KWR 2019.030| Maart 2019

Controle grondwatermodel MORIA met hydrochemische gegevens

KWR
Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together

Controle grondwatermodel MORIA met hydrochemische gegevens

KWR 2019.030 | Maart 2019

Opdrachtnummer
402019-002

Projectmanager
ir. M.L. (Martin) van der Schans

Opdrachtgever
Vitens

Kwaliteitsborger
prof. dr. P.J. (Pieter) Stuyfzand

Auteurs
ir. M.L. (Martin) van der Schans (KWR)*,
prof. dr. P.J. (Pieter) Stuyfzand (KWR)** ,
W. (Wouter) Engel MSc (RHDHV)***,
L. (Lisette) Avis MSc (RHDHV)***

Projectbegeleiding
Toon van Kessel (Vitens)
Rob Breedveld (Vitens)

Verzonden aan
Leden projectbegeleidingsgroep.

Dit rapport is openbaar.

(*) H1,H4-6; Bijlage III-6 (**) H2, Bijlage I, II; (***) H3 en bijlage III

Jaar van publicatie

2019

Meer informatie
Ir. M.L. van der Schans
T +31 30 6069 537
E martin.van.der.schans@kwrwater.nl

Postbus 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511
F +31 (0)30 60 61 165
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl

KWR | Maart 2019 © KWR

Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Samenvatting

Aanleiding en doel

Een probleem bij de toepassing van regionale grondwatermodellen is dat de kwetsbaarheid van winningen vaak onvoldoende is gevalideerd. Dit is een gemiste kans gezien de schat aan waterkwaliteitsgegevens die Vitens afgelopen decennia heeft opgebouwd.

Het doel van dit onderzoek is het ontwikkelen van een generieke aanpak om regionale grondwatermodellen te toetsen met waterkwaliteitsgegevens. De methode is getest op het MORIA-model rondom de drinkwaterwinningen in de Overbetuwe.

Werkwijze

Kern van de aanpak is het afleiden van de herkomst en ouderdom van grondwater uit waterkwaliteitsmetingen in winputten en waarnemingsfilters (peilbuizen), om deze vervolgens te vergelijken met de door het grondwatermodel berekende herkomst en ouderdom via een stroombaanberekening.

Resultaten: beoordeling MORIA-model

Uit vergelijking van de hydrochemische gegevens en stroombaanberekeningen blijkt dat het MORIA-model de herkomstgebieden in 27% van de waarnemingsfilters en 14% van de winputten afwijkend voorspelt t.o.v. de hydrochemische bepaalde herkomst. De MORIA-leeftijd wijkt in 23% van de peilbuizen en 11% van de winputten meer dan 50% af van de hydrochemisch bepaalde leeftijd.

Een deel van deze verschillen kan verklaard worden door fouten in de hydrochemische duiding van herkomst en leeftijd, met name in situaties met een te beperkt analysepakket (te weinig chemische parameters gemeten). Maar in een aantal gevallen duiden de verschillen op verbeterpunten voor het MORIA-model:

- Rondom de winning **Sijmons** berekent MORIA een afwijkend herkomstgebied voor een groot deel van de waarnemingsfilters. Water dat hydrochemisch gezien afkomstig is van de Veluwe, is volgens het MORIA-model afkomstig van de Vloedvlakten in de Overbetuwe zelf, en vice versa. Ook is er sprake van forse onderschattingen van de reistijd.
- In de winning **Fikkersdries** is mogelijk sprake van een onderschatting van de minimale reistijd. De hydrochemische gegevens onderschrijven overigens wel de recente toevoeging van een gat in de Waalreklei ten oosten van de winning in het MORIA-model door KWR/ RHDHV.
- Rondom **Hemmen** en **Zetten** zijn te weinig waterkwaliteitsmetingen beschikbaar in waarnemingsputten om het model goed te beoordelen. MORIA lijkt voor beide winningen in lijn met de hydrochemische leeftijd en herkomst al wordt in één waarnemingsfilter rond Hemmen een veel jongere leeftijd berekend dan blijkt uit isotopenmetingen.
- Ten noorden van de winningen **Oosterbeek** en **Wageningen** is sprake van een veel te lange reistijd voor peilbuizen in het gestuwde pakket (ouder dan 2000 jaar) in vergelijking met de hydrochemische gegevens (jonger dan 81 jaar).

Daarnaast wordt in het beekdal juiste een veel kortere reistijd berekend in vergelijking met isotopenmetingen.

Er is een nadere inspectie uitgevoerd van de stroombaanberekeningen naar aanleiding van de discrepanties met de isotopen- en hydrochemische gegevens rondom Wageningen en Oosterbeek. Hieruit blijkt dat er fysisch niet-plausibele reistijden berekend worden voor alle stroombanen die afkomstig zijn (infiltreren) van de Veluwe: 51% van alle berekende stroombanen overschat de reistijd naar winningen. Dit geldt ook voor de winningen in de Overbetuwe aangezien deze grotendeels water onttrekken afkomstig van de Veluwe. Daarnaast crashen 6% van de stroombanen midden in het modelgebied.

Conclusie: toepasbaarheid methode voor andere regionale modellen

In dit onderzoek is een algoritme ontwikkeld dat de hydrochemische gegevens per meetpunt analyseert. Dit leverde over het algemeen een plausibele inschatting van de hydrochemische leeftijd en het type herkomstgebied. Vergelijking met het MORIA model leverde inzicht waar het model vermoedelijk een foutief (historisch) stromingspatroon berekent en waar mogelijk verbetering wenselijk is van de geohydrologische modelparameters.

Maar op een aantal locaties ging het algoritme nog de mist in. Zo traden op veel meetpunten interne tegenstrijdigheden op; bijvoorbeeld grondwater dat in de tijd afwisselend wél en niet als antropogeen beïnvloed werd geclassificeerd. Discrepanties ontstaan met name wanneer het analysepakket per jaar verschilt (vooral wel/ geen OMIVE's). De uiteindelijke classificatie wordt dan bepaald door de frequentie van de verschillende analysepakketten. Het huidige correctiemechanisme van het algoritme, dat rekening houdt met de betrouwbaarheid en het aantal parameters, is blijkbaar niet altijd afdoende. Foutieve inschattingen door het algoritme zijn in dit rapport eruit gevist door discrepanties met het MORIA-model handmatig langs te lopen en te beoordelen. Maar dit kostte veel tijd.

Peilbuizen lenen zich beter voor een snelle vergelijking tussen waterkwaliteit en stroombaanberekeningen dan winputten. Dit komt omdat winputten mengwater aantrekken met een range aan leeftijden afkomstig uit een groot herkomstgebied. Dit maakt het lastig om eenduidig één leeftijd te bepalen op basis van de hydrochemie en dit vervolgens te vergelijken met stroombaanberekeningen. Voor winningen is vergelijking met de hydrologische response curve dan ook relevanter. Een Interessant inzicht van dit onderzoek is dat de hydrologische response curve in de loop van de tijd wijzigt. Het berekenen van de hydrologische response curve voor meerdere tijdstippen levert dus extra inzicht in de te verwachten ontwikkeling van de ruwwaterkwaliteit.

Aanbevelingen

1. Voer een nadere controle uit van het MORIA-model daar waar discrepanties optreden met de hydrochemische leeftijd en herkomstbepaling. Met name de berekende reistijden op de Veluwe vergen verbetering. En controleer hoe gevoelig de discrepanties rondom Sijmons zijn voor bijvoorbeeld een te hoge of lage inschattingen van de historische grondwateraanvulling in het MORIA-model.
2. Optimaliseer de reguliere monitoring door uitbreiding van het analysepakket met Br en hanteer een minimaal standaard analysepakket voor macro-ionen en organische microverontreinigingen.

3. Voer aanvullende isotopenmetingen uit bij winningen om de ouderdom (en met name het aandeel jong grondwater) te bepalen van het onttrokken grondwater. Deze isotopenmetingen dienen ook als baseline voor toekomstige veranderingen.
4. Controleer de berekende ouderdom van winningen door de hydrologische response curve te vergelijken met isotopenmetingen.
5. Werk de beslisregels ter hydrochemische bepaling van leeftijd en herkomstgebied verder uit tot een robuuster algoritme.
6. Pas de hydrochemische controle ook toe om andere regionale grondwatermodellen te controleren zoals Azure op de Veluwe.

De aanbevelingen zijn verder uitgewerkt in hoofdstuk 6 van dit rapport.

Inhoud

Samenvatting, conclusies en aanbevelingen 1

1 Inleiding 6
1.1 Aanleiding 6
1.2 Doel en scope 6
1.3 Aanpak op hoofdlijnen 6
1.4 Leeswijzer 7

2 Samenstellen ijkset met hydrochemische gegevens 8
2.1 Inventarisatie beschikbare gegevens 8
2.2 Hydrochemische schematisatie 9
2.3 Werkwijze: multitracing van herkomst 9
2.4 Resultaten herkomstbepaling 12
2.5 Werkwijze: ouderdomsbepaling 12
2.6 Resultaten ouderdomsbepaling 15
2.7 Aggregatie herkomst en ouderdomsbepaling per meetpunt 16

3 Stroombaanberekeningen MORIA-model 17
3.1 Werkwijze stroombaanberekeningen 17
3.2 Resultaten stroombaanberekeningen in peilbuizen 20
3.3 Resultaten stroombaanberekeningen Fikkersdries 21
3.4 Hydrologische response curve 22

4 Beoordeling 24
4.1 Werkwijze: Vergelijkingtabel en kaarten hydrochemie-MORIA 24
4.2 Vergelijking herkomstgebied 2010-2018 24
4.3 Vergelijking ouderdom 2010-2018 26
4.4 Vergelijking ouderdom 1980-1990 28
4.5 Beoordeling Moria model per winning 30

5 Nadere controle reistijd Veluwe 33
5.1 Stroombanen op Veluwe stoppen niet tijdig 33
5.2 Deel stroombanen crasht 35
5.3 Consequenties voor betrouwbaarheid stroombaanberekeningen 35
5.4 Consequenties voor beoordeling model 35

6 Aanbevelingen 36
6.1 Controle stroombaanberekeningen Veluwe en verbeteren MORIA-model (zie hoofdstuk 4 en 5) 36
6.2 Optimalisatie reguliere monitoring (zie hoofdstuk 2) 36
6.3 Aanvullende metingen (zie hoofdstuk 4) 36
6.4 Valideer de berekende reistijd van winningen met isotopenmetingen (zie hoofdstuk 4) 36
6.5 Verbeteren van algoritme om hydrochemische leeftijd en herkomst te bepalen (zie hoofdstuk 2) 37
6.6 Toepassen op andere regionale modellen 37

7 Referenties 38

Bijlage I Indrukken ruwwaterkwaliteit

Bijlage II Analytische benadering van grondwaterleeftijd

Bijlage III Digitale kaarten en tabellen

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Het modelinstrumentarium MORIA gaat de komende jaren gebruikt worden als ondersteuning voor beslissingen met op termijn ingrijpende gevolgen voor de bedrijfsvoering van Vitens. Bijvoorbeeld het vergroten van de vergunningscapaciteit van winning Hemmen en het al-dan-niet aanwijzen van strategische grondwatervoorraden in het kader van de Structuurvisie Ondergrond (STRONG).

Een probleem is dat onvoldoende is gevalideerd of het model de kwetsbaarheid van de winning c.q. hydraulische weerstand van beschermende (klei)lagen op de juiste wijze simuleert. Deze twijfel over de juistheid van het model wordt mede veroorzaakt doordat bij de modelbouw onvoldoende rekening is gehouden met de beschikbare schat aan stijghoogte- en waterkwaliteitsgegevens. Dit is een gemiste kans, want dergelijke gegevens zijn in het verleden regelmatig succesvol ingezet om lokale grondwatermodellen te verbeteren; bijvoorbeeld door Bakker et al 2008, von Asmuth 2008 en van der Schans & Vissers 2011.

Een belangrijk knelpunt is dat er geen generieke aanpak is hoe waterkwaliteitsgegevens en stijghoogtemetingen nabij puttenvelden effectief in te zetten bij modelbouw op regionale schaal. KWR en RHDHV hebben recent in opdracht van de Provincie Gelderland een verbeterslag uitgevoerd op het grondwatermodel MORIA door ijking van het model aan de hand van resultaten van tijdreeksanalyse (van Dooren et al 2018). Vitens heeft KWR en RHDHV gevraagd om dit model verder te controleren aan de hand van waterkwaliteitsgegevens.

1.2 Doel en scope

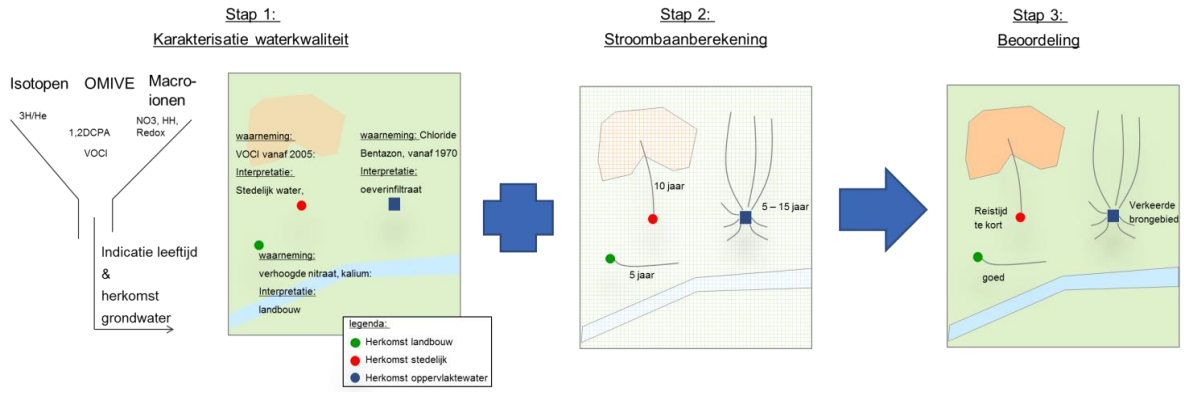
Het doel van het onderzoek is het ontwikkelen van een generieke aanpak om regionale modellen te toetsen met waterkwaliteitsgegevens rondom winningen en zo meer inzicht te geven in de kwetsbaarheid van grondwatervoorraden. Deze methode wordt getest op het MORIA model rondom de winningen in de Overbetuwe.

De analyse is met name gericht op de metingen in Overbetuwe, aangezien het gebied ten noorden van de Rijn buiten het aandachtsgebied van MORIA valt. De winningen Wageningen en Oosterbeek zijn ook meegenomen in de analyse omdat de intrekgebieden van de winningen in de Overbetuwe op de Veluwe liggen. Het is dus belangrijk dat het model ook hier goed presteert. De beoordeling is gefocussed op de meeste recente metingen tussen 2010-2018 en de periode 1980-1990 i.vm. beschikbaarheid van zeldzame isotopenmetingen.

Het aanbrengen van verbeteringen aan het grondwatermodel maakt geen overigens onderdeel uit van dit onderzoek.

1.3 Aanpak op hoofdlijnen

Kern van de aanpak is om de herkomst van het opgepompte water en de ouderdom af te leiden uit waterkwaliteitsmetingen. Dit wordt vervolgens vergeleken met de door het grondwatermodel berekende herkomst en ouderdom. Figuur 1-1 toont de verschillende stappen die in het project zijn doorlopen welke hierna worden toegelicht.



Figuur 1-1. Principe van de hydrogeochemische validatie van een hydrologisch model.

1.3.1 Stap 1: Samenstellen ijkset op basis van hydrochemische gegevens.

Bij aanvang van het project zijn alle beschikbare waterkwaliteitsmetingen en rapporten verzameld en gecontroleerd. Deze informatie is gebruikt om een conceptueel hydrochemisch model op te stellen aan de hand waarvan verschillende herkomstgebieden en ouderdomscategoriën zijn gedefinieerd. Vervolgens zijn beslisregels opgesteld om alle hydrochemische waarnemingen eenduidig te classificeren. Het resultaat is een “ijkset” met per meetpunt voor verschillende tijdstippen een inschatting van het landgebruikstype en ouderdom.

1.3.2 Stap 2: Uitvoeren stroombaanberekeningen met grondwatermodel.

Vervolgens zijn stroombaanberekeningen uitgevoerd om de berekende leeftijd van het MORIA model te bepalen. Hierbij is het model aangepast via een zgn. “historische reconstructie” om rekening te houden met de invloed van historische veranderingen in het gebied op de grondwaterstromingsrichting zoals de aanleg van ontwatering en toename van grondwaterwinningen. De berekeningen zijn uitgevoerd voor zowel peilbuizen als winputten en gestart op verschillende momenten. Er is meer dan 2000 jaar teruggerekend tot 50 BC.

1.3.3 Stap 3: beoordelen grondwatermodel door vergelijking van rekenresultaten met ijkset.

Tot slot is de leeftijd en herkomstgebied bepaald aan de hand van de waterkwaliteit vergeleken met de verspreiding volgens stroombaanberekeningen.

1.4 Leeswijzer

De gehanteerde werkwijze en resultaten komen in de navolgende hoofdstukken aan bod:

- Karakterisatie leeftijd en herkomst o.b.v. hydrochemische gegevens (Hoofdstuk 2).
- Karakterisatie leeftijd en herkomst met stroombaanberekeningen MORIA-model (Hoofdstuk3).
- Beoordeling grondwatermodel (Hoofdstuk 4).
- Nadere controle stroombaanberekeningen, naar aanleiding van in voorgaande hoofdstuk geconstateerde verschillen met hydrochemische leeftijd op de Veluwe (Hoofdstuk 5)
- Aanbevelingen (Hoofdstuk 6)

2 Samenstellen ijkset met hydrochemische gegevens

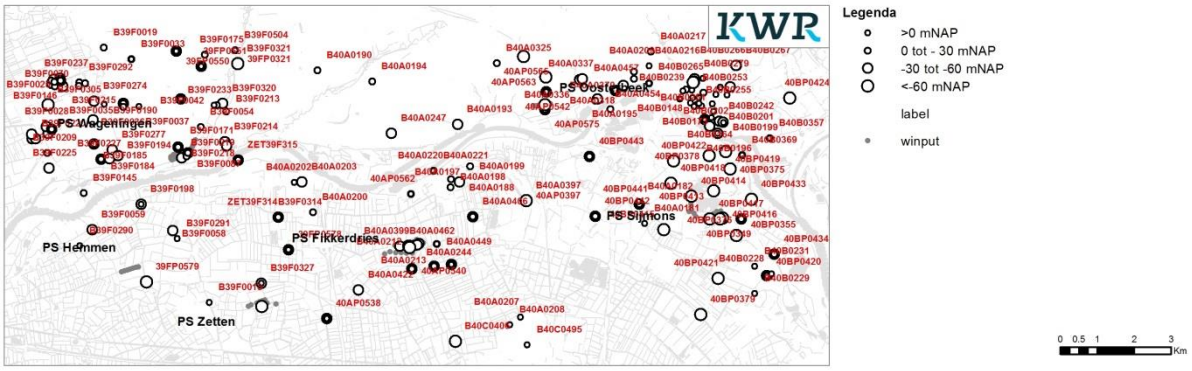
In dit hoofdstuk worden de werkwijze en resultaten besproken voor het afleiden van herkomstgebieden en ouderdom uit hydrochemische gegevens.

2.1 Inventarisatie beschikbare gegevens

Voor dit onderzoek zijn de volgende hydrochemische datasets gebruikt:

- Waterkwaliteit bij waarnemingsfilters (WPs) en winputten (PPs) van Vitens. Database Vitens aangeleverd door Rob Breedveld in augustus 2017.
- Ruwwater pompstations vanaf start winning t/m 2008. KWR-database KIDAP (= Klwa DAtabase Pompstations; Mendizabal & Stuyfzand 2009)
- Waterkwaliteit bij waarnemingsputten afkomstig uit de Dino database versie augustus 2017.
- Waterkwaliteit Rijn bij Lobith: databestanden Stuyfzand en Riwa-jaarrapport 2015.
- Waterkwaliteit Linge: databestand Waterschap Rivierenland aangeleverd augustus 2017.

Binnen het studiegebied (X = 173000-193600 en Y = 437000-4467000) zijn 3560 grondwatermonsters beschikbaar: 1697 monsters in 397 waarnemingsfilters en 1863 in 93 winputten. Deze gegevens zijn samengevoegd in één Excel database.



Figuur 2-1. Het studiegebied, met de drinkwaterwinningen en waarnemingsputten

Vervolgens is een selectie gemaakt van relevante macroparameters, sporen-elementen, organische microverontreinigingen (OMIVE) en enkele isotopen, bij elkaar 71 kwaliteitsparameters.

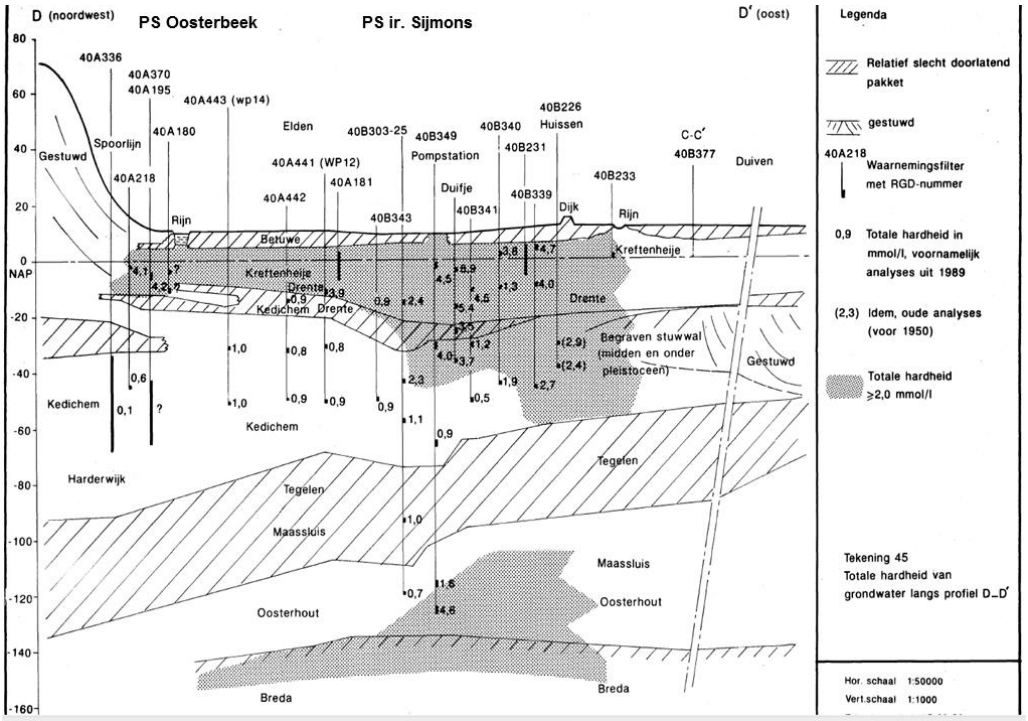
De kwaliteitsgegevens zijn gecontroleerd door vergelijking van de ionenbalans (som Ionen versus anionen) en gemeten en berekende EGV.

In later stadium zijn nog veel analoge kwaliteitsgegevens in waarnemingsputten ontdekt in diverse rapporten (zie referenties). Deze zitten niet in één van de digitale

database. Geadviseerd wordt om deze gegevens te digitaliseren en toe te voegen aan de database.

2.2 Hydrochemische schematisatie

Figuur 2-2 toont enkele belangrijke kenmerken van het huidige grondwatersysteem in de Overbetuwe. Water stroomt toe vanaf de Veluwe. Daarnaast infiltreert lokaal water vanuit de Rijn en stedelijk gebied onder invloed van de drinkwaterwinningen in de Overbetuwe zelf. Lokaal komen ook kwelsituaties voor. Water met een hogere hardheid is afkomstig uit de rivieren (verontreiniging), stedelijk gebied (ook verontreiniging) en upconing van connaat zout water. Bijlage I geeft een uitgebreider inzicht in de hydrochemie van het gebied.



Figuur 2-2. Noordzuid dwarsprofiel van de bodemopbouw en hardheid van het grondwater ter plaatse van de winning Oosterbeek en Sijmons (voor ligging van profiel, zie Bijlage I).

2.3 Werkwijze: multitracing van herkomst

In regionale studies zoals deze, vergt de herkomstbepaling van grondwatermonsters de beschouwing van meerdere waterkwaliteitsparameters die elk voor zich verschillende zegkracht hebben. Helaas zijn verschilt het analysepakket sterk per monster. Clusteranalyse is derhalve geen optie. Daarom is een aanpak gekozen met een variabel aantal beschouwde tracers waarbij ook de betrouwbaarheid van de bepaling wordt meegewogen.

Op basis van de beschikbare analyses en expert-judgement zijn 4 hoofdwatersoorten onderscheiden met verdere onderverdeling in 10 watersoorten:

- Veluwewater, in 4 soorten: V_1 (schoon, relatief kalkrijk), V_2 (schoon, relatief kalkarm, zuur), V_A (beïnvloed door landbouw), V_U (beïnvloed door stad).
- Rijnoevergrondwater (R)

- Riviervlaktewater: F (schoon), F_A (beïnvloed door landbouw), F_U (beïnvloed door stad); en
- Brak, oud grondwater: B_1 (licht brak) en B_2 (brak – zout).

Daarnaast zijn 14 potentiële waterkwaliteitsparamters geselecteerd, alsmede een set criteria opgesteld op basis waarvan watermonsters worden geclassificeerd volgens één van de 10 onderscheiden watersoorten (zie Tabel 2-1).

Tabel 2-1. Criteria voor selectie (tabel boven) en deselectie (tabel onder) bij het bepalen van de watersoort (V = Veluwe, R = Rijnoeverfiltraat, F = vloedvlakte, B = brak). AOX = actieve kool adsorbeerbare halogenen; OMP = Organische MicroPolluent; OMP-Rhine = som van 4 OMPs typisch voor de Rijn; OMP-U = som van 13 OMPs typisch voor urbane omgeving; OMP-A = som van 10 OMPs typisch voor gebieden met intensieve landbouw.

Tracer	Unit	V_1	V_2	V_A	V_U	R	F	F_A	F_U	B_1	B_2
N-select		10	8	6	7	10	4	4	5	8	8
Cl	mg/L	<=10	<=20	15-300	15-300	50-250	20-50	>30	>30	100-1000	>1000
SO4/Cl	mg/L	<=1.5		>1.5	>1.5	0.5-1.5				<=0.2	<=0.2
HCO3	mg/L	<=150	>150			150-360	>150	>150	>150		
NO3	mg/L	<=1	<=2	>5	>5	<15				<=1	<=1
pH	-		>7			7-8	>7	>6	>6	>6.8	>6.8
Ca	mg/L	<=50	>50			>50					
B	µg/L	<=20			>20	>20			>20	>100	>200
Li	µg/L	<=2				>5				>15	>30
AOX	µg/L	<=10	<10	>10	>10						
OMP-Rhine	µg/L					>0.01					
OMP-U	µg/L				>0.01				>0.1		
OMP-A	µg/L			>0.01				>0.1			
OMP-Sum	µg/L	<=0.01	<=0.01				<0.1			<0.1	<0.1
^{18}O	‰SMOW	>-8	>-8	>-8	>-8	<=-8.5				>-8	>-8

<=10	=indicatie-+uitsluitingscriterium
<=10	=indicatiecriterium

Tracer	Unit	V_1	V_2	V_A	V_U	R	F	F_A	F_U	B_1	B_2
N-deselect		5	6	4	5	5	4	3	3	6	6
Cl	mg/L	>15	>20	<=15	<=15	<=20	<=20,>40	<20	<20	<=100	<=1000
SO4/Cl	mg/L	>1.5		<=1	<=1	<=0.1,>2	<=0.2	<=0.2	<=0.2	>0.2	>0.2
HCO3	mg/L						<150	<150	<150		
NO3	mg/L	>2	>2	<=2	<=2	>25				>2	>2
pH	-		<=7			<=6				<=6.5	<=6.5
Ca	mg/L		<=50								
B	µg/L				<=20						
Li	µg/L										
AOX	µg/L										
OMP-Rhine	µg/L										
OMP-U	µg/L										
OMP-A	µg/L										
OMP-Sum	µg/L	>0.01	>0.01				>0.01			>0.01	>0.01
^{18}O	‰SMOW	<=-8	<=-8	<=-8	<=-8	>-8.5				<=-8	<=-8

Selectie vindt plaats in een aantal stappen, welke in Figuur 2-3 zijn geïllustreerd. Eerst wordt voor alle watertypen een combinatiescore berekend (D_x) op basis van de herkomst-score voor watersoort X (Or_x) en de betrouwbaarheid daarvan (Rel_x). Hierbij kunnen watersoorten ook worden uitgesloten op basis van 1 enkel criterium (Deselectie; $n_{x,neg}$). Vervolgens wordt de watersoort gekozen met de hoogste score. Mits deze combinatiescore tenminste 60% bedraagt en tenminste de basisparameters Cl, SO4/Cl, HCO3, NO3 en pH bekend zijn.

$$D_{SEL} = max\{D_A : D_X\} \qquad indien\ D_{SEL} \geq 60\ \ (anders\ geen\ keuze) \qquad \text{[eq. 2–1]}$$

Met:
$$D_X = \sqrt{Or_X\ Rel_X} = 100\sqrt{\frac{n_{X,POS}}{N_X}} \qquad \text{[eq. 2–2]}$$

$$Or_X = 100\ \frac{n_{X,POS}}{n_X} \qquad \text{[eq. 2–3]}$$

$$Rel_X = 100\ \frac{n_X}{N_X} \qquad indien\ \ N_{basis} = 5\ \&\ n_{x,neg} = 0\ \ (anders\ geen\ score) \qquad \text{[eq. 2–4]}$$

Waarin: N_x = maximale aantal te testen parameters;
n_x = aantal werkelijk geteste parameters ($n_x < N_x$, door ontbrekende data);
$n_{X,POS}$ = aantal als positief geteste parameters (selectiecriterium vervuld).
$n_{X,neg}$ = aantal als negatief geteste parameters (deselectiecrierium vervuld).
N_{basis} = aantal beschikbare basisparameters (Cl, SO4/Cl, HCO3, NO3, pH).

Stap 1:
De benodigde data (voorbeeld 10 grondwatermonsters)

Sampling point		Data for Origin classification											
Well	filter	Cl	SO4/Cl	HCO3	NO3	pH	Ca	B	Li	AOX	OMP-R	OMP-U	OMP-A	18O
40AP0533	1	32.00	1.84	417	0.50	6.9	136	29.00	3.21		0.02		0.02	
40AP0533	2	25.00	2.04	341	0.50	7.5	122	5.01	1.81					
40AP0533	3	25.00	1.72	296	0.50	7.6	102	5.01	1.62					
40AP0539	1	40.00	0.48	283	0.50	7.7	97.9	5.01	1.36		0.12		0.12	
40AP0539	2	30.00	1.20	252	0.50	7.7	87.8	5.01	1.75					
40AP0542	1												0.45	
40AP0542	1	59.00	0.97	33	89.40	5.9	37.9							
40AP0542	1	53.00	1.21	44	79.30	5.8	35.6	116.00	4.70		0		0.66	
40AP0542	2	67.00	2.01	41	67.70	6	65.8							
40AP0542	2	69.00	2.17	35	59.20	5.7	63.4	47.10	7.00					

Stap 2:
Bepaling van OrX:

Sampling point		Origin Score										
Well	filter	V1	V2	VA	VU	R	F	FA	FU	B1	B2	Mix
40AP0533	1	0	0	0	0	44	0	100	100	0	0	
40AP0533	2	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	
40AP0533	3	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	
40AP0539	1	0	0	0	0	0	0	100	75	0	0	
40AP0539	2	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	
40AP0542	1	0	0	100			0	100		0	0	
40AP0542	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
40AP0542	1	0	0	75	75	0	0	0	0	0	0	
40AP0542	2	0	0	100	100	0	0	0	0	0	0	
40AP0542	2	0	0	100	100	0	0	0	0	0	0	

Stap 3:
Bepaling van RelX

Sampling point		Reliability Score										
Well	filter	V1	V2	VA	VU	R	F	FA	FU	B1	B2	Mix
40AP0533	1	80	75	67	57	90	100	100	80	88	88	
40AP0533	2	70	63	50	57	80	75	75	80	75	75	
40AP0533	3	70	63	50	57	80	75	75	80	75	75	
40AP0539	1	80	75	67	57	90	100	100	80	88	88	
40AP0539	2	70	63	50	57	80	75	75	80	75	75	
40AP0542	1	10	13	17	0	0	25	25	0	13	13	
40AP0542	1	50	63	50	43	60	75	75	60	50	50	
40AP0542	1	80	75	67	57	90	100	100	80	88	88	
40AP0542	2	50	63	50	43	60	75	75	60	50	50	
40AP0542	2	70	63	50	57	80	75	75	80	75	75	

Stap 4:
Bepaling van DX en DSEL (rechter kolom onder Result)

Sampling point		Combination = sqrt(Origin x Reliability)										
Well	filter	V1	V2	VA	VU	R	F	FA	FU	B1	B2	Result
40AP0533	1	0	0	0	0	63	0	100	89	0	0	FA
40AP0533	2	0	0	0	0	0	87	0	0	0	0	F
40AP0533	3	0	0	0	0	0	87	0	0	0	0	F
40AP0539	1	0	0	0	0	0	0	100	77	0	0	FA
40AP0539	2	0	0	0	0	0	87	0	0	0	0	F
40AP0542	1	0	0	41			0	50		0	0	
40AP0542	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
40AP0542	1	0	0	71	65	0	0	0	0	0	0	VA
40AP0542	2	0	0	71	65	0	0	0	0	0	0	VA
40AP0542	2	0	0	71	76	0	0	0	0	0	0	VU

Figuur 2–3. Voorbeeld van de bepaling van de watersoort voor 10 grondwatermonsters uit het studiegebied, in 4 stappen.

2.4 Resultaten herkomstbepaling

De watersoort kon voldoende betrouwbaar worden vastgesteld in 2241 van de 3560 grondwatermonsters. De resterende 1319 monsters hadden te kampen met te weinig data (Rel_x te laag) of teveel menging van verschillende watersoorten (geen dominantie, zodat D_x <60%).

De gemiddelde kwaliteit in de waarnemingsfilters is in Tabel 2-2 gerubriceerd. De waterkwaliteit vertoont een logisch patroon:

- De laagste chloride concentraties voor oorspronkelijk grondwater (V1, V2, F), significant hogere concentraties in antropogeen beïnvloed grondwater (VA, VU, R, FA, FU) en de hoogste concentraties in diep brak/ zout grondwater (B1, B2).
- De maaiveld hoogte (LS) en filterdiepte (UpFilter) laten zien dat het antropogeen beïnvloedde water van de Veluwe (VA, VU) veel dichter bij maaiveld bevindt dan het oorspronkelijke grondwater op de Veluwe (V1, V2). Een vergelijkbaar patroon bestaat op de vloedvlakten: Het antropogeen beïnvloedde grondwater (FA, FU, R) zit hoger dan oorspronkelijk grondwater (F).
- Opvallend genoeg worden OMP's typisch voor de Rijn (OMP-R) ook regelmatig aangetroffen in grondwater afkomstig van de vloedvlakten (FA, FU). Vermoedelijk door inlaat van gebiedsvreemd water in de polders.

De winputten leveren het volgende interessante resultaat: Heteren, Zetten en Wageningse Berg zijn puur en alleen V1, Oosterbeek bevat deels V1 en deels mengwater (niet-geclassificeerd), Fikkersdries kent 5 soorten (V1, V2, R, F, FA), en ir. Sijmons kent er 6 (V1, V2, R, F, FA en FU). Dit is in lijn met de samenstelling van de winputten: Sijmons. Fikkersdries en Oosterbeek hebben hogere concentraties Chloride en OMP door antropogene invloeden.

Tabel 2-2 Gemiddelde samenstelling van de onderscheiden 10 watersoorten in het studiegebied voor waarnemingsfilters (alle metingen) en winputten (in periode 2010-2018). Een waarnemingsfilter kan in de loop van de tijd verschillende watertypen bevatten.

Waarnemings-filters

Water Type	Cl mg/l	SO4/Cl -	HCO3 mg/l	NO3 mg/l	pH -	Ca mg/l	B µg/l	Li µg/l	AOX µg/l	OMP-R µg/l	OMP-U µg/l	OMP-A µg/l	18O ‰SMOW	LS mNAP	UpFilter mNAP
V1	8	0.8	121	0.4	7.9	31	30	2.4	3.97	0.00	0.00	0.00		18	-61
V2	8	1.3	302	0.4	7.6	80	50	5.3	46.19	0.00	0.00	0.00		9	-38
VA	31	2.5	58	45.7	6.5	40	38	2.7	4.88	0.00	0.03	0.12		36	3
VU	26	2.2	63	48.1	6.9	39	194	4.8	7.86	0.00	1.42	0.00		39	5
R	46	0.8	311	1.4	7.1	97	41	1.8	10.01	0.14	0.27	0.11		13	-8
F	29	1.6	356	2.2	7.3	115	31	5.0	8.61	0.00	0.00	0.00		10	-23
FA	65	1.1	400	10.1	7.3	136	12	2.9	8.52	0.10	0.01	0.16		10	-8
FU	55	1.5	515	1.2	7.2	155	64	6.6	20.17	0.00	3.70	0.00		10	-10
B1	453	0.0	326	0.5	8.1	32	281	49.6			0.00			12	-161
B2	1903	0.0	326	0.6	7.9	91	272	89.1	180		0.00	0.00		11	-170
Classified															
Total															

Winputten (2010-2018)

Winning	Samples	Cl mg/l	SO4/Cl -	HCO3 mg/l	NO3 mg/l	pH -	Ca mg/l	B µg/l	Li µg/l	AOX µg/l	OMP-R µg/l	OMP-U µg/l	OMP-A µg/l	18O ‰SMOW	LS mNAP	UpFilter mNAP
FIK	109	15	0.8	155	0.5	7.8	49	6	1.2		0.04		0.05		8	-37
HEM	39	6	0.8	92	0.5	8.1	27	5	0.6		0.00	0.00	0.00		7	-33
OOS	72	11	1.2	89	3.8	7.2	29	5	1.8		0.00	0.04	0.00		14	-41
SIJM	98	26	0.9	266	0.5	7.6	77	40	5.4		0.00	0.08	0.07		11	-32
WAG	120	6	1.4	93	0.5	8.0	28	6	0.7						15	-43
ZET	67	6	1.4	109	0.5	8.0	33	6	0.6		0.00	0.00	0.00		8	-46
Classified	505	in period 2010-2018														
Total	1863	incl. other dates														

2.5 Werkwijze: ouderdomsbepaling

De ouderdom van grondwatermonsters (t [jaar]) is gedefinieerd als de tijd verstreken sinds infiltratie (aan maaiveld) t/m het moment van bemonstering. Op verschillende manieren is getracht de grondwaterouderdom te bepalen, namelijk via:

- Natuurlijke isotopen (in dit onderzoek ^{3}H tritium en ^{14}C).
- Hydrochemische inschatting op basis van het watertype of de significante aanwezigheid van specifieke verontreinigende bestanddelen (OMP, NO3, Cl, K) die vanaf een bepaald jaar gebruikt worden.

