twee hoofdrichtingen; veel van de droge beekdalen in de zuidelijke plateaus hebben bijvoorbeeld de ZW-NO oriëntatie, maar ook de NW-ZO-oriëntatie komt op vrijwel alle plateaus terug in de positie van beekdalen of hellingprofielen. Opvallend is dat de positie van de ZW-NO georiënteerde beekdalen niet overeenkomt met de indicatieve positie van de ZW-NO overschuivingsvlakken. Dat komt mogelijk omdat de breukvlakken zuidwaarts hellen, en hier zijn ingetekend op de locatie waar ze in de diepe ondergrond zijn aangetoond. Onze hypothese is dat de dagzoom van het breukvlak met het maaiveld meer noordelijk uitkomt dan deze diepe positie. Dit zou overigens goed kunnen, omdat de precieze positie van de ZW-NO breukstructuren niet goed bekend is, omdat het aantal boringen onvoldoende is om het verzet over de breuk aan te tonen en er geen geschikte seismische data van het gebied ten zuidwesten van de Mijnstreek beschikbaar is (Vis en Houben, 2022).

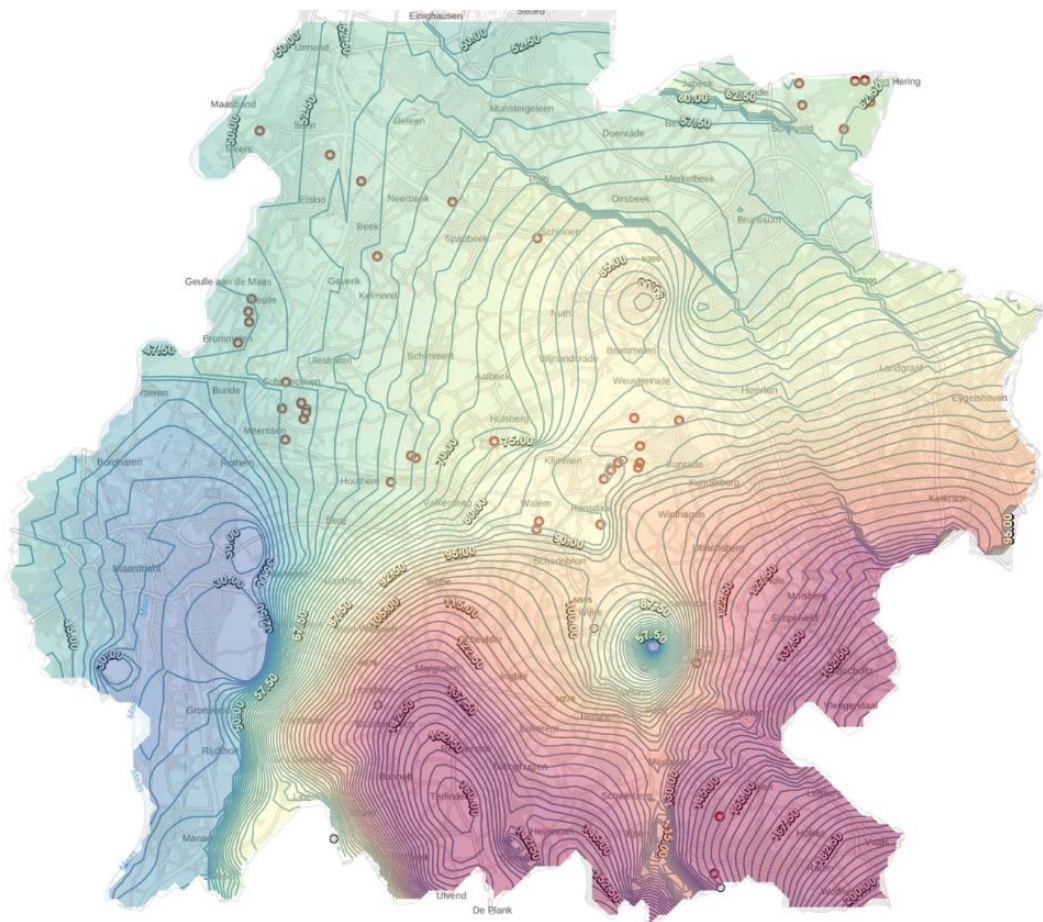
Voor de Willem-overschuiving zou die hypothese impliceren dat het breukvlak in het droge dal van de Noorbeek zou dagzomen. Het wil niet zeggen dat een dergelijke diepe breuk nog actief is; het betekent eerder dat de aanwezigheid van die ZW-NO breukzones tot zwaktezones in de kalksteen hebben geleid tijdens de tektonische spanningen in latere perioden. In die zwaktezones kon daar door de oplossing van kalk en de opening van spleetsystemen een hogere permeabiliteit ontstaan en ontstonden op die plekken later in het Pleistoceen in periglaciaire perioden door hellingprocessen beekdalen. Op lagere plekken in die beekdalen treedt grondwater nu uit, terwijl grote delen van het stroomopwaartse deel van het beekdal tegenwoordig geen water meer voeren. De hypothese dat de oriëntatie van de breuken tot zwaktezones heeft geleid die de topografische ontwikkeling hebben gestuurd, wordt gesteund in eerder onderzoek door Teulings (2001, zie ook hoofdstuk 4 met meer informatie over de St. Brigidabron). De St. Brigidabron bevindt zich bijvoorbeeld in de noordflank van

het beekdal van de Noorbeek, die pas vanaf de bron watervoerend wordt; het stroomopwaartse deel van het ZW-NO georiënteerde beekdal is droog. Maar ook aan de oostzijde van het plateau van Crapeol bevinden de bronnen zich halverwege tussen de insnijding van het ZW-NO georiënteerde beekdal en de plek waar het watervoerende deel van het beekdal afwatert op het lager gelegen riviertje de Geul. Voor veel andere bronnen in het gebied geldt dat ze op de hellingknik liggen tussen de kalksteenplateaus en de vlakke beekdalen van de Geul en de Gulp, vaak in het verlengde van de droge beekdalen in de plateaus. In hoofdstuk 5 wordt de hydrogeologische situatie voor elk van de 15 onderzochte bronnen in detail beschreven in de vorm van factsheets.



Figuur 2.8 Positie van de bekende bronnen in relatie tot de topografische structuur en de in Zuid-Limburg bekende breuksystemen zoals die bekend zijn uit Doornenbal et al. (1999), zoals opgenomen in het DGM v2.2 ondergrondmodel, aangevuld met enkele breuken die in het Belgische R2R onderzoek zijn aangegeven (Van Daele et al., 2021). In de kaart zijn ook lineamenten weergegeven die uit het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN) zijn afgeleid. Bronnen in blauw zijn binnen GeoERA onderzocht, de bronnen in groen zijn eerder bemonsterd (Broers en van Vliet, 2018).

De isohypsen van het grondwater op de zuidelijke plateaus zijn weergegeven in Figuur 2.9. Opvallend is dat de stroming op het Centraal Plateau grotendeels westwaarts gericht is met een relatief kleine gradiënt, terwijl de steilere gradiënten op de zuidelijke plateaus vooral door de grote topografische gradiënten wordt gestuurd, ten gevolge van de grotere hoogteverschillen aldaar. Het is belangrijk om te realiseren dat het grondwater op de diepte van modellaag 6 uit het LHM het Centraal Plateau onder *confined* condities stroomt, terwijl de stroming op de zuidelijke plateaus freatisch is. Ook dit draagt bij aan de verschillende gradiënten tussen de plateaus.

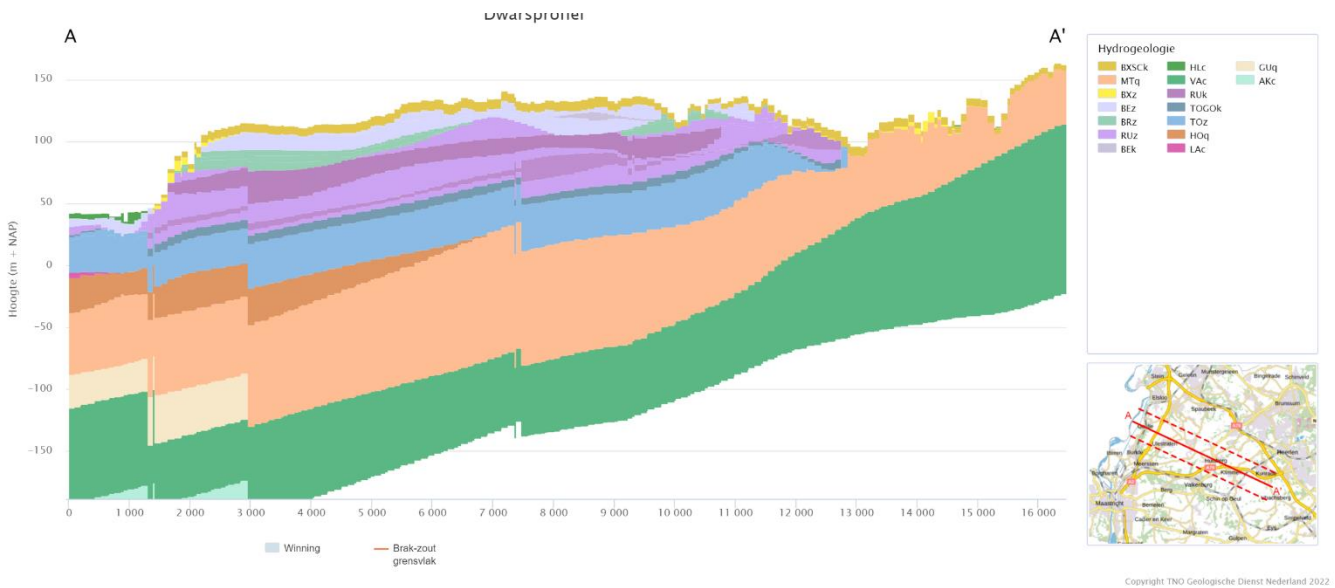


Figuur 2.9 Isohypsenpatroon met gebruikte meetpunten in modellaag 6 van het Landelijk Hydrologisch Model, die voor de zuidelijke plateaus overeenkomt met de Formaties van Gulpen, Maastricht en Vaals. Bron: Grondwaterstandenbeeld.nl.

Omdat de grondwaterstroming op het Centraal Plateau wezenlijk anders is dan op de kalksteenplateaus in het zuidelijkste deel van Zuid-Limburg worden ze hieronder apart behandeld.

2.2.1 Grondwaterstroming op het Centraal Plateau

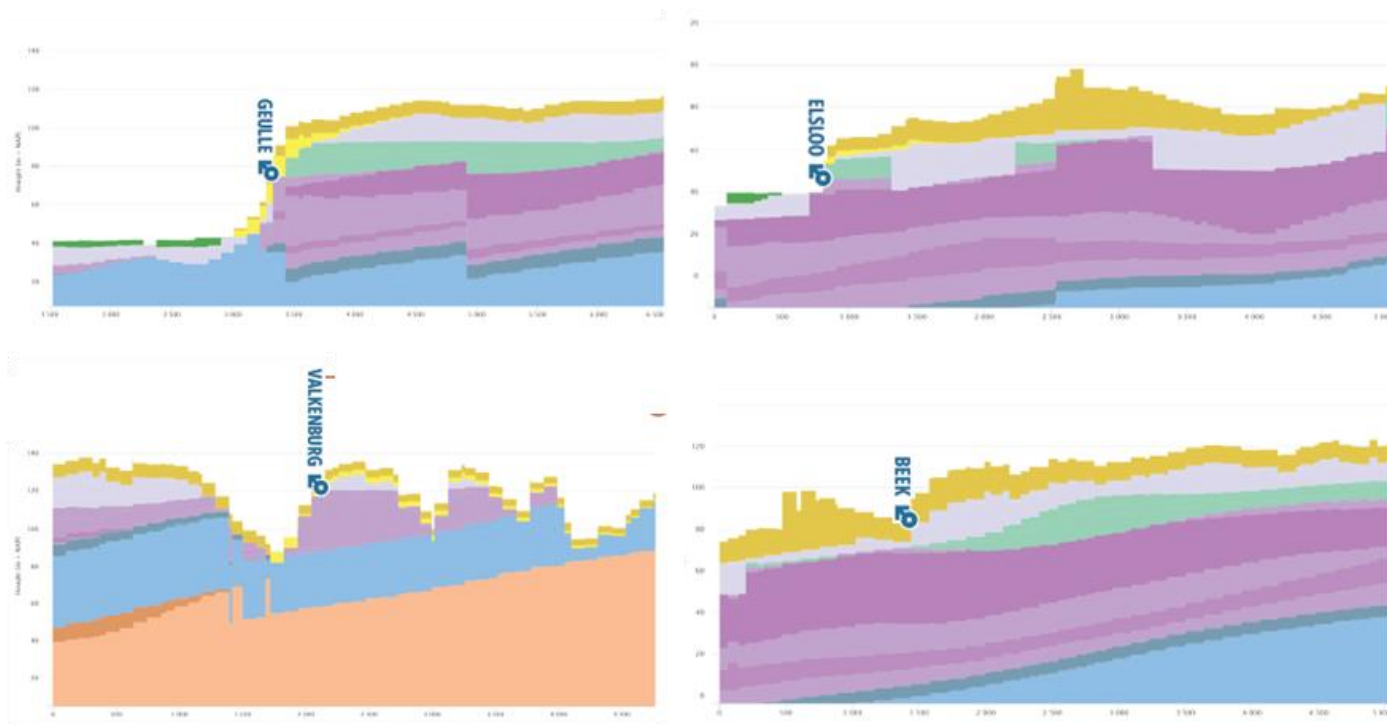
Op het Centraal Plateau zijn de kalksteenaquifers van de Formaties van Gulpen, Maastricht en Houthem op grotere diepte aanwezig en worden ze afgedekt door tertiaire en kwartaire afzettingen. De tertiaire afzettingen bestaan vooral uit een afwisseling van zand en kleilagen van de Formaties van Tongeren, Rupel en Breda (respectievelijk blauw, paars, en grijsgroen in Figuur 2.10). De kwartaire afzettingen omvatten de rivierzanden en -grinden uit de Formatie van Beegden (violet in Figuur 2.10) en de zand- en lössafzettingen uit de Formatie van Boxtel (geel en oker in Figuur 2.10).



Figuur 2.10 W-O dwarsdoorsnede door het Centraal Plateau.

De meeste bronnen in dit gebied ontspringen vanuit deze kwartaire en tertiaire aquifers, waaronder de rij bronnen die aan de westzijde van het Plateau afwateren in en rond het Bunder- en Elsloërbos. De drinkwaterwinning bij Geulle, die nog iets westelijker ligt in het Maasdal, onttrekt haar water wel uit de kalksteen onder deze formaties. Ook aan de zuid- en oostzijde ontspringt een groot aantal bronnen rond het Centraal Plateau. In dit onderzoek lichten we in totaal 4 bronnen op en rond het Centraal Plateau uit (zie ook hoofdstuk 3).

De bronnen op en rond het Centraal Plateau hebben dus gemeen dat ze ontspringen uit Pleistocene en Tertiaire lagen, zoals de rivierafzettingen van de Maas (Formatie van Beegden, licht-violet), de mariene zanden uit de Formatie van Breda (groen) en/of zandige lagen in de daaronder gelegen Rupel Formatie (paars) (zie Figuur 2.11). De kalksteenpakketten liggen op het Centraal Plateau relatief diep en worden door de bronnen niet aangetapt. Uit de reistijdverdelingen (zie hoofdstuk 3) blijkt dat deze bronnen gekenmerkt worden door relatief jong water van de laatste 30 jaar en daardoor hoge nitraatconcentraties vertonen en ook kwetsbaar zijn voor pesticiden en opkomende stoffen.

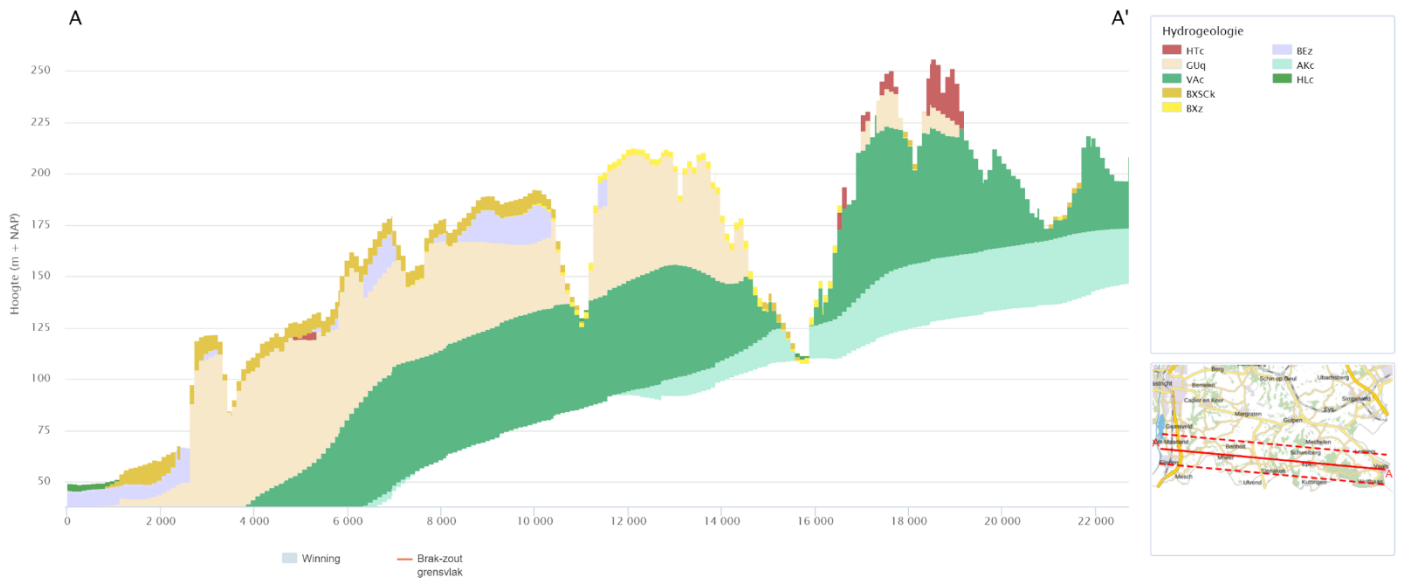


Figuur 2.11 Hydrogeologische setting van de 4 onderzochte bronnen op en rond het Centraal Plateau. Löss = okergeel, F. van Beegden is licht violet, F. van Breda is groen, Rupel F. is paars.
Bron: grondwaterkwaliteitinbeeld.nl.

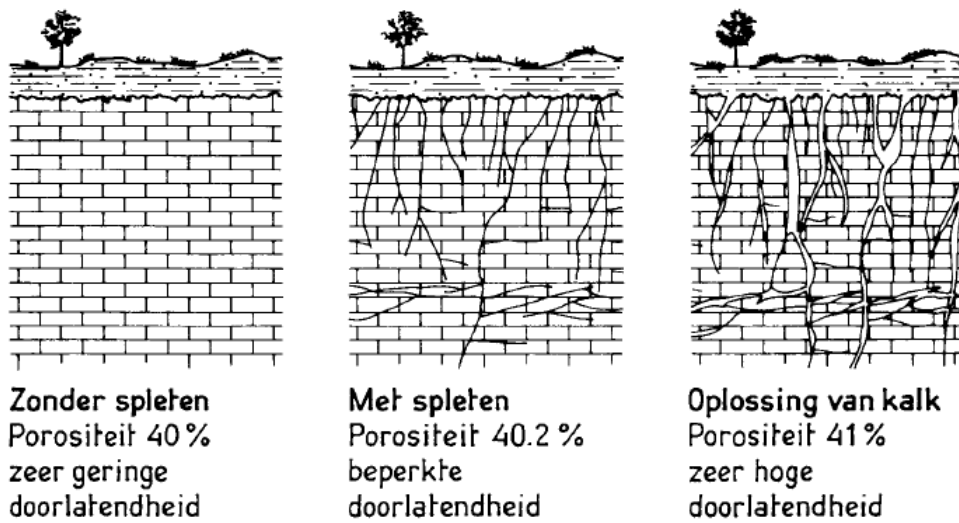
Van de 4 onderzochte bronnen onttrekt de bron bij Geulle (CPMA-34) het oudste water en de bron bij Valkenburg (UBGE-001) het jongste water. De bron bij Geulle lijkt daarbij gevoed vanuit de wat diepere lagen zoals de Formaties van Breda en Rupel. Dat de bronnen in het Bunderbos water uit diverse lagen onttrekken was overigens al door Hendrix in 1985 vastgesteld, waarbij hoger op de helling gelegen bronnen uit ondiepere lagen worden gevoed dan de bronnen lager op de helling (Hendrix, 1985). Ten opzichte van de bronnen op de zuidelijke plateaus worden die op het Centraal Plateau gevoed door gemiddeld jonger water met hoge nitraatconcentraties (zie paragraaf 3.5).

2.2.2 Grondwaterstroming op de zuidelijke plateaus

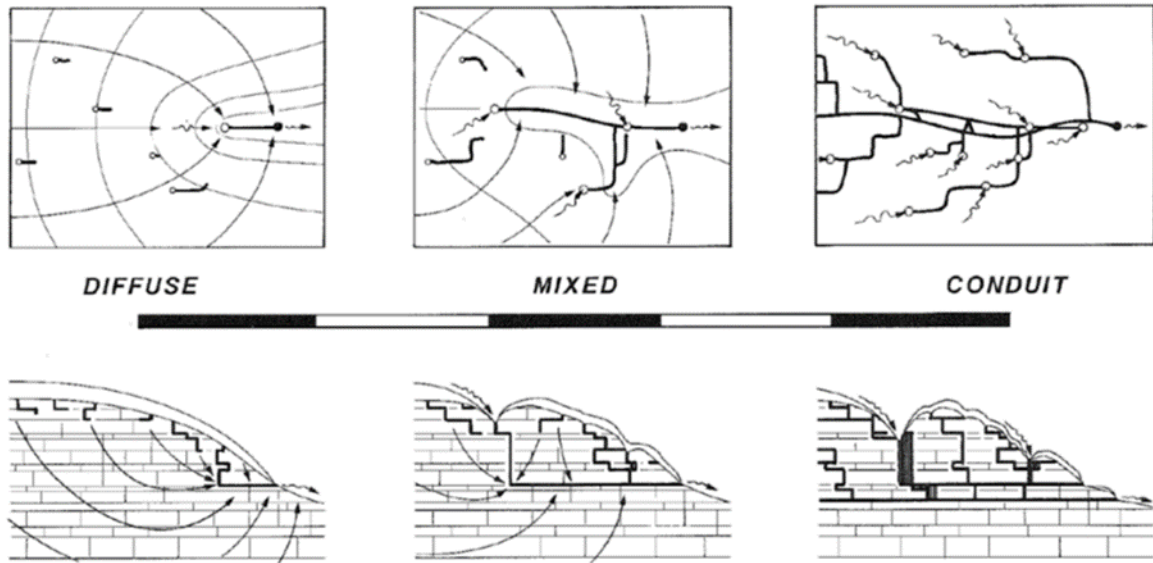
De grondwaterstroming op de zuidelijke plateaus vindt voornamelijk plaats in de zachte kalksteen van de Formatie van Gulpen (eenheid GUq, beige in Figuur 2.12) en meer naar het noorden ook in de kalksteen van de Formatie van Maastricht. De stroming vindt voornamelijk plaats door het uitgebreide systeem van spleten en breuken in de kalksteen; de secundaire permeabiliteit is duidelijk groter dan de primaire permeabiliteit van de kalksteen zelf (zie Figuur 2.13 en Figuur 2.14). De permeabiliteit neemt in de diepte af, omdat ook het aantal spleten in de kalksteen afneemt. In de beekdalen, die als zwaktezones kunnen worden bestempeld, is de permeabiliteit van het gesteente naar verwachting groter dan op de hogere delen van de plateaus (Van Rooijen, 1989, zie Figuur 2.13). De Formaties van Gulpen en Maastricht vormen op de plateaus van Margraten en Crapoel de belangrijkste aquifers. Op het meer ten zuidoosten gelegen plateau van Vijlen vindt de stroming vooral plaats door de Formatie van Vaals, met name op plaatsen waar verbroken zandsteenbanken een zekere permeabiliteit lijken te bezitten, en deels door de onderliggende Formatie van Aken die daar grover is ontwikkeld (van Rooijen, 1989). De Formatie van Vaals draagt ook bij aan de stroming van de bronnen op de meer westelijke plateaus; op het plateau van Crapoel ontspringen veel bronnen uit deze Formatie, maar ook de bronnen in het dal van de Noorbeek lijken deels vanuit de Formatie van Vaals te worden gevoed.



Figuur 2.12 W-O dwarsdoorsnede door de zuidelijke plateaus (www.grondwaterkwaliteitinbeeld.nl).



Figuur 2.13 Het effect van spleten en oplossing daarlangs op de doorlatendheid van kalksteen (bron: Van Rooijen, 1989).



Figuur 2.14 De ontwikkeling van spleetsystemen in steeds sterker verkarst gebied (van links naar rechts: diffuse stroming, gemengde *diffuse en spleetstroming* en *spleetstroming*. Bron: Quinlan & Ewers, 1995). Let ook op de ontwikkeling van duidelijke richtingen in het geval van karststroming, die vaak ook in de topografie doorwerken.

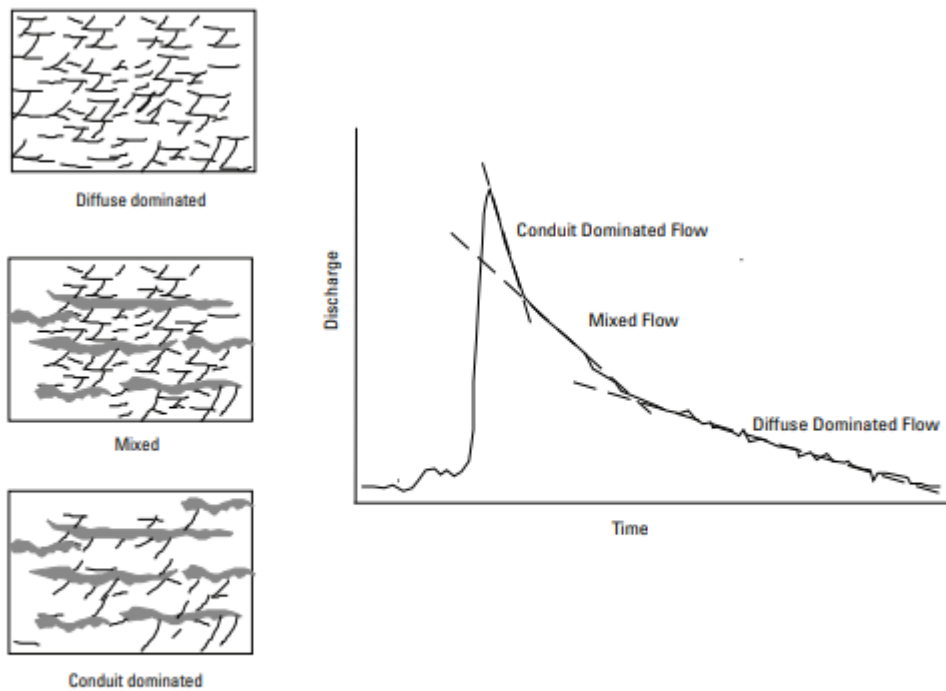


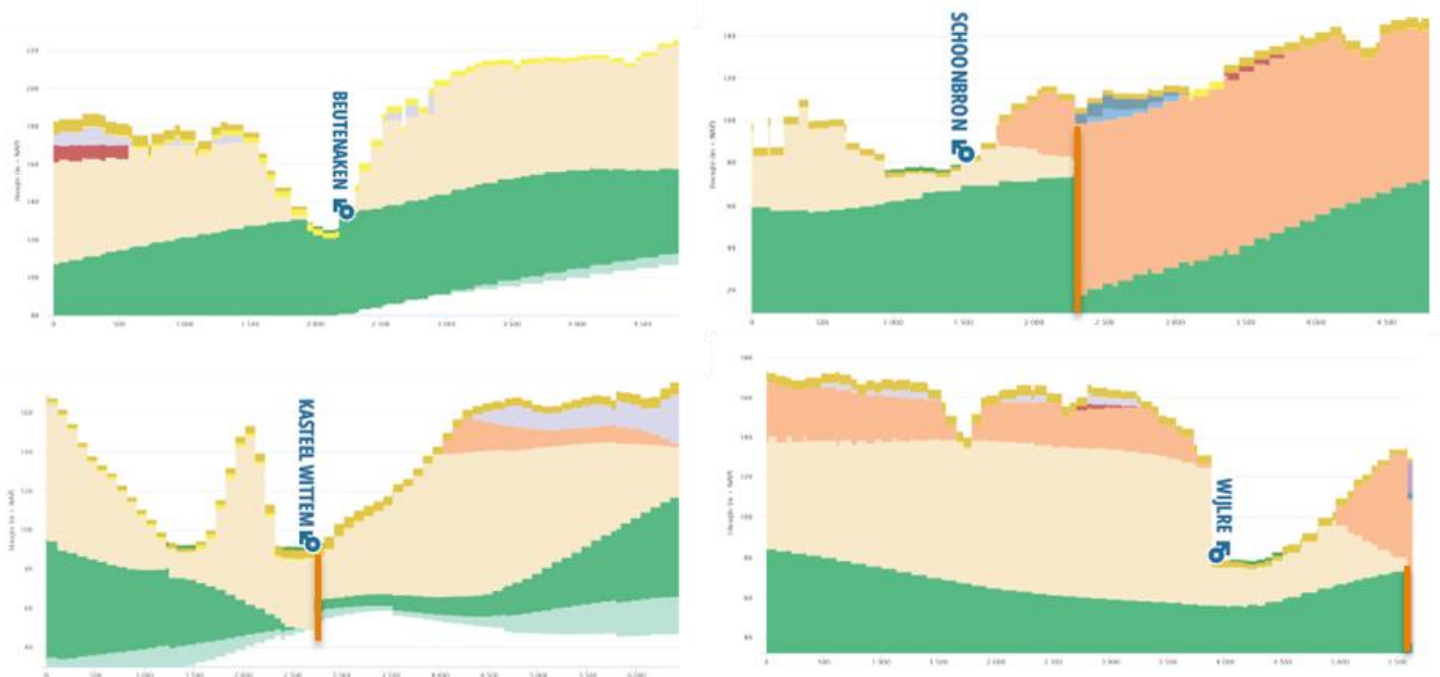
Figure 9. Conceptual spring hydrograph showing changes in slope and dominant flow regime (conduit, mixed, diffuse) due to differing hydraulic responses (artwork by Earl Greene, U.S. Geological Survey).

Figuur 2.15 Uitwerking van *dual permeability flow* op de afvoercurve van een karstbron. De indruk bestaat dat de Limburgse kalksteen tot een gemengde, duale permeabiliteitsverdeling leidt waarbij de bron deels gevoed wordt door wat tragere diffuse stroming samen met sneller transport via verbonden spleetvlakken in het gesteente. Bron: USGS.

Voor de bronnen op de zuidelijke plateaus is het aannemelijk dat ze worden gevoed uit een zogenaamd *dual permeability systeem*, waarbij de stroming deels diffuus door de kalksteen zelf en deels door grotere spleetsystemen wordt gevoed (Figuur 2.14, zie ook Bergsma, 2012). Zo'n duaal stromingssysteem heeft mogelijk ook effecten op de afvoer van de bronnen, zoals in Figuur 2.15 geïllustreerd. Om dit te onderzoeken zijn gedetailleerde afvoergegevens nodig, die in Nederland eigenlijk alleen beschikbaar zijn voor de bronnen die in de jaren '80 en '90 door de Wageningen Universiteit zijn onderzocht en bemeten. In hoofdstuk 4 zullen de afvoergegevens van de St. Brigidabron nader worden geanalyseerd, waarbij wordt doorgeborduurd op eerder onderzoek van Teulings (2001). Ook uit eerder dateringsonderzoek kwamen aanwijzingen naar voren voor een dergelijk duaal stromingssysteem (van Vliet & Broers, 2019) waardoor we in GeoERA gewerkt hebben aan het verdisconteren van duale stroming in de reistijdmodellen (zie hoofdstuk 3).

In dit onderzoek zijn tien 10 bronnen op en rond de zuidelijke plateaus uitgelicht. Die bronnen vallen in 2 groepen uiteen: de bronnen in de grote beekdalen en de bronnen in de uitlopers van de droge dalen op zuidelijke plateaus.

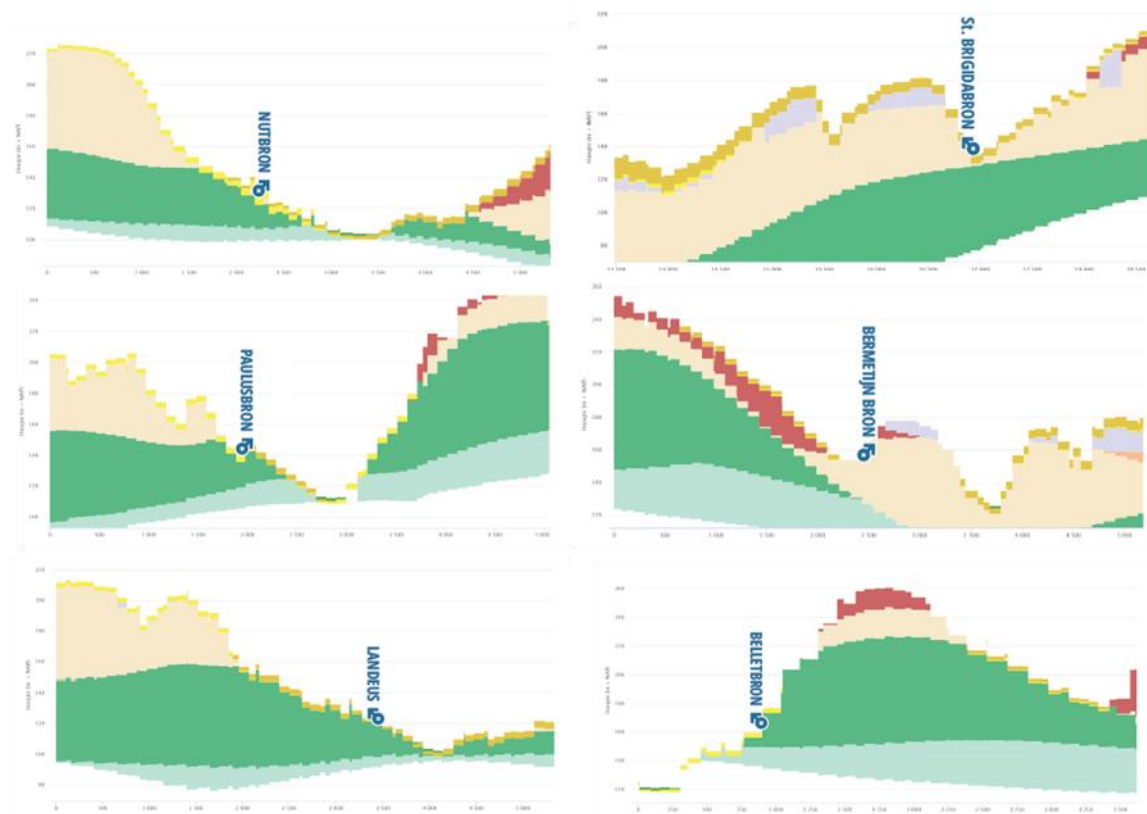
De bronnen in de grote beekdalen in het Mergelland ontspringen vanuit de kalksteenformaties. Deze bronnen bevinden zich dicht bij het laagste topografische punt in hun gebied, in het diep ingesneden beekdal van de Geul of de Gulp. Meestal ontspringen de bronnen op een hellingknik of zoals in het geval van de bron bij Kasteel Wittem ter hoogte van een dagzomende breuk in de onderliggende kalksteen. Gemiddeld hebben deze bronnen duidelijk lagere nitraatconcentraties en minder organische microverontreinigingen dan de bronnen op het Centraal Plateau, wat wordt verklaard door een relatief grote bijdrage van water dat ouder is dan 80 jaar (zie paragraaf 3.3).



Figuur 2.16 Hydrogeologische setting van de 4 onderzochte bronnen in de dalen van de Gulp en de Geul. Loess = okergeel, F. van Maastricht is roze-bruin, F. van Gulpen is beige, F. van Vaals is groen. De positie van een aantal breuken die volgens REGIS II v2.2 een duidelijk verzet te zien gegeven is geaccentueerd met een verticaal oranjebruin lijnelement. Bron: grondwaterkwaliteitinbeeld.nl.

De andere groep bronnen bevindt zich in de uitlopers van de droge dalen van de zuidelijke kalksteenplateaus (Figuur S6). Ze ontspringen vaak halverwege de droge beekdalen vaak in ZW-NO

gerichte zwaktezones. Deze bronnen kennen een karakter van duale permeabiliteit met een relatief snelle (5-30 jaar) en een relatief langzame component (>80 jaar, zie paragraaf 3.3). Qua nitraatconcentraties nemen ze een tussenpositie in: duidelijk lagere concentraties dan op het Centraal Plateau, maar wel een dalend verloop door de bijdrage van de jongere component (zie paragraaf 3.5). Veel van deze bronnen lijken niet alleen door de kalksteenformaties te worden gevoed, maar ook vanuit de dieper gelegen Formatie van Vaals.



Figuur S6: Hydrogeologische setting van de 6 onderzochte bronnen in de droge dalen van de zuidelijke kalksteenplateaus. Loess = okergeel, F. van Beegden = licht violet, F. van Gulpen is beige, F. van Vaals is groen, F. van Heyenrath is roodbruin. Bron: grondwaterkwaliteitinbeeld.nl.

3 Dateringonderzoek in 14 bronnen

3.1 Inleiding

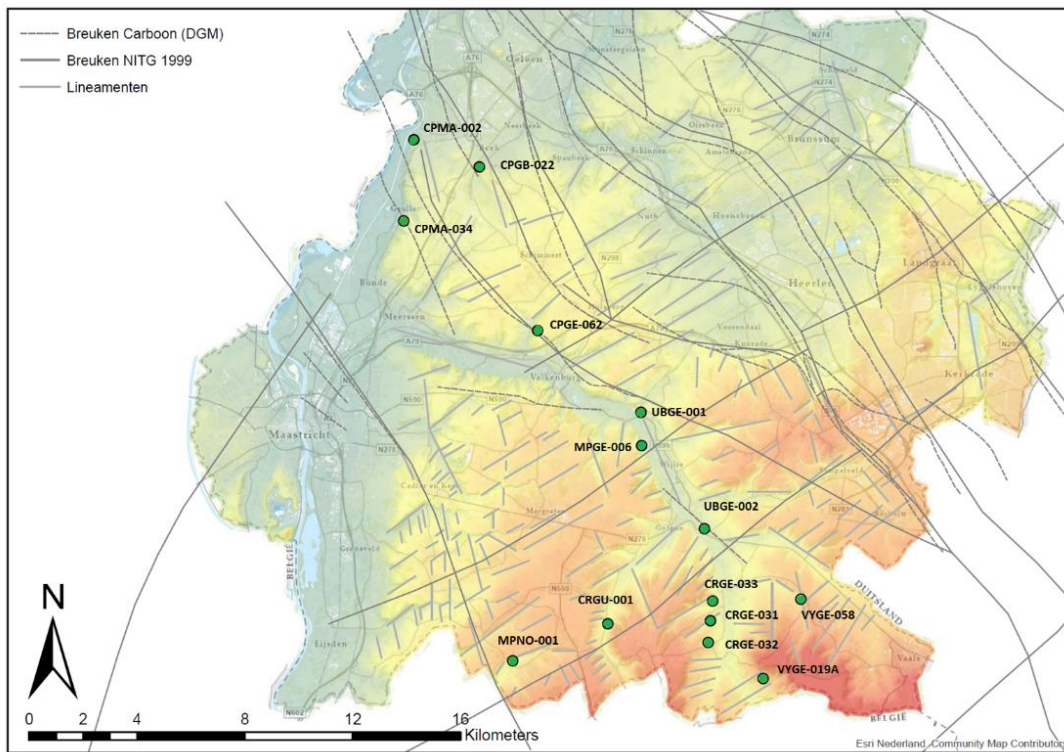
In eerdere rapporten is de leeftjidsverdeling van de bronnen in Zuid-Limburg besproken. Hendrix & Meinardi (2004) gebruikten tritium- en chloridemetingen uit 2001 voor een eerste karakterisatie van beken en bronbeken. In latere jaren zijn de tritiummetingen herhaald om de reistijdverdeling te verfijnen en een reconstructie te maken van de nitraatontwikkeling in de bronnen. Daarover is gerapporteerd in Broers en van Vliet (2018) waarin de resultaten van 80 bronnen zijn beschreven op basis van gegevens uit 2001 en 2009 en in van Vliet en Broers (2019) waarin voor 15 provinciale bronnen ook de provinciale tritiumgegevens uit 2017 en 2018 zijn betrokken. De aanpak die in deze rapporten werd gevolgd was gebaseerd op een black-box convolutiemodel met een van tevoren vastgestelde vorm van reistijdverdeling, waarbij de verzadigde zone werd beschreven met een exponentiele verdeling en de onverzadigde zone met een piston flow verdeling. In het rapport uit 2019 werd al geconstateerd dat die aanpak voor een aantal bronnen te wensen overliet omdat ze de veronderstelde duale porositeit en permeabiliteit onvoldoende in rekening bracht (zie Figuur 2.15 en

Figuur 3.2). In dit hoofdstuk wordt een nieuwe methodiek besproken en toegepast waarmee de reistijdverdelingen en nitraatprognoses zijn geactualiseerd.

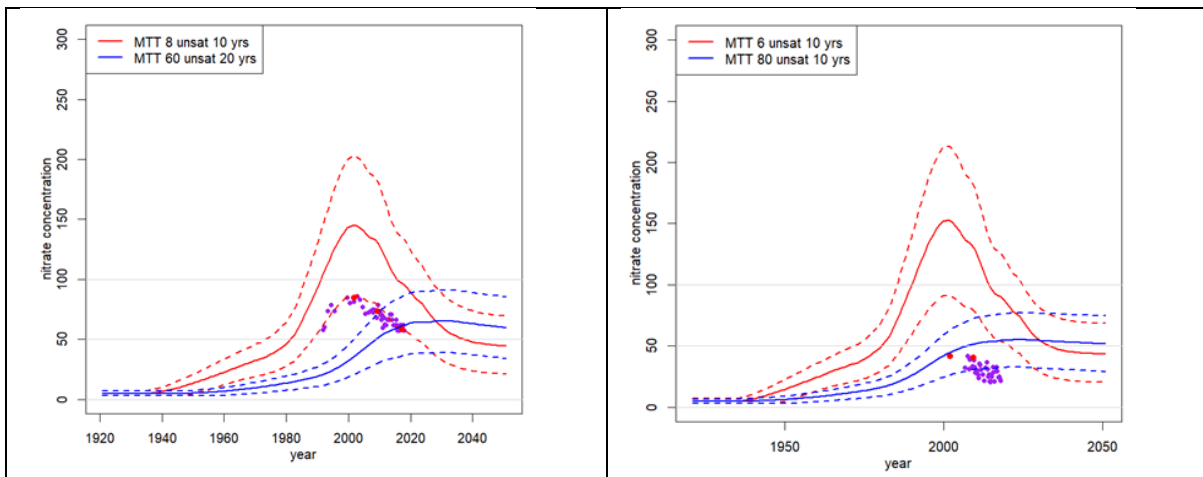
Aangezien de bronnen in verschillende onderzoeken op verschillende wijze worden aangeduid, is in Tabel 3-1 de naamgeving gespecificeerd. De provincie-code heeft daarbij betrekking op de naam van de bron in het provinciale bronnenmeetnet zoals die ook voor het KRW-meetnet Krijt-Maas is gebruikt (Broers et al., 2005). De RIVM-code is gebaseerd op werk van Hendrix & Meinardi (2004) en wordt veel gebruikt in rapportages over het Landelijk Meetnet Mestbeleid (Van Vliet et al. 2019). De positie van de bronnen is weergegeven in Figuur 3.1.

Tabel 3-1 De namen van de 14 geselecteerde bronnen met codes (RIVM-code uit Hendrix & Meinardi, 2004).

