



Bosgroepen

Zwarte Broek

Watersysteemanalyse



Colofon

Opdrachtgever: Natuurmonumenten
Titel: Zwarte Broek – Watersysteemanalyse
Status: Definitief
Datum: 24 augustus 2023
Auteur(s): D.J. Bokeloh, A.A.M. Kieskamp & H. Smeenge
Kaartmateriaal: Copyright © 2023, Dienst voor het kadaster en openbare registers, Apeldoorn
Projectnummer: 22.30.729.01

© Coöperatie Bosgroep Midden Nederland u.a., juli 2023

Postbus 8135

6710 AC Ede

t (0318) 67 26 26

e Middennederland@bosgroepen.nl

www.bosgroepen.nl



Inhoudsopgave

1	Inleiding	4
1.1	Aanleiding onderzoek	4
1.2	Onderzoeksvragen van de watersysteemanalyse	4
2	Werkwijze	6
2.1	Kaartenstudie	6
2.2	Transectenonderzoek: relatie bodem, water en watergangen	6
2.3	Inventarisatie oppervlaktewatersysteem	7
2.4	Analyse grond- en oppervlaktewaterkwaliteit	9
2.5	Uitwerking data en synthese	11
3	Historische ontwikkelingen	12
4	Natuurlijk watersysteem	17
4.1	Geologie	17
4.2	Reliëf en hydrologie	19
4.3	Bodemtypen	25
5	Huidig watersysteem	29
5.1	Ontwateringssysteem	29
5.2	Waterstanden en stromingsrichting	29
5.3	Deelsystemen op basis van stromingsrichting	32
5.4	Waterkwaliteit	33
5.5	Gebiedsopbouw: dwarsprofielen	44
6	Synthese	49
6.1	Zwarte Broek ligt op een kwelhelling	49
6.2	Hydrologische deelsystemen	49
6.3	Systeem omgeslagen van kwel naar infiltratie	51
6.4	Doelgat: verdroging en verzuring staan optimale vegetatieontwikkeling in de weg	52
	Literatuurlijst	55
	Bijlagen	56



1 Inleiding

1.1 Aanleiding onderzoek

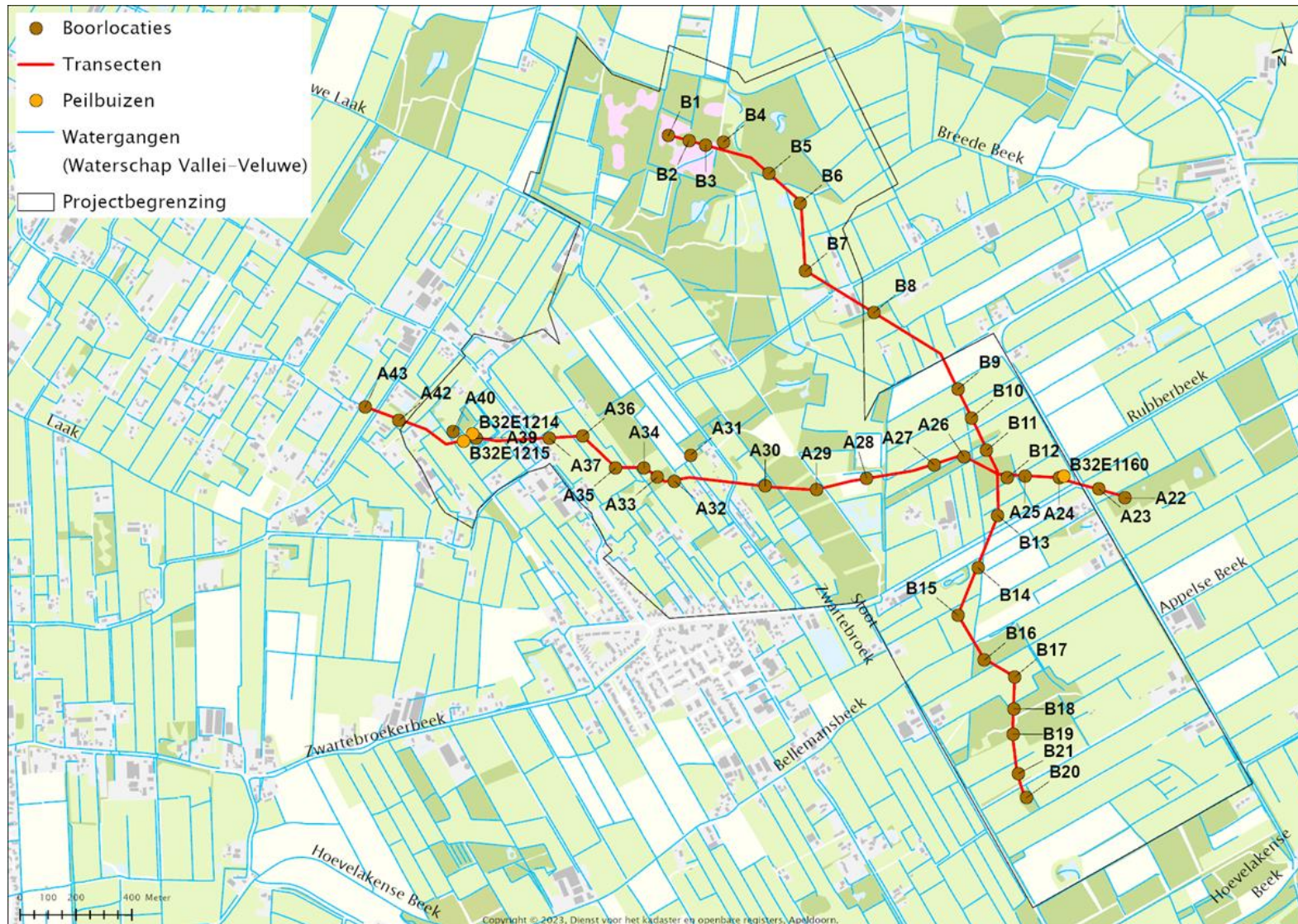
Natuurterrein Zwarte Broek is een kleinschalig, eeuwenoud cultuurlandschap in de noordelijke helft van de Gelderse Vallei. Het ligt globaal tussen Amersfoort en Voorthuizen. Het Zwarte Broek is een van oorsprong nat gebied, in de loop der tijd is er een groot aantal watergangen aangelegd. Het gebied is voornamelijk als grasland in gebruik en er zijn enkele percelen bos (figuur 1). Vereniging Natuurmonumenten heeft diverse percelen in eigendom in het Zwarte Broek, ten noorden en oosten van het dorp Zwartebroek. Hierbij zijn enkele schraallanden en daarnaast zijn er percelen waar ontwikkeling van de natuurkwaliteit het doel is. Welke inrichtingsmaatregelen daar mogelijk en nodig zijn is in een apart inrichtingsplan uitgewerkt.¹

Voor een groot deel van die percelen is in 2007 onderzoek gedaan naar o.a. de bodem- en humusopbouw, grondwatertrappen en bodem-pH door Alterra (nu: WENR). Ook is er fosfaatonderzoek uitgevoerd. Op basis daarvan hebben zij vastgesteld dat het gebied is verdroogd, verzuurd en vermist. Zij geven aan dat vooral gezocht moet worden naar mogelijkheden de bestaande natuur te versterken door de hydrologie te verbeteren. Natuurmonumenten heeft als wens om uit te zoeken welke maatregelen moeten worden genomen om deze knelpunten (verdroging, verzuring en vermist) op te heffen. Daarvoor is het van belang meer inzicht te hebben in het functioneren van het systeem: welke (hydrologische) knoppen zijn er om aan te draaien? Daartoe heeft zij de Bosgroepen gevraagd een watersysteemanalyse (WASA) uit te voeren.

1.2 Onderzoeksvragen van de watersysteemanalyse

1. Wat zijn veranderingen in het oppervlaktewatersysteem op basis van historische kaarten?
2. Hoe functioneert het actuele oppervlaktewatersysteem?
 - a. Wat is de stromingsrichting van de verschillende watergangen?
 - b. Bevatten de watergangen jaarrond water?
 - c. Wat zijn de eigenschappen van dat water (pH, EGV, kwelverschijnselen)?
 - d. Welke deelsystemen zijn te onderscheiden op basis van de verschillende stromingsrichtingen en eigenschappen van het water?
3. Hoe functioneert het geohydrologisch systeem?
 - a. Zijn er slecht doorlatende lagen aanwezig in de ondiepe (<2,2 m) ondergrond?
 - b. Wat is de relatie tussen de waterstanden, waterkwaliteit (pH, EGV) en deze slecht doorlatende lagen?

¹ Kieskamp & Smeenge, 2023.



Figuur 1. Onderzoeksgebied Zwarte Broek met de ligging van de transecten A en B, de boorlocaties en bestaande peilbuizen.



2 Werkwijze

2.1 Kaartenstudie

Binnen het plangebied zijn bestaande kaarten geraadpleegd, zoals het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN), de bodemkaart 1:50.000, de historisch-topografische kaart uit 1810 van De Man, historisch-topografische kaarten vanaf 1850 en de legger van Waterschap Vallei & Veluwe.² Ook is de geologische opbouw bestudeerd en is onderzocht welke peilbuizen er in en rond het gebied aanwezig zijn. Het patroon van de regionale grondwaterstromingen is bepaald via de applicatie Grondwatertools. Daarvoor is de situatie in 2017 genomen, dus voor de afwijkend droge jaren daarna. Hiermee is de ontstaans- en gebruiksgeschiedenis van het Zwarte Broek beschreven.

Zonder detailkennis over de geologische en bodemkundige opbouw is het niet mogelijk om het watersysteem te duiden. Daarnaast is deze gebiedsinformatie nodig om aan de hand van de WASA aan te kunnen geven welke vegetatietypen in potentie tot ontwikkeling kunnen komen en welke belemmeringen deze ontwikkelingen in de weg staan.

2.2 Transectenonderzoek: relatie bodem, water en watergangen

Om inzicht te krijgen in de relatie tussen het natuurlijke watersysteem en de mate van verstoring door de mens, is de relatie onderzocht tussen bodemopbouw, watereigenschappen en watergangen. Het onderzoek is uitgevoerd langs twee transecten (figuur 1). De ligging daarvan is gekozen op basis van informatie uit de kaartenstudie voorafgaand aan het veldonderzoek.

- Transect A loopt van oost naar west (ca. 2,5 km). De ligging is gebaseerd op de vermoedelijk natuurlijke afwateringsrichting op basis van het AHN. Hierbij zijn zoveel mogelijk bodemtypen (op basis van de landelijke bodemkaart) en verschillende maaiveldhoogten meegenomen om inzicht te krijgen in de variatie in het gebied, waarbij de eigendommen van Natuurmonumenten zoveel mogelijk zijn meegenomen: de natuurreervaten en de te ontwikkelen gebieden.
- Transect B loopt van zuid naar noord (ca. 2,8 km) vanaf het zuiden, over de te ontwikkelen landbouwgronden naar het natuurgebied 'Koperweg' in het noorden. Dit transect loopt haaks op de natuurlijke afwateringsrichting van het gebied, wat inzicht geeft in het effect van de verschillende ontwateringen op het geohydrologisch systeem.

² www.ahn.nl; www.dinoloket.nl; opendata.gelderland.nl; www.topotijdreis.nl



De bodem is gevormd door een combinatie van geologisch substraat, het reliëf, hydrologische processen, de vegetatie en cultuurhistorische invloeden. Daarmee geeft de bodem veel inzicht in natuurlijke en huidige grondwaterstromingen en de potenties voor natuur.³

Bij de 43 boringen langs de twee transecten zijn de volgende eigenschappen beschreven, die veelal hydrologisch relevant zijn:

- Bodemtype⁴
- Grondsoort op verschillende diepten: textuur (zand, veen of leem) en verstoringen
- Profielen van de bodem-pH als indicatie voor stijghoogte van grondwater/diepte van verzuring. Dit is gemeten middels pH-strips op elke 40 cm diepte, en in afwijkende lagen
- Bij een pH >6 is met verdund zoutzuur gekeken of (en vanaf welke diepte) er vrije kalk aanwezig is in de bodem
- Standen, EGV en pH van het water in de boorgaten in de nazomer (2022) en aan het einde van de winter (2023)

De boringen zijn uitgevoerd in de tweede helft van september 2022. Dat was aan het eind van een zeer droge zomer⁵, de situatie was toen droger dan over de langjarige GLG. Aan het eind van de winter met normale hoeveelheid neerslag zijn in februari 2023 de grondwaterstanden gemeten om de situatie bij hoge grondwaterstanden in beeld te krijgen. Beide situaties waren droger dan in een representatief neerslagjaar.

2.3 Inventarisatie oppervlaktewatersysteem

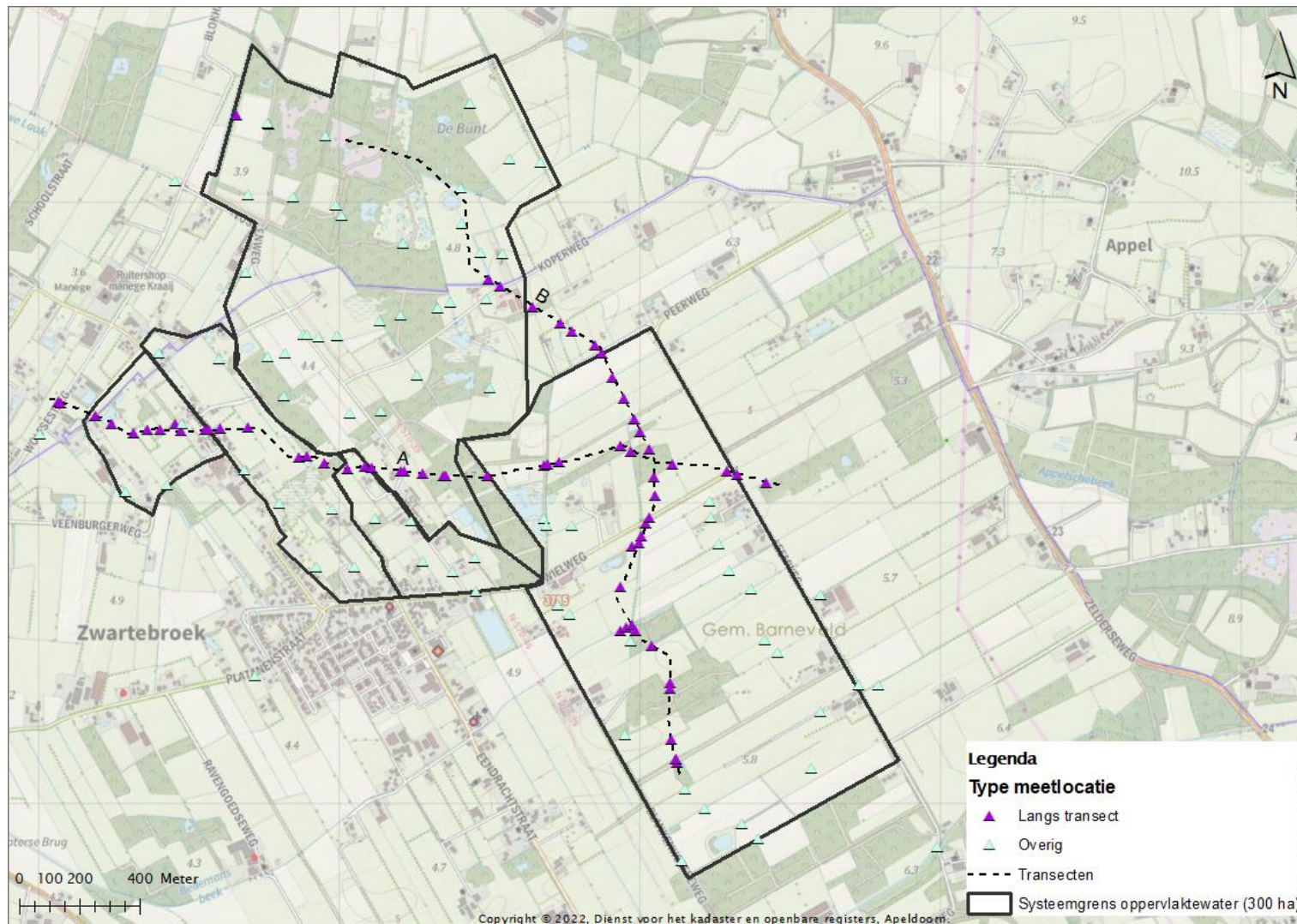
Om het oppervlaktewatersysteem in beeld te krijgen is het grootste deel van de watergangen in het gebied geïnventariseerd. Door het gebied te doorkruisen is er naar gestreefd om alle watergangen in het plangebied op minimaal één locatie te hebben gezien. Er zijn zoveel mogelijk watergangen bezocht, ruimtelijk verdeeld over het gebied. Ook zijn de watergangen op de transecten geïnventariseerd (zie paragraaf 2.3). Figuur 2 toont de locaties. Van de meetpunten in die watergangen zijn de volgende aspecten beschreven:

- Diepte
- Waterstand / watervoerendheid
- Kwelverschijnselen: aan- of afwezig (bacterievliezen, roest)
- pH en EGV
- Stromingsrichting

³ Kemmers et al., 2011.