2.5.1 Inschatting via natuurlijke isotopen

Radioactieve isotopen van waterstof (^{3}H, tritium, T½ = 12.32 j) en Koolstof (^{14}C, T½ = 5730 j) leveren dateringsmogelijkheden op, echter met vele complicaties (Stuyfzand 1994; Mook (ed) 2000; Appelo & Postma 2005). Om het simpel te houden en breed toepasbaar op grote datasets, is voor de tritium vertaling naar ouderdom het volgende algoritme gehanteerd:

als ^{3}H < 5 TU, dan $t^{3}H$ > (anal.jaar – 1953), anders $t^{3}H$ < (anal.jaar – 1953) [eq. 2-5]

De vertaling van ^{14}C data naar ouderdommen is zeer complex, controversieel en kent vele varianten. Echter, relatief eenvoudig is de volgende verdunningsmethode, gebaseerd op ^{13}C als maat voor de reactie van biogeen koolzuur (CO2) met kalk (CaCO3), waarbij men veronderstelt dat (i) alle CO2 stamt van oxiderende of respirerende organische stof (met $\delta^{13}C$ = –25 ‰ PDB) en (ii) alle C van kalk 'dood' is (met ^{14}C = 0 pmc) en met ^{13}C = +1 ‰ PDB:

$$t_{14C,13C,B} = t_A - 8270 \ln \frac{(^{14}C)_B(\delta^{13}C)_A}{(^{14}C)_A(\delta^{13}C+0.5)_B} \quad \text{[eq. 2-6]}$$

waarin: $t_{14C,13C,B}$ = berekende ouderdom op basis van 14C en 13C op punt B (stroomafwaarts van A) [j];
t_B = ouderdom op punt A (stroomopwaarts van B, b.v. bovenste paar meter grondwater) [j];
$^{14}C_A$, $^{14}C_B$ = koolstof-14 activiteit gemeten op resp. de punten A en B [pmc];
$\delta^{13}C_A$, $\delta^{13}C_B$ = koolstof-13 concentratie gemeten op resp. de punten A en B [‰ PDB].

De tweede verdunningsmethode baseert zich op de verdunnende werking in geval van een toename van opgelost totaal anorganische koolstof (TIC), waarbij alweer CO2 en kalk de hoofdrol spelen:

$$t_{14C,TIC,B} = t_A - 8270 \ln \frac{(^{14}C\ TIC)_B}{(^{14}C\ TIC)_A} \quad \text{[eq. 2-7]}$$

waarin: TIC_A , TIC_B = CO2 + H2CO3 + HCO3- + CO32- op resp. meetpunten A en B [mmol/L].

De dataset van Van Kessel (2002), met metingen van ondiep tot zeer diep bij P.S. Hoenderloo (zie Tabel 2-3), is gebruikt als testset voor bepaling van de ouderdom via ^{14}C. Deze test is van groot belang, omdat er ten zuiden van de Lek onder Oosterbeek en Arnhem alsmede in een raai van Ede naar P.S. Wageningen ^{14}C analyses voorhanden zijn, die een goede interpretatie verdienen. Het is immers een belangrijke vraag, in het kader van dit onderzoek, of een ^{14}C-waarde van b.v. 30 pmc nu duidt op een ouderdom van b.v. 1.000 of 10.000 jaar.

Uit Tabel 2-3 kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- De ^{14}C analyses zonder verdunningscorrectie leveren logischerwijze veel te hoge ouderdommen op, omdat er geen rekening is gehouden met oplossing van dode kalk. Kalkoplossing is zichtbaar aan de toename van TIC èn Ca (N.B.: de Ca-afname op grote diepte getuigt van kationuitwisseling tgv verzoeting);
- De ^{14}C analyses met ^{13}C verdunningscorrectie komen goed overeen met die van Van Kessel. Zij leveren echter nog steeds te hoge ouderdommen op, vooral waar de berekende ouderdom > 15.000 jaar bedraagt. Water met dergelijke ouderdom zou tijdens de ijstijd geïnfiltreerd moeten zijn, maar dan zou de ^{18}O concentratie lager moeten zijn (richting -9 à -10 ‰) dan de meetwaarde;
- Niet alle CO2 uit organische stof heeft een $\delta^{13}C$ = −25 ‰ PDB. Bij methaanvorming ontstaat sterk verrijkt CO2 met $\delta^{13}C$ oplopend tot +30 ‰ PDB. In kleine hoeveelheden van dit verrijkte CO2 neemt de $\delta^{13}C$-waarde van het watermonster significant toe, boven −12 indien kalk de CO2 neutraliseert. Dit verklaart waarschijnlijk de hoge ^{13}C-waarden van −7 tot −9 in enkele monsters.
- Voor de ^{14}C analyses met TIC verdunningscorrectie geldt dat het niet lukt om ouderdommen te berekenen die goed matchen met die van Van Kessel, m.u.v. de monsters met uiterst lage ^{14}C. Kennelijk zijn er variabele TIC concentraties verondersteld als input en/of is ook $^{14}C_A$ gevarieerd.
- Enkele meetpunten vertonen lekkage van jong tritiumhoudend water. Hiervoor dient gecorrigeerd te worden, b.v. via HCO_3.
- Meetpunt 33C.55-7 dient gecorrigeerd te worden voor bijmenging van diep, zeer oud (^{14}C = 0 pmc), brak/zout grondwater.
- Van boring 33C.055 en 33D.125 zijn meerdere chemische analyses gevonden in Dinoloket en Meinardi (1974, 1986), vooral m.b.t. 1969/1984. Er zijn overigens leerzame andere ^{14}C analyses van grondwater van de Veluwe te vinden in Romijn 1974 en in een dossier ontvangen van Van Kessel. Van speciaal belang bij de interpretatie van de TIC-verdunningsmethode zijn de TIC en Ca concentraties van het bovenste grondwater. Die lijken in de dataset van Van Kessel aan de lage kant.

Tabel 2-3. De Van Kessel dataset met isotopen en aanvullende analyses rond P.S. Hoenderloo, incl. interpretatie. De geïnterpreteerde ouderdom is bepaald op basis van, van links naar rechts: een hydrologische analytische benadering (Bijlage II), de ^{14}C methode zonder enige verdunningscorrectie, die met de ^{13}C-verdunningscorrectie, die met de TIC-verdunningscorrectie, en die met de ^{13}C-verdunningscorrectie plus aanname dat 14C een retardatiefactor R kent (R=2).

Monit. well	LS	Depth	GWT	Date	18O	2H	13C	14C	3H	TIC	Ca	Age [year]				
	m+NAP				‰ SMOW		‰ PDB	%	TU	mmol/L	mmol/L	Hydro.1	no corr	via 13C	via TIC	R=2,13C
33D.125-1	52.5	38.4	38.5	1991	-8.09		-22.15	107.72	25	0.50	0.10	5	0	<38	<38	<38
33D.125-2	52.5	18.3	38.5	1991	-7.99		-21.04	90.77	53.6	0.46	0.02	21	801	<38	<38	<38
33D.125-3	52.5	-52.5	38.5	1991	-8.01	-51.5	-16.03	68.1	8.9	0.82	0.45	86	3177	<38	<38	<38
33D.125-4	52.5	-138.5	38.5	1991	-7.75		-12.44	34.09	0	1.81	0.80	3985	8900	2789	-1698	1414
33D.125-5	52.5	-158.5	38.5	1991	-7.52		-13.79	47.02	14.3	1.96	0.47	4654	6241	<38	<38	<38
33D.125-7	52.5	-239	38.5	1991	-6.77	-41.7	-8.81	3.2	0.1	3.24	0.30	8482	28466	19357	13019	9698
33C.76-1	39.6	20	24.6	1991	-7.96	-47.8	-17.86	107.01	21.4	0.92	0.47	9	-560	<38	<38	<38
33C.76-2	39.6	-19	24.6	1991	-7.32	-51.1	-15.5	57.1	6.4	1.25	0.62	41	4634	<38	<38	<38
33C.76-3	39.6	-58	24.6	1991	-7.91	-52.2	-11.25	36.57	0.3	0.64	0.35	78	8319	1340	6309	690
33C.76-4	39.6	-149	24.6	1991	-7.37	-47.2	-14.28	41.61	0.7	2.72	1.07	3878	7251	2325	-6734	1183
33C.76-5	39.6	-168	24.6	1991	-7.39	-48.6	-14.31	41.56	0	2.83	1.20	4500	7261	2353	-7047	1197
33C.55-3	61.7	-128.3	38.5	1991	-7.55	-48.1	-13.59	46.26	0	1.67	0.67	180	6375	1024	-3581	532
33C.55-4	61.7	-146.3	38.5	1991	-7.55	-52.4	-12.76	34.59	0.2	2.43	1.05	4240	8779	2887	-4291	1463
33C.55-PF	61.7	-208.3	38.5	1984	-7.12		-13.45	36.2	0.5	2.69	1.12	6733	8403	2963	-5493	1502
33C.55-7	61.7	-322.3	38.5	1991	-7.82	-49.2	-22.51	8.73	1.6	9.39	2.37	22599	20166	19112	-4069	9576
33C.66-4	60	-160	38	1991	-7.59		-13.15	31.42	0	2.76	1.10	4692	9574	3941	-4521	1990
33C.72-2	67.4	-241.6	38	1991	-6.96	-43.1	-7.9	2.24	0.1	3.70	0.25	8628	31415	21347	14875	10694
33C.72-3	67.4	-266.6	38	1991	-6.96	-41.9	-7.46	1.12	0.1	4.21	0.17	10607	37148	26573	19544	13306
33C.72-4	67.4	-286.6	38	1991	-7.09	-44.4	-7.59	1.13	0.4	5.69	0.12	12840	37074	26652	16987	13346
33C.74-1	58.8	-126.2	38	1991	-7.66	-49.4	-14.04	45.04	0.6	1.99	0.80	176	6596	1525	-4815	782
33C.74-2	58.8	-151.2	38	1991	-7.67		-12.25	34.51	0	2.52	1.05	4386	8799	2555	-4566	1297
33C.74-3	58.8	-186.2	38	1991	-7.26		-14.02	41.1	0.4	2.73	1.25	5702	7353	2270	-6663	1155
33C.74-4	58.8	-202.2	38	1991	-7.31		-13.84	36.32	0	2.71	1.35	6413	8376	3181	-5571	1611

De conclusie is, dat er nog aanvullend gesleuteld moet worden aan de data en aan de interpretatiemethoden. Niettemin zijn enkele resultaten goed in lijn met de hydrologische berekeningen (die echter ook nog aanpassingen zullen behoeven). Gekozen is voor de volgende praktische benadering:

Als ^{14}C = bepaald, dan als ^{14}C >50, t<500,anders t = 13000-250^{14}C* [eq. 2-8]

2.5.2 Hydrochemische inschatting

De aanwezigheid van specifieke verontreinigende bestanddelen in grondwater boven een bepaalde drempelwaarde kan in principe gerelateerd worden aan een bepaald beginjaar van verhoogde input via infiltrerend regenwater. Zo krijgen we de volgende algemene vertaalslag in ouderdom t_X:

als X > Y mg/L, dan t_x < (anal.jaar – startjaar), anders t_x > (anal.jaar – startjaar) [eq. 2-9]

waarin X = analyseresultaat contaminant;

Y = drempelwaarde voor contaminant X; startjaar = 1e jaar waarop verhoogde input (boven drempelwaarde) plaatsvond;.

Dit algoritme is toegepast op de volgende parameters, met tussen haakjes de drempelwaarde en het startjaar: Som OMP (OMP_R+OMP_A+OMP_U >0.01 µg/L; 1950), NO_3 (>2 mg/L; 1935), SO_4/Cl (>1; 1940), Cl (>15 mg/L, 1950), K (>2, 1935). In geval van K is rekening gehouden met retardatie tijdens bodempassage door sorptie. Dit gebeurt door (anal.jaar – startjaar) te delen door 3 (= aangenomen retardatiefactor K voor studiegebied). Extra is nog toegevoegd de watersoort: indien behorende tot het verontreinigde type (V_A, V_U, R, F_A, F_U) dan is de leeftijd < (anal.jaar – 1935) aangenomen. Eigenlijk zou voor Cl en K nog gecorrigeerd moeten worden voor zeer oud grondwater (Type B1, B2).

Afhankelijk van de beschikbare data zijn maximaal 6 hydrochemische schattingen van de ouderdom beschikbaar. De beste schatting wordt gekozen op basis van de beschikbaarheid, in volgorde van keuze (eerste keuze Type; laatste keuze K):

Type > OMPs > NO3 > SO4/Cl > Cl > K [eq. 2-10]

2.6 Resultaten ouderdomsbepaling

Tabel 2-4 toont enkele resultaten van de isotopenmetingen en hydrochemische ouderdomsbepaling. De ^{14}C metingen in de Overbetuwe (n=11) duiden op zeer oud grondwater tussen de 3500 en 10.000 jaar. Vergelijking met hydrochemische gegevens leert dat deze waarnemingsputten het beste geclassificeerd worden als type V1 (schoon Veluwewater) wat duidt op oud grondwater (ver) voor 1935; niet in tegenspraak dus met de isotopen. Wel geldt als kanttekening dat er meestal te weinig hydrochemische parameters zijn gemeten waardoor de betrouwbaarheid eigenlijk te laag is (C_x<60%). De hydrochemische schatting op basis van alleen K en SO4/Cl leidt in een aantal locaties juist tot een zeer jonge leeftijdsinschatting, maar deze wordt niet betrouwbaar geacht.

De ^{3}H leeftijd in de Overbetuwe (n=2) zijn ook in lijn met de hydrochemische bepalingen:

- B40B0369 filter1: ^{3}H = 39 jaar; Hydrochemie = <55 jaar.
- B40B0369 filter3: ^{3}H = 57 jaar; Hydrochemie = <56 jaar.

Wat opvalt is dat de verschillende hydrochemische methoden tot tegengestelde conclusies kunnen leiden. De correlatie tussen “Type” en OMP is nog redelijk acceptabel (R^2=0,68) maar voor de overige methoden is het verschil vrij groot (NO3 R^2=0,37, R^2=0,26, CL R^2=0,64, K R^2=0,01). Dit is ook logisch aangezien bijvoorbeeld NO_3 uitspoeling onderhevig kan zijn aan denitrificatie, zodat aan afwezigheid eigenlijk geen conclusies verbonden kunnen worden (en aan aanwezigheid juist wel).

Tabel 2-4. Output voorbeeld van de 6 hydrochemische schattingen van de ouderdom. Het jaar waarop de concentratie stapsgewijs verondersteld is te stijgen en de drempelwaarden staan in de gele vlakken vermeld. Een negatief getal betekent “kleiner dan” (dus jonger grondwater), een positief getal betekent “groter dan” (dus ouder grondwater). Via een voorkeursvolgorde wordt een keuze gemaakt uit de ‘chemische’ leeftijd. Deze wordt in de rechter kolom vergeleken met de leeftijd volgens isotopen.

Sampling point			Age hydrochemistry							Age Isotope	
Well	filter	Result	Type	OMPs	NO3	SO4/Cl	Cl	K	Choice	3H	14C
	nr		1935	1950	1935	1940	1950	1935	Chem.	1953	
			type	0.01	2	1	15	2		5	calc
B40A0337	1	V1	31			26	16		31		
B40A0370	1	FA	-35		-35	-30	-20	-12	-35		
B40A0397	1	V1	38		38	33	23	-13	38		
B40A0397	1	V1	38		38	-33	23	-13	38		
B40A0397	2	V1	38			33	23	13	38		
B40A0397	2	V1	38			33	23	13	38		
B40A0397	2							16	16		7200
B40A0397	3	V1	38			33	23	-13	38		
B40A0397	3	V1	38			-33	23	-13	38		
B40A0397	3							-16	-16		10025

2.7 Aggregatie herkomst en ouderdomsbepaling per meetpunt

Uit voorgaande paragraaf blijkt dat de hydrochemische ouderdomsbepaling tot plausibele resultaten leidt. Maar dat voorzichtigheid geboden is bij interpretatie van samples met weinig parameters. Om dit probleem te ondervangen is iedere hydrochemische leeftijdsschatting voorzien van een “rapportcijfer”. Indien er een schatting is op basis van Type dan is de score altijd 100%. Bij andere methoden wordt 17% toegekend voor iedere schattingsmethode die in lijn is met de geschatte leeftijd (dus ook jonger of ouder dan) en een “boete” van -4% wanneer de leeftijd tegengesteld is. Schattingen met een rapportcijfer beneden de 29% worden afgekeurd. In de praktijk zijn dus minstens twee vergelijkbare leeftijdsschattingen nodig.

Om de gegevens te kunnen vergelijken met het MORIA Model, zijn ze per tijdvak geaggregeerd. Hiertoe is per meetpunt bepaald welk watertype het vaakste voorkwam. Ook is bepaald of er meer metingen zijn met een “ouder dan” criterium (maximale leeftijd) of een “jonger dan” criterium (minimale leeftijd). Als een meerderheid van de metingen een “ouder dan” criterium heeft, dan is het gemiddelde van alle “ouder dan” metingen genomen als leeftijd voor het meetpunt; en idem voor “jonger dan”.

3 Stroombaanberekeningen MORIA-model

In dit hoofdstuk worden de werkwijze van de stroombaanberekeningen beschreven. De resultaten worden toegelicht aan de hand van de Fikkersdries. Kaarten van de overige winningen zijn opgenomen in Bijlage II.

3.1 Werkwijze stroombaanberekeningen

3.1.1 Historische reconstructie

In de Overbetuwe en Veluwe zijn afgelopen decennia vele hydrologische veranderingen opgetreden door ontwatering en toename van grondwaterwinningen. Ook het landgebruik is aangepast. Met name voor ouder grondwater is het dan ook noodzakelijk om de historische grondwaterstroming juist te berekenen door een historische reconstructie van het grondwatermodel MORIA.

Het grondwatermodel is voor deze historische reconstructie opgedeeld in vijf tijdsvakken, namelijk: 2018 – 2005, 2005 – 1990, 1990 – 1970, 1970 – 1950 en 1950–50 BC. Er is dus circa 2000 jaar teruggerekend. Deze perioden zijn zodanig gekozen dat zij goed samenvallen met veranderingen in onttrekkingsdebieten, aanleg van de stuwen in de Rijn en de geochemische samenstelling van het grondwater. Alle tijdvakken zijn stationair doorgerekend.

Invoerparameters die verschillen tussen de tijdvakken zijn: de drinkwaterwinningen, overige onttrekkingen, rivierstanden, buisdrainage (drain-conductance in iMODFLOW), oppervlaktewaterpeilen en waterlopen (surface water-conductance in iMODFLOW). De overige parameters zijn constant in de tijd genomen. In overleg met Vitens zijn de belangrijkste invoerparameters geselecteerd, deze zijn weergegeven in Tabel 3-1. Voor de perioden voor 1990 zijn de overige onttrekkingen uitgezet.

Voor 1990 is aangenomen dat binnen een winveld alle winputten evenveel onttrekken. Er is dus geen rekening mee gehouden dat bepaalde putten tussentijds zijn bijgeboord of vervallen. De herkomstgebieden per winput zullen dus globaal gezien kloppen maar her-en-der afwijken van de praktijk door verschillende belasting (draaiuren) of pompcapaciteit. Na 1990 is de huidige verdeling van de windebieten aangehouden.

Voor de historische constructie is gebruik gemaakt van onttrekkingsgegevens van Vitens, de historische riviernormalen van Rijkswaterstaat en Verdroging van Compendium voor de Leefomgeving.

Tabel 3-1 De belangrijkste invoerparameters voor de vijf historische tijdvakken

Tijdperiode	Winningen Mm³/jaar		Rivierstand cm+NAP	Buis-drainage	Oppervlakte-waterpeil
Voor 1950*	Alle winningen: 0		Nijmegen: 852 Dodewaard: 654 Tiel: 489 Arnhem: 853 Lexkesveer: 634 Grebbe: 543 Remmerden:	Geen	Huidig peil +30 cm -50% conductance
1950 - 1970*	Edese Bos: 2,8 *** Fikkersdries: 0 Hemmen: 0 La Cabine: 6,0 Oosterbeek: 0,5	Sijmons: 0 Wageningen: 1,5 Zetten: 0 Parenco: 0 Overige: 0	Nijmegen: 852 Dodewaard: 654 Tiel: 489 Arnhem: 853 Lexkesveer: 634 Grebbe: 543	Kwart van de huidig buis-drainage MORIA	Huidig peil +30 cm -25% conductance
1970 - 1990**	Edese Bos: 5,0 *** Fikkersdries: 2,2 Hemmen: 0 La Cabine: 9,5 Oosterbeek: 0,8	Sijmons: 0 Wageningen: 2,0 Zetten: 0 Parenco: 0 Overige: 0	Nijmegen: 810 Dodewaard: 620 Tiel: 485 Arnhem: 845 Driel boven: 810 Driel beneden: 657 Lexkesveer: 624 Grebbe: 602	Helft van de huidig buis-drainage MORIA	Huidig peil +15 cm
1990 - 2005	Edese Bos: 5,5 Fikkersdries: 12 Hemmen: 0 La Cabine: 9,5 Oosterbeek: 2	Sijmons: 3,0 Wageningen: 3,1 Zetten: 0 Parenco: 5 Overige: MORIA ****	Gemiddelde berekenen met huidige ISG	Huidige Buis-drainage MORIA	Huidige praktijk peilen
Vanaf 2005	Edese Bos: 3,3 Fikkersdries: 13 Hemmen: 1,5 La Cabine: 9,5 Oosterbeek: 1,8	Sijmons: 5,0 Wageningen: 3,1 Zetten: 3,9 Parenco: 4,5 Overige: MORIA ****	Gemiddelde berekenen met huidige ISG	Huidige buis-drainage MORIA	Huidige praktijk peilen

** op basis van riviernormalen tussen 1931 - 1940 en 1951 - 1960*

*** op basis van riviernormalen tussen 1971 - 1980*

**** Ede is op basis van huidige meetgegevens, historisch grafiek vanaf 1985 en daarvoor vergelijkbaar patroon als Wageningen en La Cabine.*

***** Overige onttrekkingen overgenomen uit het MORIA model 2018 (van Dooren et al 2018)*

3.1.2 Stroombaanberekeningen

Met het aangepaste MORIA-model zijn vervolgens stroombaanberekeningen terug in de tijd uitgevoerd (backward tracing) tot het moment dat de stroombaan stopt aan het maaiveld of een infiltratiepunt of tot de maximale rekentijd.

Als startpunt voor de berekeningen zijn zowel winning als peilbuizen gebruikt. Bij de winningen zijn meerdere stroombanen per put gebruikt om het gehele intrekgebied te bepalen. Deze stroombanen zijn zowel in de ruimte rondom de put verspreid als in de diepte over de lengte van het filter (per 5 meter filter 100 startpunten voor de stroombanen).

De berekeningen kunnen in principe herhaald worden voor alle tijdstippen waarop metingen beschikbaar zijn in de ijkset. Maar om het overzichtelijk te houden is gekozen om vanaf een aantal tijdvakken terug te rekenen, namelijk: 2018, 2005, 1990, 1970 en 1950. Vanaf 1950 is 2000 steeds jaar teruggerekend.

De eindpunten van de berekeningen die gestart zijn in 2018 en eindigen in 2005, zijn als startpunten gebruikt voor de berekeningen voor het voorgaande tijdvak (2005 tot 1990). Deze procedure is steeds herhaald tot en met het laatste tijdvak (1950). Vervolgens is de "MORIA leeftijd" van het water is bepaald door de start- en eindtijd met elkaar te vergelijken. Om het "MORIA-landgebruik" te bepalen (zie stap 3), zijn per stroombaan ook de coördinaten van de eindpunten geregistreerd.

De berekeningen zijn uitgevoerd met iMODPATH.

3.1.3 Nabewerking stroombaanberekeningen

Helaas was niet mogelijk om voor elke peilbuis en/of winning een leeftijd volgens het model af te leiden. Deels wordt dit veroorzaakt doordat stroombanen soms verdwenen of crashten in iMODPATH tijdens de berekende periodes. De reden hiervan is onbekend. Een aantal stroombanen stopte midden in een tijdstap, om vervolgens in een voorgaande tijdvak weer verder terug te stromen. Indien de stroombanen nabij maaiveld (>0m NAP) stopten, is aangenomen dat de berekening in voorgaande tijdvakken overbodig was. Bij stroombanen die beneden 0 mNAP stopten, is steeds de langste reistijd aangehouden. Volledig gecrashte stroombanen zijn in de analyse niet meegenomen.

Een aantal winputten staat erg dicht op elkaar liggen. De zones van waaruit de stroombanen gestart zijn kunnen hierdoor overlappen, waardoor het niet altijd mogelijk was de juiste stroombanen aan de juiste winput toe te kennen. Dit heeft overigens alleen consequenties voor de analyse per winput maar niet op winveldniveau.

Een groot deel van de stroombanen eindigde aan de noordrand van het model midden op de Veluwe. Voor deze stroombanen is de reistijd naar maaiveld geschat via een postprocessing stap met een analytische formule beschreven in Bijlage II. Dit overigens zonder rekening te houden met factor f. Als herkomstgebied is "Veluwe" aangehouden. Een ander deel van de stroombanen had na de rekenperiode nog niet het maaiveld of de modelrand bereikt. Hier is geen reistijdschatting gemaakt, omdat volgens de stroombaanberekeningen de reistijden in de Overbetuwe veel langer zijn dan berekend met de analytische formule. Als herkomst gebied is "onbekend" aangehouden, behalve voor stroombanen die de Veluwe al hadden bereikt.

3.1.4 Classificatie landgebruik in herkomstgebied

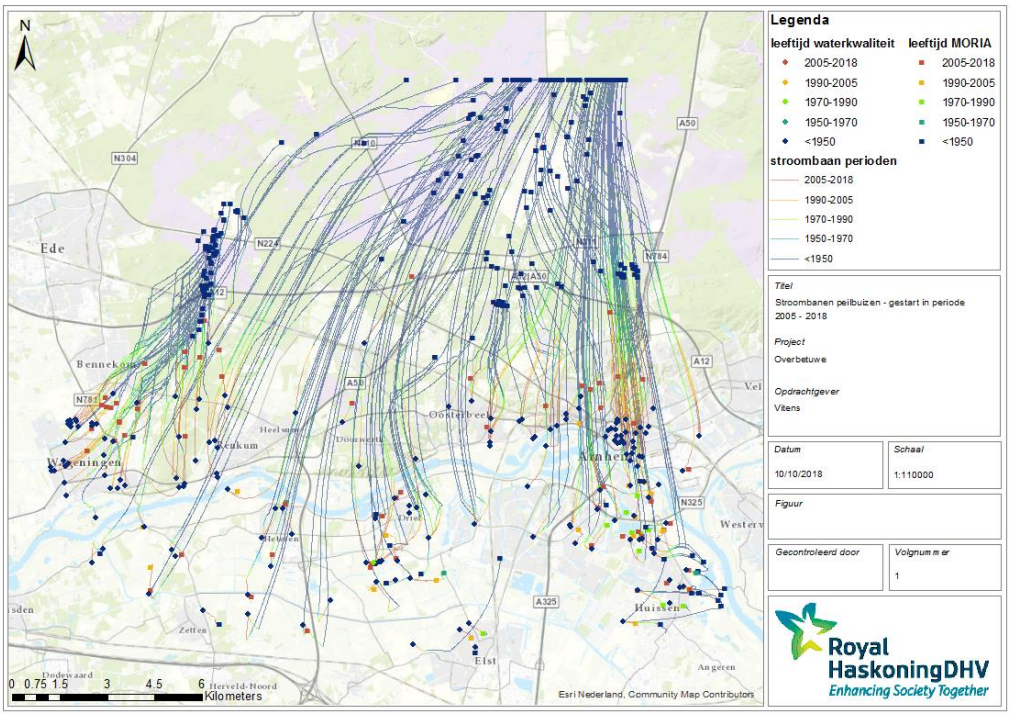
Het herkomstgebied van de stroombaanberekeningen bepaald door het landgebruik ter plaatse van het eindpunt van de stroombaan aan maaiveld te classificeren op basis van het Bestand Bodemgebruik (CBS, BG2012). Voor winputten is steeds met meerdere stroombanen gerekend en is per winput de procentuele verdeling van het landgebruik van alle eindpunten bepaald. Bij deze verdeling is water als 'beïnvloed door stad of landbouw' geclassificeerd als minimaal 30% van de eindpunten zich in stedelijk[1] of agrarisch gebied bevinden. Water is geclassificeerd als 'Rijnwater' indien meer dan de helft van de eindpunten afkomstig was uit binnenwater. Verder is gekeken of het eindpunt van de stroombaan (of in het geval van meer stroombanen meer dan de helft) zich op de Veluwe bevindt of daarbuiten.

[1] Categorieën Bebouwing, Verkeer, Semi-bebouwd en Recreatie in BG2012

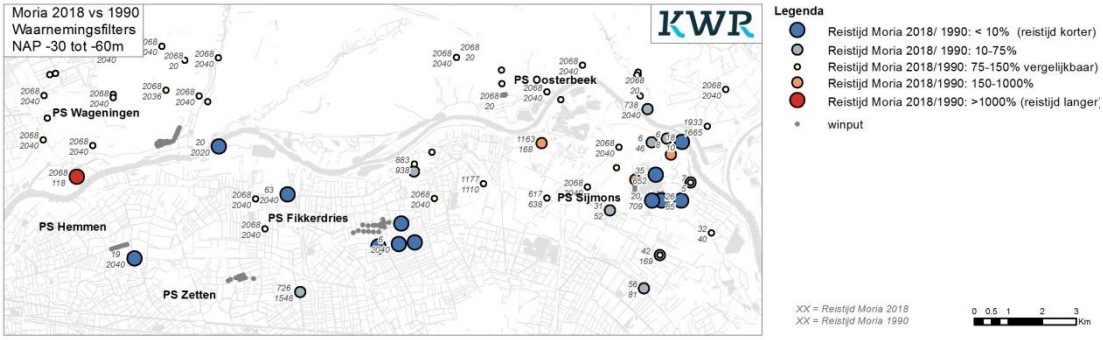
3.2 Resultaten stroombaanberekeningen in peilbuizen

Figuur 5-1 toont de stroombanen teruggerekend vanaf alle waarnemingsfilters met waterkwaliteitsgegevens. Stippen geven hierin de startpunten van de stroombanen weer met in kleur de bijbehorende leeftijd op basis van de hydrochemische gegevens in de periode 1990-2018 (NB: Bij de beoordeling in Hoofdstuk 4 zijn de metingen in kortere perioden onderverdeeld). Deze stippen komen overeen met de locaties van peilbuizen en winningen. De vierkanten geven de eindpunten van de stroombanen weer: op deze locaties komen de stroombanen aan maaiveld. Een uitzondering hierop zijn de vierkanten in het noorden, die op dezelfde horizontale lijn liggen. Deze vierkanten liggen op de modelgrens, maar zijn nog niet aan maaiveld gekomen. Dit grondwater heeft dus een berekende leeftijd die groter is dan 2000 jaar. Verder geven de kleuren van de lijnen weer bij welk tijdvak de delen van de stroombanen horen.

De berekende reistijden vertonen over het algemeen een logisch beeld. Veel stroombanen van diepere waarnemingsfilters in de Overbetuwe zijn afkomstig van de Veluwe terwijl in enkele ondiepere waarnemingsfilters rondom de winningen het water in kortere tijd meer lokaal vanaf maaiveld toestroomt.



Figuur 3-1 Stroombanen vanaf waarnemingspunten teruggerekend vanaf 2018 (2068 jaar in totaal). De leeftijd waterkwaliteit (gekleurde rondjes) heeft betrekking op de periode waarin het water infiltreerd en is gebaseerd op alle metingen vanaf 1980. De leeftijd MORIA (kleur van de stroombanen) heeft betrekking op het tijdvak waarin de grondwaterstroming plaatsvindt.



Figuur 3-2 Vergelijking van de berekende reistijd met het MORIA model van 2018 en 1990 in waarnemingsfilters tussen NAP-30 en -60 m. De blauwe bollen betekent dat de reistijd in 2018 veel korter is dan in 1990. Rood betekent een toename van de reistijd.

3.3 Resultaten stroombaanberekeningen Fikkersdries

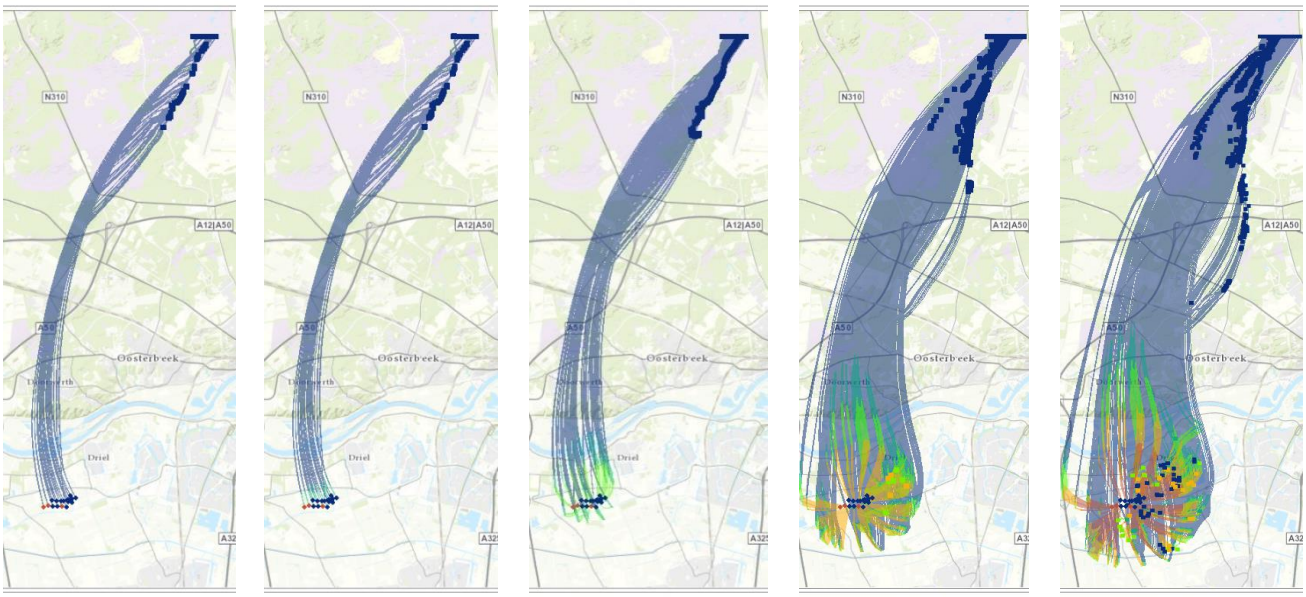
Figuur 3-3 geeft de stroombanen van de winning Fikkersdries, teruggerekend vanaf verschillende tijdstippen:

- De stroombanen voor de periode tot 1950 en 1970 zijn vergelijkbaar. De winning bij Fikkersdries was nog niet gerealiseerd en het grondwater ter plaatse van de huidige winputten was afkomstig van een smal gebied op de Veluwe.
- In de periode 1970-1990 is de winning in gebruik genomen met een beperkt debiet van 2.2 Mm3/jaar. Dit resulteert in een verbreding van de berekende baan met toestromend grondwater.
- De vergroting van het debiet na 1990 naar 12 Mm3/jaar heeft een zeer duidelijke invloed op het regionale stromingspatroon: het gebied rondom de winning van waaruit water wordt aangetrokken is nog breder. Daarnaast gaat de winning een aandeel jonger water aantrekken dat is geïnfiltreerd in de vloedvlakten van de Overbetuwe en wordt zeer oud water gewonnen afkomstig van het derde watervoerend pakket.

Uit de dwarsdoorsnede in figuur 4-6 blijkt dat de Rijn weinig interactie heeft gehad met het omliggende grondwater en (bijna) niet bijdraagt aan de winning. Maar bedacht moet worden dat de stroombanen rondom de Rijn horen bij het tijdvak voor 1950 toen de Overbetuwe nog slecht ontwaterd was en de winningen nog niet actief waren. Mogelijk dat de huidige stromingssituatie anders is; er is niet onderzocht of het aandeel Rijnwater in de winning in de toekomst zal toenemen.

De vergroting van het windebiet leidt overigens ook tot een duidelijke afname van de reistijd in waarnemingsfilters rondom met name de grote winningen Sijmons en Fikkersdries. Dit is weergegeven met de blauwe bollen in Figuur 3-2.

Voor stroombaanberekeningen in de overige winningen wordt verwezen naar Bijlage III.



Startjaar: 1950 *1970* *1990* *2005* *2018*

Figuur 3-3 Stroombanen voor de winning Fikkersdries teruggerekend vanaf verschillende startmomenten t/m 50 BC. Legenda: zie Figuur 3-1.

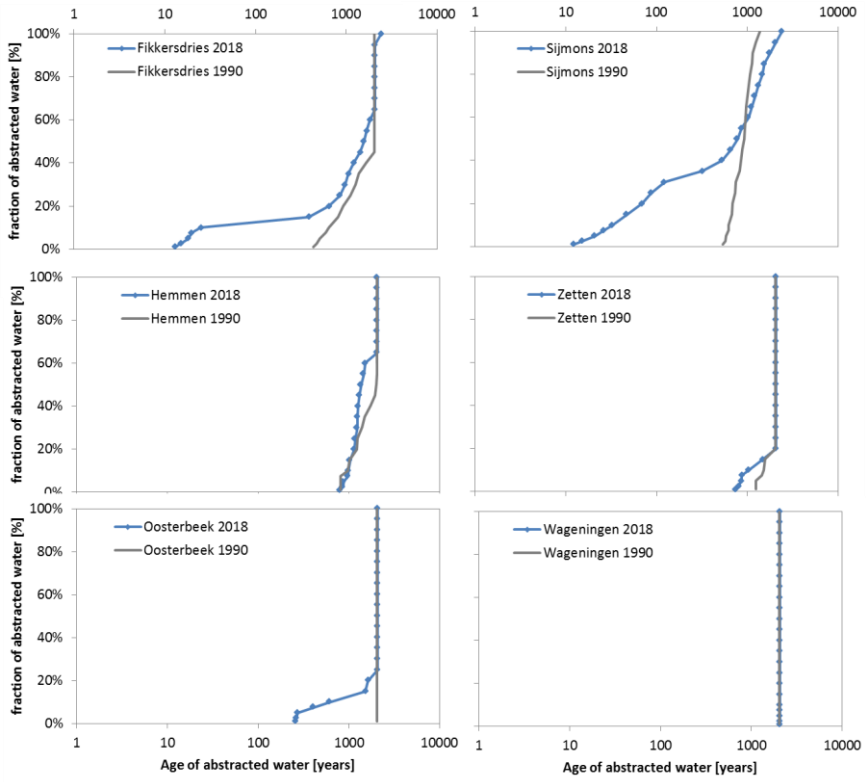
3.4 Hydrologische response curve

De hydrologisch response curve van de winningen in Figuur 3-4 vertoont opvallende verschillen. De winningen Hemmen, Zetten en Wageningen winnen in 2018 water met een minimale leeftijd van 1000 jaar. De winningen Fikkersdries en Sijmons bevatten ook een aanzienlijke jongere component met reistijden vanaf 10 jaar. De jongste stroombanen naar Oosterbeek zijn 250 jaar oud.

Verder valt op dat het aandeel jonger water in 2018 (blauwe lijn) in de winningen Fikkerdries, Sijmons en Oosterbeek aanzienlijk groter is dan in 1990 (grijze lijn). Deze toename van het aandeel jonger water is overigens in lijn met de langjarige veranderingen van de gezamenlijke ruwwaterkwaliteit in de winningen (Mendizabal & Stuyfzand 2009).

De uitgevoerde stroombaanberekeningen geven dus aan wat de herkomst is van het momenteel onttrokken grondwater. Dit wijkt enigszins af van de huidige grondwaterbeschermzones waarbij alleen gerekend wordt met het huidige onttrekingsregime. Het aandeel antropogeen beïnvloed grondwater zal komende jaren alleen nog maar verder toenemen.