Naam	Provincie code	RIVM code
Elsloo	CPMA-002	n.002
Geulle	CPMA-034	n.010
Valkenburg	CPGE-062	n.020
Schoonbron	UBGE-001	n.037s
Beek	CPGB-022	n.091
St. Brigidabron	MPNO-001	z.001
Paulusbron	CRGE-032	z.025
Nutbron	CRGE-031	z.027
Landeus	CRGE-033	z.028
Beutenaken	CRGU-005	z.035
Wijlre	MPGE-006	z.039
Kasteel Wittem	UBGE-002	Z.203
Bermetijn bron	VYGE-058	Z.205
Belletbron	VYGE-019A	Z.210



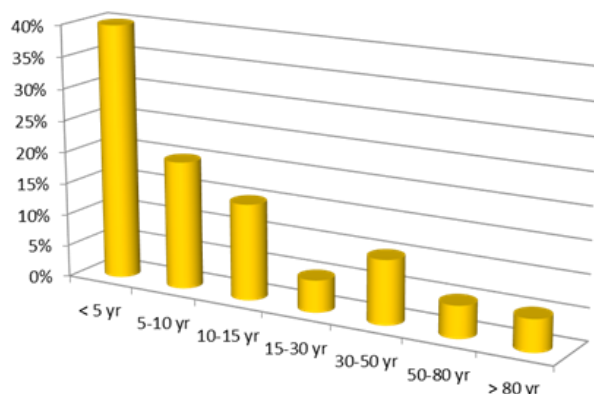
Figuur 3.1 Geselecteerde bronnen met provincie-code uit het bronnenmeetnet zoals dat ook voor de KRW-rapportage gebruikt wordt.



Figuur 3.2 Resultaten van de modellering van de reistijdverdeling van de St. Brigidabron (links) en de Landeus bron (rechts), die niet goed te fitten waren met de gebruikte combinatie van een exponentieel en een piston flow model. Bij dit type bronnen lijkt er sprake te zijn van een snelle afvoercomponent, die leidt tot een duidelijke, vrij snelle toe- en afname van nitraatconcentraties in de bron en een langzame, oude afvoercomponent die tot een verdunning van de nitraatconcentraties leidt door een bijmenging van oud, nitraatloos water. Bij de Landeus bron leidt dat er bijvoorbeeld toe dat een “oud model” (blauw) de concentraties redelijk voorspelt, maar dat dit oude model de duidelijke afname van nitraatconcentraties niet kan verklaren; die afname lijkt qua helling meer op het jongere rode model.

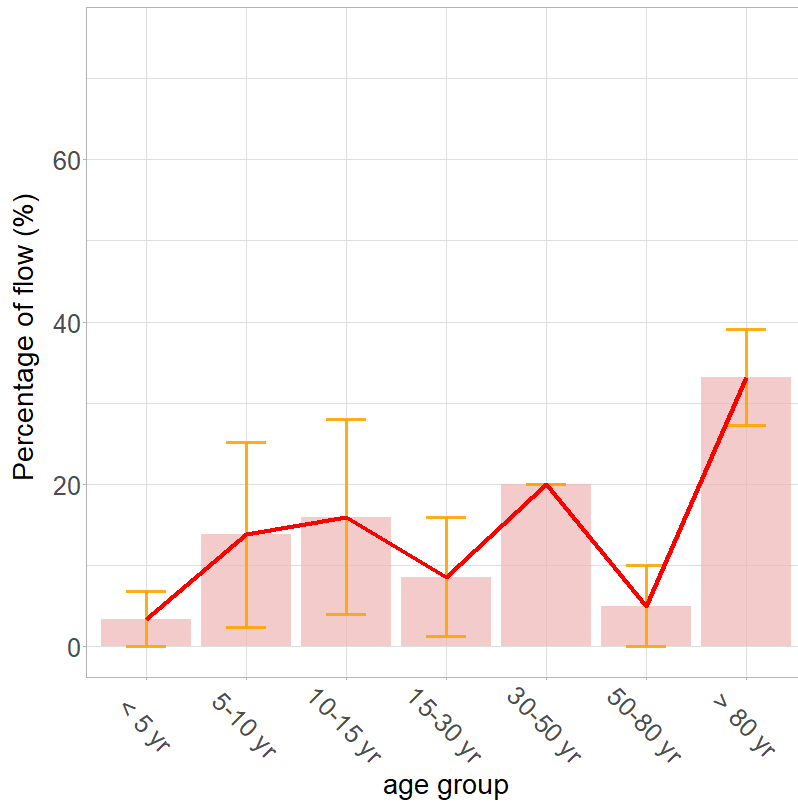
3.2 Methodiek dual porosity modellering

In het GeoERA onderzoek CHAKA is geëxperimenteerd met een verdelingsvrije methode, die elke mogelijke combinatie van jonger en ouder water in de reistijdverdeling mogelijk maakt. Die methode is eerder gebruikt in onderzoek te Holten (Visser et al., 2013) en in Noord-Brabant (Broers & de Weert, 2015, Broers et al., 2021). Met die methode zijn de 14 provinciale bronnen opnieuw gemodelleerd. In de verdelingsvrije methode (*shape-free method*) worden 7 bakjes met een verschillende reistijd gevuld in stapjes van 10%. Elk bakje kan voor minimaal 0% en maximaal 100% worden gevuld, maar het totaal in alle bakjes samen is 100%. In het voorbeeld van Figuur 3.3 is dus 40% gevuld met water dat minder dan 5 jaar oud is, 20% met water tussen de 5 en 10 jaar oud, 15% met water tussen 10 en 15 jaar oud, etc. Alle bakjes tellen dan samen op tot 100%. In totaal zijn er met stappen van 10% en met 7 bakjes zijn er dan 8008 verschillende reistijdverdelingen mogelijk. Voor al die mogelijke 8008 combinaties van reistijdverdelingen is uitgerekend wat de betreffende tritium- en nitraatconcentraties zouden zijn in elk van de meetjaren tussen 1950 en 2050.

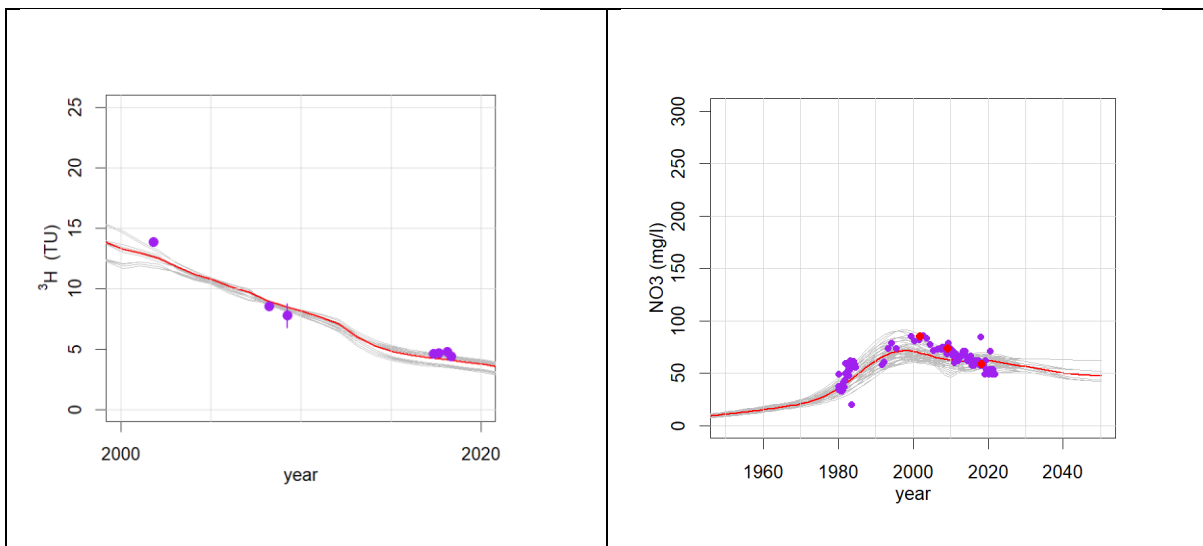


Figuur 3.3 Bakjesmodel dat gebruikt is voor de verdelingsvrije methode om reistijdverdelingen mee te evalueren. Elk van de 7 bakjes kan worden gevuld met 0%, 10%, 20% ... 100% van de afvoer van de bron. Samen bevatten de bakjes maximaal 100% van de afvoer van de bron. Er zijn 8008 mogelijkheden om deze bakjes te vullen.

Die nitraat- en tritiumconcentraties van de 8008 bakjes zijn daarna vergeleken met de gemeten tritium- en nitraatconcentraties over alle jaren waarover die metingen beschikbaar zijn. Van 50 van 8008 van deze reistijdmodellen die het beste pasten bij de gemeten tritium- en nitraatconcentraties zijn vervolgens de gemiddelde percentages bepaald en hun standaardafwijking. Op die manier worden de gemiddelde reistijdverdeling, de gemiddelde reistijd en de onzekerheid rond die gemiddelden vastgesteld.



Figuur 3.4 Verdelingsvrije reistijdverdeling voor de St. Brigidabron. De rode lijn en de roze balkjes geven de gemiddelde percentages weer van de bijdrage van de reistijdklasse aan de afvoer van de bron. De oranje error bars geven de onzekerheid rond die schatting aan als standaarddeviatie rond dit gemiddelde.

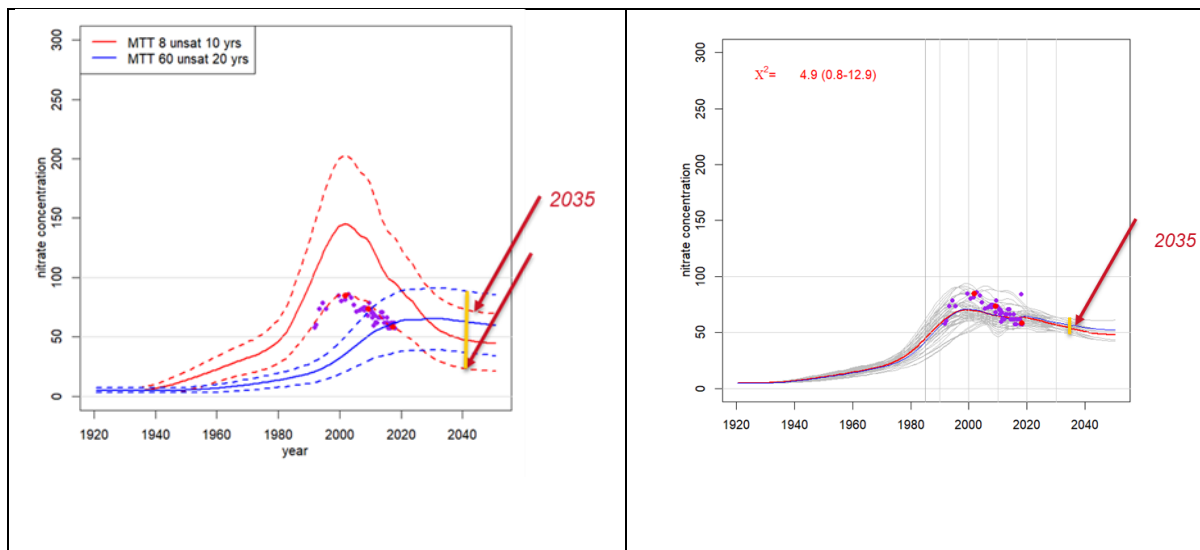


Figuur 3.5 Fit van de tritiumconcentraties (links) en de nitraatconcentraties (rechts) voor de St. Brigidabron (z.001, MPNO-001). De grijze lijnen geven alle 50 realisaties die het beste pasten bij de gegeven nitraat- en tritiumconcentraties. De rode lijn geeft het gemiddelde van deze 50.

De resultaten van de modellering zijn weergegeven in Figuur 3.5. Voor de St. Brigidabron is zowel de tritiumreeks als de nitraatreeks goed te reconstrueren op basis van de in Figuur 3.4 afgeleide reistijdverdeling. De rode lijn geeft hierbij de gemiddelde schatting van zowel tritium als nitraat. De grijze lijnen tonen de resultaten alle andere 50 best-fit modellen, en geven daarmee een onzekerheidsband rond de gemiddelde schatting. De St. Brigidabron is dus inderdaad met een dual stromingsmodel te reconstrueren: 43% van het afgevoerde water is jonger dan 30 jaar en 33% ouder

dan 80 jaar. De gemiddelde reistijd naar de bron bedraagt 50 jaar; maar dit getal zegt eigenlijk minder dan de fractie jong water (42%) en de fractie oud water (33%). Die fracties zijn daarmee een betere manier om de reistijdverdeling te karakteriseren dan de gemiddelde reistijd van 50 jaar (zie ook paragraaf 3.3).

De nieuwe manier van modelleren heeft ook voordelen voor de extrapolatie van de nitraatontwikkeling naar de belangrijke KRW-jaren 2027 en 2035. Figuur 3.6 toont hoe die extrapolatie tot nu toe plaats vond op basis van het onderzoek uit 2018 en 2019, en hoe die extrapolatie nu kan plaatsvinden.

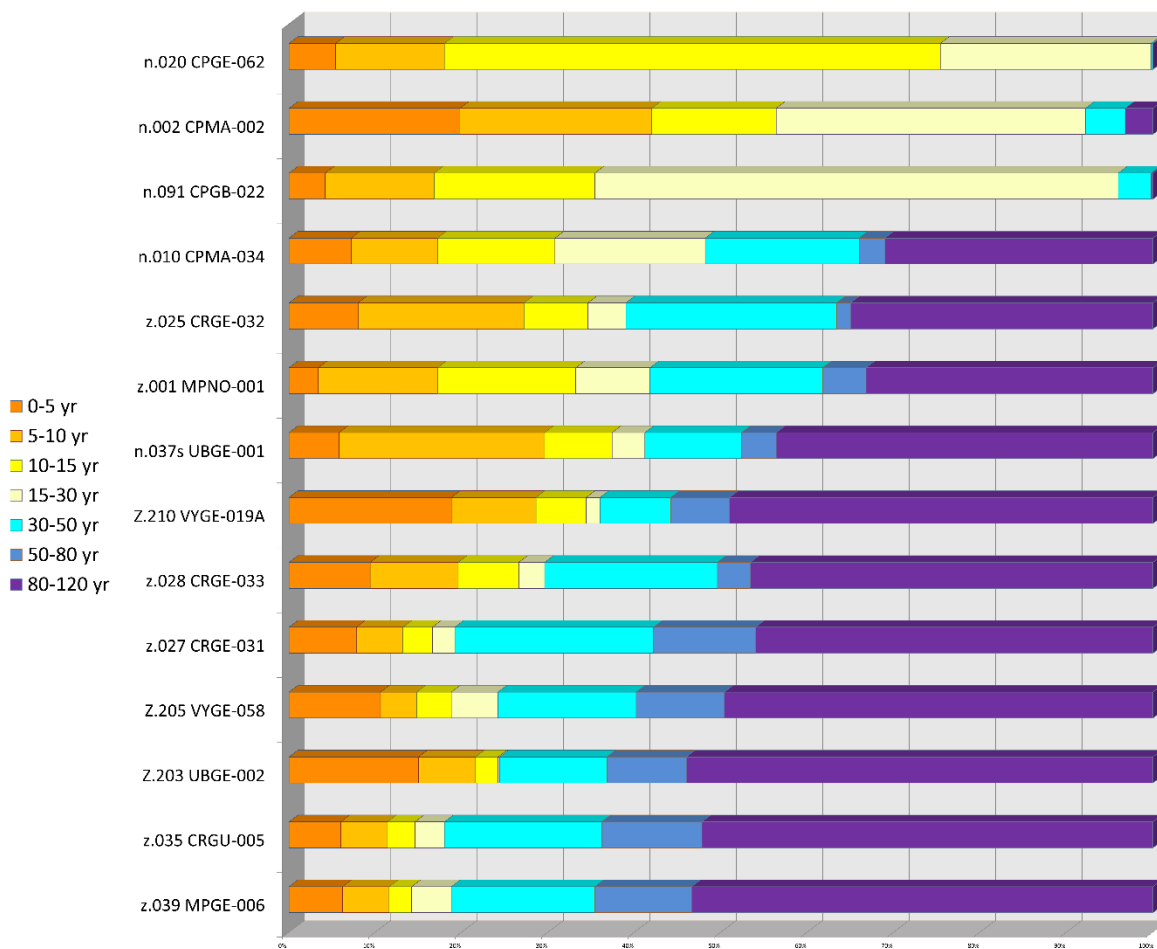


Figuur 3.6 Extrapoleren van de ontwikkeling in de nitraatconcentratie naar 2027 en 2035. Links: oude methode (Broers en van Vliet, 2018). Bij die methode moest eerst een arbitraire keuze tussen het jonge model (MTT 8 jaar) en het oude model (MTT 60 jaar) plaatsvinden, en lagen de gemeten waarden niet altijd op de meest waarschijnlijke prognose (dikke rode lijn). Rechts: nieuwe GeoERA-methode uit dit rapport die tot een wat minder ambiguë extrapolatie met veel kleinere bandbreedte leidt.

3.3 Reistijdverdelingen van de 14 bronnen

Op dezelfde manier is ook de reistijdverdeling bepaald van de andere 13 bronnen in dit onderzoek. De resultaten van de studie voor de individuele bronnen worden gepresenteerd in de factsheets die in hoofdstuk 6 worden beschreven. In dit hoofdstuk worden de reistijden van de bronnen in onderlinge samenhang gepresenteerd.

In Figuur 3.7 zijn de reistijdverdelingen als staafdiagrammen gepresenteerd. De 7 reistijdklassen hebben daarbij eigen kleuren; donkeroranje voor het jongste water met een leeftijd kleiner dan 5 jaar, tot donkerpaars voor het oudste water dat ouder is dan 80 jaar. Uit de figuur blijkt dat een aantal bronnen bijna uitsluitend water met een leeftijd < 30 jaar afvoeren (met name CPGE-062, CPMA-002 en CPGB-022). De 4 bronnen met de jongste leeftijdsverdeling zijn alle gelegen rond het Centraal Plateau. Andere bronnen voeren juist veel ouder water af; bij de bronnen MPGE-006, CRGU-005, UBGE-002, VYGE-058, CRGE-031 en VYGE-019A is meer dan 50% van het water ouder dan 80 jaar. De bronnen CPMA-034, CRGE-032, CRGE-033 (Landeus), MPNO-001 (St. Brigida) en UBGE-001 nemen een intermediaire positie in met zowel een grote fractie jong als een grote fractie oud water.

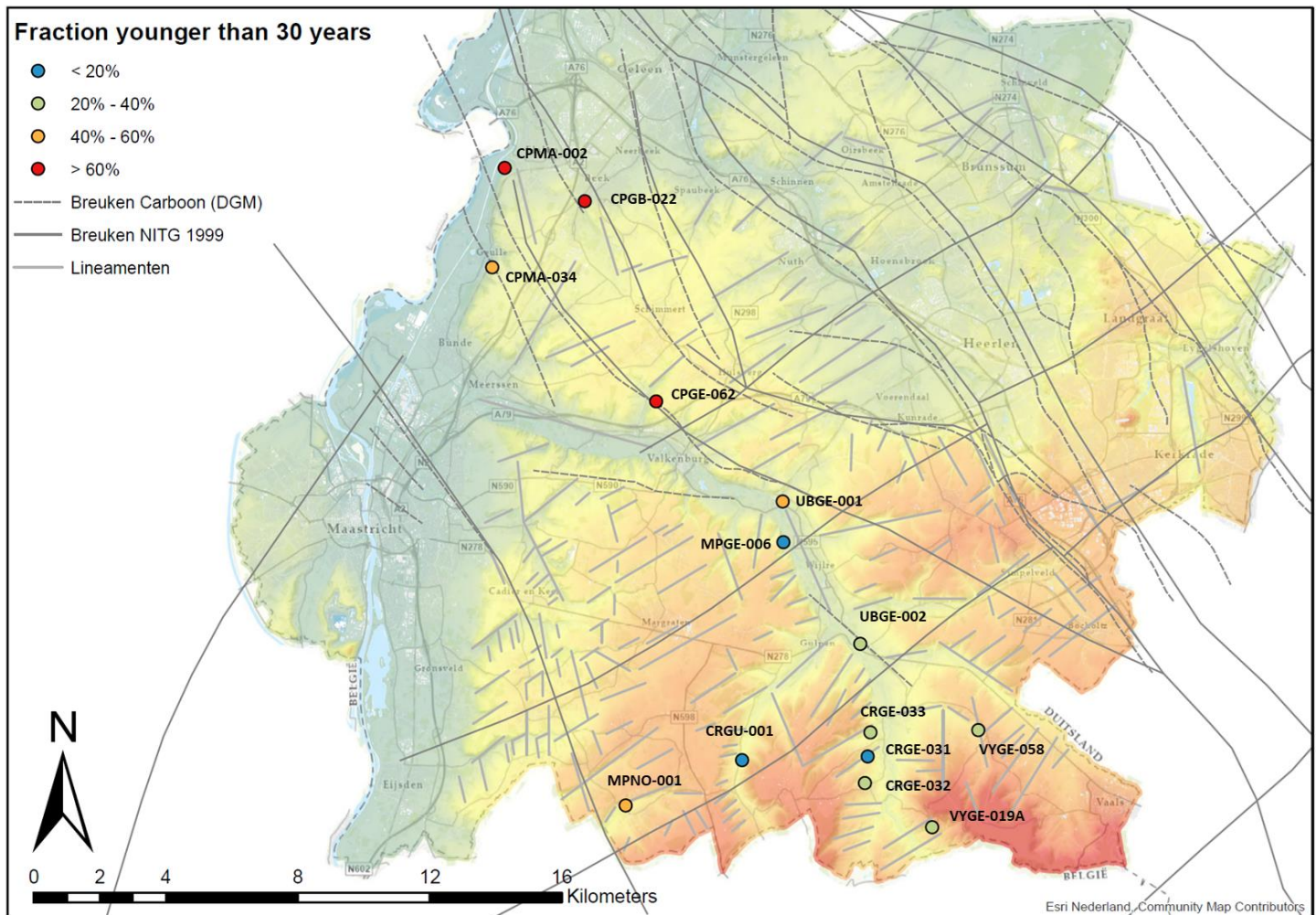


Figuur 3.7 Reistijdverdelingen van 14 bronnen uit het provinciale meetnet van Limburg.

3.4 Hydrogeologische positie en reistijdenverdeling

Er is een duidelijke relatie tussen de afgeleide reistijdverdelingen en de hydrogeologische setting van de bronnen. Figuur 3.8 toont de locatie van de bronnen in relatie tot de topografische positie. De bronnen met het jongste water in de mix liggen alle 4 rond het Centraal Plateau. Op dit plateau zijn de kalksteenaquifers van de Formaties van Gulpen, Maastricht en Houthem op grotere diepte aanwezig en worden ze afgedekt door tertiaire afzettingen, met een afwisseling van zand en kleilagen van de Formaties van Tongeren, Rupel en Breda (respectievelijk blauw, paars en grijsgroen in Figuur 2.11). Het water uit de bronnen ontspringt vanuit deze ondiepere tertiaire aquifers of zelfs vanuit de daarboven gelegen rivierzanden en -grinden van de Formatie van Beegden. Dat laatste geldt zeker voor de bron met het jongste water (CPGE-062) die zeer hoog in het beekdal ontspringt. Bron CPMA-034 toont een iets minder jonge verdeling: deze bron lijkt een iets diepere laag in de tertiaire aquifers te ontwateren, mogelijk ook in relatie met een NW-ZO gerichte breukzone in de ondergrond. Overigens onttrekt de winning Geulle haar water uit de nog dieper gelegen kalksteenaquifers. Van die winning is wel een tritiumconcentratie bekend uit 1983 van 23.7 TU. Dit duidt op een zekere

bijmenging van jong water in het onttrokken water, maar de ene tritiummeting is onvoldoende om een reistijdverdeling te kunnen schatten.



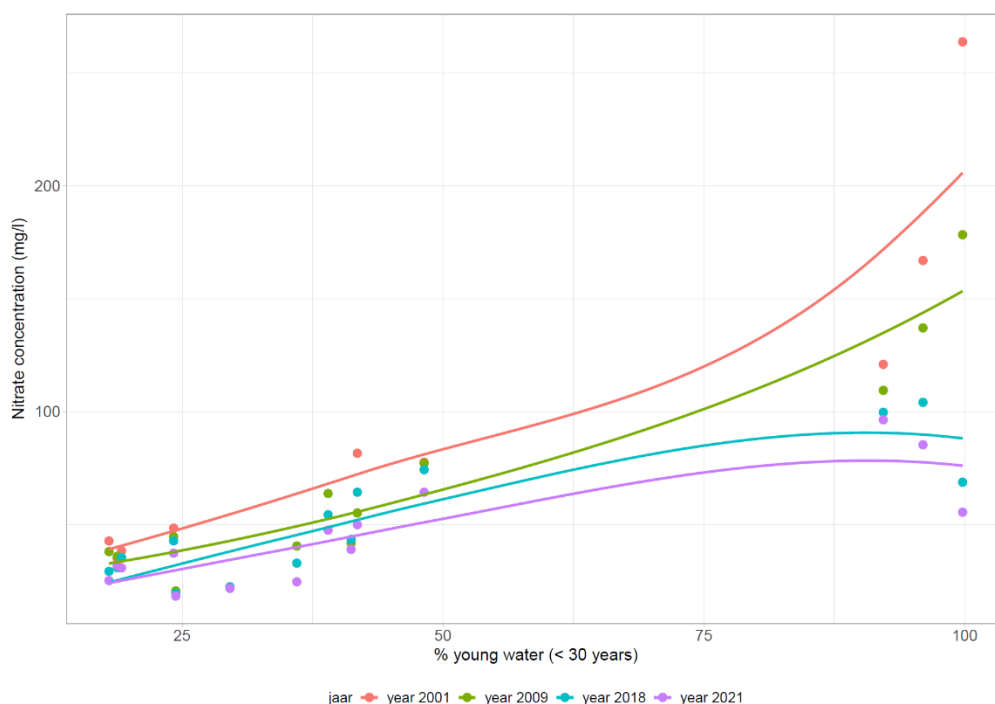
Figuur 3.8 Fractie jong water in de 14 onderzochte bronnen in relatie tot de topografische positie.

Een mix met beduidend ouder water wordt aangetroffen rond de zuidelijke kalksteenplateaus. Het relatief meest oude water ontspringt in bron MPGE-006 (Wijlre), aan de westelijke steile dalrand waar de Geul langs het plateau van Margraten stroomt. Veel van de bronnen zijn daar gelegen op de hellingknik tussen het plateau en het alluviaal opgevulde beekdal of in het beekdal zelf. Dat geldt bijvoorbeeld voor bron UBGE-001 (Schin op Geul) en UBGE-002 (kasteel Wittem) en in het Gulpdal voor de bron bij Beutenaken (CRGU-005). De overige bronnen liggen wat hoger op de plateaus: de St. Brigidabron ontspringt halverwege het droge beekdal van de Noorbeek; de Nutsbron, Paulusbron en de Landeus (CRGE-031, 32 en 33) ontspringen halverwege de oostelijke droge dalen van het plateau van Crapoel, de bronnen VYGE-058 en VYGE-019A ontspringen op de hellingen rond het plateau van Vijlen. Elk van deze bronnen voert een deel jong water af, het meest bij de St. Brigida en Schin op Geul, maar ook een flinke portie water dat ouder is dan 50 jaar. Dit wordt grotendeels verklaard door de andere hydrogeologische opbouw, zoals in Figuur 2.12 wordt weergegeven. De stroming vindt met name plaats door de kalksteenformaties of de daaronder gelegen Formatie van Vaals. Vermoedelijk heeft de meeste stroming plaats door zwaktezones en spleten in het gesteente, die deels door verkarsting zijn beïnvloed (zie bijv. Figuur 2.13).

3.5 Nitraatconcentraties en de reistijdverdeling

Er is een duidelijke relatie tussen de concentratie nitraat en de reistijdverdeling (zie Figuur 3.9). De hoogste nitraatconcentraties worden gemeten in de vier bronnen met de grootste fracties jong water. Opvallend is dat in die bronnen de concentraties ook hard zijn gedaald tussen 2001 en 2021 (vergelijk rode en paarse lijn). Deze bronnen liggen rond het Centraal Plateau. Omdat de aquifers daar vrij dun zijn is de gemiddelde reistijd relatief kort, en is het hele grondwatersysteem sinds de jaren 70 van de vorige eeuw gevuld geraakt met nitraat. Nu de concentraties in het infiltrerende water afnemen ten gevolge van het mestbeleid sinds 1985 dalen de concentraties ook weer relatief snel.

De andere bronnen hebben zowel een kleiner percentage water van de laatste 30 jaar, als ook lagere nitraatconcentraties over de gehele meetperiode. Dit komt omdat het oudere water in de mix een verdunnende invloed heeft; er wordt bijgemengd met nitraatloos, oud water van voor de mestpiek. Opvallend is dat ook in die bronnen dalende nitraatconcentraties zijn tussen 2001 en 2021. Die daling is veel minder groot dan in de bronnen bij het Centraal Plateau, maar lijkt wel in alle bronnen consistent aanwezig te zijn. Die daling is dan afkomstig uit het jonge deel van de mix waarin de nitraatconcentraties dalen als gevolg van het mestbeleid.



Figuur 3.9 Relatie tussen de nitraatconcentratie in de 14 onderzochte bronnen in 2001, 2009, 2018 en 2021 en de fractie jong water (% jong water < 30 jaar in de reistijdverdeling).

De verschillen die uit Figuur 3.9 blijken kunnen nader worden geïllustreerd door drie voorbeelden te laten zien van de afgeleide reistijdverdeling en de reconstructie en prognose van de nitraatconcentraties (Figuur 3.10); de drie voorbeelden zijn representatief voor de bronnen rond het Centraal Plateau (a), de bronnen in de grote beekdalen (b) en de bronnen in de droge dalen op de zuidelijk plateaus (c).



Figuur 3.10 Histogram van de afgeleide reistijdverdeling (links) en ontwikkeling en reconstructie nitraatontwikkeling in 3 bronnen die representatief zijn voor de 3 genoemde groepen. Boven: bron Elsloo (Centraal Plateau), midden: bron Wijlre (bronnen in grote beekdalen) en beneden: St. Brigidabron (bronnen zuidelijke kalksteenplateaus).

Figuur 3.10 illustreert de grote verschillen tussen deze bronnen:

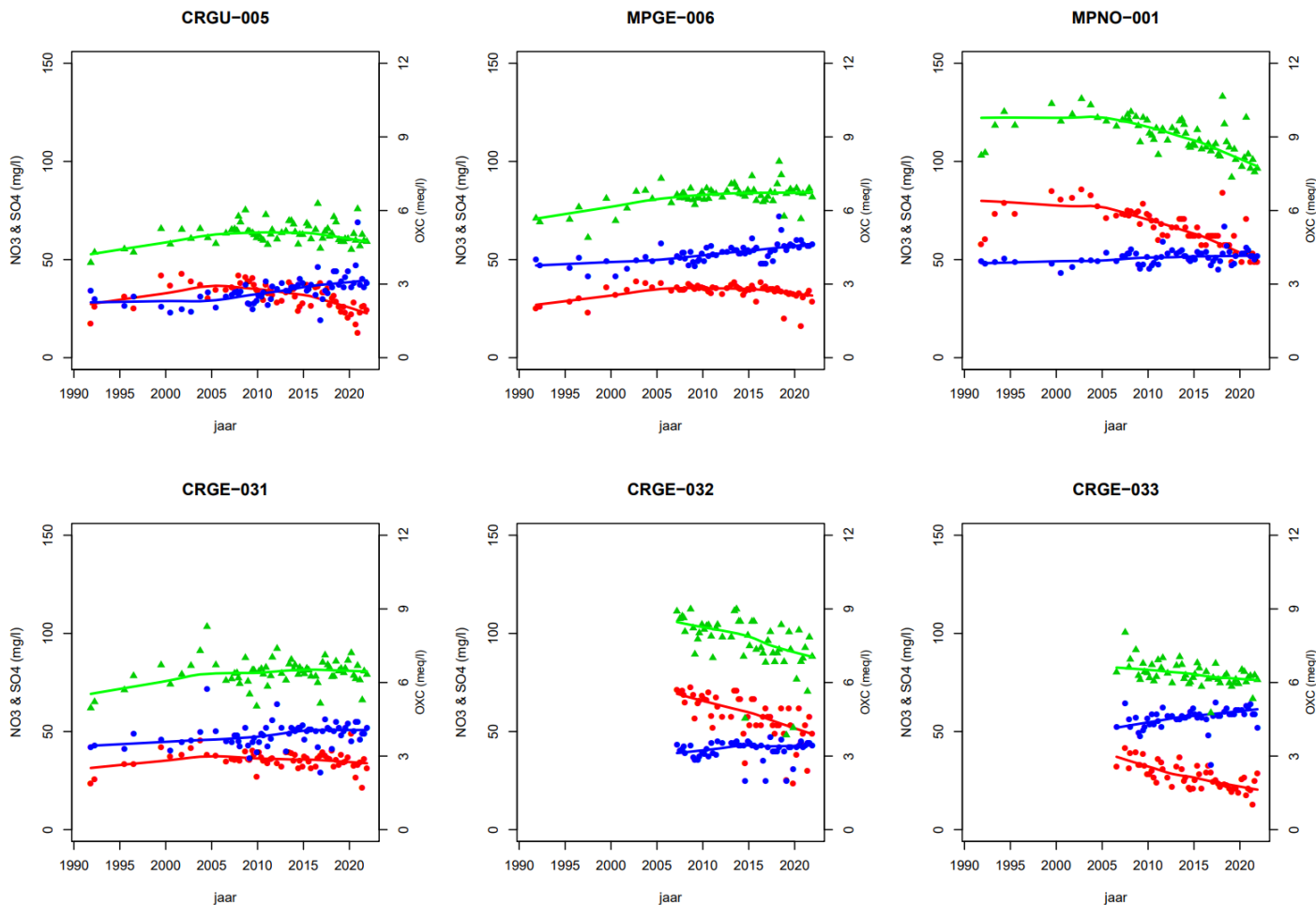
- relatief jong water in de bronnen op het Centraal Plateau wat zich uit in hoge nitraatconcentraties ten gevolge van de piek in mestbelasting rond 1995 en een snelle daling nadien, met concentraties die zich ook nu nog ruim boven de 50 mg/l bevinden;
- relatief oud water in de bronnen in de grote beekdalen, met duidelijke lagere concentraties nitraat door de bijmenging van ouder nitraatloos water met een stabilisatie van de nitraatconcentraties sinds ca. 2010;
- een bimodaal karakter van de reistijdverdeling bij de bronnen op de zuidelijke plateaus, met nitraatconcentraties die rond 2000 op een lager niveau pieken dan op het Centraal Plateau, maar met een duidelijke, maar langzamer afname van de nitraatconcentraties sinds die tijd.

3.6 Aanwijzingen voor denitrificatie in de Formatie van Vaals en stijgend sulfaat

Mogelijkerwijs worden de lagere nitraatconcentraties bij enkele bronnen van de zuidelijke plateaus mede veroorzaakt omdat een deel van het jongere water toestroomt via de onder de kalksteen gelegen Formatie van Vaals. Indien het jongere nitraathoudende water de Formatie van Vaals zou bereiken, dan zou denitrificatie een rol kunnen gaan spelen. Vooral omdat in de Formatie van Vaals naast het mineraal glauconiet ook het mineraal pyriet aanwezig is (Felder & Bosch, 2000) dat zou kunnen reageren met nitraat, waarbij sulfaat zou vrijkomen. In de reistijdmodellering is daarmee nog geen rekening gehouden omdat het een extra verklarende factor zou toevoegen waarover vrijwel niets bekend is; op die manier zou het aantal mogelijke vrijheidsgraden voor het model te groot worden voor de hoeveelheid beschikbare data. In de modellering is er tot op heden van uitgegaan dat het jonge, nitraathoudende water toestroomt vanuit de kalksteen, waarin denitrificatie geen rol speelt. Dat komt overeen met de waarneming dat bij geen van de bronnen is waargenomen dat er ook Fe-houdend water zou uittreden; vaak is dat zichtbare aan oranjekleuring van het sediment of aan vliesjes van ijzerbacteriën. De aanname is dus feitelijk dat bij eventuele doorstroming van de Formatie van Vaals alleen oud, nitraatloos water is betrokken. Dat leek tot op heden een verantwoorde aanname die past bij alle observaties tot nu toe.

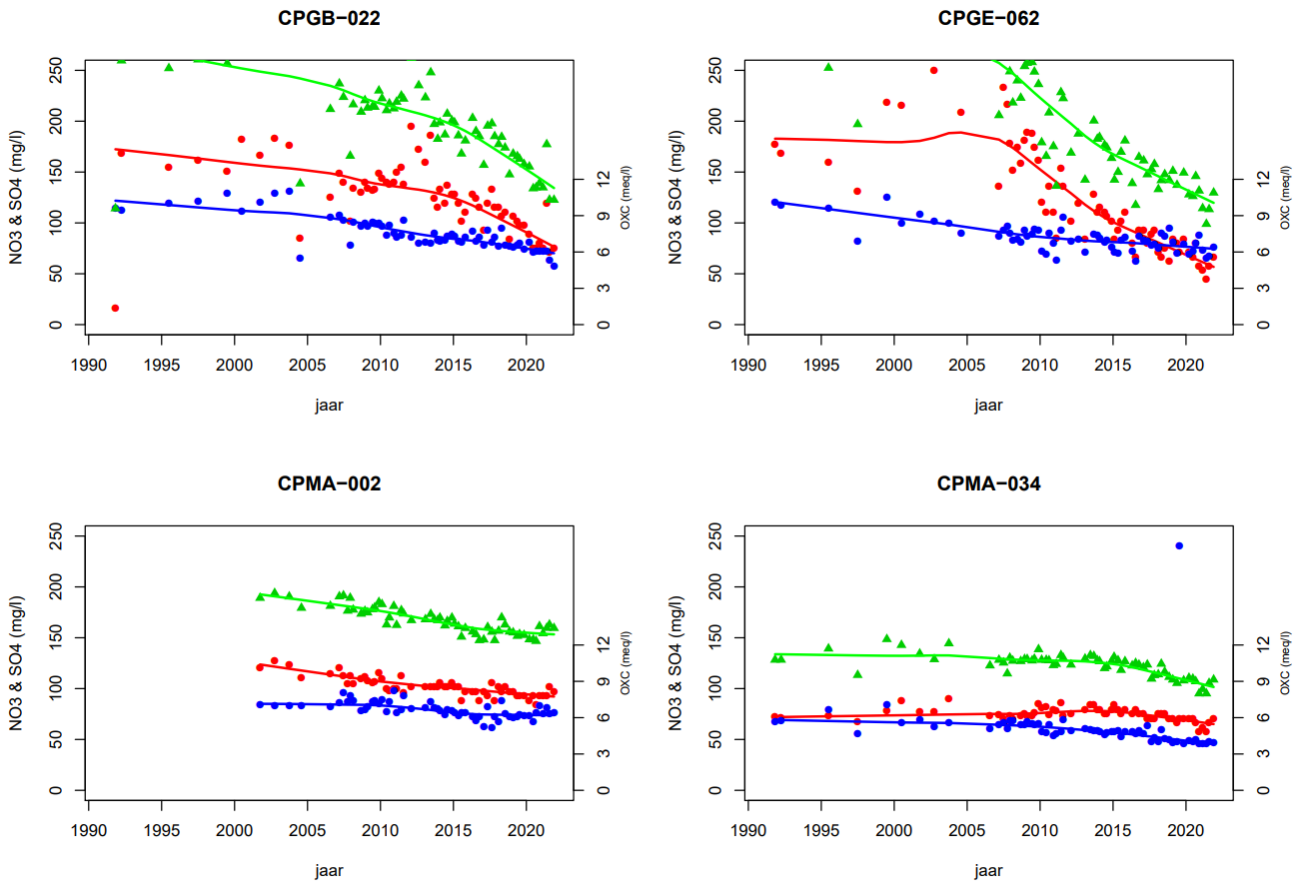
De vraag of er ook een substantiële bijdrage vanuit de Formatie van Vaals in de bronnen aanwezig is, is voor de prognoses van de kwaliteitsontwikkeling wel van belang. Boormonsters uit de Formatie van Vaals laten zien dat een deel van het sediment is geoxideerd, maar een ander deel niet, wat zich uit in grijze en groengrijs gekleurde sedimenten. In die gereduceerde delen van de Vaals is zowel glauconiet als pyriet aanwezig (Felder & Bosch, 2000). Bij een aantal bronnen is toestrooming vanuit de Formatie van Vaals waarschijnlijk. Dat is het geval bij de St. Brigidabron en met name in het beekdal van de Noor ten zuidwesten van de bron zijn er aanwijzingen van kwel in de beekbodem. Die kwel in het beekdal moet haast wel uit de Formatie van Vaals komen, omdat die formatie hier dicht onder het maaiveld ligt. Ook bij de bronnen ten oosten van het Plateau van Crapoel (CRGE-31 tot 33) ligt een zekere toestrooming vanuit de Formatie van Vaals voor de hand omdat de bronnen vanuit die formatie lijken te ontspringen (zie bijvoorbeeld Figuur 2.12).

Om hier meer zicht op te krijgen is het nuttig ook de sulfaatconcentraties te betrekken in de analyse. Een complicerende factor is dat de sulfaatconcentraties van het onder de landbouwpercelen infiltrerende water erg slecht bekend zijn (Broers & van Vliet, 2018). Daardoor kan sulfaat niet goed worden gemodelleerd met het reistijdenmodel en zijn de sulfaatconcentraties in de bronnen niet goed te relateren aan ofwel infiltratiewater ofwel pyrietoxidatiewater uit de Formatie van Vaals.



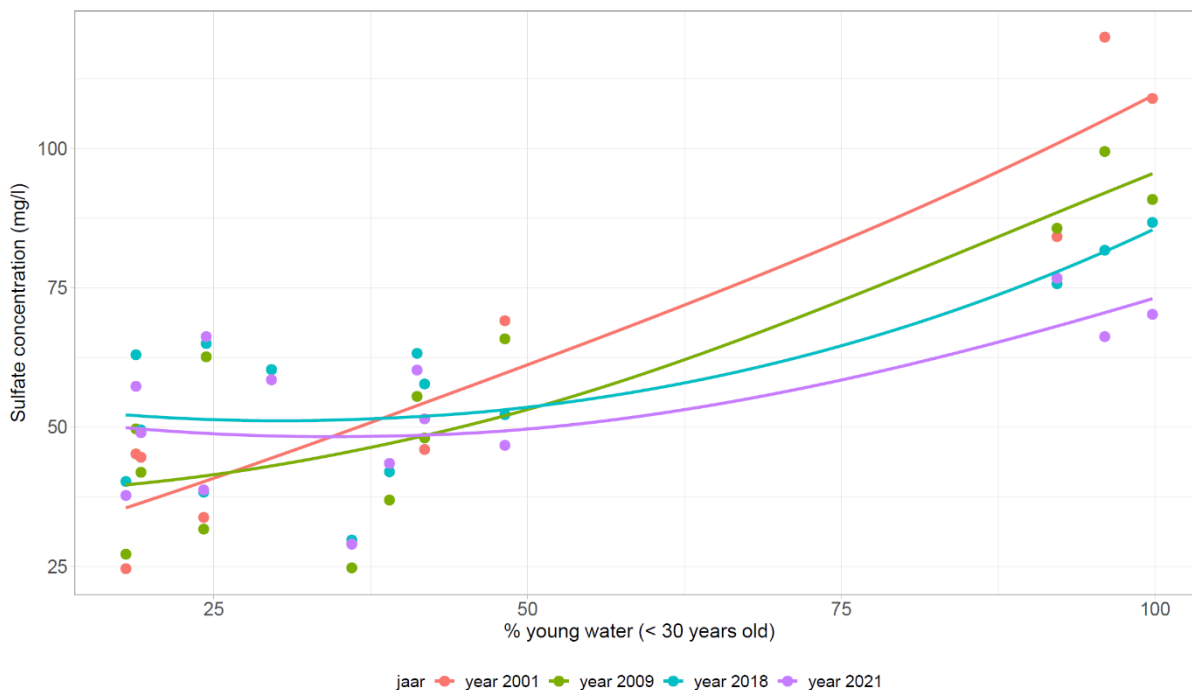
Figuur 3.11 Concentraties van nitraat (rood), sulfaat (blauw) en OXC (groen) voor 6 bronnen rond de zuidelijke kalksteenplateaus op basis van data uit het bronnenmeetnet van de provincie Zuid-Limburg. In een aantal van deze bronnen is sulfaat geleidelijk aan het stijgen terwijl de mestinvoer OXC afneemt (MPNO-001, CRGE-032 en vooral CRGE-033). Bij andere bronnen lijkt de mestbelasting te stabiliseren (CRGU-005, CRGE-031 en MPGE-006), neemt nitraat iets af, maar stijgt sulfaat. In bron MPGE-006 bijvoorbeeld, die veel oud water omvat, daalt nitraat wel, maar stijgt sulfaat geleidelijk en is de netto mestbelasting vrij stabiel gezien de stabiele OXC. Bij de St. Brigidabron (MPNO-001) dalen zowel nitraat als de OXC, wat wijst op een afnemende mestinvoer, maar stijgt sulfaat heel geleidelijk.