⁴ Volgens De Bakker & Schelling, 1983

⁵ KNMI, 2022.



Figuur 2: Locaties van de waterstandsmetingen t.b.v. de WASA langs twee transecten en verspreid over het plangebied.



De metingen zijn vrijwel gelijk met de bodemboringen gedaan. Dit was in zowel een droge als zo nat mogelijke periode, namelijk tweede helft van september 2022 (droog) en half februari 2023 (nat). In het voorjaar van 2023 is daarna aanvullend de waterhoudendheid en de stromingsrichting geïnventariseerd, om zo een beeld te krijgen van hoe lang de watergangen water bevatten en of de stromingsrichting gedurende het jaar verandert. Die voorjaars inventarisatie is samen met Natuurmonumenten uitgevoerd.

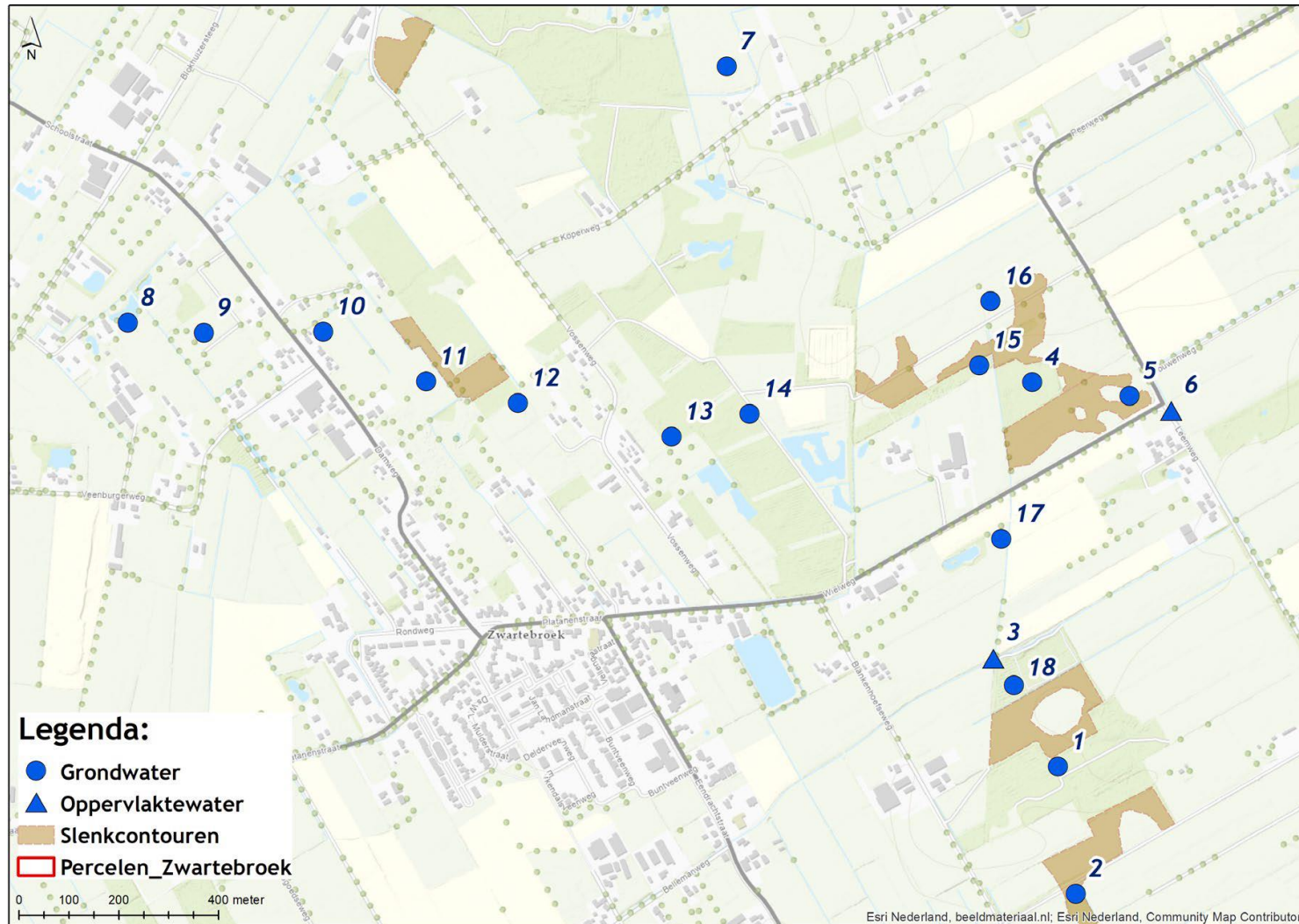
2.4 Analyse grond- en oppervlaktewaterkwaliteit

Naast fysieke verstoring (zoals opgebrachte grond) zijn er waarschijnlijk door historisch intensieve bemesting knelpunten op gebied van bodem- en waterkwaliteit. De waterkwaliteit is relevant wanneer in de toekomst vernattingsmaatregelen worden uitgevoerd op percelen.

Om duidelijk te krijgen of de grond- en oppervlaktewaterkwaliteit kansen bieden voor de beoogde ontwikkeling of juist een knelpunt vormen, zijn voor de watersysteemanalyse diverse watermonsters genomen. In totaal zijn 16 grondwatermonsterlocaties en 2 oppervlaktewatermonsterlocaties geselecteerd. De locaties zijn weergegeven in figuur 3. Deze locaties werden 30 en 31 januari 2023 bemonsterd door onderzoekcentrum B-WARE. De grondwaterbemonstering is uitgevoerd in tijdelijke peilbuizen (bodemboringen).

In het lab zijn de pH en EGV bepaald en de concentraties CO_2 , HCO_3^- , Ca, Mg, Al, Fe, Mg, P, SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , Na^+ , K^+ en Cl^- in $\mu\text{mol/l}$ en is de Fe/P ratio berekend. Een uitgebreide beschrijving van de methode en analyses is te vinden in de rapportage van onderzoekcentrum B-WARE in Bijlage 1.⁶

⁶ Bijlage 1; Visscher et al, 2023.



Figuur 3: Monsterlocaties onderzoekcentrum B-WARE (Bron: Visscher et al, 2023).

Noot: De nummering van deze onderzoekslocaties van B-WARE is anders dan de boorpunten op de transecten.



2.5 Uitwerking data en synthese

De verzamelde gegevens zijn uitgewerkt tot kaarten en dwarsprofielen van de twee transecten. De kaarten geven ruimtelijke patronen weer van de verschillende gegevens. De dwarsprofielen geven inzicht in de relatie en hydro-ecologische samenhang tussen waterstanden, pH, EGV en grondsoort (zand, veen, leem) op basis van dwarsdoorsneden van het hoogteverloop van het maaiveld. Die maaiveldprofielen zijn afgeleid van het AHN3. In de dwarsprofielen zijn ook de watergangen opgenomen om te kunnen zien wat het effect is van deze watergangen op de omgeving. Welke patronen zijn er? Hoe zijn die te duiden? Wat zijn de historische ontwikkelingen? Daarmee is afgeleid hoe het gebied is ontstaan, welke ontwikkelingsfasen er zijn geweest, en hoe dit tegenwoordig doorwerkt in het functioneren van het watersysteem.

Deze systeembeschrijving is de basis voor het beantwoorden van de onderzoeksvragen. Aan de hand van deze resultaten zijn de hoofdkenmerken van het systeem van het Zwarte Broek herleid. De synthese benoemt de kern van de kenmerken van het watersysteem. Hiermee kunnen gerichte inrichtingsmaatregelen worden gekozen, voor herstel van het functioneren van het watersysteem, de ecologische kwaliteiten en de cultuurhistorische kenmerken.

In de synthese komt ook het 'doelgat' aan de orde.

De gemeten waterstanden in de boorgaten in de natte en droge periode zijn vergeleken met de referentiewaarden voor de daar gekarteerde bodemtypen (Waternood, versie 3.0.4). Het verschil geeft het "doelgat" weer: het verschil van de gemeten waterstand ten opzichte van de waterstand waaronder de bodems zijn ontstaan. Als check is ook het waterstandverloop in bestaande peilbuizen binnen de transecten in het plangebied geanalyseerd (GxG en tijdstijghoogte) middels het programma Menyanthes.

Dit in beeld brengen van het doelgat biedt een basis voor de benodigde hydrologische herstelmaatregelen (zowel intern als extern).



3 Historische ontwikkelingen

De streek aangeduid als het Zwartebroek, in de buurt van Barneveld in de Gelderse Vallei, is een kleinschalig, eeuwenoud cultuurlandschap dat later de naam heeft gegeven aan het Natuurgebied Zwarte Broek. De Gelderse Vallei bestaat van nature uit geïsoleerde dekzandlaagten, zonder langgerekte beekdalen die het water konden afvoeren. Door de gebrekkige afvoer is het gebied van oorsprong nat waardoor er grote veencomplexen voorkwamen. In de vallei lag het Harderwijker Veen en Nijkerksche Veen. Deze toponiemen komen van de Bonnekaart van 1901. Het Zwartebroek was een vermoedelijk onderdeel of een randzone van dit grote veencomplex. Het Zwartebroek stond onder invloed van regionale kwel (grondwater) wat leidde tot zeggeveen en broekbos, waar de naam broek op duidt.⁷ In de detailuitsnede van figuur 4 is op de plek van Zwartebroek in de 16^e eeuw nog een veen- of moerassig gebied te zien.



Figuur 4: Fragment en detail van de kaart van de Veluwe uit de 80-jarige oorlog, vervaardigd door Christiaan Sgrooten in 1570, in opdracht van het Spaanse Hof. Het Zwartebroek is rood omcirkeld aangegeven en als detail uitgelicht.

(<https://www.elspeethistorie.nl/luchtfotos/topografische-kaarten/veluwe-1570>).

⁷ Grift, 2015.



Het in cultuur brengen van de Gelderse Vallei is al eeuwen geleden begonnen. Vanaf de middeleeuwen is het grote veencomplex ontgonnen en afgegraven. Op de kaart van Christiaan Sgrooten uit 1570 is al een grootschalig ontwateringsstelsel te zien (figuur 4). Van nature geïsoleerde laagten werden door deze ontwateringen met elkaar verbonden, waardoor het gebied kon afwateren.

Zwarteboek is later ontgonnen. Er zijn geen middeleeuwse boerderijen uit bekend. In de middeleeuwen waren boerderijen wel aanwezig op de overwegend hogere gronden ten noorden en oosten van Zwarteboek: in een lijn van Nijkerk, via Slichtenhorst, Driedorp, Kruishaar naar Appel.⁸ Ten noorden van de Hoevelakense beek is een middeleeuwse boerderij bekend, bij de tol ten westen van het projectgebied van Zwarteboek. De eerste vermelding van de plaatsnaam Zwarteboek is gevonden in de periode 1459–1470. De ontginning rondom de Kopersteeg strekte zich in het jaar 1560 al op tot aan het huidige Nijkerkerveen. Middeleeuwse erven langs de Bellemansbeek staan op een kaart van Passavant uit 1697. ⁹Grift (2015) vat het als volgt samen: “Het natuurlijke landschap van het dorp Zwarteboek werd beschreven als een moerassig gebied, waarin men in de loop van de tijd turf heeft gewonnen. De burgemeester C.A. Nairac van Barneveld liet in 1874 een inventarisatie maken van de veengaten rondom Zwarteboek. In die veentjes is hout van diverse boomsoorten gevonden, waarschijnlijk stammend van 8000 jaar geleden van vóór de veenontwikkeling hier.” In het gebied Zwarteboek heeft de ontginning geleid tot een kleinschalig cultuurlandschap met akkers, graslanden en singels, met in de laagste delen nat bos. Op de kaart van 1815 zijn de noordelijke delen van Zwarteboek nog woeste grond. Rond 1850 waren de meeste gronden ondertussen in cultuur gebracht blijkt uit kaarten op Topotijdreis.

In een uitgebreide studie van bodemkaarten en boorgegevens heeft Grift (2015) de aanwezigheid en type veen herleid in een deel van de Gelderse Vallei dat Zwarteboek omvat (figuur 5). Heel vaak is het veen afgedekt met een laag veraard veen, waarvan het type veen niet meer is te herleiden¹⁰. Rond Zwarteboek bestaat het veen, voor zover gemeten, vaak uit zeggeveen en soms broekveen. Dat veen is onder voedsel- en mineraalrijkere omstandigheden gevormd dan veenmosveen. Veenmosveen ontwikkelt zich onder invloed van regenwater, en is op slechts een punt bij Zwarteboek is aangetroffen. Dat boorpunt bevat overigens een decimeter dunne laag veenmosveen die, heel atypisch, overdekt is met een halve meter zeggeveen.

De Hoevelakense Beek ten zuiden van het projectgebied en de Brede Beek ten noorden hebben mogelijk een natuurlijke oorsprong op basis van hun meanderend patroon op oude kaarten.¹¹

⁸ Grift, 2015.

⁹ Grift, 2015.