NB: bovenstaande analyse bevat vermoedelijk een overschatting van de reistijd als gevolg van modelartefacten in de stroombaanberekeningen (zie hoofdstuk 5)



Figuur 3-4 Hydrologische responsecurve van de winningen in de Overbetuwe *NB: deze figuur bevat vermoedelijk een overschatting van de reistijd als gevolg van modelartefacten in de stroombaanberekeningen (zie hoofdstuk 5)*

4 Beoordeling

In dit hoofdstuk worden de stroombaanberekeningen volgens het MORIA-model vergeleken met de leeftijd en herkomst van het grondwater volgens hydrochemische gegevens. Eerst presenteren we de werkwijze en bevindingen voor het gehele gebied. Vervolgens beoordelen we de berekeningen per individuele winningen.

4.1 Werkwijze: Vergelijkingtabel en kaarten hydrochemie-MORIA

De hydrochemische leeftijd en bijbehorend landgebruik en de door het MORIA-model berekende leeftijd en landgebruik zijn samengevoegd in een database welke als digitale bijlage is meegeleverd met het rapport (zie Bijlage III.6).

De kaarten op navolgende pagina's visualiseren de verschillen en overeenkomsten tussen de hydrochemische gegevens en het MORIA model. Hierbij is steeds onderscheid gemaakt tussen drie verschillende diepte-intervallen: boven 0 mNAP omvat globaal de deklaag, NAP 0 tot -30m omvat globaal wvp1 en NAP-30 tot -60 omvat globaal wvp2. De winputten bevinden zich ook in wvp2 en zijn weergegeven op een separate kaart.

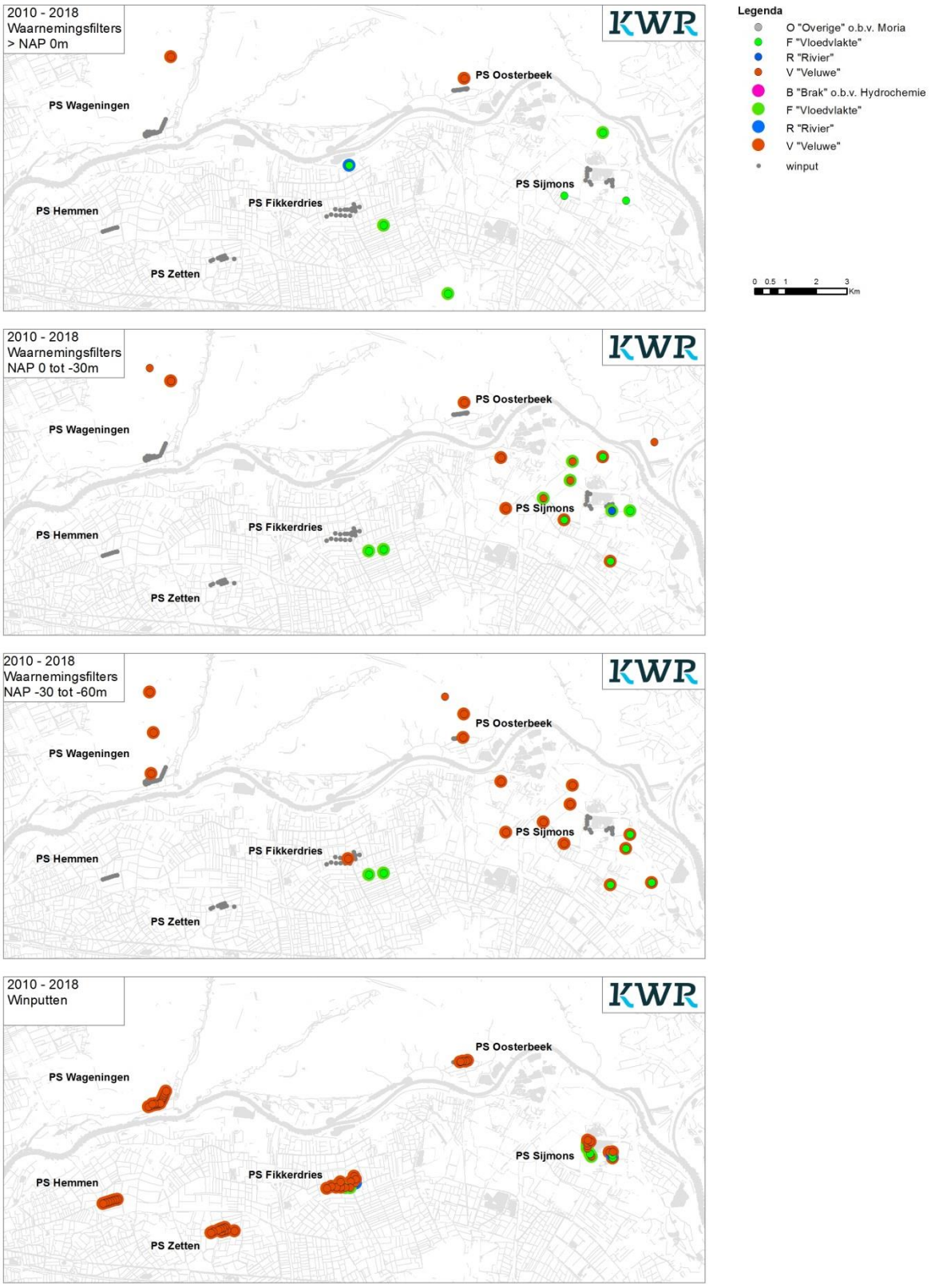
Voor de winningen is de hydrochemische leeftijd steeds vergeleken met de 10% snelste stroombanen. Dit omdat de drempelwaarden voor antropogeen beïnvloed grondwater al met een klein aandeel mengwater overschreden kunnen worden. Voor herkomst is wel steeds het dominante landgebruikstype bepaald aan het eindpunt van de stroombanen.

4.2 Vergelijking herkomstgebied 2010-2018

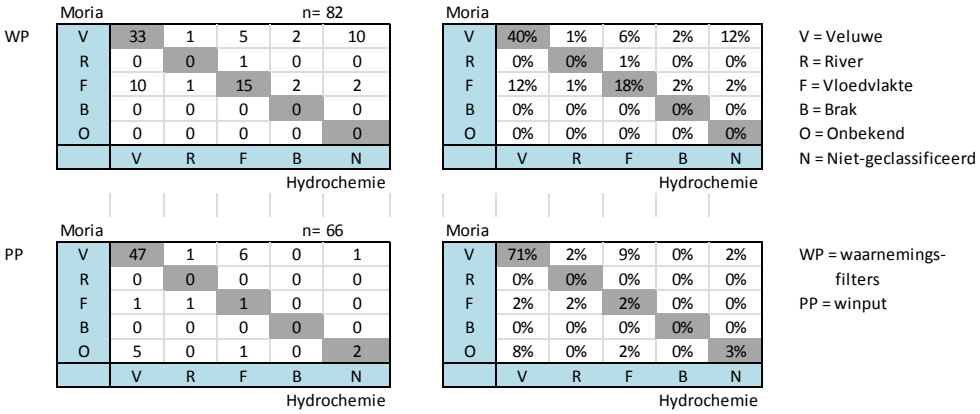
Figuur 4-1 vergelijkt het landgebruik in het herkomstgebied op basis van de hydrochemische gegevens met de stroombaanberekeningen. Volgens de hydrochemische gegevens bevatten de waarnemingsfilters in de deklaag in de Overbetuwe vloedvlaktewater (type F,FA,FU; grote groene bollen) en ten noorden van de Rijn Veluwewater (type V1,V2,VA,VU; grote oranje bollen). De meeste meetpunten in de Overbetuwe in WVP1 en WVP2 bevatten water afkomstig van de Veluwe, behalve op enkele plekken waar grondwater omlaag zijgt langs de Rijn en rondom winningen. De winputten zijn overwegend ook als Veluwewater geclassificeerd behalve enkele winputten in Sijmons en Fikkersdries met vloedvlaktewater en oeverinfiltraat. Overigens is hier in de praktijk vaak sprake van mengwater.

De herkomstgebieden van de stroombaanberekeningen in wvp1 komen overeen met de hydrochemische interpretatie. De waarnemingsfilters in wvp1 en wvp2 rondom de winning Sijmons en ook enkele winputten zelf vertonen duidelijke verschillen. Dit geldt ook voor enkele winputten op pompstation Fikkersdries die hydrochemische als vloedvlaktewater en Rivierwater zijn geclassificeerd terwijl ze volgens MORIA overwegend Veluwewater onttrekken.

De herkomstgebieden op basis van MORIA en hydrochemische gegevens zijn samengevat in Figuur 4-2. In 59% van de waarnemingsfilters wordt de herkomst correct voorspeld, 26% heeft een discrepantie in herkomstgebied en voor 15% is het landgebruik niet te classificeren. In de winputten wordt 73% correct voorspeld, 14 % afwijkend en in 15% is het landgebruik niet-geclassificeerd.



Figuur 4-1 Herkomstgebied op basis van de hydrochemische samenstelling (grote circels) uitgezet tegen het herkomstgebied Volgens MORIA (kleine, binnenste cirkels) voor de periode 2010-2018.



Figuur 4-2 Herkomstgebied op basis van de hydrochemische samenstelling in peilbuizen uitgezet tegen het herkomstgebied volgens MORIA. Alleen weergegeven zijn de waarnemingsfilters met voldoende gegevens voor een betrouwbare leeftijdsbepaling in de periode 2010-2018.

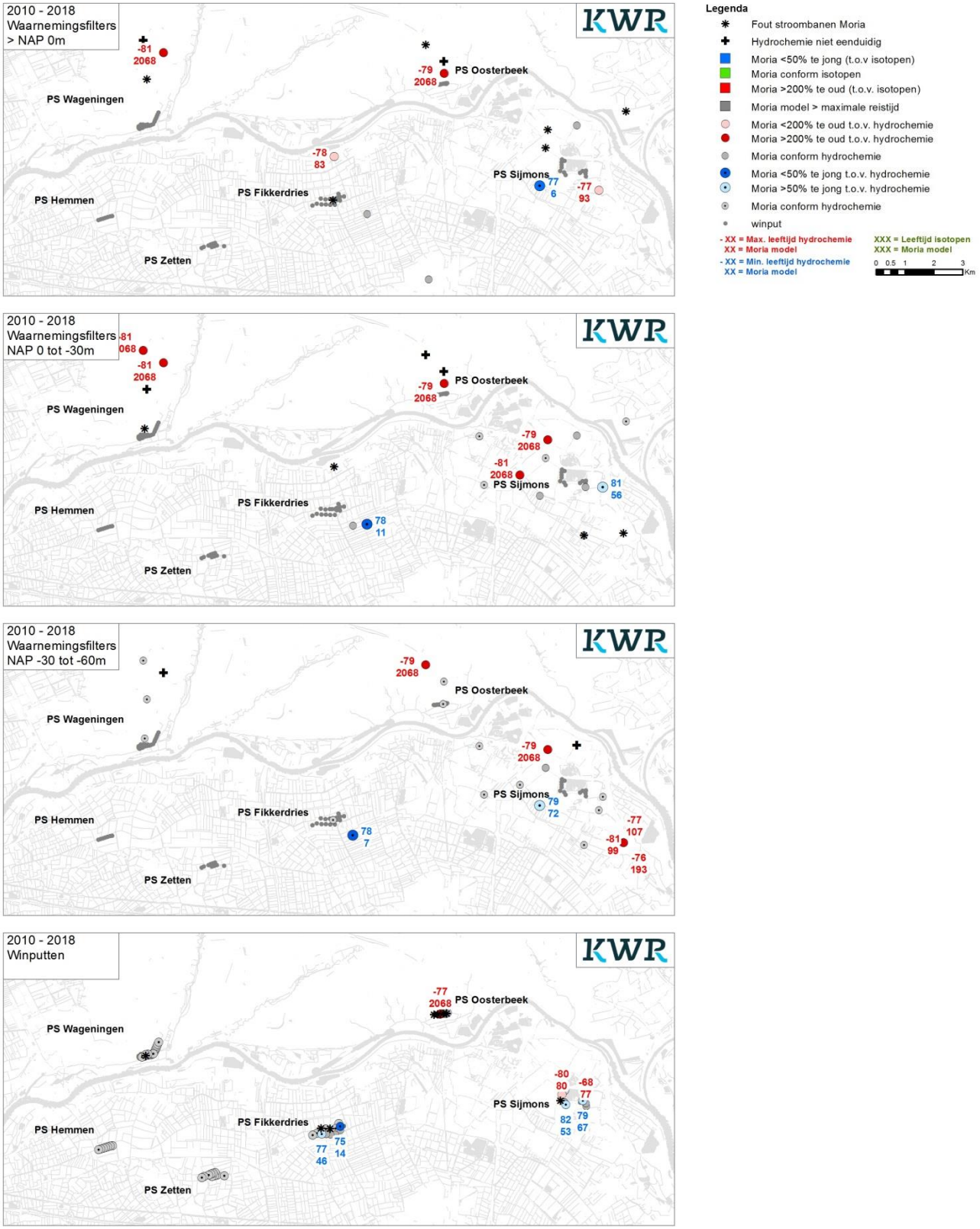
4.3 Vergelijking ouderdom 2010-2018

Figuur 4-3 vergelijkt de hydrochemische ouderdom met de stroombaanberekening voor de periode 2010-2018. Voor de deklaag overschat het MORIA-model de reistijd in twee peilbuizen ten noorden van de Rijn met meer dan 2000 jaar (donker rode bollen): de hydrochemische leeftijd is <81 resp. <79 jaar terwijl de stroombanen het maaiveld niet bereiken binnen de 2068 jaar maximale rekenduur. Nabij Sijmons wordt de reistijd in één peilbuis sterk onderschat: hydrochemie >77 jaar, MORIA-model 6 jaar (donker blauwe bollen). Daarnaast zijn er met lichtblauwe en -rode bollen nog enkele kleine discrepanties tussen MORIA en hydrochemie weergegeven.

WVP1 vertoont een vergelijkbaar patroon als de deklaag, met te lange, berekende reistijden in 5 peilbuizen ten noorden van de Rijn en Sijmons. In 1 peilbuis nabij Fikkersdries wordt de reistijd juist sterk onderschat.

In WVP2 treden verschillen op rondom Sijmons (MORIA-model overschat reistijd) en Fikkerdries (MORIA onderschat reistijd). In twee winputten van Fikkerdries is de hydrochemische leeftijd fors groter (77 en 75 jaar) vergeleken met de 10% snelste stroombanen (14 jaar, 46 jaar). Terwijl het model de reistijd in één winput van Oosterbeek juist sterk overschat (<77 versus >2068 jaar). Daarnaast treden kleine verschillen op in enkele winputten van Sijmons.

Samengevat wijkt 18% van de stroombaanberekeningen meer dan 50% af van de hydrochemische leeftijdsschatting (zie Figuur 4-4). De meeste verschillen (n=15) komen doordat het model een te hoge leeftijd schat in peilbuizen met jong grondwater.



Figuur 4-3 Vergeijking van de leeftijd op basis van de hydrochemische samenstelling (grote circels) met de berekende leeftijd van het MORIA voor de periode 2010-2018.

Reliable data	Hydrochem. Class *		Comparison Moria **			
	minimum age limit	maximum age limit	too young	too old	too young	too old
WP	47	35	4	15	5%	18%
PP	50	16	4	3	6%	5%
Total	148		26		18%	

(*) A minimum age limit means that hydrochemical data indicates that the groundwater at a location "older than" a certain age. A maximum age limit indicates that water is "younger than" a certain age
(**) "too young" means that the travel time in Moria is at least 50% shorter than the minimum age limit.

Figuur 4-4 Vergelijking van hydrochemische ouderdomsbepaling met de ouderdomsbepaling volgens MORIA. Alleen weergegeven zijn de waarnemingsfilters met voldoende gegevens voor een betrouwbare leeftijdsbepaling in de periode 2010-2018 met een discrepantie groter dan 50% van de hydrochemische leeftijd.

4.4 Vergelijking ouderdom 1980-1990

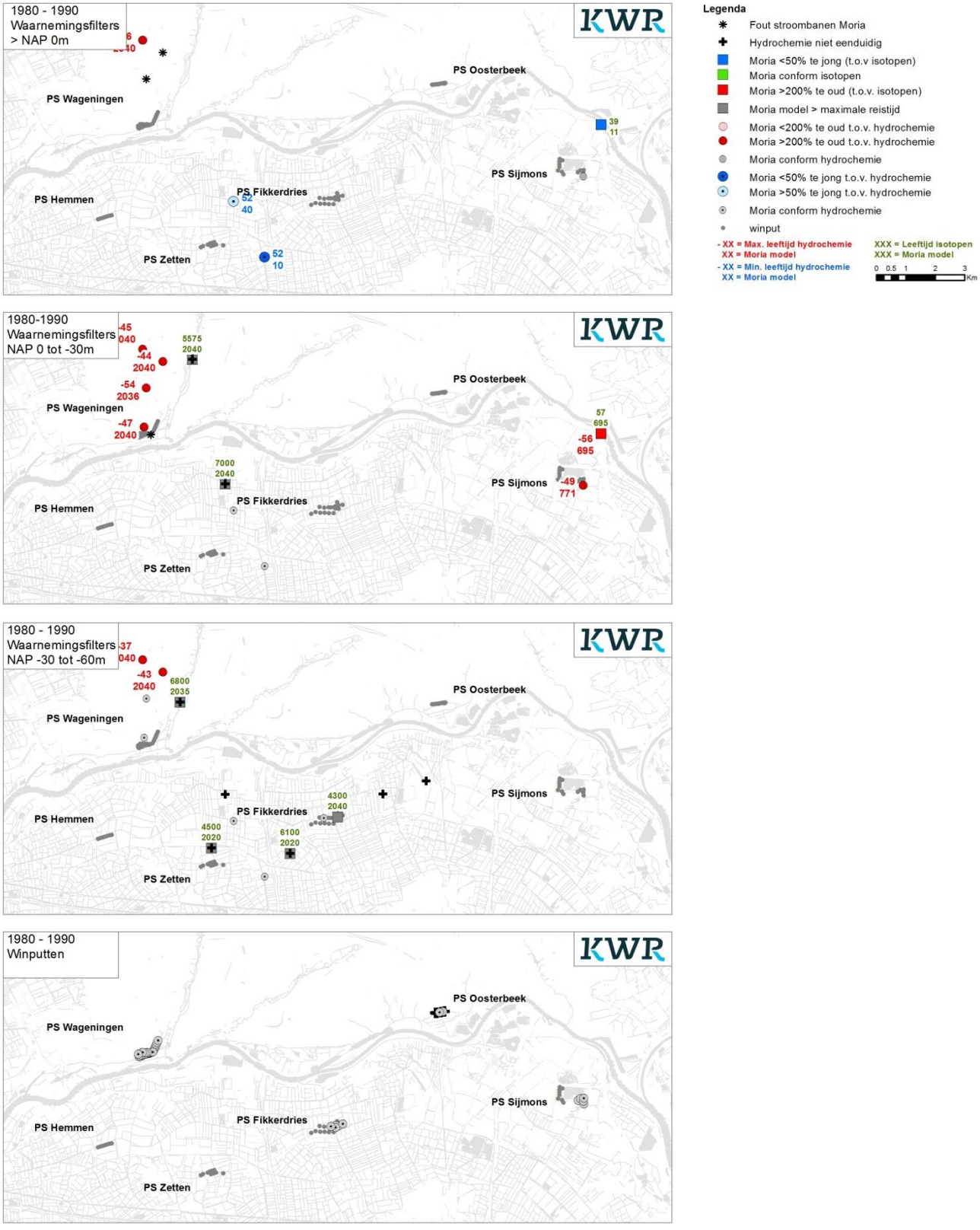
Voor de periode 1980-1990 zijn op een aantal locaties absolute leeftijden geschat op basis van isotopen (zie Figuur 4-6). De ^{14}C metingen zijn allemaal veel ouder dan de modelberekeningen, maar dit kan veroorzaakt worden doordat het model na 2000 jaar wordt stopgezet. De ^{3}H metingen ten noorden van Sijmons wijken ook sterk af: MORIA onderschat de reistijd in de deklaag en overschat de reistijd in WVP1.

22% van de stroombaanberekeningen wijkt meer dan 50% af van de hydrochemische leeftijdsschatting (zie Figuur 4-5). Dit is vergelijkbaar met de periode 2010-2018 en ook hier worden de meeste verschillen (n=12) veroorzaakt doordat het model een te hoge leeftijd schat in peilbuizen met jong grondwater.

Reliable data	Hydrochem. Class *		Comparison Moria **			
	minimum age limit	maximum age limit	too young	too old	too young	too old
WP	15	18	2	13	6%	39%
PP	40	0	1	0	3%	0%
Total	73		16		22%	

(*) A minimum age limit means that hydrochemical data indicates that the groundwater at a location "older than" a certain age. A maximum age limit indicates that water is "younger than" a certain age
(**) "too young" means that the travel time in Moria is at least 50% shorter than the minimum age limit.

Figuur 4-5 Vergelijking van hydrochemische ouderdomsbepaling t.o.v. de ouderdomsbepaling volgens MORIA. Alleen weergegeven zijn de waarnemingsfilters met voldoende gegevens voor een betrouwbare leeftijdsbepaling in de periode 1980-1990 met een discrepantie groter dan 50% van de hydrochemische leeftijd.



Figuur 4-6 Vergeijking van de leeftijd op basis van de hydrochemische samenstelling (grote circels) en isotopen (vierkanten) met de berekende leeftijd van het MORIA voor de periode 1980 – 1990.

4.5 Beoordeling Moria model per winning

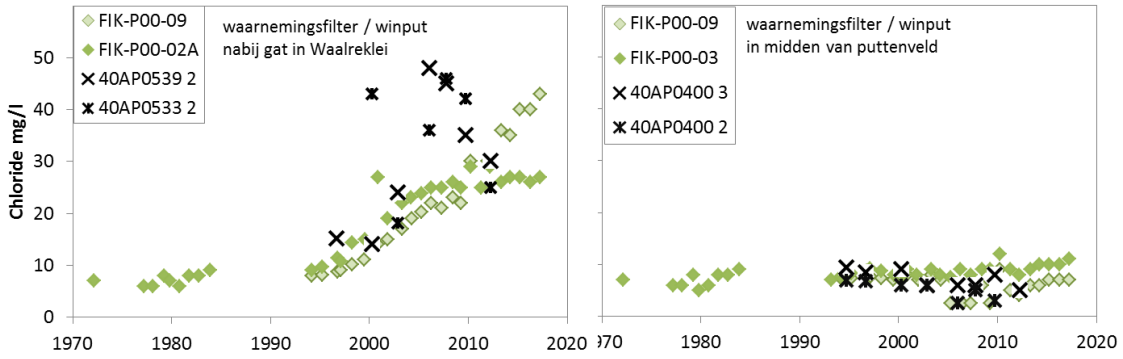
In navolgende paragrafen beoordelen wij in hoeverre de discrepanties tussen hydrochemische leeftijd en model duiden op verbeterpunten voor het MORIA-model.

4.5.1 Fikkersdries

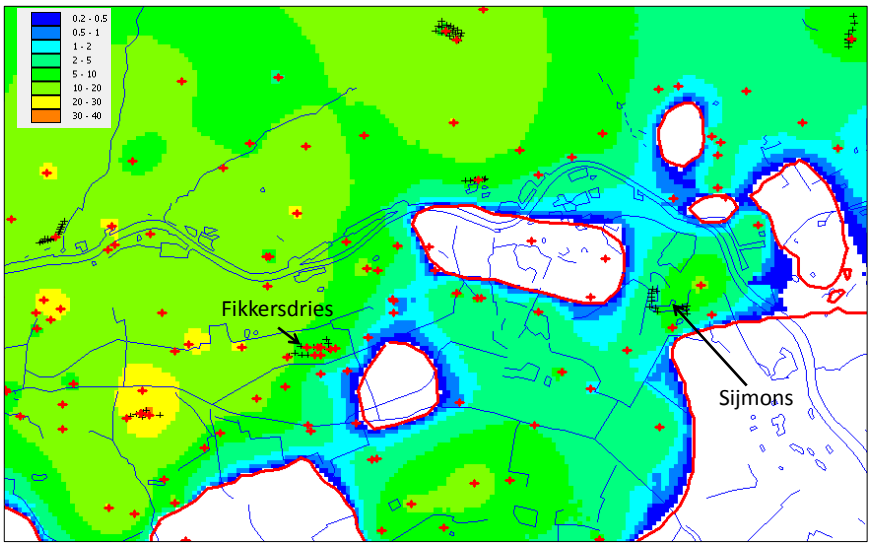
De berekende reistijden zijn in twee waarnemingsfilters (40AP0533_F2, 40AP0539_F2 aanzienlijk korter (resp. 7 en 11 jaar) dan de minimale hydrochemische leeftijd (beiden >78 jaar). De filters liggen in WVP1 en WVP2 . Het betreft vermoedelijk een foutieve hydrochemische inschatting doordat in de periode vanaf 2010 een beperkter pakket is gemeten dan in de voorafgaande jaren toen de filters wel als antropogeen beïnvloed (VA) en dus jong grondwater tevoorschijn kwamen.

Volgens het MORIA-model was tot 1990 nog sprake van een kwelsituatie (reistijd >1000 jaar in beide peilbuizen). Dit is in lijn met het watertype V2 dat in 1996 is bemonsterd. Tussen 2000 en 2005 stijgen de chlorideconcentraties sterk van circa 15 naar 45 mg/l type FA. De vertraging tussen verhoging van het windebiet in 1990 en de omslag naar antropogeen beïnvloed grondwater is dus circa 10 tot 15 jaar; slechts enkele jaren langer dan de berekende reistijd. Overigens wordt in filter 40AP0400 een aanzienlijk lagere chloride concentraties gemeten zowel in WVP2 (F2; 5 mg/l) als in WVP3 (F3; 7 mg/l). Het verschil wordt veroorzaakt doordat de waarnemingsputten 40AP0533 en 40AP0539 in of nabij een gat liggen in de Waalreklei, dat in 2018 door RHDHV/ KWR is vastgesteld en ingebouwd in het MORIA model (Van Dooren 2018). De hydrochemische metingen onderschrijven dus de gemaakte aanpassingen.

Conclusie: de berekende reistijden van MORIA komen qua orde grootte overeen met de hydrochemische gegevens. De isotopenmetingen kunnen meer uitsluitsel geven over de reistijd wanneer deze kritisch is.



Figuur 4-7 Verloop van de chloride concentratie in enkele winputten (vierkanten) en waarnemingsfilters (kruisjes) rondom Fikkersdries.



Figuur 4-8 Dikte Waalreklei 1 vastgesteld in de studie *"Hydrologische analyse Overbetuwe en aanpassing grondwatermodel MORIA"* door KWR en RHDHV (van Dooren 2018)

4.5.2 Hemmen & Zetten

In het gebied tussen Hemmen en Fikkersdries zijn in 1986 twee waarnemingsputten éénmalig bemonsterd. De hydrochemische leeftijd is volgens deze metingen aanzienlijk lager dan het MORIA model. Helaas zijn verder geen ondiepere peilbuizen beschikbaar met waterkwaliteitsgegevens in de beschouwde perioden.

Indien het wenselijk is om het model beter te controleren met hydrochemische analyses, dan wordt geadviseerd om komende jaren enkele waarnemingsfilters in WVP1 en WVP2 rondom Zetten te bemonsteren. Bij voorkeur peilbuizen die reeds eerder bemonsterd zijn zodat deze eerdere metingen kunnen dienen als referentie voor verandering c.q. antropogene invloed.

4.5.3 Oosterbeek

De hydrologische responscurve (zie Figuur 3-4) van winning Oosterbeek duidt op een berekende minimale reistijd van 250 jaar. De putten vertonen echter een oplopende hardheid en nitraat; met name OOS-P00-08A en 11 die als antropogeen beïnvloed zijn geclassificeerd. Het model overschat derhalve de leeftijd (en beschermbaarheid) van het grondwater.

De waarnemingsfilters in de gestuwde lagen (boven NAP-30m) vertonen duidelijke tekenen van antropogene invloed met nitraat tot boven 50 mg/l. Dit is duidelijk niet in lijn met de modelberekeningen die uitgaan van reistijden groter dan 2000 jaar.

Een aantal waarnemingsfilters in wvp2 (NAP -30 tot -60 m) waaronder 40AP0565_F3 is ook als antropogeen beïnvloed geclassificeerd op basis van iets verhoogde Chlorideconcentraties (17 mg/l) en nitraat (5 mg/). Maar dit gemiddelde is sterk beïnvloed door een uitbijter in 2002 toen de concentraties sterk overeenkwamen met de gemiddelden in filter 1. Vermoedelijk is dus sprake van eenmalige monsterwisseling.

4.5.4 Sijmons

Het onttrokken grondwater in de winputten van Sijmons is volgens de hydrochemie afkomstig vanuit de Veluwe, riviervlaktewater (schoon, beïnvloed door stad en

landbouw) en Rijnoevergrondwater. Dit is in lijn met de stroombaanberekeningen die uitkomen bij twee heel verschillende intrekgebieden: een gebied op de Veluwe, nabij vliegveld Deelen, en de waterlichamen rondom Sijmons: de Rijn en Immerlooplas.

De reistijden in de winputten zijn grotendeels in lijn met de hydrochemie. Het grootste verschil treedt op bij SIJMPP06 waar de 10% snelste stroombanen na 53 jaar arriveren terwijl het water volgens de hydrochemisch classificatie ten minste 82 jaar oud is. Maar omliggende putten zijn weer wat jonger geclassificeerd dan berekend door MORIA, dus mogelijk heeft het verschil te maken met de verdeling van het debiet over de putten en niet per se een fout in de ondergrondschematisatie.

In de waarnemingsputten rondom Sijmons zijn structurele afwijkingen gevonden in het herkomstgebied (Veluwe versus vloedvlakte). Ook zijn grote verschillen gevonden met name ten noorden en oosten van de winning. In 40BP0441_F1 en 40BP0442_F2 is de berekende reistijd bijvoorbeeld meer dan 2000 jaar, terwijl de Chloride concentraties tussen 1997 en 2015 zijn opgelopen van 72 naar 120 mg/l wat op deze diepte indicatief is voor antropogene invloed. De isotopenmetingen in waarnemingsput B40B0369 wijken zowel voor het eerste als tweede watervoerend pakket af, in tegengestelde richting.

Geadviseerd wordt om te onderzoeken of de schematisatie van de ondergrond in MORIA voor dit gebied verbeterd kan worden. Bijvoorbeeld door een gevoeligheidsanalyse uit te voeren in welke mate het herkomstgebied beïnvloed wordt door de schematisatie en parameterisatie van de ondergrond. En ook wat de invloed is van de historische reconstructie.

4.5.5 Wageningen

In de winputten van Wageningen zijn reistijden van het MORIA-model >2040 jaar wat in lijn is met de hydrochemische analyses die aangeven dat het thans onttrokken water ten minste voor 1935 is geïnfiltreerd.

Enkele peilbuizen ten noorden van de winning boven NAP-30 vertonen duidelijk sporen van antropogene invloed met aanwezigheid van OMP-U tot boven 1 µg/l (per), chloride concentraties in oplopende trend vanaf de jaren ’80 tot waarden boven de natuurlijke achtergrondwaarden van 20 mg/l (voor V1, V2) en nitraat tussen 5 en 50 mg/l. Een logische bron is de voormalige vuilstort ten noorden van de beïnvloede peilbuizen. De waarnemingen wijken dus duidelijk af van de modelberekeningen die uitgaan van reistijden van meer dan 2000 jaar.

Ook in het winpakket (-30 tot -60 m) kan enige antropogene beïnvloeding worden afgeleid uit de verhoogde OMP-U in de jaren ’80 en ’90 (39FP0550_F4 en 39FP0551_F4), maar de macroparameters duiden op oorspronkelijk Veluwe-water (type V1). Mogelijk is er sprake van een contaminatie tijdens monstername of door kortsluitstroming in de waarnemingsput.

Een hydrologische verklaring voor de waargenomen verschillen is dat het MORIA-model een te hoge weerstand heeft aan de onderkant van de stuwwal, waardoor het model te weinig verticale stroming berekend.

Geadviseerd wordt om de integriteit van alle waarnemingsfilters tot 4 km ten noorden van Wageningen te testen en vervolgens opnieuw te bemonsteren op OMP’s, alsmede een isotopendatering uit te voeren.

5 Nadere controle reistijd Veluwe

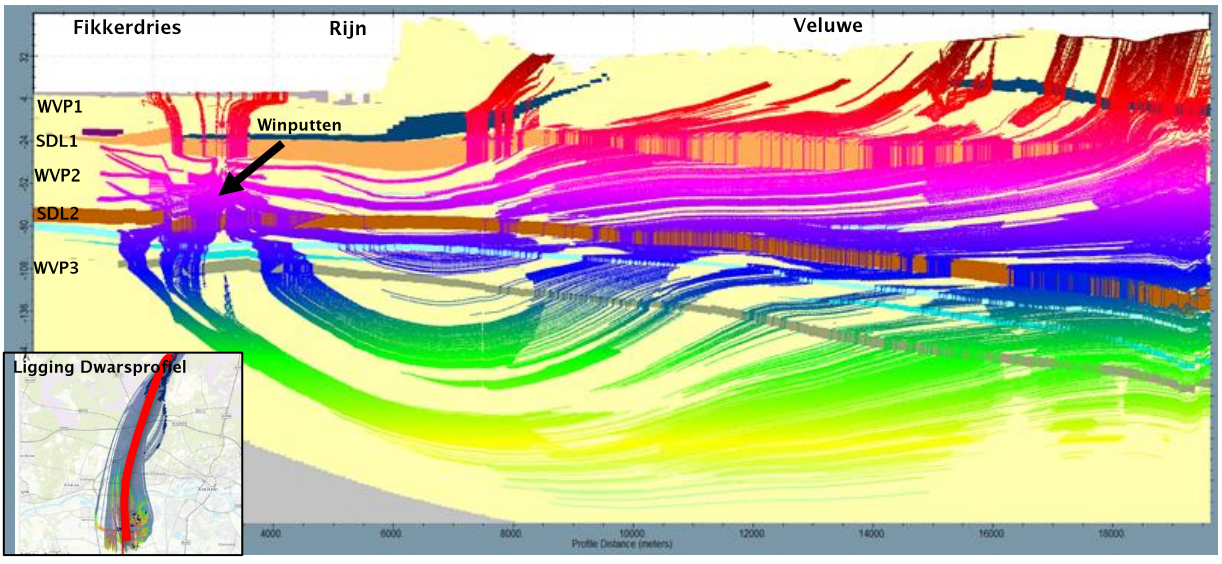
Naar aanleiding van de geconstateerde verschillen tussen hydrochemische metingen en berekende reistijden op de Veluwe (zie §4.5.3 & 4.5.5) is een extra analyse uitgevoerd van de stroombaanberekeningen.

5.1 Stroombanen op Veluwe stoppen niet tijdig

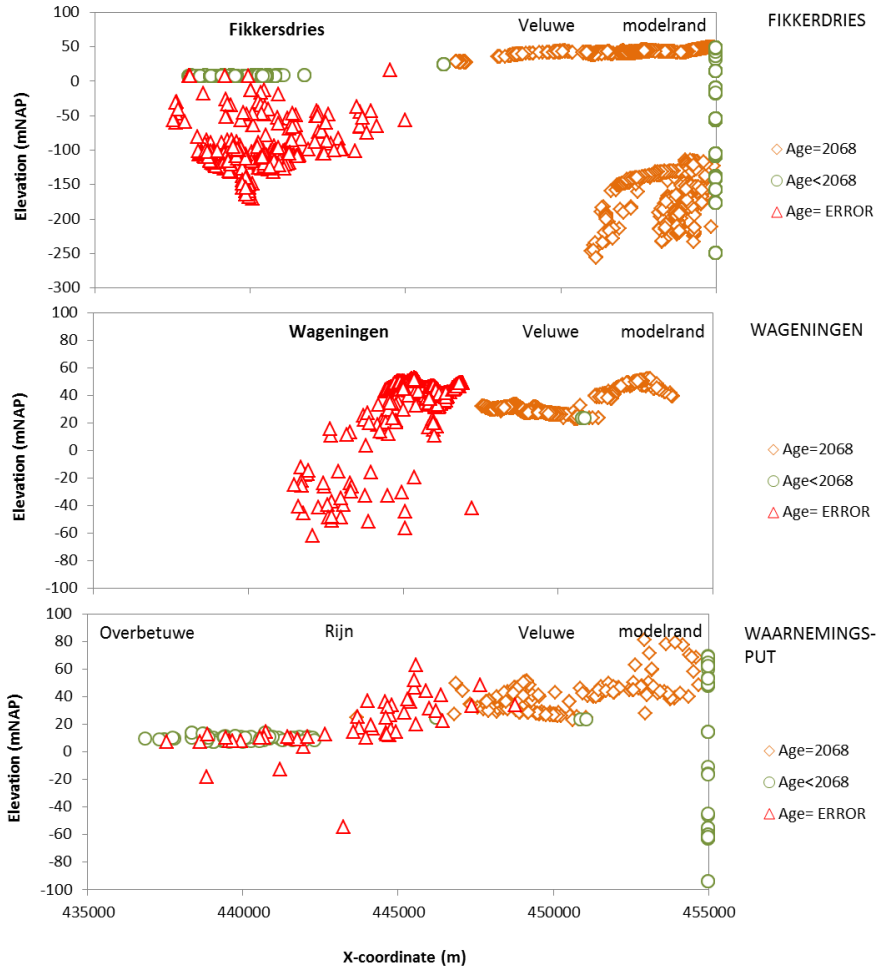
Figuur 5-1 toont een dwarsdoorsnede van de stroombanen naar de winning Fikkersdries. De globale stromingsrichting van de Veluwe richting de winning is logisch en in lijn met eerdere onderzoeken. Maar wat opvalt is dat de stroombanen op de Veluwe helemaal tot aan maaiveld doorlopen terwijl de grondwaterspiegel ver onder maaiveld zit. Bovendien treedt horizontale stroming op van stroombanen die het maaiveld eenmaal bereikt hebben. Een dergelijk stromingspatroon is niet plausibel in dit gebied.

Uit Figuur 5-2 (boven) blijkt dat de eindpunten van stroombanen nabij maaiveld op de Veluwe allemaal een leeftijd hebben van 2068 jaar (oranje bollen) overeenkomstig de maximale rekenperiode. De eindpunten van Wageningen (midden) en waarnemingsputten (onder) vertonen een vergelijkbaar patroon.

In de modellagen beneden maaiveld treedt een neerwaartse flux op van 150 – 225 mm/jaar. Deze waarde is in overeenstemming met de te verwachten range aan grondwateraanvulling. Er is dus vermoedelijk sprake van een artefact in het MORIA-model of toepassing van iMODPATH waardoor bijna alle stroombanen op de Veluwe niet tijdig stoppen bij backward tracking.



Figuur 5-1 Dwarsdoorsnede in de noord-zuid-richting van stroombanen vanaf Fikkersdries teruggerekend vanaf 2018, De gele achtergrondlagen zijn aquifers en de gekleurde lagen bestaan uit slechtdoorlatende lagen. De kleuren van de stroombanen komen overeen met de diepte en zijn getekend over een breedte van 250m rondom het dwarsprofiel. SDL = Slechtdoorlatendelaag; WVP = Watervoerende pakket



Figuur 5-2. Dwarsdoorsnede met betrouwbaarheid van de eindpunten van de stroombaanberekeningen van winning Fikkersdries (boven), Wageningen (midden) en waarnemingsfilters (onder).De rode eindpunten horen bij zijn stroombanen die crashen midden in het modelgebied (niet bruikbaar). De oranje eindpunten hebben een leeftijd gelijk aan de 2068 jaar modelperiode (locatie betrouwbaar, leeftijd fout). De groene eindpunten hebben een ouderdom korter dan 2068 jaar en eindigen op de modelrand (locatie en leeftijd betrouwbaar).