Toch zijn er aanwijzingen dat sulfaatconcentraties in een aantal bronnen wat aan het stijgen zijn, wat kan worden gerelateerd aan nitraat dat de Formatie van Vaals heeft bereikt. Dat speelt met name bij de bronnen CRGE-032 en CRGE-033, maar lijkt ook bij MPNO-001 en MPGE-006 een zekere rol te spelen (zie Figuur 3.11). Het speelt echter niet bij de bronnen op het noordelijker gelegen Centraal Plateau: ter referentie is daarom Figuur 3.12 opgenomen. Uit die figuur blijkt dat in de bronnen op het Centraal Plateau in alle gevallen zowel een daling van nitraat en sulfaat aanwezig is, en dus ook een daling van de uit nitraat en sulfaat samengestelde indicator OXC. OXC is vaak een goede indicator voor vermessing (o.a. Broers, 2004, Zhang et al., 2007). Dat is in overeenstemming met de kennis dat zowel nitraat als sulfaat verhoogd zijn in infiltrerend, bemest water (zie bijv. Visser et al., 2009). Deels komt die sulfaat in het infiltrerende water uit atmosferische depositie, maar sinds de jaren '80 is de bijdrage uit mest daarin dominant en sinds die tijd daalt zowel de atmosferische bijdrage als de mestbijdrage (Visser et al., 2009). Op de noordelijke plateaus is de gecombineerde daling van nitraat én sulfaat dus 1-op-1 te relateren aan een afname van de uitspoeling in de tijd.



Figuur 3.12 Concentraties van nitraat (rood), sulfaat (blauw) en OXC (groen) voor 4 bronnen rond het Centraal Plateau in de tijd. In elk van die bronnen dalen zowel nitraat als sulfaat, als OXC. OXC is daarbij de beste aanwijzing voor mestinvloed: dalende OXC duidt op vermindering van de mestbelasting op het bronwater. Bij elk van deze bronnen daalt sulfaat mee, al zijn de sulfaatconcentraties nog relatief hoog (tussen de 46 mg/l in 2021 voor bron CPMA-034 en 76 mg/l voor bron CPMA-002).

In de bronnen van de zuidelijke plateaus is die daling in sulfaatconcentraties niet zichtbaar (Figuur 3.11). In tegendeel, de sulfaatconcentraties lijken geleidelijk te stijgen in veel van deze bronnen, terwijl OXC op een afnemende of stabiele invloed van bemest water wijst. Dit zou gerelateerd kunnen zijn aan een deel van het nitratrijke water dat door de Formatie van Vaals stroomt: oxidatie van pyriet door een deel van het nitraat zou dan tot verhoogde sulfaatconcentraties kunnen leiden. Omdat de nitraatconcentraties in het jongere deel van de mix aan het dalen zijn, is de afnemende tendens er een van dalende nitraatconcentraties en dalende of stabiliserende OXC. Naarmate een groter deel van de mestgolf de Formatie van Vaals zou gaan doorstromen is een verdere toename van sulfaat dan mogelijk. Belangrijk is dat de sulfaatconcentraties nu nog lager zijn dan langs het Centraal Plateau; tussen de 38 en 60 mg/l.



Figuur 3.13 Relatie tussen de sulfaatconcentratie in de 14 onderzochte bronnen in 2001, 2009, 2018 en 2021 en de fractie jong water (% jong water < 30 jaar in de reistijdverdeling). In tegenstelling tot nitraat in Figuur 3.9 nemen de sulfaatconcentraties wel af in bronnen met een grote fractie jong water maar stijgen ze in de bronnen met een grote fractie oud water aan de linkerkant van de figuur. De gekleurde lijnen geven de LOWESS-kromme door de data: een bekende manier om het typische, mediane gedrag in een *scatterplot* te visualiseren (Cleveland, 1979).

Het hierboven geschetste patroon wordt bevestigd als we de sulfaatconcentraties uitzetten tegen de fractie jong water, op dezelfde manier als eerder gedaan voor nitraat (vergelijk Figuur 3.13 met Figuur 3.9). Voor bronnen met een grote fractie jong water is een duidelijke daling zichtbaar tussen 2001 en 2021; de afname van de sulfaatconcentraties tussen 2001 en 2021 valt samen met de afname van de nitraatconcentraties. Dat is logisch omdat in water dat uitspoelt onder landbouwgebieden niet alleen nitraat is verhoogd, maar ook sulfaat. Bovendien zijn in de laatste 30 jaar ook de sulfaatconcentraties in de atmosfeer en het regenwater verder afgenomen.

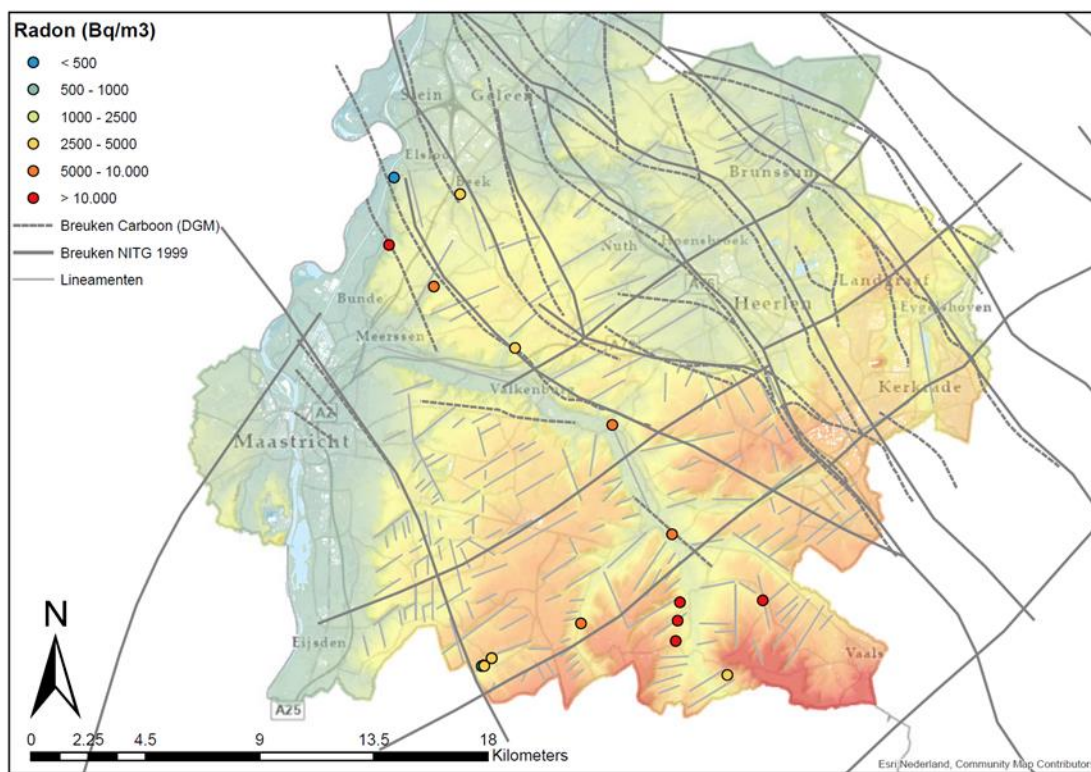
In bronnen met een kleine fractie jong water is volgens Figuur 3.13 echter iets bijzonders aan de hand, daar beginnen de sulfaatconcentraties op te lopen, met name sinds 2010 (zie ook Figuur 3.11). Dit langzaam oplopen van de sulfaatconcentraties relateren wij aan het voor het eerst bereiken van geologische formaties met daarin pyriet, door via bemesting beïnvloed, nitraathoudend water. Het oplopen van de sulfaatconcentraties is dan waarschijnlijk vooral bepaald door het doorstromen van de Formatie van Vaals, waarvan de minder goed doorstroomde delen nog pyriet bevatten, wat reageert met een deel van het langsstromende nitraat. De concentraties sulfaat zijn weliswaar nog laag, en de veranderingen zijn traag, maar mogelijk heeft deze toename op termijn ecologische consequenties voor de betrokken bronsystemen en beekdalen.

3.7 Haalbaarheidsstudie radon

Tijdens de bemonsteringscampagne voor opkomende stoffen op 12, 13, 19 en 20 juli 2021 (zie hoofdstuk 5) zijn de watermonsters ook in het veld geanalyseerd op de concentratie ^{222}Rn . Radon-222 is een vervalproduct uit de U/Th vervalreeks met een heel snelle vervaltijd van 3,7 dagen. De aanwezigheid van ^{222}Rn geeft dan ook een indruk over de korte termijn interactie met doorstroomd sediment; als water kortgeleden in contact was met sediment waarin enige mate van radioactief verval aanwezig is, dan zal de ^{222}Rn concentratie verhoogd zijn. Uit eerder onderzoek weten we inmiddels dat de ^{222}Rn concentraties uit verschillende geologische formaties kunnen verschillen afhankelijk van de mineralogische samenstelling. Het idee van de haalbaarheidsstudie was om na te

gaan in hoeverre de radonconcentraties tussen verschillende bronnen variëren, en of we die verschillen kunnen relateren aan de doorstroomde geologische formaties. Op voorhand schatten we in dat de Formatie van Vaals hogere ^{222}Rn zou meegeven aan het water dan de kalksteen, maar daarvoor hadden we geen bewijs. Ook verwachtten we hogere radonconcentraties in de kleihoudende tertiaire formaties, omdat we op andere plekken verhoogde radonconcentraties hebben gemeten in de Formatie van Breda.

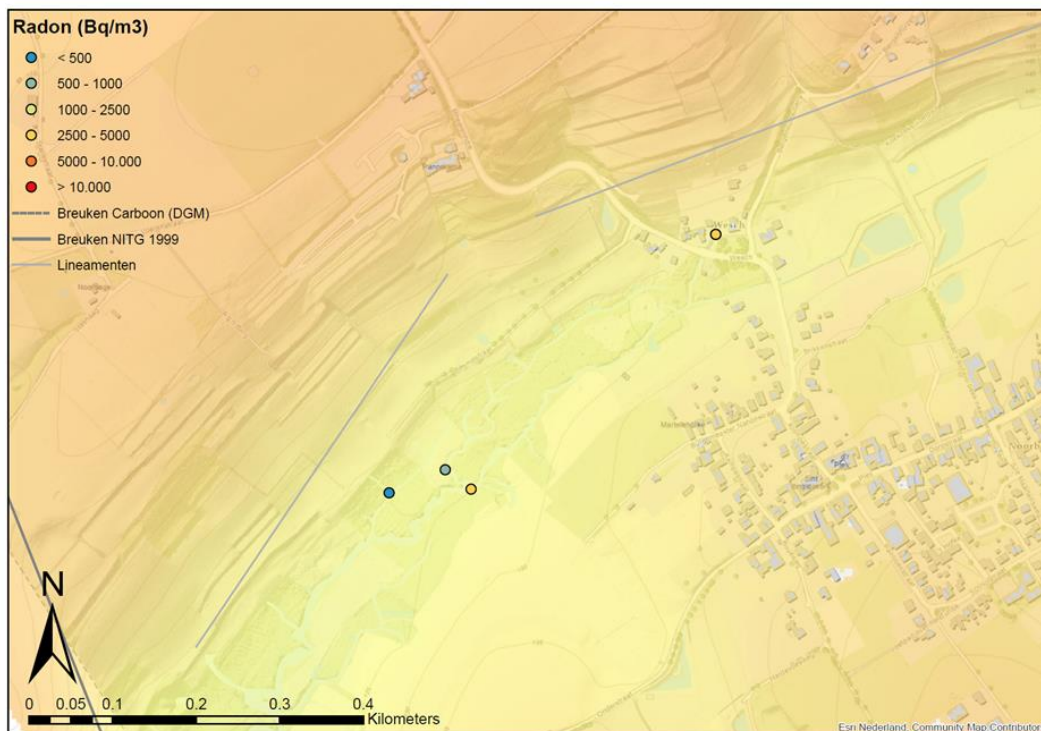
Figuur 3.14 toont de eerste resultaten van de studie. Er blijken inderdaad verschillen tussen de verschillende bronnen aanwezig te zijn. Hoge ^{222}Rn concentraties boven de 10.000 Bq/m^3 worden bijvoorbeeld gemeten in de bronnen CRGE-31 tot 33 aan de oostflank van het Plateau van Crapoel, maar ook in bron VYGE-058 en in bron CPMA-034. Matig hoge concentraties boven de 5000 Bq/m^3 vinden we in UBGE-001 en 002 (beide in het Geuldal) en in CRGU-005 in het Gulpdal. Voorlopig relateren we de hogere radonconcentraties bij het Plateau van Crapoel en bij VYGE-058 aan een bijdrage uit de Formatie van Vaals, en het hogere radon bij CPMA-034 aan het doorstromen van wat diepere tertiaire aquifers. We realiseren ons echter dat de dataset heel klein is, en de resultaten moeten dan ook als zeer voorlopig worden gezien. De hypothesen hierboven zouden wel passen bij de toenemende sulfaatconcentraties bij het Plateau van Crapoel en het relatief oude water in CPMA-034.



Figuur 3.14 Eerste resultaten haalbaarheidsonderzoek ^{222}Rn .

De radonconcentraties hielpen ook bij het ontrafelen van de situatie bij de St. Brigidabron. De bron zelf heeft verhoogde radonconcentraties van 4700 Bq/m^3 . Na de hoogwatergolf van 13-14 juli 2021, waarbij veel wateroverlast ontstond in Zuid-Limburg, waren de concentraties enkele dagen later gedaald naar ca. 4500 Bq/m^3 . Wij nemen aan dat dit het gevolg is van een bijmenging met wat jonger water. Die afname is heel gering, wat bevestigt dat de bron niet een supersnelle component heeft, in tegenstelling tot veel bekende karstbronnen in het buitenland (zie hoofdstuk 4). De radonconcentraties in de kleinere bronnen in het dal van de Noorbeek zijn weergegeven in Figuur 3.15. Opvallend is dat de radonconcentratie ook in de beek zelf op gelijke hoogte blijft (4250 Bq/m^3 op RIVM meetplek z.006), maar in de bronnetjes aan de randen van het beekdal veel lager is. Dit duidt

op een sterker contact met de ondergrond bij z.006 waar zandvulkaantjes in de beekdalbodem duidelijke aanwijzingen zijn voor grondwaterkwel ten opzichte van de zijbronnen die hun water waarschijnlijk ondieper uit het verspoelde hellingmateriaal in het beekdal tappen. De kwel in het beekdal moet eigenlijk wel uit de Formatie van Vaals afkomstig zijn omdat die het beekdal in deze formatie is ingesneden. Aangezien er geen sporen van ijzer aanwezig zijn in de vorm van roestkleuring of ijzer bacteriën-vliesjes, is deze kwel duidelijk nitraathoudend en niet ijzerhoudend.

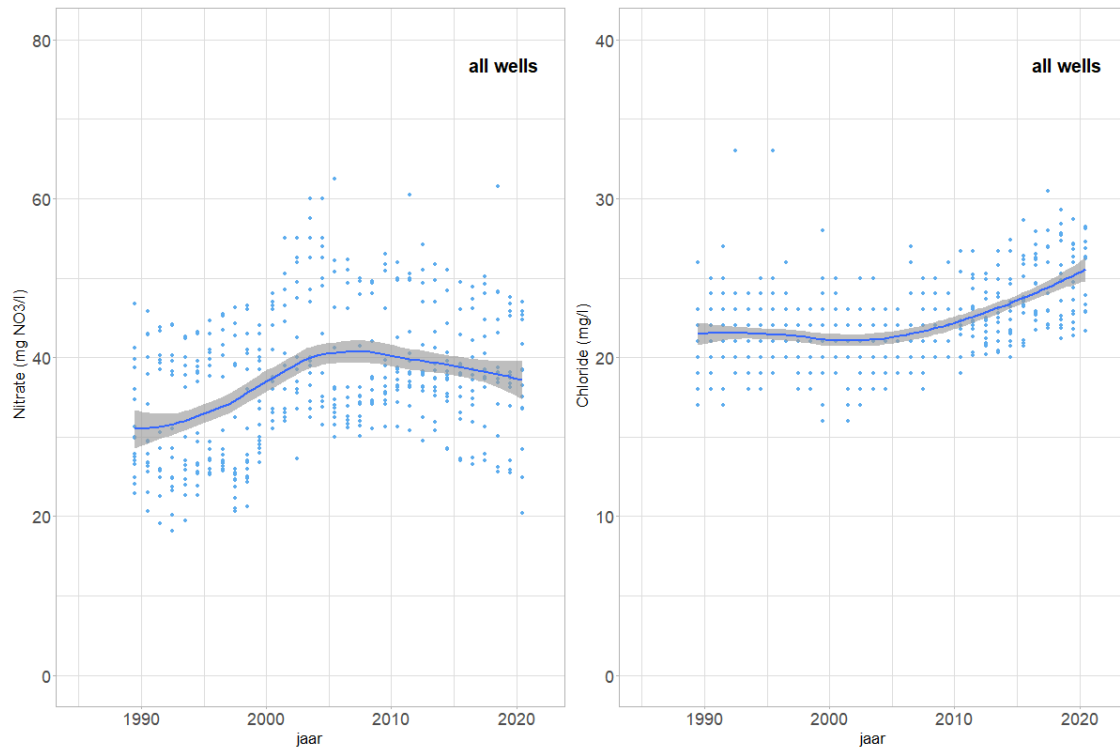


Figuur 3.15 Radonconcentraties in het dal van de Noorbeek te zuidwesten van de St. Brigidabron.

3.8 Reistijdenverdeling en nitraat bij ps. Roodborn

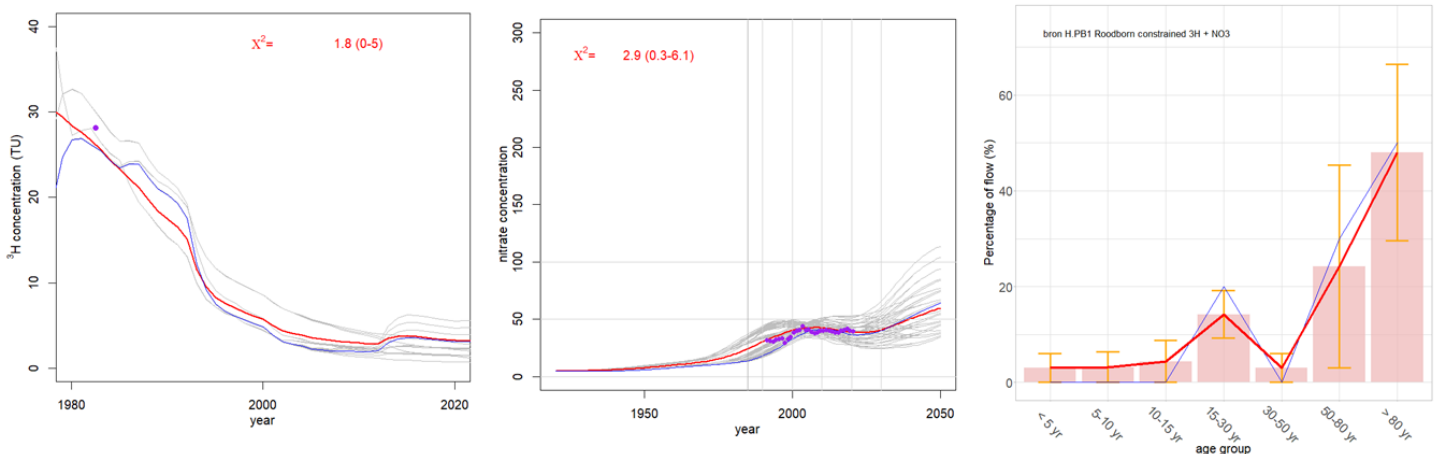
Het reistijdenmodel dat voor de bronnen is afgeleid is als test ook gebruikt om de kwaliteitsontwikkeling bij de winning Roodbron te onderzoeken. Van de winning Roodbron is slechts 1 tritiummeting beschikbaar, genomen in het rein water in 1982: 28,8 TU. Dat is eigenlijk te weinig om het verloop van tritium goed mee te nemen in het reistijdsverdelingsmodel, maar de enkele tritiummeting geeft wel een randvoorwaarde mee aan de afgeleide reistijdverdeling.

In het algemeen geldt dat elk van de 19 pompputten winning Roodborn een eigen verhaal vertelt; zowel de gemiddelde hoogte van de nitraatconcentraties verschillen, maar ook de vorm van de ontwikkeling is per put anders en ook de korte termijnvariaties verschillen. Duidelijk is wel dat de pompputten elkaar beïnvloeden. Na het sluiten bijvoorbeeld van PP19 is er een reactie te zien in de nabijgelegen PP18 en iets soortgelijks geldt voor PP14 en PP13. We kennen dit van de winning Holten (Broers et al., 2012), en daar werkte het goed om de concentraties van de gehele winning te middelen voor het bepalen van de globale reistijdverdeling. Dat is ook gedaan in Figuur 3.16 voor de winning Roodborn.



Figuur 3.16 Jaargemiddelde concentraties van nitraat (links) en chloride (rechts) van alle in het specifieke jaar actieve pompputten van de waterwinning Roodborn (elke blauwe stip representeert een van de 19 putten). Blauwe lijn = LOWESS-kromme (lokale mediaan door alle putten), grijze band = onzekerheidsband rond die LOWESS-kromme.

Uit Figuur 3.16 blijkt dat de nitraatconcentraties rond 2005 een piek bereikten en sindsdien licht dalen. Bijzonder is dat chlorideconcentraties dit patroon niet volgen; er is een graduele stijging gaande die los lijkt te staan van de doorbraak van de mestgolf die de nitraatconcentraties bepaalt.



Figuur 3.17 Resultaten van het reistijdenmodel voor de winning Roodborn als geheel. Voor de winning is slechts één oude tritiummeting beschikbaar, waardoor het model relatief onzeker is ten opzichte van de eerder besproken modellen van de 14 bronnen.

Toepassing van het reistijdenmodel leidt tot een bimodale reistijdverdeling met 25% water dat jonger is dan 30 jaar en 50% water dat ouder is dan 80 jaar. Deze reistijdverdeling is onzekerder dan die van de eerder besproken 14 bronnen, omdat we geen tijdreeks van tritiumconcentraties hebben. Het model voorspelt een stabilisatie van de nitraatconcentraties tot circa 2030 en een geleidelijke toename nadien. De spreiding van de mogelijke uitkomsten is echter heel groot, gezien de brede

bundel met grijze modeluitkomsten. Concluderend is het model indicatief voor een bimodale reistijdverdeling met een duidelijk jong en een duidelijk oud deel. Het jonge deel van de mix is zonder twijfel verantwoordelijk voor de korte termijnvariaties in nitraatconcentraties die in de pompputten aanwezig zijn. De winning staat inderdaad bekend om relatief grote kwetsbaarheid voor grootschalige neerslagevents (mnd. med. Falco van Driel, WML). Voor winningen zoals Roodborn kan een laagfrequente bemonstering op tritium (eens per 5 jaar bijvoorbeeld) van het ruwwater of in de individuele pompputten naar verwachting bijdragen aan een beter begrip van de kwaliteitsontwikkeling. Gezien de indicatie voor een grote bijdrage van ouder water en het vrij ondiep voorkomen van de Formatie van Vaals is doorstroming van deze formatie een reële mogelijkheid. Hoge radonconcentraties uit eerder onderzoek geven daarvoor ook een indicatie (Kwakman & Versteegh, 2016). Die concentraties van 16,000 tot 19,000 Bq/m³ zijn vergelijkbaar met de bronnen CPMA-034 en CRGE-033 uit dit onderzoek en werden gerelateerd aan respectievelijk tertiaire formaties en de Formatie van Vaals. Een nadere studie naar doorstroming van de Formatie van Vaals en de mogelijkheid van partiële denitrificatie van nitraat door pyriet, en het mogelijk mobiliseren van sulfaat wordt daarom aanbevolen. De sedimentkernen die uit de recente boring bij Eys zijn vrijgekomen geven daarbij ook relevante informatie over het voorkomen van pyriet en de redoxtoestand van het sediment.

4 De St. Brigidabron als Nederlandse pilot

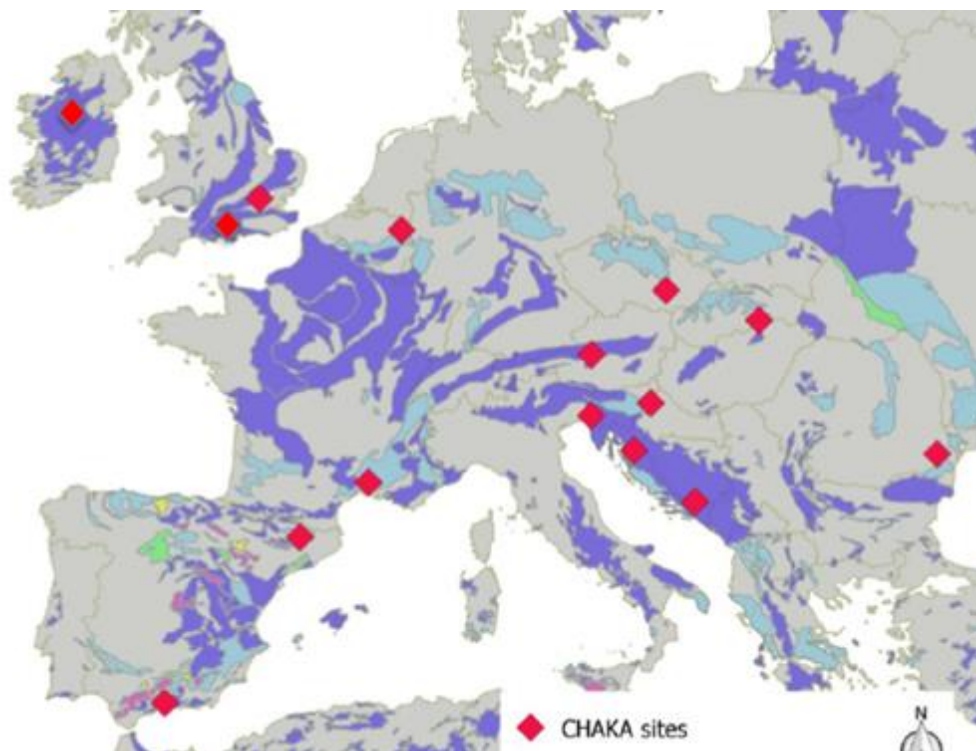
4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de Nederlandse pilot in CHAKA samengevat. We bekijken de St. Brigidabron daarbij in relatie tot de andere pilots in Karst- en *Chalk-gebieden*, en vatten het uitgebreide onderzoek van de Wageningen Universiteit (WUR) in dit gebied in beknopte vorm samen. Daarbij komen zowel de relaties tussen tektoniek en landschap aan de orde, maar ook de hydrogeologische opbouw en de stromingssituatie rond de St. Brigidabron zoals dat uit het WUR-detailonderzoek kon worden afgeleid.

Op basis van die analyse voegen we de resultaten uit de CHAKA-studie toe. We maken daarbij een nieuwe reconstructie van de afvoerreeks van de St. Brigidabron over de periode 1980-2020 en relateren die aan de nieuwste tijdreeksen van nitraat en sulfaat en de afgeleide reistijdverdeling die rekening houdt met een mogelijke duale permeabiliteit in de kalksteen en de daaronder gelegen Formatie van Vaals.

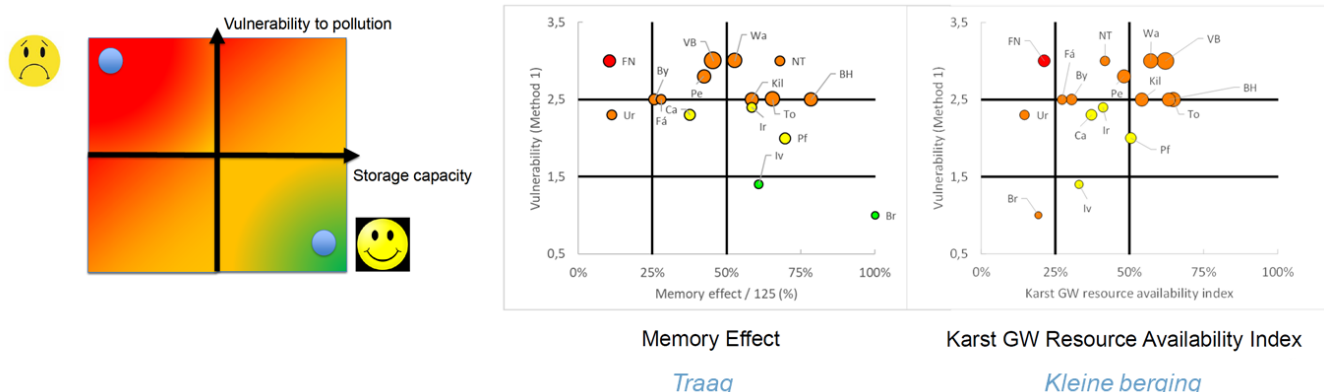
4.2 Resultaten van de St. Brigidabron in de internationale vergelijking

In het CHAKA-deelproject van GeoERA RESOURCE is één van de Nederlandse bronnen ingebracht in de internationale vergelijking: de St. Brigidabron bij Noorbeek. De resultaten van die vergelijking zijn beschreven in Engelstalige hoofdstukken in deel 2 van dit rapport, met name in hoofdstuk 2.



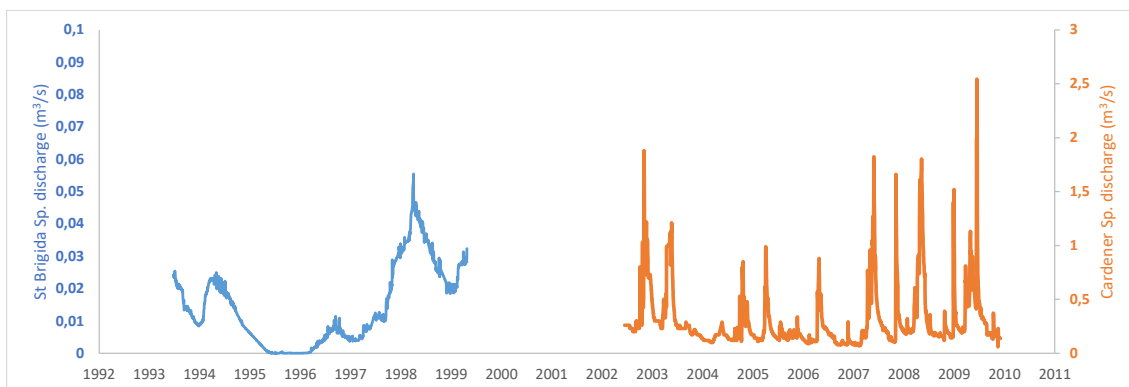
Figuur 4.1 De pilotgebieden in het GeoERA RESOURCE deelproject CHAKA.

Uit de vergelijking blijkt dat de St. Brigidabron in vergelijking met andere bronnen in Karst- en Chalk-aquifers een uitzondering is; ze reageert veel trager op neerslag en er is sprake van een relatief kleine berging (Figuur 4.2).



Figuur 4.2 Vergelijking van de St. Brigidabron (Br) met de 14 andere pilots (zie de uitgebreide beschrijving in paragraaf 2.3 van deel 2 van dit syntheserapport).

Ook in een rechtstreekse vergelijking met een andere Chalk-bron in het Verenigd Koninkrijk, de Cardenerbron, toont de St. Brigida zich zeer onderscheidend, met haar bescheiden debiet en minder nadrukkelijke karstverschijnselen zoals verdwijngaten en grotten in het intrekgebied. De VK-tegenhanger heeft een veel groter debiet (> 1000 l/s) en uit tracerests blijken zeer grote stroomsnelheden die karakteristiek zijn voor karst (kilometers per dag). In de CHAKA-classificatie wordt de kwetsbaarheid van de St. Brigidabron als 'low' beoordeeld; in het rapport staat echter dat het nadrukkelijk gaat om de kwetsbaarheid ten opzichte van puntbronnen van verontreiniging, aangezien het voorkomen van nitraat en bestrijdingsmiddel-metaboliëten wel degelijk op een kwetsbaarheid voor diffuse verontreinigingen wijst (zie hoofdstuk 2 in deel 2 voor details). Een vergelijking van de debietsvariaties in de tijd tussen de St. Brigidabron en de Cardenerbron bevestigt het volstrekt andere karakter van de St. Brigidabron ten opzichte van de andere pilots in CHAKA (Figuur 4.3). De figuur toont het gemeten verloop van de afvoer uit de periode dat die intensief werd gemeten door de Wageningen Universiteit. In paragraaf 4.4 van dit rapport zullen we de afvoer nader analyseren.

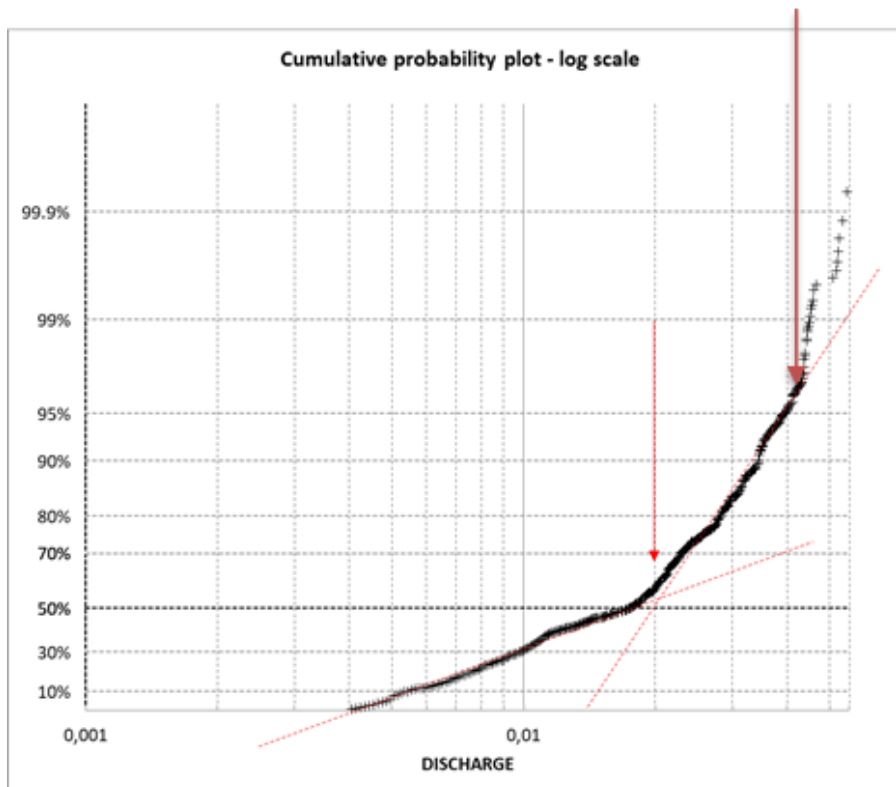


Figuur 4.3: Tijdreeksen van de afvoer van de St Brigida bron (blauwe lijn) en de Cardener bron (oranje lijn).

Behalve de veel tragere respons van de St. Brigidabron in relatie tot andere bronnen valt ook op dat er een knik zit in de afvoerrespons bij ca. 20 l/s afvoer (zie Figuur 4.4). Dit duidt op een duaal permeabiliteitsstelsel waarbij er boven de 20 l/s een ander afvoergedrag is dan daaronder tijdens basisafvoer condities. Een tweede knik in de respons van Figuur 4.4 treedt op bij de tweede rode pijl in de figuur en duidt op gebeurtenissen met oppervlakkige afstroming (*overland flow*) rond de bron. In het veld is waargenomen dat bij grote neerslaghoeveelheden, zoals in juli 2021, een rooster naast de

bron overloopt waarna het water over het verharde terrein afstroomt naar de plaats waar de meetstuw staat. Die bijdrage van oppervlakkige afstroming is dus niet uit de bron zelf afkomstig.

Overland flow (o.a juli 2021)



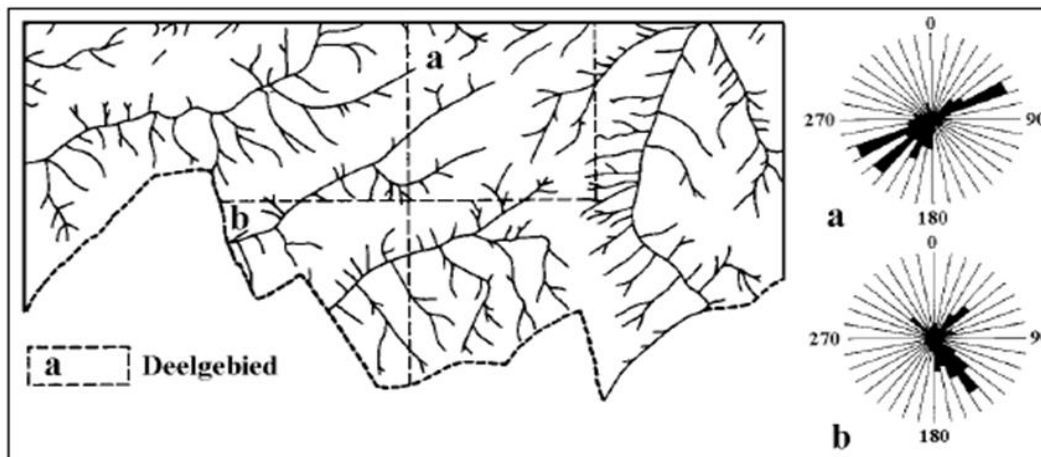
Figuur 4.4 Cumulatieve overschrijdingskans van de afvoer (Y-as) tegen de afvoer van de St. Brigidabron (in m^3/s) (X-as) beide op logaritmische schaal zoals bepaald in de internationale vergelijkingen tussen de bronsystemen in CHAKA.

4.3 Samenvatting eerder onderzoek naar de St. Brigidabron in Nederland

Onderzoekers van de Wageningen Universiteit hebben de St. Brigidabron en de kleinere bronnen in het dal van de Noorbeek in het verleden uitgebreid bestudeerd via studentenonderzoeken en de resultaten daarvan ook internationaal gepubliceerd (Nota et al., 1988, Van Lanen et al. 1995, Dijkma et al., 1998, Van Lanen & Dijkma, 1999, Klonowski et al., 2001, Teuling, 2001, Dijkma & van Lanen, 2001, Van Lanen & Dijkma, 2004).

4.3.1 Tektoniek en landschap

Met name in de MSc thesis van Ryan Teuling (Teuling, 2001) wordt dieper ingegaan op de tektonische setting van het gebied en de invloed daarvan op het landschap en de consequenties voor grondwaterstroming. De analyse van Teuling komt overeen met de gedachten zoals die ook in paragraaf 2.2 zijn verwoord, maar nu toegespitst op het dal van de Noor en de St. Brigidabron. Teuling is daarmee de eerste die dergelijke verbanden tussen tektoniek, landschapsgenese en grondwaterstromingspatronen voor Zuid-Limburg legt. Teuling legt het verband tussen de richtingen van de droge dalen in zuidelijk Zuid-Limburg met de permeabiliteit van de kalksteen (zie Figuur.4.5).



Figuur.4.5 Droge dalen in het stroomgebied van de Noor en omgeving en hun samenhang met de oriëntatie van breuken (uit Teuling, 2001 naar Van den Berg, 1994). In de 'kompasrosjes' worden de oriëntaties van alle deelstukjes van het patroon van de droge dalen samengevat; daarin in een dominante ZW-NO richting en een dominante NW-ZO richting te zien, waarbij die laatste richting vooral voortkomt uit dalen die naar het NW hellen.

In paragraaf 2.2 is al betoogd dat die breukoriëntaties samenhangen met tektonische spanningsfasen in de diepere ondergrond. In met name de Formatie van Gulpen en mogelijk in de daaronder aanwezige verkitte zandsteenbanken van de Formatie van Vaals zijn ten gevolge van de tektonische krachten zwaktezones ontstaan in het gesteente; het gaat daarbij zowel als breuken waarin een verzet zichtbaar is als om spleitvlakken en diaklazen ('joints' & 'fractures'). In de diepere ondergrond is bekend dat breukvorming ook tot een verzet langs de breukvlakken heeft geleid, zoals bij de Heimans-, Willem- en Aachen-overschuivingen, al is de informatie over het gebied rond de Noor schaars (zie Figuur 2.4 en Figuur 2.7). Voor de formaties van Gulpen en Vaals is dit daardoor eigenlijk niet goed bekend; vandaar dat we liever spreken van zwaktezones, spleitvlakken of diaklazen in het gesteente. De richtingen van de dalen, en het feit dat die richtingen over grote delen van Zuid-Limburg te vervolgen zijn in de topografie, wijzen nadrukkelijk op een invloed van de tektonische structuur op de vorming van de topografie (zie bijvoorbeeld de lineamenten in Figuur 2.8, waarvan de ZW-NO- en NW-ZO-oriëntaties in grote delen van Zuid-Limburg dominant zijn).

Zoals Teuling ook betoogd, ligt daarmee ook een tektonische invloed op grondwaterstroming voor de hand, omdat de zwaktezones/spleitvlakken aanleiding geven tot grotere vertering en erosie, maar in het geval van kalksteenaquifers ook van oplossingsprocessen. In veel Karst- en Chalk-gebieden is de verkarsting gerelateerd aan dit soort zwaktezones en de grote invloed van de tektonische structuur op daloriëntaties en spleetoriëntaties is daaruit ook bekend, ook in Chalk-gebieden van Frankrijk en het VK (e.g. Allen, 1997, Rodet & Magn, 2009, Bloomfield, 1995, zie bijvoorbeeld ook Figuur 2.14). Teuling schrijft hierover: *"De vorming van het huidige reliëf in het stroomgebied heeft geheel plaatsgevonden tijdens het Pleistoceen, grotendeels onder periglaciale omstandigheden. In het Holoceen is op de dalbodem de kleiige, zeer slecht doorlatende Formatie van Singraven afgezet, die lokaal wordt afgewisseld met veenlaagjes. De dalvorming in het stroomgebied van de Noor blijkt sterk gekoppeld te zijn geweest aan de tektonische spanningen waar het gebied aan blootstaat. Deze spanningen hebben een uitgebreid stelsel van spleitvlakken doen ontstaan in de Formatie van Gulpen. De oriëntatie van deze spleitvlakken is zowel evenwijdig aan als loodrecht op de overheersende spanningsrichting. De vertering van de Formatie van Gulpen tijdens het Pleistoceen zal voornamelijk langs deze zwaktezones geconcentreerd zijn geweest. De dalvorming zal dan ook voornamelijk in deze zones hebben plaatsgevonden"*.

Teuling (2001) en Van Lanen et al. (1995) geven aan dat zelfs de NO-gerichte loop van de oer-Maas uit het Laat-Tertiair en Vroeg Pleistoceen vermoedelijk is terug te voeren op onderliggende tektonische structuur en daarmee wellicht ook de basis heeft gelegd voor de locatie van het droge dal van de Noor. De verdere topografie met droge ZW-NO-gerichte

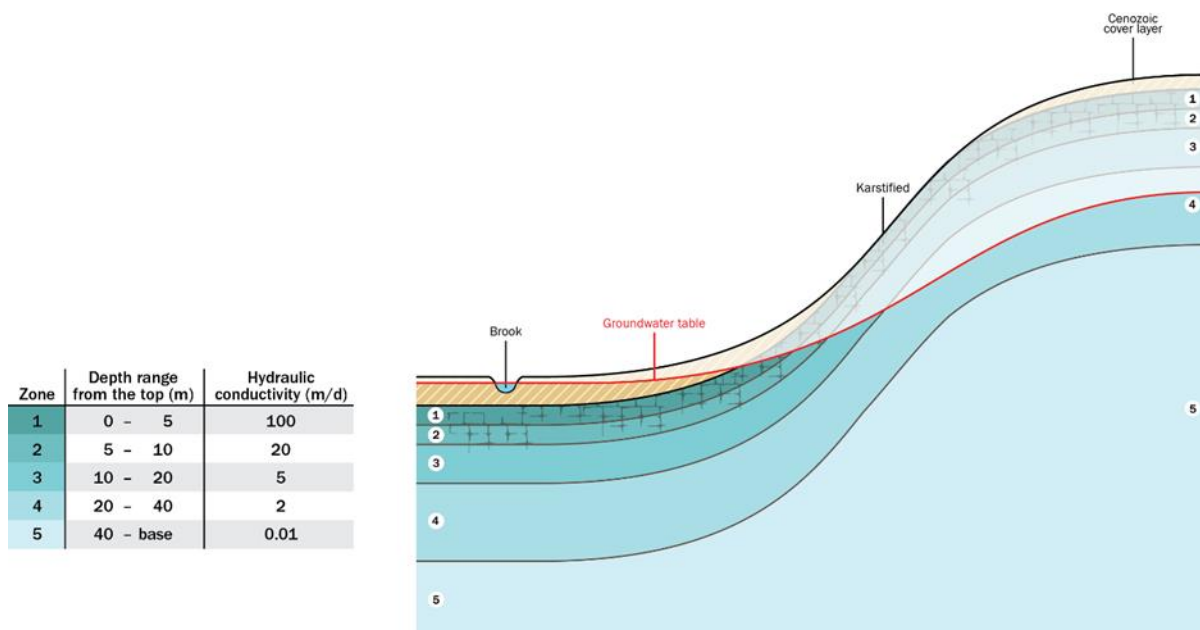
dalen is vervolgens in de loop van het Pleistoceen ontstaan door periglaciaire processen tijdens de warmere perioden tussen de ijstijden. Het is daarbij zelfs mogelijk dat grondwaterstroming zelf medebepalend is geweest bij de totstandkoming van de topografie, waardoor voorkeursrichtingen van grondwaterstromen die mogelijk door tektonische zwaktezones doorwerken in de erosie in het landschap (Dunne et al., 1990).