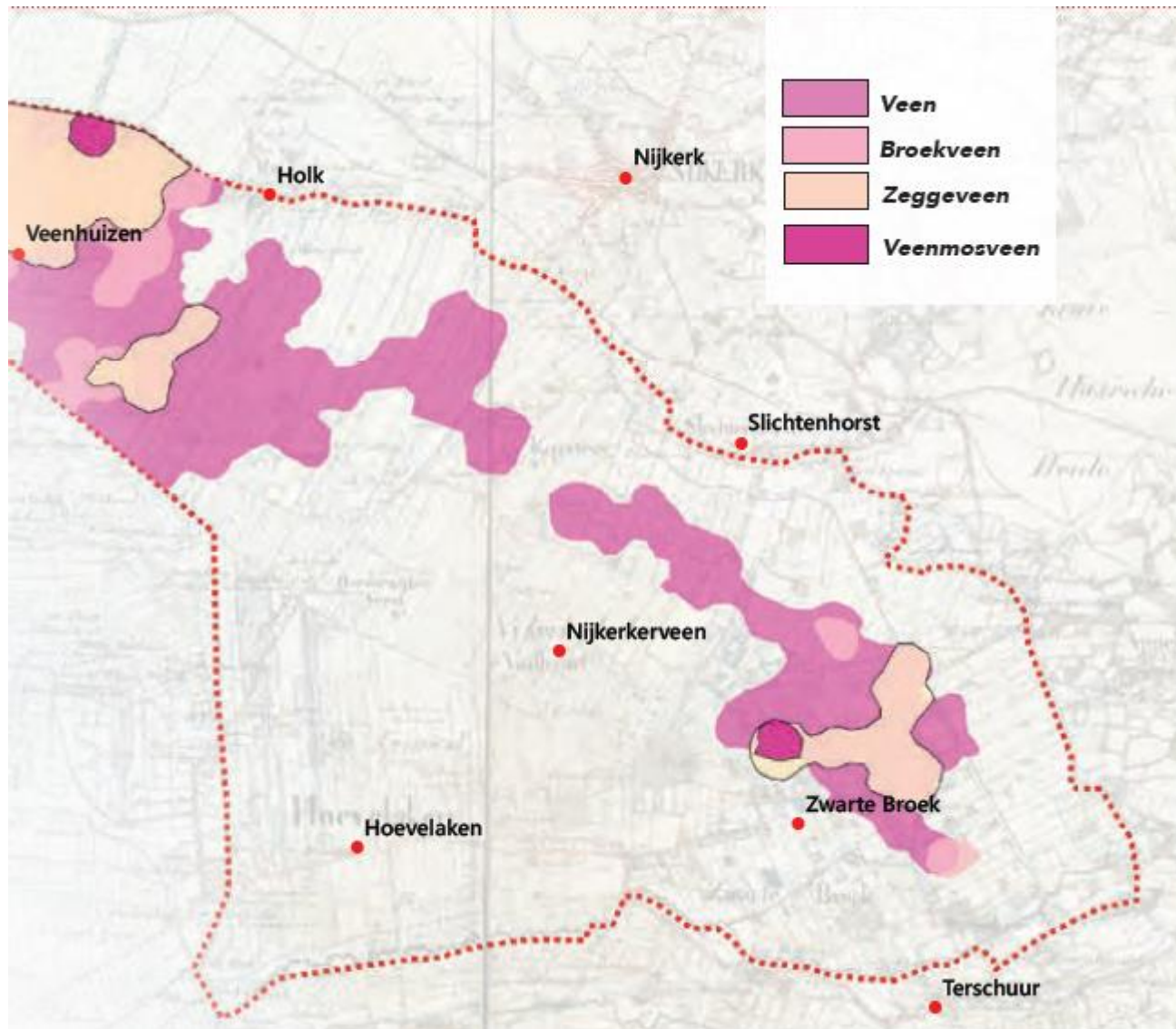
¹⁰ Grift, 2015

¹¹ Grift, 2015.

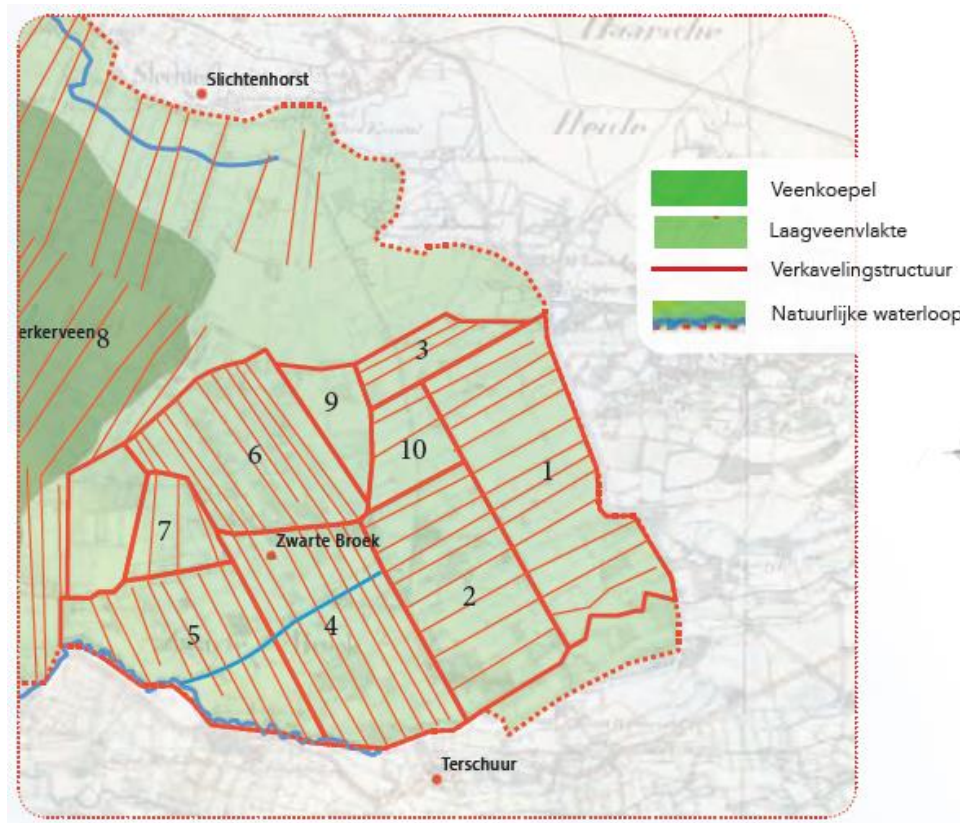


Zwartebroek ligt op het kruispunt van beide hydrologische deelsystemen. Met de ontginning van Zwartebroek zijn de beken in de loop der tijd rechtgetrokken en verlengd tot in het gebied (figuur 6 en 7) en is een intensieve ontwateringsstructuur gevormd. De ontginningen in het Zwartebroek zijn te zien in de verkavelingspatronen. De verkaveling is georiënteerd op de Bellemansbeek en maakt een scherpe hoek met de Hoevelakense beek. De Bellemansbeek was hoogstwaarschijnlijk de basis om het laagveengebied van Zwartebroek te ontginnen. De Bellemansbeek is gegraven om het westelijke deel van het Zwartebroek te ontwateren. Vervolgens heeft men aan weersijden boerderijen gesticht en is men het gebied gaan ontginnen.¹²

¹² Grift, 2015.



Figuur 5 Veensoorten in de noordelijke Gelderse Vallei op basis van boorpunten met veen uit het BodemInformatieSysteem. Bron: Grift, 2015.



*Figuur 6 . Ontginningsblokken in het Zwarte Broek. Bron: Grift (2015).
In het zuiden de Hoevelakense beek, met de gegraven Bellemansbeek als zijtak,
en de Brede beek in het noorden.*



Afbeelding 31. Ligging en namen van de belangrijkste waterlopen in de 19e eeuw.
(Bron: kadastrale atlas van Nijkerk (Van der Flier et al. 1989), kadastrale atlas van
Barneveld, Garderen en Voorthuize (Van der Hoek & Crebolder, 2014) en de ka-
dastrale atlas van Hoevelaken (Van der Hoek & Veldhuizen, 2009))

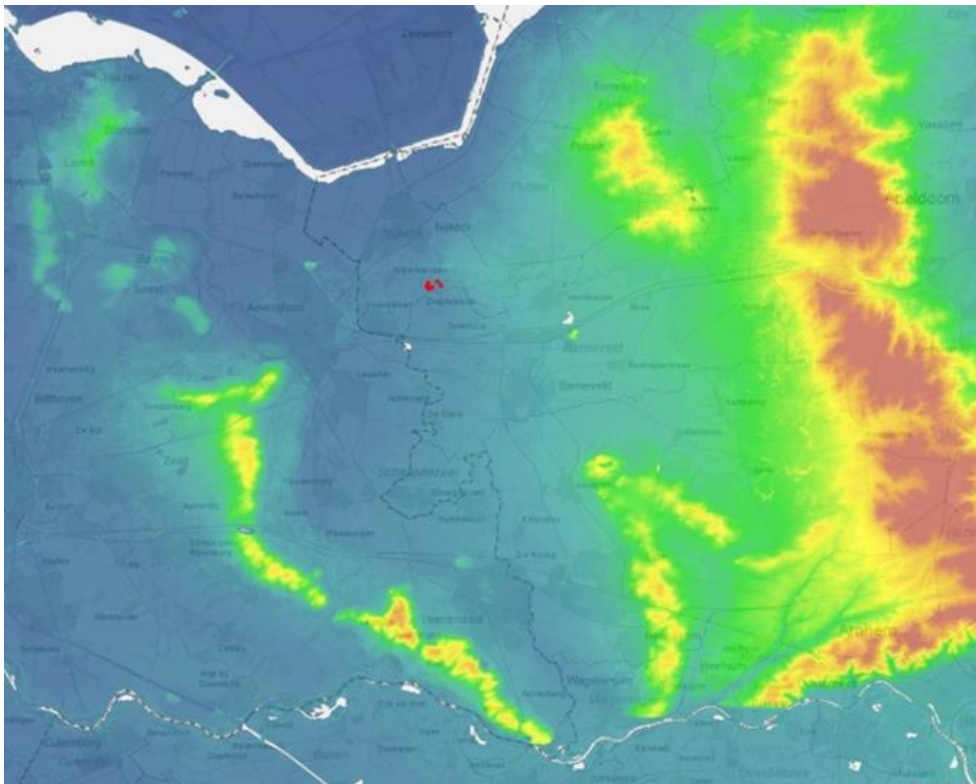
*Figuur 7 . Belangrijkste waterlopen in de 19e eeuw.
Bron: Grift (2015) op basis van kadastrale atlassen.*



4 Natuurlijk watersysteem

4.1 Geologie

De basis van het gebied is gevormd in het Pleistoceen. In de voorlaatste ijstijd, het Saalien (zo'n 150.000 jaar geleden), reikte de ijskap tot midden Nederland. Een grote ijslob kwam vanuit noordelijke richting het gebied binnen. De stuwwallen Utrechtse Heuvelrug en het Veluwe-complex zijn toen gevormd, en daarmee ook het tussenliggende tongbekken: de Gelderse Vallei. Zwarte Broek ligt daar midden in (figuur 8).

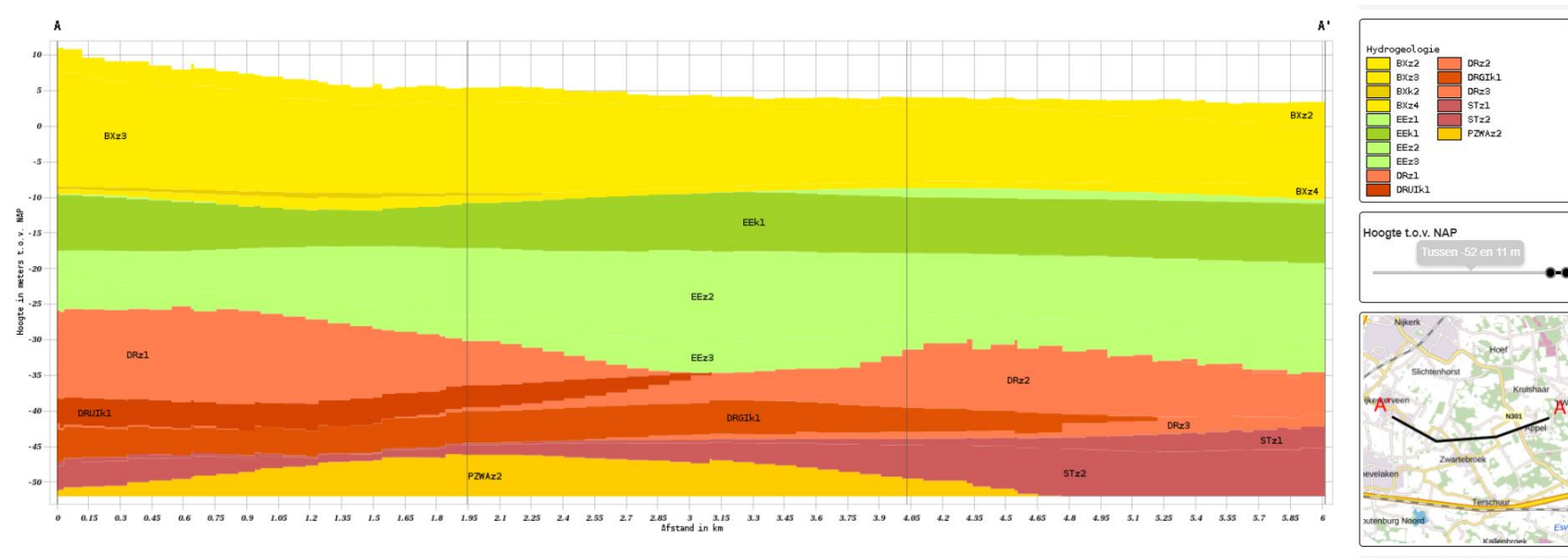


Figuur 8. Landschappelijke positie op basis van hoogteligging (AHN). Zwarte Broek (rood) ligt in de laaggelegen Gelderse Vallei die wordt begrensd door de Utrechtse Heuvelrug (west) en het Veluwe-massief (oost).



Onder de ijslob is keileem afgezet. Dit vormt de zeer slecht doorlatende basis op de bodem van de vallei. Dit is in figuur 9 als de oranje laag (Formatie van Drenthe; DR) herkenbaar. Hier bovenop is een dikke laag zanden afgezet na het smelten van het ijs.

Na die ijstijd volgde een warme periode met een veel hogere zeespiegel, het Eemien. Het tongbekken maakte toen deel uit van de Eemzee. In een periode van ca. 10.000 jaar is op de zeebodem een kleilaag afgezet. Die laag Eemklei is slecht doorlatend en vormt de basis voor het hydrologisch systeem. In figuur 9 is die laag als grasgroene laag weergegeven (EEK). Daar boven ligt een dik zandpakket (geel, Formatie van Bostel; BX), gevormd door ijs- en sneeuwseltafzettingen, en windafzettingen (dekzand; meer of minder lemig). Lokaal zijn gyttja- en veenlagen gevormd.¹³



Figuur 9. Geologische opbouw van de Gelderse Vallei van oost naar west. Zwarte Broek ligt tussen de verticale grijze strepen. Verticale doorsnede uit geohydrologisch ondergrondmodel Regis II v2.2, www.DINOloket.nl)

¹³ Smeenge et al., 2021.



Her en der zijn inderdaad leem- en veenlagen onder het zandpakket aangetroffen bij de bodemboringen. Volgens eerdere onderzoekers dateren dergelijke veenlagen uit het Laat Glaciaal (15.000 tot 12.000 jaar geleden).¹⁴ In het nabije Landgoed Oldenaller is door de Bosgroepen ook op diverse plekken veen gevonden op 1–1,5 m diepte, dat echter veel ouder bleek, namelijk 26.000 jaar oud.¹⁵ Wanneer de veen- en leemlagen in Zwarte Broek precies gevormd zijn is dus niet te bepalen zonder nader dateringsonderzoek.

Wat relevant is, is dat de aanwezigheid van leem en veen effect heeft op de hydrologie ter plekke: het is veel minder goed doorlatend dan het aangetroffen zand, en werkt doorgaans als een storende laag.