Locatie	Endpoint	Age<2068	Age=2068	Age= ERROR
FIK	count	6004	3041	449
	%	63%	32%	5%
HEM	count	1606	877	42
	%	64%	35%	2%
OOS	count	1246	4473	341
	%	21%	74%	6%
SIJ	count	8316	503	271
	%	91%	6%	3%
WAG	count	4	7599	2295
	%	0%	77%	23%
ZET	count	545	2767	21
	%	16%	83%	1%
WP	count	159	174	53
	%	41%	45%	14%
All PP	mean %	43%	51%	6%

= locatie en leeftijd betrouwbaar (incl stroombanen tot aan modelrand)
= als stroombaan aan maaiveld: locatie redelijk betrouwbaar, leeftijd fout
als stroombaan niet tot aan maaiveld: locatie fout, leeftijd bruikbaar als ondergrens
= niet bruikbaar

Figuur 5-3. Samenvatting met betrouwbaarheid van stroombaanberekeningen per winning, voor alle waarnemingsputten en samengevat voor alle winningen (laatst regel).

Gelukkig lijkt dit probleem niet op te treden in de Overbetuwe: Stroombanen die hier aan maaiveld eindigen (groene bollen) hebben allen een plausibele reistijd kleiner dan 2068 jaar.

5.2 Deel stroombanen crasht

Analyse van de eindpunten laat overigens ook zien dat een groot aantal stroombanen midden in het model stopt, ver voordat de 2068 jaar rekenperiode is afgelopen (rode driehoeken, Figuur 5-2). Blijkbaar crashen hier stroombanen. De oorzaak is niet nader onderzocht.

5.3 Consequenties voor betrouwbaarheid stroombaanberekeningen

De gecrashte stroombanen (rood) zijn niet meegenomen in de analyse in voorgaande hoofdstukken. Het is niet duidelijk of hierdoor een bias optreedt in de resultaten wanneer er een patroon is of wanneer een selectief deel van de stroombanen crasht. Dit probleem speelt bij 6% van de stroombanen en met name bij de winning Wageningen (23%, zie Figuur 5-3).

Stroombanen die in het jaar 2068 eindigen aan maaiveld (oranje) geven een plausibel beeld van de locatie maar een foutieve inschatting van de ouderdom. Stroombanen die na 2068 jaar niet aan maaiveld eindigen leveren wel een minimale ouderdom maar geen herkomstgebied, al kan in de praktijk worden aangenomen dat deze afkomstig zijn van de Veluwe aangezien het oude water in de winningen hiervandaan afkomstig is. Dit probleem speelt bij 51% van de stroombanen van winningen en 45% van de waarnemingsputten.

Stroombanen met een leeftijd kleiner dan 2068 jaar (groen) hebben een correcte herkomst en ouderdom. 43% van de berekende stroombanen lijkt dus rekenkundig gezien volledig in orde (los van de vergelijking met hydrochemische data).

5.4 Consequenties voor beoordeling model

Voorgaande bevindingen leiden tot een aantal nuanceringen van de beoordeling in §4.5:

- De MORIA-reistijd wordt vermoedelijk ten onrechte overschat voor alle winningen (zie Figuur 3-4).
- De MORIA-reistijd is ter plaatse van de isotopenmetingen in peilbuizen rondom Zetten, Fikkersdries en Wageningen zijn mogelijk ten onrechte “goedgekeurd” omdat in §4.4 ten onrechte is aangenomen dat de MORIA-reistijd langer is dan 2000 jaar. De stroombanen arriveren in het model vermoedelijk eerder aan maaiveld.
  Een mogelijke geohydrologische verklaring voor deze verschillen is dat de hydraulische weerstand van de eerste scheidende laag onder de stuwwal te laag wordt ingeschat. Daarnaast kunnen verschillen optreden doordat de historische reconstructie nog uitgaat van een (gesimplificeerde) neerslagoverschot gelijk aan de huidige situatie.

KWR en RHDHV adviseren dan ook dringend om de oorzaak van de afwijkende stoombaanberekeningen uit te zoeken en de stroombaanberekeningen en beoordeling van het model vervolgens te actualiseren.

6 Aanbevelingen

6.1 Controle stroombaanberekeningen Veluwe en verbeteren MORIA-model (zie hoofdstuk 4 en 5)

- KWR en RHDHV adviseren dringend om de oorzaak van de oorzaken van extreem lange stoombaanberekeningen op de Veluwe uit te zoeken, en de stroombaanberekeningen en beoordeling van het model vervolgens te actualiseren.
- Daarnaast adviseren we om te onderzoeken of het mogelijk is om de laagopbouw rondom Sijmons zodanig aan te passen zodanig dat de berekende stroombanen meer in lijn komen met de waargenomen grondwaterkwaliteitspatronen. De huidige database met waterkwaliteitsmetingen kan daarbij als “ijkset” dienen. Mogelijk dat de historische reconstructie (bijvoorbeeld historische grondwateraanvulling op de Veluwe) ook van invloed is op de huidige berekende herkomst van het grondwater,

6.2 Optimalisatie reguliere monitoring (zie hoofdstuk 2)

- Neem Bromide op in het standaard analysepakket van Vitens. Dit om onderscheid te kunnen maken tussen natuurlijke bronnen c.q. connaat zout grondwater en antropogene bronnen zoals wegenzout.
- Analyseer altijd de volledige set macro-(an)ionen in waarnemingsputten. Vitens meet nu regelmatig een selectie van parameters (bijvoorbeeld geen SO4, NO3). Dit is begrijpelijk vanuit kostenoogpunt, maar bemoeilijkt herkomstbepaling.
- Harmoniseer het analysepakket voor organische micro-verontreinigingen in de waarnemingsfilters met de winputten. Dit t.b.v. onderlinge vergelijkbaarheid.

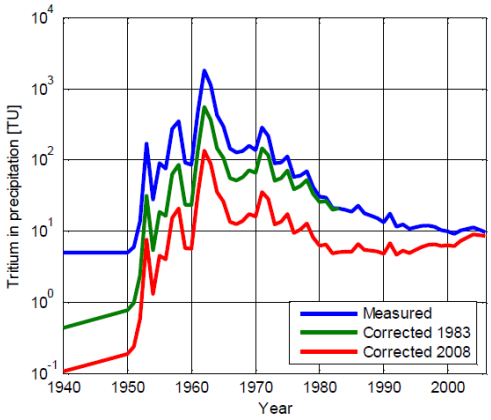
6.3 Aanvullende metingen (zie hoofdstuk 4)

- Controleer de integriteit van alle peilbuizen waar organische microverontreinigingen zijn aangetroffen zonder duidelijke verhoging van macro-parameters t.o.v. natuurlijke achtergrondwaarden. Mogelijk dat de metingen beïnvloed worden door een lekstroom.
- Meet natuurlijke isotopen in het gezamenlijk ruwwater van alle winningen als baseline om de huidige ouderdom te bepalen.
- Idem voor de peilbuizen ten noorden van de winning Wageningen (tenzij de MORIA-leeftijd reeds goed overeenkomt met de hydrochemische gegevens na verbetering van de stroombaanberekeningen, zie aanbeveling 1)
- Voer aanvullende isotopenmetingen uit in de winputten en ondiepe waarnemingsfilters gericht op het identificeren van specifieke verontreinigingsbronnen zoals RWZI effluent, mest of lekke riolering. Deze laatste analyse is met name interessant als Vitens verwacht dat de verontreinigingen vanaf maaiveld in de toekomst een uitbreiding van de zuiveringscapaciteit nopen.

6.4 Valideer de berekende reistijd van winningen met isotopenmetingen (zie hoofdstuk 4)

- Voor winningen heeft het de voorkeur om deze te beoordelen aan de hand van een hydrologische responsecurve in plaats van gemiddelde leeftijd per winput.

- Dit kan door de waargenomen 14C, 3H en He isotopen te vergelijken met berekende waarden aan de hand van de hydrologisch response curve. 3H is met name geschikt om het aandeel water dat na 1950 infiltreert te bepalen, terwijl 14C inzicht geeft in het aandeel zeer oud grondwater (zie Figuur 6-1 en BTO-rapport over Noordbargeres Stuyfzand 2015 voor meer informatie).



Figuur 6-1. Het regenwater kent een kenmerkend verloop van Tritiumactiviteit door kernproeven in 1950. Dit verloop is op veel locaties in Nederland teruggevonden in het grondwater en kan gebruikt worden om het aandeel jong grondwater te schatten.

(bron: meetstation Groningen. Figuur overgenomen uit Stuyfzand 2015. Data 1970-2006 verkregen via database WISER van International Atomic Energy Agency).

6.5 Verbeteren van algoritme om hydrochemische leeftijd en herkomst te bepalen (zie hoofdstuk 2)

- De classificatiemethode van herkomst en leeftijd verdient op een aantal punten nog verbetering om deze robuuster te maken. Zo zijn de categorieën FA, FU, VA en VU qua waterkwaliteit weinig onderscheidend wanneer geen OMP's zijn gemeten. Mogelijk zijn enkele aanvullende parameters of verhoudingsgetallen nodig om beter onderscheid beter te maken.
- Daarnaast wordt bij de indeling in watertype worden uitsluitingsciteria gebruikt die leiden tot deselectie van een watertype als voor één parameter een drempelwaarde wordt overschreden. Mogelijk wordt een robuuster methode verkregen door een "boetefunctie" te hanteren voor de "origin score" in plaats van deze meteen te deselecteren.
- In gevallen dat het niet mogelijk is om een eenduidige type te bepalen wordt nu automatische gekozen voor een andere beoordelingswijze, meestal OMP of SO4/Cl. Mogelijk is het beter om een combinatie van de overige parameters te hanteren om te bepalen of een monster al-dan-niet antropogeen beïnvloed is en dus jong water bevat.
- Tot slot wordt momenteel eerste per meetdatum een leeftijd geschat en vervolgens geaggregeerd tot een minimale of maximale ouderdom over een bepaalde periode. Het zou beter zijn om alle metingen in een bepaalde periode in samenhang te beschouwen Bijvoorbeeld door een meetpunt als antropogeen beinvloed te beschouwen als in een voorgaande meetronde(n) OMP's zijn aangetroffen. En ook te kijken naar trend zoals oplopende chloride concentraties door infiltratie van Rijnwater.

6.6 Toepassen op andere regionale modellen

- Het verdient aanbeveling om andere regionale modellen ook te toetsen met waterkwaliteitsgegevens alvorens deze toegepast gaan worden om beschermingsmaatregelen voor winningen door te rekenen (zoals het instellen van grondwaterbeschermzones).

7 Referenties

Appelo, C.A.J. 1982. Verzuring van het grondwater op de Veluwe. H2O 15(18), 464-468.

Appelo, C.A.J. & D. Postma 2005. Geochemistry, groundwater and pollution. Balkema, Rotterdam, 2nd edition, 649p.

Bakker, M., Maas, C., and Von Asmuth, J. R., 2008. Calibration of transient groundwater models using time series analysis and moment matching. Water Resources Research; 44(W04420):doi:10.1029/2007WR006239.

Boukes H. 2002. Grondstofontwikkeling pompstation ir. Sijmons te Arnhem-Zuid. Adviesburo Harry Boukes - De Meern, 23p.

Boukes H. en M. de Jonge 2000. Grondstofontwikkeling pompstation Oosterbeek. Adviesburo Harry Boukes - De Meern, 24p.

Boukes H. en M. de Jonge 2000. Grondstofontwikkeling pompstation Wageningse Berg. Adviesburo Harry Boukes - De Meern, 33p.

CBS, PBL, RIVM, WUR 2003. Grondwatersituatie, landelijk beeld, 1950-1990 (indicator 0283, versie 03 , 2 december 2003). www.clo.nl. Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS), Den Haag; PBL Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag; RIVM Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven; en Wageningen University and Research, Wageningen.

Meeuwissen B.A.J. en A.J. Vogelaar 1990. Geohydrologisch en geohydrochemisch onderzoek in de omgeving van de winplaats Immerloopark. Kiwa rapport SWO-90.259, 193p.

Meinardi, C. R. 1974. De chemische samenstelling van grondwater van de Veluwe. RID Meded. 74-4, Bilthoven, 48p.

Meinardi C.R. 1976. Characteristic examples of the natural groundwater composition in the Netherlands. Verslagen & Meded Hydrol. Onderzoek TNO 21, 12-33.

Meinardi, C. R. 1983. Groundwater recharge in the Rhine Fluvial Plain. Z.dt geol. Ges., 134, p. 581-611.

Meinardi C.R. 1986. De ouderdom van het zoete grondwater in Nederland. H2O 19(13), 286-289.

Mendizabal, I, P.J. Stuyfzand 2009. Guidelines for interpreting hydrochemical patterns in data from public supply well fields and their value for natural background groundwater quality determination. Journal of Hydrology 379.1-2 (2009): 151-163.

Mook, W.G. (ed) 2000. Environmental isotopes in the hydrological cycle; Principles and Applications. UNESCO/IAEA Series, 6 volumes.

Romijn. E. 1974. Geohydrologische inventarisatie Veluwe. RID rapport 74-1, 23p + 11 bijlagen.

Schoute H.R. 1976. Rapport inzake een geo-elektrisch onderzoek in de OVER-BETUWE en de GELDERSE VALLEI, kaartbladen 39 Oost en 40 West. DIENST GRONDWATERVERKENNING TNO Delft, Rapport 92, 71p.

Stuyfzand, P.J. 1994. Bepaling van de herkomst, ouderdom en koolstofbronnen van grondwater in Hollands kustregio, met behulp van natuurlijke isotopen. Bijdrage aan NHV-dag 19 nov.1992 te Groningen. Kiwa-rapport SWE 94.057 of als SWI 95.136, 20p. Tevens uitgegeven als Speciale uitgave Ned. Hydrol. Vereniging, nr.1 over Isotopen in de Hydrologie, state of the art, 2002, M.R. van der Valk (ed), p.47-68.

Stuyfzand, P.J. 2015. Model based monitoring van puttenvelden: meetnetoptimalisatie via systeemanalyse en hydrogeochemische modellering, met Noordbargeres als voorbeeld. KWR rapport BTO-2015.021, 127p.

Supèr J. & C.M. Gommer 1993. Waterwinning en natuurontwikkeling op de zuidelijke Veluwezoom rapport 2: grond- en oppervlaktewater in de Rosandepolder en Doorwerthsche Waarden. Kiwa-rapport SWO 93.297, 112p.

Super J., E.J. Schrama en A.J. Vogelaar 1992. Oriënterend geohydrologisch onderzoek bij de winplaatsen La Cabine (Arnhem) en Oosterbeek. Kiwa-rapport SWO 91.372, 67p.

van Beek C.G.E.M. & M.P. Laeven 1999. Meetsysteem NUON Water; Optimalisatie meetnetten. Kiwa-rapport KOA 99.139, 100p.

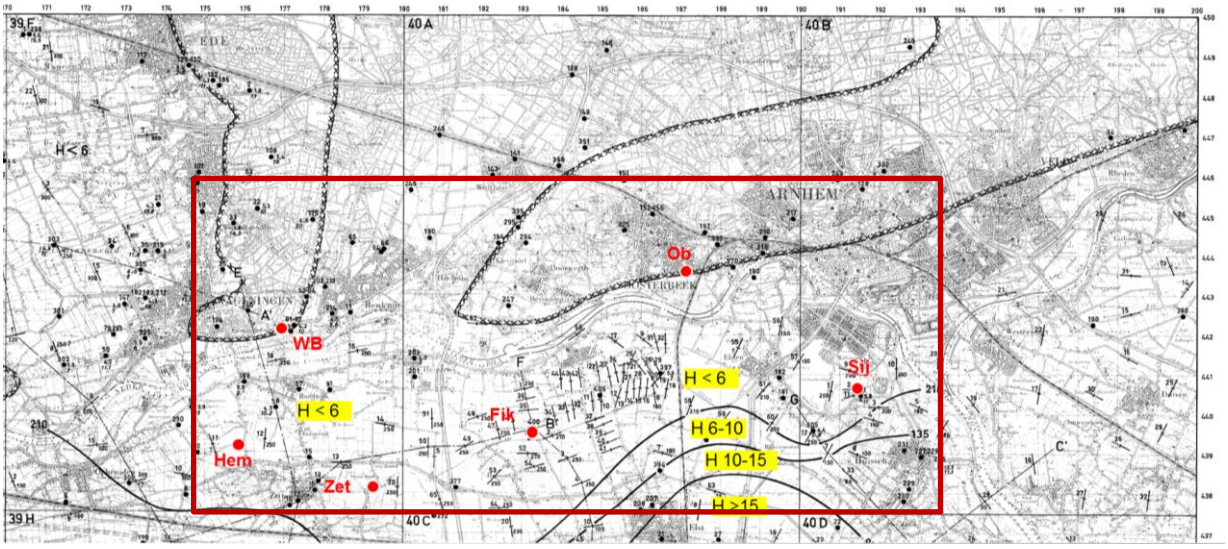
van Dooren, T.C.G.W, S. Stofberg, A. van Doorn, B. Hillebrand, W. Engel, J. Jansen, B. van der Wal, M.L. van der Schans 2018. Hydrologische analyse Overbetuwe en aanpassing grondwatermodel MORIA. KWR 2018.082.

Van Kessel A.A.L. 2002. Toepassing van isotopenhydrologie voor de waterwinplaats Hoenderloo. In NHV Special nr.1 “Isotopen in de hydrologie, the state of the art”. M.R. van der Valk (ed), 91-98.

Van der Schans, M.L., M. Vissers. 2011. Grondwateronderzoek hydrologisch systeem drinkwaterwinning Laren. Grontmij.

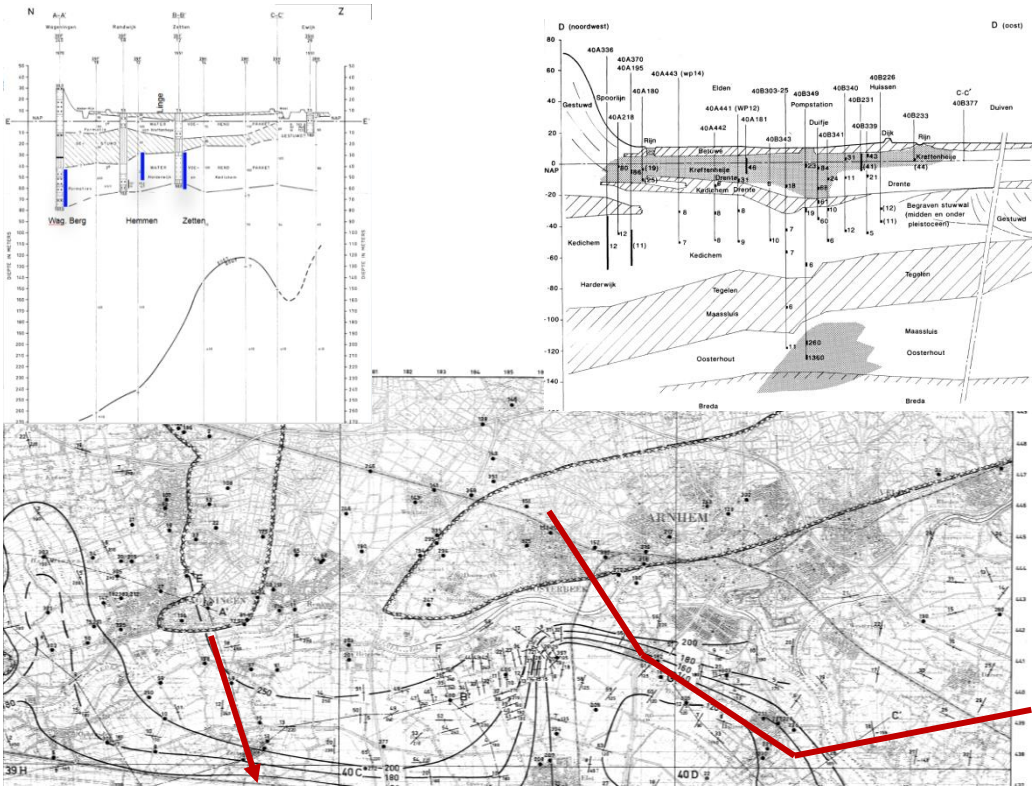
Von Asmuth, J. R., C. Maas, M. Bakker, J. Petersen, 2008. Modeling time series of groundwater head fluctuations subjected to multiple stresses. Groundwater.doi: 10.1111/j.1745-6584.2007.00382.x,46(1):30-40.

Bijlage I Indrukken ruwwaterkwaliteit

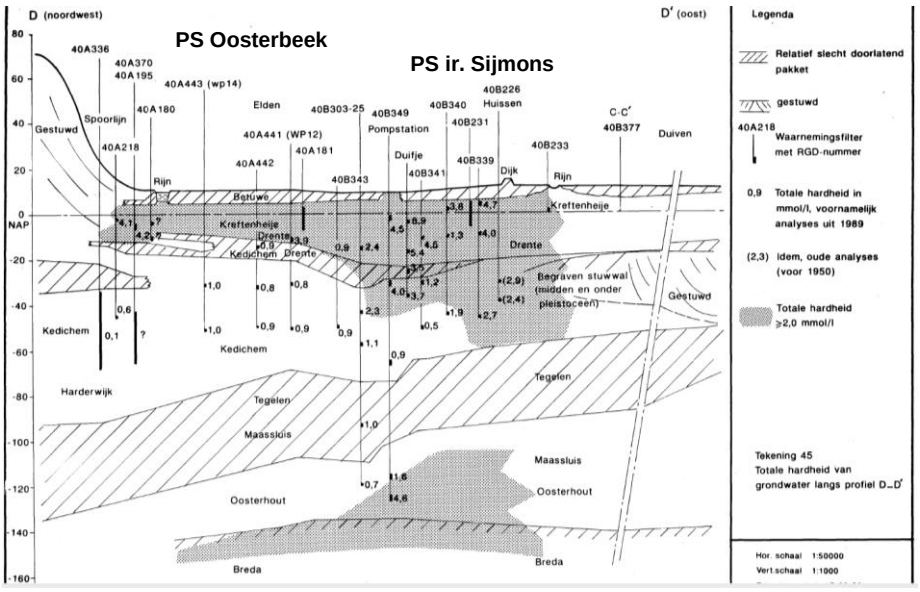


Figuur I.1 Het studiegebied (binnen rode kader), met de 6 relevante puttenvelden voor de openbare drinkwatervoorziening (WB = Wageningse Berg; Hem = Hemmen; Zet = Zetten; Fik = Fikkersdries; Ob = Oosterbeek; Sij = ir. Sijmons), boorpunten, geo-electrische metingen en de totale hardheid (in oD; 1 mmol/L = 5.2 oD) van het grondwater in WVP 2. Ondergrond gebaseerd op Schoute (1976).

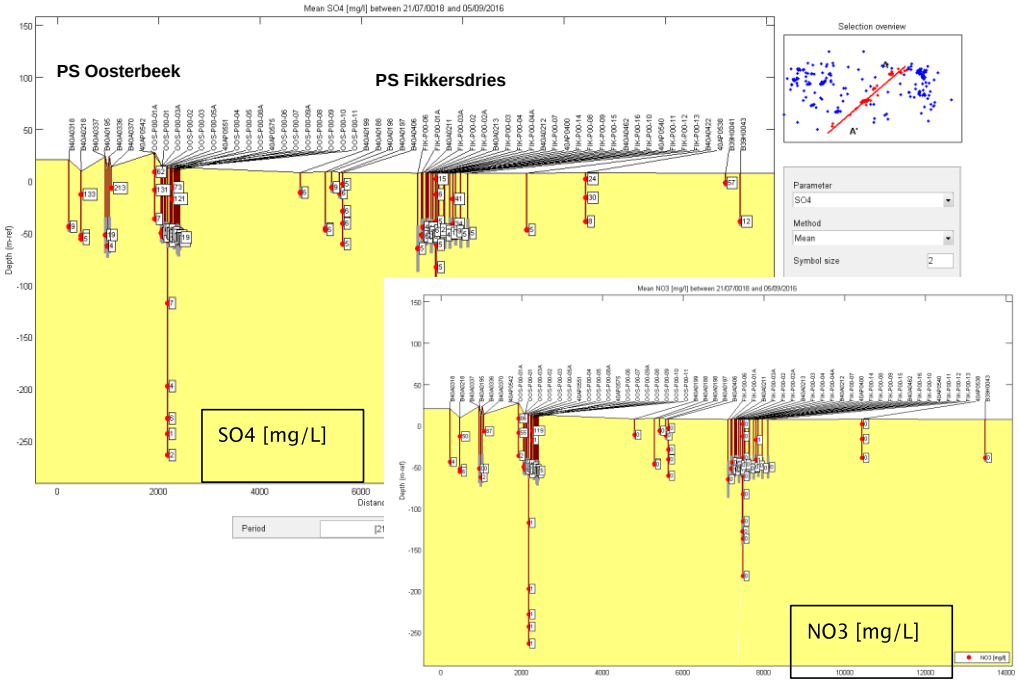
Over de waterkwaliteit in het studiegebied zijn diverse rapporten verschenen (zie referenties). Enkele beelden daaruit volgen in onderstaande figuren. Verder is een Tabel I.1 samengesteld, waarin een overzicht van de ruwwaterkwaliteit van de 6 pompstations, de Rijn bij Lobith en de Linge bij Snedenhoek.



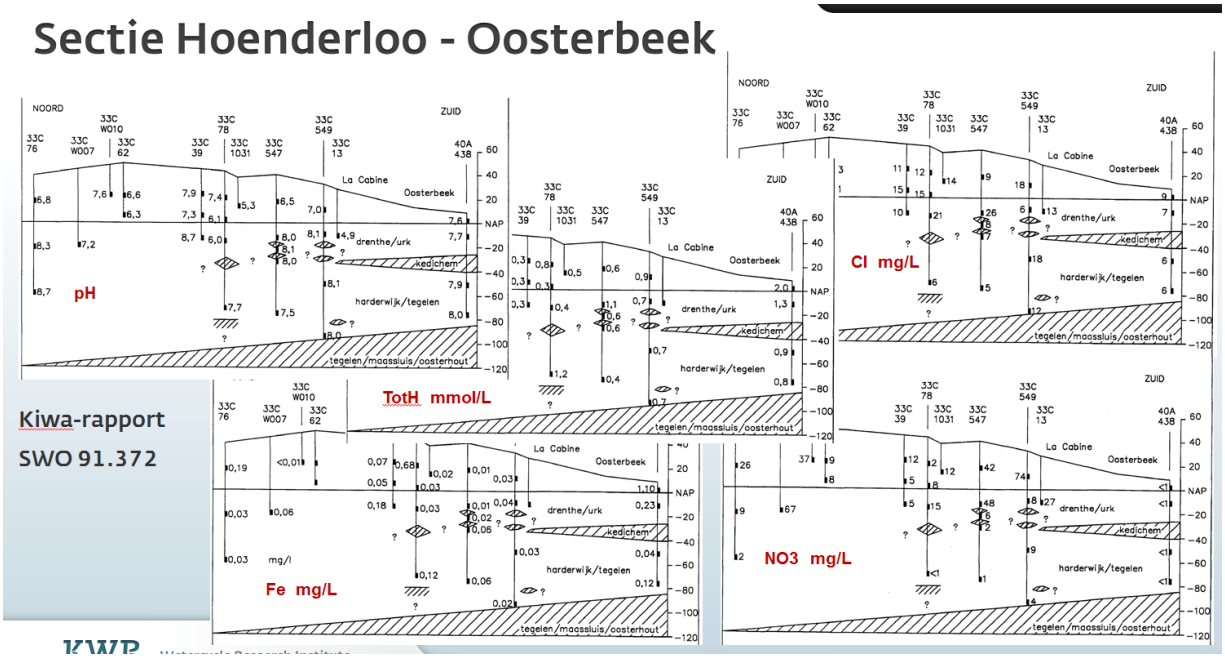
Figuur I.2 Diepteligging van het zoet-zout grensvlak (1000 mg Cl/L) medio jaren 70 (fragment van Schoute 1976), met rechts een NW-ZO doorsnede volgens Meeuwissen en Vogelaar (1990).



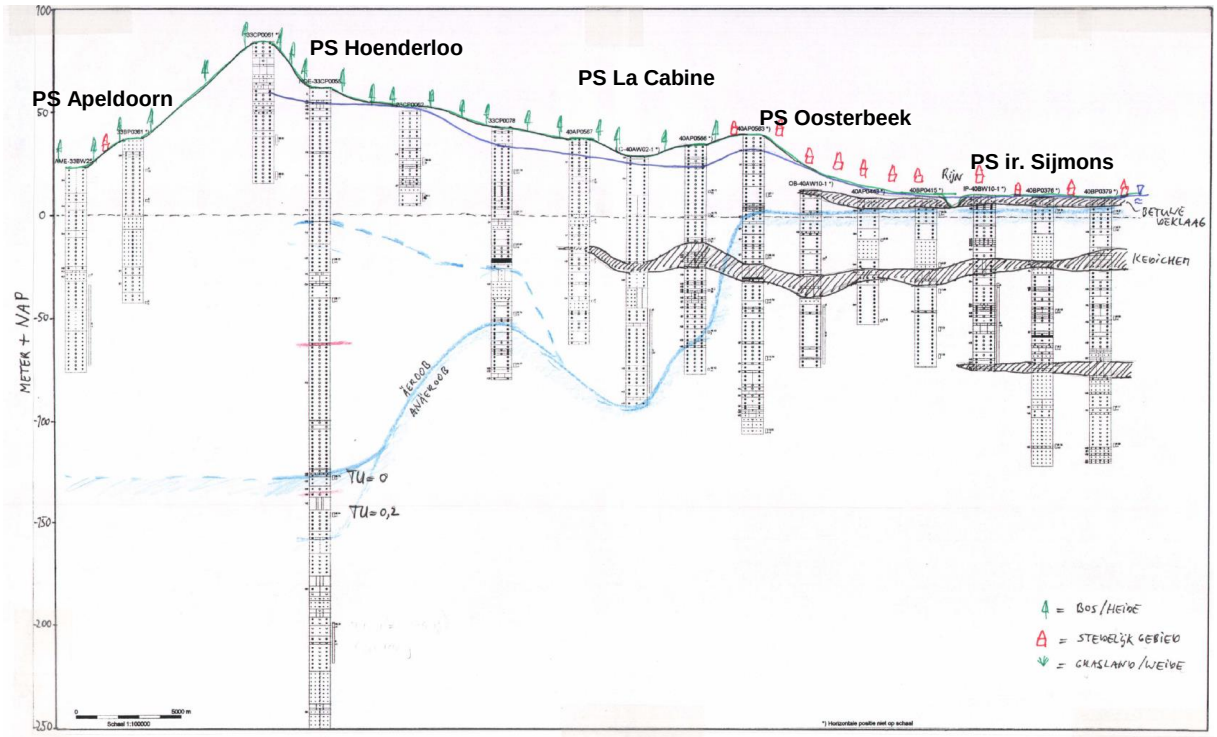
Figuur I.3 NW-ZO doorsnede over pompstations Oosterbeek en ir. Sijmons volgens Meeuwissen en Vogelaar (1990), met de totale hardheid (in mmol/L) van het grondwater rond 1989. Voor ligging profiel zie Figuur.I.2.



Figuur I.4 NO-ZW profiel over PS Oosterbeek en Fikkersdries, gebaseerd op alle aanwezige data in periode 1918-2016.



Figuur I.5 Hydrochemisch N-Z profiel over de winningen Hoendeloo, La Cabine en Oosterbeek. Naar Super et al. (1992).

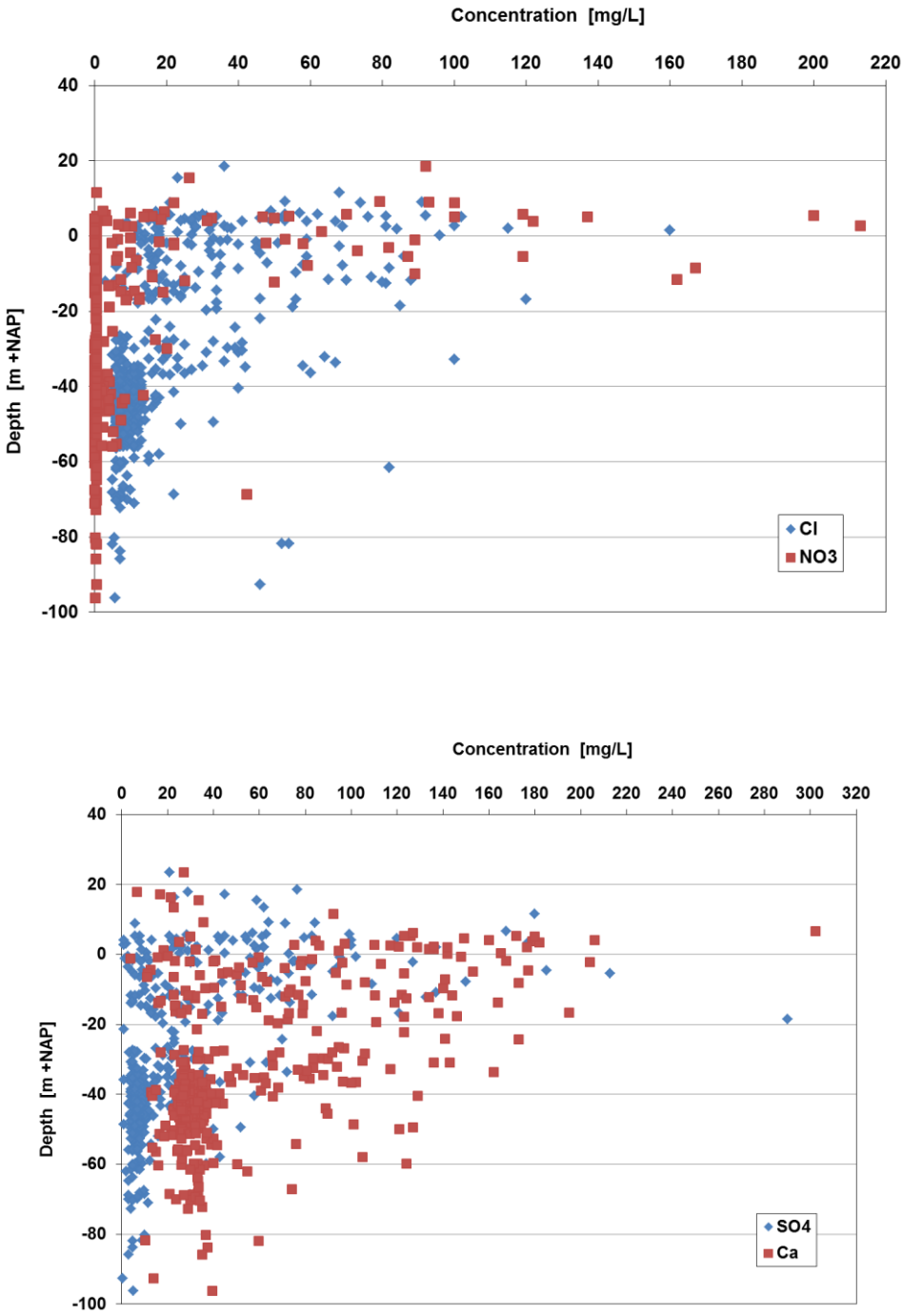


Figuur I.6 Geochemische N-Z doorsnede met 5 pompstations van Vitens. Naar Van Beek & Laeven 1999.

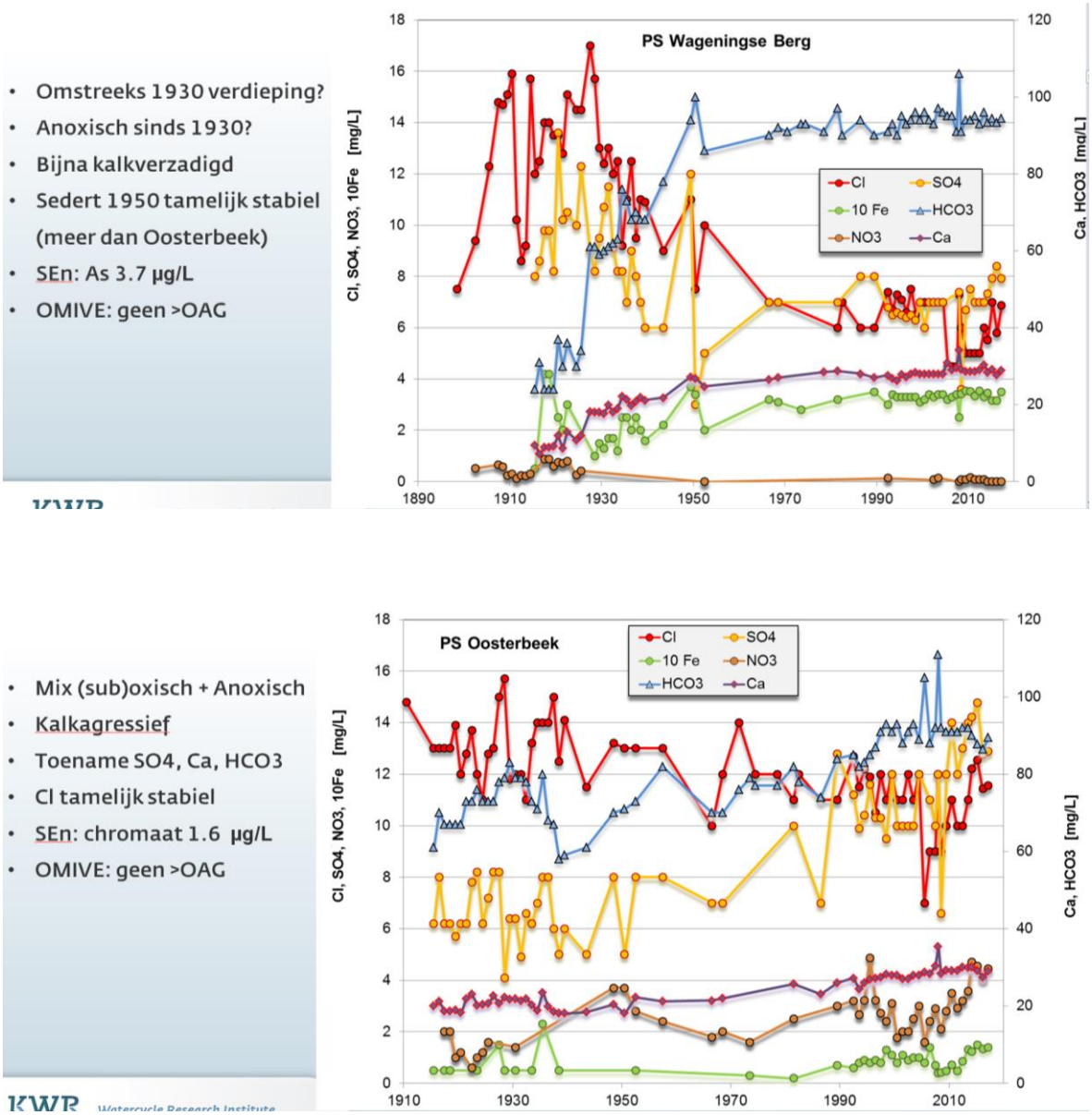
TABEL I.1 Overzicht van de gemiddelde kwaliteit van ruwwater van de 6 pompstations (sortering op afnemende Y-coördinaat), de Rijn bij Lobith en de Linge bij Snedenhoek (tNWv Elst). Tritium data uit 1983, ^{2}H, ^{13}C en ^{18}O uit 2008 (datafiles Stuyfzand).