Het is overigens mogelijk dat één van de twee richtingen van de zwaktezones duidt op grotere permeabiliteit en de voorkeursrichting van grondwaterstroming domineert, terwijl de andere richting juist een blokkade opwerpt tegen grondwaterstroming. Uit de posities van een aantal grotere bronnen is af te leiden dat die zich op kruispunten van NW-ZO en ZW-NO lineamenten bevinden; het geldt bijv. ook voor de St. Brigidabron. Mogelijk is de NW-ZO richting blokkerend, waardoor stroming vanuit het noordoosten juist ter plaatse van de St. Brigidabron convergeert en het water daar als bron uittreedt. Ook de door Teuling genoemde, mogelijk blokkerende werking van de Eckelrade breuk (zie verder) zou in dat patroon passen.

Teuling (2001) en ook Van Lanen et al. (1995) vermoeden dat de permeabiliteit juist in de grotere dalen is verhoogd: *“Wanneer dalen zich vormen boven zwaktezones, betekent dit ook dat de permeabiliteit van de kalksteen in de dalen groter is dan onder de plateaus. Naast de relatie tussen tektoniek en topografie bestaat er dus ook op stroomgebiedsschaal een relatie tussen tektoniek en permeabiliteit die het mogelijk maakt uitspraken te doen over ruimtelijke variatie van permeabiliteit in de Formatie van Gulpen. Er zijn een aantal redenen waarom deze goed doorlatende zones zich in de dalen ontwikkeld hebben [Allen et al., 1997]”*. Daarbij baseren zij zich behalve op Allen (1997) ook op Van Rooijen (1993) die schrijft: *“The hilly area of the unconfined Chalk- aquifer includes many dry valleys, beneath which a concentrated network of solution openings along joints, fractures and horizontal discontinuities is believed to provide drainage for all of the percolating rainfall. These zones of enhanced permeability below the dry valleys form preferential flow paths for the groundwater which may thus reach extremely high flow velocities.* Deze hypothese wordt grosso modo ook gevolgd bij de modellering van grondwaterstroming rond de kalksteenwinningen, waarbij wordt uitgegaan van een hogere doorlatendheid dichtbij maaiveld, die afneemt met de diepte. In de (droog)dalen, waar het grondwater dicht bij maaiveld staat, komt daardoor het grondwater in de lagen met hogere doorlatendheid. Dat leidt tot kortere reistijden van grondwater in de droogdalen (mondelijke mededeling Falco van Driel, WML). Netto komt dit qua effect waarschijnlijk overeen met het opnemen van beter doorlatende breukzones in droogdalen in het model.

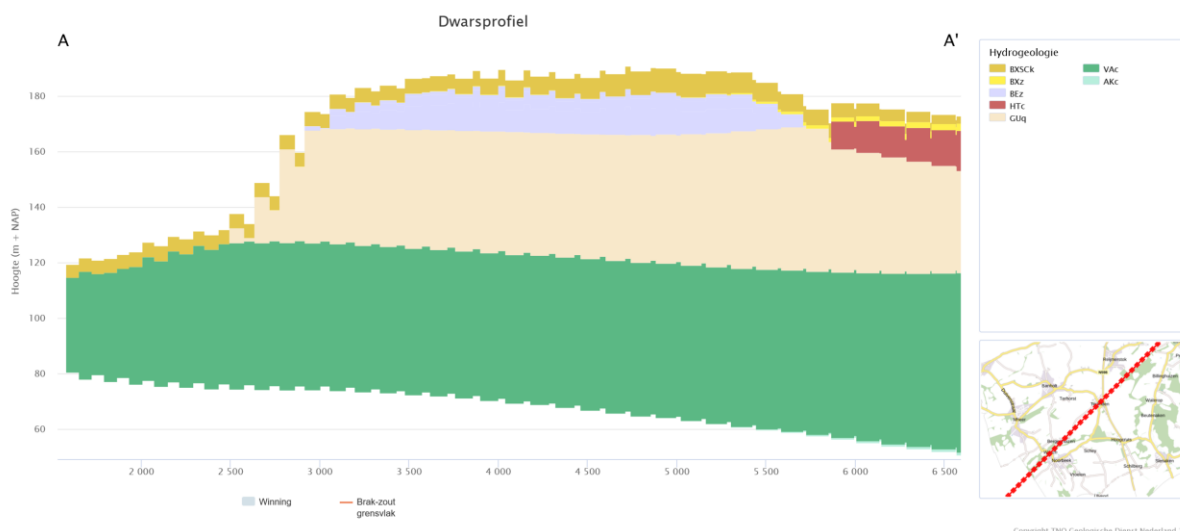
4.3.2 De hydrogeologische opbouw in het dal van Noor

Voor de grondwaterstroming rond de St. Brigidabron en de Noor zijn vooral de Formaties van Gulpen en Vaals van belang (zie paragraaf 2.1 voor een beknopte beschrijving van de lithologie). De Formatie van Gulpen bepaalt de kalkplateaus aan de zuid- en noordzijde van het beekdal. De permeabiliteit van deze formatie is vooral te danken aan de aanwezigheid van holtes ter plaatse van breuken, spleten en laagvlakken (*bedding planes*) en de oplossing van de kalksteen rond deze holtes. De aanname is dat de permeabiliteit in de diepte afneemt door een afname van de gespletenheid met de diepte (Van Rooijen, 1989, Figuur 4.6), maar over de secundaire doorlatendheid door spleten en oplossingsverschijnselen is op detailniveau redelijk weinig bekend; aangenomen wordt dat de secundaire permeabiliteit overheerst en afneemt in de diepte (zie Figuur 2.13).



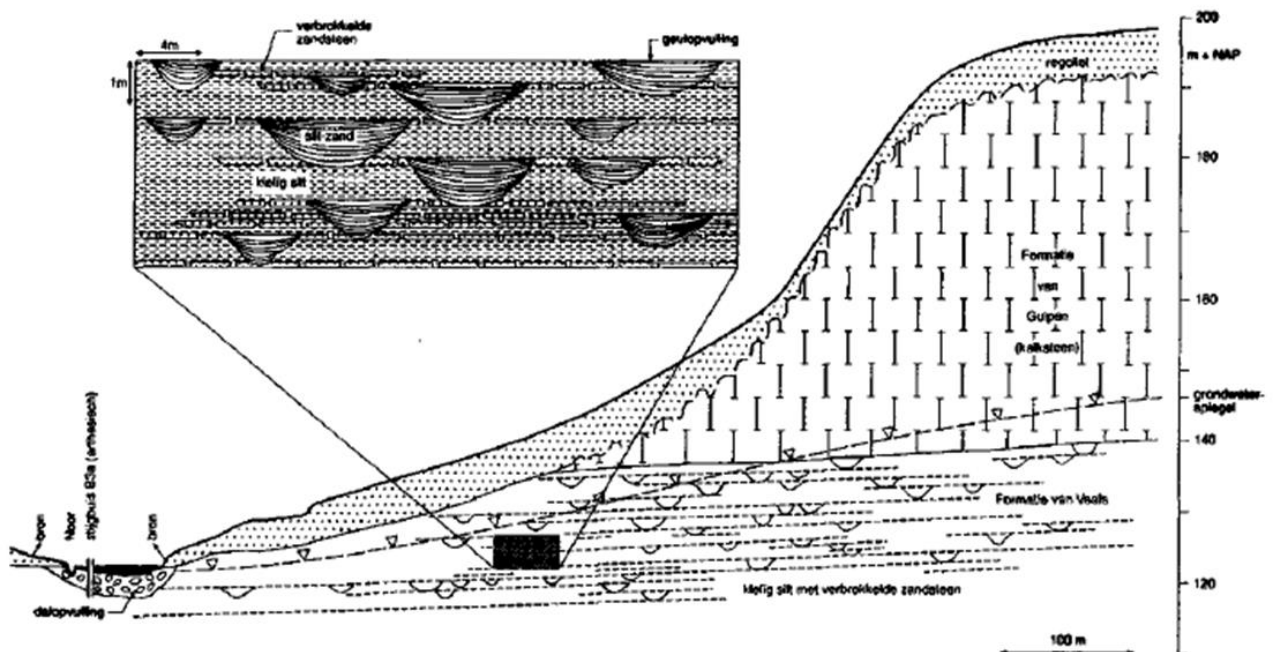
Figuur 4.6 Afname van de spleetdichtheid van diaklazen in de kalksteen naar de diepte waardoor de permeabiliteit met de diepte afneemt. Ook in niet verbroken delen van de kalksteen neemt de permeabiliteit met de diepte af door geringere vertering/verkarsting van de kalksteen. (naar Vernes et al. 2008). Ook in laterale zin zal de permeabiliteit van de kalksteen variëren; door tektonische processen kunnen in de ZW-NO en NW-ZO gerichte zwaktezones ook tot een hogere permeabiliteit hebben geleid (zie bijv. Teuling, 2001).

In het gebied rond de St. Brigidabron is de Formatie van Gulpen ca. 40 m dik (Figuur 4.7). De boven de Formatie van Gulpen gelegen Maasafzettingen van de Formatie van Beegden staan droog en maken dus deel uit van de onverzadigde zone.



Figuur 4.7 Dwarsdoorsnede in de lengterichting, parallel aan het dal van de Noor.

Uit Figuur 4.7 al dat de Formatie van Vaals in het Noordal dagzoomt ten zuidwesten van de St. Brigidabron. Voor de grondwaterstroming zijn vooral de verkitte zandsteenbanken in de Formatie van Vaals belangrijk; die zandsteenbanken zijn ooit als geulsedimenten afgezet in een waddenmilieu en later verkit en verbrokken geraakt door tektonische krachten (Van Lanen et al., 1995). Figuur 4.8 geeft een schematische voorstelling van de structuur van de Formatie van Vaals.

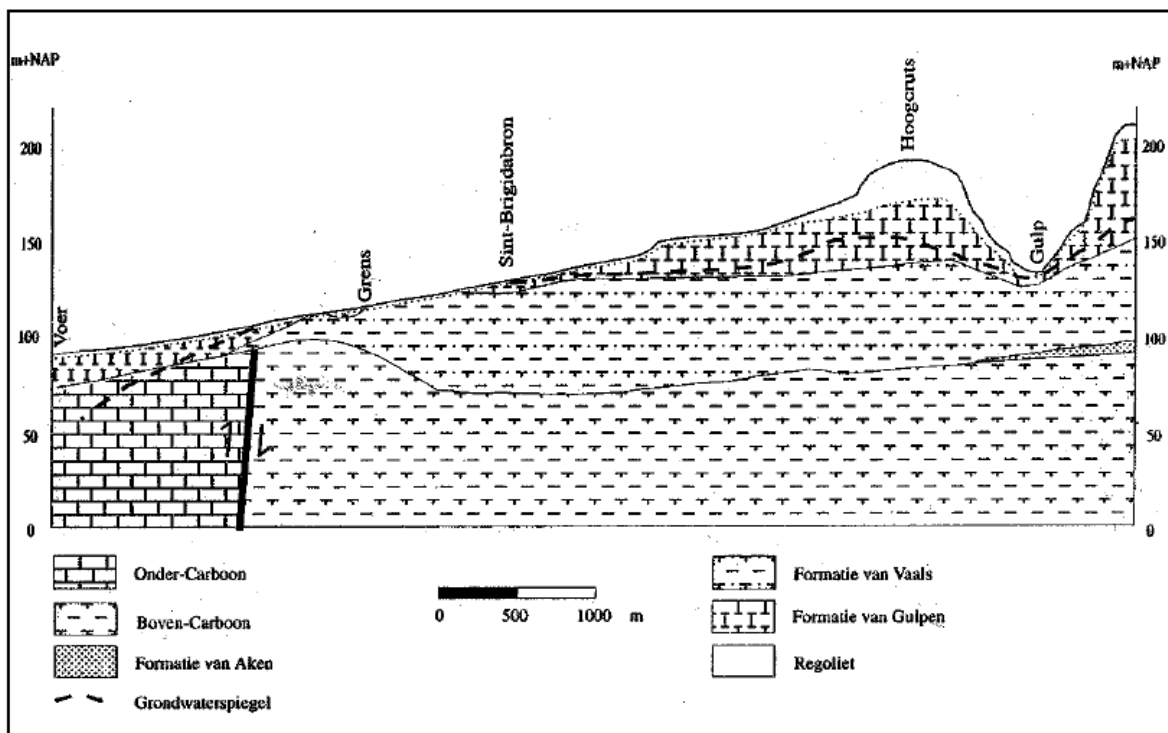


Figuur 4.8 Schematische voorstelling van de opbouw van de Formatie van Vaals (bron: Van Lanen et al., 1995).

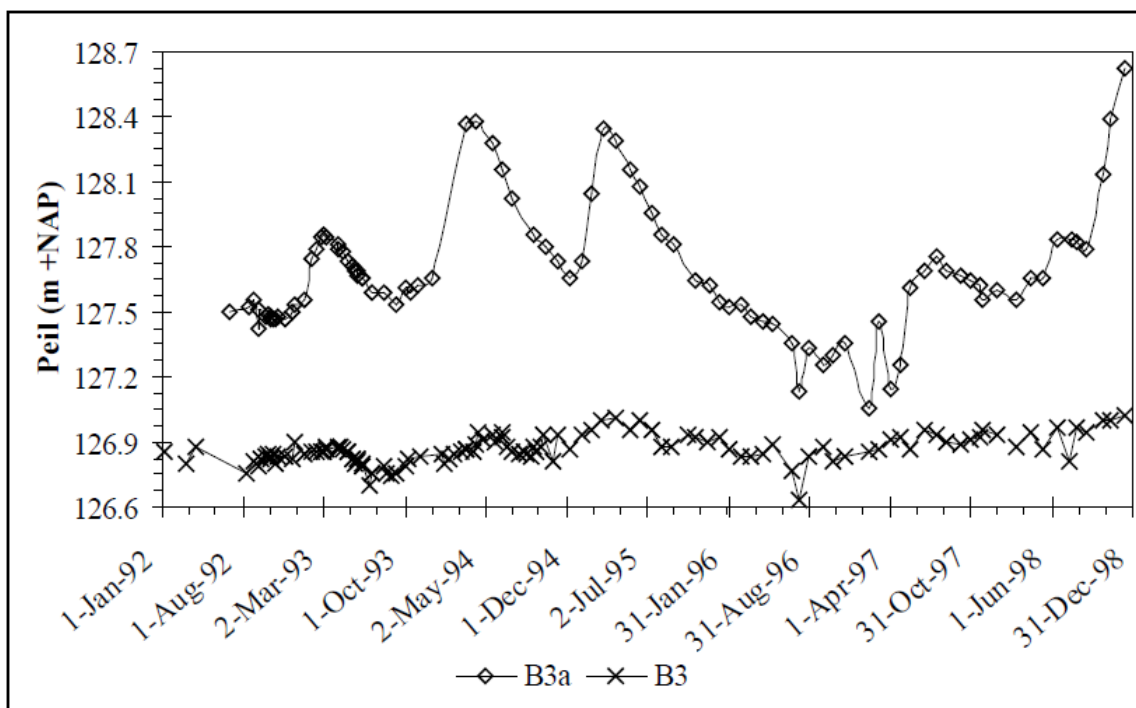
4.3.3 Stromingssituatie rond de St. Brigidabron en het beekdal van de Noor

De Wageningen Universiteit heeft in de het dal van de Noor en rond de St. Brigidabron veel veldwerk uitgevoerd. Daarmee is zicht gekregen op de afvoer van de bron zelf, de bijdragen van zijstroompjes in het Noordal en is beter inzicht ontstaan op grondwaterstanden, stijghoogten en stijghoogteverschillen in het gebied. Uit Figuur 4.7 die is gebaseerd op REGIS II v2.2, bleek al dat de St. Brigidabron uittreedt in de buurt van de overgang van de Formatie van Gulpen naar de Formatie van Vaals. Dat komt overeen met het oude profiel in het rapport van Van Lanen et al. (1995) dat is weergegeven in Figuur 4.9. Het profiel uit Figuur 4.9 loopt verder naar het ZW door en toont dat het dal van de Noor in België de verlengde Eckelradebreuk snijdt. Ten zuidwesten van die breuk komt het Carboon dicht aan de oppervlakte en Teuling (2001) doet de suggestie dat de breuk relatief ondoorlatend is¹. In het gebied tussen de St. Brigidabron en de breuk is sprake van natte omstandigheden en ontvangt de Noor water vanuit kleine zijtakken, maar ook vanuit de onderliggende Formatie van Vaals. Dat blijkt bijvoorbeeld uit het voorkomen van artesisch water in de Vaals, zoals de WUR dat uit peilbuizen heeft vastgesteld (Figuur 4.10). Dat duidt op kwel vanuit de Formatie van Vaals in de richting van de Noor. Aanwijzingen voor kwel hebben we ook zelf vastgesteld tijdens ons haalbaarheidsonderzoek naar de toepassing van radon (zie paragraaf 3.7).

¹ De ligging van deze breuk is onzeker (Van Tongeren, 2006) en kon met geo-electrisch onderzoek in het Noordal, uitgevoerd door de WUR niet worden aangetoond. Van Lanen et al., 1995 bevelen daarom aan om het voorkomen van de verlengde Eckelrade breuk en de invloed op de grondwaterbeweging nader te onderzoeken.



Figuur 4.9 ZW-NO Lengteprofiel door het dal van de Noor over de St. Brigidabron (uit: Van Lanen et al., 1995).



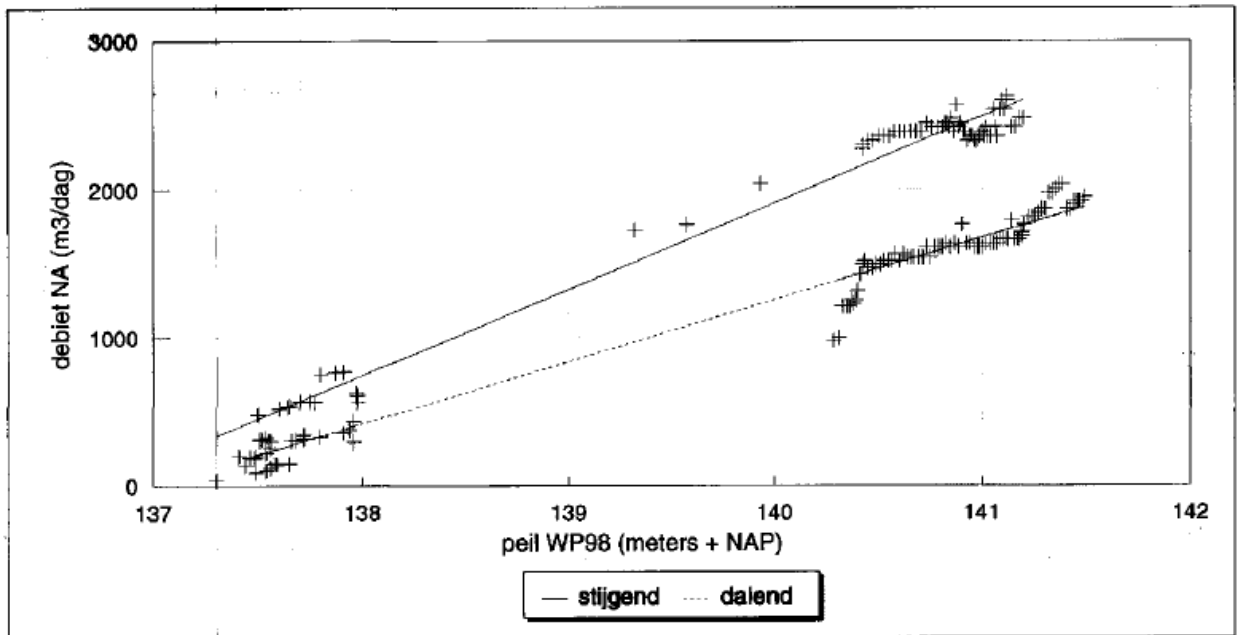
Figuur 4.10 Stijghoogteverschil tussen een ondiepe peilbuis B3, 300 m ten zuidwesten van de St. Brigidabron, en een diepere WUR-peilbuis in de Formatie van Vaals (B3a).

De WUR heeft de flux vanuit de Formatie van Vaals en vanuit de zijtakken ook gekwantificeerd. Zowel van de zijtakken als van de St. Brigidabron zelf zijn afvoermetingen beschikbaar, en de diffuse kwelstroming werd afgeleid vanuit de waterbalans van het deel van de Noor dat ten noordoosten van het stroomafwaarts gelegen meetpunt M6 ligt. Voor de situatie op 1 april 1994 werd daarbij een debiet van ca. 2500 m³/dag voor de St. Brigidabron bepaald, een debiet van ca. 3000 m³/dag voor de diffuse

kwel vanuit de Formatie van Vaals en ca. 2200 m³/dag voor de zijtakjes die aan de randen van het Noordal ontspringen (Van Lanen et al., 1995). Opvallend daarbij is dat de component diffuse kwel in de beekloop dus groter is dan die van de St. Brigidabron zelf; zoals al eerder gerapporteerd zijn de ²²²Rn concentraties van die twee componenten zeer vergelijkbaar, maar is de radonconcentratie in de zijtakjes veel lager. Dat lijkt erop te wijzen dat ook in de St. Brigidabron een aanzienlijk deel van de afvoer door de Formatie van Vaals is gestroomd.

Teuling (2001) heeft de grondwaterstroming in het dal van de Noor met MODFLOW doorgerekend, en komt daarbij tot de conclusie dat de debietsvariaties van de St. Brigidabron met de gekozen modelopzet worden onderschat. Teuling wijt dit afwijkende gedrag aan verticale verschillen in doorlatendheid in de kalksteen: bij hoge grondwaterstanden wordt een groter deel van het water aangevoerd door de meer peremabele bovenste delen van de kalksteen, terwijl onder baseflowcondities juist stroming door de minder permeabele, diepere delen van de kalksteen optreedt. Ook merkt Teuling op dat de hydraulische weerstand van de doorstroomde sedimenten uit de Formaties van Gulpen en Vaals in werkelijkheid waarschijnlijk groter is dan in eerste instantie gedacht. Het betekent mogelijk *'dat de invloed van de Formatie van Gulpen op de grondwaterbeweging op veel plaatsen in het stroomgebied kleiner is dan gedacht... De invloed van de Formatie van Vaals op de grondwaterbeweging neemt hiermee toe en daarmee ook het belang van goede kennis over de ligging en de grootte van zandsteenbankjes [in deze formatie]'*. Feitelijk beschrijft Teuling hiermee een systeem met duale permeabiliteit; hij onderkent dit ook in de conclusies: *"Het berekenen van de grondwateraanvulling door middel van een dual-porosity benadering kan hier mogelijk goede uitkomsten geven"*.

In het rapport beschrijft Teuling ook de grote correlatie tussen het debiet van de St. Brigidabron en een aantal waarnemingsfilters in peilbuizen in de kalksteen. Met name de correlatie tussen het debiet van de bron en waarnemingsput WP98 (TNO code B62C0059) is daarbij opvallend ($r=0.98$). Het filter met de hoge correlatie ligt in de Formatie van Gulpen op zo'n 1,5 km ten noorden van de bron op het Plateau van Margraten. In de studie van Van Lanen et al. (1995) was deze correlatie al opgevallen en zijn regressievergelijkingen opgesteld (zie Figuur 4.11). Uit de figuur blijkt het optreden van hysteresis: in de dalende "schouder" van de afvoergrafiek horen relatief lagere grondwaterstanden dan in de stijgende "schouder". Dit heeft te maken met de duale permeabiliteit van de kalksteen (volgens het voorbeeld van Figuur 2.15) of in de verticale permeabiliteitsverschillen in de kalksteen zoals eerder door Teuling beschreven. De door Van Lanen afgeleide regressievergelijkingen staan in Figuur 4.12.



Figuur 4.11 Regressiemodellen voor de dalende en stijgende takken van de afvoerreeks van de St. Brigidabron volgens Van Lanen et al. (1995).

Tabel 5.3.2 Resultaten van de regressie-analyse op de relatie tussen afvoer van de Sint-Brigidabron en de stijghoogte bij WP98

Variabele	Stijgende lijn	Dalende lijn
n	68	112
R ²	0.97	0.79
a	-79916.9	-57423.2
b	584.49	419.13

Met enige voorzichtigheid kan de afvoer van de Sint-Brigidabron worden berekend uit:

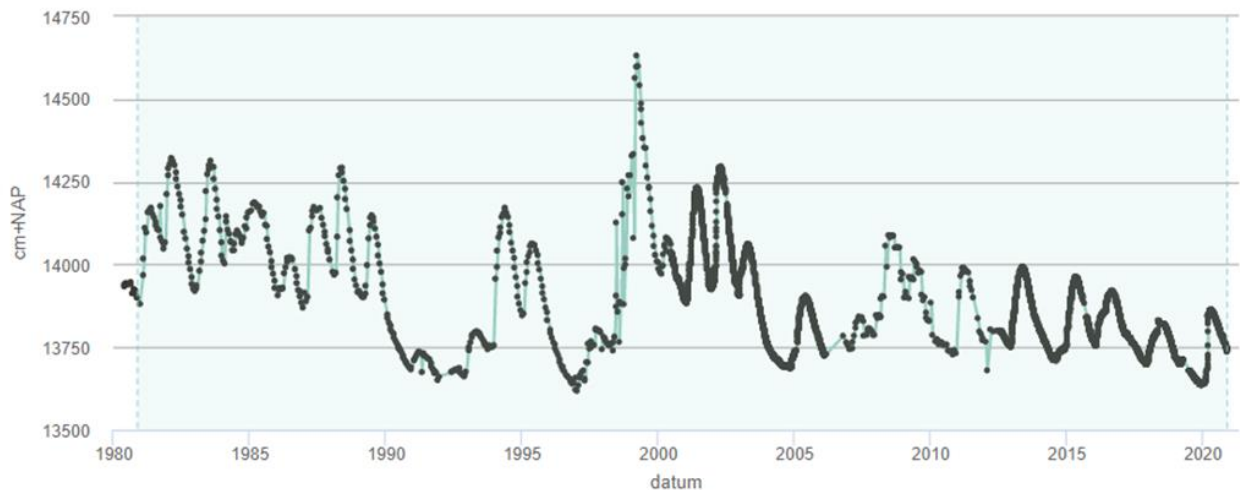
$$Q = -79916.9 + 584.49\phi_{WP98}$$

$$Q = -57423.2 + 419.13\phi_{WP98}$$

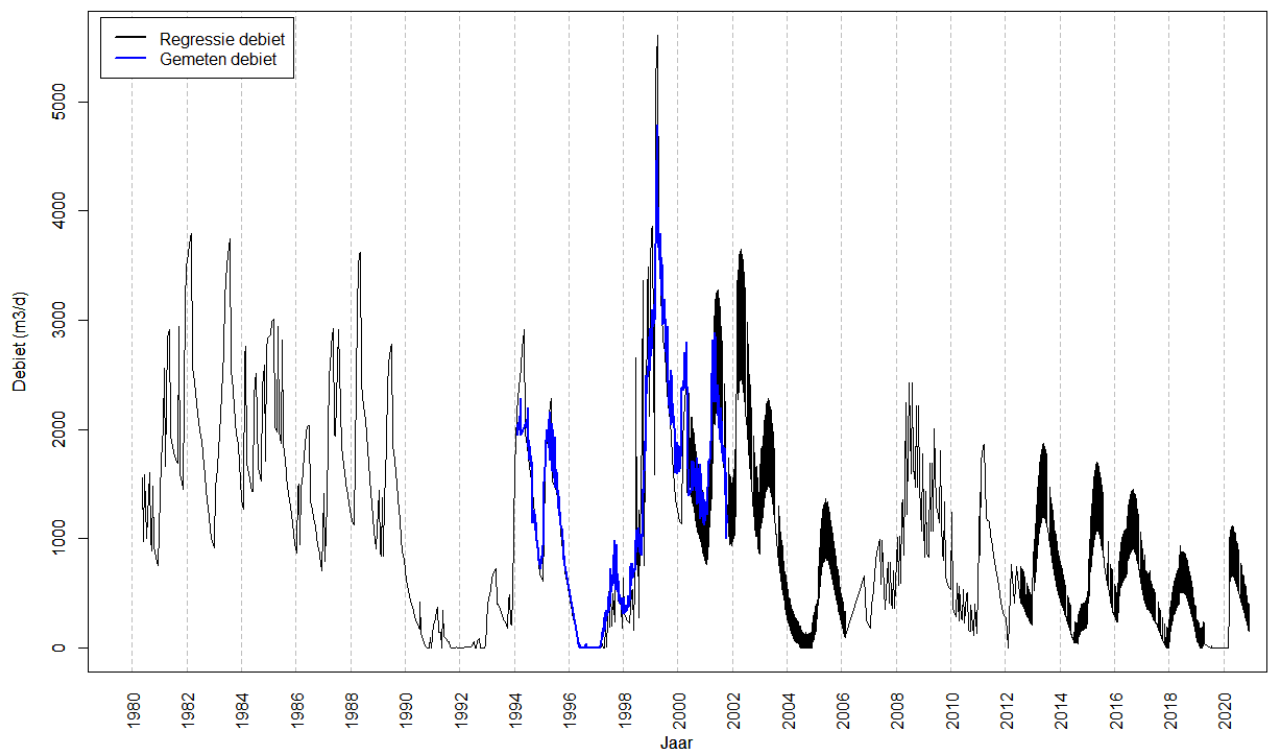
Figuur 4.12 De door Van Lanen (1995) voorgestelde regressievergelijkingen tussen put WP98 (B62C0059) en de afvoer van de St. Brigidabron.

4.4 Extrapolatie van het debiet van de St. Brigidabron over de periode 1990-2021

In dit onderhavige onderzoek hebben we de regressievergelijkingen van Van Lanen (1995) toegepast op de volledige reeks van put B62C0059 om daarmee een afvoerreeks te verkrijgen van de St. Brigidabron. De tijdreeks van put B62C0059, filter 1, is weergegeven in Figuur 4.13 en is beschikbaar voor de periode 1980-2020. Voor de dalende en stijgende delen van de tijdreeksen zijn de aparte regressies gebruikt waarmee het effect van hysteresis is geïmplementeerd in de verkregen afvoerreeks.



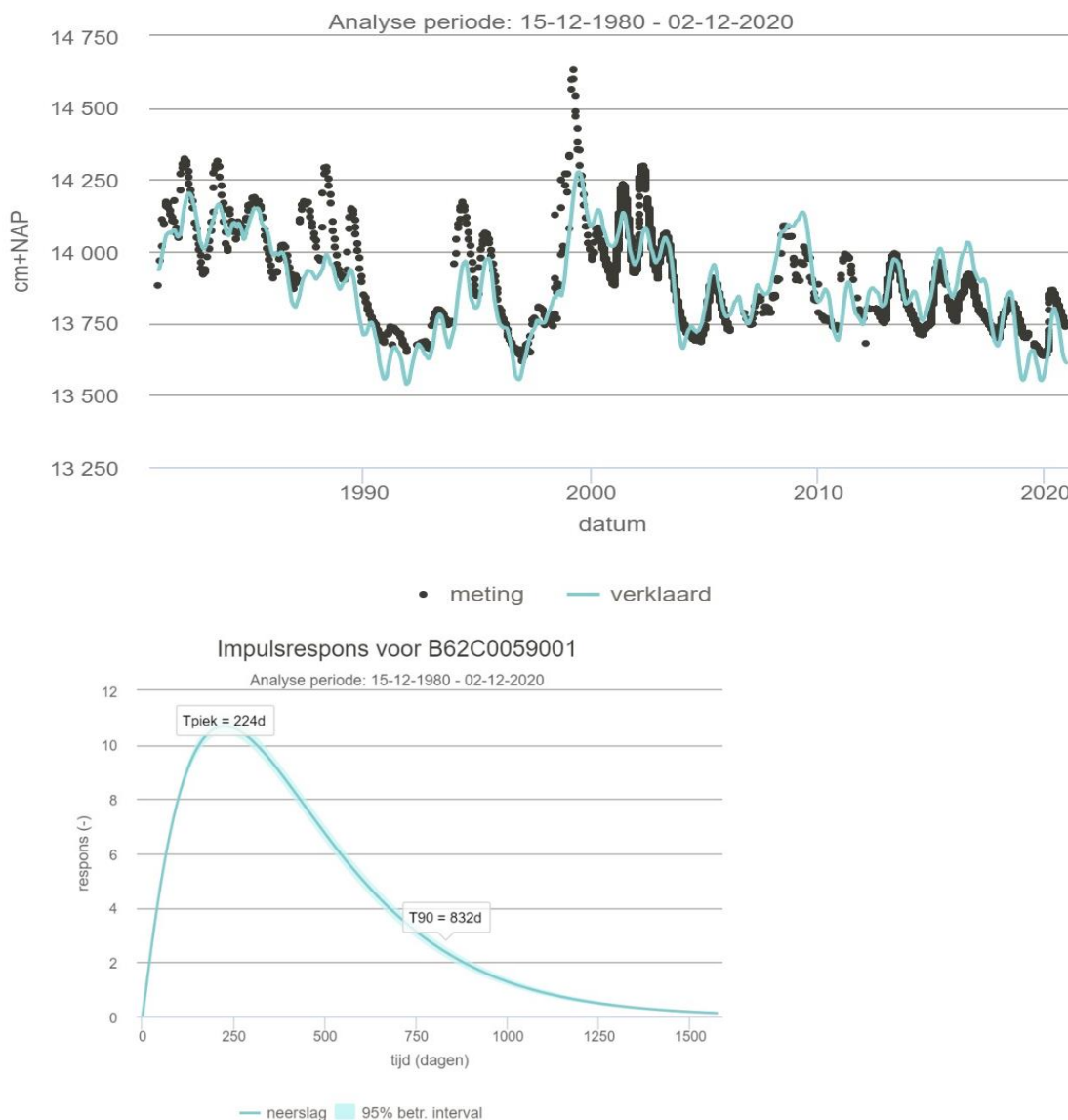
Figuur 4.13 Tijdreeks van put B62C0059, filter 1 (bron: grondwaterstandeninbeeld.nl).



Figuur 4.14 Gereconstrueerde afvoerreeks voor de St. Brigidabron op basis van een regressie met put B62C0059, filter 001.

De via de regressie afgeleide, geconstrueerde afvoerreeks van de St. Brigidabron is weergegeven in Figuur 4.14. In blauw zijn daarbij de werkelijke metingen van de afvoer door de Wageningen

Universiteit weergegeven. De gebruikte regressiecoëfficiënten hebben betrekking op de blauwe metingen tot uiterlijk 1995. Voor de periode 1995 tot 2002 is het resultaat van de regressie nieuw wat betreft de vergelijking tussen metingen en reconstructiemodel. De resultaten over 1995 tot 2001 gaven geen aanleiding om aanpassingen te doen aan de regressie; we beschouwen de periode 1995-2001 daarom als validatieperiode voor het regressiemodel. Het regressiemodel voorspelt een droogstaande bron in de periode 1991-1993 en een ook daadwerkelijk gemeten afvoerloze periode in 1996/1997. De reconstructie geeft ook een periode zonder afvoer weer in 2019. Die afvoerloze periode is ook daadwerkelijk opgetreden (mondelijke mededeling Roel Dijkma, 2021, WUR). Daarmee ontstaat de indruk dat het model een realistische weergave van het brondebiet toont.



Figuur 4.15 Tijdreeksanalyse van put B52C0059 over de periode 1980-2020 via de website “grondwaterstandeninbeeld.nl”. Zwart: meetreeks. Blauw: verklaarde deel door neerslag en verdamping. Onder: impulsresponsfunctie voor deze meetreeks.

Interessant is hoe de bron duidelijk vertraagd reageert op droge perioden: ondanks de droge zomer van 2018 stopt de afvoer pas in 2019 na een eveneens relatief droog jaar. Ook de reactie op de droge zomer van 2003 is duidelijk vertraagd met een dal in de afvoer in 2004. Een eerste tijdreeksanalyse op de oorspronkelijke stijghoogtereeks die ten grondslag ligt aan de debietreconstructie, leidt tot een kwantificering van die vertraging (Figuur 4.15a). De piek in de

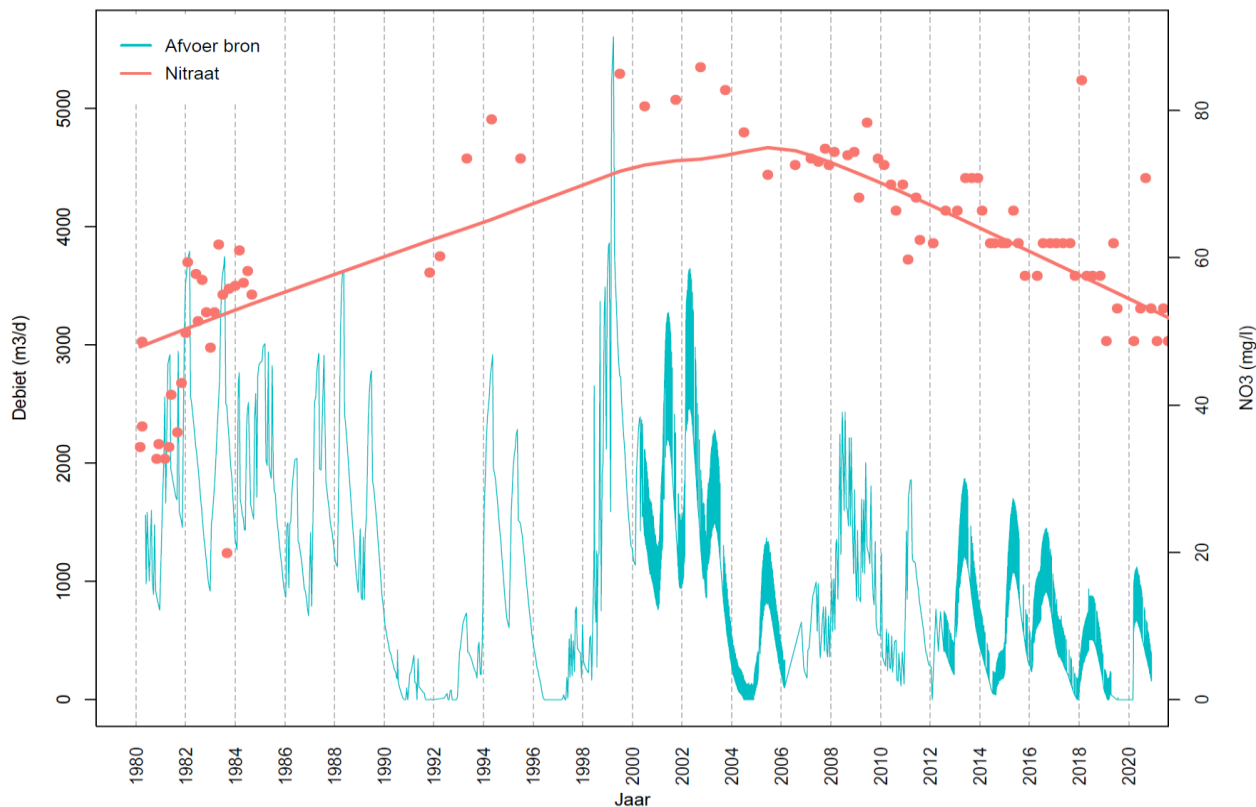
stijghoogte ligt ten opzichte van de piek van neerslag en/of verdamping ca. 7,5 maanden en de tijd tot het uitdempen van de respons bedraagt zelfs 28 maanden (zie Figuur 4.15b). Vanwege de goede correlatie tussen de stijghoogtereeks en het brondebiet kan ervan worden uitgegaan dat deze getallen ook voor de vertraging van het brondebiet ten opzichte van neerslag en verdamping gelden. De gekwantificeerde responstijd past ook goed bij de doorwerking van droge zomers zoals hierboven kwalitatief beschreven.

Een eerste beschouwing van de complete debietreeks sinds 1980 geeft de indruk dat het debiet van de bron sinds de jaren '80 is afgenomen (Figuur 4.14). Dat beeld wordt grosso modo bevestigd door de tijdreeksanalyse van de stijghoogtereeks die ten grondslag ligt aan de debietreeks (Figuur 4.15). Die analyse suggereert dat de respons op neerslag in de tijd is gewijzigd; in de periode tot het jaar 2000 ligt de gemeten stijghoogte namelijk regelmatig boven door de component die wordt verklaard door neerslag en verdamping, en sinds die tijd eigenlijk niet meer. De dynamiek vóór 2000 is daarbij groter dan in de periode na 2000, met name tijdens natte periodes. Twee stijghoogtereeksen in de omgeving (B62C002 en B62C0064) geven een soortgelijke indicatie voor een verandering van het regime in de tijd.

We kennen de precieze oorzaken van die mogelijk dalende trends op dit moment nog niet. Er kan een verband zijn met de effecten van een veranderend klimaat en een daardoor veranderde voeding, maar ook effecten door meer directe menselijke ingrepen zoals een trage doorwerking van het effect van waterwinningen aan de westzijde van het Plateau van Margraten, toenemende verstedelijking, maar wellicht ook een toenemend gebruik van grondwater onder de plateaus ten behoeve van de beregening van gewassen. De lange-termijn gevolgen van een mogelijk afnemend debiet zijn potentieel groot: immers bronnen zoals de St. Brigida bepalen voor een groot deel de afvoer van de beken die de plateaus ontwateren, en het risico bestaat dat de beken regelmatig droog zullen vallen als de tendens zich door zou zetten met mogelijke ecologische consequenties. Inzicht in de bepalende factoren van dit proces is ook van belang voor een goed inschatting van de waterbeschikbaarheid voor verschillende gebruiksfuncties in het gebied op de langere termijn. Nader onderzoek naar deze mogelijke trends is om deze redenen aanbevolen, bijvoorbeeld door deze eerste analyse uit Figuur 4.15 uit te breiden door een meer verfijnde tijdreeksanalyse uit te voeren waarin ook het effect van veranderende meetfrequenties in de tijd wordt verdisconteerd, mogelijk in combinatie met een fysisch-gebaseerd model met bijvoorbeeld IBRAHYM3. Het is dan ook aan te bevelen om de nieuwste meetdata tot 2023 toe te voegen en een aantal andere stijghoogtereeksen op de plateaus in de analyse te betrekken.