4.2 Reliëf en hydrologie

De geologische opbouw en het reliëf bepalen het natuurlijke grondwatersysteem. Zwarte Broek ligt op de overgang van de hoge dekzandruggen in het oosten naar de lage vlakte van de Gelderse Vallei (figuur 8 en 10). Het maaiveld maakt bij Zwarte Broek een knik (Figuur 10).

Er is sprake van een regionale grondwaterstroming waardoor grondwater naar de vallei stroomt. Het grondwater komt vanuit de hoge dekzandgronden en omringende stuwwallen. Het is vooral een westelijk gerichte stroming vanuit de Veluwe. In het Zwarte Broek in detail is de regionale grondwaterstroming iets naar het zuidwesten gericht (figuur 11).

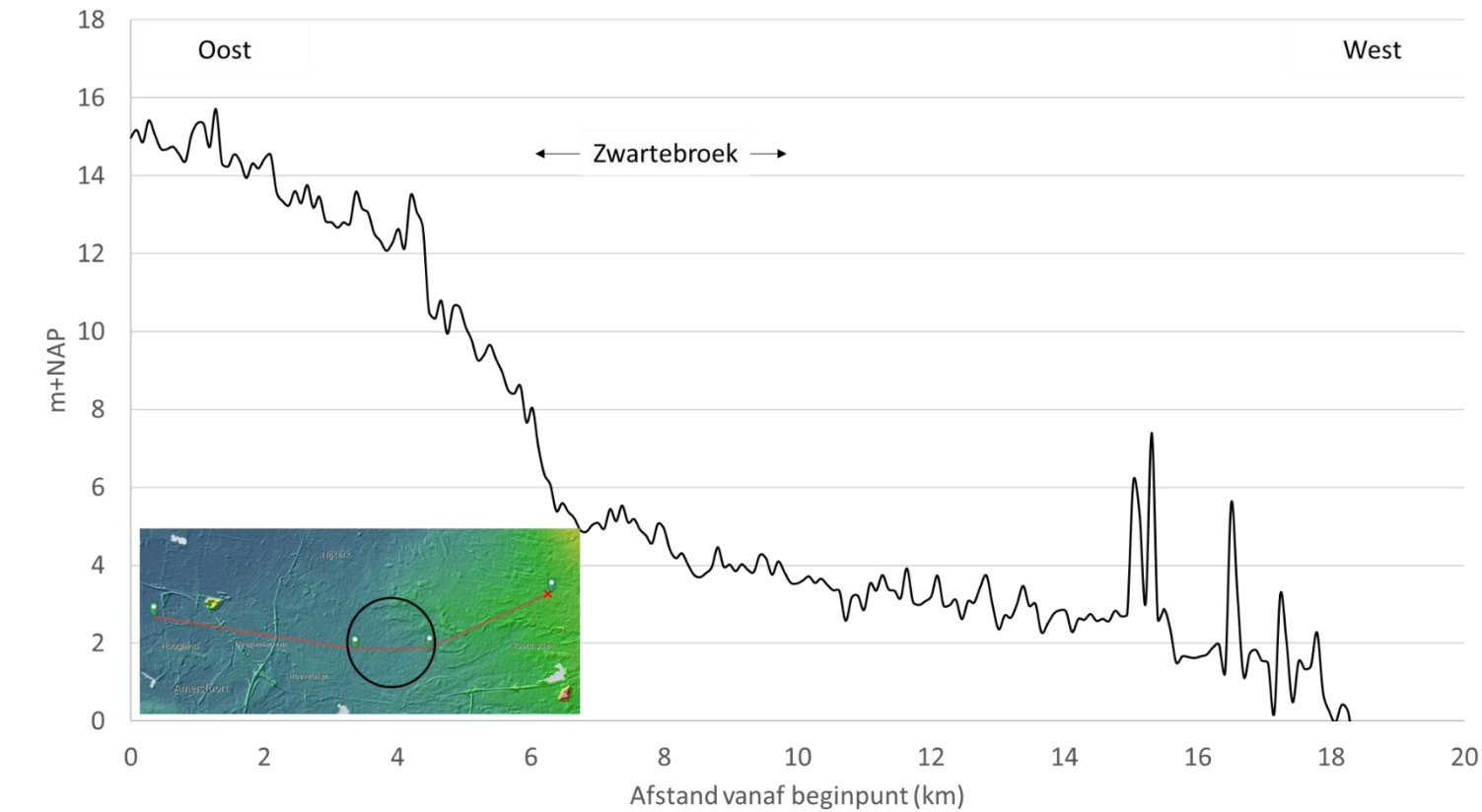
De zandige laag van de Formatie van Boxtel vormt het eerste watervoerende pakket (figuur 9). Deze laag is doorslaggevend voor wat er hydrologisch gebeurt. De laag Eemklei er onder is slecht doorlatend en vormt min of meer de hydrologische basis.

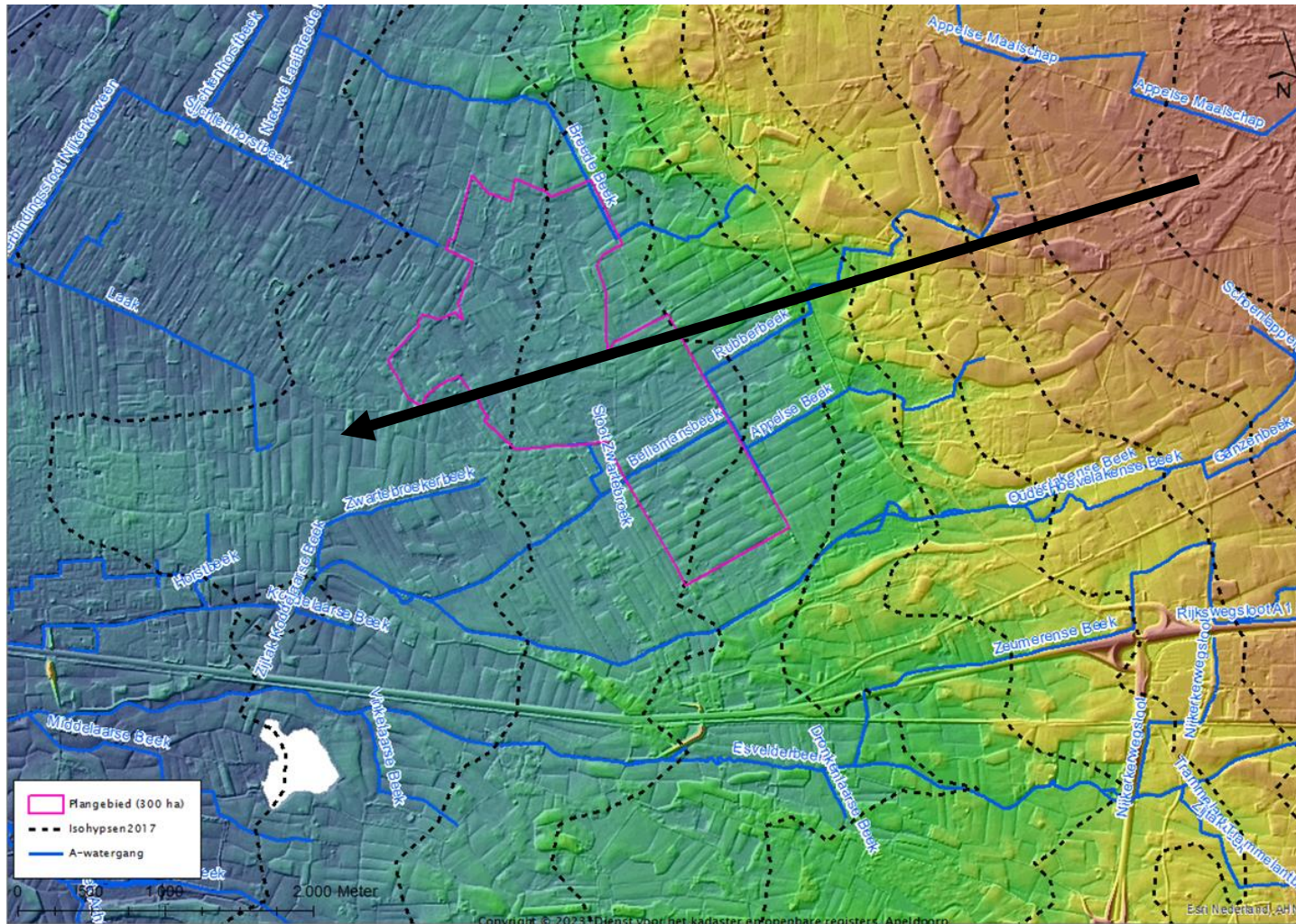
De met grondwater gevulde zandlaag onder de Eemklei geeft opwaartse tegendruk in de vallei: kweldruk. Er komt water in vanaf de stuwwallen aan de zijkant (waar geen Eemklei ligt), en dat grondwater zit daarna opgesloten onder de zeer slecht doorlatende kleilaag. Die tegendruk is relevant: als de Eemklei plaatselijk dun is of wat beter doorlatend, dan werkt de kweldruk door in het eerste watervoerende pakket er boven.

In figuur 11 is te zien dat de isohypsen (de 'hoogtelijnen' van het grondwater in de bodem) dicht bij elkaar liggen aan de oostkant van het Zwarte Broek. Het grondwaterstandsverloop is hier steiler, er zit druk en toestroom achter vanuit de Veluwe in het oosten. De Brede beek ligt aan de voet van de helling waar de toestroom het grootst is (isohypsen dichtst bij elkaar). Die is hier hoogstwaarschijnlijk ontstaan en vergraven door een overvloed aan uittredend grondwater. Waarschijnlijk zijn de Appelse Beek, Rubberbeek en Oude Hoevelakense Beek ook gegraven en verder stroomopwaarts getrokken, tot waar ze in de huidige situatie beginnen: in die kwelhelling (zie ook hierna). Waarschijnlijk ontsprongen de natuurlijke Brede Beek en Oude Hoevelakense Beek meer benedenstrooms (zie figuur 6).

¹⁴ Berendsen, 2008; Jongmans et al., 2018.

¹⁵ Smeenge et al., 2021.





Figuur 11 Plangebied Zwarte Broek: hoogteverloop van het grondwater (isohypsen) van het 1^e watervoerend pakket en belangrijkste waterlopen. De pijl geeft de regionale grondwaterstroming, die staat haaks op de isohypsen en is gericht naar het laaggelegen westen (blauw), vanaf de hogere dekzanden in het oosten (bruin en geel).



De invloed van grondwater is eveneens te illustreren aan de hand van de duurlijnen¹⁶ van een peilbuis in het gebied (Figuur 12). De bovenste twee filters (1 en 2) zitten in het zandpakket (Boxtel), de onderste in of onder de Eemklei. Er is niet alleen een overdruk te zien van het water onder de Eemklei, maar ook binnen het zandpakket boven de Eemklei is de stijghoogte van het tweede (diepere) filter hoger dan die in het ondiepe, eerste filter. De grondwaterstroming is opwaarts gericht: kwel. Het duidt erop dat Zwarte Broek op een kwelhelling ligt (Figuur 13). Ook laten metingen van onder andere pH en EGV, die verderop in hoofdstuk 5 worden besproken, preferente grondwaterstromingen zien.

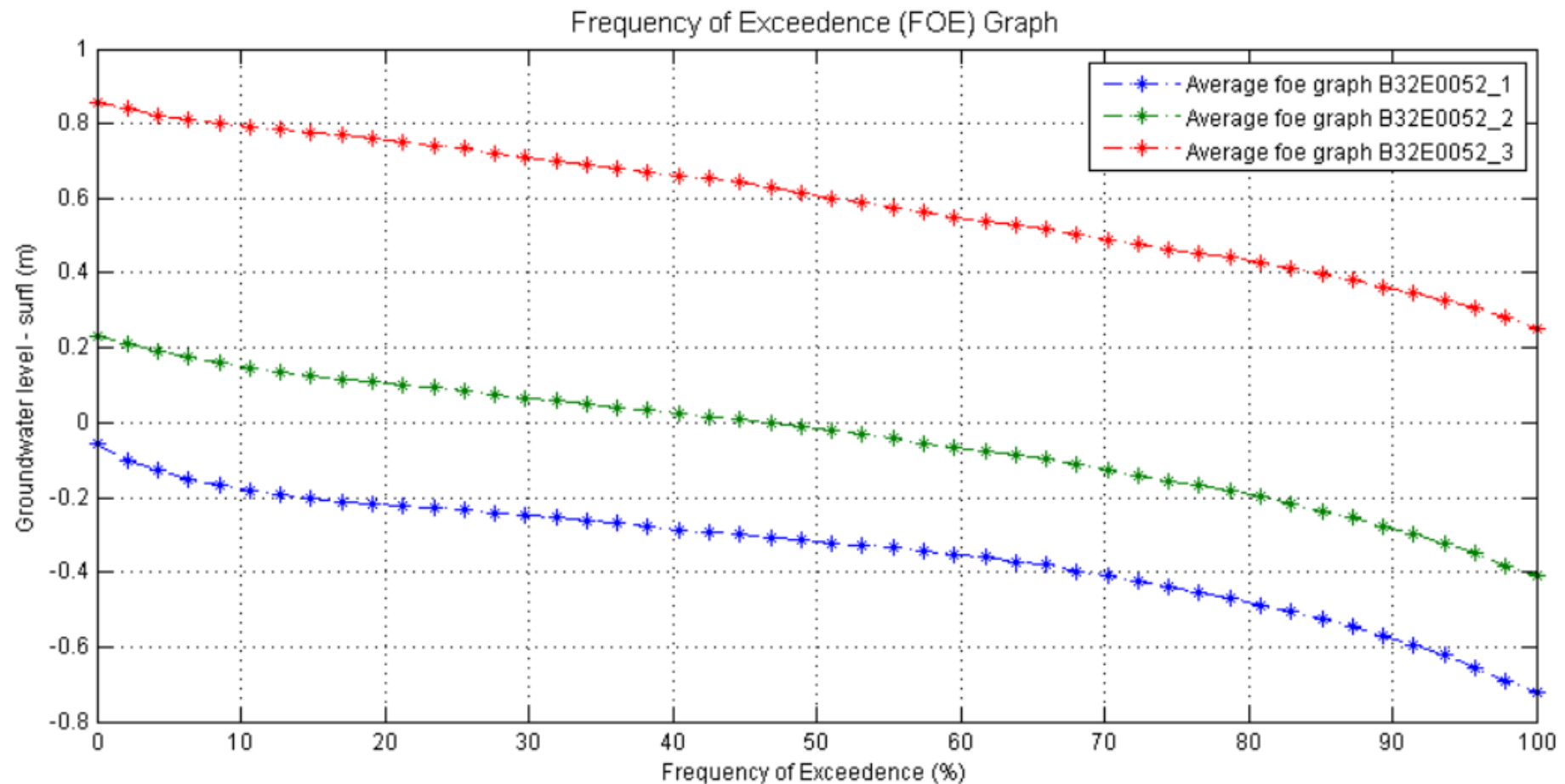
De Gelderse Vallei kent sinds het einde van de laatste ijstijd en het begin van het Holocene tijdperk een natuurlijk afwateringssysteem. Dit bestaat uit het riviertje de Eem, die in noordelijke richting stroomt, via de stad Amersfoort die veel later aan die rivier is ontstaan. De zuidelijke helft van de vallei kent een aantal oost-west lopen de beken die vanaf de Veluwe naar het westen stromen en de Eem voeden. Dat is buiten het projectgebied. De Hoevelakense beek ten zuiden van het projectgebied Zwarte Broek is de noordelijkste van die beken.