	PS		Ooster-beek	Wagening-se Berg	Sijmons	Fikkers-dries diep	Fikkers-dries	Hemmen	Zetten	Rijn 1880	Rijn 1967-1976	Rijn 2015	Linge
Locatie	X	m	186.9	177.1	191.2	183.2	183.1	175.7	179.2	Lobith	Lobith	Lobith	185.3
	Y	m	443.5	442.2	440.7	439.7	439.6	439.1	438.1				438.1
	MV	m+NAP	12-16	11-20	10.6	8.1	7.9	7.3	7.6				
	Top putfilter	m-MV	53	53	38	120	42	38	50				
	Basis putfilter	m-MV	80	89	84	152	78	62	78				
	Q	Mm3/j	1.9	3.1	5.5-3.7		13-12	2-2.9	4.2-3.4			60591	
	Wells	n	9	15	12	1	13	7	10				
	Start	jaar	1910	1898	1981	1972	1962	2007	2007				
	Monstername	jaar	2015	2015	2015	1998	2015/12	2015	2015	1880	1967-76	2015	2015
Algemeen	EGV	µS/m	194	163	455	260	274	151	179	333	868	601	688
	pH		7.21	8.04	7.60	7.9	7.71	8.11	7.99	7.7	7.22	8.02	7.91
	CO2	mg/L	9.6	1.7	13.1	6	5.2	1.6	2.2				
	O2	mg/L	<1	<1	<1	0.2	<1	<1	<1	11.5	2.2	11.1	10.2
	CH4	µg/L	<5	15	168	<10	51	11	55				
	Tot. Hh.	mg/L	0.89	0.83	2.27		1.41	0.75	0.94			2.26	
	SI	mg/L	-1.05	-0.16	0.16	0.09	-0.12	-0.14	-0.10				
	DOC	mg/L	<0.5	3.5	1.0	0.6	0.9	0.6	<0.5	2	5.5	2.46	2.9
	SiO2	mg/L	12.6	11.6	14.8	16.1	12.4	12.5	12.2	6.0		4.9	
Anionen	Cl	mg/L	12.6	7.0	26.1	7	15.5	6.4	6.2	12	178	81.9	66.9
	SO4	mg/L	14.8	7.9	20.3	5	11.5	4.1	7.0	35	85	60.9	59.9
	HCO3	mg/L	88	94	265	168	157	91	108	160	150	177	229
	NO3	mg/L	4.54	<1	<1	<0.5	<1	<1	<1	0.35	19	10.3	6.4
	NO2	mg/L	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01			0.04	0.04
	o-PO4	mg/L	0.07	0.12	0.34	0.34	0.15	0.12	0.12	0.05	*0.9*	0.176	
	F	mg/L	0.08	0.05	0.06		<0.05	0.09	0.06	0.116	329	0.142	
Kationen	Na	mg/L	8.5	6.4	16.1	8	9.3	6.6	6.0	5	96.9	46.8	40.8
	K	mg/L	0.75	0.55	6.84	4.3	0.68	0.53	0.54	3	7.51	4.34	4.4
	Ca	mg/L	29.1	29.1	75.2	43	48.7	26.4	33.1	50	83.1	71.6	80.8
	Mg	mg/L	4.1	2.4	9.5	5.4	4.6	2.2	2.8	9	12.2	11.4	12.1
	Fe	mg/L	0.15	0.32	1.26	0.35	0.71	0.26	0.34	0.2	0.2	0.005	0.66
	Mn	mg/L	0.05	0.13	0.16	0.03	0.17	0.13	0.10	0.25	0.07	0.006	
	NH4	mg/L	<0.05	0.040	0.43	0.25	0.03	0.03	0.03	0.02	0.6	0.078	0.12
Sporenelementen	Ag	µg/L	*<0.05*	*<0.05*	*<0.05*		*<0.05*	<1	<1				
	Al	µg/L	<2	<2	2.8	<5	2.5	2.4	11.3	61		<8	
	As	µg/L	0.9	3.7	1.9	<2	1.5	4.1	1.1	0.8	5	0.8	
	B	µg/L	<10	15	33	<100	18	<10	<10	15	*143*	55	
	Ba	µg/L	3.3	7.1	38.4	5	24.2	11.9	14.6	30	*141*	74.4	
	Be	µg/L	<0.05	<0.05	<0.05		<0.05	<0.1	<0.1			<0.01	
	Br	µg/L	*35.0*	*26.0*	*67.0*		*27.0*			41	*250*	142	
	Cd	µg/L	<0.05	<0.05	<0.05	<0.1	<0.05	<0.1	<0.1	0.002	0.44	0.025	
	Ce	µg/L	<1	<1	<1		<1	<1	<1				
	Co	µg/L	0.11	0.05	*<0.02*	<2	*0.02*	0.09	0.08	3	4		
	Cr	µg/L	1.59	<0.5	0.17	<2	<0.5	<0.5	<0.5		2.2	0.21	
	Cu	µg/L	0.8	2.2	<0.5	<2	<0.5	<0.5	<0.5	0.7	9.2	1.9	2.3
	La	µg/L	<0.5	<0.5	<0.5		<0.5	<0.5	<0.5				
	Li	µg/L	1.8	1.3	5.4		1.3	1.1	<1	5		15.2	
	Mo	µg/L	*0.1*	*0.2*	*0.4*		*0.3*	<1	<1			1.71	
	Nd	µg/L	<0.5	<0.5	<0.5		<0.5	<0.5	<0.5				
	Ni	µg/L	2.5	<1	1.5	<2	3.5	1.1	3.1	1.2	6.5	1.1	1.4
	Rb	µg/L	*0.26*	*0.26*	1.4		*0.67*	<0.5	<0.5			4.1	
	Sa	µg/L	<0.5	<0.5	<0.5		<0.5	<0.5	<0.5				
	Sb	µg/L	*<0.05*	*<0.05*	*<0.05*	<2	*<0.05*	<1	<1	0.07		0.26	
	Se	µg/L	<0.5	<0.5	<0.5	<2	<0.5	<0.5	<0.5			0.25	
	Sr	µg/L	86	79	284		146	74	96	219		500	
	U	µg/L	*0.52*	*<0.02*	*<0.02*		*<0.02*	<1	<1			0.71	
	V	µg/L	<0.2	<0.2	<0.2		<0.2	<0.5	<0.5		2	1.1	
	Zn	µg/L	4.3	12.1	2.4	6	<5	<2	<2	14	49	5	4.2
OMIVE	Bentazon	µg/L	<0.01	<0.01	<0.01		0.02	<0.01	<0.01	0	*1*	<0.01	
	Chloridazon-de	µg/L	<0.05	<0.05	0.14		<0.05	<0.05	<0.05	0	*0*	0.05	
	Chloridazon-me	µg/L	<0.02	<0.02	0.04		<0.02	<0.02	<0.02	0	*0*		
	Dikegulac	µg/L					0.014			0	*2*		
	MCPP	µg/L	<0.02	<0.02	<0.02		0.02	<0.02	<0.02	0	*0.2*	<0.05	
	MTBE	µg/L	<0.05	<0.05	0.11		<0.05	<0.05	<0.05	0	*0*	0.04	
	TCM	µg/L	0.15	<0.05	<0.05		<0.05	<0.05	<0.05	0	3.5	0.01	
	THF	µg/L	<0.1	<0.1	0.18		<0.1	<0.1	<0.1	0			
Isotopen	2H	‰ SMOW	-45.4	-53.4	-40.9		-46.1			-70			
	3H	TU	2.5	<0.4	<0.4	0	<0.8			4	199	37.3	
	13C	‰ PDB	-12.2	-10.8	-13.5	-14.3	-12.25						
	14C	%				27.4	32.9						
	18O	‰ SMOW	-7.8	-7.4	-6.5	-6.99	-7.5			-10	-9.6	*-8.8*	
Ratio's e.d	Ca/Mg	mg/L	7.1	11.9	7.9	8.0	10.6	12.2	11.9	5.6	6.8	6.3	6.7
	Ca/Sr	mg/L	339	367	265		334	356	346	228		143	
	Cl/Br	mg/L	359	269	389		573			293	712	577	
	BEX	meq/L	0.35	0.28	0.87	0.69	0.33	0.28	0.32	0.67	0.03	0.61	0.86

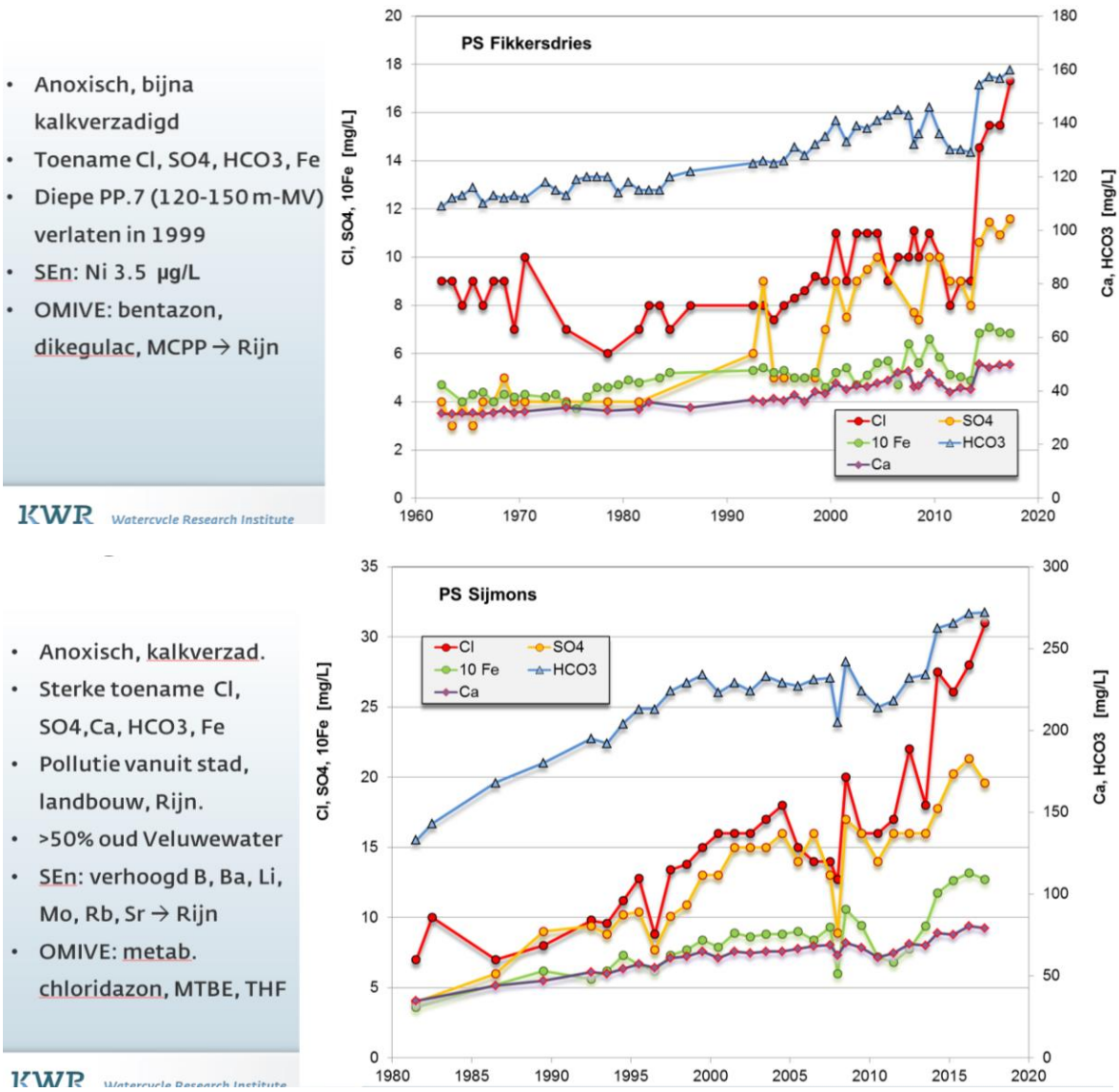
Hoe de concentraties van Cl, NO_3, SO_4 en Ca met de diepte verlopen in het studiegebied, is weergegeven in Figuur I.7. Verder is het kwaliteitsverloop van het ruwwater van 4 winningen in beeld gebracht: P.S. Wageningseberg en P.S. Oosterbeek in Figuur I.8, en P.S. Fikkersdries en P.S. ir. Sijmons in Figuur I.9. Deze verlopen laten interessante trends zien; zij zijn links van de figuren samengevat met vermelding van enkele karakteristieken van het gewonnen grondwater.



Figuur I.7 Verloop van de concentratie Cl, NO_3, SO_4 en Ca met de diepte in het studiegebied. Afgekapt beneden 100 m-NAP.



Figuur I.8 Ontwikkeling in de ruwwaterkwaliteit van de puttenvelden Wageningse Berg en Oosterbeek. Gebaseerd op KIDAP (gegevens tot 2008) en recentere data van Vitens. N.B.: Laatste 4 jaar gebaseerd op ongewogen gemiddelden van alle pompputten behorende bij puttenveld.



Figuur I.9 Ontwikkeling in de ruwwaterkwaliteit van de puttenvelden Fikkerdries en ir. Sijmons. Gebaseerd op KIDAP (gegevens tot 2008) en recentere data van Vitens. N.B.: Laatste 4 jaar gebaseerd op ongewogen gemiddelden van alle pompputten behorende bij puttenveld.

Bijlage II Analytische benadering van grondwaterleeftijd

Een bekende schatting van de ouderdom van grondwater gaat uit van de formule van Vogel (1967; zie Eq.3.10 in Appelo & Postma (2005)), waarbij als voorwaarden gelden: uniforme grondwateraanvulling, subhorizontale stroming, homogene en isotrope aquifer. Hierop is een uitbreiding gezocht door toevoeging van (i) de verblijftijd in de onverzadigde zone, en (ii) een tweede aquifer met een duidelijk lagere doorlatendheid dan de erboven liggende aquifer (Fig.II-1). De formule wordt dan (intuïtief) als volgt (Stuyfzand in prep):

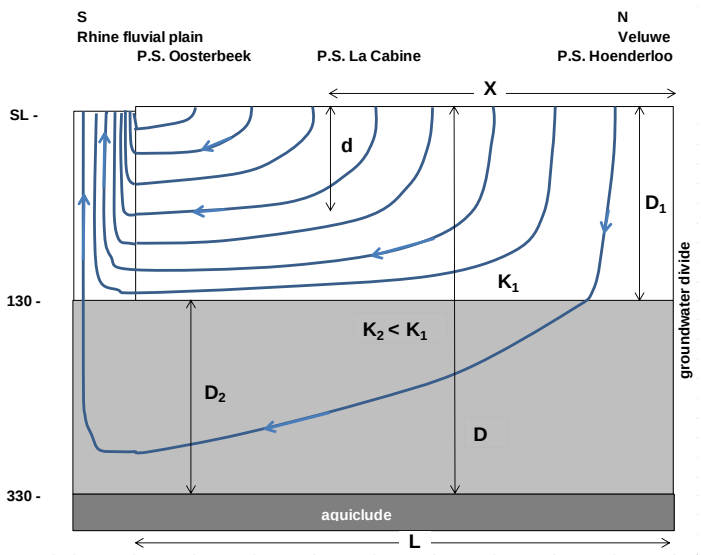
if $d<D_1$: $t_Z = \frac{0.15h}{R} + \frac{nD_1}{R-R_2}\ln(\frac{D_1}{D_1-d})$ [eq II-1]

if $d \geq D_1$: $t_Z = \frac{0.15h}{R}\frac{nD_1}{R-R_2}\ln\left(\frac{D_1}{0.01D_1}\right) + \frac{nD_2}{R_2}\ln(\frac{D_2}{D_2-(d-D_1)})$ [eq II-2]

met: $R_2 = R\frac{K_2D_2}{(K_1D_1+K_2D_2)}$ [eq II-2]

waarin: h = dikte onverzadigde zone [m];
D, D_1, D_2 = dikte waterverzadigde freatische aquifer, resp. hele aquifer, bovenste en onderste aquiferzone [m];
d = diepte meetpunt beneden grondwaterstand [m-GWT];
n = effectieve porositeit [-].
R, R2 = gemiddelde voeding van resp. bovenste en onderste aquiferzone [m/j]

Bij de berekening is de dikte van de onverzadigde zone geschat uit de maaiveldshoogte en waarnemingen op enkele meetpunten. Het gemiddelde vochtgehalte van de onverzadigde zone is gesteld op 0.15%, de grondwateraanvulling op gemiddeld 0.45 m/j en de dikte van het tweelaags aquifersysteem op max. 370 m. De benadering is alleen toepasbaar in infiltratiegebieden (zoals de Veluwe) en geeft in principe te lage uitkomsten in kwelgebieden (zoals de riviervlakte), waar ouder water opwaarts stroomt.



Figuur II-1. Schematisatie van een tweelagen aquifer, zoals bij benadering in het noord-zuid transect tussen P.S. Hoenderllop en P.S. Oosterbeek, met de parameters nodig voor toepassing van vergelijking eq 3-5.

Bijlage III Digitale kaarten en tabellen

De bijlages die horen bij hoofdstuk 3 en 5 zijn vanwege de grootte niet opgenomen in dit rapport. De volgende bestanden zijn separaat in digitaal formaat opgeleverd:

III.1 01_Stroombanen_startperiode20052018.pdf
Kaarten van stroombanen, waarbij deeltjes zijn teruggerekend vanaf 2018

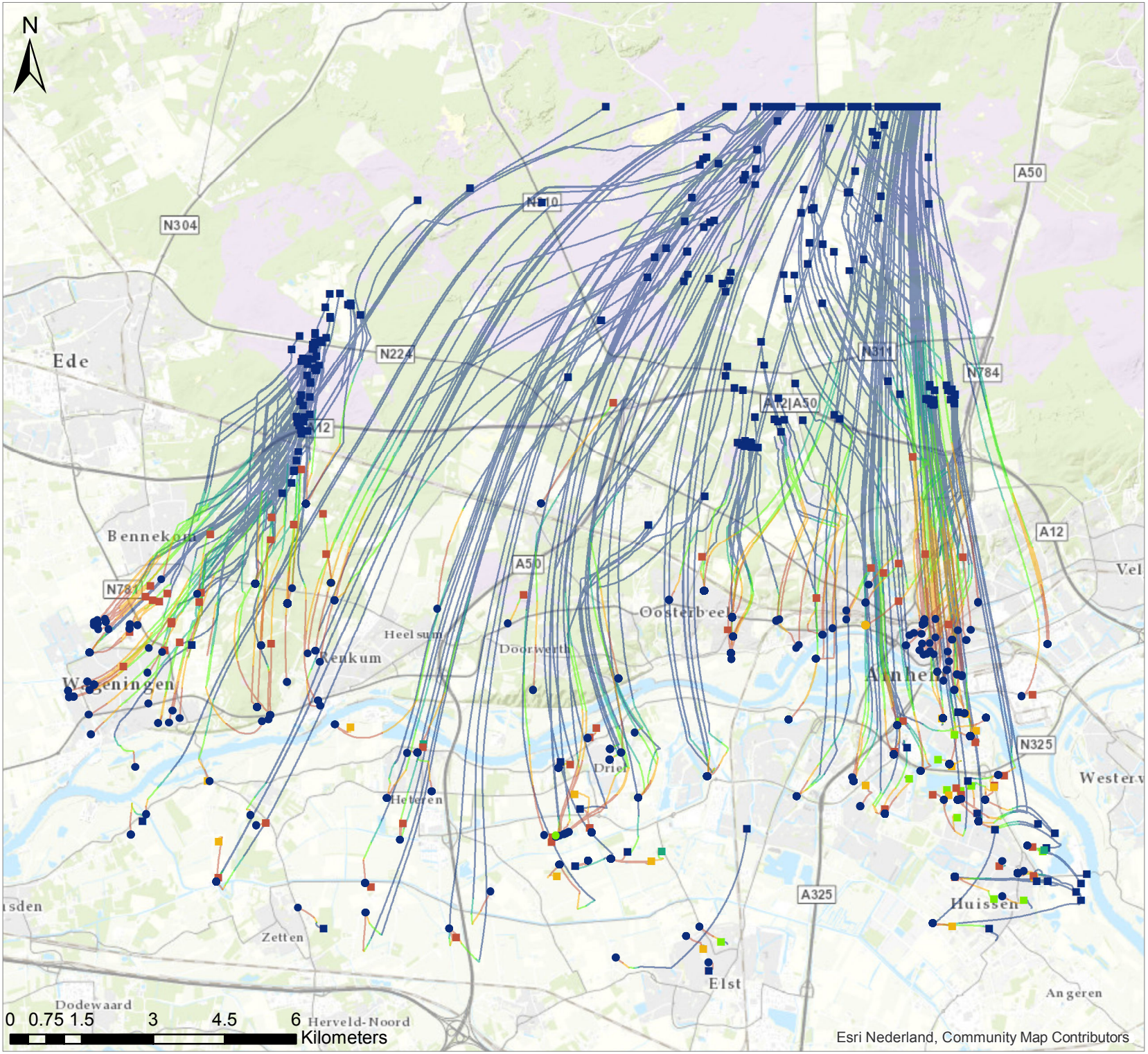
III.2 02_Stroombanen_startperiode19902005.pdf
Kaarten van stroombanen, waarbij deeltjes zijn teruggerekend vanaf 2005

III.3 03_Stroombanen_startperiode19701990.pdf
Kaarten van stroombanen, waarbij deeltjes zijn teruggerekend vanaf 1990

III.4 04_Stroombanen_startperiode19501970.pdf
Kaarten van stroombanen, waarbij deeltjes zijn teruggerekend vanaf 1970

III.5 05_Stroombanen_startperiode1950.pdf
Kaarten van stroombanen, waarbij deeltjes zijn teruggerekend vanaf 1950

III.6 06_Vergelijking_HydroChemieMORIAModel_2010-2018.xlsx
Tabel met de locaties van peilbuizen en winningen, de bijbehorende hydrochemische leeftijd en landgebruik van het intrekgebied en de leeftijd en het landgebruik volgens het model, gemiddeld voor de periode 2010-2018.
Rij 5 van deze tabel bevat de kolomnamen die gebruikt zijn voor het genereren van de GIS-kaarten met vergelijking tussen hydrochemie en stroombaanberekeningen.



Legenda

leeftijd waterkwaliteit

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

leeftijd MORIA

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

stroombaan perioden

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

Titel

Stroombanen peilbuizen - gestart in periode 2005 - 2018

Project

Overbetuwe

Opdrachtgever

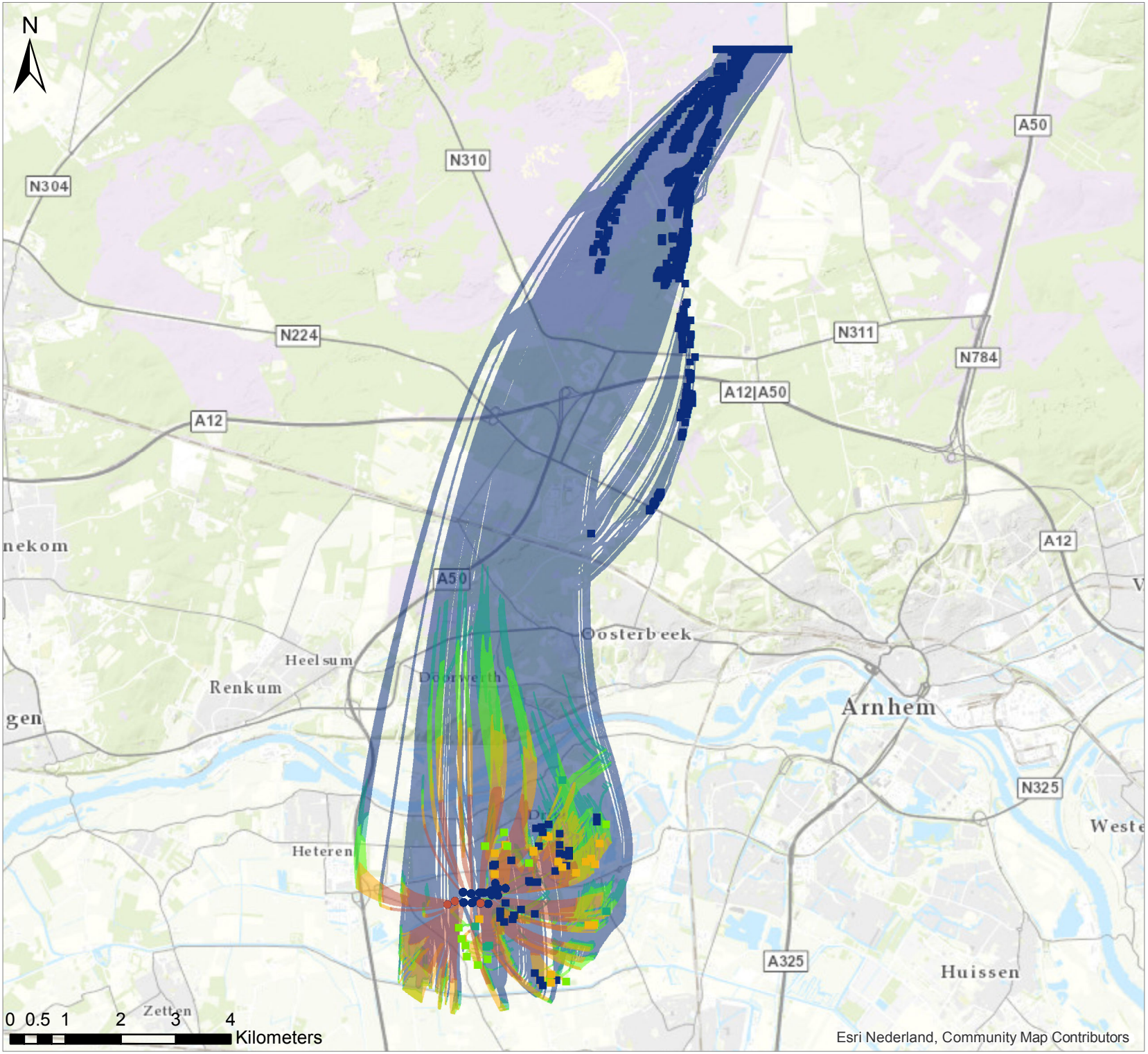
Vitens

Datum	*Schaal*
10/10/2018	1:110000

Figuur

Gecontroleerd door	*Volgnummer*
	1

Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together



Legenda

leeftijd waterkwaliteit

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

leeftijd MORIA

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

stroombaan perioden

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

Titel

Stroombanen Fikkersdries - gestart in periode 2005 - 2018

Project

Overbetuwe

Opdrachtgever

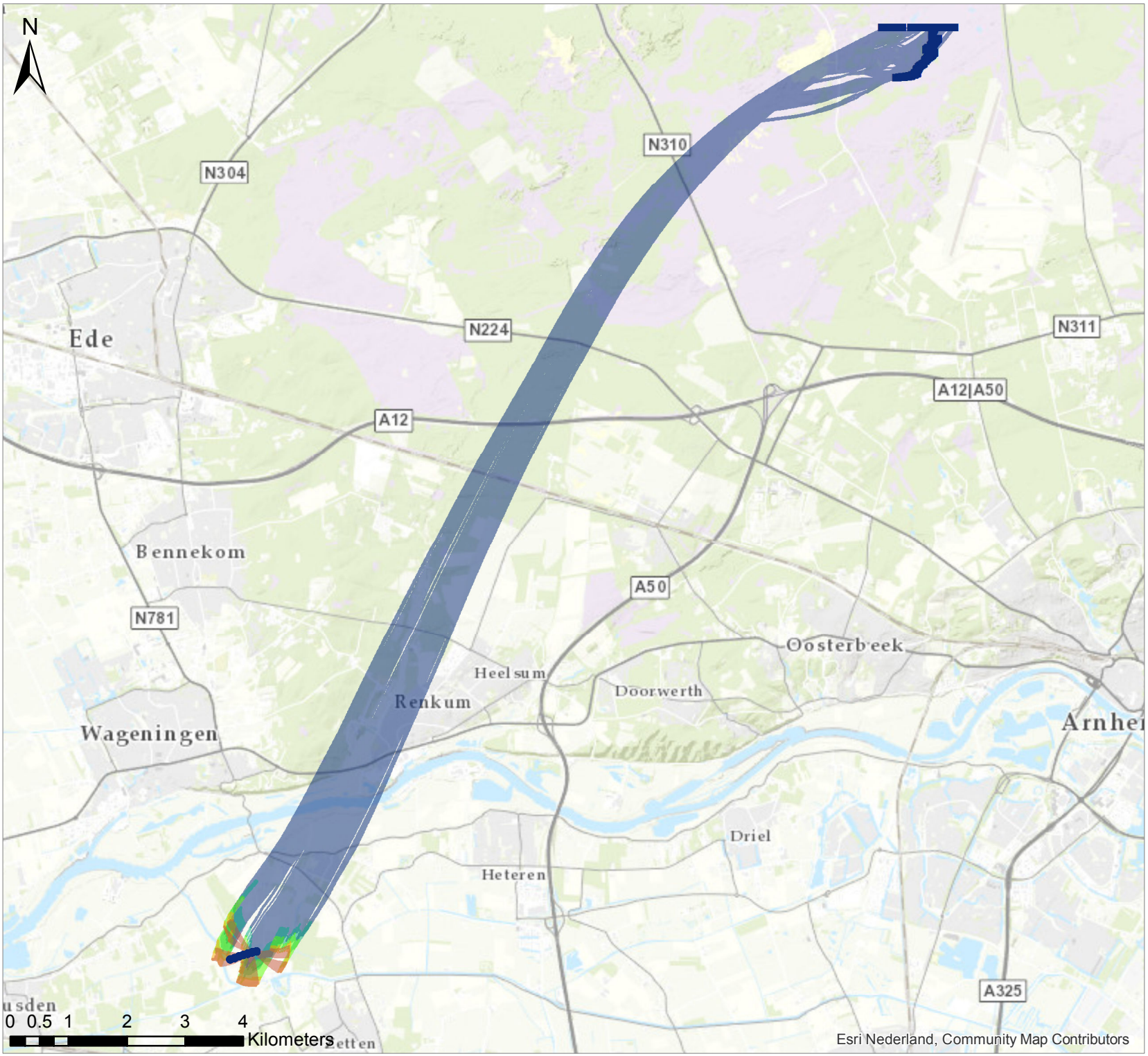
Vitens

Datum	*Schaal*
10/10/2018	1:95000

Figuur

Gecontroleerd door	*Volgnummer*
	1

Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together



Legenda

leeftijd waterkwaliteit

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

leeftijd MORIA

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

stroombaan perioden

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

Titel

Stroombanen Hemmen - gestart in periode 2005 - 2018

Project

Overbetuwe

Opdrachtgever

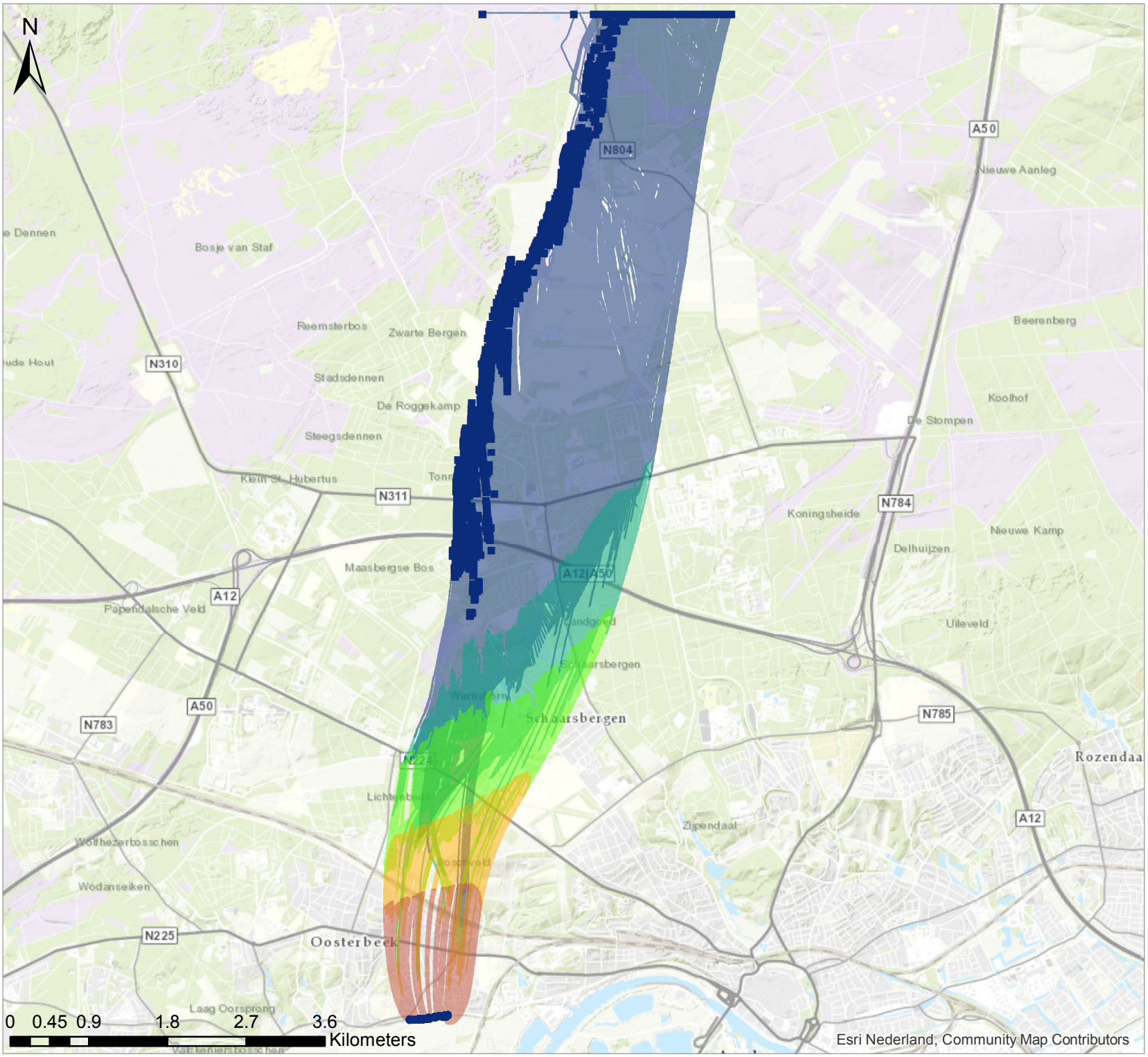
Vitens

Datum	*Schaal*
10/10/2018	1:90000

Figuur

Gecontroleerd door	*Volgnummer*
	1

Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together



Legenda

leeftijd waterkwaliteit	leeftijd MORIA
2005-2018	2005-2018
1990-2005	1990-2005
1970-1990	1970-1990
1950-1970	1950-1970
<1950	<1950

stroombaan perioden

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

Titel

Stroombanen Oosterbeek - gestart in periode 2005 - 2018

Project

Overbetuwe

Opdrachtgever

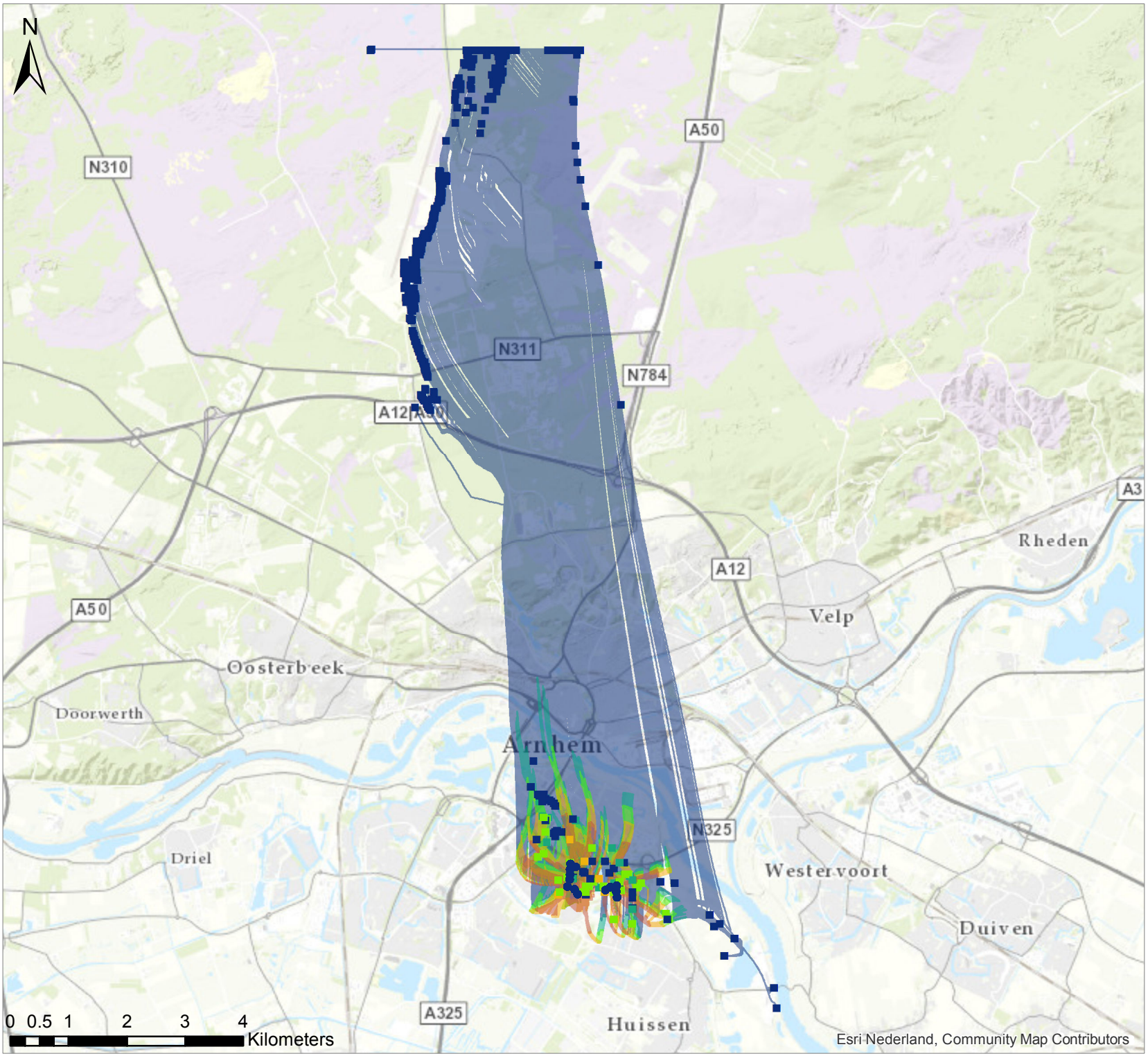
Vitens

Datum	*Schaal*
10/10/2018	1:60000

Figuur

Gecontroleerd door	*Volgnummer*
	1

Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together



Legenda

leeftijd waterkwaliteit	leeftijd MORIA
2005-2018	2005-2018
1990-2005	1990-2005
1970-1990	1970-1990
1950-1970	1950-1970
<1950	<1950