4.5 Nitraat in relatie tot het debiet van de bron

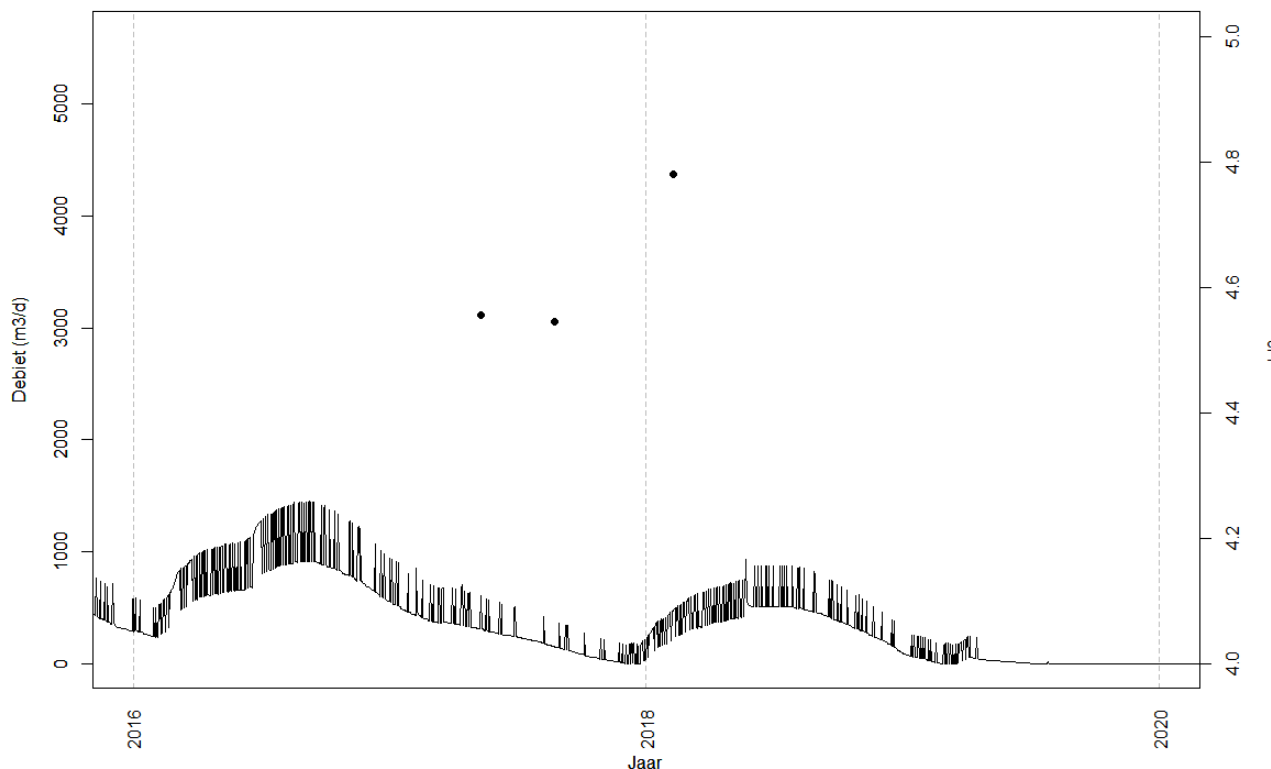
In het eerdere werk uit de jaren negentig van de 20^e eeuw (Van Lanen et al. 1995, Dijkema et al., 1998, Van Lanen & Dijkema, 1999), leek de nitraatconcentratie in de bron duidelijk verhoogd in de perioden met hogere grondwaterstanden. Tijdens die periode was de stikstofbelasting vanuit de landbouw op haar hoogtepunt met een piek in 1985 toen de Mestwet werd ingevoerd. Sindsdien is er sprake van een geleidelijke daling van stikstofbelasting met een stabilisatie in de laatste 10 jaar. Om na te gaan of die relatie tussen hoge nitraatconcentraties en hoge grondwaterstanden nog steeds opgaat, zijn de gemeten nitraatconcentraties vergeleken met de nieuw geconstrueerde debietcurve. Hoge grondwaterstanden corresponderen daarbij met een hoge afvoer zoals in paragraaf 4.4 is beschreven. De nitraatconcentraties uit de jaren negentig zijn daarbij afkomstig van de Wageningen Universiteit. Sinds 2005 maakt de St. Brigidabron ook deel uit van het KRW-meetnet van de provincie (Broers et al., 2005) en wordt sindsdien 4 maal per jaar door de provincie bemonsterd. De vergelijking van afvoer met nitraatconcentraties is opgenomen in Figuur 4.16.



Figuur 4.16 Gemeten nitraatconcentraties in relatie tot de geconstrueerde afvoerreeks van de St. Brigidabron.

Wat direct opvalt aan Figuur 4.16 is dat de nitraatconcentraties niet zozeer op seizoensbasis reageren op periode met lage en hoge afvoer, maar met name een langjarige trend laten zien die het vertraagd doorwerken van de mestbelasting representeert. Die lange termijn reactie is al besproken in Figuur 3.5 in paragraaf 3.2 en wordt in paragraaf 4.6 nog wat nader uitgewerkt. Ze is het gevolg van het doorwerken van de reistijdverdeling van de bron, die wordt gekenmerkt door een relatief snelle component van water dat jonger is dan 30 jaar en een component water die ouder is dan 80 jaar. Deze lange reistijden geven al aan dat de St. Brigida-systeem bepaald geen snel karststelsel is zoals veel van de andere bronssystemen die in CHAKA zijn bestudeerd door andere buitenlandse partners.

Bijzonder is echter ook dat de relatie tussen hoge nitraatconcentraties bij hoge afvoer niet langer wordt gevonden. De variaties die zijn gesuperponeerd op de langjarige trend die is weergegeven door de rode LOWESS-kromme, zijn niet meer duidelijk te koppelen aan periodes met stijgende afvoeren. Punten boven de rode LOWESS-kromme komen zowel bij dalende afvoeren als bij stijgende afvoeren voor. Mogelijk gaat het verband verloren doordat de concentraties in het jonge water zijn afgenomen, waardoor de jongere component van het water in de mix bij de bron niet langer de hoogste nitraatconcentraties vertegenwoordigt.



Figuur 4.17 Relatie tussen de tritiummetingen in 2017-2018 en de afvoer van de St. Brigidabron. Linker Y-as: debiet bron in m³/dag. Rechter Y-as: tritiumconcentratie in TU. De debietreeks is grillig door het verwerken van het hysteresis-effect met de twee verschillende regressiecoëfficiënten.

Voor tritium lijkt er wel een verband met korte termijn variaties in de afvoerreeks (Figuur 4.17). Hoewel we maar weinig metingen in de tijd hebben, lijkt tritium in 2018 wel te stijgen nadat de afvoer toeneemt in de winterperiode. Dit zou dan wijzen op een grotere component jong water in de mix bij toenemende afvoer en stijgende grondwaterstanden. Dit uit zich dan niet automatisch meer in stijgende nitraatconcentraties.

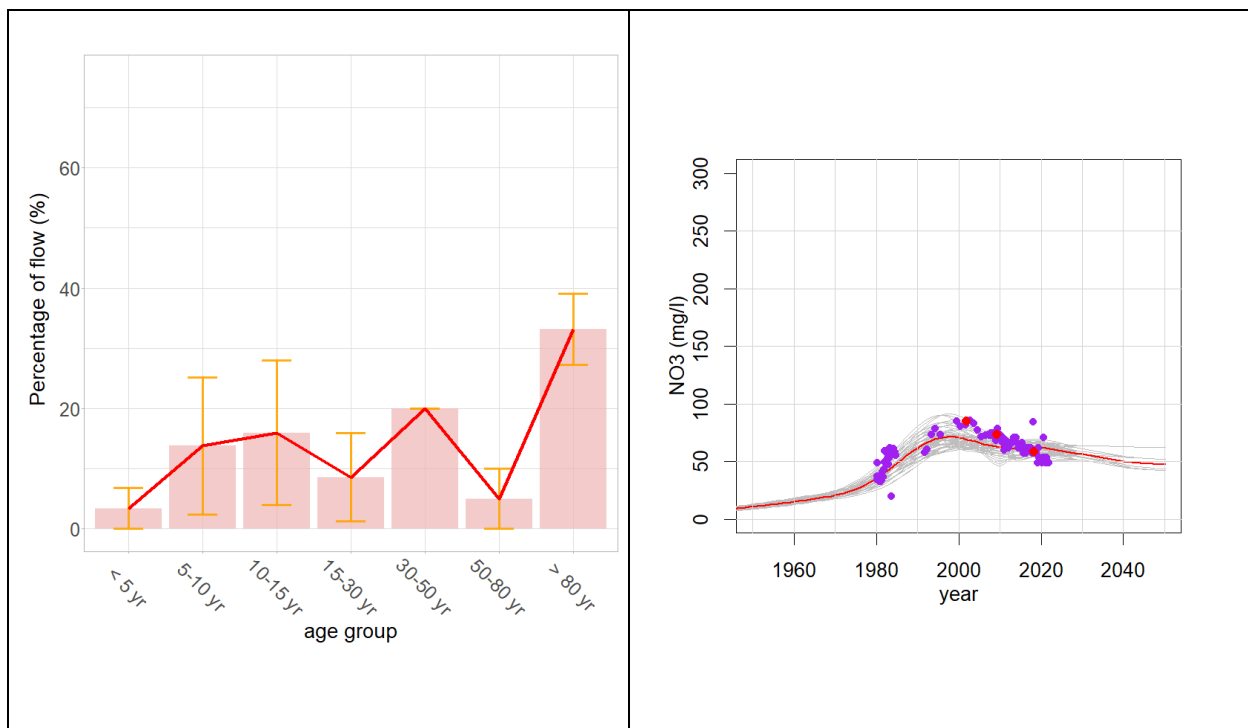
4.6 De relatie tussen reistijdverdeling en nitraat voor de St. Brigidabron

In paragraaf 3.2 is een reistijdverdeling voor de St. Brigidabron opgesteld op basis van de gemeten tijdreeksen van tritium en nitraat. Er is daarbij bewust gekozen voor een verdelingsvrije aanpak, waardoor ook een systeem met een bimodale reistijdverdeling kan worden beschreven zonder daaraan van tevoren condities op te leggen. Het is de moeite waard om de verkregen reistijdverdeling te bespreken in het licht van al het onderzoek dat in de paragrafen uit dit hoofdstuk is samengevat.

De reistijdverdeling en de nitraatreconstructie van de St. Brigidabron zijn in Figuur 4.18 nogmaals getoond. De afgeleide reistijdverdeling toont inderdaad een verdeling met een oude component waarvan het water meer dan 80 jaar geleden is geïnfiltrerd (33%) en een jonge fractie < 30 jaar (42%). Gezien de hydrogeologische setting lijkt het aannemelijk om te stellen dat die oude component wellicht uit de diepere delen van de Formatie van Gulpen komt, of waarschijnlijk ook vanuit de Formatie van Vaals. In de jongere component valt op dat weinig tot geen water wordt afgevoerd dat jonger is dan 5 jaar of 10 jaar. Dat past goed bij de relatief trage respons in de afvoer en past ook bij de geringe variaties in nitraatconcentraties, die nauwelijks of geen seizoensfluctuaties laten zien en waarbij de langjarige trend domineert die ontstaat door de convolutie van de reistijdverdeling met de stijgende en sinds 1985 dalende stikstofinput vanuit mestbelasting. Een kleine bijdrage vanuit jong water is ook logisch gezien de dikte van de onverzadigde zone op de plateaus. Naar verwachting is het water dat jonger is dan 10 jaar niet zozeer van de plateaus afkomstig maar vanuit het droge

Noordal in de directe omgeving van de bron. De hypothese is dat veel van het water met een leeftijd tussen 10 en 50 jaar – dat bij elkaar 45% van het brondebiet bepaalt – op de plateaus is geïnfiltrerd, in eerste instantie verticaal is weggezakt in de onverzadigde zone, en vervolgens als verzadigde grondwaterstroming is meegevoerd door het spletenstelsel in de Formatie van Gulpen en mogelijk deels in de daaronder gelegen Formatie van Vaals. Een vertraging van ca. 10 tot 15 jaar in de onverzadigde zone correspondeert daarbij ook met de verschuiving van de nitraatpiek in de afvoer van de bron (rond het jaar 2000) ten opzichte van de stikstofpiek in de mestbelasting die rond 1985 zal zijn opgetreden. Het precieze moment van ombuiging in de nitraatreeks van de bron wordt bepaald door het geheel van de reistijdverdeling zoals die in Figuur 4.18 is gegeven. Een relatief sterk effect van demping op de grondwaterstanden zoals bij bijvoorbeeld put B62C0059 is te zien (zie Figuur 4.13), past overigens ook bij een systeem met een dikke onverzadigde zone.

De invloed van de grote component water die ouder is dan 80 jaar, is er één van demping van de nitraatconcentraties. Dit water is ver voor de toename van de mestbelasting geïnfiltrerd en levert dus vooral een bijdrage van nitraatloos water van grotere ouderdom. Het netto effect daarvan is dat de nitraatconcentraties in bronnen met een dergelijke oude component minder hoog stijgen dan in bronnen die die component missen, zoals veel van de bronnen rond het Centraal Plateau (zie paragraaf 3.3).



Figuur 4.18 Reistijdverdeling (links) en nitraatreconstructie (rechts) voor de St. Brigidabron.

5 Resultaten veldonderzoek opkomende stoffen

Uit eerder onderzoek (Kivits et al., 2018) is gebleken dat diergeneesmiddelen en antibiotica in het Nederlandse grondwater tot op grote diepte kunnen doordringen, en vooral onder omstandigheden waarin nog weinig omzetting van nitraat heeft plaatsgevonden. Dat is bij uitstek het geval in het Mergelland waar in alle onderzochte bronnen nitraat aanwezig is. Mergelland lijkt daardoor kwetsbaar voor het uitspoelen van deze stoffen naar bronnen en het ontvangend oppervlaktewater. Vandaar dat we binnen CHAKA een eerste inventarisatie van de aanwezigheid van die stoffen in het bronwater hebben uitgevoerd.

5.1 Veldonderzoek 2021

Op 12,13, 19 en 20 juli 2021 is een beknopt veldonderzoek uitgevoerd waarbij 15 bronnen zijn bemonsterd voor de analyse op opkomende stofgroep van diergeneesmiddelen. In deze selectie zijn alle 14 geselecteerde bronnen opgenomen, behalve de bron bij Wijlre (MPGE-006/z.039), omdat die bron niet bereikbaar was. Aanvullend zijn de bronnen n.003 en n.015 bemonsterd (Broers en Van Vliet, 2018). Figuur 5.2 toont de locaties van de bemonsterde bronnen en het aantal diergeneesmiddelen dat in elk van de bronnen is aangetroffen. Van de meeste bemonsterde locaties zijn zowel XY-coördinaten als Z (maaiveldhoogte) bepaald met een DGPS (zie Tabel 5-1). Dit is een nauwkeurig meetinstrument, waarbij XY tot op cm en Z tot mm nauwkeurig kan worden bepaald. Voorafgaand aan de bemonstering zijn in het veld pH, EGV, temperatuur en zuurstof gemeten (Tabel 5-1). Voor de helft van de monsters is na bemonstering ook bicarbonaat in het veld bepaald. De monsters zijn genomen in 500 ml glazen flessen. Deze flessen zijn tot de helft gevuld en gekoeld bewaard en op zowel 13 juli als 20 juli ingevroren. De monsters zijn begin september 2021 geanalyseerd.

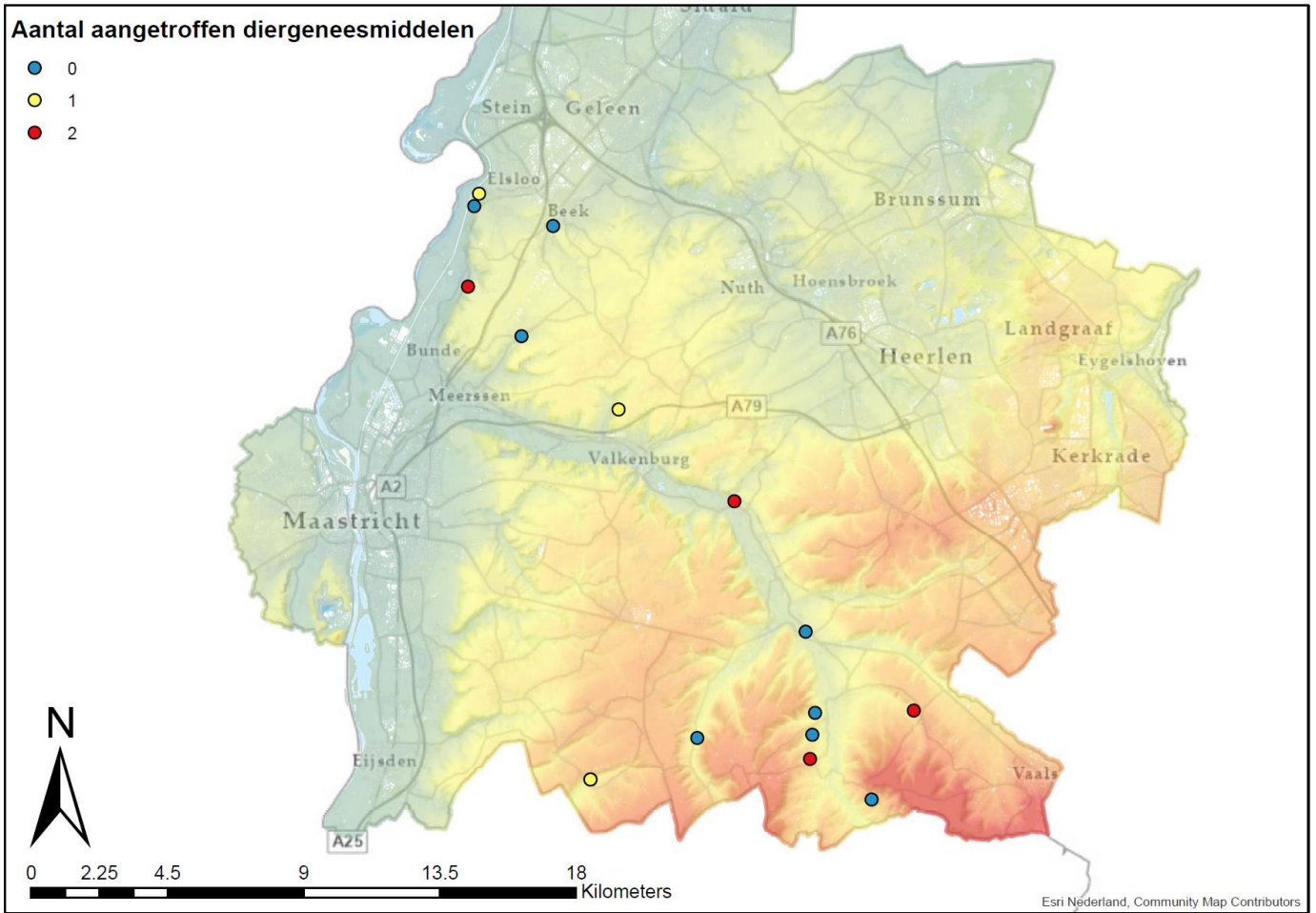


Figuur 5.1 Bemonstering bron gebruikmakend van slangenpomp.

Tabel 5-1 Overzicht van de in het veld verzamelde gegevens. In het veld zijn naast waterkwaliteitsparameters (pH, temperatuur, geleidbaarheid en zuurstof) ook de locatieparameters X- en Y- coördinaten en de hoogte (Z) bepaald. De bron bij Wijlre z.039 was door het hoogwater in juli 2021 onbereikbaar. In plaats daarvan zijn de bronnen n.003 en n.015 bemonsterd.

Bron naam	Provinciecode	datum	X-GPS (m)	Y-GPS (m)	Hoogte (m NAP)	pH (-)	Temp (C)	EGV (uS/cm)	O ₂ (mg/l)
n.002	CPMA-002	12-7-2021				6,97	11,4	606	9,49
n.003		12-7-2021	180806,2	328073,3	56,046	8,09		522	9,17
n.010	CPMA-034	12-7-2021	180603,8	325412	78,097	7,2	11,3	575	7,97
n.015		12-7-2021	182373,3	323774,9	93,164	7,58	12	676	10,34
n.020	CPGE-062	20-7-2021	185574,3	321349,9	120,509	7,62	13,9	413	9,35
n.037s	UBGE-001	20-7-2021	189404,7	318323,1	79,253	7,39	11,3	431	5,81
n.091	CPGB-022	12-7-2021	183410,8	327413,1	84,447	7,15	12,3	673	6,69
z.001	MPNO-001	13-7-2021	184651,7	309125	129,801	7,32	11,5	460	5,67
		19-7-2021	184651,7	309125	129,801	6,85	11,3	440	6,18
z.025	CRGE-032	19-7-2021	191898,7	309799,7	136,746	6,93	11,8	363	5,28
z.027	CRGE-031	19-7-2021	191979,6	310604,2	130,198	7,53	11,3	352	9,07
z.028	CRGE-033	19-7-2021	192067,9	311330,2	119,763	7,42	12,5	365	4,65
z.035	CRGU-005	13-7-2021	188172,2	310496,6	128,474	7,64	11,6	382	7,63
Z.203	UBGE-002	13-7-2021	191755,4	314010	92,7	7,47		478	5,37
Z.205	VYGE-058	19-7-2021	195329,1	311400,2	150,85	7,46	10,9	363	8,4
Z.210	VYGE-019A	19-7-2021	193935,3	308462,2	168,469	7,44	12,9	258	9,45

Tabel 5-2 geeft de meetresultaten weer. De geneesmiddelen Carbamazepine, Metoprolol, de antibiotica Sulfamethoxazole, Sulfadiazine, Trimethoprim en fungicide Thiabendazole zijn aangetroffen in de bronnen. In bron Z.205/VYGE-058 bij Vijlen (bron Bermetijn) zijn drie verschillende antibiotica gevonden; het hoogste aantal in de onderzochte bronnen (Figuur 5.2). De St. Brigidabron z.001 is zowel op dinsdag 13 juli als op maandag 19 juli 2021 bemonsterd. In de tussentijdse dagen, 14 en 15 juli, heeft er hevige regenval plaatsgevonden. In het eerste monster voor de regenval is geen enkele parameter aangetroffen. In het monster na de regenval is het antibioticum sulfadiazine aangetroffen.



Figuur 5.2 Overzicht bronnen bemonsterd in juli 2021 voor analyse op opkomende stoffen. Tevens geeft het figuur weer hoeveel stoffen in deze meetronde in een bron zijn aangetroffen.

Tabel 5-2 Overzicht van de analyseresultaten (in ng/l) van de bemonstering van de bronnen tussen 12 en 20 juli 2021 op opkomende stoffen.

	Detectie-grens	Rapportage-grens	n.002	n.003	n.010	n.015	n.091	z.001	z.001	z.035	z.203	z.025	z.027	z.028	Z.205	Z.210	n.020	n.037s
bemonsteringsdatum			12-7-2021	12-7-2021	12-7-2021	12-7-2021	12-7-2021	13-7-2021	19-7-2021	13-7-2021	13-7-2021	19-7-2021	19-7-2021	19-7-2021	19-7-2021	19-7-2021	20-7-2021	20-7-2021
2-aminoflubendazole	1	3	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
5-hydroxy-thiabendazole	1	3	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
abamectine (B1a)	1	3	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
amoxicillin	0,5	1,5	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
atenolol	1	3	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
azithromycin	1	3	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
bezafibrate	1	3	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
carbamazepine	0,1	0,3	0,17	<	1,83	<	<	<	<	<	<	<	<	<	0,13	<	0,21	0,72
cefuroxime	0,5	1,5	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
chloramphenicol	1	3	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
ciprofloxacin	1	3	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
clarithromycin	0,1	0,3	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
dichlofenac	2	6	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
doxycycline	2	6	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
emamectine (B1) B1b	1	3	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
emamectine (B2) B1a	1	3	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
erythromycin	6	18	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
fenofibrate	1	3	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
flubendazole	1	3	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
flumequine	0,5	2	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
furazolidone	1	3	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
gemfibrozil	1	3	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
ibuprofen	1	3	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
ketoprofen	1	3	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
levofloxacin / ofloxacin	0,2	0,6	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
lincomycin	0,1	0,3	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
metoprolol	1	3	<	<	<	<	<	<	<	<	<	4,75	<	<	<	<	<	<
naproxen	1	3	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
oxytetracycline	0,5	1,5	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
roxithromycin	0,1	0,3	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
sulfachloropyridazine	0,1	0,3	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
sulfadiazine	0,1	0,3	<	<	<	<	<	<	0,11	<	<	<	<	<	0,17	<	<	3,20
sulfamethazine	0,1	0,3	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
sulfamethoxazole	1	3	<	<	1,04	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
tetracycline	2	6,0	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
thiabendazole	1	3,0	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	1,18	<	1,12	1,43	<	<
triclosan	1	3	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
trimethoprim	0,1	0,3	<	<	<	<	<	<	<	<	<	0,18	<	<	<	<	<	<
tylosin	0,1	0,3	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<

5.2 Eerdere onderzoeken in bronnen

TNO heeft ook in eerdere (beperkte) meetrondes één of meerdere bronnen op opkomende stoffen geanalyseerd. Op 24 sept 2018 zijn drie bronnen (z.001/MPNO-001, n.020/CPGE-062 en n.002/CPMA-002) in duplo bemonsterd en geanalyseerd op opkomende stoffen (veterinaire antibiotica). Tabel 5-3 toont de analyseresultaten. In bron n. n.020/CPGE-062 is carbamazepine, een anti-epilepticum, aangetroffen in beide monsters. In deze bron is in beide monsters ook thiabendazole (fungicide) aangetroffen. In één van de monsters van n.002 is deze stof ook gedetecteerd. Sulfamethazine, een antibioticum, is in één van de monsters van de St. Brigidabron (z.001) aangetroffen.

Tabel 5-3 Overzicht van analyseresultaten van de drie bronnen in duplo bemonsterd op 24 sept. 2018

parameter	detectie grens	rapportage grens	z.001	z.001	n.020	n.020	n.002	n.002
eenheid	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l
2-aminoflubendazole	1	3	<	<	<	<	<	<
5-hydroxythiabendazole	1	3	<	<	<	<	<	<
abamectine	1	3	<	<	<	<	<	<
amoxicillin	0.5	1.5	<	<	<	<	<	<
azithromycin	1	3	<	<	<	<	<	<
carbamazepine	0.1	0.3	<	<	0.31	0.24	<	<
cefuroxime	0.5	1.5	<	<	<	<	<	<
chloramphenicol	2	6	<	<	<	<	<	<
ciprofloxacin	1	3	<	<	<	<	<	<
clarithromycin	0.1	0.3	<	<	<	<	<	<
doxycycline	2	6	<	<	<	<	<	<
emamectine (B1b)	1	3	<	<	<	<	<	<
emamectine (B1a)	1	3	<	<	<	<	<	<
erythromycin	6	18	<	<	<	<	<	<
flubendazole	1	3	<	<	<	<	<	<
flumequine	0.5	1.5	<	<	<	<	<	<
furazolidone	1	3	<	<	<	<	<	<
levofloxacin / ofloxacin	0.2	0.6	<	<	<	<	<	<
lincomycin	0.1	0.3	<	<	<	<	<	<
oxytetracycline	0.5	1.5	<	<	<	<	<	<
roxithromycin	0.1	0.3	<	<	<	<	<	<
sulfachloropyridazine	0.1	0.3	<	<	<	<	<	<
sulfadiazine	0.1	0.3	<	<	<	<	<	<
sulfamethazine	0.1	0.3	<	0.13	<	<	<	<
sulfamethoxazole	0.5	1.5	<	<	<	<	<	<
tetracycline	2	6	<	<	<	<	<	<
thiabendazole	1	3	<	<	15	65	<	2.0
trimethoprim	0.1	0.3	<	<	<	<	<	<
tylosin	0.1	0.3	<	<	<	<	<	<

Op 7 december 2020 is bron n.020/CPGE-062 in het kader van de interlaboratorium test van het project GeoERA HOVER WP8 bemonsterd. De monsters zijn ingevroren en tegelijkertijd met de hierboven besproken monsters in september 2021 geanalyseerd. Togola et al (2021) geeft meer informatie over de Europese interlab test en de resultaten van de Europese partners. In het rapport Van Vliet et al. (2022) worden de bemonstering en de Nederlandse analyseresultaten besproken en toegelicht. Tabel 5-4 geeft een overzicht van de analyseresultaten. Carbamazepine is als enige

parameter tijdens deze meetronde aangetroffen. Deze parameter is ook in de meetronde van 24 september 2021 in deze bron aangetoond.



Figuur 5.3 Bemonstering bron n.020/CPGE-062 voor het interlaboratorium onderzoek van GeoERA HOVER WP8 op 7 december 2020.

Tabel 5-4 Overzicht analysesresultaten van bron n.020/CPGE-062, bemonsterd op 7 december 2020.

parameter	detectiegrens (ng/l)	rapportagegrens (ng/l)	n.020 (ng/l)
2-aminoflubendazole	1	3	<
5-hydroxy-thiabendazole	1	3	<
abamectine (B1a)	1	3	<
amoxicillin	0,5	1,5	<
atenolol	1	3	<
azithromycin	1	3	<
bezafibrate	1	3	<
carbamazepine	0,1	0,3	0,18
cefuroxime	0,5	1,5	<
chloramphenicol	1	3	<
ciprofloxacin	1	3	<
clarithromycin	0,1	0,3	<
dichlofenac	2	6	<
doxycycline	2	6	<
emamectine (B1) B1b	1	3	<
emamectine (B2) B1a	1	3	<
erythromycin	6	18	<
fenofibrate	1	3	<
flubendazole	1	3	<
flumequine	0,5	2	<
furazolidone	1	3	<
gemfibrozil	1	3	<
ibuprofen	1	3	<
ketoprofen	1	3	<
levofloxacin/ofloxacin	0,2	0,6	<
lincomycin	0,1	0,3	<
metoprolol	1	3	<
naproxen	1	3	<
oxytetracycline	0,5	1,5	<
roxithromycin	0,1	0,3	<
sulfachloropyridazine	0,1	0,3	<
sulfadiazine	0,1	0,3	<
sulfamethazine	0,1	0,3	<
sulfamethoxazole	1	3	<
tetracycline	2	6,0	<
thiabendazole	1	3,0	<
triclosan	1	3	<
trimethoprim	0,1	0,3	<
tylosin	0,1	0,3	<

5.3 Inventarisatie stoffen uit de Brede Screening

Behalve de data van de opkomende stoffen is voor de 14 bronnen ook geïnventariseerd welke stoffen in de “Brede screening” van de Provincie Limburg zijn aangetroffen. Van die dataset is data beschikbaar uit 2007, 2010, 2016 t/m 2021. Het analysepakket van de Provincie bestaat voornamelijk uit pesticiden en metabolieten. Daarnaast zijn alle bronnen (behalve n.002) in 2020 eenmalig op MTBE, ETBE (loodvervangers) en 1,2-dichloorpropan (vluchtige koolwaterstof) geanalyseerd en zijn vijf bronnen in 2016 en 2019 op EDTA (complexvormer) en chloorfenolen onderzocht. De bron n.010/CPMA-034 in Geulle, gelegen nabij het vliegveld Maastricht-Aken, is in 2016 en 2019 op een uitgebreider pakket onderzocht bestaande uit PAK's, PFAS, BTEXN, chloorfenolen en vluchtige koolwaterstoffen.

Voor alle onderzochte parameters uit de TNO-onderzoeken en uit de Brede screening is gekeken hoe vaak ze zijn aangetroffen in een bron. Tabel 5-5 geeft een overzicht van alle stoffen die in de brede screening en/of het TNO-onderzoek zijn aangetroffen in elke van de 14 bronnen. De verschillende parameters zijn vervolgens ingedeeld in parametergroepen:

- Complex vormer;
- Fungicide;
- Herbicide;
- Insecticide;
- Metaboliet;
- Geneesmiddel;
- Antibioticum;
- Overig (PFAS).

In 12 van de 14 bronnen werden in de Brede Screening dan wel het GeoERA onderzoek uit de periode 2018-2021 dergelijke stoffen aangetoond. De data uit de Brede Screening en het GeoERA onderzoek bevestigen de kwetsbaarheid van de Limburgse bronnensystemen voor de uitspoeling van organische microverontreinigingen, zowel uit de landbouw als vanuit stedelijke en industriële bronnen. Overigens zijn de signalen uit de Brede Screening niet nieuw: al in 2001 rapporteerden Van Maanen et al. de aanwezigheid van bestrijdingsmiddelen in een flink aantal bronnen. In de bron n.034 werd ook toen al een substantiële concentratie van het bestrijdingsmiddel atrazine gevonden.

Tabel 5-5 Stoffen die zijn aangetroffen in de onderzochte 14 bronnen tijdens de bemonsteringsrondes van de Brede Screening en de GeoERA bemonsteringsrondes uit 2018-2021.

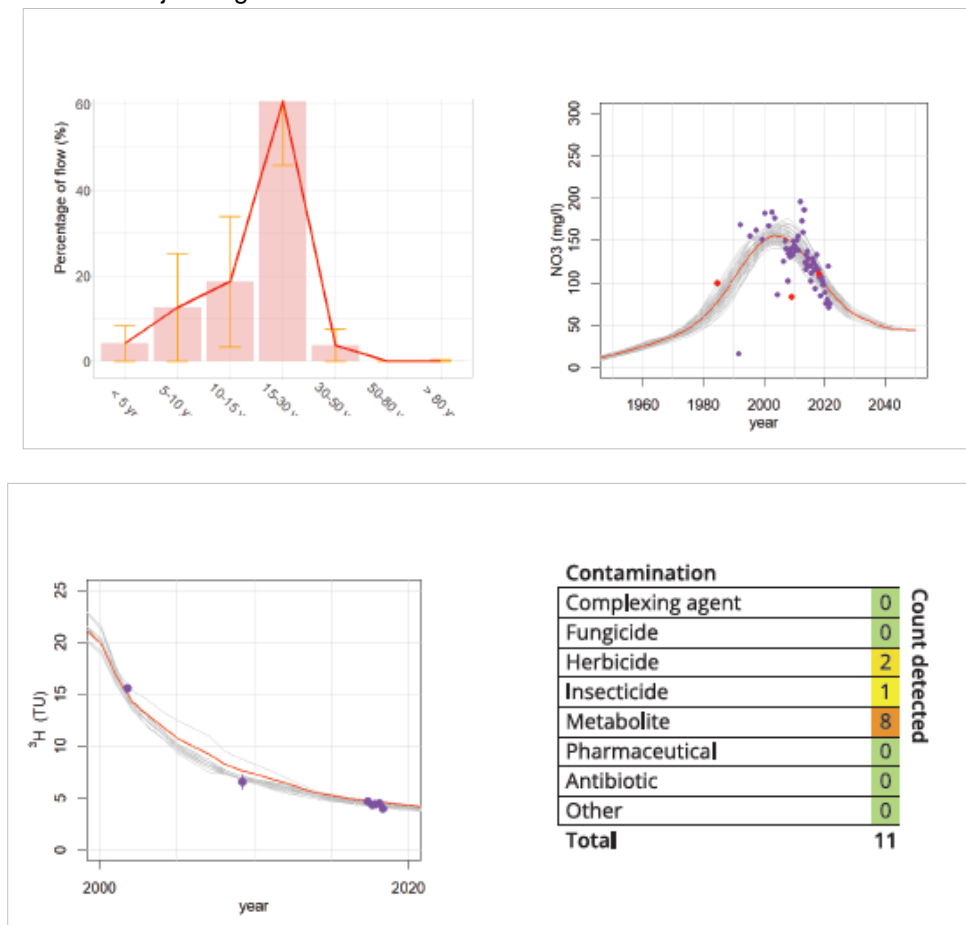
Bronnaam	Stofgroep	Parameter
CPGB-022	herbicide	atrazine
	insecticide	diethyltoluamide
	metaboliet	BAM, desethylatrazine, desfenylchloridazon, dimethylsulfamide (DMS), methyl-desfenylchloridazon
CPGE-062	complexvormer	EDTA
	fungicide	thiabendazole, metalaxyl, penconazool
	herbicide	atrazine, bentazon, metolachloor, simazine, diethyltoluamide, diflubenzuron
	metaboliet	desethylatrazine, desfenylchloridazon, methyl-desfenylchloridazon
	geneesmiddel	carbamezepine
CPMA-002	fungicide	thiabendazole
	herbicide	atrazine, bentazon, simazine
	insecticide	diethyltoluamide, lambda-cyhalothrin
	metaboliet	BAM, desfenylchloridazon, dimethylsulfamide (DMS), methyl-desfenylchloridazon
	geneesmiddel	carbamezepine
CPMA-034	complexvormer	EDTA
	fungicide	o-fenylfenol
	herbicide	atrazine, diuron, monuron, simazine
	insecticide	carbofuran, diethyltoluamide, diflubenzuron
	metaboliet	BAM, desethylatrazine, desfenylchloridazon, desisopropylatrazine,
	PFAS	FBSA, L_PFBS, L_PFHxS, IPFOA, IPFOS, PFHpA, PFHxA, PFOA, PFOS, PFPA
	geneesmiddel	carbamezepine
	antibiotic	sulfamethoxazole
CRGE-031	fungicide	thiabendazole
CRGE-032	fungicide	o-fenylfenol
	insecticide	chloorpyrifos, diethyltoluamide
	geneesmiddel	metoprolol
	antibioticum	trimethoprim
MPGE-006	insecticide	diflubenzuron
	fungicide	o-fenylfenol
MPNO-001	fungicide	o-fenylfenol
	herbicide	metolachloor
	insecticide	diethyltoluamide, desfenylchloridazon, dimethylsulfamide (DMS), methyl-desfenylchloridazon
	antibioticum	sulfadiazine, sulfamethazine
UBGE-001	herbicide	atrazine, bromacil
	geneesmiddel	carbamezepine
	antibiotic	sulfadiazine
UBGE-002	herbicide	dichlobenil, glyfosaat, mecoprop (MCP)
	insecticide	antrachinon, diethyltoluamide
	metaboliet	AMPA
VYGE-19A	insecticide	diethyltoluamide, diflubenzuron
	fungicide	thiabendazole
VYGE-058	insecticide	diethyltoluamide
	fungicide	thiabendazole
	geneesmiddel	carbamezepine
	antibioticum	sulfadiazine

5.4 Introductie op de presentatie van de data in de factsheet

De uitkomst van hiervoor genoemde analyse en de resultaten uit Tabel 5-5 zijn tevens per bron samengevat in een korte tabel op de factsheets (zie hoofdstuk 6). De indeling in de factsheets is gebaseerd op de eerder geïntroduceerde parametergroepen:

- Complex vormer (complexing agent);
- Fungicide;
- Herbicide;
- Insecticide;
- Metaboliet (metabolite);
- Geneesmiddel (pharmaceutical);
- Antibioticum (antibiotic);
- Overig (PFAS; other).

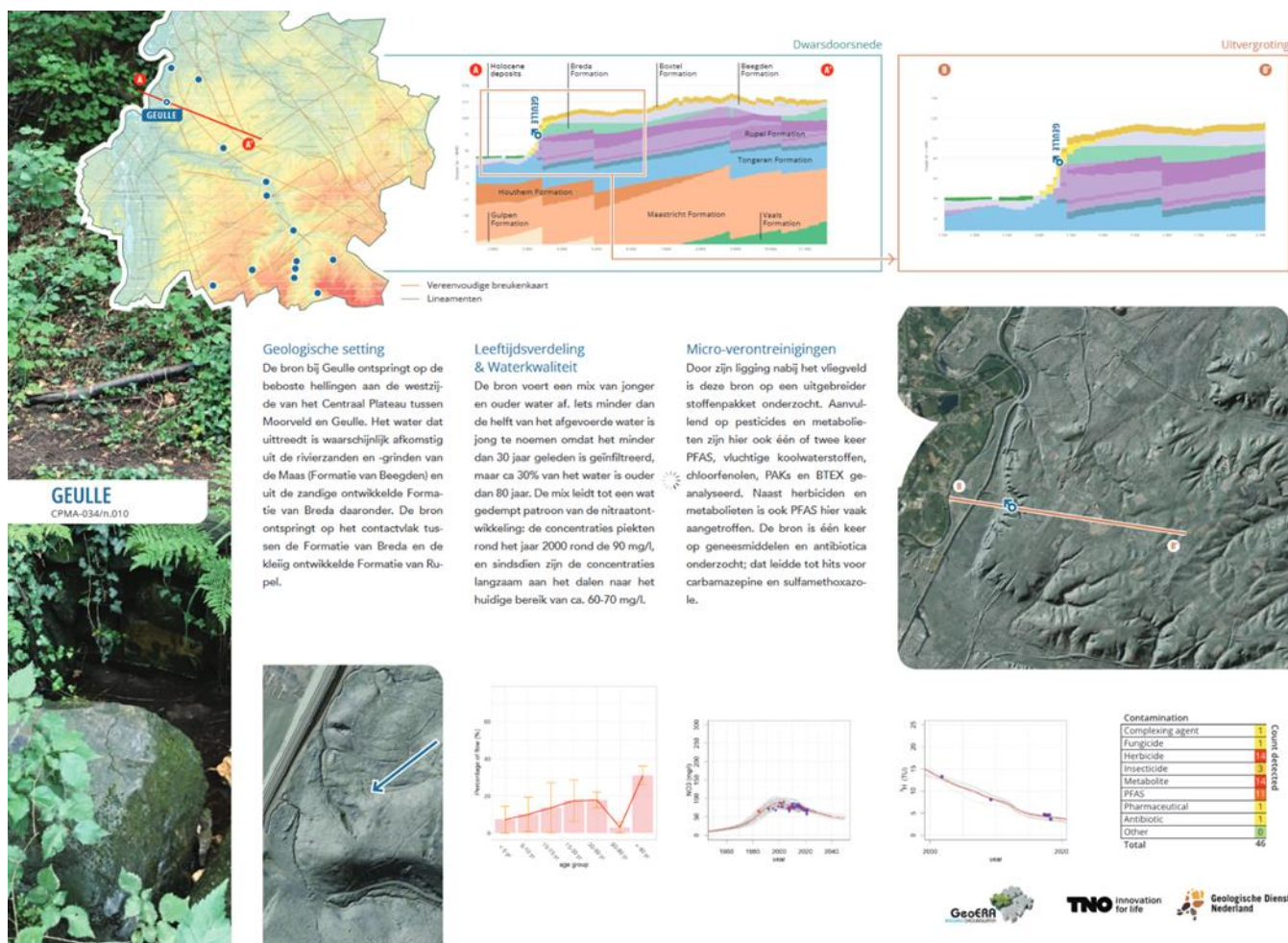
Indien een bron op geen enkele parameter uit een parametergroep is geanalyseerd, komt deze parametergroep ook niet voor in de tabel die opgenomen is op de factsheet behorend bij deze bron. In de factsheet wordt bovenstaande informatie met de leeftjidsverdeling en nitraatconcentratie besproken onder het kopje 'leeftjidsverdeling en waterkwaliteit'. Figuur 5.4 toont de reistijdverdeling, nitraatreconstructie, tritiumreconstructie en aangetroffen stoffen, zoals opgenomen op de factsheet van bron n.091 (CPGB-022, Beek). Uit de figuren blijkt dat n.091 jong grondwater heeft (9% heeft grondwater <30 jaar), de nitraatconcentratie daalt naar 50 mg/l en dat 3 keer pesticiden en 8 keer metabolieten zijn aangetroffen.



Figuur 5.4 Figuren van de reistijdverdeling, nitraatreconstructie en tritiumreconstructie en tabel met aangetroffen stoffen afkomstig uit de factsheet van bron n.091.

6 Introductie op de factsheets

Bij de huidige rapportage hoort een set van factsheets die voor elk van de onderzochte 14 bronnen een overzicht geeft van de topografische positie en de hydrogeologische setting, en waarbij de reistijdverdeling en de nitraat- en tritiumreconstructies zijn gevisualiseerd. Bij elk van de factsheets is daarbij een beknopte beschrijving gegeven van de belangrijkste bevindingen. Een verantwoording van de gebruikte methoden is te vinden in de vorige hoofdstukken van dit rapport.



Figuur 6.1 Voorbeeld van één van de factsheets voor de bron bij Geulle (CPMA-034/n.010).

Elk van de factsheets bevat een regionale hydrogeologische dwarsdoorsnede waarop de positie van de bron is ingetekend, en een ingezoomde dwarsdoorsnede. De dwarsdoorsnedes zijn zelf te creëren in de webtool “Grondwaterkwaliteit in Beeld” die is te vinden op de Grondwatertools webpagina (<https://www.grondwatertools.nl/gwatlas/>). De topografische positie is gevisualiseerd met een schaduwbeeld van het Actueel Hoogtebestand Nederland, waarmee de positie van de bron wordt verhelderd. De reistijdverdeling, de nitraatreconstructie en de tritiumreconstructie wordt op elke factsheet getoond; voor de verantwoording verwijzen we naar hoofdstuk 3 uit dit rapport. Daarnaast is op de factsheets een overzicht te vinden van de grondwaterverontreinigingen die in de bronnen zijn aangetroffen, zoals verantwoord in hoofdstuk 5 van dit rapport.