In het noordelijk deel van de Gelderse vallei, waartoe Zwarte Broek behoort, is het afwateringssysteem van origine beperkt tot de Brede beek, die zich pas veel noordelijker bij een rivier voegde (namelijk middenin wat nu Zuidelijk Flevoland is, te zien in de Atlas van Nederland in het Holoceen.¹⁷ Verder is het een gebied met overwegend geïsoleerde dekzandlaagten, zonder langgerekte beekdalen die het water gemakkelijk konden afvoeren naar de Eem. Er is in dit deel van de Gelderse Vallei een soort keten van lokale laagtes, met lokale grondwatersystemen. In neerslagrijke perioden bolt het grondwater op in de hogere ruggen langs de laagtes. Daardoor ontstaat er druk op het grondwater en wil het naar de lagere delen stromen. Op basis van de hoogtekaart (AHN) zijn in de laagtes de –hypothetische– natuurlijke stromingen van de lokale watersystemen weergegeven in figuur 14. In de laagtes zal zich ook regenwater hebben verzameld. Zodoende omvat het gebied een serie van ‘bakjes’ waar lang grond- en regenwater in bleef staan. Er zal wel wat afvoer zijn geweest op momenten dat deze dekzandlaagten vol water stonden en overliepen in aangrenzende, lager gelegen laagten.

Door de gebrekkige afvoer was de Gelderse vallei dus van oorsprong nat en ontwikkelde het zich tijdens het Holoceen tot een veenmoeras (Hoofdstuk 3). Bij het grote Harderwijker Veen en Nijkerksche Veen is een hoogveenkoepel ontstaan, waarbij het veen zich vormde onder invloed van regenwater (veenmosveen), zegt Grift, (2015) in zijn onderzoek. Hij geeft aan dat het gebied met toponiem Zwarte broek vermoedelijk een randzone was van dit grote veencomplex, en dat hier bij eerder onderzoek in lage delen veen is aangetroffen dat bestaat uit zeggeveen, rietveen en broekveen. Zulk veen is gevormd onder permanente invloed van mineraalrijk water, zoals bij grondwaterinvloed en kwel.

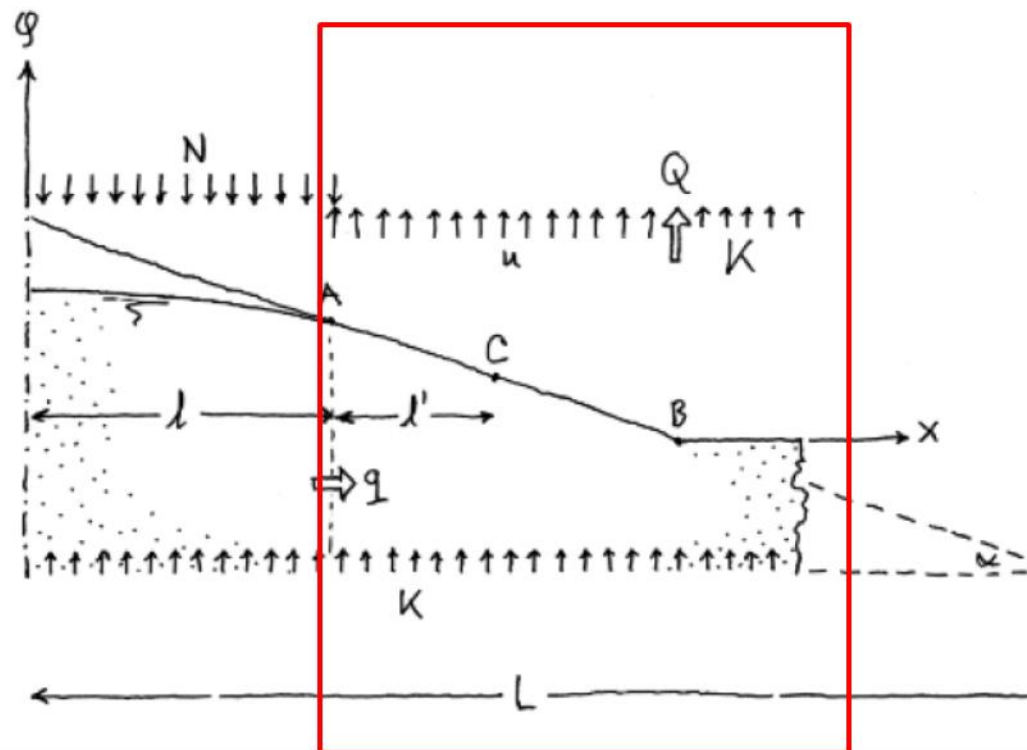
¹⁶ Duurlijnen geven aan hoeveel procent van de tijd de waterstand boven een bepaald niveau is. Aan de vorm van een duurlijn is af te leiden van welke hydrologische situatie er sprake is: een bolle lijn zoals bij de weergegeven peilbuis geeft een kwelsituatie weer (lang, hoge waterstanden), terwijl een S-vormige curve een infiltratiesituatie weergeeft.

¹⁷ Vos et al, 2011.



Figuur 12: Duurlijnen van drie filters van een peilbuis aan de Vossenweg ten oosten van het dorp Zwarte Broek.

De 'bolle' vorm van de duurlijnen duidt op een kwelsituatie (langdurig hoge waterstanden). Filter 3 is in of onder de Eemklei geplaatst (rood). Er is met name overdruk door de Eemklei (zie filter 3 versus 1 en 2), maar ook binnen het zandpakket is er grondwaterdruk: de waterstand in filter 2 (groen) staat hoger dan in filter 1 (blauw). Filter 1 en 2 staan op ongeveer 10 en 22 m onder maaiveld in het zandpakket,

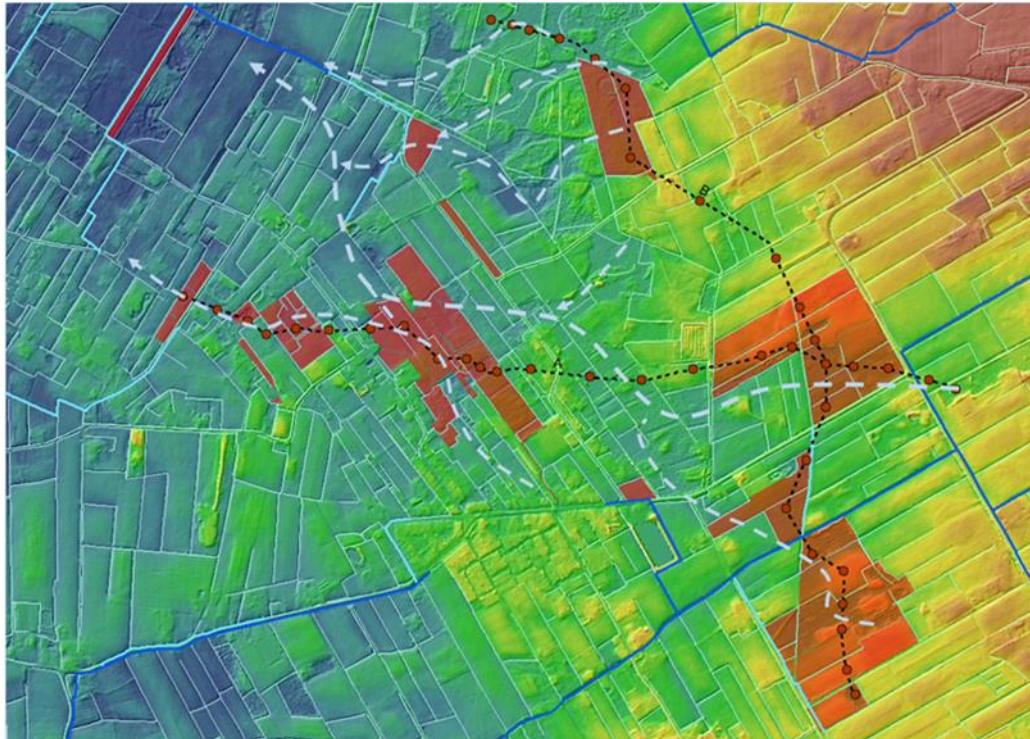


x	plaatsvariabele (m)
ϕ	freatische grondwaterstand (m)
k	doorlatendheid van de freatische aquifer (m/d)
c	weerstand van de scheidende laag (d)
α	hellingshoek (-)
N	grondwateraanvulling (m/d)
u	uittreding van grondwater langs de helling (m/d)
K	diepe kwelflux (m/d)
Q	uittreding van grondwater aan de rand van een ven (m ²)
A	bovengrens van de zone met kwel aan maaiveld
B	overgang van helling naar dalbodem
C	grens tussen lokaal en diep kwelwater
ℓ	(halve) breedte van het intrekgebied
ℓ'	breedte van de zone met lokale kwel

Figuur 13: Werking van een kwelhelling (bron: C. Maas). Infiltratie (links) zorgt voor uittreding van grondwater langs de helling (in kader). Doordat het Zwarte Broek op de overgang ligt van infiltratie (dekzandruggen het oosten) naar de lage vlakte van de Gelderse Vallei, treedt juist in deze zone grondwater uit.



Op basis van de hoogtekaart (AHN3) en de kavelstructuur (zie vorige hoofdstuk) is in figuur 14 met blauwe pijlen een inschatting gemaakt van hoe het water zich van nature een weg baande richting het noorden. Het hydrologisch systeem is aanzienlijk veranderd sinds de ontginning. Hoofdstuk 5 gaat in op de huidige situatie en hoofdstuk 6.2 op de deelsystemen.



Figuur 14: Hypothetische grond- en oppervlaktewater stromingen (blauwe stippelpijlen) op basis van het AHN en de kavelstructuur. In rood zijn de eigendommen van Natuurmonumenten weergegeven.

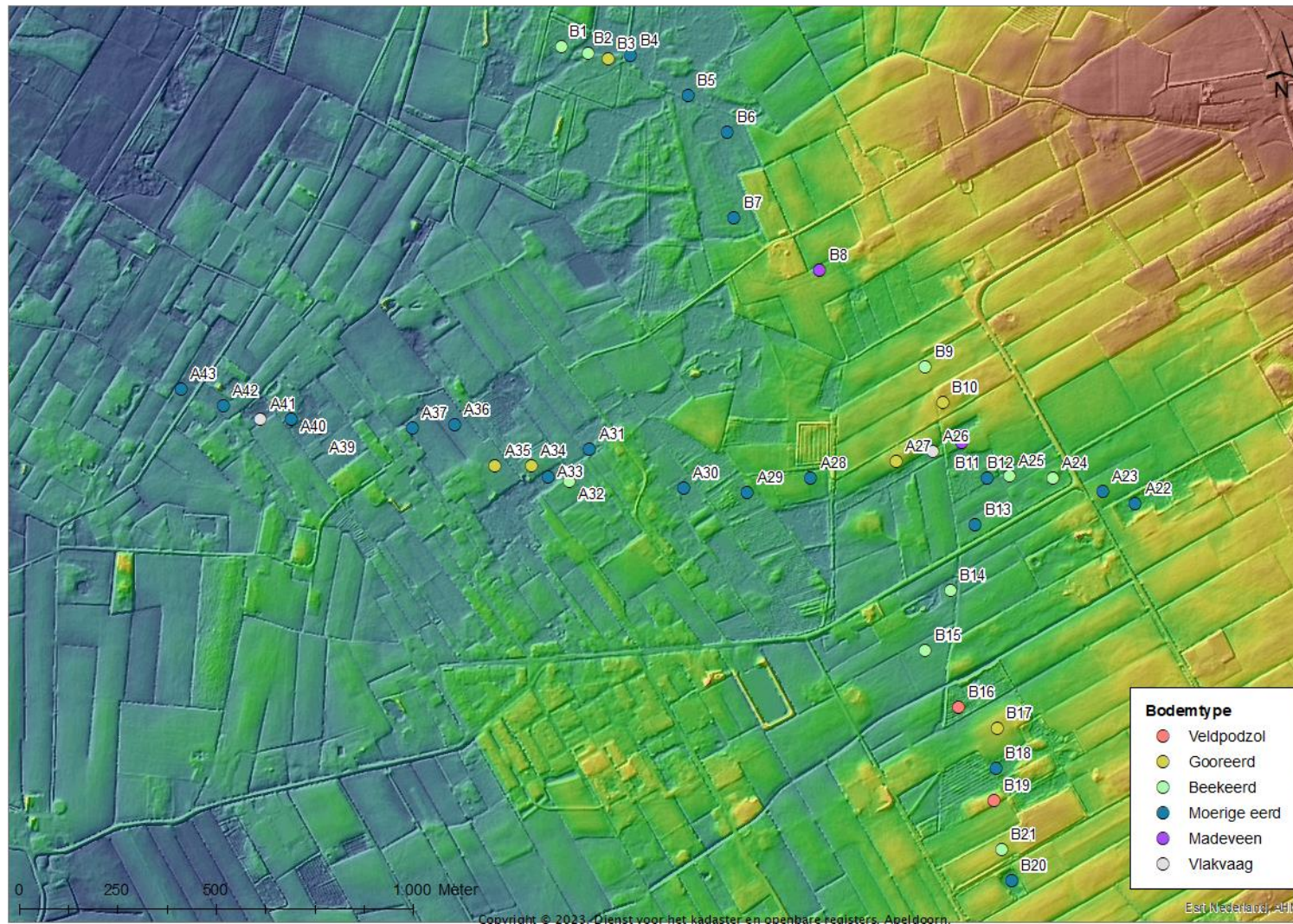
4.3 Bodemtypen

Bodemtypen zijn het resultaat van honderden jaren bodemvorming en zeggen daarmee iets over het historisch functioneren van het landschap. Ze geven duiding aan de opbouw van de ondiepe ondergrond (tot 80 cm diepte). Figuur 15 toont het bodemtype per boorlocatie en figuur 16 foto's van enkele profielen. Opgemerkt moet worden dat tijdens en na ontginning van Zwarte Broek verschillende van oorsprong natte percelen zijn opgehoogd met zand van elders. Zand was hier zeer gewild (mond. med. W. Zwaneveld). Daar is het oorspronkelijke bodemtype begraven.



Voorbeeld van zo'n begraven (veen)bodem is te zien in Figuur 16. In deze studie is uitgegaan van het oorspronkelijke bodemtype zoals ontstaan in het natuurlijke hydrologische systeem.