stroombaan perioden

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

Titel

Stroombanen Sijmons - gestart in periode 2005 - 2018

Project

Overbetuwe

Opdrachtgever

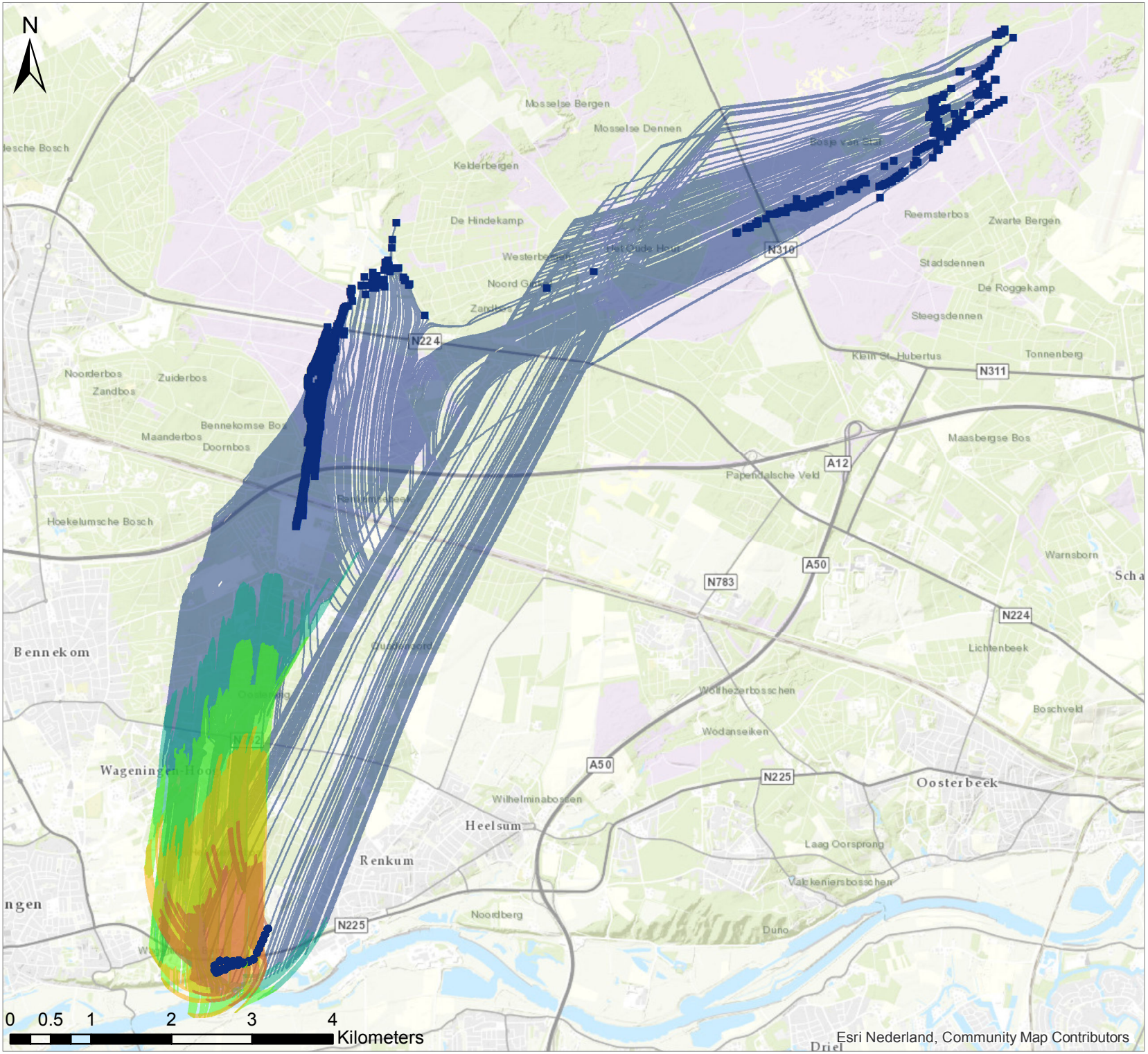
Vitens

Datum	*Schaal*
10/10/2018	1:90000

Figuur

Gecontroleerd door	*Volgnummer*
	1

Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together



Legenda

leeftijd waterkwaliteit

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

leeftijd MORIA

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

stroombaan perioden

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

Titel

Stroombanen Wageningen - gestart in periode 2005 - 2018

Project

Overbetuwe

Opdrachtgever

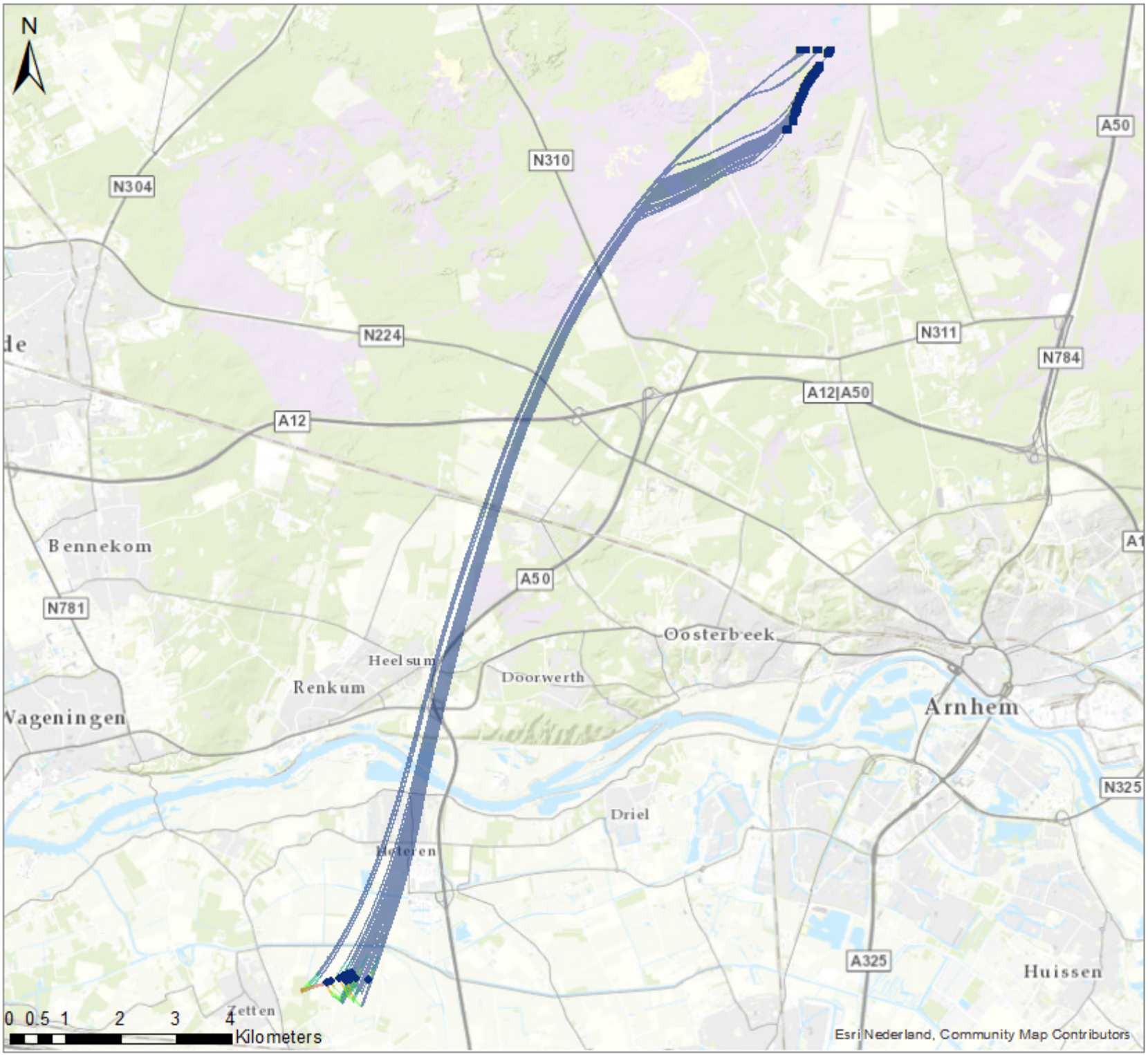
Vitens

Datum	*Schaal*
10/10/2018	1:65000

Figuur

Gecontroleerd door	*Volgnummer*
	1

Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together



Legenda

leeftijd waterkwaliteit

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

leeftijd MORIA

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

stroombaan perioden

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

Titel

Stroombanen Zetten - gestart in periode 2005 - 2018

Project

Overbetuwe

Opdrachtgever

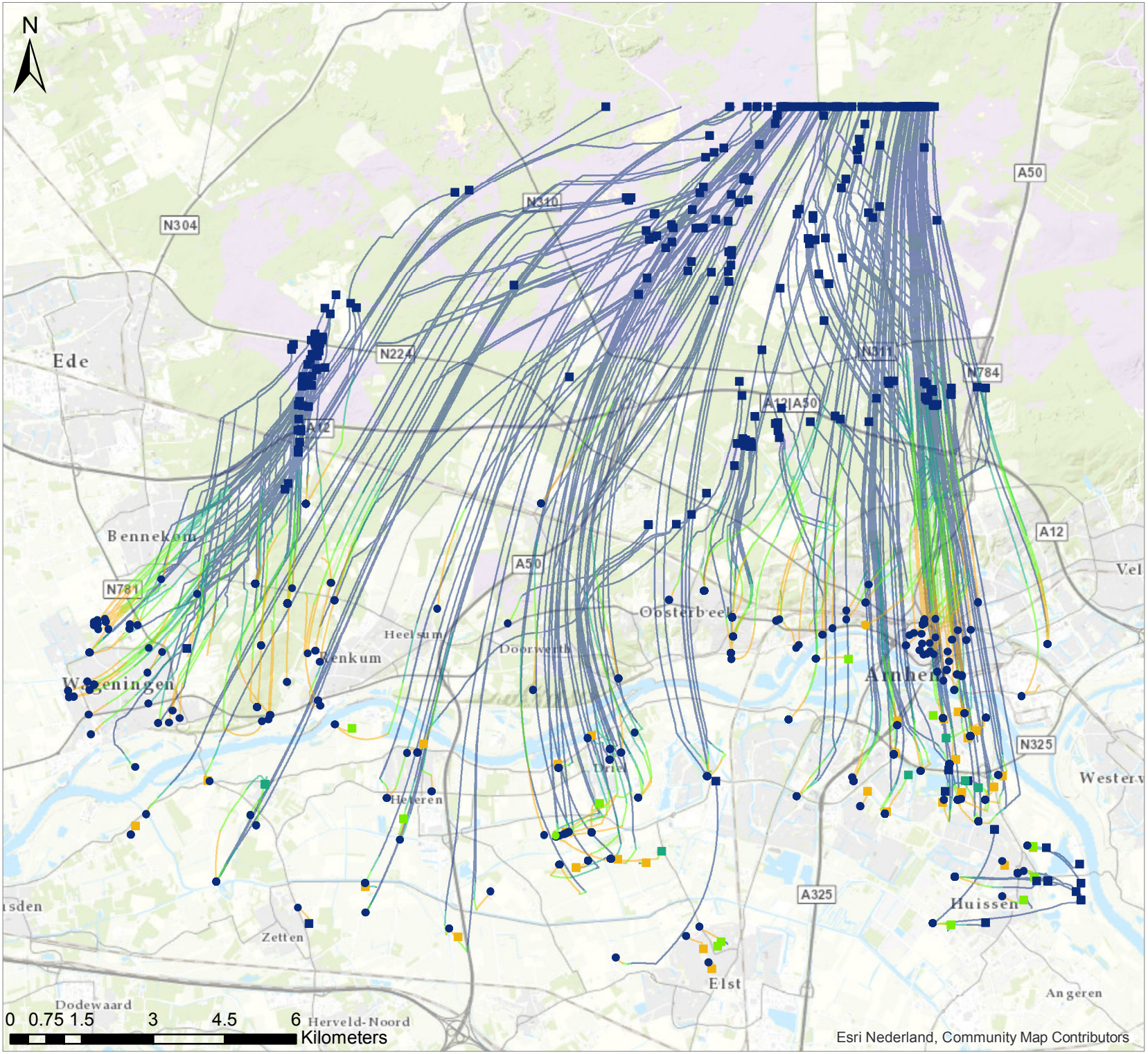
Vitens

Datum	*Schaal*
10/10/2018	1:95000

Figuur

Gecontroleerd door	*Volgnummer*
	1

Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together



Legenda

Leeftijd waterkwaliteit	leeftijd MORIA
2005-2018	2005-2018
1990-2005	1990-2005
1970-1990	1970-1990
1950-1970	1950-1970
<1950	<1950

stroombaan perioden

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

Titel

Stroombanen peilbuizen - gestart in periode 1990 - 2005

Project

Overbetuwe

Opdrachtgever

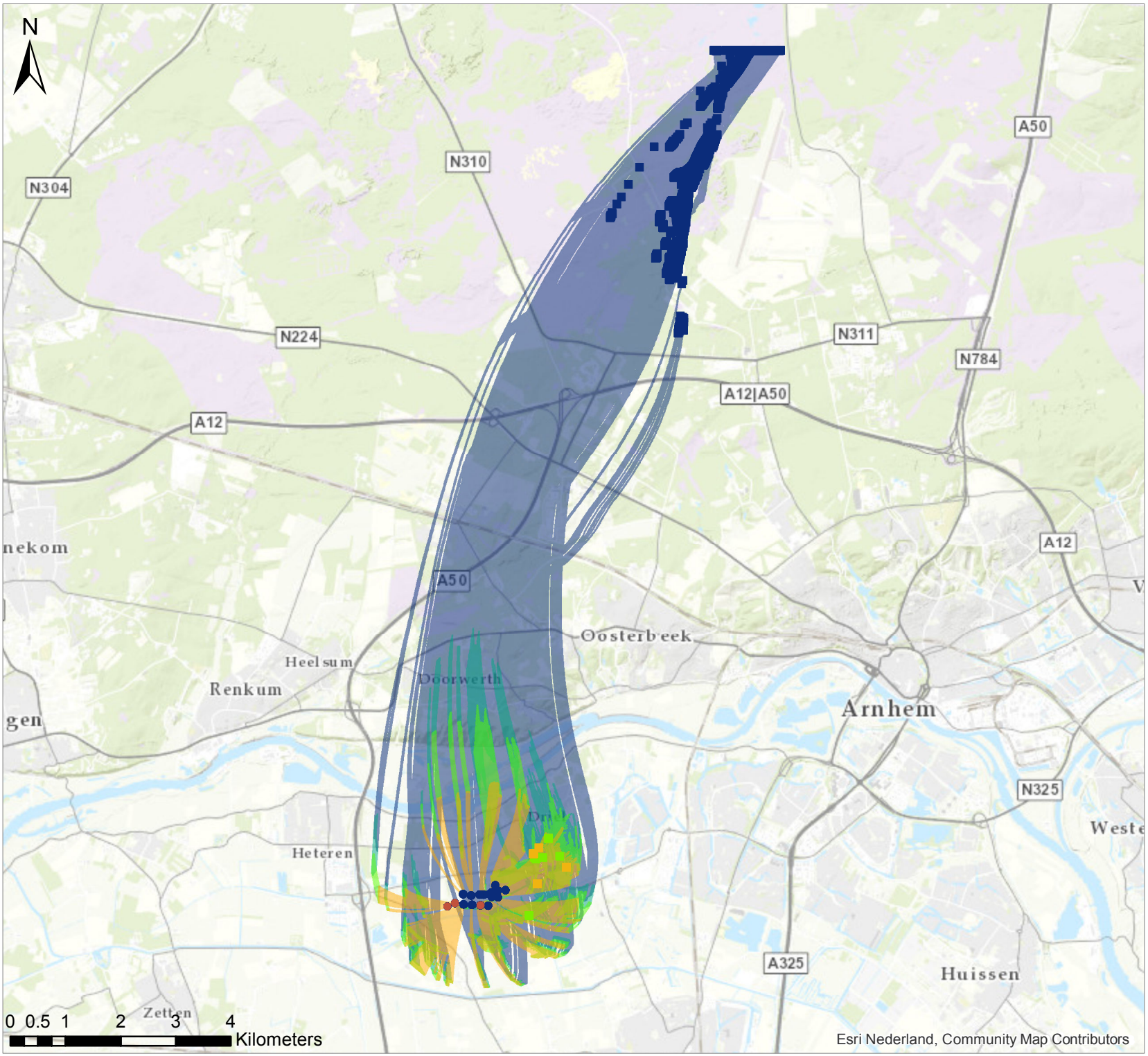
Vitens

Datum	*Schaal*
19/10/2018	1:110000

Figuur

Gecontroleerd door	*Volgnummer*
	1

Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together



Legenda

Leeftijd waterkwaliteit	leeftijd MORIA
2005-2018	2005-2018
1990-2005	1990-2005
1970-1990	1970-1990
1950-1970	1950-1970
<1950	<1950

stroombaan perioden

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

Titel

Stroombanen Fikkersdries - gestart in periode 1990 - 2005

Project

Overbetuwe

Opdrachtgever

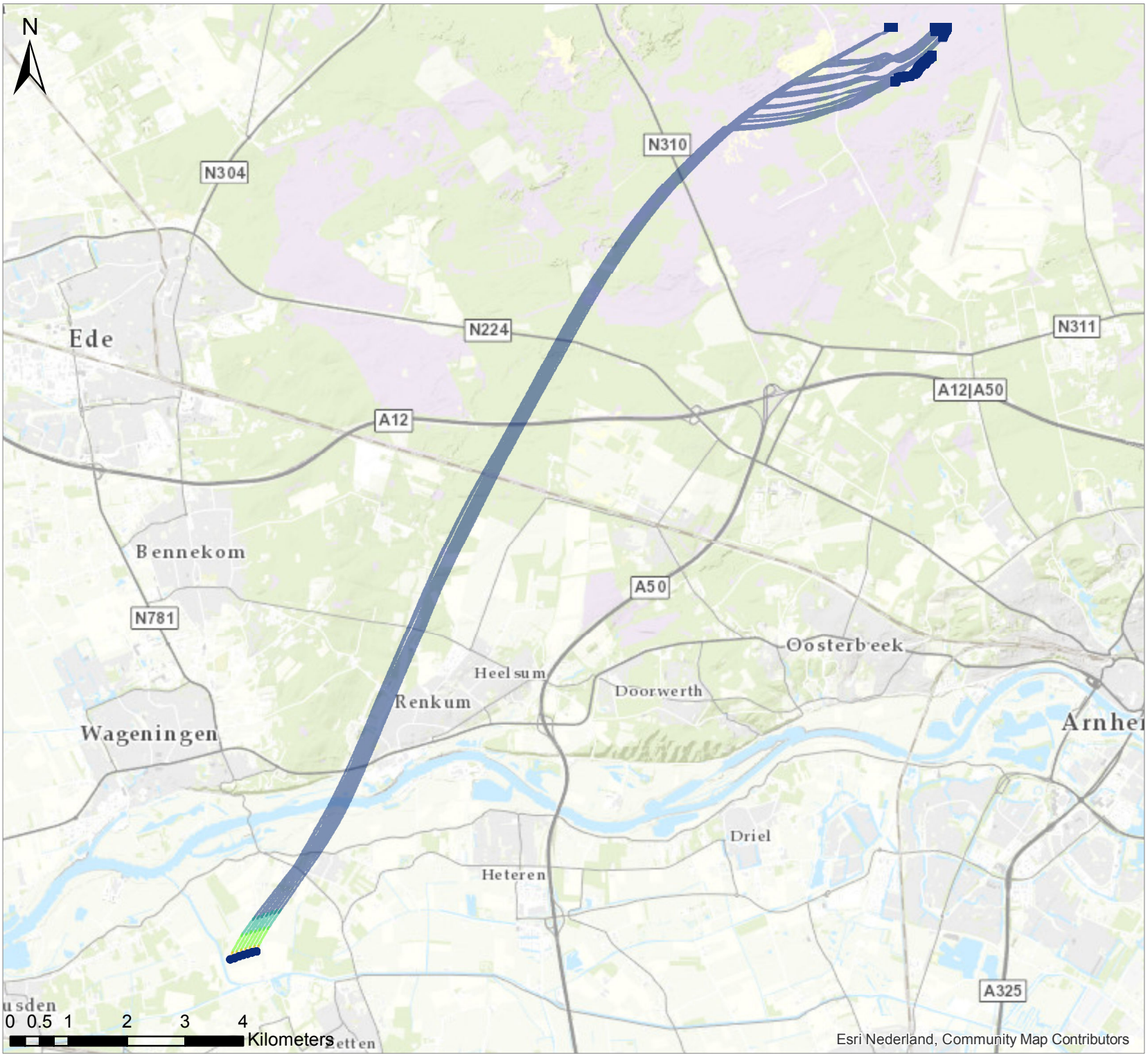
Vitens

Datum	*Schaal*
19/10/2018	1:95000

Figuur

Gecontroleerd door	*Volgnummer*
	1

Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together



Legenda

Leeftijd waterkwaliteit

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

leeftijd MORIA

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

stroombaan perioden

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

Titel

Stroombanen Hemmen - gestart in periode 1990 - 2005

Project

Overbetuwe

Opdrachtgever

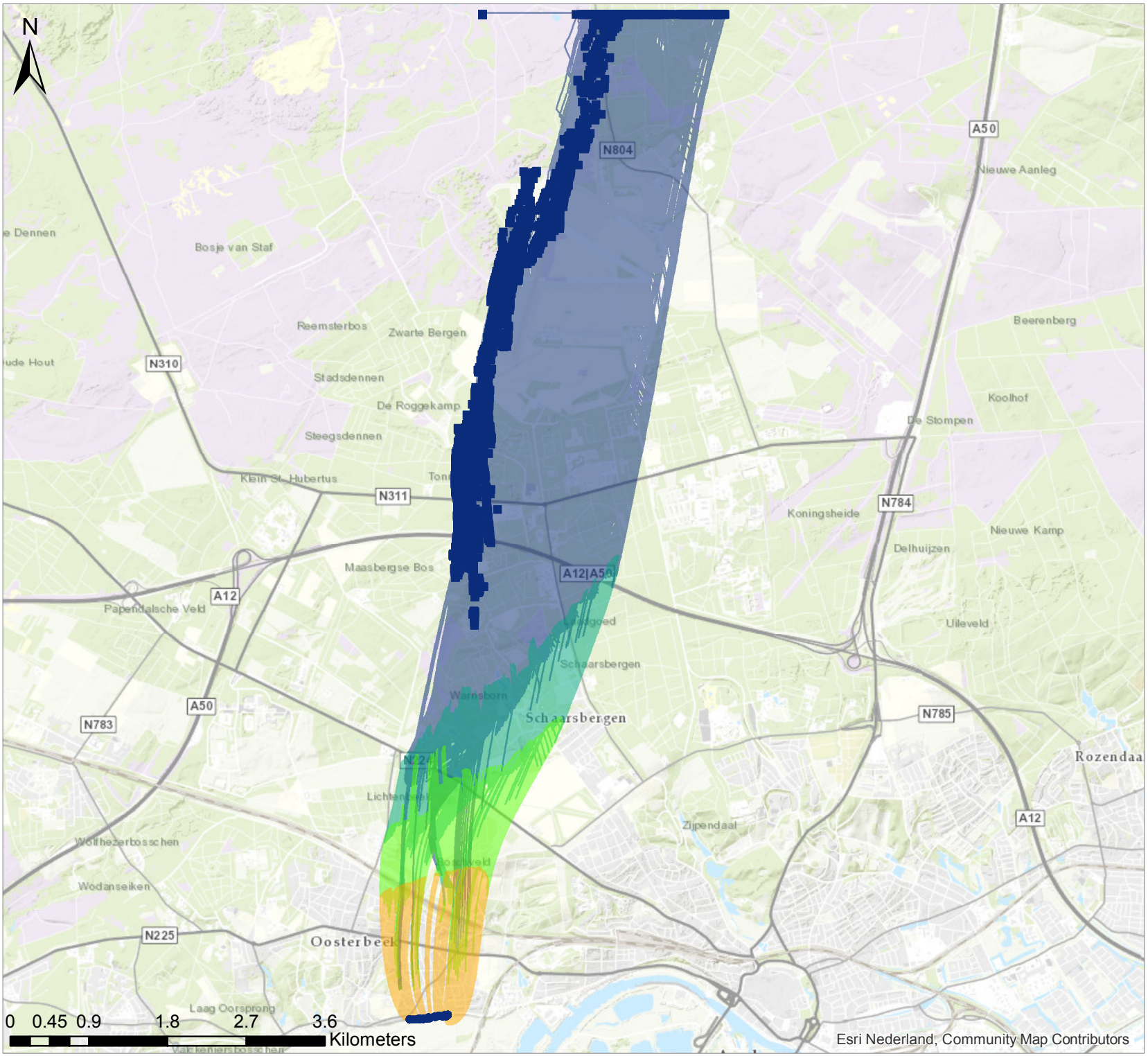
Vitens

Datum	*Schaal*
21/10/2018	1:90000

Figuur

Gecontroleerd door	*Volgnummer*
	1

Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together



Legenda

Leeftijd waterkwaliteit	leeftijd MORIA
2005-2018	2005-2018
1990-2005	1990-2005
1970-1990	1970-1990
1950-1970	1950-1970
<1950	<1950

stroombaan perioden

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

Titel

Stroombanen Oosterbeek - gestart in periode 1990 - 2005

Project

Overbetuwe

Opdrachtgever

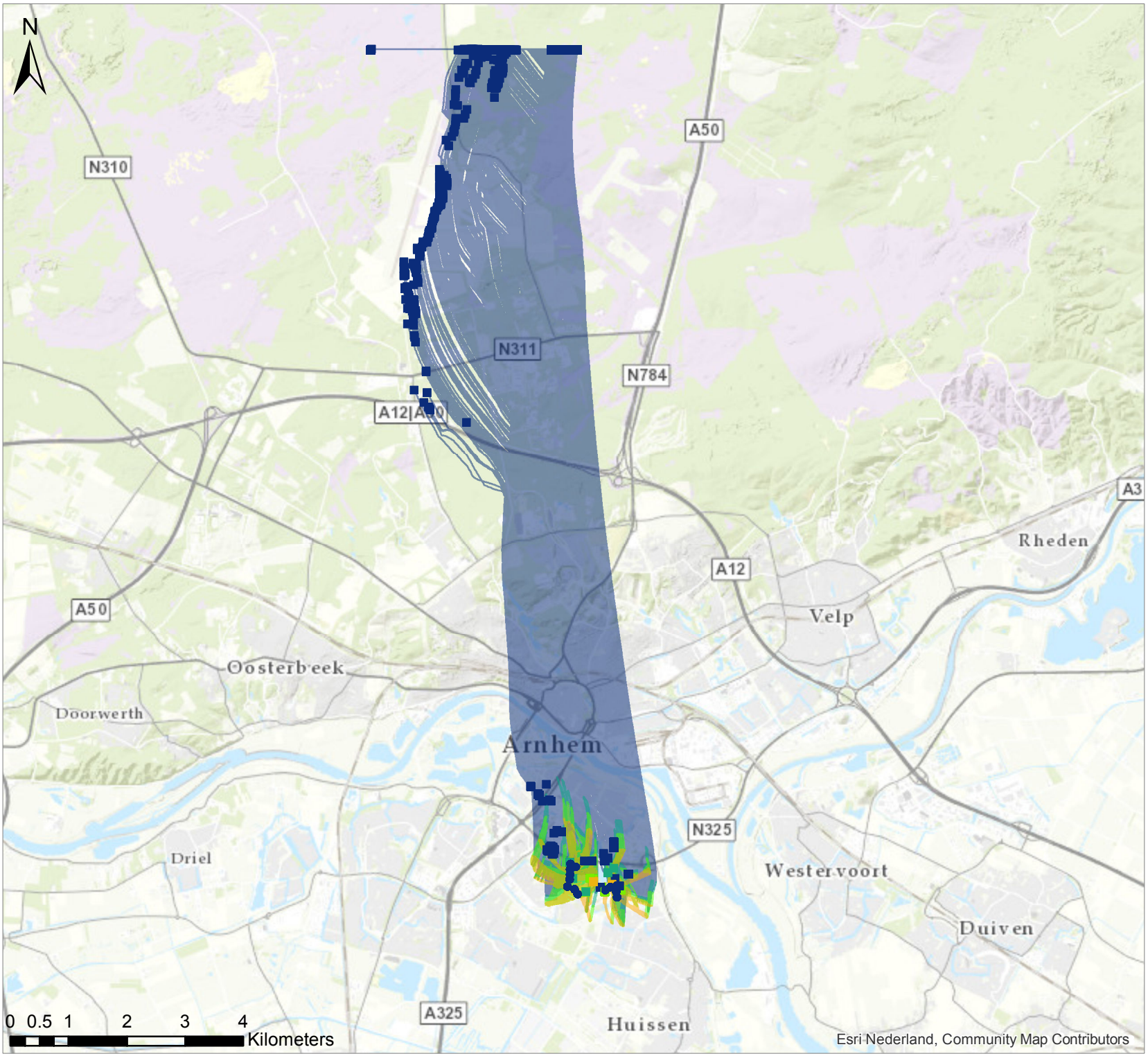
Vitens

Datum	*Schaal*
21/10/2018	1:60000

Figuur

Gecontroleerd door	*Volgnummer*
	1

Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together



Legenda

Leeftijd waterkwaliteit

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

leeftijd MORIA

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

stroombaan perioden

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

Titel

Stroombanen Sijmons - gestart in periode 1990 - 2005

Project

Overbetuwe

Opdrachtgever

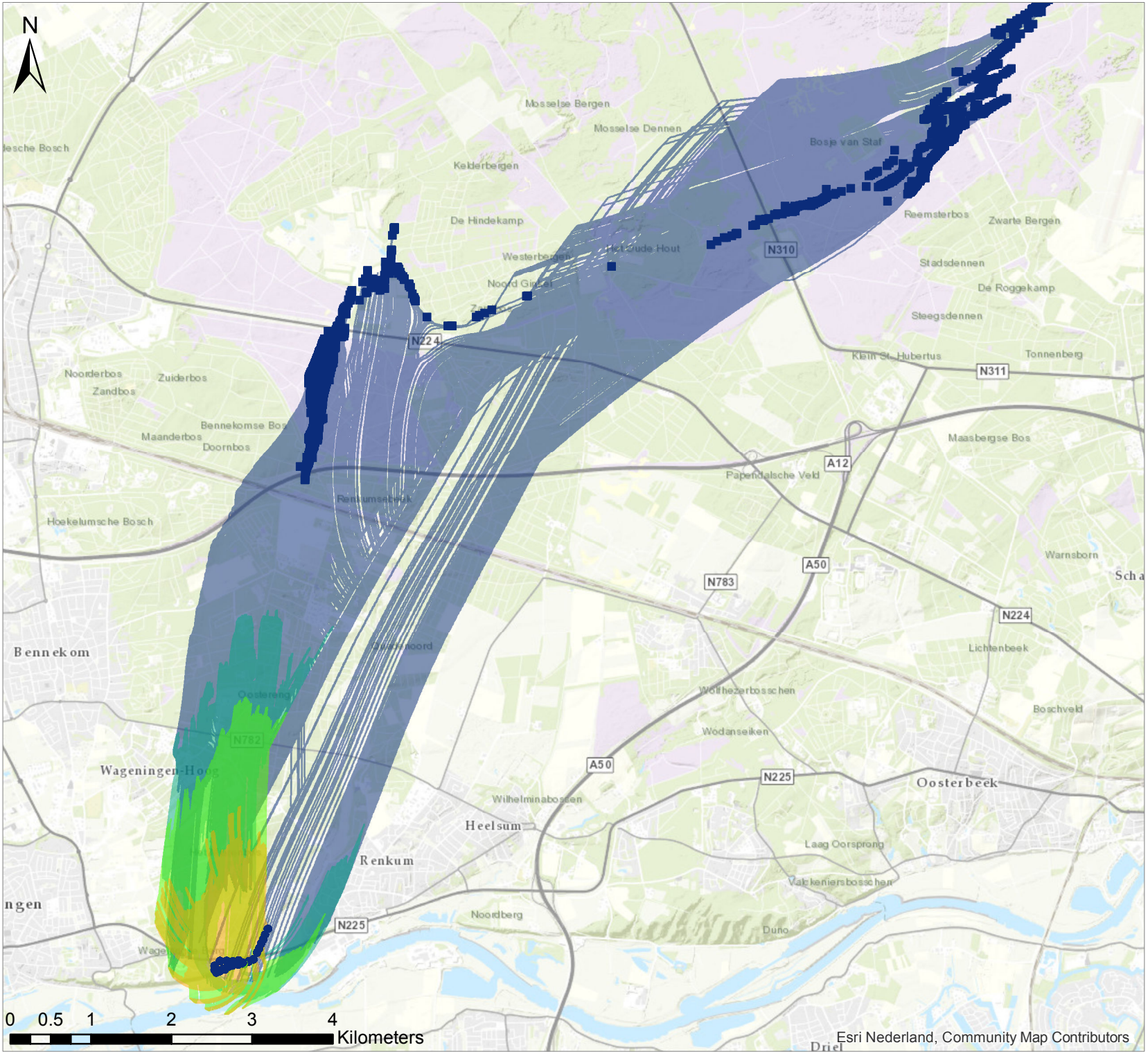
Vitens

Datum	*Schaal*
21/10/2018	1:90000

Figuur

Gecontroleerd door	*Volgnummer*
	1

Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together



Legenda

Leeftijd waterkwaliteit	leeftijd MORIA
2005-2018	2005-2018
1990-2005	1990-2005
1970-1990	1970-1990
1950-1970	1950-1970
<1950	<1950

stroombaan perioden

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

Titel

Stroombanen Wageningen - gestart in periode 1990 - 2005

Project

Overbetuwe

Opdrachtgever

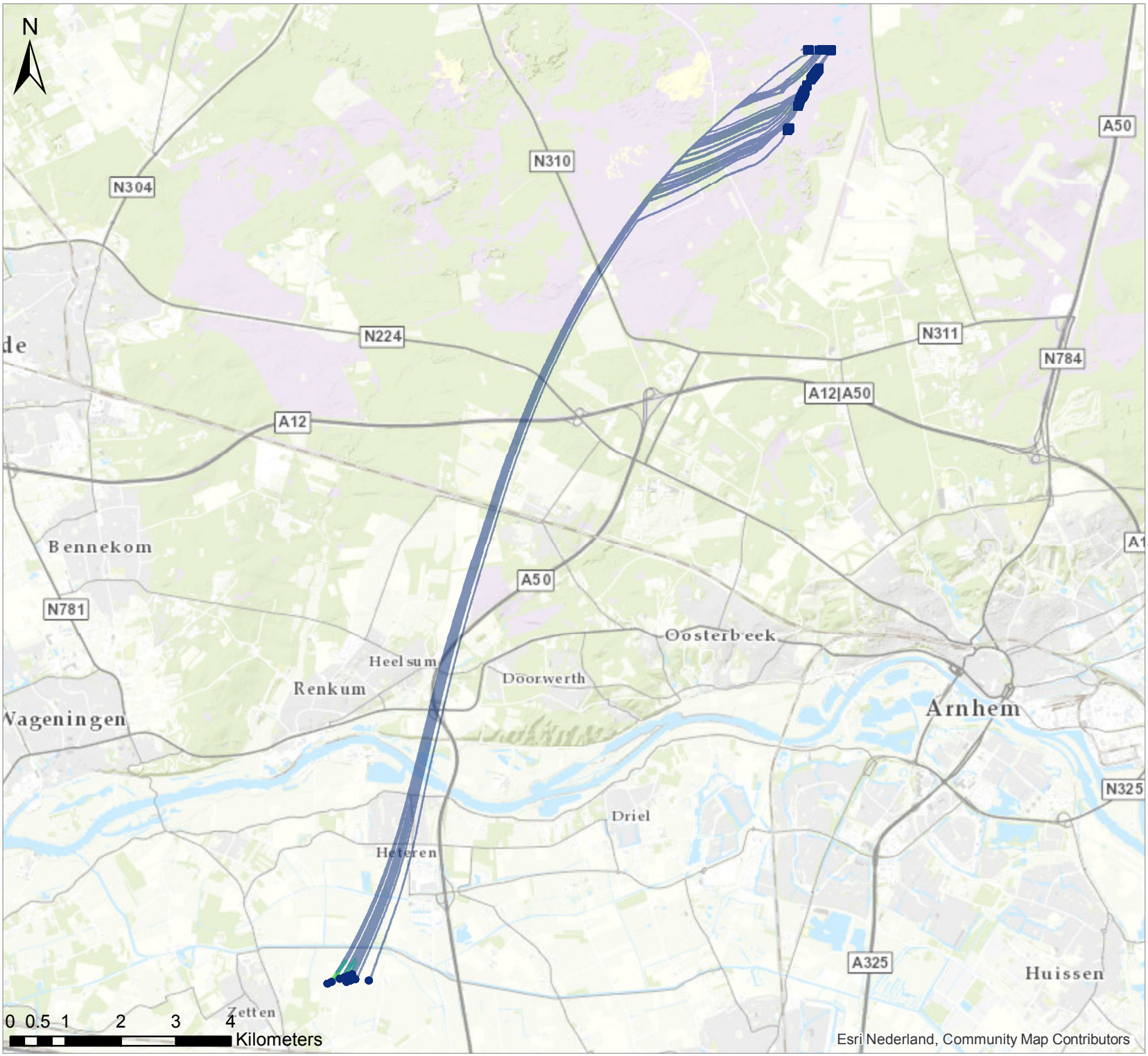
Vitens

Datum	*Schaal*
21/10/2018	1:65000

Figuur

Gecontroleerd door	*Volgnummer*
	1

Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together



Legenda

Leeftijd waterkwaliteit	leeftijd MORIA
2005-2018	2005-2018
1990-2005	1990-2005
1970-1990	1970-1990
1950-1970	1950-1970
<1950	<1950