7 Conclusies en aanbevelingen

Het onderhavige rapport vormt de synthese van het werk dat in GeoERA is uitgevoerd in het deelproject CHAKA: Karst & Chalk. In het rapport hebben we gepoogd een nadere karakterisatie te geven van de hydrogeologische situatie op de Mergelland plateaus in Zuid-Limburg, voor wat betreft het dieptebereik dat van belang is voor de stroming van het zoete grondwater naar bronnen en waterwinplaatsen. In het rapport hebben we de bestaande kennis gebundeld en aangevuld met gegevens van een nieuwe bemonsteringsronde en een analyse van de reistijdverdelingen en de waterkwaliteit in een veertiental bronnen en één waterwinplaats. Daarbij zijn we ingegaan op de hydrogeologische opbouw, de oriëntatie van tektonische zwaktezones en de topografische setting en hebben we een reconstructie en prognose gemaakt van nitraatconcentraties in de bronnen over de periode 1970 tot 2035. Een deel van de resultaten van de studie is opgenomen in factsheets, die voor 14 onderzochte bronnen een overzicht geven van de topografische positie, de hydrogeologische opbouw, de reistijdenverdeling van het grondwater, de concentraties van nitraat in de tijd en het voorkomen van microverontreinigingen, zoals de metaboliëten van bestrijdingsmiddelen.

Het project beoogde een hydrogeologische karakterisatie te maken van het Krijt en boven- en ondergelegen formaties, voor zover die van belang zijn voor de stroming van zoet grondwater naar bronnen en waterwinplaatsen, waarvoor we een aantal subdoelen hebben geformuleerd:

- Vergelijken van het Nederlandse Chalk-systeem met de Karst- en Chalk-systemen van de andere partners in CHAKA;
- Beschrijven van de setting van 14 bronnen in het regionale hydrogeologische systeem van Zuid-Limburg;
- Ontwikkelen van een manier om de reistijdverdelingen van de 14 bronnen te bepalen op een manier waarop het duale permeabiliteitsstelsel in de Chalk goed wordt verdisconteerd;
- Via de afgeleide reistijdverdelingen meer grip krijgen op de ontwikkeling van nitraat- en sulfaat trends in de 14 bronnen en daarmee prognoses te maken van de toekomstige ontwikkeling in die bronnen;
- Het maken van een eerste inventarisatie van diergeneesmiddelen in het water dat uittreedt in de bronssystemen;
- Reconstrueren van de debietreeks van de St. Brigidabron aan de hand van eerder aangetoonde relaties tussen brondebiet en ontwikkelingen in grondwaterstijghoogte op de kalkplateaus.

Om deze doelstellingen te bereiken, hebben we bestaande kennis gebundeld en samengevoegd met kennis uit de andere CHAKA-pilotgebieden en gecombineerd met hydrologische, hydrochemische en geologische informatie.

7.1 Conclusies

Vergelijking van het Nederlandse Chalk-systeem met de Karst- en Chalk-systemen van de andere partners in CHAKA

De St. Brigidabron vormde één van de 16 pilots in het project CHAKA. De bron, die als Nederlandse pilot gekozen werd vanwege de relatief grote hoeveelheid informatie en metingen, blijkt een heel ander hydrologisch en hydrochemisch regime te vertonen dan de andere 15 Europese pilots. Het debiet van de bron reageert veel trager op neerslag dan het debiet van de andere bronnen en de debietsvariaties zijn gedempt. Ook de variatie van de nitraatconcentraties blijkt gedempt te zijn. De St. Brigidabron werd daarom binnen het EU-project als de minst kwetsbare bron beschouwd, omdat ze niet binnen een tijdstroom van dagen tot maximaal weken reageert op mogelijke verontreinigingsgebeurtenissen. Dat de St. Brigidabron en de andere bronnen in absolute zijn wel kwetsbaar zijn voor een scala aan diffuse verontreinigingen, maar op een iets andere tijdstroom, blijkt overigens uit de rest van de rapportage.

Setting van 14 bronnen in het regionale hydrogeologische systeem (factsheets)

De positie van de bronnen in het landschap van Mergelland is gerelateerd aan de hydrogeologische opbouw en de onderliggende, oude tektonische structuur. De oude tektonische structuur is herkenbaar aan de NW-ZO en ZW-NO oriëntaties van beekdalen en droogdalen. De positie van de bronnen wordt daarbij bepaald door de hellingsrichtingen van laagvlakken in het gesteente en zwaktezones die door de tektonische processen zijn ontstaan en daarmee de lokale permeabiliteit hebben vergroot door splijting van het gesteente en oplossing van kalk naderhand. De bronnen bevinden zich vaak halverwege de droogdalen of op plaatsen waar een duidelijke hellingknik optreedt in het landschap of een breuk of zwaktezones dagzoomt. De hydrogeologische setting en topografische positie van elk van de 14 onderzochte bronnen is weergegeven in factsheets. De dwarsdoorsnedes zijn zelf te creëren in de webtool “Grondwaterkwaliteit in Beeld” die is te vinden op de Grondwatertools webpagina (<https://www.grondwatertools.nl/gwatlas/>).

De 14 bronnen zijn grofweg in drie groepen in te delen op basis van de hydrogeologische setting.

- De eerste groep omvat de bronnen op en rond het Centraal Plateau. De bronnen hebben gemeen dat ze ontspringen uit Pleistocene en Tertiaire lagen. De kalksteenpakketten liggen op het Centraal Plateau relatief diep en worden door de bronnen niet aangetapt. Uit de afgeleide reistijdverdelingen blijkt dat deze bronnen gekenmerkt worden door relatief jong water van de laatste 30 jaar en daardoor hoge nitraatconcentraties vertonen en ook kwetsbaar zijn voor pesticiden en opkomende stoffen.
- De tweede groep bronnen ligt in de grote beekdalen in het Mergelland en ontspringt vanuit de kalksteenformaties. Deze bronnen bevinden zich dicht bij het laagste topografische punt in hun gebied, in het diep ingesneden beekdal van de Geul of de Gulp. Meestal ontspringen de bronnen op een hellingknik of zoals in het geval van de bron bij Kasteel Wittem ter hoogte van een dagzomende breuk in de onderliggende kalksteen. Gemiddeld hebben deze bronnen duidelijk lagere nitraatconcentraties en minder organische microverontreinigingen, wat wordt verklaard door een relatief grote bijdrage van water dat ouder is dan 80 jaar.
- De derde groep bronnen bevindt zich in de uitlopers van de droge dalen van de zuidelijke kalksteenplateaus. Ze ontspringen vaak halverwege de droge beekdalen vaak in ZW-NO gerichte zwaktezones. De bronnen lijken een duidelijk karakter van duale permeabiliteit te kennen met een relatief snelle (5-30 jaar) en een relatief langzame component (>80 jaar). Qua nitraatconcentraties nemen ze een tussenpositie in: duidelijk lagere concentraties dan op het Centraal Plateau, maar wel een dalend verloop door de bijdrage van de jongere component (zie verder). Veel van de bronnen lijken niet alleen door de kalksteenformaties te worden gevoed, maar ook vanuit de dieper gelegen Formatie van Vaals.

Reistijdverdelingen 14 bronnen op basis van secundaire permeabiliteit/porositeit

De reistijdverdeling van de 14 bronnen is in dit onderzoek afgeleid met een nieuwe methode die de mogelijkheid van een bimodale verdeling van de reistijden toelaat. Voor de 14 bronnen was eerder een reistijdverdeling afgeleid op basis van een gecombineerd exponentieel en piston flow model dat met name voor de laatstgenoemde groep van 6 bronnen niet goed leek te voldoen. De nieuwe methode gaat uit van een zogenaamde “free-shape” ofwel verdelingsvrije methode, waarmee in eerdere onderzoeken goede ervaringen waren opgedaan. Voor de genoemde drie groepen bronnen geldt grosso modo het volgende:

- relatief jong water in de bronnen op het Centraal Plateau wat zich uit in hoge nitraatconcentraties ten gevolge van de piek in mestbelasting rond 1995 en een snelle daling nadien, met concentraties die zich ook nu nog ruim boven de 50 mg/l bevinden;
- relatief oud water in de bronnen in de grote beekdalen, met duidelijke lagere concentraties nitraat door de bijmenging van ouder nitraatloos water met een stabilisatie van de nitraatconcentraties sinds ca. 2010;
- een bimodaal karakter van de reistijdverdeling bij de bronnen op de zuidelijke plateaus, met nitraatconcentraties die rond 2000 op een lager niveau pieken dan op het Centraal Plateau, maar met een duidelijke, maar langzamere afname van de nitraatconcentraties sinds die tijd.

Begrijpen van nitraat- en sulfaat-trends in 14 bronnen inclusief prognose

Het verband tussen de reistijdverdeling en de ontwikkeling van de nitraatconcentraties is voor alle 14 onderzochte bronnen geanalyseerd aan de hand van de fractie water die jonger is dan 30 jaar. Bronnen met een grote fractie jong water liggen met name op het Centraal Plateau en bronnen met een kleine fractie jong water met name in de grote beekdalen. De nitraatconcentraties in bronnen met een grote fractie jong water zijn hoog, maar dalen ook relatief snel tussen 2001 en 2021. In bronnen met een kleine fractie jong water zijn de concentraties juist laag, maar dalen ze ook veel minder snel. In de bronnen met een grote fractie jong water volgt sulfaat het patroon van nitraat met afnemende concentraties tussen 2001 en 2021, wat samenhangt met de afnemende input van sulfaat uit mest en atmosferische depositie. In bronnen met een kleine fractie jong water is daarentegen een toename te zien van de sulfaatconcentraties, wat wij relateren aan de eerste doorbraak van ouder, nitraathoudend water dat heeft gereageerd met sporadisch aanwezig pyriet in delen van de Formatie van Vaals. De sulfaatconcentraties in die bronnen zijn relatief laag (30-50 mg/l) maar de toename is traag doch gestaag en mogelijk heeft de toename op termijn ecologische consequenties voor de betrokken bronsystemen en beekdalen.

Inventarisatie van diergeneesmiddelen in het water van de bronnen

Tussen 2018 en 2021 is een inventarisatie uitgevoerd van het voorkomen van opkomende stoffen en diergeneesmiddelen. In 7 van de 15 bronnen uit het GeoERA CHAKA onderzoek werden daadwerkelijk resten van diergeneesmiddelen aangetroffen, waaronder de antibiotica sulfadiazine en sulfamethoxazole. Uit een inventarisatie van eerdere metingen in het kader van de brede screening, kan uit het grote aantal treffers worden geconcludeerd dat de bronnen in Mergelland niet alleen kwetsbaar zijn voor nitraat, maar ook voor bestrijdingsmiddelen, diergeneesmiddelen en andere opkomende stoffen die uitspoelen naar het grondwater onder de plateaus. In 12 van de 14 in detail onderzochte bronnen werden één of meer van deze stoffen aangetroffen in de meetrondes van de Brede Screening en/of het GeoERA CHAKA onderzoek.

Reconstructie van de debietreeks van de St. Brigidabron

In de CHAKA studie is het verloop van het debiet van de St. Brigidabron beschouwd om een vergelijk te kunnen maken met de andere CHAKA-pilots. Op basis van eerder onderzoek van de WUR hebben we een reconstructie gemaakt van het debiet van de bron over de periode 1990 tot en met 2020. Uit die reconstructie blijkt dat het debiet van de bron over die periode een dalende tendens vertoont. We kennen de precieze oorzaken van die trend op dit moment nog niet. Er kan een mogelijk verband zijn met de effecten van een veranderend klimaat en een daardoor veranderde voeding, maar ook effecten door meer directe menselijke ingrepen zoals verandering in het landgebruik, waterwinning of onttrekkingen voor beregening kunnen niet worden uitgesloten.

7.2 Aanbevelingen & suggesties

Op basis van de studie kunnen we een aantal kennislacunes benoemen en suggesties doen voor het gebruik van de kennis en data die in dit onderzoek is verzameld. Het gaat daarbij om:

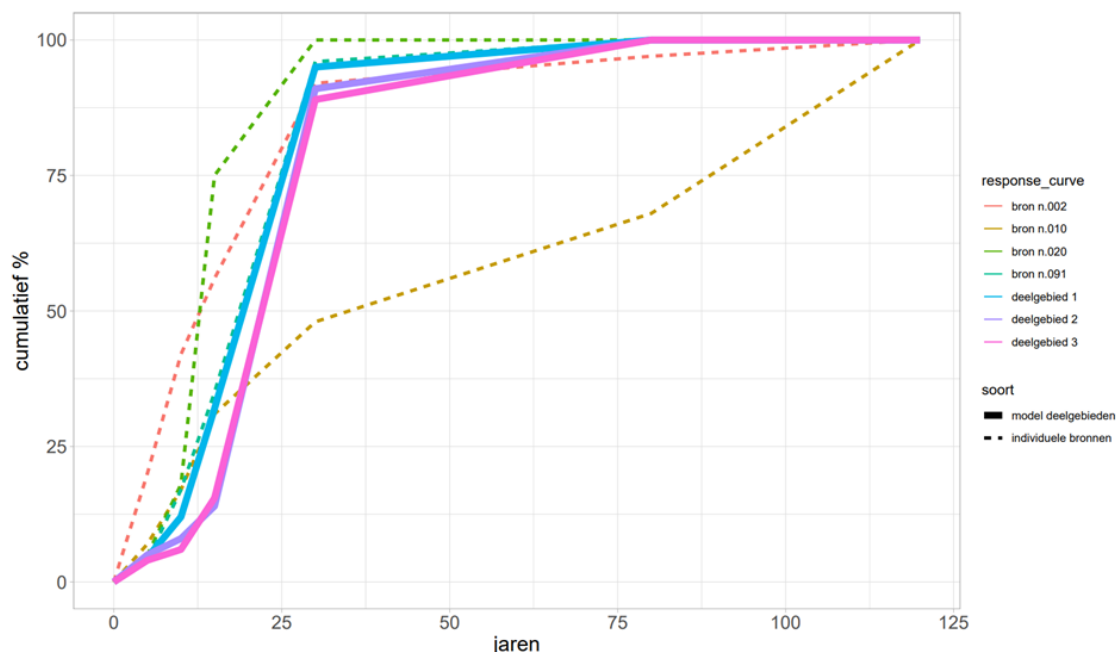
1. Het gebruik van de afgeleide reistijdverdelingen met onzekerheden voor de validatie van modellen waarmee nitraatprognoses worden opgesteld voor diverse bronsystemen;
2. Integreren van de kennis uit dit rapport met werk aan de intrekgebieden van bronnen in het kader van Natura2000-beleid;
3. Het uitvoeren van nieuwe tritiumbepalingen en het afleiden van reistijden bij de waterwinningen;
4. De reconstructie van de trend in de afvoer van de St. Brigidabron in relatie tot klimaat en gebruik van de ondergrond;
5. Doorwerking van de diepe tektonische structuren op de permeabiliteit in de kalksteen en Vaals;
6. Inzet van het Limburgse bronnenmeetnet voor inventarisatie van het transport van opkomende stoffen in de ondergrond van Limburg;

7. Nader onderzoek naar de oorzaak van de toenemende sulfaatconcentraties in de bronnen op de zuidelijke plateaus.

Ad 1. Gebruiken van de afgeleide reistijdverdelingen ter validatie van modellen

In de provincie Limburg worden reistijdmodellen gebruikt om de ontwikkeling van nitraatconcentraties in bronsystemen te begrijpen en scenario's te schetsen voor grondwaterbeschermingsbeleid (Van de Weerd, 2018). De manier waarin in de huidige studie reistijdverdelingen zijn opgesteld voor de bronnen verschilt wezenlijk van die eerdere studies in het Mergelland, maar is ook complementair aan dat werk. In de huidige studie wordt de reistijdverdeling gebaseerd op een tijdreeks van 3 of 4 tritiummetingen in de individuele bronnen over een tijdperiode van ca. 10 of 20 jaar in combinatie met een fit op de gemeten nitraatconcentraties. Vervolgens is met deze afgeleide reistijdverdeling een prognose gemaakt van de ontwikkeling van de nitraatconcentraties op basis van een gemiddelde uitspoeling van stoffen op de plateaus die de bronnen voeden. Deze methode is complementair aan werk dat is uitgevoerd door Van de Weerd (2018) en Bouwmeester & Van de Weerd (2018) waarbij de reistijd voor drie deelgebieden van het plateau ten oosten van het Bunder- en Elsoërbos is afgeleid uit een hydrologische modellering. Voor een kalibratie van de reistijd in het verzadigde grondwater zijn daarbij de tritiummetingen uit 2001, van Hendrix en Meinardi (2004), gebruikt. Door de reistijden te koppelen met gedetailleerde landgebruiks-informatie en voor elk landgebruik binnen de veronderstelde intrekgebieden een uitspoelingshistorie te modelleren, maakt Van de Weerd (2018) daarmee een prognose van de ontwikkeling van de nitraatconcentraties voor de drie deelgebieden. Op die manier komen Bouwmeester & Van de Weerd (2018) tot een gemiddelde totale reistijd van 17 jaar voor deelgebied 1 (noordelijk deel van het gebied) en 21 jaar voor de deelgebieden 2 en 3 (zuidelijke delen van het Bunder- en Elsoërbos), waarbij zij concluderen dat reistijd door de onverzadigde zone groter is dan de reistijd in de verzadigde zone daaronder. De studies zijn onderling niet direct vergelijkbaar omdat binnen CHAKA de reistijdverdeling en nitraatprognose wordt opgesteld voor individuele bronnen met een gemiddelde uitspoeling op de plateaus, terwijl de studies van Van de Weerd uitgaan van een ruimtelijk gedetailleerde uitspoeling, maar de reistijdverdeling en nitraatprognoses vervolgens berekenen voor grote deelgebieden. Uit het CHAKA-werk blijkt echter al dat de reistijdverdelingen van individuele bronnen fors kunnen afwijken van een gemiddelde over een plateau, bijvoorbeeld doordat andere lagen in de ondergrond worden aangetapt. Onze indruk is echter dat beide studies elkaar kunnen versterken, waarbij er een potentie is om de beleidsscenario's ook te evalueren op het niveau van individuele bronnen via de afgeleide individuele reistijdverdelingen. Daarbij helpt het dat de reistijdverdeling voor alle door het RIVM onderscheiden bronnen binnenkort beschikbaar komen, en deels al zijn gerapporteerd via een iets andere analysemethode (Van Vliet & Broers, 2019).

Om een eerste indruk te krijgen van de verschillen tussen de studies van Van de Weerd en CHAKA is Figuur 7.1 gemaakt. Daarin zijn de responscurves van de drie deelgebieden van Van de Weerd in eenzelfde plot gezet als de responscurves van de vier bronnen rond het Centraal Plateau uit CHAKA. Een responscurve is daarbij de cumulatieve reistijdverdeling, een iets andere vorm van de weergave van de reistijdsverdeling met histogrammen die de vergelijking wat duidelijker maakt. Uit de figuur blijkt dat de reistijdverdeling van bron n.091 bij Beek sterk lijkt op die van deelgebied 1, maar dat de andere bronnen duidelijk jonger water laten zien (n.002 Elsloo en n.020 Valkenburg) dan wel een mix van duidelijk ouder water (n.010 bron bij Geulle). Bij n.010 (Geulle) lijkt dat te komen doordat diepere laagpakketten uit de Rupel Formatie en Formatie van Breda worden doorstroomd. Op basis van deze informatie mag ook worden verwacht dat de nitraatrespons van de bronnen onderling duidelijk verschilt; de blijkt ook uit de veel lagere nitraatconcentraties in n.010 ten opzichte van de bronnen met jonger water. Gebruik van deze informatie bij het ontwikkelen en evalueren van beleidsscenario's voor de bescherming van de bronsystemen levert dus duidelijk meerwaarde.



Figuur 7.1 Vergelijking tussen de responsecurves voor de drie deelgebieden (Van de Weerd, 2018) en de responscurves van de 4 bronnen rond het Centraal Plateau die in de onderhavige studie zijn onderzocht.

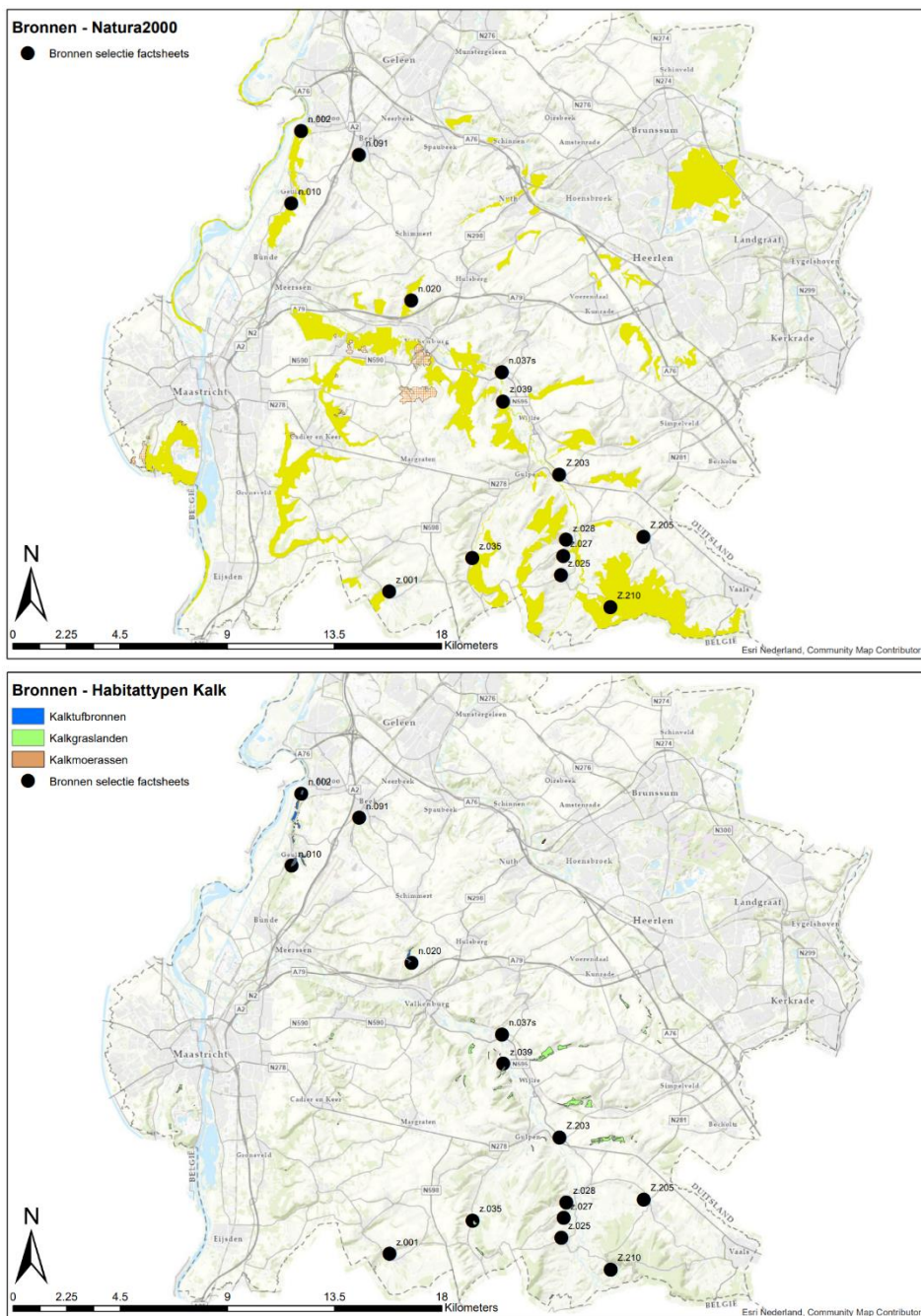
Een aspect dat daarbij ook aandacht verdient is de inschatting van toekomstige uitspoeling van nitraat. Voor de periode sinds 2005 zijn in dit CHAKA rapport duidelijk andere nitraatconcentraties ingeschat dan in de studies van Van de Weerd (2018). In de nitraatreconstructies in dit CHAKA rapport, maar ook in de voorafgaande rapporten voor het RIVM (Broers & Van Vliet, 2018) en voor de Provincie (Van Vliet & Broers, 2019), is uitgegaan van een stabilisatie van de uitspoeling op de plateaus rond de 50 a 55 mg/l. In de studies van Van de Weerd wordt echter in 2020 al een gemiddelde uitspoeling rond de 36 mg/l nitraat opgevoerd. Onze indruk is dat de vermindering van de uitspoeling in werkelijkheid minder snel is gegaan. Het is daarom de moeite waard om uit te zoeken wat het effect is van de snelheid van de vermindering van de uitspoelingsconcentraties op de individuele bronnen. Dit is met name relevant omdat de referentiewaarde voor het Natura 2000 habitattypen Kalktufbronnen voor nitraat 18 mg/l bedraagt, een waarde die op termijn alleen kan worden gehaald als de gemiddelde uitspoelingsconcentraties op de plateaus zelf onder die grenswaarde zullen blijven.

Tenslotte is het in dit verband nuttig om in meer detail te karteren uit welke lagen in de Formaties van Breda, Rupel en eventueel Tongeren de diverse bronniveaus rond het Bunder- en Elsoërbos worden gevoed. Het verdient daarbij aanbevelingen om de boringen die ca. 2 jaar geleden zijn uitgevoerd in detail te analyseren, niet alleen qua lithologische opbouw, maar ook wat betreft sediment-mineralogische samenstelling en reactiviteit. Daarvoor zouden bij voorkeur ook zogenaamde CNS-analyses kunnen worden uitgevoerd, die een idee kunnen geven van de denitrificatiecapaciteit in de verschillende lagen.

Ad 2. Integreren van de kennis met werk aan de intrekgebieden ten behoeve van Natura2000

De Provincie Limburg hecht aan de bescherming van de bronnen die binnen het Natura 2000 habitattypen *Kalktufbronnen* en *Vochtige alluviale bossen vallen* (zie Figuur 7.2). Voor elk van de bronnen is daartoe een inschatting gemaakt van het intrekgebied, waarvoor met een mobiel meetschot debietmetingen zijn verricht (De Mars & van der Weijden, 2019, Van der Weijden et al., 2020). Bij het bepalen van de intrekgebiedjes is een inschatting gemaakt van de hydrogeologische setting van elk van de bronnen, en bovendien zijn kwaliteitsmetingen uitgevoerd van het bronwater (De Mars & van der Weijden, 2019). De metingen zijn daarbij getoetst aan ecologische grenswaarden: 18, respectievelijk 28 mg/l nitraat voor goede, respectievelijk matige ecologische

toestand, 50 mg/l voor sulfaat en 0,05 mg/l voor fosfaat. Bij de interpretatie van die metingen is de kennis uit eerdere rapporten over de reistijdverdeling (Broers & Van Vliet, 2018, Van Vliet & Broers, 2019) echter tot op heden niet betrokken. Op basis van deze studies kan de interpretatie van de gemeten nitraat- en sulfaatconcentraties worden geoptimaliseerd.



Figuur 7.2 Positie van de 14 bronnen in relatie tot de Natura2000 gebieden in Limburg (boven) en in relatie tot de habitattypen kalktufbronnen, kalkgraslanden en kalkmoerassen.

Het verdient daarom aanbeveling om de kennis uit de huidige CHAKA studie en de genoemde eerdere onderzoeken te integreren in de interpretaties over de instandhouding van de Natura2000 habitattypen. Specifieke aandacht is daarbij nodig voor sulfaat. In de rapportages wordt sulfaat vrijwel uitsluitend gekoppeld aan het optreden van pyrietoxidatie en wordt voorbijgegaan aan de influx van sulfaat bij de uitspoeling van mest en de influx vanuit atmosferische depositie. Dit klemt des te meer omdat de grenswaarde van 50 mg/l in veel bronsystemen wordt overschreden. Zoals in dit rapport

(zie paragraaf 3.6) wordt betoogd, dalen de sulfaatconcentraties in de bronnen op het Centraal Plateau als gevolg van dalende influx van stoffen, maar is op de zuidelijke plateaus een stijging gaande waarbij de grenswaarde op termijn alsnog lijkt te worden overschreden.

Ad 3. Afleiden van reistijden bij de waterwinningen

Voor veel bronsystemen kunnen we inmiddels beschikken over een tijdreeks van tritiumconcentraties over de periode 2001 tot 2018. Daarmee kunnen die tritiumconcentraties worden gebruikt om een reistijdsverdeling af te leiden door convolutie met de bekende tritiumconcentraties uit neerslag over de laatste 70 jaar. Een soortgelijke aanpak is ook mogelijk voor de pompputten van de waterwinningen in het gebied. Van die pompputten zijn enkele ad hoc tritiummetingen beschikbaar uit de jaren 80 en soms een enkele meer recente bepaling. Door een dergelijke tijdreeks op te bouwen is op het op de iets langere termijn mogelijk de reistijdverdeling ook voor de pompputten op te stellen. Dit kan helpen bij de prognoses van de ontwikkeling van concentraties van nitraat, sulfaat en bestrijdingsmiddelen. Eén tritium meting per 5 jaar per pompput voldoet daarbij, omdat de tritiumconcentraties maar langzaam dalen. Het kan in het geval van de winningen in Mergelland ook nuttig zijn om tegelijkertijd de concentraties CFK's te meten en de concentratie van het gas SF₆. In andere delen van Nederland zijn die gassen in de ondergrond aan reductie onderhevig, maar dat is in de nitraatrijke omgeving van het Mergelland niet het geval. Deze gasmetingen kunnen helpen als extra 'constraint' bij de interpretatie van de tritiumtijdreeks bij het bepalen van de reistijdverdeling.

Ad 4. Trends in de St. Brigidabron in relatie tot klimaat en gebruik van de ondergrond

Uit de reconstructie van het debiet van de St. Brigidabron over de periode 1980-2020 komen signalen over een dalende tendens en een veranderend stijghoogteregime in de omgeving. Daarom wordt aanbevolen om naar eventuele trends in de stijghoogten op de kalksteenplateaus te kijken, waarvan in ieder geval voor de St. Brigidabron is vastgesteld dat ze een duidelijke relatie hebben met de brondebieten. Voor dergelijke onderzoek is een aantal meetpunten met langere tijdreeksen in Mergelland beschikbaar. Aanbevolen wordt de tijdreeksanalyses uit grondwaterstandeninbeeld.nl te verfijnen, bijvoorbeeld door het effect van veranderende meetfrequenties in de tijd te verdisconteren, mogelijk in combinatie met een fysisch-gebaseerd model met bijvoorbeeld IBRAHYM3. Het is daarbij aan te bevelen om de nieuwste meetdata tot 2023 in de analyse te betrekken.

We kennen de precieze oorzaken van die mogelijk dalende trends op dit moment nog niet en het is niet op voorhand duidelijk of het om een lokaal of regionaal effect gaat. Er kan een verband zijn met de effecten van een veranderend klimaat en een daardoor veranderde voeding, maar ook effecten door meer directe menselijke ingrepen zoals een trage doorwerking van het effect van waterwinningen aan de westzijde van het Plateau van Margraten, toenemende verstedelijking maar wellicht ook een toenemend gebruik van grondwater onder de plateaus ten behoeve van de beregening van gewassen. De lange termijn gevolgen van mogelijk afnemende debieten van de bronnen in Mergelland zijn potentieel groot; immers, bronnen zoals de St. Brigida bepalen voor een groot deel de afvoer van de beken die de plateaus ontwateren, en het risico bestaat dat de beken regelmatig droog zullen vallen als de tendens zich doorzet met mogelijke ecologische consequenties. Inzicht in de bepalende factoren van dit proces is ook van belang voor een goed inschatting van de waterbeschikbaarheid voor verschillende gebruiksfuncties in het gebied op de langere termijn.

Het is ons in dit verband opgevallen dat van de Limburgse bronnen nauwelijks gegevens beschikbaar zijn over de afvoer in de tijd. De enige bron met een afvoerreeks van enige lengte is de St. Brigidabron, maar ook bij de St. Brigidabron zijn geen systematische metingen meer gaande. Dat heeft een tweetal nadelen:

- Het is daardoor in vergelijking met bronnen in andere Europese stroomgebieden lastig om de waterkwaliteitspatronen goed in te schatten en daarmee ook om een prognose te doen over veranderingen in de watersamenstelling. De hoge nitraatconcentraties, de aangetroffen residuen van bestrijdingsmiddelen en de lichte toename van sulfaat in zuidelijke bronnen, geven aanleiding

om debieten beter in kaart te brengen, omdat de bron toch vaak de start is van een ecologisch relevant beekstelsel.

- Het tweede nadeel is dat het zicht ontbreekt op de ontwikkeling van de afvoer van de bronnen zelf, waarvan het afvoerregime bijvoorbeeld ten gevolge van menselijke invloeden en klimaatverandering zou kunnen veranderen. Het signaal van dalende tendens van het debiet van de St. Brigidabron is daarvan een voorbeeld. Aangezien grondwater vaak een bufferende rol speelt, bijvoorbeeld in de temperatuurbuffering van beekjes (zie bijv. Kaandorp et al., 2021), is het belangrijk om zicht te houden op die grondwaterbijdrage aan de beeksystemen in Zuid-Limburg, en dus ook op het debiet van de toeleverende bronnen.

Om deze redenen wordt aanbevolen om systematisch de afvoer te gaan meten bij belangrijke bronnen. Die meetdata kunnen vervolgens ook als referentie dienen om de mogelijke effecten van toekomstige grote ingrepen in het bodem- en watersysteem in beeld te krijgen, zoals die bijvoorbeeld samenhangen met veranderingen in het waterbeheer als uitvloeisel van *Bodem-en-water-sturend* en de eventuele komst en bouw van de Einsteintelecoop. Ook verdient het aanbeveling om te inventariseren of er een toename is van de onttrekking van grondwater door beregening. Gezien de toenemende behoefte aan irrigatie van gewassen in andere delen van het land is het niet ondenkbaar dat dit ook in Mergelland het geval is.

Ad 5. Doorwerking van de diepe tektonische structuren op de permeabiliteit in de kalksteen en de Formatie van Vaals

De mate waarin diepe hydrogeologische structuren doorwerken op de permeabiliteit van de kalksteen in de Formaties van Gulpen en Maastricht en in de verkitte delen van de Formatie van Vaals is voor zuidelijk Limburg niet goed bekend. De doorwerking van de diepe ZW-NO structuren naar de ondiepere kalksteenaquifers is niet goed in beeld en kan worden onderzocht met gerichte geofysische opnames, bijvoorbeeld met ondiepe hoge resolutie seismiek. Het verdient in dat kader aanbeveling om het onderzoek naar het hydrogeologische systeem en de bronnen in zuidelijke deel Zuid-Limburg te continueren, ook in verband met nieuwe ontwikkelingen zoals de mogelijke komst van de Einstein telescoop en de ontwatering die daarvoor noodzakelijk lijkt. Over de relaties tussen de grondwaterstroming in het Krijt, en in het bijzonder de wisselwerking met de Formaties van Vaals en Aken en de daaronder gelegen paleozoïsche gesteenten is nog onduidelijkheid, al zijn in dit rapport wel de nodige hypothesen opgesteld.

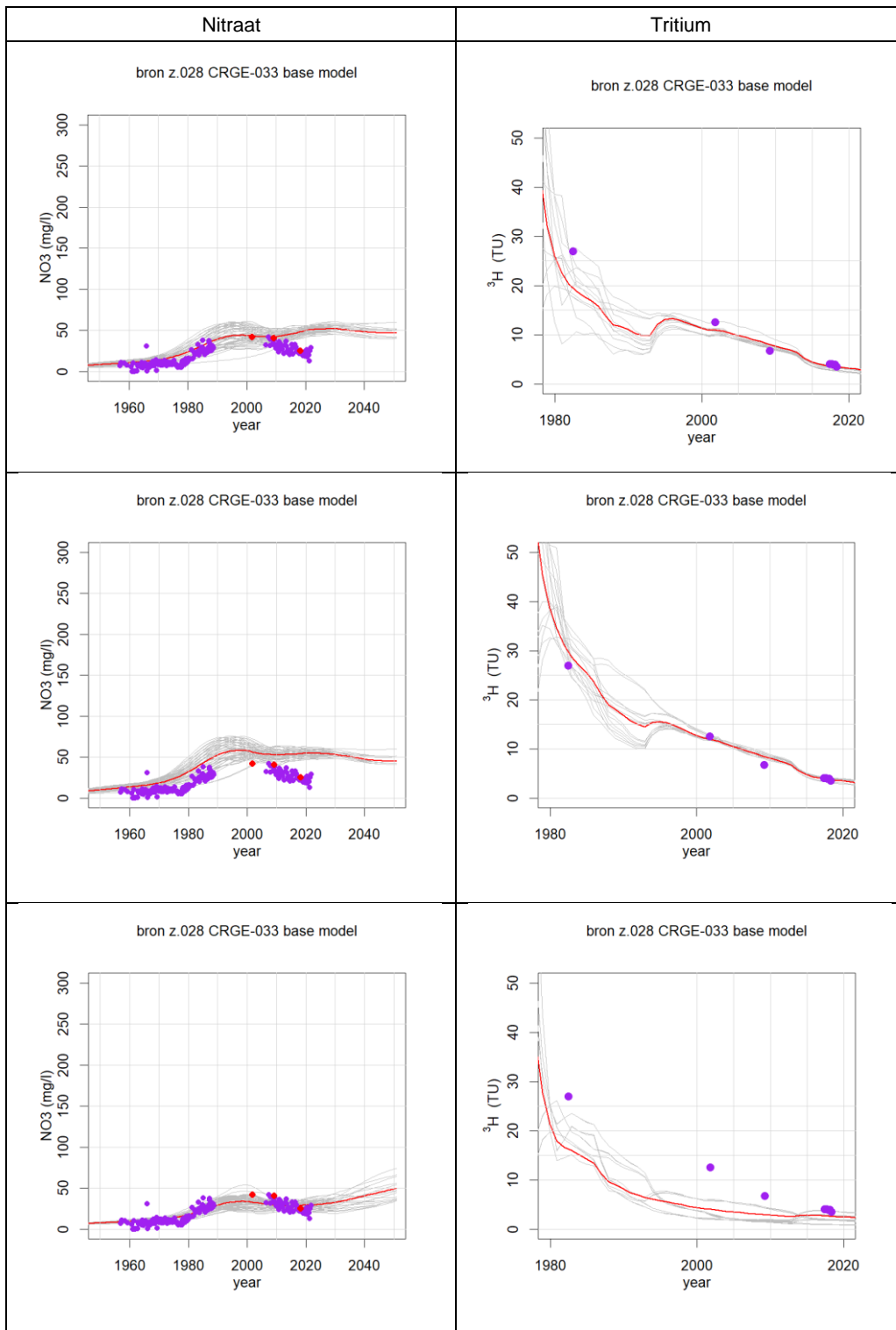
Ad 6. Inventariseren het transport van opkomende stoffen met het Limburgse bronnenmeetnet

Aanbevolen wordt om de systematische waterkwaliteitsbemonstering van de bronnen in het kader van de KRW door te zetten met een driemaandelijke frequentie. De tijdreeksen die sinds het begin van de KRW-metingen in 2005 zijn opgebouwd zijn waardevol om een beter begrip te krijgen over de stromingssituatie en de kwetsbaarheid van de bronnen. Uit de inventarisaties van aangetroffen bestrijdingsmiddelen en diergeneesmiddelen blijkt nogmaals dat het grondwatersysteem van de Limburgse lössplateaus kwetsbaar is en dat dergelijke stoffen uitspoelen vanaf maaiveld en bijdragen aan fluxen van de stoffen in bronnen en het ontvangend oppervlaktewatersysteem. Het verdient aanbeveling om een relevante subset van middelen en stoffen op systematische wijze in de monitoring van het bronnenmeetnet op te nemen.

Ad 7. Beter snappen van de trends in sulfaat in de zuidelijke bronnen

Eén van de aandachtspunten uit dit onderzoek is de geleidelijke toename van sulfaat in de bronnen op de zuidelijke plateaus. Die toename is relevant omdat de Natura2000 grenswaarde voor sulfaat van 50 mg/l bij een deel van de zuidelijke bronnen in het vizier komt of inmiddels wordt overschreden. De hypothese is dat die toename het gevolg is van het doordringen van bemest water tot aan het niveau van de Formatie van Vaals. Het gevolg van die doorbraak naar de Formatie van Vaals is dat nitraat kan reageren met in de Formatie van Vaals aanwezig pyriet, waarbij sulfaat wordt gemobiliseerd dat naar de bron stroomt. In de prognoses van de waterkwaliteit die voor de zuidelijke bronnen zijn gemaakt is tot nu toe steeds aangenomen dat in het grondwatersysteem geen denitrificatie optreedt en dus ook geen mobilisatie van sulfaat. Voor enkele onderzochte bronnen in

het zuiden (met name CRGE-033 en CRGE-032) ontstaat daardoor een afwijking tussen de geprognoseerde concentratie nitraat en de werkelijk gemeten concentratie, die lager is en sneller afneemt dan voorspeld. Een voorbeeld van zo'n bronsysteem is de Landeus (CRGE-033), de voormalige captage voor de drinkwatervoorziening die ooit is gesloten vanwege toenemende concentraties nitraat. Voor deze bron is geen model te vinden dat zowel de tritiumconcentraties goed fit als de nitraatconcentraties (zie Figuur 7.3). Onze hypothese voor deze afwijking is dat in een deel van het ouder water nitraat wordt omgezet in een reactie met pyriet, waardoor in dat deel van het water de sulfaatconcentraties stijgen en de nitraatconcentraties dito dalen. Mogelijk speelt eenzelfde proces deels ook bij de huidige kalksteenwinning Roodborn (zie paragraaf 3.8). Voor dit type bronnen en winningen is het de moeite waard om de reistijdmodellen zo aan te passen dat dit proces in het oudere water wordt verdisconteerd; aanbevolen wordt om dat in een toekomstige studie te doen om op die manier beter grip te krijgen op de ontwikkeling van zowel de nitraat- als sulfaatconcentraties (zie Figuur 7.3).



Figuur 7.3 Reconstructie en prognose van de nitraat- en tritiumconcentraties bij bron CRGE-033, de Landeus. Bovenste rij: model gekalibreerd met zowel tritium als nitraat. Middelste rij: model gekalibreerd met alleen tritiumconcentraties. Onderste rij: model gekalibreerd met alleen nitraat, waarbij de grote afwijking met de gemeten tritiumconcentraties opvalt die wellicht verminderd kan worden door denitrificatie op het model op te nemen.

8 Referenties

- Allen, D.J., L.J. Brewerton, L.M. Coleby, B.R. Gibss, M.A. Lewis, A.M. MacDonald, S.J. Wagstaff and A.T. Williams (1997). The physical properties of major aquifers in England and Wales. British Geological Survey, Keyworth, Nottingham.
- Bergsma, T. (2012) Implementatie van duale porositeit in het integraal water en nitraatmodel Heuvelland (IWANH). ARCADIS rapport C01013.000145.0200.
- Bloomfield, J. (1996). Characterisation of hydrogeologically significant fracture distributions in the Chalk: an example from the Upper Chalk of southern England. *Journal of hydrology*, 184(3-4), 355-379.
- Broers, H.P. en M.E. van Vliet (2018). Dateringsonderzoek bronnen en bronbeken Zuid-Limburg. Prognose van de nitraatconcentraties in Limburgse bronnen voor het KRW-jaar 2027, rapport TNO 2018 R10421, TNO, Utrecht.
- Broers, H.P., P. Schipper, F. van Geer en R. Stuurman (2005) Opzet van het KRW-meetprogramma grondwater voor het stroomgebied Maas. TNO rapport NITG 05-176-A, 89 p.
- Broers, H.P., M.E. van Vliet, T. Kivits (2022). Factsheets bronnen Zuid-Limburg. Publicatie Geologische Dienst Nederland.
- Broers, H. P. and van Vliet, M. E. (2018) Dateringsonderzoek bronnen en bronbeken Zuid-Limburg, TNO-rapport TNO 2018 R10421, TNO, Utrecht, p. 21, 2018.
- Cleveland, W. S. (1979). Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. *Journal of the American statistical association*, 74(368), 829-836.
- Dijkema, R., & van Lanen, H. A. J. (2001). *De afvoer van de Noor (Zuid-Limburg): periode 1992-2000* (No. 98). Landbouwniversiteit Wageningen.
- Dijkema, R., van Lanen, H. A. J., Ackerman, W. J., & Gertsen, H. F. (1998). *De afvoer van de Noor (Zuid-Limburg), periode 1992-1997* (No. 78). Landbouwniversiteit Wageningen.
- Dunne, T. (1990). Hydrology, mechanics, and geomorphic implications of erosion by subsurface flow. *Groundwater geomorphology: The role of subsurface water in earth-surface processes and landforms*, 252, 1-25.
- Felder, W. M., & Bosch, P. W. (2000). Geologie van Nederland, deel 5. Krijt van Zuid-Limburg. Plantijn-Casparie, Delft/Utrecht.
- Hancock, J. M. (1975). The petrology of the Chalk. *Proceedings of the Geologists' Association*, 86(4), 499-535.
- Hakoun, V., Orban, P., Dassargues, A., & Brouyère, S. (2017). Factors controlling spatial and temporal patterns of multiple pesticide compounds in groundwater (Hesbaye chalk aquifer, Belgium). *Environmental Pollution*, 223, 185-199.
- Hendrix, W.P.A.M. (1985). Het grondwater van het Centraal Plateau (Z-Limburg). Rapport Geografisch Instituut der Rijksuniversiteit Utrecht.
- Hendrix, W.P.A.M. (1990). Bronnen in Zuid-Limburg (in Dutch). *Natuurhistorisch Maandblad*, 79(3-4), 50-62.
- Hendrix, W.P.A.M & Meinardi, C.R. (2004). Bronnen en bronbeken in Zuid-Limburg, Kwaliteit van grondwater, bronwater en beekwater (in Dutch), RIVM rapport 500003003/2004. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven, The Netherlands. p 82.
- Kaandorp, V. P., Doornenbal, P. J., Kooi, H., Broers, H. P., & de Louw, P. G. (2019). Temperature buffering by groundwater in ecologically valuable lowland streams under current and future climate conditions. *Journal of Hydrology X*, 3, 100031.
- Kivits, T., Broers, H. P., Beeltje, H., van Vliet, M., & Griffioen, J. (2018). Presence and fate of veterinary antibiotics in age-dated groundwater in areas with intensive livestock farming. *Environmental pollution*, 241, 988-998.