- **Podzolgronden** worden gevormd onder invloed van regenwater (inzijging). De neerwaartse beweging van het (zure) regenwater zorgt voor deze typische humusprofielen. Binnen Zwarte Broek zijn veldpodzolgronden waargenomen: aan de zuidoostzijde van het gebied, op de overgang naar wat hogere grond. Veldpodzolen ontwikkelen zich op plekken die van nature periodiek nat zijn, van water met een mineraalarm, regenwaterachtig karakter. In de zomer zakken de waterstanden bovendien diep weg.
- **Gooreerdgronden** zijn gevormd door een afwisseling van ijzerarm grondwater in de winter, maar vrij diep wegzakkende grondwaterstanden in de zomer. Ze liggen op de overgang van infiltratie- naar kwelgronden, vaak met een laterale aanvoer van grondwater. Gleyverschijnselen (roest) zit dieper dan 35 cm. In Zwarte Broek zijn ze aangetroffen in raai B aan de oostkant van het gebied, en op een wat hoger gelegen deel middenin de oost-westraai.
- **Beekeerdgronden** liggen in kwelgebied. Ze zijn gevormd onder invloed van ijzerrijk grondwater. Dat is te zien aan roestvlekken in het bodemprofiel binnen 35 cm-mv., een kenmerk van beekeerdgronden. In Zwarte Broek zijn beekeerdgronden vooral aangeboord in lage delen van het natuurontwikkelingsgebied ten noorden van de Bellemansbeek. (A25, A26, B14, B15) en in de noordpunt van het onderzoeksgebied (B1, B2).
- **Veengronden** ontstaan in laagtes en plekken met permanent natte omstandigheden. Als zich een veenlaag van dikker dan 40 cm heeft kunnen ontwikkelen is sprake van veengrond. In Zwarte Broek is in het onderzoek op één locatie veengrond aangetroffen: een bij de knik in het maaiveld (boring B11, figuur 15). Deze Madeveengrond is begraven onder 60 cm zand (figuur 16).
- **Moerige eerdgrond** zijn gronden waar het aanwezige pakket veen dunner is dan 40 cm.. Vaak is veen in het verleden ontgraven of door verdroging verdwenen waardoor een dunne laag restveen over is. In Zwarte Broek is veenaufgraving en verdroging ook het geval (hoofdstuk 3), en er zijn vaak moerige eerdgronden aangeboord. Moerige eerdgronden kunnen ook van nature voorkomen: aan randen van het veengebied op de overgang naar hogere zandgrond, waar de veenvorming nog relatief jong is of waar de grondwaterstand teveel schommelt voor vorming van dikke veenpakketten.
- **Vlakvaaggronden** hebben geen duidelijke bodemvorming. Op locatie A26 betreft het een rabat waarbij dus grond op het oorspronkelijke maaiveld is opgebracht. Locatie A41 betreft een afgegraven bodem.



Figuur 15: aangetroffen bodemtype per boorlocatie.



Begraven madeveengrond



Beekeerdgrond met roest tot in maaiveld



Gooreerdgrond



Veldpodzolgrond

Figuur 16: Bodemprofielen van verschillende bodemtypen in Zwarte Broek



5 Huidig watersysteem

Het huidige watersysteem is onderzocht en gemeten na een (heel) droge zomer en normale winterperiode¹⁸: september 2022 en februari 2023.

5.1 Ontwateringssysteem

De hoofdwatgangen in het gebied zijn allemaal gegraven of vergraven. De Breede beek en de Hoevelakense beek (ten zuiden van het plangebied) hebben mogelijk een natuurlijke oorsprong (zie hoofdstuk 3), maar zijn rechtgetrokken en doorgetrokken het Zwarte Broek in.

Momenteel liggen er in het plangebied de volgende oppervlaktewatersystemen met een hoofdwatgang (figuur 17):

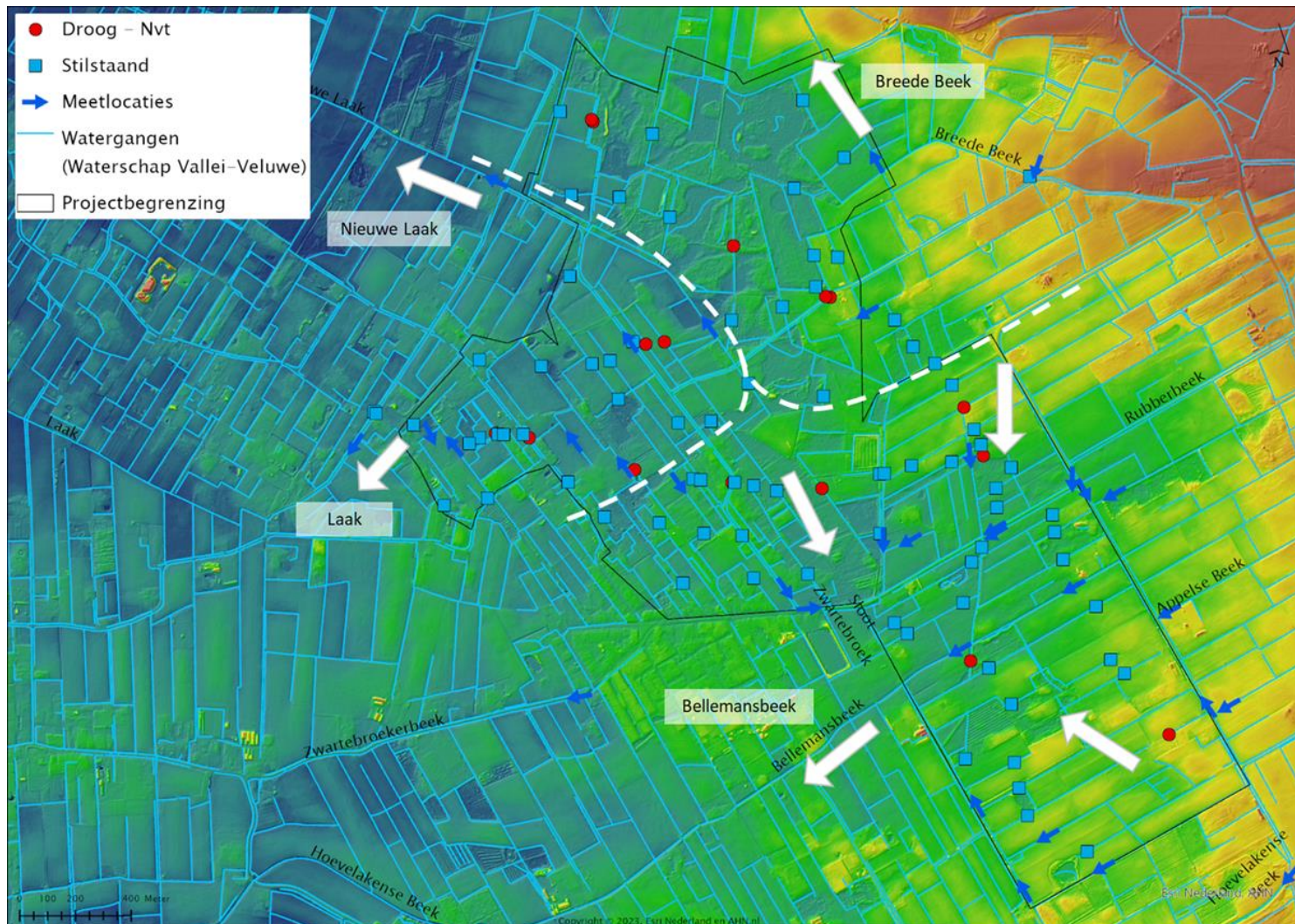
- Bellemansbeek: De Bellemansbeek begint ten westen van de Peerweg. Hier komen de twee bovenlopen van de Bellemansbeek bij elkaar: Rubberbeek en Appelse Beek. Ze liggen in het hoger gelegen oostelijker dekzandlandschap, hoger op de kwelhellings.
- Bellemansbeek zijtak: deze zijtak watert af op de Bellemansbeek zelf.
- Laak: De ontwatering in dit gebied gaat richting het westen, naar de Laak (eerst B-, later A-watgang).
- Nieuwe Laak & Breedebeek: De detailontwatering gaat richting de Breedebeek (noorden) en Nieuwe Laak (noordwesten)
- Nieuwe Laak: de detailontwatering in dit gebied lijkt af te wateren op de Nieuwe Laak (eerst B-, later A- watgang).

In deze deelsystemen liggen enkele kilometers aan hoofdwatgangen, en de lengte aan B- en C- watgangen omvat er ca. 50 kilometer. Dit is nog zonder de lengte aan sloten die niet op de waterschapslegger staan. Het gebied is intensief ontwaterd. De Bellemansbeek en haar detailontwatering zijn noordoost-zuidwest-georiënteerd. In de overige deelgebieden zijn de sloten zuidoost-noordwest-georiënteerd.

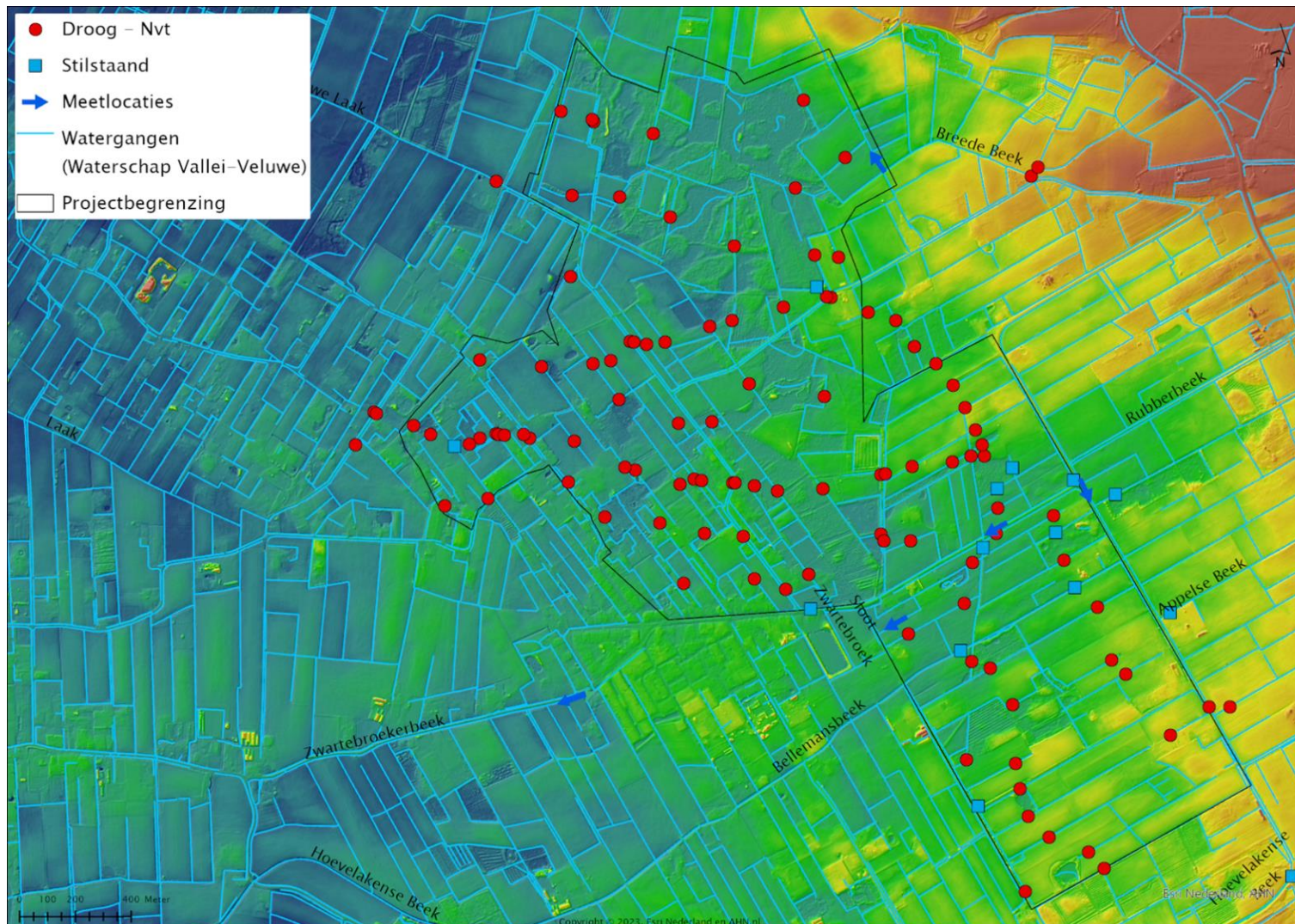
5.2 Waterstanden en stromingsrichting

Een onderzoeksvraag is of de watgangen jaarrond water bevatten. De meeste greppels, sloten en watgangen stonden in september droog (figuur 18). In enkele sloten (dieper dan 70 cm) en beken werd wel water aangetroffen, stilstaand. Alle beken zijn dieper dan 1 m. Op een heel enkele plek was zelfs stromend water: In de Breede beek (noord), Rubberbeek langs de Leemweg (oost) en Zwartebroekerbeek (zuid). Daar was dus, na die heel droge zomer, nog steeds afvoer van water. In figuur 21 zijn de waterstanden in de boorgaten te zien. Moerasbossen, die 's winters nog water aan maaiveld bevatten, stonden droog met grondwaterstanden 75–90 cm onder maaiveld (Figuur 19). Eén uitzondering was een broekbos met zeggen (locatie A30, bij de Vossenweg): hier stond het 'slechts' 45 cm onder maaiveld (figuur 21). En in de natte schraallanden van Bondte Vos en bij de Koperweg was er nog grondwater op 60–65 cm diepte.

¹⁸ KNMI, 2022.



Figuur 17: Te onderscheiden deelsystemen van het oppervlaktewater op basis van gemeten stromingsrichtingen van het water in de watergangen (februari 2023) en globale afstroomrichting van elk beekstelsel (witte pijlen).



Figuur 18: Watervoerendheid en stromingsrichting op meetlocaties van watergangen (september 2022).



Figuur 19: Het moerasbos en rietland ten noorden van de Koperweg dat droog stond (september 2022).

Aan het einde van de winter in februari 2023 stond een klein deel van de wateren nog steeds droog (figuur 22). Dat waren watergangen van 10 tot 70 cm diepte. De meeste beken en sloten waren weer watervoerend. Het was doorgaans stilstaand water. Stromend water is vooral aangetroffen in de beken. Verder was er een beperkt aantal sloten met stromend water. Daarmee zijn de stromingsrichtingen in het Zwarte Broek bepaald.

5.3 Deelsystemen op basis van stromingsrichting

Op basis van de stromingsrichtingen van het water in de watergangen (februari 2023) zijn in figuur 17 deelgebieden onderscheiden. Het zuidelijke deel van Zwarte Broek behoort tot het systeem van de Hoevelakense Beek. De Rubberbeek en Appelse Beek komen uit op de Bellemansbeek. Deze watert ook de sloten ten oosten van de Vossenweg af.

Het noordelijk deel van Zwarte Broek valt grotendeels in het systeem van de Nieuwe Laak. Daar hoort ook het slotenstelsel bij ten westen van de Vossenweg. Het noordoostelijk gebied rond de Koperweg behoort tot het stroomgebied van de Breede Beek. Het westelijke deel van Zwarte Broek watert af op de Laak, die buiten de gebiedsgrens naar het noordwesten afbuigt, parallel aan de Nieuwe Laak.



5.4 Waterkwaliteit

De eigenschappen van het water in de watergangen en boorgaten zijn in de komende paragraaf beschreven aan de hand van kwelverschijnselen (in watergangen), pH en EGV (in watergangen en boorgaten) en analyses van de chemische samenstelling van het grond- en oppervlaktewater op enkele locaties verspreid door het gebied.