stroombaan perioden

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

Titel

Stroombanen Zetten - gestart in periode 1990 - 2005

Project

Overbetuwe

Opdrachtgever

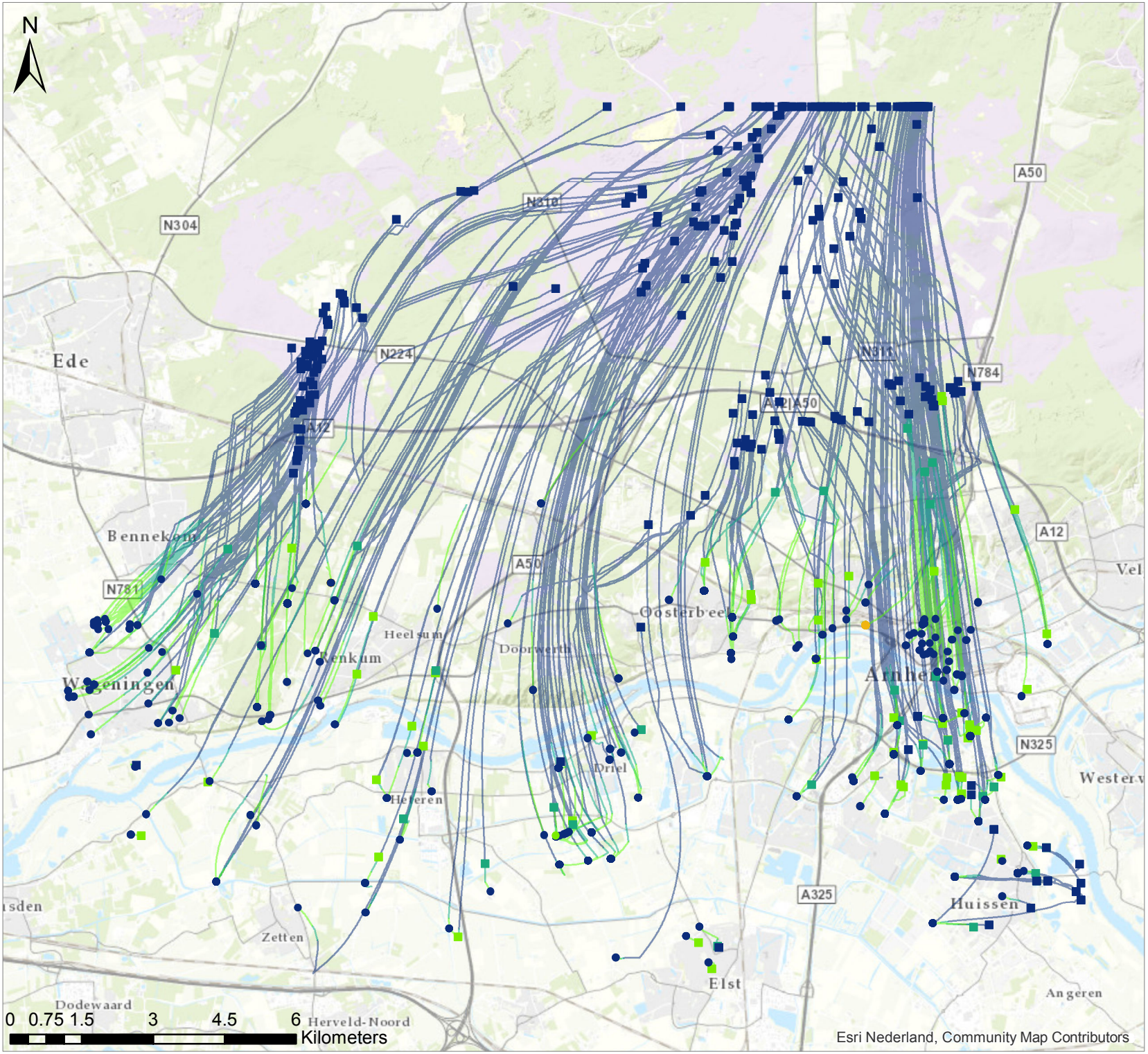
Vitens

Datum	*Schaal*
21/10/2018	1:95000

Figuur

Gecontroleerd door	*Volgnummer*
	1

Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together



Legenda

Leeftijd waterkwaliteit

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

leeftijd MORIA

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

stroombaan perioden

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

Titel

Stroombanen peilbuizen - gestart in periode 1970 - 1990

Project

Overbetuwe

Opdrachtgever

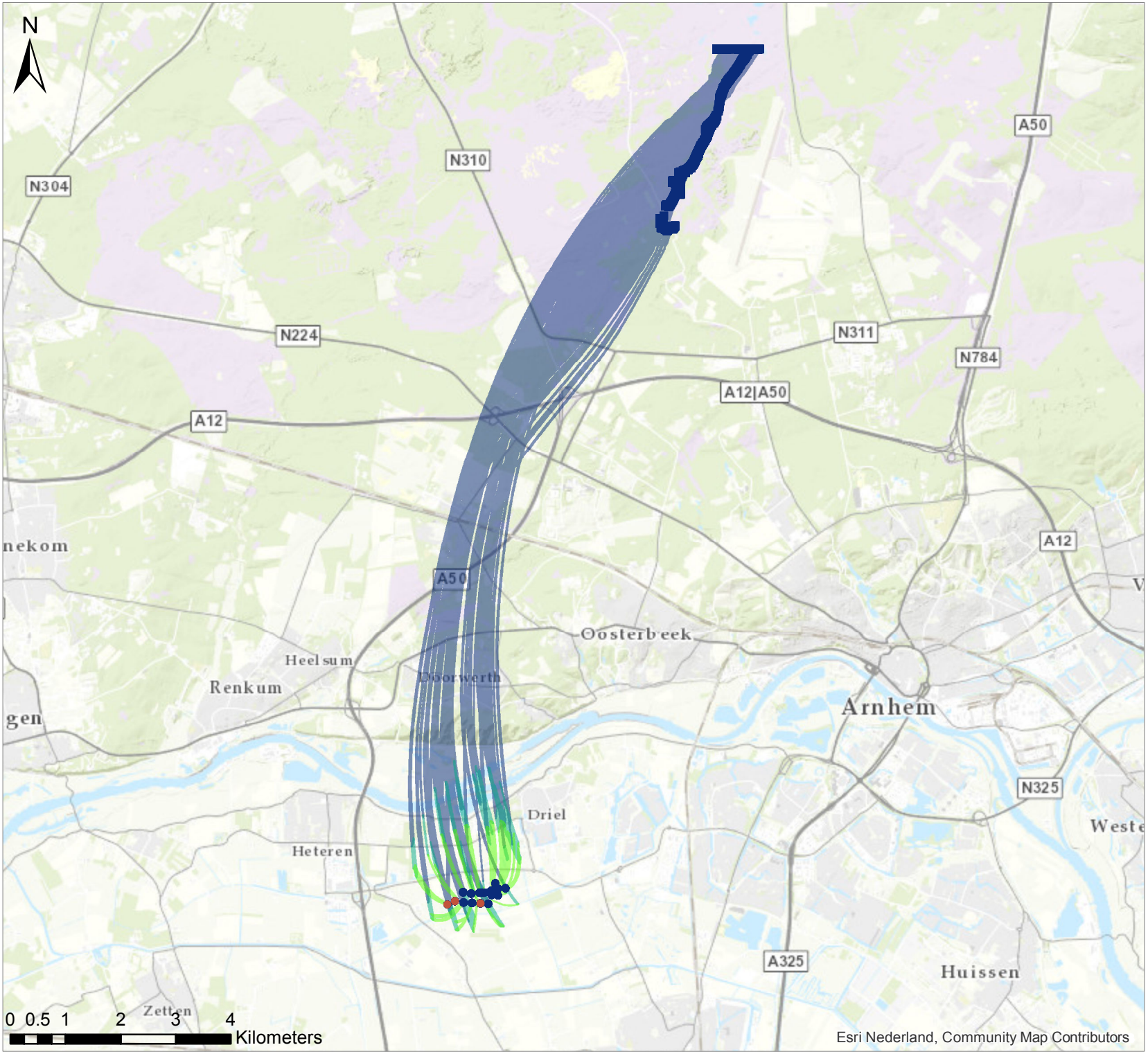
Vitens

Datum	*Schaal*
19/10/2018	1:110000

Figuur

Gecontroleerd door	*Volgnummer*
	1

Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together



Legenda

Leeftijd waterkwaliteit	leeftijd MORIA
2005-2018	2005-2018
1990-2005	1990-2005
1970-1990	1970-1990
1950-1970	1950-1970
<1950	<1950

stroombaan perioden

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

Titel

Stroombanen Fikkersdries - gestart in periode 1970 - 1990

Project

Overbetuwe

Opdrachtgever

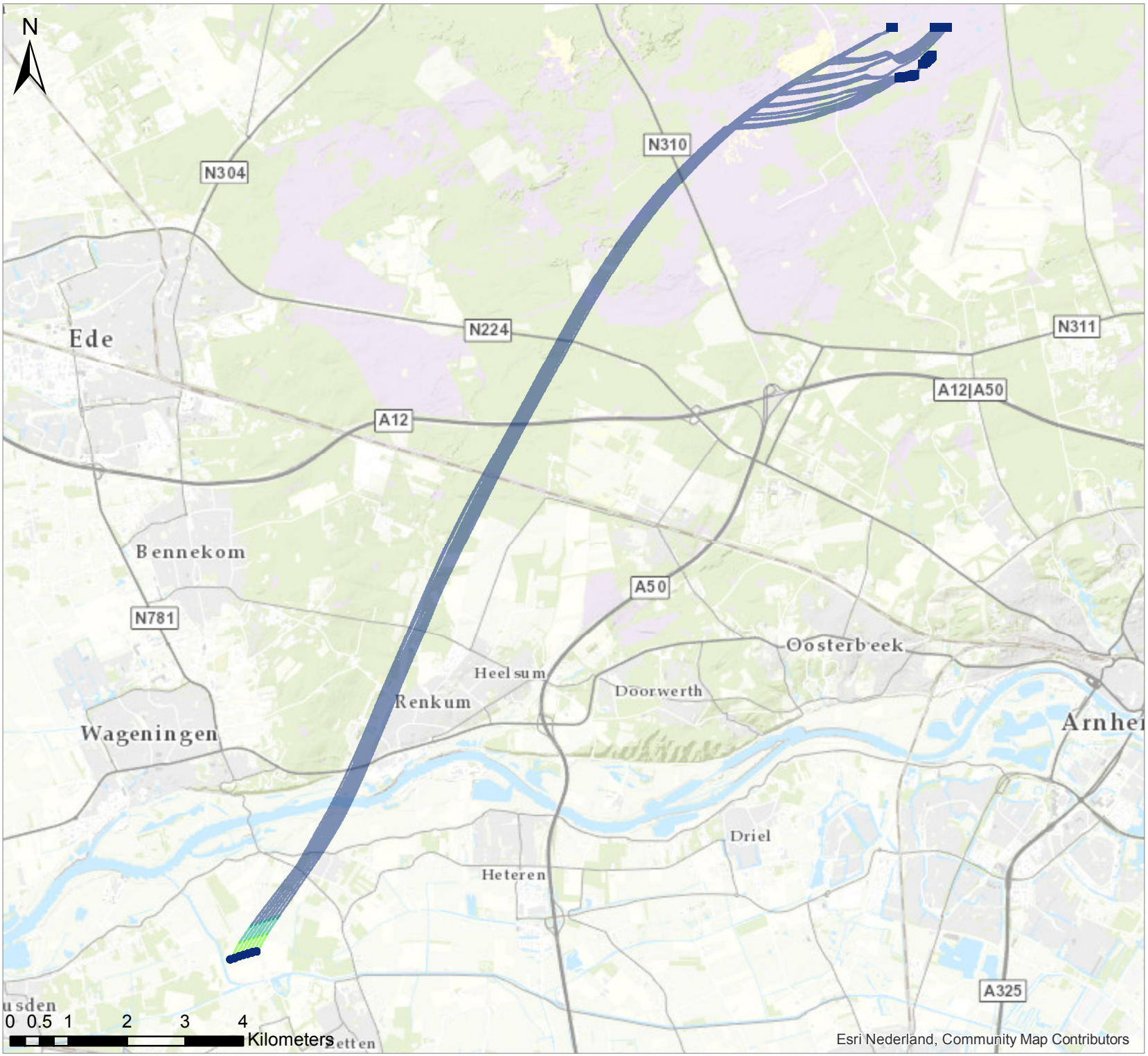
Vitens

Datum	*Schaal*
19/10/2018	1:95000

Figuur

Gecontroleerd door	*Volgnummer*
	1

Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together



Legenda

Leeftijd waterkwaliteit

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

leeftijd MORIA

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

stroombaan perioden

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

Titel

Stroombanen Hemmen - gestart in periode 1970 - 1990

Project

Overbetuwe

Opdrachtgever

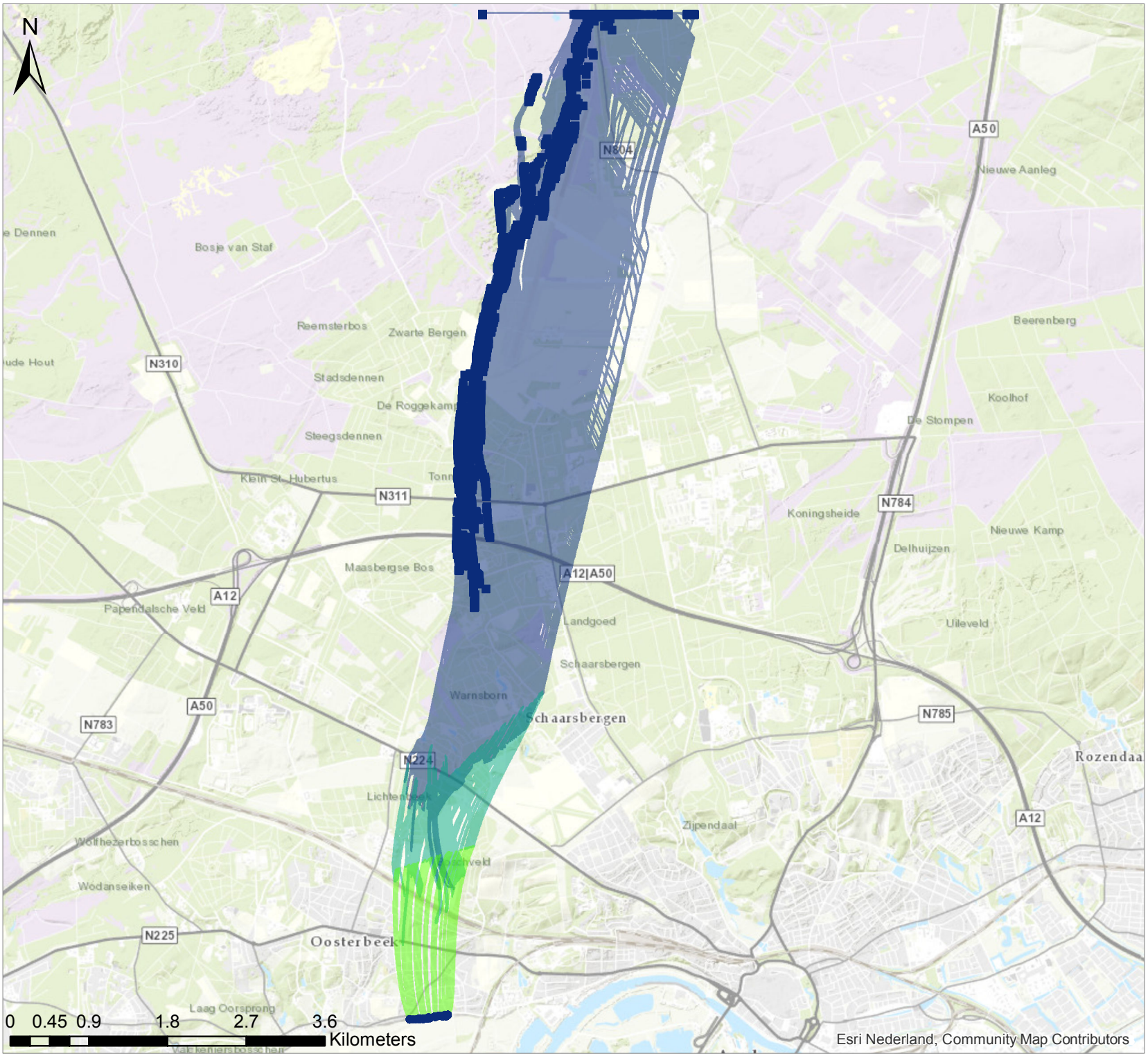
Vitens

Datum	*Schaal*
21/10/2018	1:90000

Figuur

Gecontroleerd door	*Volgnummer*
	1

Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together



Legenda

Leeftijd waterkwaliteit	leeftijd MORIA
2005-2018	2005-2018
1990-2005	1990-2005
1970-1990	1970-1990
1950-1970	1950-1970
<1950	<1950

stroombaan perioden

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

Titel

Stroombanen Oosterbeek - gestart in periode 1970 - 1990

Project

Overbetuwe

Opdrachtgever

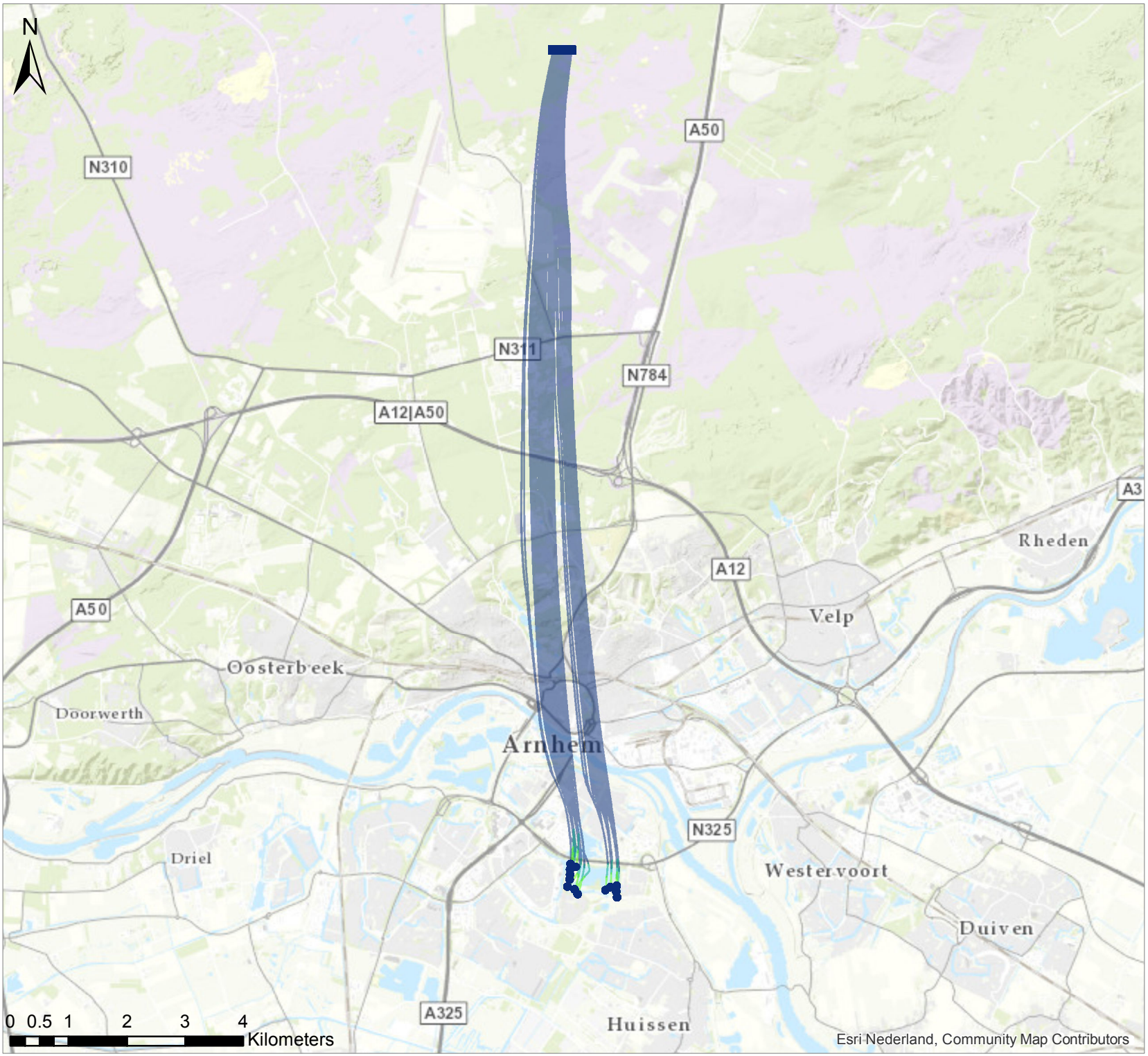
Vitens

Datum	*Schaal*
21/10/2018	1:60000

Figuur

Gecontroleerd door	*Volgnummer*
	1

Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together



Legenda

Leeftijd waterkwaliteit	leeftijd MORIA
2005-2018	2005-2018
1990-2005	1990-2005
1970-1990	1970-1990
1950-1970	1950-1970
<1950	<1950

stroombaan perioden

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

Titel

Stroombanen Sijmons - gestart in periode 1970 - 1990

Project

Overbetuwe

Opdrachtgever

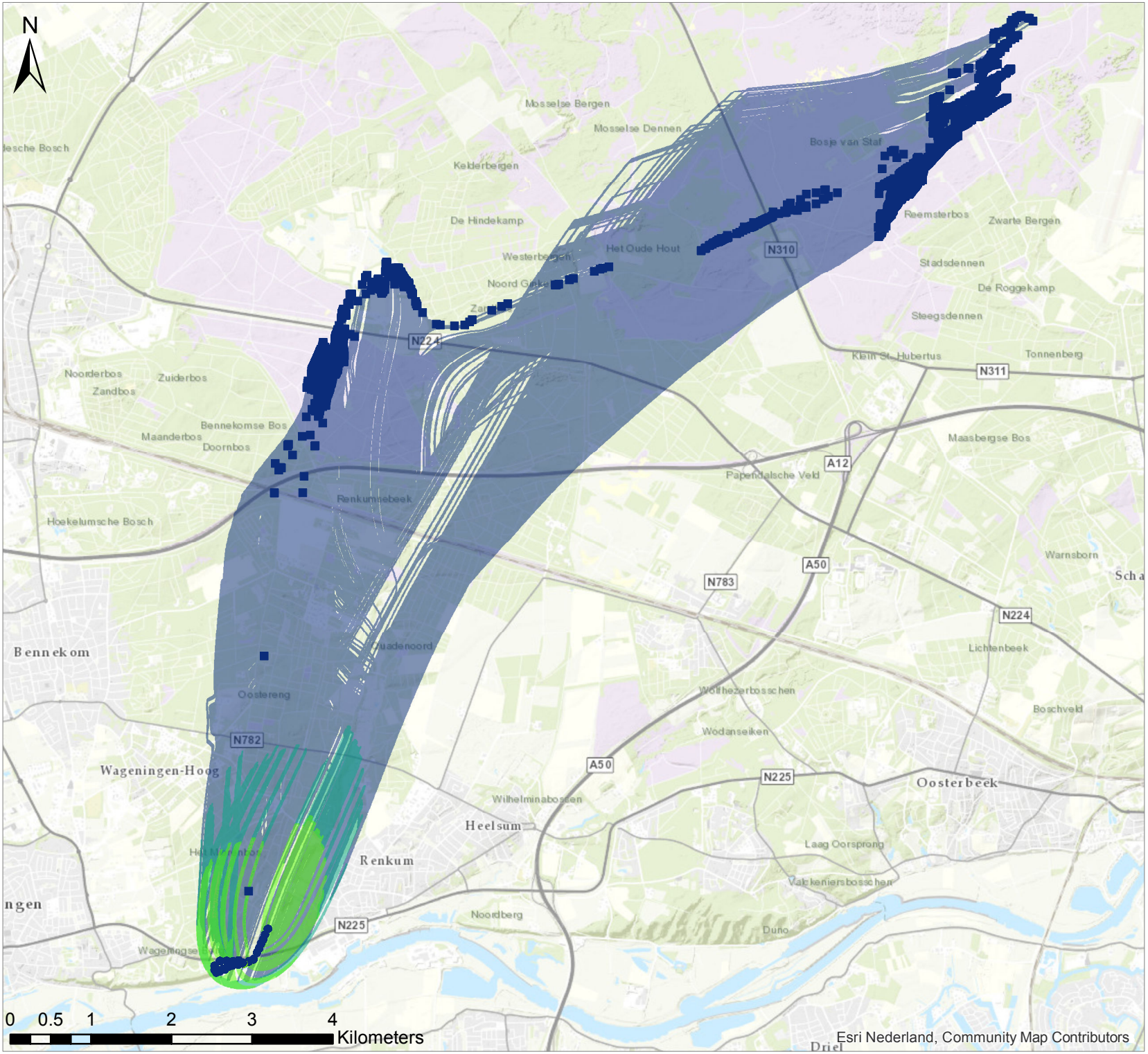
Vitens

Datum	*Schaal*
21/10/2018	1:90000

Figuur

Gecontroleerd door	*Volgnummer*
	1

Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together



Legenda

Leeftijd waterkwaliteit	leeftijd MORIA
2005-2018	2005-2018
1990-2005	1990-2005
1970-1990	1970-1990
1950-1970	1950-1970
<1950	<1950

stroombaan perioden

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

Titel

Stroombanen Wageningen - gestart in periode 1970 - 1990

Project

Overbetuwe

Opdrachtgever

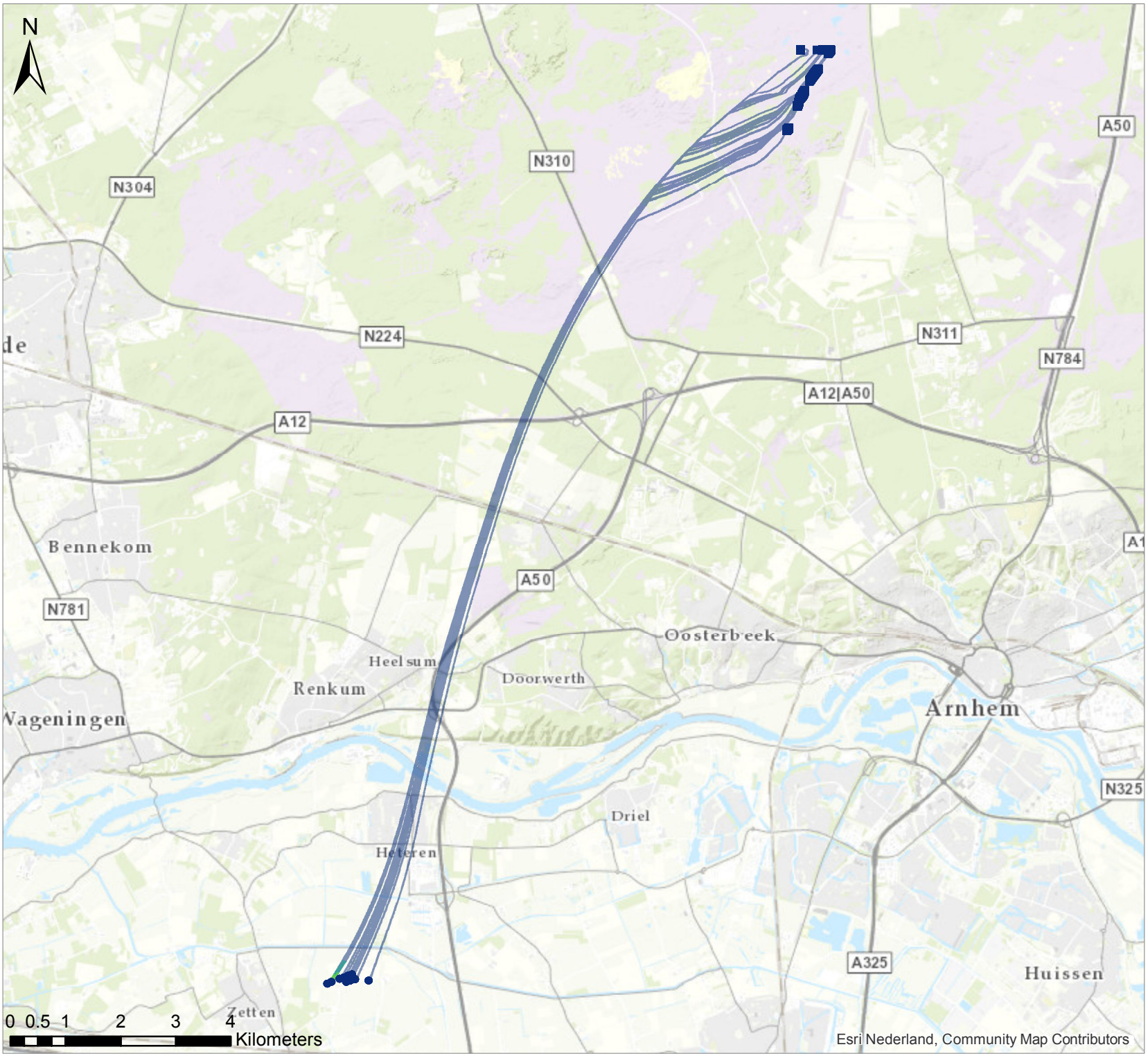
Vitens

Datum	*Schaal*
21/10/2018	1:65000

Figuur

Gecontroleerd door	*Volgnummer*
	1

Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together



Legenda

Leeftijd waterkwaliteit

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

leeftijd MORIA

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

stroombaan perioden

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

Titel

Stroombanen Zetten - gestart in periode 1970 - 1990

Project

Overbetuwe

Opdrachtgever

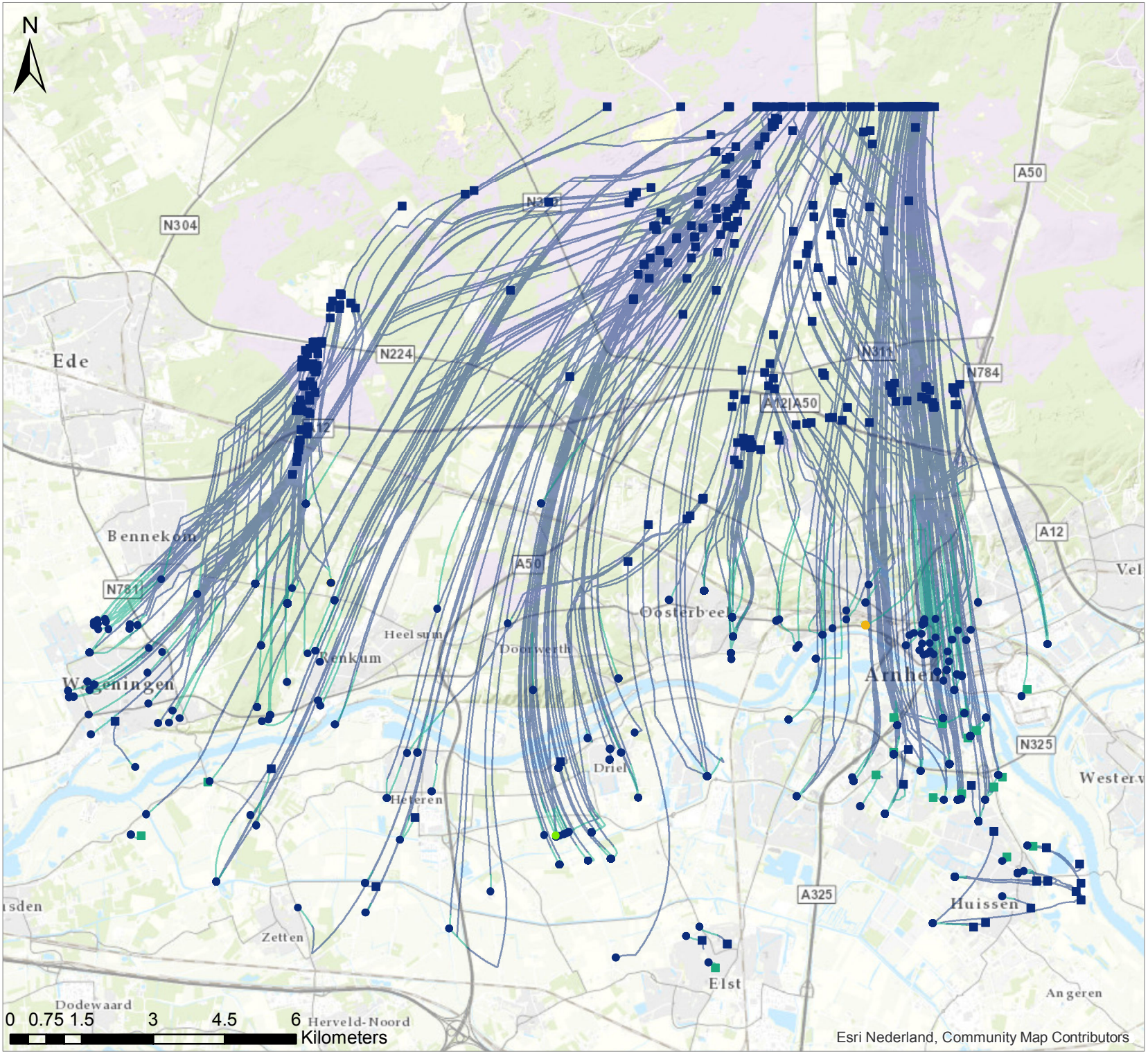
Vitens

Datum	*Schaal*
21/10/2018	1:95000

Figuur

Gecontroleerd door	*Volgnummer*
	1

Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together



Legenda

Leeftijd waterkwaliteit	leeftijd MORIA
2005-2018	2005-2018
1990-2005	1990-2005
1970-1990	1970-1990
1950-1970	1950-1970
<1950	<1950

stroombaan perioden

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

Titel

Stroombanen peilbuizen - gestart in periode 1950 - 1970

Project

Overbetuwe

Opdrachtgever

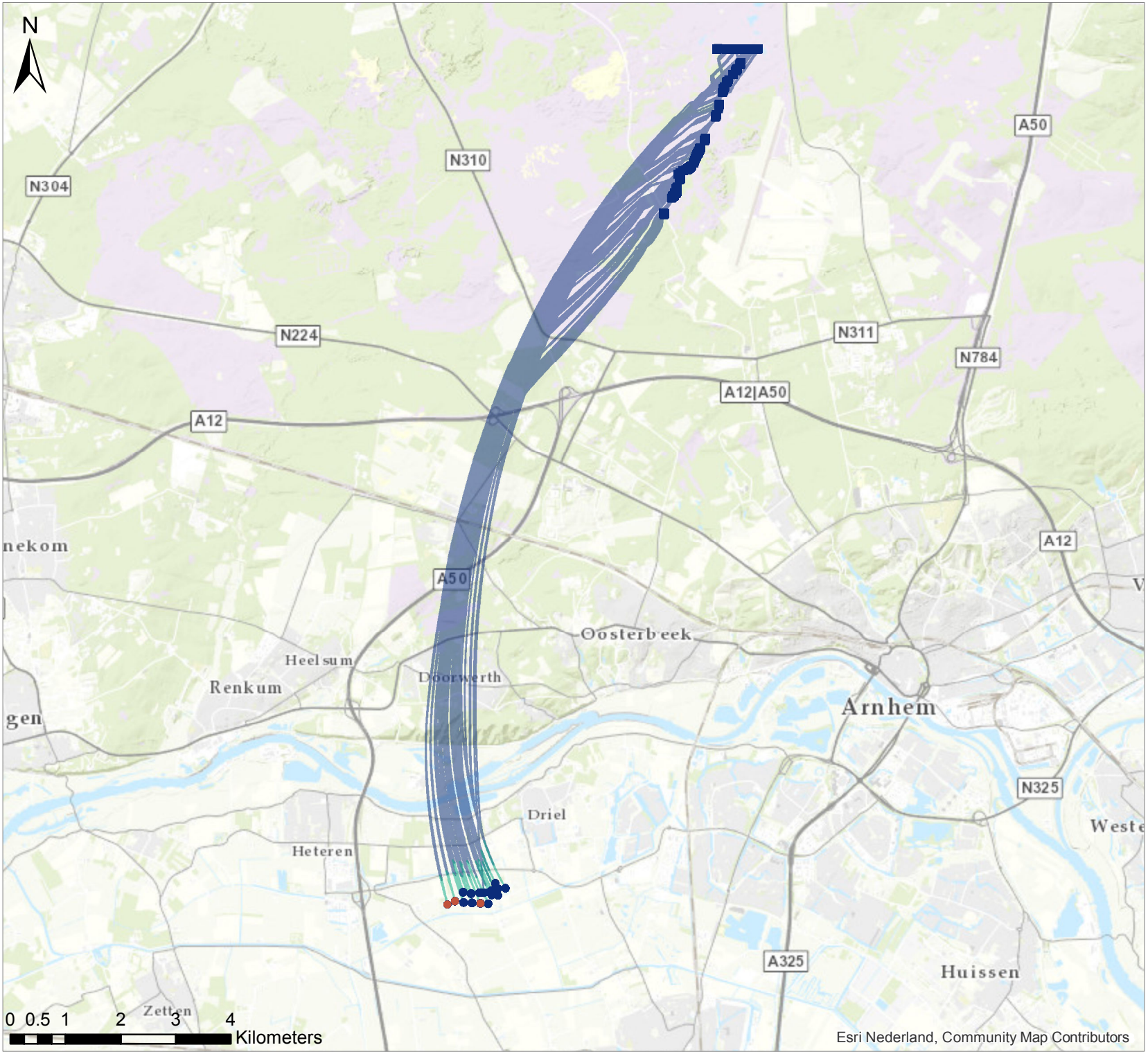
Vitens

Datum	*Schaal*
19/10/2018	1:110000

Figuur

Gecontroleerd door	*Volgnummer*
	1

Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together



Legenda

Leeftijd waterkwaliteit

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

leeftijd MORIA

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

stroombaan perioden

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

Titel

Stroombanen Fikkersdries - gestart in periode 1950 - 1970

Project

Overbetuwe

Opdrachtgever

Vitens

Datum	*Schaal*
19/10/2018	1:95000

Figuur

Gecontroleerd door	*Volgnummer*
	1

Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together



Legenda

Leeftijd waterkwaliteit

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

leeftijd MORIA

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

stroombaan perioden

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

Titel

Stroombanen Hemmen - gestart in periode 1950 - 1970

Project

Overbetuwe

Opdrachtgever

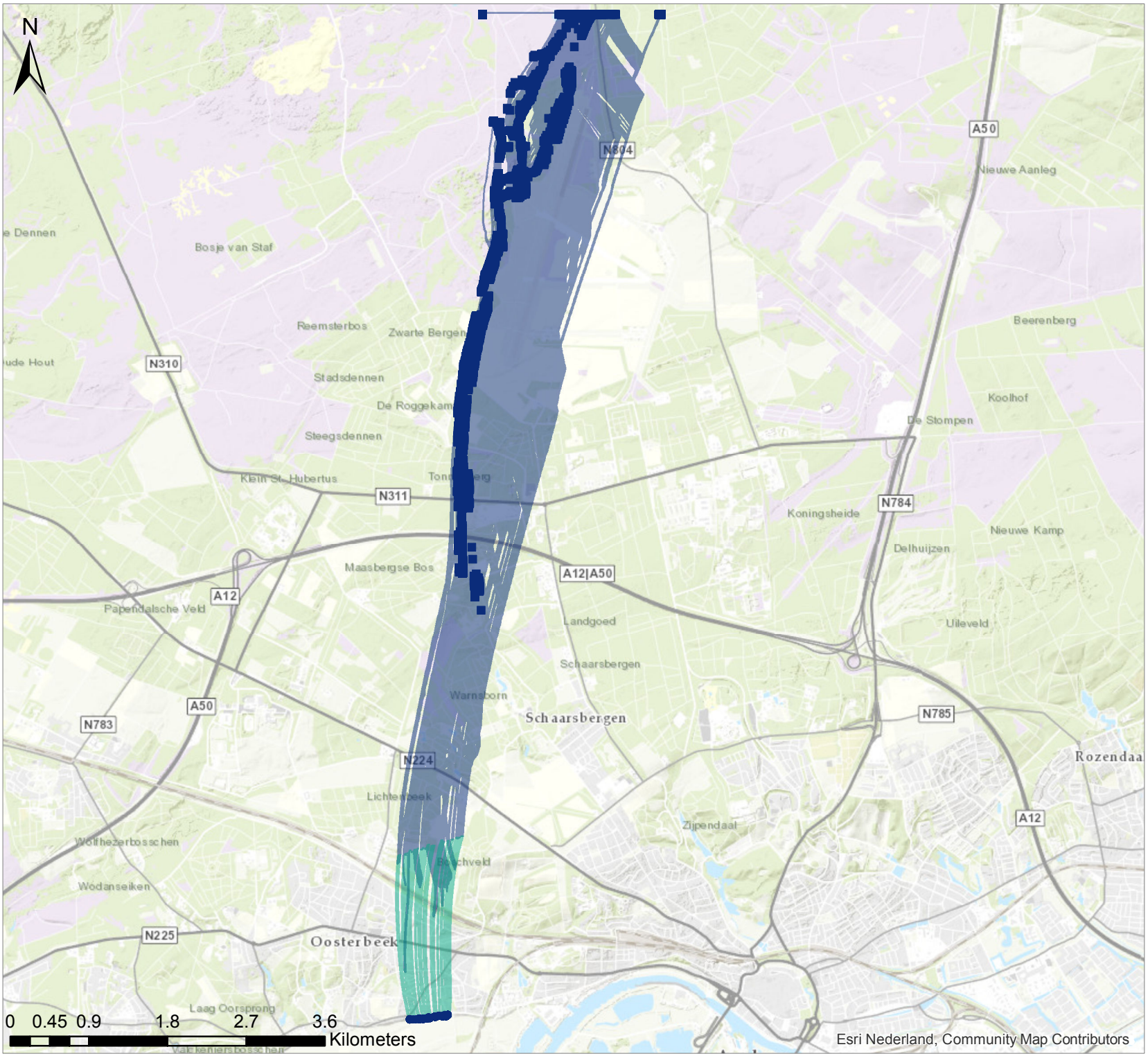
Vitens

Datum	*Schaal*
21/10/2018	1:90000

Figuur

Gecontroleerd door	*Volgnummer*
	1

Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together



Legenda

Leeftijd waterkwaliteit	leeftijd MORIA
2005-2018	2005-2018
1990-2005	1990-2005
1970-1990	1970-1990
1950-1970	1950-1970
<1950	<1950