- Klimaat van Nederland. (2020, May 5). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 09:38, May 5, 2020 from https://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Klimaat_van_Nederland&oldid=56214570.
- Kłonowski, M., Lanen, H. V., & Dijkma, R. (2001). Groundwater flow and nitrate migration in a Dutch-Belgian Chalk catchment; observed and future concentrations. *Geological Quarterly*, 45, 53-66.
- KNMI (2020, July 14). Weather station 380 Maastricht, period 1990-2019, from <https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/dagegevens>.
- Kwakman, P. J. M., & Versteegh, J. F. M. (2016). Radon-222 in ground water and finished drinking water in the Dutch provinces Overijssel and Limburg: Measuring campaign 2015.
- Mars, H. de & B. van der Weijden (2019) Alluviale bossen in beekdalen; debietmetingen en waterkwaliteit. Ondertitel: Debietmetingen Alluviale bossen. RoyalHaskoning/DHV, rapport BF8661WATRP1812041020.
- Mergelland. (2020, April 27). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 20:53, April 27, 2020 from <https://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Mergelland&oldid=56159220>.
- Natuur en Landschap. (n.d.). Nationaal Landschap Zuid-Limburg. Retrieved on January 4, 2020 from <https://www.natuurparkenlimburg.nl/nl/zuid-limburg/natuur-en-landschap#landbouw-en-veeteelt>.
- Nota, D. J. G., & Van de Weerd, B. (1988). A hydrogeological study in the basin of the Gulp Creek-A reconnaissance in a small catchment area. *Agricultural University Wageningen Papers*, 87, 7.
- Quinlan, J. F., & Ewers, R. O. (1995). Applications of groundwater tracing to the solution of environmental problems in carbonate terranes. Proceedings from the 2nd tracer workshop, Univ. of Texas at Austin, November 14 and 15, 1994.
- Rodet, J., & Magn, L. (2009) First elements of the karstic evolution if a continental basin in Chalk limestones of the Paris basin: Upper Avre River, Normandy, France. (2009) Speleogenesis 908 -1 2009 ICS Proceedings.
- Teuling, A.J. (2001). Een studie naar de afvoercharacteristieken van de Sint-Brigidabron en de invloed van tektoniek op de hydrogeologie van het Nederlandse deel van het stroomgebied van de Noor met behulp van MODFLOW. (Publication No. HG 187) [Master's thesis, Wageningen University]. Wageningen, the Netherlands: Wageningen University.
- Teuling, A.J. (2011) Een studie naar de afvoercharacteristieken van de Sint-Brigidabron en de invloed van tektoniek op de hydrogeologie van het Nederlandse deel van het stroomgebied van de Noor met behulp van MODFLOW. Afstudeerverslag Wageningen Universiteit.
- TNO-GSN (2020a). Gulpen Formation. In: Stratigraphic Nomenclature of the Netherlands, TNO – Geological Survey of the Netherlands. Accessed on 22-07-2020 from <http://www.dinoloket.nl/en/stratigraphic-nomenclature/gulpen-formation>.
- TNO-GSN (2020b). Maastricht Formation. In: Stratigraphic Nomenclature of the Netherlands, TNO – Geological Survey of the Netherlands. Accessed on 22-07-2020 from <http://www.dinoloket.nl/en/stratigraphic-nomenclature/maastricht-formation>.
- Togola, A. [BRGM], Lopez, B. [BRGM], Kuczyńska, A. [PGI-NRI], Koroša, A. [GeoZS], Mali, N. [GeoZS], Rosenqvist, L. [SGU], van Vliet, M.E. [TNO], Lapworth, D.J.[BGS], Wyszomierski, M. [PGI-NRI] (2021). European interlaboratory testing of emerging organic compounds in groundwater, GeoERA HOVER WP8, deliverable 8.3
- Van Daele, J., K. Dirix, H. Ferket en R. Barros (2021) Geoconnect^{3D}: Lessons learnt from the R2R case. GeoERA Geocconnect3D, deliverable D5.2c. https://repository.europ-geology.eu/egdidocs/geoconnect3d/geoconnect3d_d52c_lessons+learnt+r2r.pdf.
- Van den Hoven, F. & Van den Hoven, M. (n.d.). Mergelland. Retrieved on January 4, 2020, from <https://www.plaatsengids.nl/mergelland>.
- Van Lanen, H.A.J., M. Heijnen, T. de Jong, en B. van de Weerd (1994). Nitrate concentrations in the Gulp catchment; some spatial and temporal considerations. Conf. on Assessment of hydrological temporal variability and changes, Barcelona, 27-30 September, 1994.

- Van Lanen, H. A. J., van de Weerd, B., Dijkma, R., ten Dam, H. J., & Bier, G. (1995). *Hydrogeologie van het stroomgebied van de Noor en de effecten van grondwateronttrekkingen aan de westrand van het Plateau van Margraten* (No. 57). Landbouwniversiteit Wageningen.
- Van Lanen, H. A. J., & Dijkma, R. (2004). Impact of groundwater on surface water quality: role of the riparian area in nitrate transformation in a slowly responding Chalk catchment (Noor, The Netherlands). *Ecohydrology & Hydrobiology*, 4(3), 315-325.
- Van Lanen, H. A., & Dijkma, R. (1999). Water flow and nitrate transport to a groundwater-fed stream in the Belgian–Dutch Chalk region. *Hydrological Processes*, 13(3), 295-307.
- Van Maanen, J. M. S., De Vaan, M. A. J., Veldstra, A. W. F., & Hendrix, W. P. A. M. (2001). Pesticides and nitrate in groundwater and rainwater in the province of Limburg in the Netherlands. *Environmental monitoring and assessment*, 72(1), 95-114.
- Van Rooijen, P. (1989) Grondwater in Limburg. *Grondboor en Hamer* 43: 377-386.
- Van Rooijen, P. (1993). The Netherlands. In R.A. Downing, M. Price, & G.P. Jones (Eds.), *The Hydrogeology of the Chalk of North-West Europe* (pp. 170-185). Oxford, United Kingdom: Clarendon Press.
- Van Vliet, M.E, & H.P. Broers (2019) Reistijdverdelingen en nitraatprognoses voor 15 bronnen in het KRW-meetnet Krijt-Maas op basis van metingen van tritium in 2001, 2009 en 2017. TNO Rapport R11581.
- Van der Weijden, B., H. de Mars en W. Swierstra (2020) Methodiek voor de bepaling van de omvang van het intrekgebied van kleine bronsystemen. Methodiek bepaling omvang intrekgebieden. RoyalHaskoning/DHV, rapport WATBG6145R001F01.
- Vernes, R.W., Goes, B.J.M., Gunnink, J.L., De Heer, E., Hummelman, H.J., Menkovic, A., Schokker, J. (2009). REGIS Limburg, Uitbreiding van de dataset REGIS II voor de provincie Limburg (in Dutch, TNO-report 2008-U-R34140/A). Utrecht, the Netherlands: TNO – Geological Survey of the Netherlands.
- Vernes, R.W., Hummelman, H.J., Menkovic, A. & Reindersma, R. (2018, April 25). Estimating the hydraulic conductivity and transmissivity of the Chalk aquifer in South-Limburg, the Netherlands. [Conference session]. *The Hydrogeology of the Chalk*, The Geological Society, Burlington House, London, United Kingdom.
- Vis en Houben, (2022). Vis, G.J. and Houben, S. (2022). Feasibility of a new geological model of the Devonian, Carboniferous and Triassic of South Limburg. Utrecht, the Netherlands, Geological Survey of the Netherlands.

9 Ondertekening

Utrecht, februari 2023

TNO

Naam een paraaf tweede lezer

Dr. Ir. W.J. Zaadnoordijk

Ondertekening

Autorisatie vrijgave

Dr. H.P. Broers
Auteur

Drs. D. Maljers
Research manager

DEEL 2 RELEVANT PARTS FROM THE GEOERA RESOURCE CHAKA DELIVERABLES

De in dit deel opgenomen informatie is letterlijk afkomstig uit de volgende GeoERA RESOURCE Deliverables die beschikbaar zijn via de benoemde weblinks:

Maréchal, J.C., Stroj A., Bailly-Comte V., Bunting, S.Y., Elster, D., Herms, I., Hickey, C., Kovács, A., Krystofova E., Maurice, L., Pardo-Igúzquiza E., Persa, D., Urbanc, J., Van Vliet, M., and Vernes, R., (2020). Detailed conceptual hydrogeological models for pilot areas and case studies. Deliverable 5.2. Technical report Chaka Project. GeoERA RESOURCE Project. 157 pp.

<https://repository.europe-geology.eu/egdidocs/resource/geoera+resource+chaka+deliverable+52+detailed+con.pdf>

Maréchal, J.C., Bailly-Comte V., Hickey C., Maurice, L., Stroj A., Bunting, S.Y., Charlier J.B., Hakoun V., Herms I., Krystofova E., Pardo-Igúzquiza E., Persa D., Schubert G., Skopljak F., Szucs A., Urbanc, J., Van Vliet M.E., Vernes R.W. (2021). Karst aquifer typology tool. Deliverable 5.3. Technical report Chaka Project. GeoERA RESOURCE Project.

<https://repository.europe-geology.eu/egdidocs/resource/geoera+resource+chaka+deliverable+53+karst+typolo.pdf>

Maréchal, J.C., Bailly-Comte V., Hickey C., Maurice, L., Stroj A., Bunting, S.Y., Charlier J.B., Hakoun V., Herms I., Krystofova E., Pardo-Igúzquiza E., Persa D., Schubert G., Skopljak F., Szucs A., Urbanc, J., Van Vliet M.E., Vernes R.W. (2021). Groundwater management recommendations for karst and chalk aquifers. Deliverable 5.4. Technical report Chaka Project. GeoERA RESOURCE Project.

<https://repository.europe-geology.eu/egdidocs/resource/geoera+resource+chaka+deliverable+54+groundwater.pdf>

1 Detailed conceptual hydrogeological models for pilot areas and case studies: Mergelland, the Netherlands (D5.2)

1.1 Overview

“Mergelland” (“Marl country”) is a region in the south of the Dutch province of Limburg (Figure 1.1). The name refers to the presence at shallow depth of limestone, called “Mergel” (Marl) by the local population. The area is known for its hilly countryside (which sticks out compared to the rest of the Netherlands), the natural beauty, and several picturesque villages and hamlets (“Mergelland”, 2020).

The region is roughly bounded by highways A2, A79 and A76 and the Dutch-German and the Dutch-Belgian border (Figure 1.1). The Margraten Plateau can be considered as the centre of “Mergelland”. This plateau is bounded by the valley of the river Meuse to the West and by the valley of the river Geul in the North. It is dissected by the valley of the Gulp brook and various dry valleys. The entire region is part of the catchment of the Meuse River (Van den Hoven & Van den Hoven, n.d.).

Due to the presence of loess deposits, the soils in Mergelland are fertile and are widely used for arable and dairy farming and fruit growing. Particular flora and fauna are present, for example on the slopes and in the smaller brook valleys. This has resulted in the designation of various nature areas, including Natura 2000 sites (“Natuur en Landschap”, n.d.).

The brooks are fed by several relatively small springs (Figure 1.1). In many of these springs and brooks nitrate concentrations are above 50 mg/l, due to leaching of agricultural fertilizer. This eutrophication has led to changes in vegetation. High nitrate concentrations are also found in groundwater in the area, thus having an impact on public and private water supplies (Hendrix & Meinardi, 2004).

The main aquifer in the area is the “kalksteenaquifer” (limestone aquifer). The saturated thickness of the limestone aquifer varies from 0 to 180 meters with an average of 66 meters. The thickness of the unsaturated zone of the aquifer varies from around 75 meters on the plateaus to 0 meters in the valleys of the rivers and brooks where the aquifer is fully saturated. Only the upper 40 m of the limestone aquifer are thought to be karstified to a certain degree (Vernes et al., 2009). Caves in the limestone are all manmade. To the north this aquifer is covered by a second stratified aquifer of quaternary and tertiary deposits. The hydrogeological situation at the location of the springs varies.

The discharge of the springs has only been measured or estimated occasionally. No continuous measurements are currently carried out at the sites of the springs.

St Brigida spring

The Sint-Brigida spring is the only site with some discontinuous time series data available. The discharge of this spring is characterized by a lack of a fast discharge component (Teuling, 2001). The Sint-Brigida spring is the main source of the Noor brook, which flows to the southwest into Belgium. The entire hydrological system of the Noor sub catchment behaves more or less homogeneously (Teuling, 2001).

The data analysis to identify methods of classifying the typology of karst aquifers (deliverable D5.3) will be done using the time series data of the St Brigida spring.

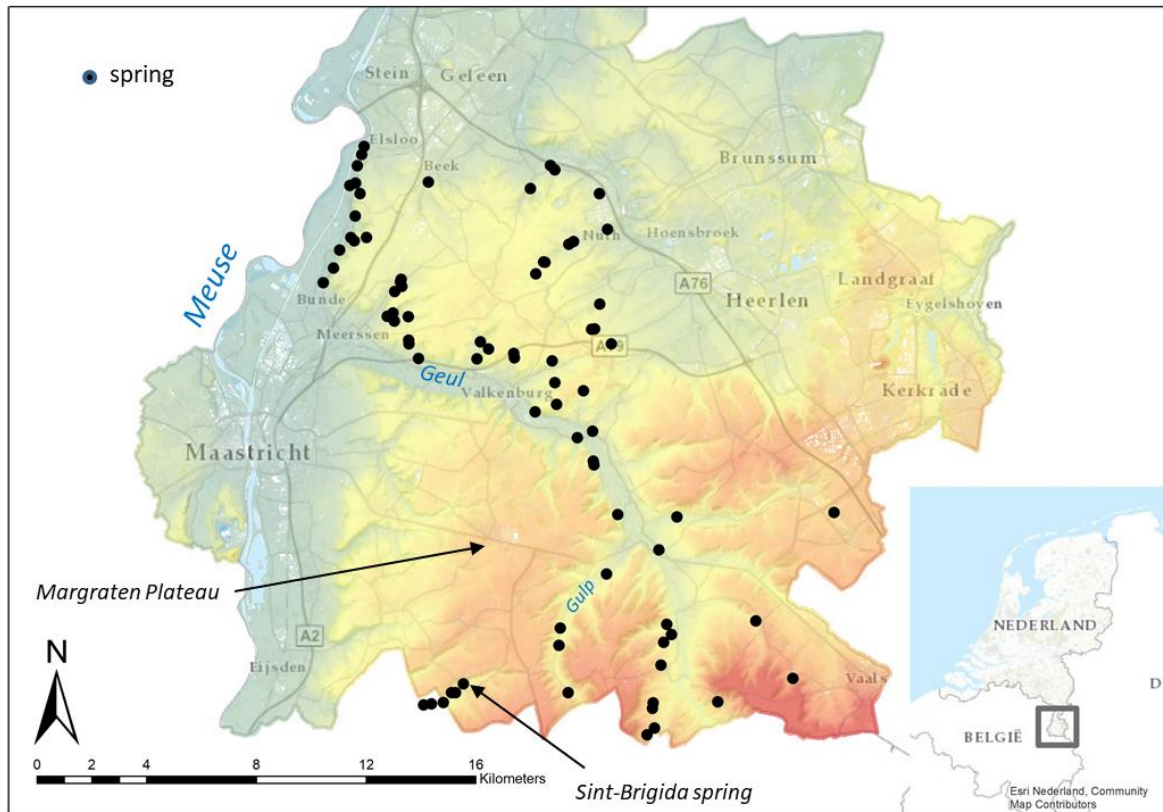


Figure 1.1: Location of “Mergelland” (“Marl country”) and springs in the south of the Dutch province of Limburg. The Margraten Plateau can be considered as the centre of “Mergelland”.

1.2 Geology

“Mergelland” is situated on the northern flank of the Rhenish Slate mountains (Rheinische Schiefergebirge), a chain of low mountains that stretches across Germany (the Eifel), Belgium and Luxembourg (the Ardennes) and the southernmost part of the Netherlands, and that predominately consist of Palaeozoic rocks (“Rijnlands leisteenplateau”, 2020). To the north the area is bounded by **the Roer Valley Graben, an active rift zone that stretches out across the southern part of the Netherlands, the north-eastern part of Belgium and North Rhine-Westphalia in Germany.**

The Palaeozoic basement of the Rhenish Slate mountains dips in a north-westerly direction and is covered by marine Upper-Cretaceous rocks, and to the north by marine Paleogene and Neogene deposits. Fluvial and/or aeolian Quaternary deposits are present as a cover layer in nearly the entire area (Figure 1.2).

The lowermost part of the Upper-Cretaceous deposits consists of partly consolidated sands, silts and clays (Aken Formation, Vaals Formation). Silts and clays are dominant. The upper part is made up of soft limestone (Gulpen Formation, Maastricht Formation). The Gulpen Formation predominantly consists of soft, fine-grained limestone. The lower part contains 50-90% CaCO_3 and glauconite. The upper part contains 80-95% CaCO_3 and distinctive flint nodules which may constitute up to 20% of its volume. (TNO-GSN, 2020a). The Gulpen Formation matches the description of the Chalk in the United Kingdom (Van Rooijen, 1993). Within the Maastricht Formation two lithofacies can be distinguished (TNO-GSN, 2020b). In the southwestern part of Limburg, the Maastricht facies occur which are soft, fine to very coarse-grained yellow chalky limestones with intercalations of glauconitic limestones, hardgrounds and fossil beds. Flint is limited to the lower part.

In the south-eastern part of Limburg, it consists of alternating hard and soft, light grey limestones (Kunrader facies). The overlying Houthem Formation, which is of Palaeocene age, also consists of soft limestone and together with the Gulpen and Maastricht formations makes up the “kalksteenaquifer” (*limestone aquifer*). The thickness of these soft limestones varies from 0 to 185 meters with an average thickness of 75 meters.

Younger Paleogene and Neogene deposits consist of an alternation of fine to medium sands and clays (Landen Formation, Tongeren Formation, Rupel Formation, Breda Formation). These are covered by coarse sands and gravels (Beegden Formation) and loess (Boxtel Formation) on the plateaus and hillslopes; and by local fluvial deposits (Boxtel Formation) in the brook valleys.

According to Van Rooijen (1993) a mature karst system is not present in the “kalksteenaquifer” (limestone aquifer) in Mergelland. Caves are all man-made. Although major solution caves are not known to exist, at a tunnel construction site near Maastricht cavities of substantial size were encountered (personal communication Björn Vink, 2019). However typical karst features are present: sink holes or dolines, dry valleys, narrow, vertical solution pipes and at the top of the Chalk a residual of flint-bearing clay and sandy loam.

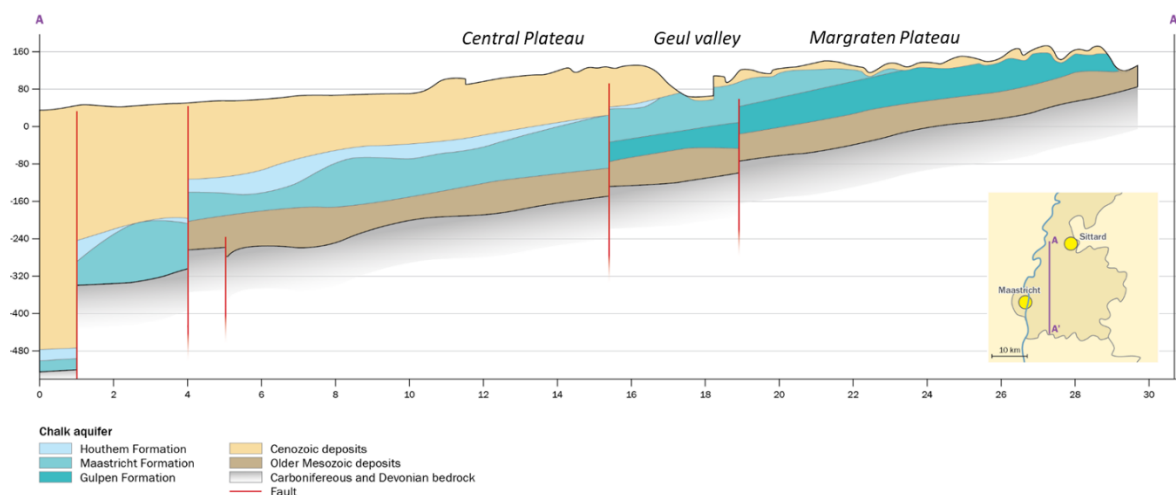


Figure 1.2: North-south geological cross-section through South-Limburg and “Mergelland” (Vernes et al., 2018)

1.3 Geomorphology

The Margraten Plateau can be considered as the centre of “Mergelland”. This plateau is bounded by the valley of the river Meuse to the west and by the valley of the river Geul in the north. The plateau is dissected by the valley of the Gulp brook and various smaller (dry) valleys.

The Sint-Brigida spring (Figure 1.3) is located just south of the Margraten Plateau, on the northern slope of the valley of the Noor brook. Dry valleys are present in the near vicinity.



Figure 1.3: Sint-Brigida spring, the source of the Noor brook.

1.4 Climate

According to the Köppen classification system, the climate of Mergelland is a temperate oceanic climate, code Cfb, with mild winters and cool summers (“Klimaat van Nederland”, 2020). The daily mean temperature at Maastricht is 10.7 °C, the annual precipitation is around 800 mm and the annual reference evaporation (Makkink) approximately 600 mm (KNMI, 2020).

1.5 Hydrogeology

The “kalksteenaquifer” (limestone aquifer), comprising the soft limestone of the Gulpen, Maastricht and Houthem formations, is the main aquifer in Mergelland (Figure 1.2). A subdivision can be made in the area in the north of the river Geul where the aquifer is overlain by Paleogene and Neogene deposits, of which the lower part acts as an aquitard; and the area in the south where these deposits are absent. The character of the “kalksteenaquifer” therefore changes from a confined aquifer in the north to a phreatic aquifer in the south.

The saturated thickness of the limestone aquifer varies from 0 to 180 meters with an average of 66 meters; the thickness of the unsaturated zone of the aquifer varies from around 75 meters on the plateaus to 0 meters in the valleys of the rivers and brooks where the aquifer is fully saturated. Due to the low permeability of some of the Paleogene deposits a perched water table with a regional extent is present just north of the river Geul above the “kalksteenaquifer”. Several small streams that drain this area become losing streams once the edge of the aquitard is crossed and some streams disappear completely. Springs are present, both in the northern and southern part of the “kalksteenaquifer” (see Figure 1.1). In the northern part these springs generally occur on the slopes of the valleys, at the level of poorly permeable layers within the Paleogene and Neogene deposits. These springs are not fed by the “kalksteenaquifer” and could therefore have a different behaviour. Also, in the southern area, where the “kalksteenaquifer” is phreatic, there are springs which are not

fed by the “kalksteenaquifer”, but by small local permeable zones present in fractured sand- and siltstones within the underlying generally poorly permeable Vaals and Aken formations.

Some of the locations of the springs coincide with the interface between the “kalksteenaquifer” and the underlying Vaals and Aken formations, one of which is the location of the Sint-Brigida spring. Further research is needed to get a better understanding of the hydrogeological system of the various springs.

The “kalksteenaquifer” is exploited for public water supply, industry (for example breweries, mineral water production and soft drink industry) and for agricultural purposes.

At various locations groundwater levels in the “kalksteenaquifer” are measured on a regular basis. Based on these data, maps were created (Vernes et al., 2009) that clearly reflect the different character of the aquifer in the north, where it is confined, versus the south where it is phreatic.

1.6 Hydrodynamic characteristics of the springs (and river)

The discharge of the springs has only been measured or estimated occasionally, except for the Sint-Brigida spring for which a (discontinuous) time series over the period of 12 February 1994 to 23 October 2001 exist. Based on single measurements and estimates provided by Hendrix & Meinardi (2004) for the end of 2001, the discharge rate of the springs is small compared to springs in mature karst systems and varies between 0.01 and 12 l/s (northern area) and between 0.05 and 23.8 l/s (southern area). Time series of the discharge of the Sint-Brigida spring for the period of 22 June 1994 – 23 April 2000 show fluctuations in discharge from 0 (dry) to 55 l/s. Some of the larger springs are thought to be related to karst features (Hendrix, 1990).

Teuling (2001) concluded that the discharge of Sint-Brigida spring is characterized by a lack of a fast discharge component. The Sint-Brigida spring is the main source of the Noor brook. The entire hydrological system of the Noor sub catchment behaves more or less homogeneously (Teuling, 2001). The brook flows into Belgium where it enters a tributary of the Meuse River.

1.7 Data available for the project

1. Mergelland, springs			
Data type	Time step	Monitoring period	Time period
Level	-	-	-
Discharge: - St Brigida spring - Other springs	Every quarter-hour Occasionally	>10 year unknown	1994-2002 unknown
Temperature	One a year 4 times a year	>10 year	1991 – 2006 2007-present
Electrical conductivity	Once a year 4 times a year	>10 year	1991 – 2006 2007-present
pH	Once a year 4 times a year	>10 year	1991 – 2006 2007-present
Dissolved oxygen O ₂	One a year 4 times a year	>10 year	1991 – 2006 2007-present
Suspended matter	-	-	-
Major anions/cations	Once a year	>10 year	1991 – 2006

1. Mergelland, springs			
Data type	Time step	Monitoring period	Time period
	4 times a year		2007-present
Isotopes (tritium)	1 time per approx. 8 years	>10 year	2001 - 2018
Turbidity	-	-	-
Nutrients (NO ₃ ; PO ₄)	Once a year 4 times a year	>10 year	1991 – 2006 2007-present
TOC/DOC	Once a year 4 times a year	>10 year	1991 – 2006 2007-present
Other: metals, trace elements	Once a year 4 times a year	>10 year	1991 – 2006 2007-present

2. Mergelland, monitoring wells			
Data type	Time step	Monitoring period	Time period
Level	Once every 2 weeks / once a day	>10 year	different measurement periods
Discharge	-	-	-
Temperature	Once a year / Once every 2 years	>10 year	1992-2015
Electrical conductivity	Once a year / Once every 2 years	>10 year	1992-2015
pH	Once a year / Once every 2 years	>10 year	1992-2015
Dissolved oxygen O ₂	Once a year / Once every 2 years	>10 year	1992-2015
Suspended matter	-	-	-
Major anions/cations	Once a year / Once every 2 years	>10 year	1992-2015
Isotopes	-	-	-
Turbidity	-	-	-
Nutrients (NO ₃ ; PO ₄)	Once a year / Once every 2 years	>10 year	1992-2015
TOC/DOC	Once a year / Once every 2 years	>10 year	1992-2015
Other: metals, trace elements	Once a year / Once every 2 years	>10 year	1992-2015

1.8 Summary

Pilot name	Mergelland		
Country	The Netherlands	EU-region	North-western Europe
Area (km ²)	617	Lithology	Chalk
Short description: Mergelland is the southernmost part of the Netherlands. The area consists of a number of plateaus, dissected by small valleys. The main river is the river Geul. Small springs are present at various locations. In the southern part these springs are fed by cretaceous aquifers, to the north by Cenozoic aquifers. The Sint-Brigida spring, located on the southern edge of the area, is the only spring with a time series of discharge measurements.	<p>● spring ■ groundwater extractions for public water supply</p>		
Monitored objects	Springs, wells and precipitation.		
Monitored data	Groundwater levels, discharge (occasionaly), temperature, electric conductivity, major anions/cations, stable isotopes, nutrients (NO ₃ ;PO ₄), TOC/DOC, other.		
Contact person	Mariëlle van Vliet (marielle.vanvliet@tno.nl) & Ronald Vernes (ronald.vernes@tno.nl)		

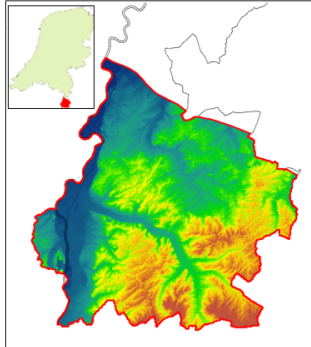
1.9 References

- Hendrix, W.P.A.M. (1990). Bronnen in Zuid-Limburg (in Dutch). *Natuurhistorisch Maandblad*, 79(3-4), 50-62.
- Hendrix, W.P.A.M & Meinardi, C.R. (2004). Bronnen en bronbeken in Zuid-Limburg, Kwaliteit van grondwater, bronwater en beekwater (in Dutch), RIVM rapport 500003003/2004. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven, The Netherlands. p 82.
- Klimaat van Nederland. (2020, May 5). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 09:38, May 5, 2020 from https://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Klimaat_van_Nederland&oldid=56214570.
- KNMI (2020, July 14). Weather station 380 Maastricht, period 1990-2019, from <https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/daggegevens>.
- Mergelland. (2020, April 27). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 20:53, April 27, 2020 from <https://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Mergelland&oldid=56159220>.
- Natuur en Landschap. (n.d.). Nationaal Landschap Zuid-Limburg. Retrieved on January 4, 2020 from <https://www.natuurparkenlimburg.nl/nl/zuid-limburg/natuur-en-landschap#landbouw-en-veeteelt>.
- Rijnlands leisteenplateau. (2020, May 5). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 12:20, May 5, 2020 from https://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Rijnlands_leisteenplateau&oldid=56215721.
- Teuling, A.J. (2001). Een studie naar de afvoercharacteristieken van de Sint-Brigidabron en de invloed van tektoniek op de hydrogeologie van het Nederlandse deel van het stroomgebied van de Noor met behulp van MODFLOW. (Publication No. HG 187) [Master's thesis, Wageningen University]. Wageningen, the Netherlands: Wageningen University.
- TNO-GSN (2020a). Gulpen Formation. In: Stratigraphic Nomenclature of the Netherlands, TNO – Geological Survey of the Netherlands. Accessed on 22-07-2020 from <http://www.dinoloket.nl/en/stratigraphic-nomenclature/gulpen-formation>.
- TNO-GSN (2020b). Maastricht Formation. In: Stratigraphic Nomenclature of the Netherlands, TNO – Geological Survey of the Netherlands. Accessed on 22-07-2020 from <http://www.dinoloket.nl/en/stratigraphic-nomenclature/maastricht-formation>.
- Van den Hoven, F. & Van den Hoven, M. (n.d.). Mergelland. Retrieved on January 4, 2020, from <https://www.plaatsengids.nl/mergelland>.
- Van Rooijen, P. (1993). The Netherlands. In R.A. Downing, M. Price, & G.P. Jones (Eds.), *The Hydrogeology of the Chalk of North-West Europe* (pp. 170-185). Oxford, United Kingdom: Clarendon Press.
- Vernes, R.W., Goes, B.J.M., Gunnink, J.L., De Heer, E., Hummelman, H.J., Menkovic, A., Schokker, J. (2009). REGIS Limburg, Uitbreiding van de dataset REGIS II voor de provincie Limburg (in Dutch, TNO-report 2008-U-R34140/A). Utrecht, the Netherlands: TNO – Geological Survey of the Netherlands.
- Vernes, R.W., Hummelman, H.J., Menkovic, A. & Reindersma, R. (2018, April 25). Estimating the hydraulic conductivity and transmissivity of the Chalk aquifer in South-Limburg, the Netherlands. [Conference session]. *The Hydrogeology of the Chalk*, The Geological Society, Burlington House, London, United Kingdom.

1.10 Appendix 1: Short presentation of the case study



The Netherlands: Mergelland



Karst and main spring characteristics:

Outlet altitude [m a.s.l.]	Dominant lithology*	Average flow rate [m3/s]	Maximum discharge [m3/s]	Catchment area [km2]	Yearly precipitation [mm/yr]
38	Chalk	0.002	N/A (St Brigida spring 0.06 m3/s)	617	800



Management issues:

- Hydrogeological system of the Chalk aquifer in Mergelland is only poorly understood;
- Nitrate concentrations exceed the nitrate threshold value 50 mgNO3/l.

Monitoring status:

- Low frequency monitoring;
- Hardly any discharge data



2 Karst aquifer typology tool (D5.3)

2.1 Results of the karst system classification using the Mangin (1975) method

The XLKarst tool has been used in the project to provide statistical parameters that will be used in the new methods of karst aquifer classification proposed in the GeoERA project. At this step, only the results given by the recession curves analysis will be shown and discussed as a starting point for further developments. The results are shown in for the 16 case studies. The analysis has been done on daily discharge time series, except for the BHS (UK) case study which is at a weekly time step. The 5 domains proposed by Mangin (1975) with the modification of the 5th domain proposed by El-Hakim and Bakalowicz (2007) are reported in the classification.

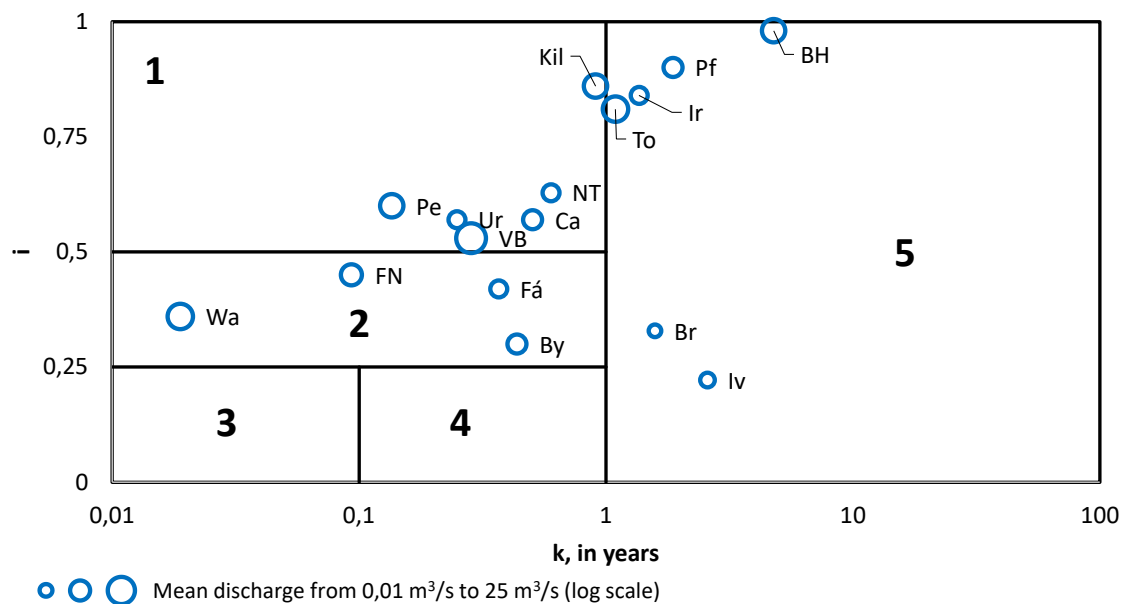


Figure 2.1: Results of the Mangin's classification for the 16 case studies of the CHAKA project

This classification shows that most of the case studies fall in the first domain, which is, for $k < 1$ and $i > 0.5$ the domain of complex karst systems, largely extended and made up of several sub-systems. Some karst systems show a higher karstification degree and fall in the second domain. Several karst systems show however a high regulating power (k in X axis), which define a poorly karst system ($0.5 < k < 1$) and even a non-karstic system (porous or fissured aquifer) according to Mangin (1975) for $k > 1$. El-Hakim and Bakalowicz (2007) however propose to add the 5th domain to include karst system with a deep phreatic zone, partly or totally confined underneath impermeable sediments, and largely karstified during previous karstification phases. This description applies for the Killeglan case study (Kil, IR), but cannot explain the results for the Tonkovic karst system (To, Croatia) or dolomitic and karstified karst systems like the Ironselle (Ir, FR), the Ivanscica Sp. (Iv, Croatia) or the Pfannbauernquelle (Pf, Austria). In addition, the karst systems developed in chalk (BH, UK and Br, NL) also show high values for k .

For systems with high regulation power, it can be difficult to describe the first part of the recession, before the exponential decreasing limb, because the infiltration rate (q_0) would be negative. This implies a 0 value for ϵ , and somehow arbitrary value of I that only depends on the time t_i . For instance, the values found for the St Brigida Sp. system (Br, NL) or the Ivanscica Sp. (Iv, Croatia) can be discussed and could be interpreted differently.

2.2 Method 1: Classification of karst aquifer intrinsic vulnerability to pollution: Application to CHAKA case study springs

The results of Method 1 for the GEOERA case study springs are shown in Figure 2.2. In addition to the original case study springs which are detailed in the case study report, Deliverable 5.2 (Maréchal et al., 2020), three additional dolomite springs have been included: the Pfannbauernquelle spring in Austria, Ironselle spring in France, and Ivanscica spring in Croatia.

The majority of the CHAKA case study springs have high scores, and are classed as high vulnerability, with 4 sites scoring 3 for all available parameters indicating the highest vulnerability score possible. This is consistent with the type of karstic springs that were selected as case studies for this project, with many of them being in classically karstic areas.

There are two case study springs from the Chalk which have very different characteristics. The Bedhampton and Havant springs in the UK Chalk are very large springs (combined mean flows of > 1000 l/s) with very clear evidence of karst: surface karst features (stream sinks) are present in the catchment; tracer tests demonstrate rapid flow of several kilometers per day to the springs over distances of many kilometers; and there are strong water quality indicators of high vulnerability. This case study site scores 2.5 and is classed as high vulnerability. The main reason that the score is not as high as many of the limestone case study springs is that there is no known cave development in the catchment, which is consistent with the very limited cave development that occurs in the English Chalk. In contrast the St Brigida spring in the Netherlands Chalk is a smaller spring (0 to 55 l/s) with no water quality indicators of rapid groundwater flow in an area where there is no evidence of stream sinks or dolines. Whilst the flows that are observed require a connected network of karstic solutional fissures and conduits, it appears that this spring has low intrinsic vulnerability with scores of 1 for all available parameters. It should be noted that groundwater analysis of this spring show high nitrate concentrations as well as presence of pesticides (Dimethylsulfamide, Metolachlor, metabolites desphenyl-chloridazon and methyl-desphenyl-chloridazon). The low vulnerability of this spring compared to the other case studies is related to point-source and accidental pollution, not to long-term and diffuse pollution due to agriculture activities.

The three dolomite springs that have been added to the CHAKA study have somewhat lower scores (Ironselle 2.4; and Pfannbauernquelle 2.0; Ivanscica 1.4) than many of the limestone springs and are classified as having moderate (Ironselle and Pfannbauernquelle) or low (Ivanscica) intrinsic vulnerability.

Country/Region	Site name	Surface karst	Caves	Water quality	Coliforms	Tracer tests	Discharge	Average score	Vulnerability Class
France	Fontaine de Nimes	3	3	3	-	3	3	3.0	High
Austria	Waldbachursprung	3	3	3	-	3	3	3.0	High
Hungary	Naga-Tohonya	3	3	-	-	3	-	3.0	High
Bosnia and Herzegovina	Vrelo Bune	3	3	-	-	3	3	3.0	High
Croatia	Gacka Pecina spring	3	2	3	-	3	3	2.8	High
UK	Bedhampton and Havant	3	1	3	3	3	2	2.5	High
Croatia	Gacka Tonkovic spring	3	2	2	2	3	3	2.5	High
Czech Republic	Bull Rock	3	3	2	1	3	3	2.5	High
Ireland	Killeglan	3	1	3	3	3	2	2.5	High
Spain	La Farara	2	2	3	-	-	3	2.5	High
France	Ironselle	2	3	2	-	3	2	2.4	moderate
Catalonia	St Quinti & Cardener	2	2	-	-	-	3	2.3	moderate
Romania	Grota Ursului	3	3	2	1	2	3	2.3	moderate
Austria	Pfannbauernquelle	2	2	-	-	-	2	2.0	moderate
Croatia	Ivanscica springs	1	1	2	1	-	2	1.4	low
Netherlands	St Brigida	1	1	1	-	-	1	1.0	low

Figure 2.2: Table of Results of Method 1 for the CHAKA case study springs

2.3 Method 2: Mixed classification using the method 1 plus a discharge time series: Application to the CHAKA dataset

2.3.1 Dataset description and results

16 discharge time series have been provided by the various partners of the project. All these time series are daily, except the one from the BH case study which is weekly. The results from the statistical analyses using the XLKarst tool are given in the Figure [2.3](#).

Name	Killeglan	Nagy-Tohonya	Vrelo Bune	Byčí skála (Bull Rock)	Grota Ursului	Waldbach-ursprung	St Quinti and Cardener	Fontaine de Nimes	St Brigida	La Fájara	Ivanscica springs	Tonkovic (Gacka riv)	Pecina (Gacka riv)	Bed-Hampton	Ironselles	Pfannbauern-quelle
Short-name	Kil	NT	VB	By	Ur	Wa	Ca	FN	Br	Fa	Iv	To	Pec	BH	Ir	Pf
Data	3165	10958	2191	3652	365	1420	2729	6309	2133	866	735	7305	7305	2884	1030	1342
From	01/01/2010	01/01/1964	01/01/2010	01/01/2009	01/10/1997	07/11/2012	13/06/2003	25/12/2000	22/06/1994	19/05/2015	01/03/2019	01/01/1997	01/01/1997	02/01/1961	04/01/2017	01/01/2014
To	31/08/2018	31/12/1993	31/12/2015	31/12/2018	30/09/1998	26/09/2016	01/12/2010	03/04/2018	23/04/2000	30/09/2017	04/03/2021	31/12/2016	31/12/2016	04/04/2016	30/10/2019	03/09/2017
Mean	1,02	0,11	24,26	0,29	0,06	3,00	0,30	0,55	0,01	0,12	0,05	3,66	1,55	1,11	0,14	0,29
Median	0,93	0,06	16,05	0,17	0,04	1,94	0,20	0,09	0,01	0,05	0,05	3,28	0,97	1,06	0,13	0,29
σ	0,58	0,13	23,95	0,39	0,06	3,28	0,28	1,32	0,01	0,16	0,00	1,62	1,58	0,26	0,05	0,02
Min	0,22	0,02	3,44	0,05	0,01	0,08	0,06	0,00	0,00	0,01	0,04	0,74	0,00	0,61	0,07	0,23
Max	4,50	1,14	133,90	7,65	0,64	14,24	2,54	16,50	0,06	2,24	0,06	13,70	10,60	1,96	0,34	0,34
Min/Max	0,05	0,01	0,03	0,01	0,02	0,01	0,02	0,00	0,00	0,01	0,71	0,05	0,00	0,31	0,21	0,69
SVC Q10/Q90	4,13	8,66	12,31	7,58	4,80	55,94	6,10	190,94	494,47	20,31	1,21	2,95	27,11	1,83	2,95	1,24
Q25/Q50	0,63	0,62	0,51	0,66	0,74	0,13	0,74	0,52	0,39	0,40	1,05	0,77	0,39	0,84	0,81	0,95
CV	0,57	1,24	0,99	1,37	1,11	1,09	0,93	2,41	0,86	1,38	0,07	0,44	1,02	0,24	0,37	0,08
ME (d)	73	85	57	32	14	66	47	13	125	35	76	82	53	98	73	87
RT (d)	77,86	51,42	46,96	29,85	5,02	56,10	47,12	20,06	116,44	32,57	78,32	59,80	47,42	*	66,54	82,16
σ_{250}/σ (%)	0,75	0,63	0,60	0,50	0,16	0,63	0,58	0,38	0,95	0,47	0,78	0,68	0,60	0,85	0,71	0,78
BFI	0,86	0,69	0,66	0,65	0,59	0,62	0,75	0,38	0,92	0,65	0,97	0,86	0,64	*	0,90	0,98
RT (d) σ_{250}/σ	71	49	46	31	3	50	43	18	113	27	76	57	45	90	64	76
Method 1	2,50	3,00	3,00	2,50	2,30	3,00	2,30	3,00	1,00	2,50	1,40	2,50	2,80	2,50	2,40	2,00
KGWRAI	0,54	0,42	0,62	0,31	0,15	0,57	0,37	0,21	0,19	0,27	0,33	0,65	0,48	0,63	0,41	0,51
Relat ME (%)	0,58	0,68	0,46	0,26	0,11	0,53	0,38	0,10	1,00	0,28	0,61	0,66	0,42	0,78	0,58	0,70

Figure 2.3: Results of the statistical analysis from the XLKarst tool using the 16 discharge time series of the CHAKA project. * requires daily data. ME: Memory Effect. RT: regulation time. KGWRAI: Karst GW resource availability index.