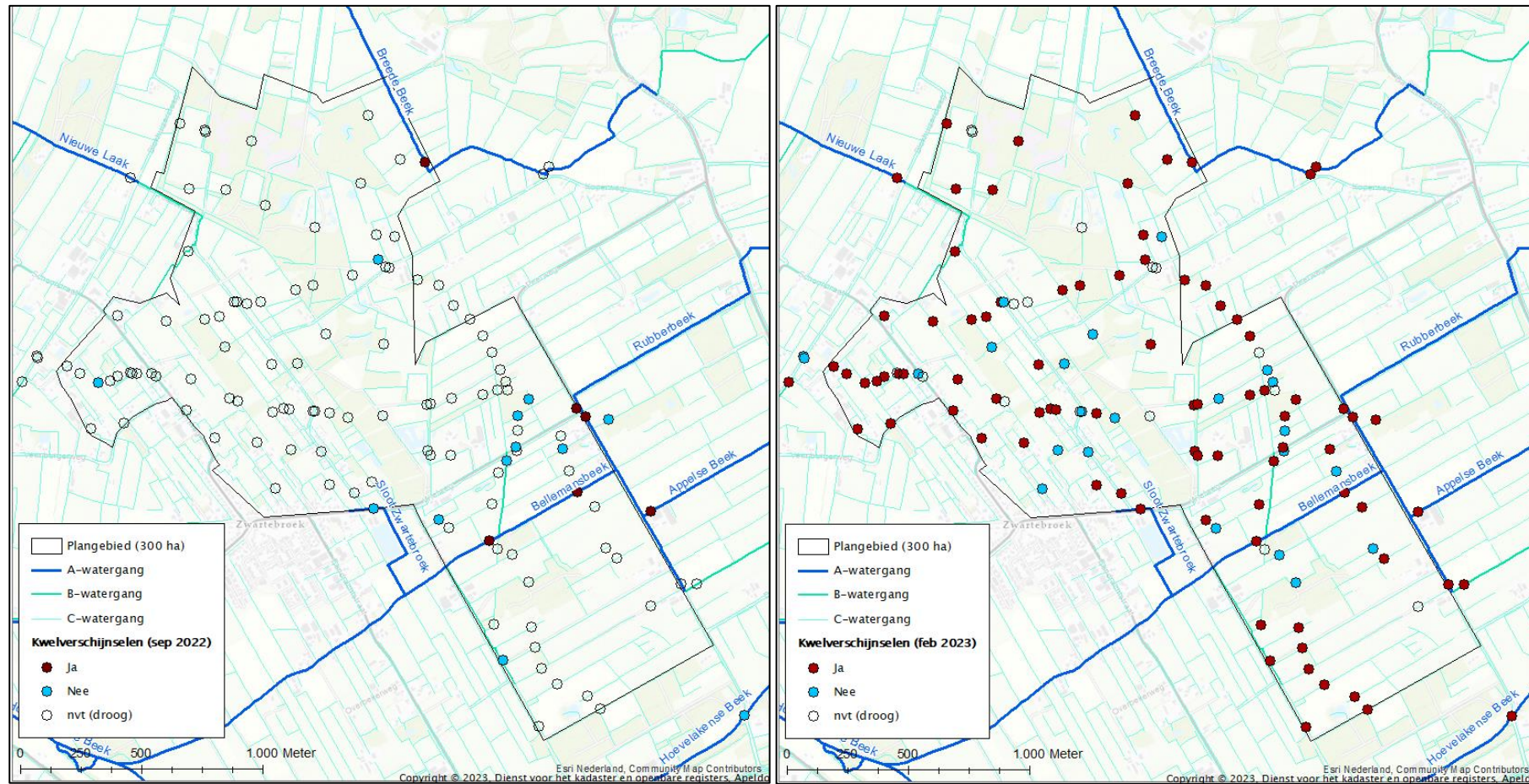
5.4.1 Kwelverschijnselen

Kwelverschijnselen omvatten roestkleuring van bodem en water en/of aanwezigheid van ijzerbacterievliesjes op het water (olie-achtig). Ze duiden op invloed van (ijzerrijk) grondwater..¹⁹ Kwelverschijnselen zijn geïnventariseerd in de watergangen in september 2022 en februari 2023. Na de droge zomerperiode stonden in september 2022 het overgrote deel van de watergangen droog. Er zijn alleen kwelverschijnselen aangetroffen in beken aan de oostkant van het gebied en de Breede beek in het noorden (Figuur 20). In de nawinterperiode zijn verspreid over het hele gebied kwelverschijnselen aangetroffen, maar niet in alle wateren. Op de plekken waar geen kwelverschijnselen zijn aangetroffen, maar wel water, is de watergang waarschijnlijk vooral gevoed met regenwater. In landgoederen rond de Koperweg is ook kwel geconstateerd. Op landgoed Groot Grevengoed is sprake van kwelzones, met kwelviezen in maaiveld.²⁰ Op De Bunt van landgoed Slichtenhorst is diepe kwel aanwezig, die zich echter beperkt tot de sloten.²¹

¹⁹ In kleigronden in bijvoorbeeld west-Nederland kan ijzer vrijkomen bij droogval van de toplaag van klei, hetgeen resulteert in roestrood water en/of ijzerbacterievliezen. In Zwarte Broek (zand- en veengrond) duidt het echter op toestroom van (ijzerrijk) grondwater.

²⁰ Eelerwoude, 2022

²¹ Spek en Reyntjes, 2018



Figuur 20. Kwelderschijsen in de droge zomerperiode (links) en in de nawinter (rechts)



5.4.2 pH

Na de droge zomerperiode van 2022 stonden heel veel sloten droog, en konden er daar geen pH-metingen worden gedaan. In de beken en enkele sloten aan de oostkant van het plangebied was wel water. Daar was de pH van het oppervlaktewater heel hoog, namelijk 7–7,5 (figuur 21). In de boorgaten was de pH over de hele linie iets lager (door enige invloed van eerder ingetrokken neerslagwater), maar nog steeds hoog. aan de oostkant van het plangebied was de pH 6,5–7 en regelmatig ook 6–6,5. Het feit dat de watergangen water afvoeren met een hogere pH, duidt erop dat de watergangen grondwater afvoeren wat daardoor niet meer in de percelen terecht komt.

In het midden en westen van Zwarte Broek is de pH van het water in de boorgaten 5 tot 6. Het water stond op behoorlijke diepte (90 tot 130 cm), maar bij Bondte Vos en westelijker ondieper (40–60 cm, wat betrekkelijk hoog is na een heel droge zomerperiode). Daar was de pH 6,5.

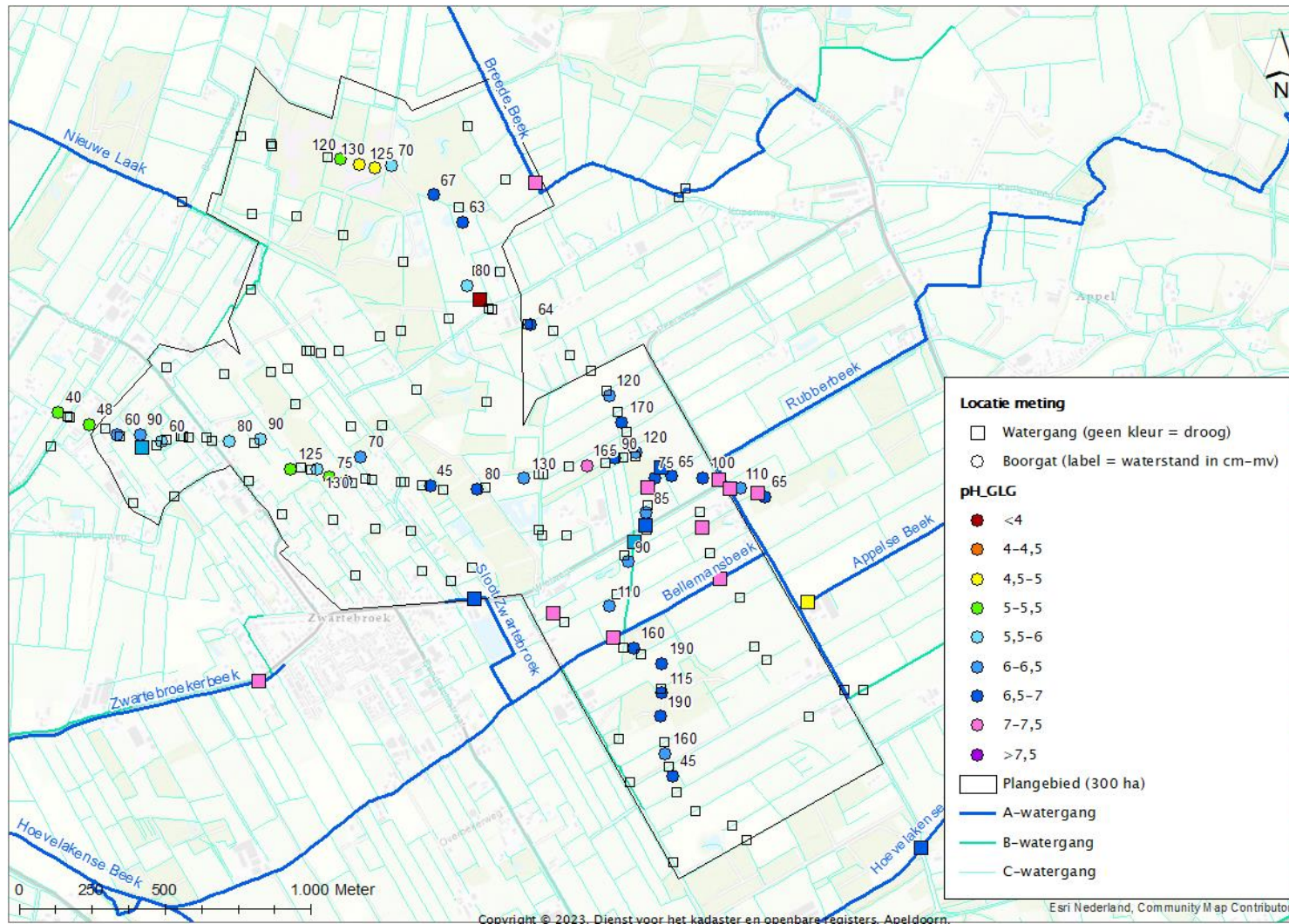
Op de noordpunt van transect B, in terrein De Bunt van landgoed Slichtenhorst, is de pH van het water in de bodem het laagst en dus het meest zuur. Onder deze heiden en bossen is een pH van 4,0–5,5 gemeten (zomer en winter). Inziggend regenwater is hier bepalend voor de pH.

Na de winter, in februari 2023, zijn alle watergangen gevuld met water met een hoge pH. De eerder droogstaande sloten hadden veelal een pH van 6,5, de andere wateren dezelfde hoge waarde als in de zomer: pH 7–7,5. Op enkele plaatsen is zelfs een zeer hoge pH gemeten: bij de Breede beek, Appelse Beek en vijf punten midden in het gebied is de pH groter dan 7,5 (figuur 22).

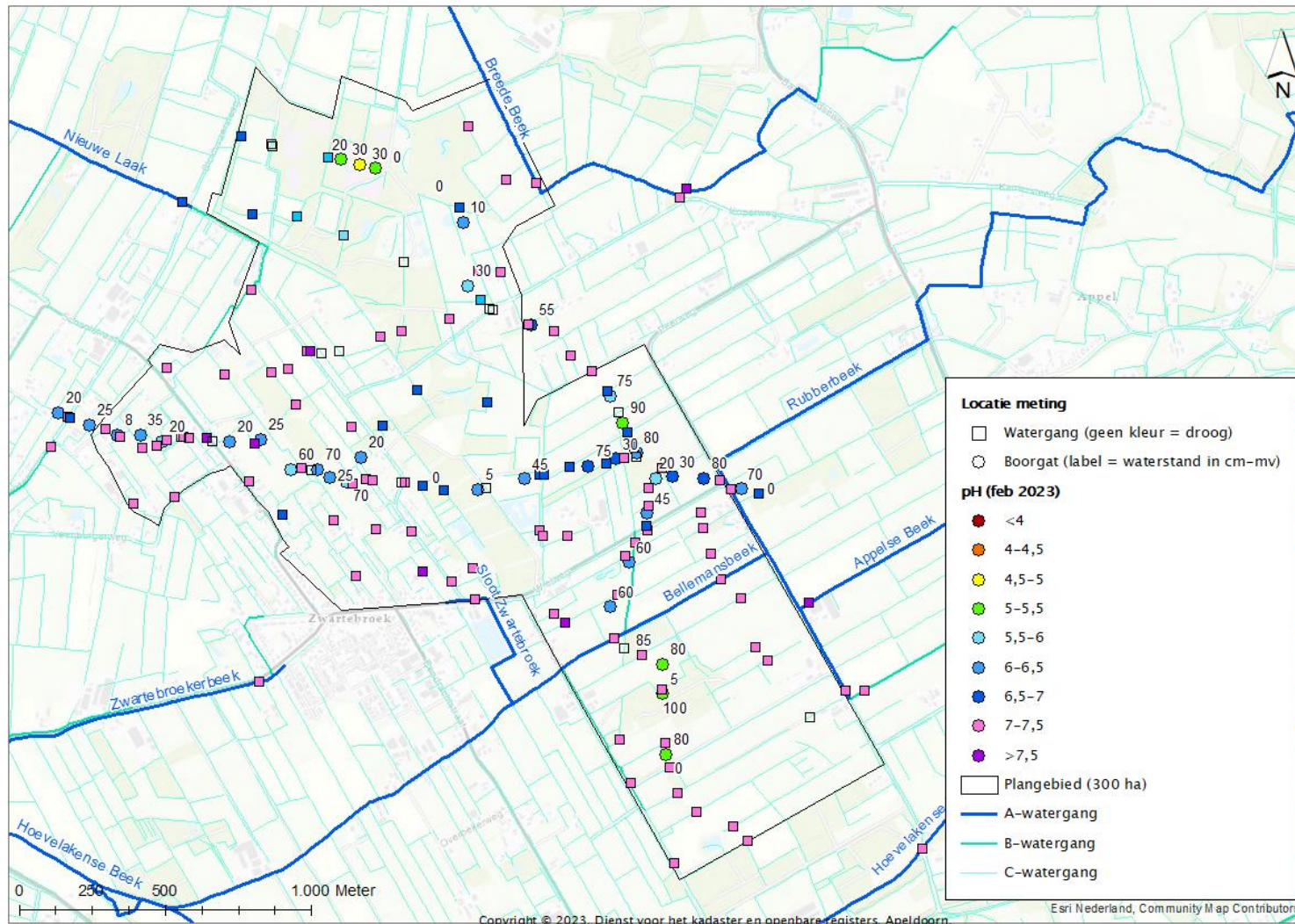
Het water in de boorgaten heeft in februari 2023 aan de westzijde van het gebied een hogere pH dan in september 2022 (gemiddeld 0,3, maximaal 0,7 hoger). Dat is te verklaren doordat hier in de winter een grotere grondwaterinvloed is dan in de zomer. De grondwaterdruk lijkt hier minder robuust dan in de rest van het gebied: In vrijwel de hele rest van het gebied is de pH in het algemeen hoger dan in het westen, wat duidt op een grotere grondwaterinvloed jaarrond. De pH-waarden liggen er in de winter wel iets lager dan in de zomer (gemiddeld 0,7). Dat komt doordat de watergangen hier het grondwater afvangen waardoor dit verminderd in de percelen terecht komt. De bovenkant van het bodemprofiel kan zich dan met mineraalarm en wat zuurder regenwater vullen. Dat afvangen van gebufferd grondwater wordt bevestigd door het feit dat de pH in de watergangen overal hoger is dan de pH in de boorgaten.