stroombaan perioden

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

Titel

Stroombanen Oosterbeek - gestart in periode 1950 - 1970

Project

Overbetuwe

Opdrachtgever

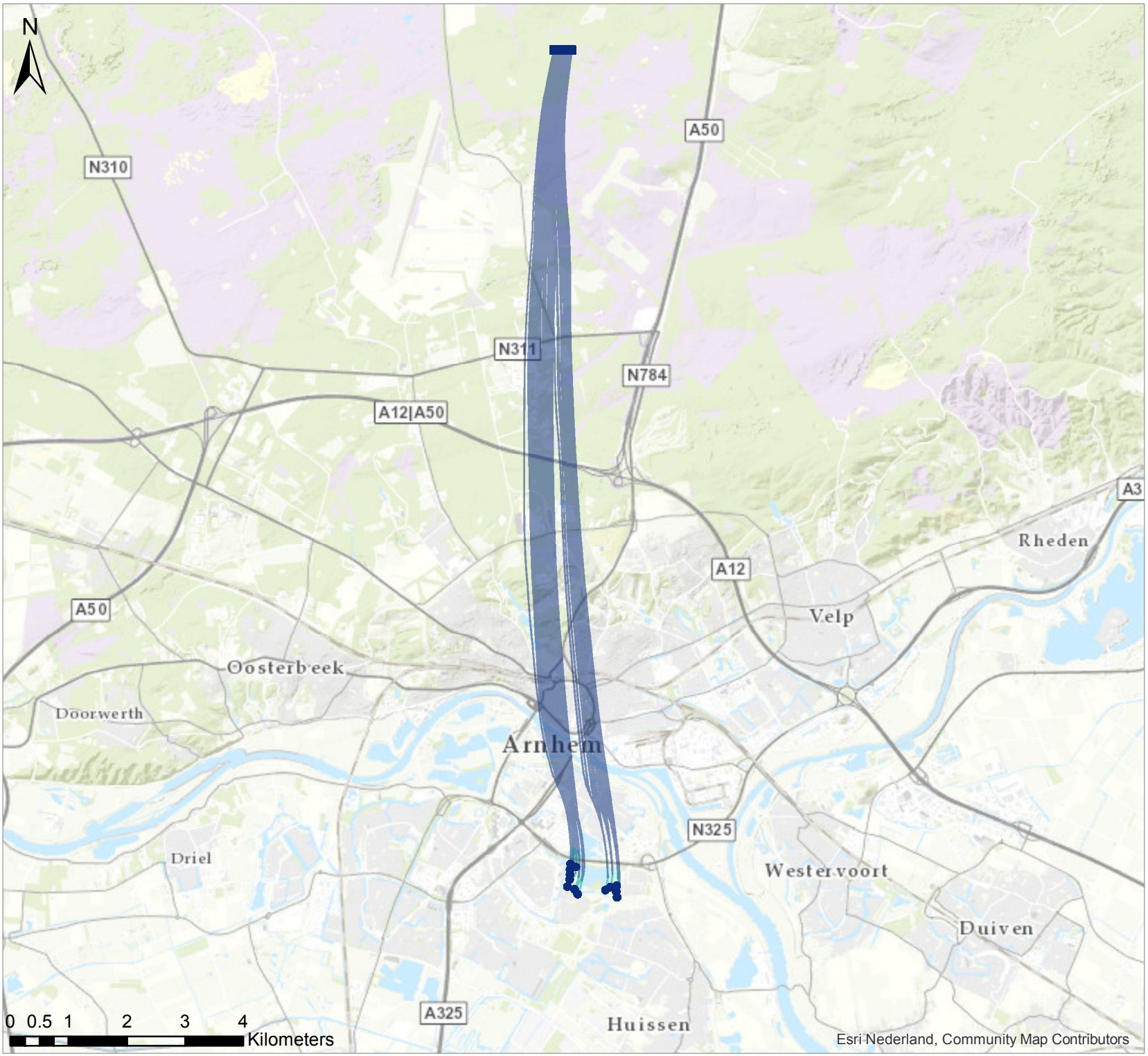
Vitens

Datum	*Schaal*
21/10/2018	1:60000

Figuur

Gecontroleerd door	*Volgnummer*
	1

Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together



Legenda

Leeftijd waterkwaliteit	leeftijd MORIA
2005-2018	2005-2018
1990-2005	1990-2005
1970-1990	1970-1990
1950-1970	1950-1970
<1950	<1950

stroombaan perioden

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

Titel

Stroombanen Sijmons - gestart in periode 1950 - 1970

Project

Overbetuwe

Opdrachtgever

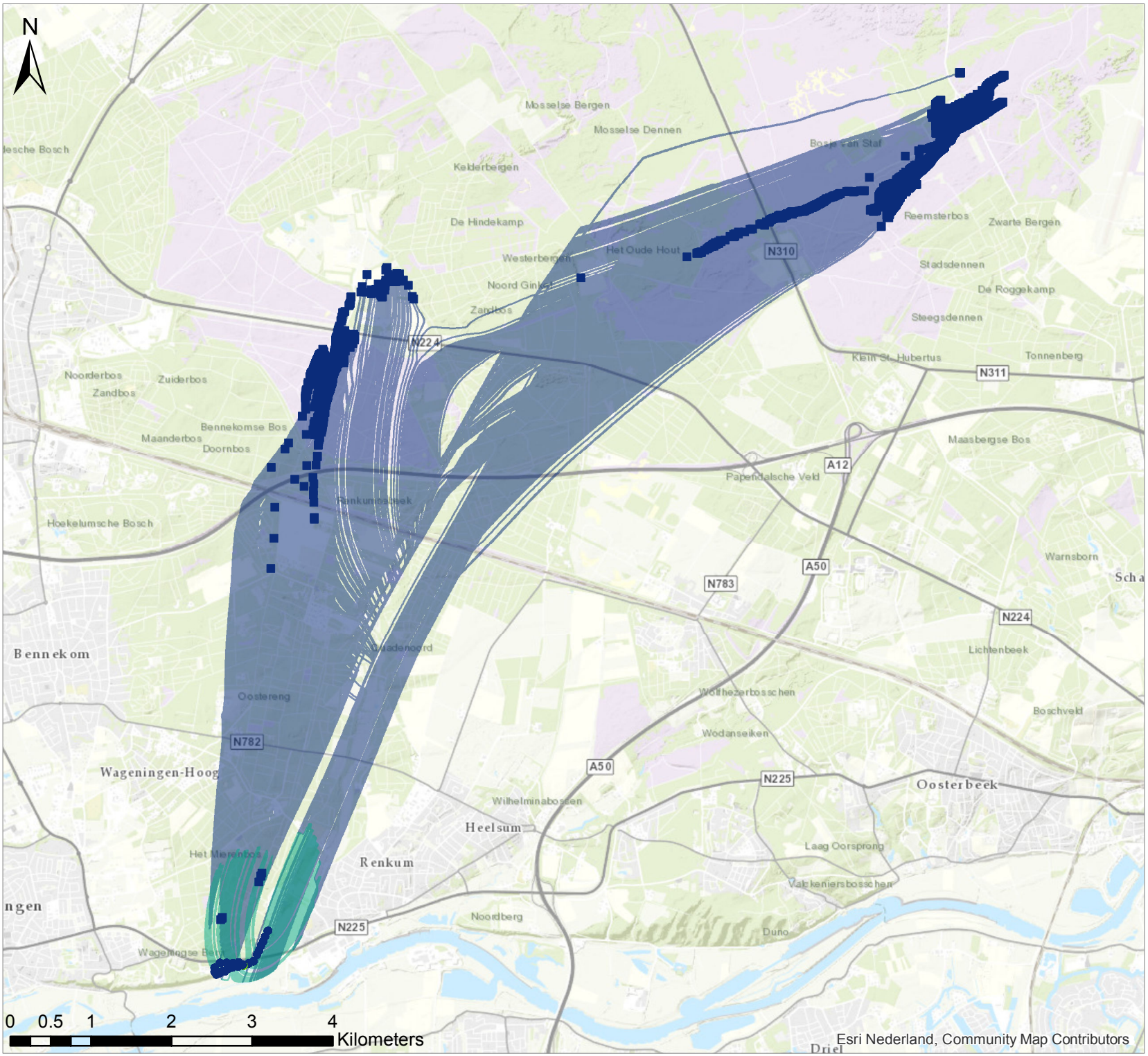
Vitens

Datum	*Schaal*
21/10/2018	1:90000

Figuur

Gecontroleerd door	*Volgnummer*
	1

Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together



Legenda

Leeftijd waterkwaliteit	leeftijd MORIA
2005-2018	2005-2018
1990-2005	1990-2005
1970-1990	1970-1990
1950-1970	1950-1970
<1950	<1950

stroombaan perioden

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

Titel

Stroombanen Wageningen - gestart in periode 1950 - 1970

Project

Overbetuwe

Opdrachtgever

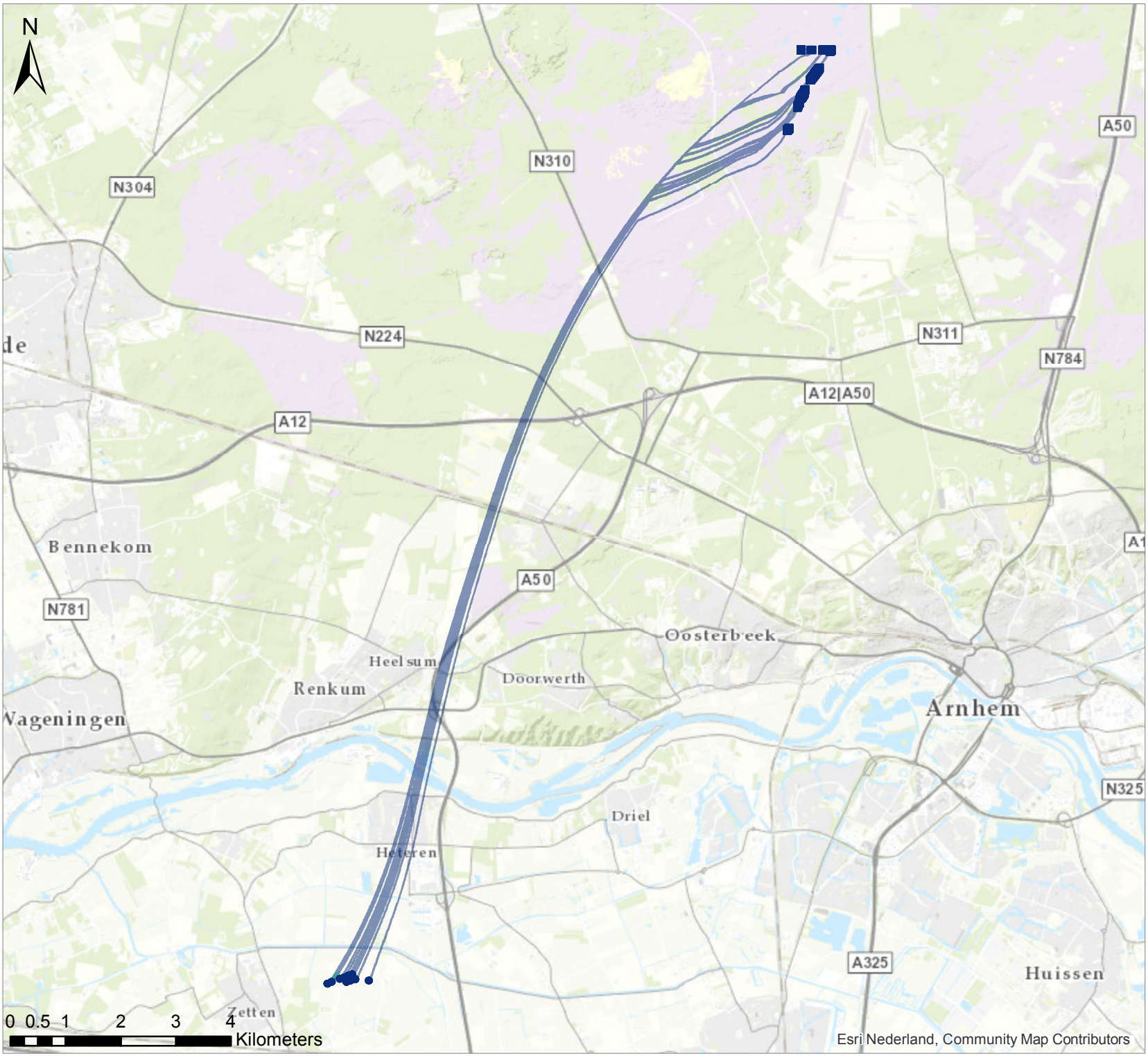
Vitens

Datum	*Schaal*
21/10/2018	1:65000

Figuur

Gecontroleerd door	*Volgnummer*
	1

Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together



Legenda

Leeftijd waterkwaliteit

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

leeftijd MORIA

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

stroombaan perioden

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

Titel

Stroombanen Zetten - gestart in periode 1950 - 1970

Project

Overbetuwe

Opdrachtgever

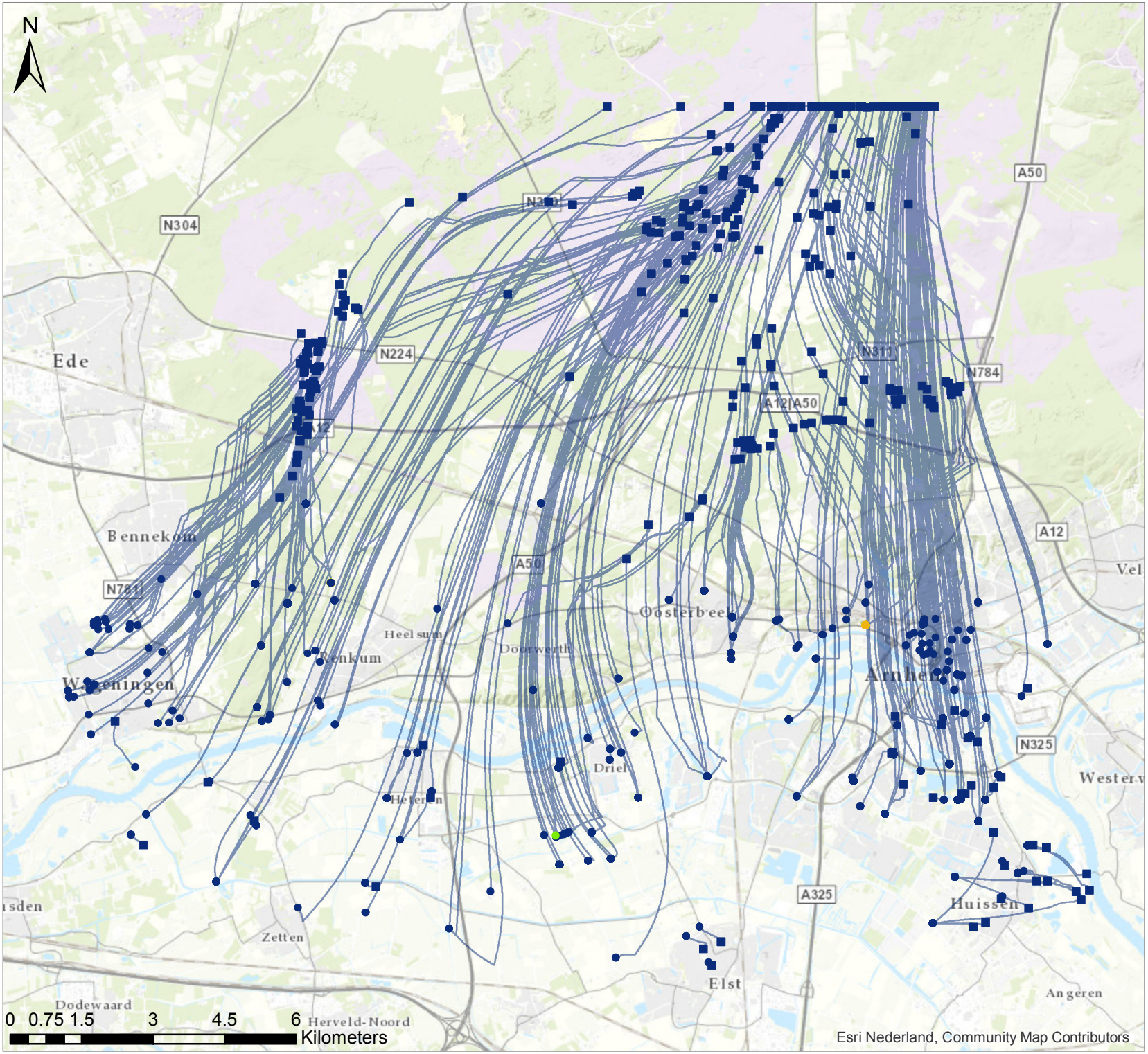
Vitens

Datum	*Schaal*
21/10/2018	1:95000

Figuur

Gecontroleerd door	*Volgnummer*
	1

Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together



Legenda

Leeftijd waterkwaliteit	leeftijd MORIA
2005-2018	2005-2018
1990-2005	1990-2005
1970-1990	1970-1990
1950-1970	1950-1970
<1950	<1950

stroombaan perioden

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

Titel

Stroombanen peilbuizen - gestart in periode voor 1950

Project

Overbetuwe

Opdrachtgever

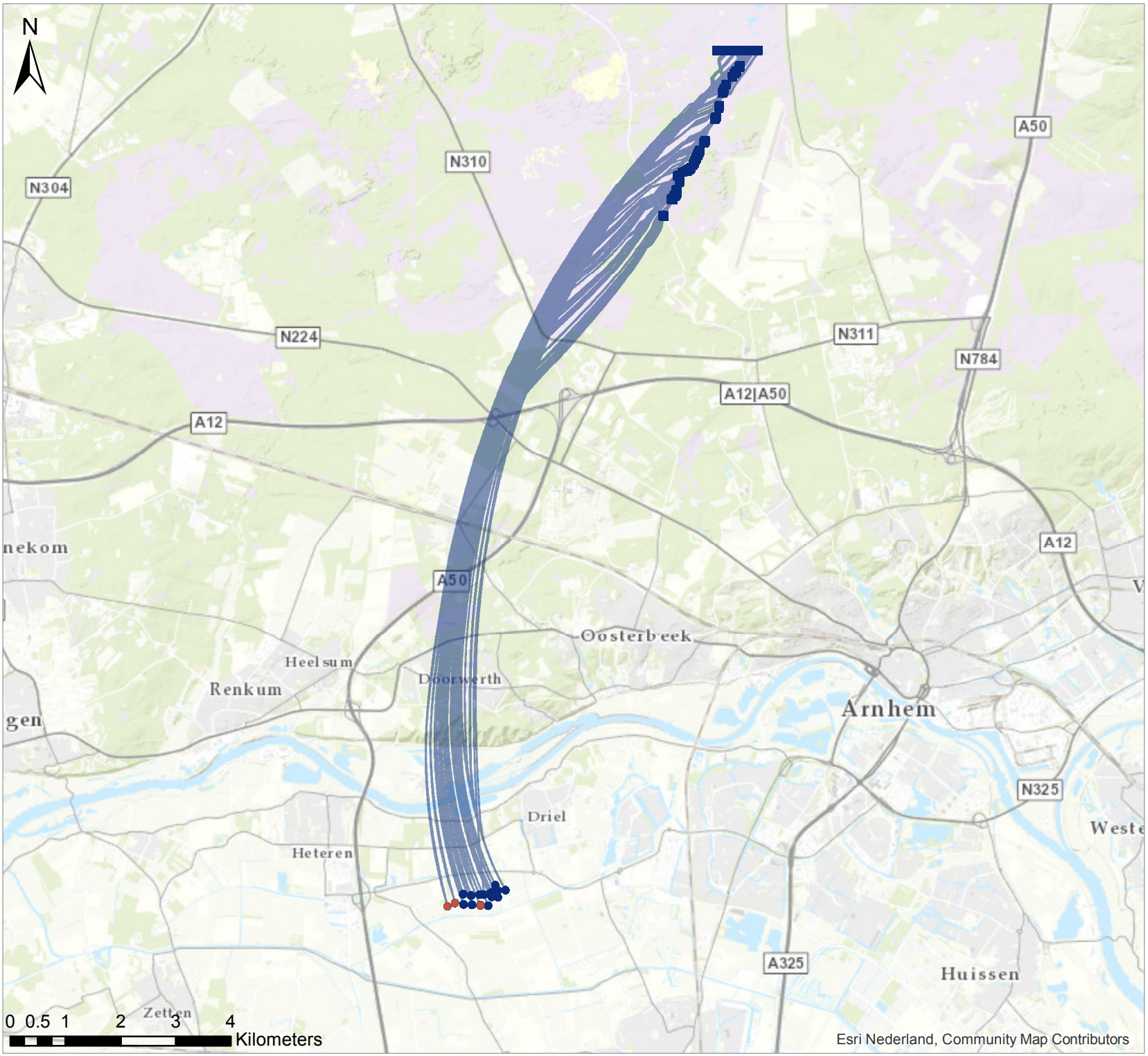
Vitens

Datum	*Schaal*
19/10/2018	1:110000

Figuur

Gecontroleerd door	*Volgnummer*
	1

Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together



Legenda

Leeftijd waterkwaliteit

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

leeftijd MORIA

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

stroombaan perioden

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

Titel

Stroombanen Fikkersdries - gestart in periode voor 1950

Project

Overbetuwe

Opdrachtgever

Vitens

Datum	*Schaal*
19/10/2018	1:95000

Figuur

Gecontroleerd door	*Volgnummer*
	1

Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together



Legenda

Leeftijd waterkwaliteit

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

leeftijd MORIA

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

stroombaan perioden

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

Titel

Stroombanen Hemmen - gestart in periode voor 1950

Project

Overbetuwe

Opdrachtgever

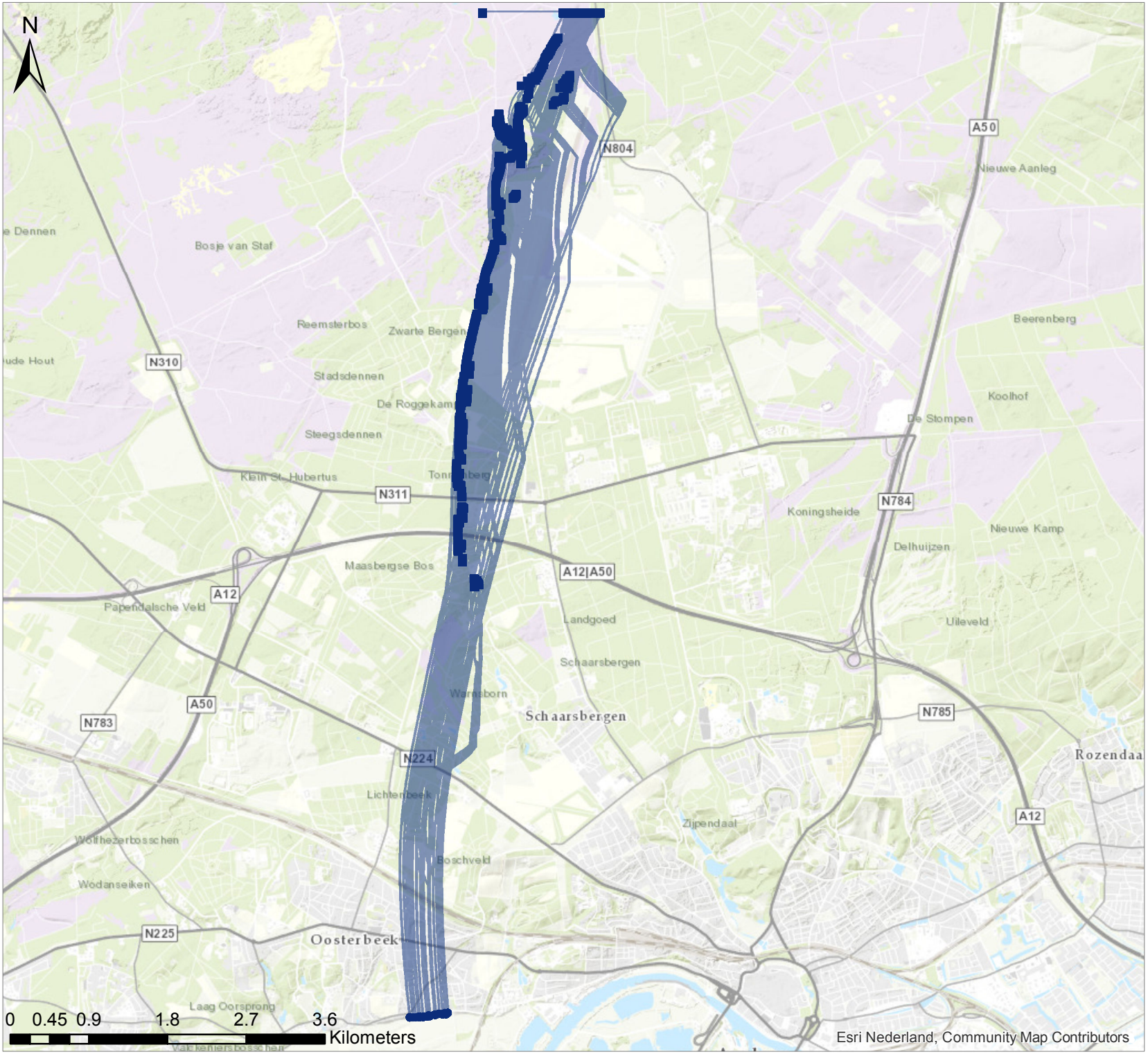
Vitens

Datum	*Schaal*
21/10/2018	1:90000

Figuur

Gecontroleerd door	*Volgnummer*
	1

Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together



Legenda

Leeftijd waterkwaliteit	leeftijd MORIA
2005-2018	2005-2018
1990-2005	1990-2005
1970-1990	1970-1990
1950-1970	1950-1970
<1950	<1950

stroombaan perioden

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

Titel

Stroombanen Oosterbeek - gestart in periode voor 1950

Project

Overbetuwe

Opdrachtgever

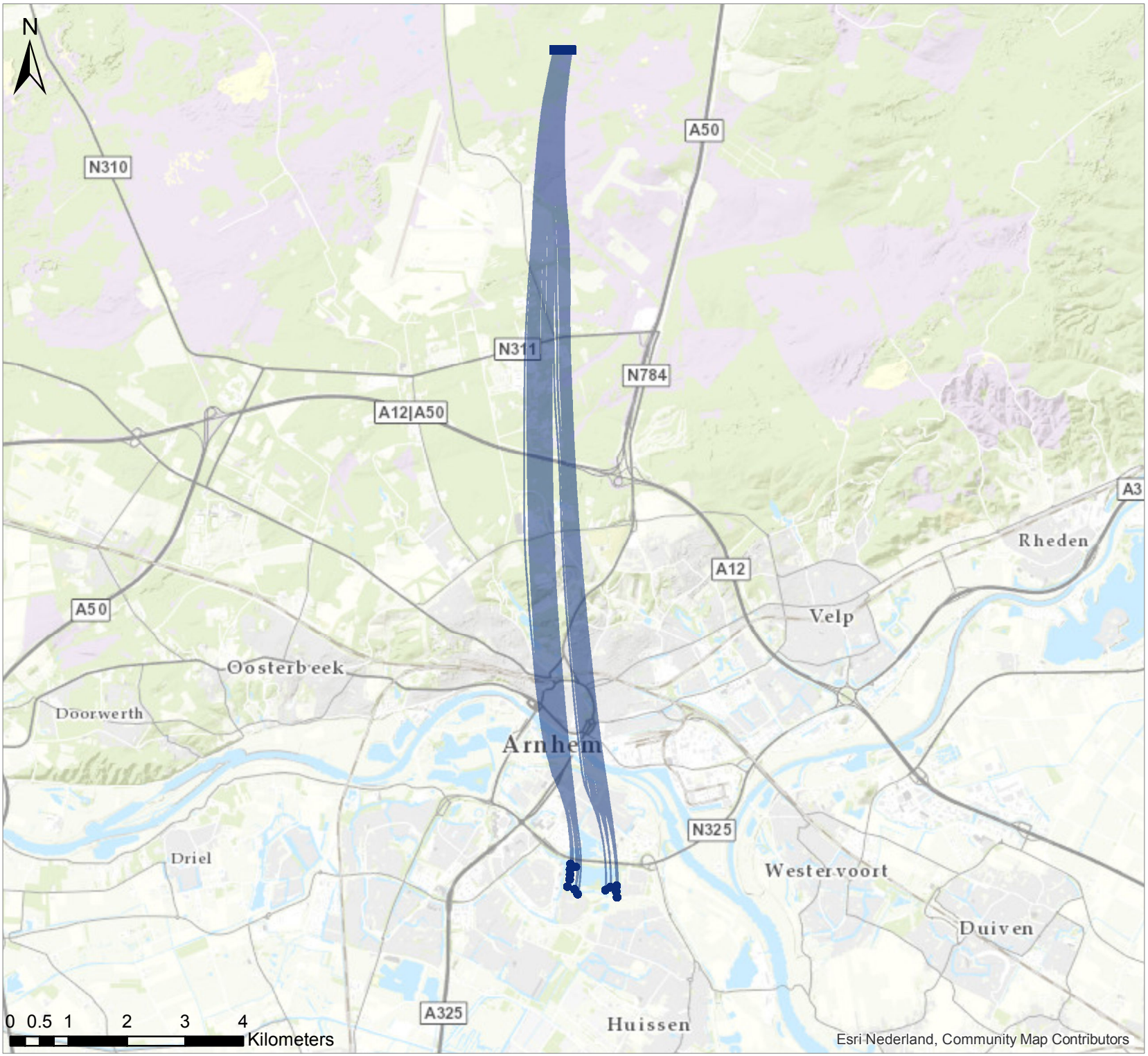
Vitens

Datum	*Schaal*
21/10/2018	1:60000

Figuur

Gecontroleerd door	*Volgnummer*
	1

Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together



Legenda

Leeftijd waterkwaliteit	leeftijd MORIA
2005-2018	2005-2018
1990-2005	1990-2005
1970-1990	1970-1990
1950-1970	1950-1970
<1950	<1950

stroombaan perioden

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

Titel

Stroombanen Sijmons - gestart in periode voor 1950

Project

Overbetuwe

Opdrachtgever

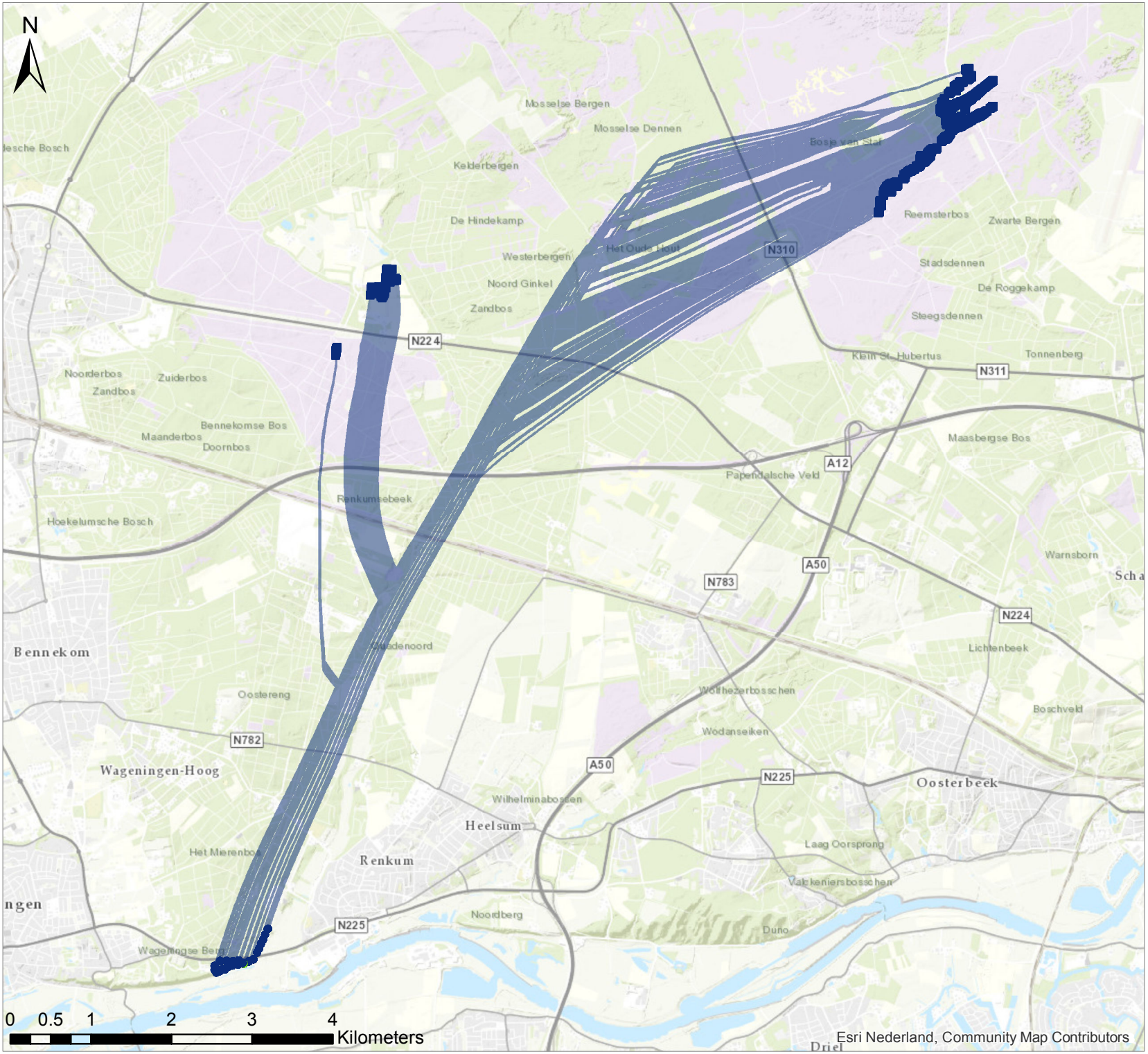
Vitens

Datum	*Schaal*
21/10/2018	1:90000

Figuur

Gecontroleerd door	*Volgnummer*
	1

Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together



Legenda

Leeftijd waterkwaliteit	leeftijd MORIA
2005-2018	2005-2018
1990-2005	1990-2005
1970-1990	1970-1990
1950-1970	1950-1970
<1950	<1950

stroombaan perioden

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

Titel

Stroombanen Wageningen - gestart in periode voor 1950

Project

Overbetuwe

Opdrachtgever

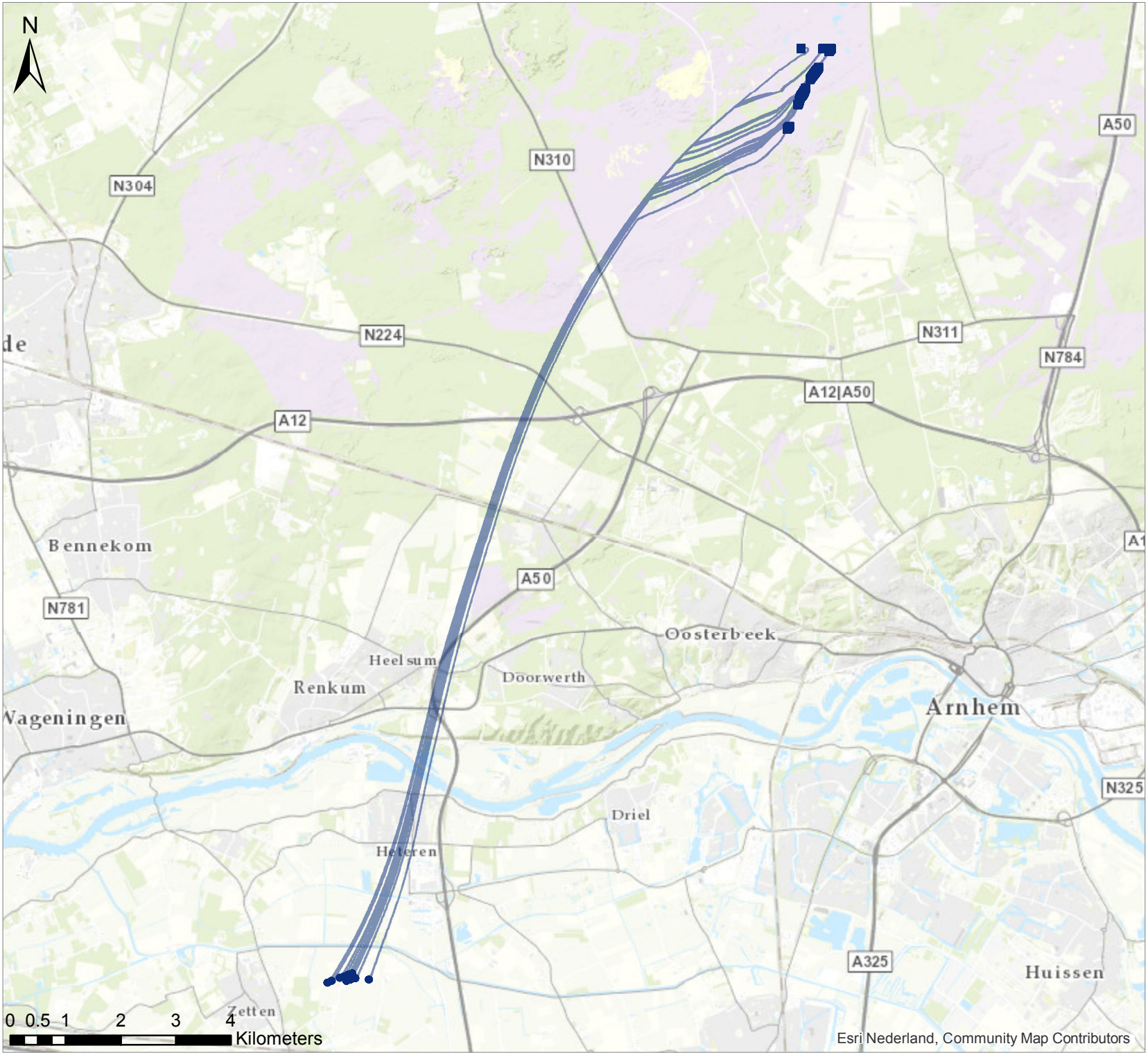
Vitens

Datum	*Schaal*
21/10/2018	1:65000

Figuur

Gecontroleerd door	*Volgnummer*
	1

Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together



Legenda

Leeftijd waterkwaliteit

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

leeftijd MORIA

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

stroombaan perioden

- 2005-2018
- 1990-2005
- 1970-1990
- 1950-1970
- <1950

Titel

Stroombanen Zetten - gestart in periode voor 1950

Project

Overbetuwe

Opdrachtgever

Vitens

Datum	*Schaal*
21/10/2018	1:95000

Figuur

Gecontroleerd door	*Volgnummer*
	1

Royal HaskoningDHV
Enhancing Society Together

| | | |