The use of a theoretical time series show that the memory effect is the only parameter that should be used to describe the responsiveness of a karst spring. Consequently, the application to real case studies from the CHAKA project allows to compute various statistical parameters that will be compared to the value of the memory effect, the latter being used as a reference.

Figure 2.4 A, B and C show the relationships between CV, BFI and the regulation time with the memory effect.

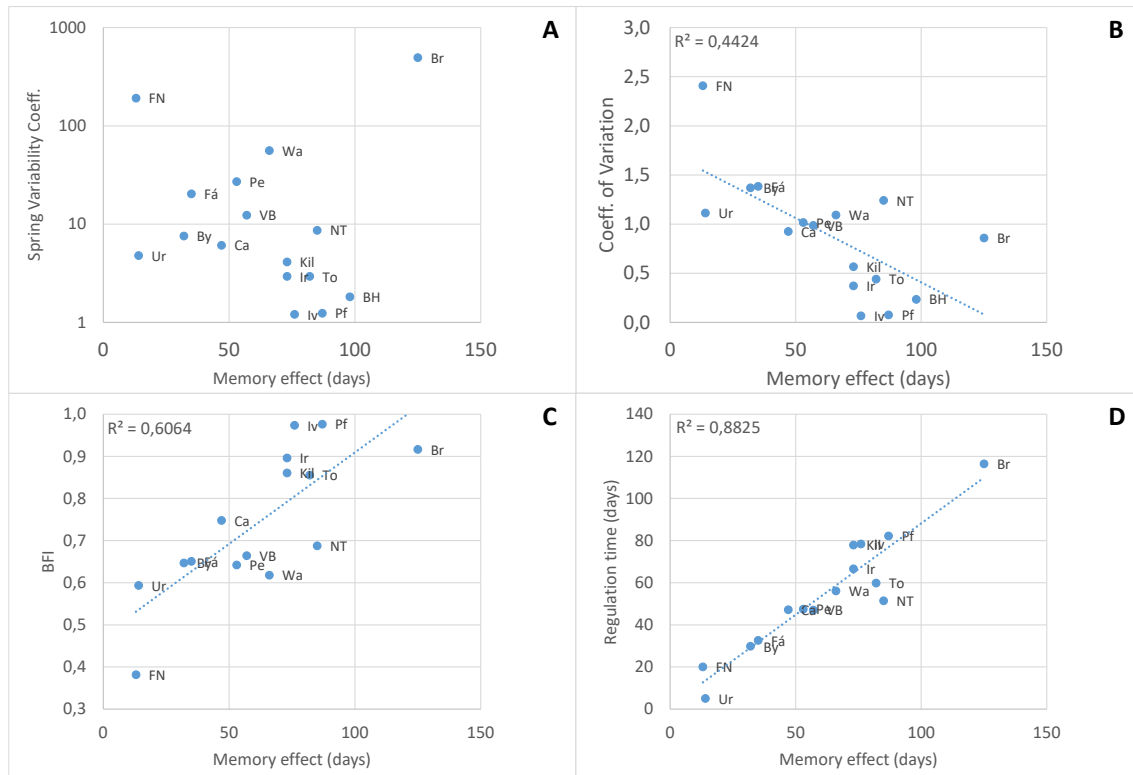


Figure 2.4: Correlation between some statistical parameters given in Figure 2.3

2.3.2 Interpretation

Figure 2.4A does not show any clear relationship between the Spring flow Variability Coefficient (SVC) and the memory effect. This means that the SVC cannot be used alone if one is concerned by the characterization of the responsiveness of a karst spring. However, the SVC is able to capture long term variations that are not highlighted by the memory effect: For instance, The St Brigida Sp. (Br, NL) shows a high SVC, because the discharge can be very low for a long time as a response of low recharge during several years, while its memory effect is very high (>125 days). In that case, the SVC can bring another important information that is not covered by the memory effect. This low flow period is also a consequence of a very low mean discharge combining with a high memory effect, which means that several droughts will induce to dry up the karst system for a long time due to the resilience of the system. It is thus important to add another information to the memory effect, either the mean discharge or the SVC, the latter being used in Method 3.

Figure 2.4B shows a poor correlation between CV and the memory effect is poor (coeff. of determination $R^2=0.4$). For instance, CV given by the discharge time series of St Brigida Sp. (Br, $CV=0.86$) is close to the one from the Cardener Sp. (Ca, $CV=0.93$), while they give distinct memory effects (47 days and 125 days respectively, 125 days, the latter being underestimated for a maximum correlation length of 125 days). The corresponding time series are shown on Figure 2.5, where it is clear that the responsiveness of the Cardener Sp. is higher than the one of the St Brigida Sp. Thus,

although its common use in karst hydrology, the CV can lead to misleading interpretations when most of the discharge variations are due to long term fluctuations (annual or higher period).

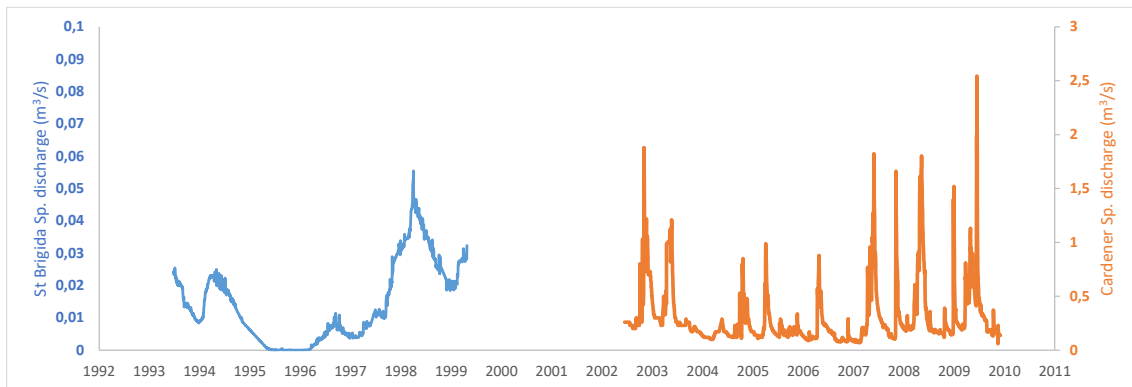


Figure 2.5: Discharge time series at St Brigida Sp. (blue line) and Cardener Sp. (orange line)

Figure 2.4C show that the BFI computed with a coefficient of 0.91 show a more significant and positive correlation with the memory effect ($R^2=0.6$), which means that the memory effect computed for various discharge time series also give some information on the relative importance of baseflow: The more the memory effect is and the more important is the relative contribution of baseflow to the spring discharge.

An example of baseflow separation method using the Lyne and Hollyck (1979) method is given in Figure 2.6. The use of such a baseflow separation method designed for surface stream is however questionable when applied to karst spring hydrograph separation. Karst groundwater flows can be conceptualized by quickflows through the larger karst conduits that drain smaller voids also called the matrix (Atkinson, 1977; Kovacs and Perrochet, 2014). The term matrix is used in this context for the fractures and fissures which supply the larger conduits, as in most carbonate aquifers there is little contribution from the bedrock matrix which generally has exceptionally low permeability. It is generally thought that it is groundwater flow from the fractures and smaller fissures which comprise the baseflow that sustains the spring flow. During recharge events, these matrix/conduit exchanges may reverse, and the baseflow should be considered negative (Kiraly, 2003; Bailly-Comte et al., 2010). Applied to karst spring discharge, it is thus assumed that the baseflow separation proposed by Lyne and Hollick (1979) gives the positive part of the karst spring baseflow, which may greatly overestimate the flow from matrix to conduits at the beginning of the flood event.

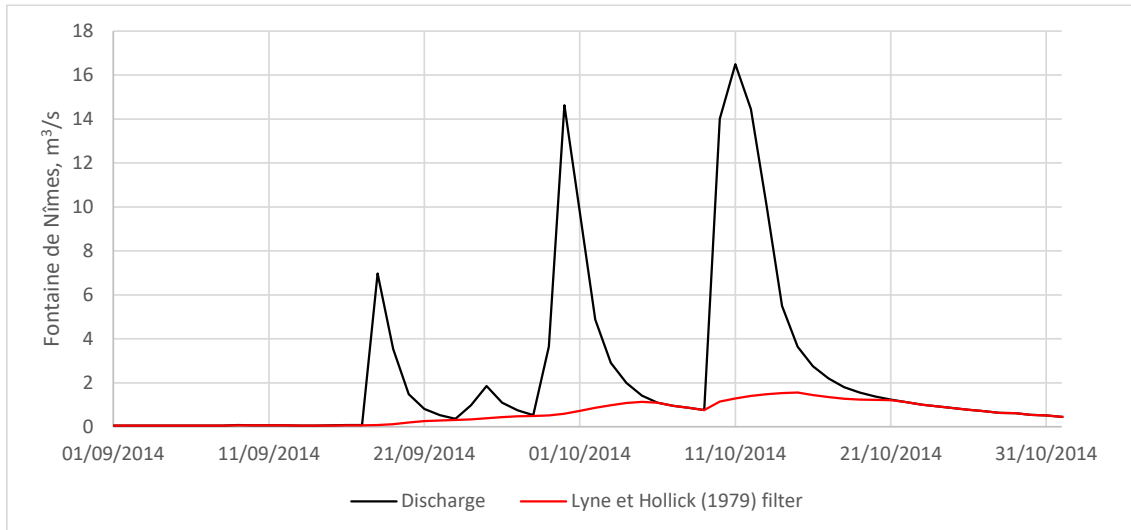


Figure 2.6: Example of baseflow separation using the Lyne and Hollick method (1979) applied to the Fontaine de Nîmes (FR) discharge time series

The BFI of the St Brigida Sp., for which the discharge time series is shown on Figure 2.5 is close to 1 (0.92), which means that most of the spring discharge should be considered as baseflow. This high BFI is interpreted as a consequence of the lithology (chalk). Other karst springs with relatively high BFI are the Tonkovic Sp. (To, HZ), Killeglan (Kil, IR) case study and the two karst systems developed in dolomitic limestones (Ivanscica, Iv, HZ and Ironselle, Ir, FR). High BFI for the Irish case study is probably a consequence of the indirect recharge through porous glaciofluvial deposits that cover the karstified limestones, while karst voids filled with porous dolomitic sands can explain the larger BFI found in dolomitic aquifers.

However, as shown by Figure 2.4D, the best correlation with the memory effect is given by the regulation time ($R^2=0.88$), which means that these two parameters can be used and interpreted in the same way. In addition, Figure 2.7 shows a very good fit ($R^2=0.99$) between the regulation time computed with spectral analysis of daily time series (Mangin, 1984) and the regulation time computed with Eq. 1 using a moving average filter. The relationship between the two regulation times is good for systems ranging from very low to very high regulation time (Grota Ursului, RO, and St Brigida Sp., NL, with regulation time of 5 and 116 days respectively). This means that the ratio σ_{250}/σ can also be used to characterize the responsiveness of a karst spring when continuous data are not available at a daily time step.

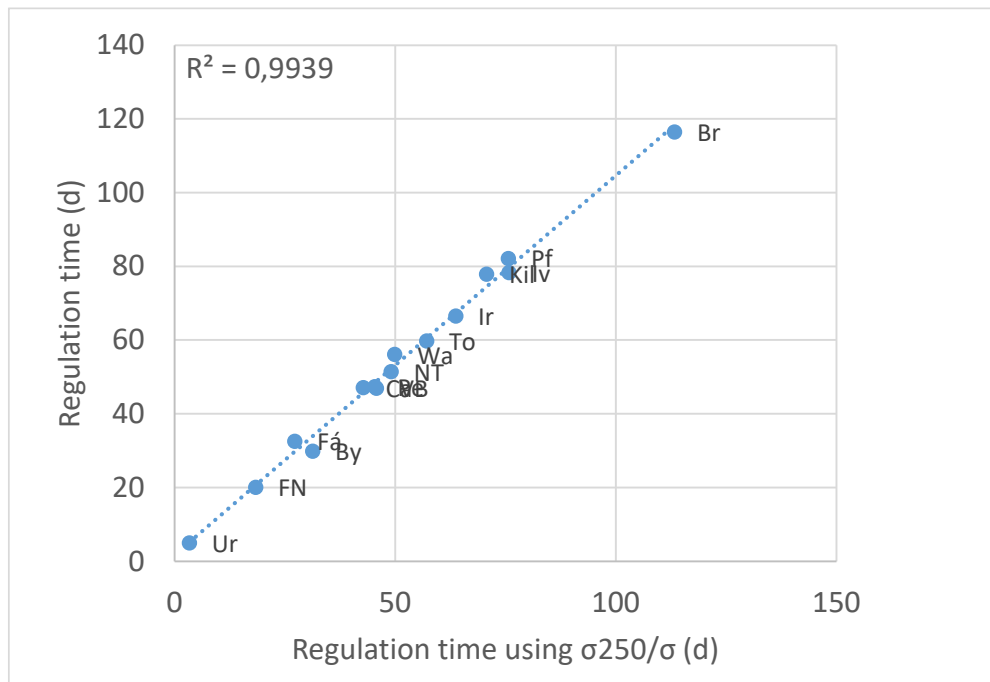


Figure 2.7: Relationship between the regulation times computed from spectral analysis and the one using σ_{250}/σ (Eq.1)

2.3.3 Time step

It is often recommended to work with daily discharge time series, but in some cases exemplified by the Bedhampton Spring (BH, UK) case study, discharge is only available at a lower sampling rate. In that case, before computing statistical parameters, it is important to check if the sampling rate allows to characterize the responsiveness of the karst spring. This can be done using spectral analysis of the discharge time series. Power Spectral Densities (PSD) of discharge times series show how the variance of the discharge time series is distributed according to frequencies, ranging from 0 (long term trend) to $1/2\Delta t$, with Δt the sampling rate of the discharge time series. The analysis of the slope of the spectrum is used to find the frequency beyond which the variance spectrum becomes flat (zero slope). In that case, the higher frequencies components can be described as a Gaussian noise, and the discharge time series is over-sampled. If the slope of the spectrum is always decreasing according to frequencies, then the spectrum is a function of the frequency. In that case, the discharge time series is probably under-sampled, and the results of the statistical treatments must be taken with caution.

For instance, Figure 2.8 shows two PSD computed with two discharge time series of the CHAKA project:

- The PSD of the FdN discharge time series (Figure 2.8A) show how the variance of the discharge time series is distributed according to frequencies, ranging from 0 (long term trends) to 0.5 cycles per day (cpd) for this daily time series. The spectrum becomes flat only for the highest frequencies, which means that the daily sampling rate may be too large for this system, hourly data should be used instead.
- The PSD of the BHS discharge time series (Figure 2.8A), which is a weekly time series is clearly different and shows a flat spectrum for frequencies higher than 0.06. This means that the discharge variations can be compared to a Gaussian white noise for frequencies higher than 0.06, or a period lower than 16 days. Thus, the weekly time series is able to capture the flow dynamics of this spring.

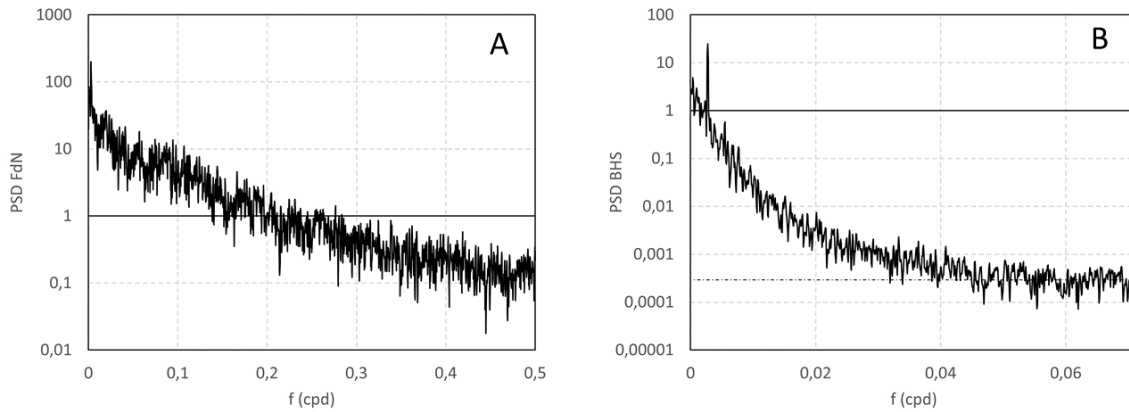


Figure 2.8: Power spectral densities computed with daily (A, FdN case study, FR) and weekly (B, BHS case study, UK) discharge time series

These two examples show that the time step of a discharge time series should be chosen taking into account the responsiveness of the karst spring. Spectral analysis can be used to check the consistency of this time step, which also means that methods used for the characterization of karst spring responsiveness should not be specific to a given time step.

2.3.4 *Choice of a statistical parameter*

Results given by the discharge time series from the CHAKA project allows to select 2 parameters for the characterization of the karst spring responsiveness: the memory effect and the ratio σ_{250}/σ . The BFI also gives interesting result when applied to karst spring hydrograph, but it requires a daily time series. Mangin (1984) introduced the memory effect in 1984, which means that there are a lot of case studies in scientific papers or engineering reports that provide memory effect for karst springs through the world. This parameter can be computed whatever the time step of the time series, and its value can be normalized with the value of 125 days that is used for short term correlation analysis of karst spring to avoid the influence of seasonal cycles.

It is thus proposed to use the memory effect for the characterization of the responsiveness of a karst spring.

2.3.5 *Results of classification method 2*

2.3.5.1 *First classification based on memory effect*

On Figure 2.9, the X axis represent the relative memory effect, which is the value of the memory effect expressed in days and divided by 125.

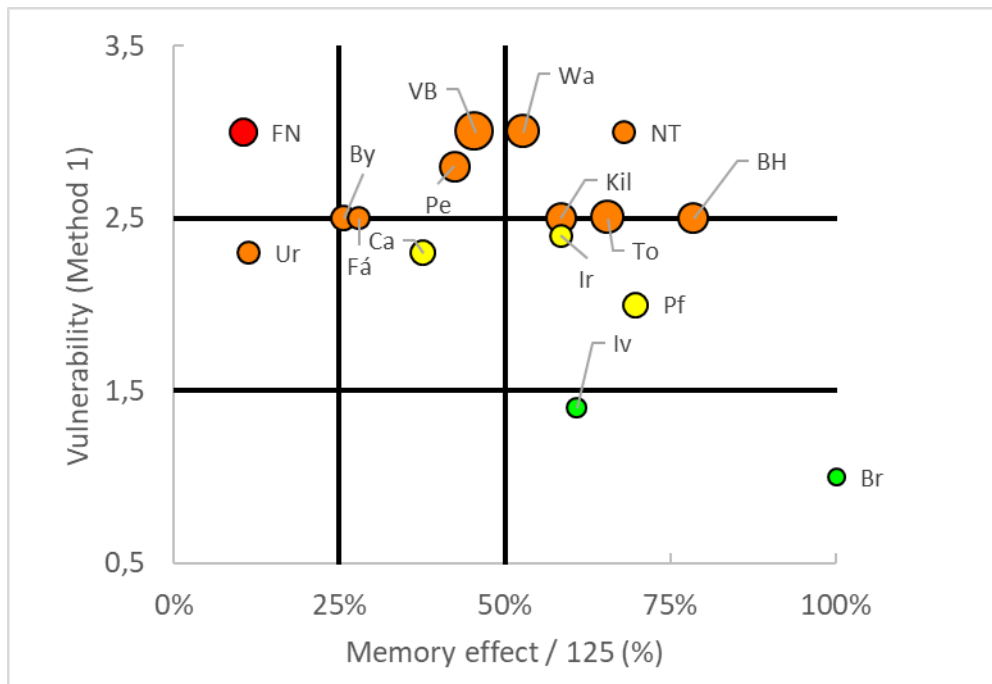


Figure 2.9: Results of the first classification

This value of 125 days is high for karst spring with high regulation capacity, while a low value characterizes karst systems with low storage.

The value given by the method 1 (Y axis) are grouped in 3 classes (<1.5, >=1.5 and <2.5, >=2.5), which are shown by the two thick horizontal lines. In the same way, the values of the relative memory effect are grouped in 3 classes (<25%, >=25% and <50%, >=50%) to provide, at the end, 9 classes of results that can be used for recommendations for GW managements. These thresholds have been chosen to clearly distinguish the two karst systems that show a very high responsiveness (FN and Ur) with memory effect lower than 1 month (30 days divided by 125 gives 0.24 ~ 25%), and to classify karst systems with memory effect higher than 2 months as low responsiveness.

These 9 classes are grouped according to the following rules (Figure 2.10):

- Green points: Low vulnerability and high memory effect (>50%)
- Red points: High vulnerability and low memory effect (<25%)
- Orange points: Other cases with low memory effect or high vulnerability
- Yellow points: All the other cases

Responsiveness	High (ME <25%)	Medium (ME>25% and <50%)	Low (ME>50%)
Vulnerability			
High			
Medium			
Low			

Figure 2.10: Groupings in 4 classes according to the values obtained for the Y-axis related to the vulnerability (Method 1) and the X-axis related to the karst responsiveness.

The diameter of the circles is a function of the mean discharge (log scale) to better consider the availability of the GW resource, from 0.01 m³/s to 25 m³/s.

This is important information, without which can lead to misleading interpretation of Figure 2.9: The best result of this type of classification should be the case of low vulnerability / high relative memory effect (green points). This case is exemplified by the St Brigida karst system (NL) or the Ivanscica Sp. (HZ), which both deliver a very small groundwater flow (mean discharge: 0.014 m³/s and 0.052 m³/s respectively).

2.3.5.2 Second classification accounting for mean spring discharge

A second classification has thus been proposed to better account for the karst groundwater resource availability. It is assumed that the groundwater availability increases with both the mean discharge and the memory effect. As a result, a classification using discharge time series only is proposed in Figure 2.11 where the Y axis represent the mean discharge. In this framework, crossing the information given by the mean discharge and the memory effect is used to assess a karst groundwater resource availability index: This is done by subdivided the Y axis representing the mean discharge in 4 classes in a log scale from 0.01 m³/s to 100 m³/s. The log scale is used since it is of primary importance to distinguish karst systems that show various mean discharge in the range 0.01 to 1 m³/s.

This new scale allows to compute an index linearly varying from 0 (0.01 m³/s) to 1 (100 m³/s), following a log scale and computed as follow, with Q the mean discharge in m³/s : $Y=(2+\log(Q))/4$. For instance, a mean discharge of 1 m³/s will give an index of $[2+\log(1)]/4=50\%$.

The product of this index with the value of the memory effect (divided by 125) is shown on Figure 2.11 with the different hyperbolas. Each hyperbola refers to the square roots of this product which ranges between 0 and 1. The result is used as a proxy for the assessment of the karst groundwater availability resource, which is called the Karst GW resource availability index (KGWRAI, see also the numerical values in Figure 2.3).

Figure 2.11 shows the results with varying color referring to the vulnerability classification from method 1, and varying size of square that refers to the ratio between the linearized mean discharge and the relative memory effect. Thus, along the same hyperbola, a larger square will refer to a karst system that has a higher mean discharge relative to its memory effect. In other words, the size of the square represents the relative importance of the mean discharge to quantify the karst GW resource availability index as compared to the memory effect.

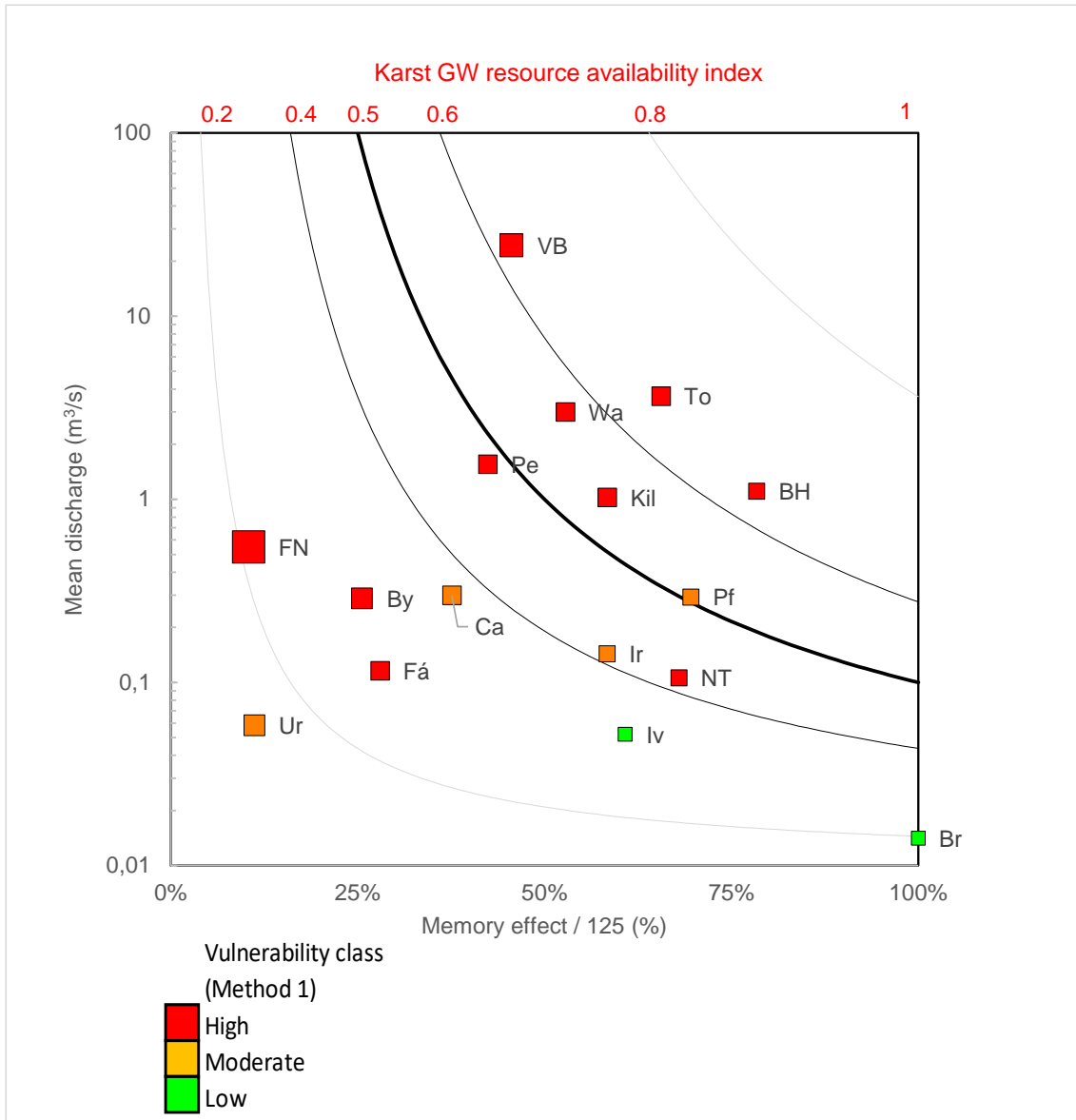


Figure 2.11: Classification of karst systems showing the computation of the karst GW resource availability index

This index is then used for a new classification combining the vulnerability assessment from the method 1 with the karst GW resource availability index (Figure 2.12), using the same color and sizes rules than the ones used for the first classification (Figure 2.9).

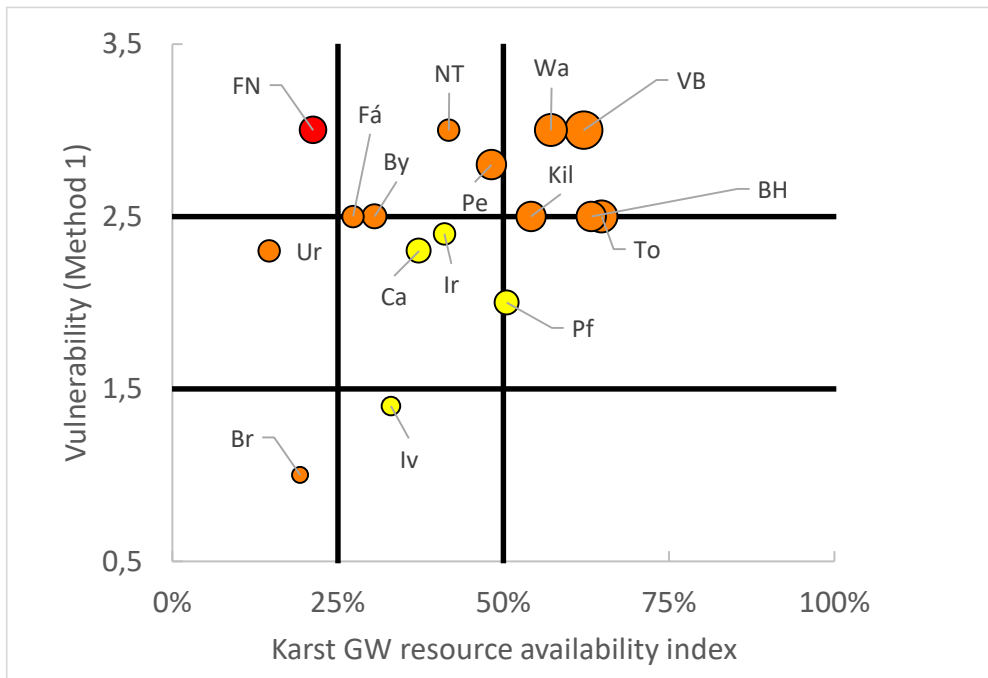


Figure 2.12: Classification of karst systems showing the computation of the karst GW resource availability index

This classification shows for instance that the Fontaine de Nîmes karst sp. is characterized by a high vulnerability with a low karst GW resource availability, which gives poor characteristics for water supply management. There is no karst system that shows low vulnerability with high karst GW resource, the best compromise between these two factors is exemplified by the Pfannbauernquelle case study (Pf, AU), which shows a high KGWRAI but a moderate vulnerability. The good results shown by the Figure 2.9 for the St Brigida Sp. are not validated by this second classification, reflecting its low discharge and thus its small size and the resulting poor GW resource.

As a result, this new classification shown by the Figure 2.12 is the classification proposed for the Method 2, combining the results of the Method 1 dedicated to vulnerability assessment with an easy to implement automatic procedure of discharge time series analysis, which leads to results without any user influence.

KGWRAI \ Vulnerability	Low (KGWRAI <25%)	Medium (25%<KGWRAI <50%)	High (KGWRAI >50%)
High			
Medium			
Low			

Figure 2.13: Groupings in 4 classes according to the values obtained for the Y-axis related to the vulnerability (Method 1) and the X-axis related to the karst GroundWater Resource Availability Index.

2.4 Method 3: (V-RC classification): quantitative classification based on monitoring data - discharge and other time series: Application to case studies: results

V-RC classification (Method 3) was applied on all CHAKA pilot sites, distributed in karst areas across the Europe (described in detail within Deliverable 5.2 of RESOURCE Project, CHAKA WP: Detailed conceptual hydrogeological models for pilot areas and case studies). Sufficient data was available for computing both V and RC scores for 16 out of 18 included spring sites. Remaining two spring sites has only discharge data available, so only their RC score was determined. There are also two sites with boreholes included in pilot sites, for which only V score was determined. Results of V-RC estimation with specified reliability levels and system (spring) sizes of all included pilot sites are specified in FIGURE 2.14. For easier comparison of the V-RC results, they are shown graphically on FIGURE 2.15. FIGURE 2.16 shows results for all sites with both V and RC estimations (16 sites) on proposed V-RC graphical representation scheme. Distribution of pilot sites based on the spring size (i.e. average discharge) is presented on FIGURE 2.17, and distribution of pilot RC and V estimation reliabilities (based on available input data) is shown on FIGURE 2.18.

Figure 2.14: Results of V-RC classification (Method 3) for all CHAKA pilot sites (springs marked with blue, wells with yellow; RC and V score <1.5 is low, 1.5-2.4 medium and ≥ 2.5 high; spring sizes vary from 1 = very small to 5 = very large).

Site	Short name	RC	V	RC rel	V rel	Size
1	Ton Cro	3.0	1.1	3	3	5
2	Pec Cro	1.5	2.9	3	3	4
3	BHS UK	3.0	3.0	3	3	4
4	Wald Au	1.5	2.4	3	3	4
5	Kill Ir	2.0	3.0	3	3	4
6	FdN Fr	1.0	2.8	3	3	4
7	LF Esp	1.5	2.8	2	2	3
8	BB Ro	1.5	2.0	1	2	3
9	Card Cat	2.0	2.7	3	2	3
10	StQ Cat	2.0	2.7	1	1	3
11	StB Neth	2.0	1.5	3	1	2
12	GU Ro	1.5	2.4	1	2	2
13	NT Hu	2.5	2.0	3	1	2
14	Iva Cro	3.0	1.0	2	1	2
15	Iron Fr	2.5	1.6	3	3	3
16	Pfann Au	3.0	1.0	3	2	3
17	VB BiH	1.5		2	0	5
18	BS Cz	1.5		3	0	3
19	Ess UK		3.0	0	3	2
20	B4 Slo		2.0	0	2	2
21	B9 Slo		2.5	0	2	2

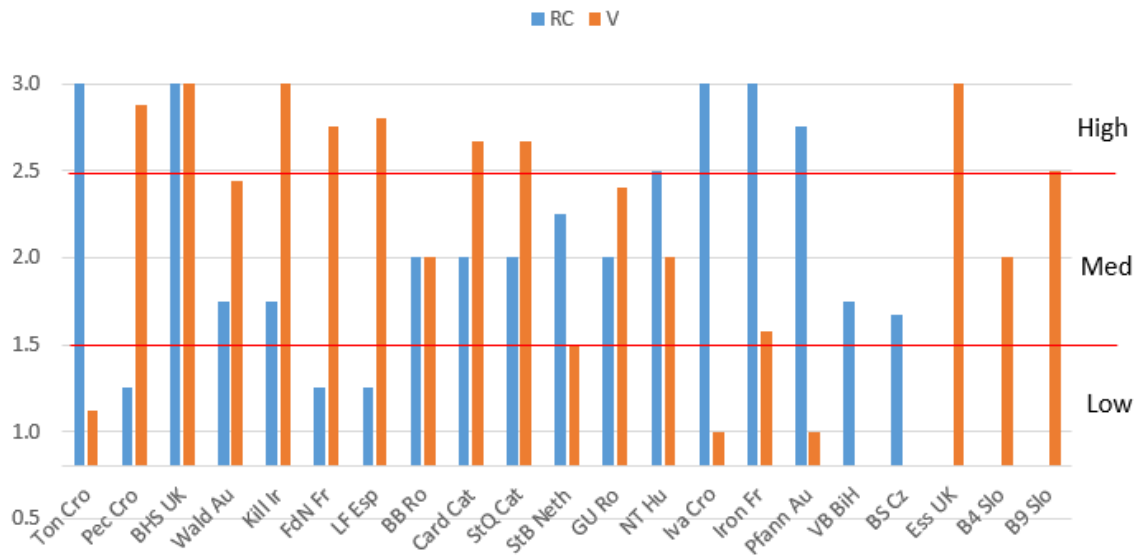


Figure 2.15: Graphical comparison of V and RC final scores for all CHAKA pilot sites.

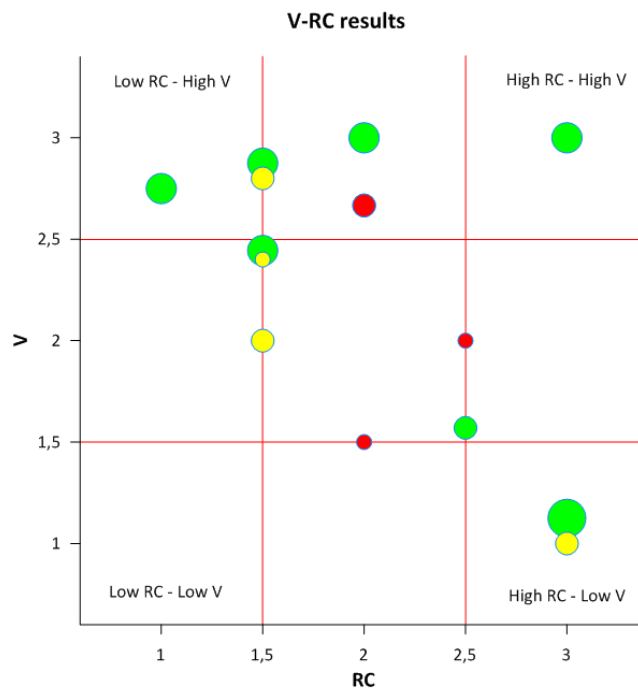


Figure 2.16: All CHAKA pilot sites (where both V and RC estimation was possible) on proposed V-RC representation diagram (circle position according to final V and RC scores, circle color based on estimated V reliability and circle radius on spring size; some circles are overlapping due to similar V-RC scores).

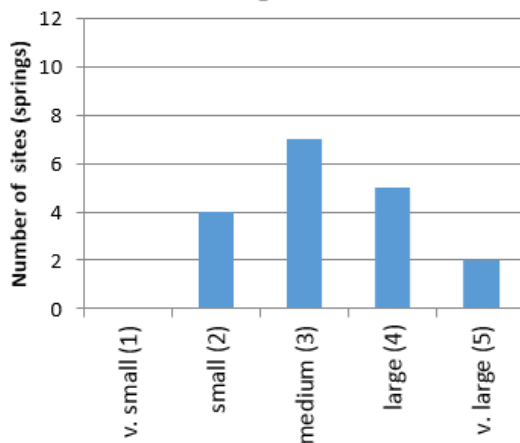


Figure 2.17: Distribution of CHAKA pilot sites (springs) by their sizes (i.e. average discharges)

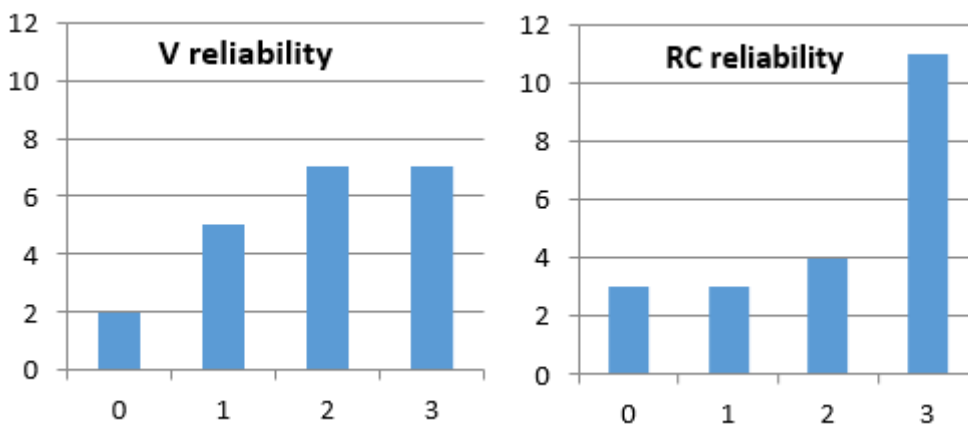


Figure 2.18: Distribution of CHAKA pilot sites by reliability levels of their final V and RC scores.

As can be seen in FIGURE 2.16 (V-RC diagram), the circles representing individual springs are generally clustered around a line which connects low RC/high V – medium RC/medium V – high RC/low V areas. However, some springs show significant deviations from that line towards the high RC/high V area, while no cases deviate towards low RC/low V. Large spring situated in chalk area of England (BHS UK) shows the most pronounced deviation due to multiple indicators of very fast transport from surface to the spring despite highly regulated discharge dynamics. Causes for such characteristics can be connected to high storage within the Chalk aquifer and significant soil cover on the surface, which can both buffer hydrological response of the spring. On the other hand the existence of well connected conduit systems with concentrated input points on the surface enable fast transport of a part of the infiltrated water, which can carry pollutants to the spring. There are also a few other examples with high V accompanied by medium RC, and with medium V and high RC (all deviating from the general trend). It can be concluded that although most typical karst springs are characterized by inverse RC-V relationship, there are also considerable deviations possible, which indicate the benefit of separation of V and RC estimations.

Regarding catchment lithology it can be also noticed that springs which drain dominantly dolomitic aquifers generally has high RC and medium to low V (Iron Fr, Pfann Au, Iva Cro), while springs with catchment composed of well karstified compact limestones medium to low RC and high V. However, deviations from this relation are also present (related to climate, soil cover, etc.), as the largest spring within high RC/low V category (Ton Cro) drain area dominantly composed of compact limestones. However, detailed explanation of various factors and processes influencing a spring V and RC characteristics is outside the scope of this classification.

V-RC classification is rather focused on observed spring characteristics important for its efficient management, regardless of underlying hydro(geo)logical causes and processes.

2.5 References

- Atkinson, T. C. (1977). Diffuse flow and conduit flow in limestone terrain in the Mendip Hills, Somerset (Great Britain). *Journal of hydrology*, 35(1-2), 93-110.
[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(77\)90079-8](https://doi.org/10.1016/0022-1694(77)90079-8)
- El-Hakim, M., Bakalowicz, M., 2007. Significance and origin of very large regulating power of some karst aquifers in the Middle East. Implication on karst aquifer classification. *J. Hydrol.* 333, 329–339. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.09.003>
- Mangin, A. (1975) - Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Université de Dijon, p.267 p., Ph.D. dissertation. Revu.
- Mangin, A. (1984). Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrale. *Journal of Hydrology*, 67(1-4), 25-43.

3 Groundwater management recommendations for karst and chalk aquifers: Summary (D5.4)

Fractured limestones, dolostones and chinks, all susceptible to karstification processes, form important groundwater resources, but often with a complicated flow regime that includes both fast flow routes that makes them vulnerable to pollution, and slow baseflow of older uncontaminated water that mixes at the springs and wells. This complexity and heterogeneity of groundwater flow in karst aquifers limits the use of classical methods applied to porous aquifers for assessing the water reserve volume or evaluating their vulnerability to pollution. Classically, due to their high degree of heterogeneity, understanding of karst aquifer hydrogeology relies on the monitoring of the main spring outlets of the aquifer, considering these as the best proxy to characterize the karst aquifer as a whole. Most karst classifications rely on these measurements and use spring time series data. Work package 5 of the GeoERA RESOURCE project (also called 'CHAKA') focuses on typologies/classifications for karst (including chalk) aquifers in order to improve their management. The objective of the GeoERA RESOURCE WP5 is to test and evaluate analytical and assessment methods and come up with an improved characterization framework and typology for karst aquifers. These methods are tested on pilot areas within different countries across Europe. The operational objective is to provide a set of management recommendations associated with the different types of karst/chalk aquifers in order to assist management by multi-disciplinary teams including water operators, planners, engineers, government, scientists, farmers, land-owners and politicians and other operators in charge of karst aquifers in the context of karst hydrogeology and land use management.

In deliverable 5.3, karst classification methods were tested on the CHAKA case study springs to assess the water resource availability and the vulnerability of springs. Two methods were proposed which produce scatter plots that assess vulnerability on the Y axis and water resource availability on the X axis. In the current deliverable 5.4, the following management recommendations have been identified: sustainability assessment, source protection zones, vulnerability mapping, active and passive management, early warning systems and mitigation measures. These management measures are then recommended for springs on the basis of their position on the X-Y scatter plot classification diagrams. The more vulnerable and the less well-regulated in terms of available water resources the aquifer is, as demonstrated by the classification methods, the more aquifer management recommendations there are.

As outlined in Deliverable 5.3, these methods are a promising first attempt at karst classification aimed at water management issues based on the case studies available for the CHAKA project. Most of the case studies are within more classically karstic aquifers, and therefore further work is needed to assess the applicability of the methods to karst aquifers such as the Chalk with lower levels of karstification. Most of the case studies are spring sites rather than boreholes and therefore the application of the methods to boreholes also needs further investigation. The two vulnerability assessment methods identify a number of important physico-chemical parameters measured at spring and borehole sites that can indicate high vulnerability of karst sites. However, there remain some uncertainties about the thresholds and interpretation of these physico-chemical parameters, and further research using large datasets from a wide range of karst aquifers is needed to improve the vulnerability classifications.