Op één locatie is de pH zelfs gedaald van 6,5–7 (zomer) naar 4,5–5,5 (winter). Hier zijn ook verhoogde sulfaatconcentraties gemeten in januari. Waarschijnlijk is hier door de zeer droge zomer sprake van oxidatie van pyrietlaagjes in de bodem, waardoor zwavelzuur wordt gevormd.²²

²² Dit effect is ook gemeten op de oostflank van de Sallandse Heuvelrug (Smeenge et al. in voorbereiding)



Figuur 21. pH van het water in boorgaten en watergaten in september 2022 na de zeer droge zomerperiode. De waterstand in de boorgaten is als label weergegeven bij de boorgaten (in cm -mv).



Figuur 22. pH van het water in boorgaten en watergangen in februari 2023 na een winter met gemiddelde neerslag. De waterstand in de boorgaten is weergegeven als label bij het boorgat (n cm -mv).



5.4.3 EGV

Het EGV, het elektrisch geleidingsvermogen, is een maat voor de hoeveelheid opgeloste stoffen in het water. Lage waarden duiden op regenwater en leveren een laag EGV van rond de 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Waarden tussen 50 en ca 250 duiden in natuurlijke situaties op een lichte aanrijking van het bodemvocht met mineraalrijk grondwater. Hoge waarden duiden in natuurlijke systemen op mineraalrijk en gebufferd grondwater. Die buffering krijgt het grondwater als het lang onderweg is (vele honderden jaren), zodat het steeds meer mineralen kan opnemen uit de ondergrond waar het doorheen stroomt. Is die ondergrond zeer mineraalrijk, dan kan die aanrijking in veel kortere tijd optreden en tot hogere waarden leiden.

In Nederlandse pleistocene zandgebieden met grondwaterinvloed zijn EGV-waarden van nature zelden hoger dan 400–500. In gebieden met invloed van zeewater of zee-afzettingen in de ondergrond kan het EGV door de mineralenrijkdom (veel) hoger dan 1000 worden. Ook in gebieden met kalkbodems is de EGV zeer hoog. Door menselijke invloeden zoals meststoffen uit landbouw kunnen de waarden ook toenemen.

In het Zwarte Broek is het EGV zeer hoog, met waarden tussen 500 en 750, en ook zelfs daar boven. Controle met de chemische bepalingen door onderzoekcentrum B-WARE (zie 5.4.2) geven aan dat dit doorgaans niet komt door uitspoeling van meststoffen. De gehalten fosfor en stikstof (nitraat en ammonium) zijn juist laag in de monsters met een dergelijk hoog EGV. De hoge waarden hangen wel samen met heel hoge gehalten aan calcium, carbonaat en bicarbonaat. Dit zijn de stoffen die ook voor de hoge pH zorgen. Het hoge EGV heeft dus met name een natuurlijke oorsprong. Tijdens het bodemonderzoek is in het oostelijk gebied vrije kalk aangetroffen in de wat diepere bodemlagen. Die zorgt er voor dat het grondwater met deze stoffen wordt verrijkt. Mogelijk zijn dergelijke kalkrijke lagen ook ten oosten van het plangebied aanwezig, waar het grondwater vandaan komt.

Er zijn twee locaties waar wel verhoogde nitraat- en sulfaatwaarden zijn aangetroffen, in 5.4.4 is daar nader op ingegaan

Het patroon van de gemeten EGV-waarden is in de zomer vergelijkbaar aan het patroon van de pH: in het oostelijk gebied is een hoge EGV in de boorgaten en in de beken en sloten daar (figuur 23). In het midden en westen van Zwarte Broek is er 's zomers een veel lagere EGV. Die bedraagt daar in veel boorgaten 100–300. Hier heeft het water veel meer een regenwaterkarakter. Er is hier in de zomer minder invloed van grondwater dan in de rest van Zwarte Broek. Onder de 100 komt de EGV alleen bij de heide van De Bunt in het noorden, en centraal in Zwarte Broek.

In de winterperiode wordt het systeem aangevuld met neerslag maar neemt ook de grondwaterinvloed toe. Het EGV is veelal 500–750 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Dat is overigens voor de Nederlandse pleistocene zandgronden heel hoog. In het westen van Zwarte Broek is het EGV –net als de pH– wat lager, met 300–500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (figuur 24). Dat is voor Nederlandse begrippen nog steeds aanzienlijk. De beken en sloten daar die 's zomers watervoerend waren en een heel hoge EGV hadden boven de 750 hebben dat 's winters veelal ook. In de boorgaten is 's winters doorgaans een wat lagere EGV gemeten dan in omringend grondwater, hetzelfde patroon als bij de pH ook zichtbaar was. Dit toont aan dat in de bodem indringend regenwater een grotere



rol heeft dan in de watergangen. Het mineraalrijke grondwater heeft een kleinere rol in de bodem want het wordt deels afgevangen door de watergangen.

Dat afvangen van grondwater door watergangen is duidelijk zichtbaar aan weerszijden van de Peerweg ter hoogte van de Rubberbeek. Het grondwater in de bodem heeft een EGV van 100–300, terwijl de Rubberbeek water met een EGV van 500–750 afvoert. Dit is te verklaren door de ontwaterende invloed van de Rubberbeek, waardoor de bodem zich van bovenaf vult met regenwater, in plaats van zijdelings of van onderaf met regionaal grondwater. De Rubberbeek loopt hier parallel met de knik in het maaiveld tussen het lage Zwarte Broek en de wat hogere oostelijke zandgronden, en vangt het grondwater af.

5.4.4 Chemische samenstelling

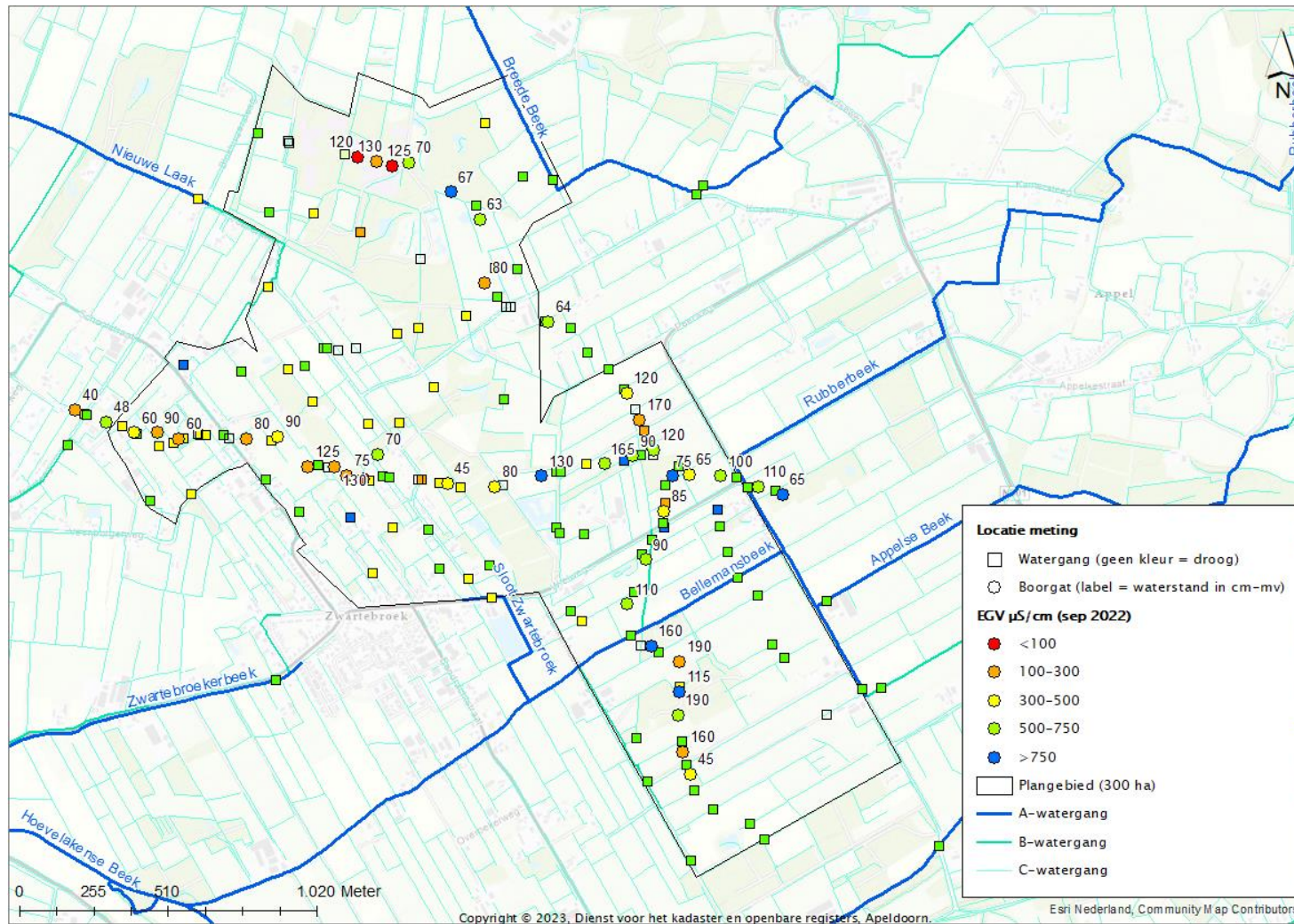
De waterkwaliteitsanalyses van onderzoekcentrum B-WARE geven aanvullend op de pH- en EGV-metingen inzicht in de samenstelling van het water. Hieronder zijn enkele bevindingen genoemd, het complete onderzoek is bijgevoegd als Bijlage.²³

Aan de zuidoostkant van het gebied is het grondwater goed tot zeer sterk gebufferd (figuur 25). Hier komen bicarbonaatgehalten voor van ruim boven 4000 $\mu\text{mol/l}$. In de rest van het gebied varieert de buffering sterk per locatie. Er zijn goed gebufferde locaties met gehalten van 1500–3000 $\mu\text{mol/l}$ op locaties 8, 10, 13 en 14 (figuur 3). En er zijn zwak tot matig gebufferde locaties met minder dan 1000 $\mu\text{mol/l}$ op locaties 9, 11, 12 en 16. Het calciumgehalte vertoont hetzelfde patroon.²⁴

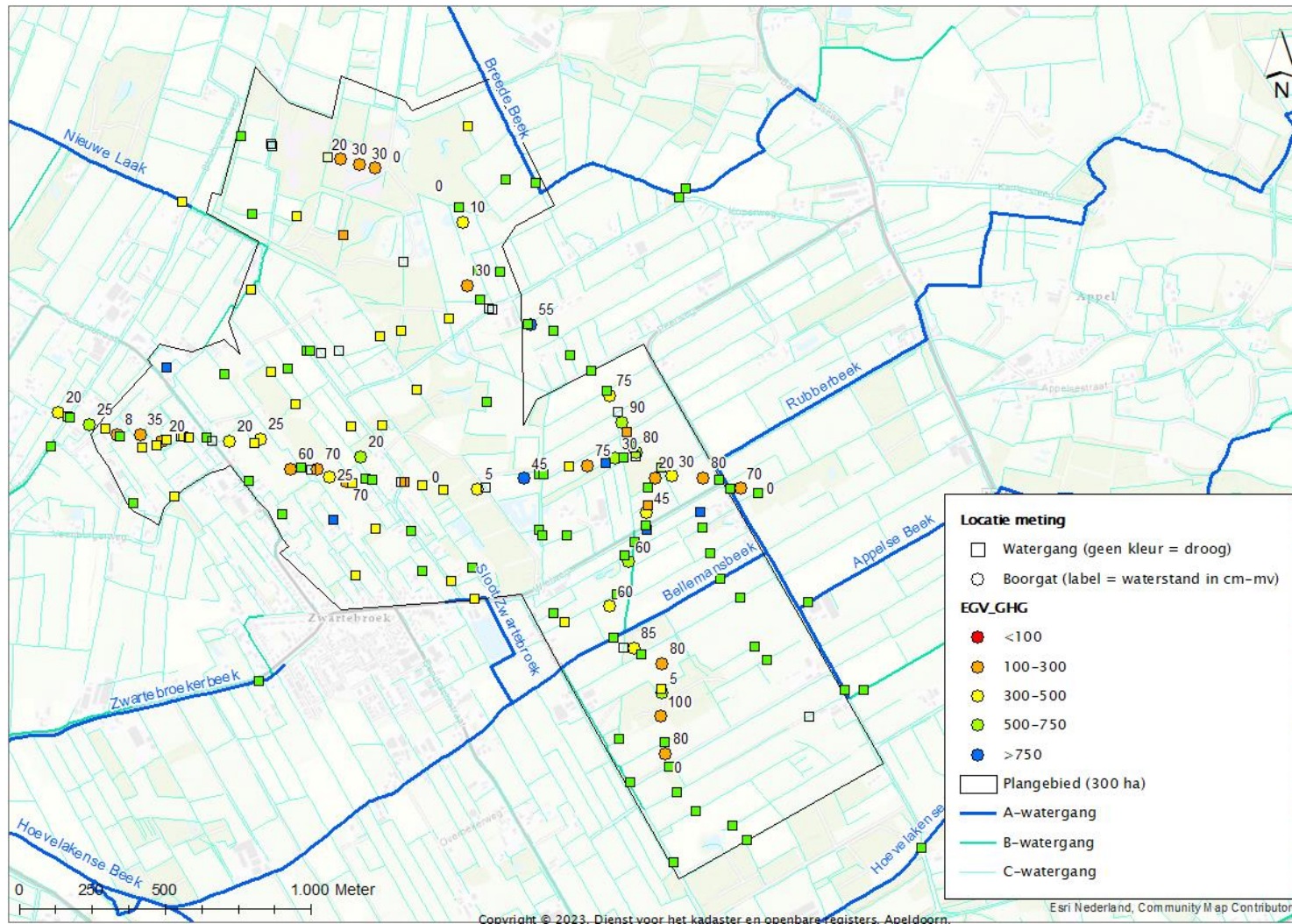
Bij de bodemboringen is op een deel van juist deze goed gebufferde locaties daadwerkelijk kalk aangetoond in de bodem, meestal op 150 cm diepte of dieper. Aan weerszijden van de Peerweg, waar ook de Rubberbeek loopt, bevat de bodem kalk op 130 – 140 cm diepte. Dit is precies de locatie waar in 5.4.3. is beschreven dat het grondwater wordt weggevangen door de Rubberbeek en regenwater het bodemprofiel indringt. Aannemelijk is dat de ondiepere bodemprofielen door deze verlaagde waterstanden deels ontkalkt zijn. Bij de Peerweg is de kalk al op 30 cm diepte in de bodem aangetoond, in het broekbos aan de oostpunt van transect A. Het water van de Rubberbeek zelf is ook zeer sterk gebufferd, met hoge gehalten aan calcium en bicarbonaat.

²³ Visscher et al., 2023; zie Bijlage.

²⁴ Visscher et al., 2023; zie Bijlage.



Figuur 23. EGV van het water in boorgaten en watergangen metingen in september 2022 na de zeer droge zomerperiode. De waterstand in de boorgaten is weergegeven als label (cm - mv).



Figuur 24. EGV van het water in boorgaten en watergangen metingen in februari 2023 na een winter met relatief normale neerslag. De waterstand in de boorgaten is weergegeven als label (cm -mv).



Op locatie 1, in het zuidoostelijke broekbos, is sprake van verhoogde calcium- en sulfaatconcentraties. Dit duidt op verzuring door pyrietoxidatie. Door de zeer droge zomers die we achter de rug hebben (grondwaterstanden < GLG) is het mogelijk dat er wat nieuwe pyriethoudende bodemlagen zijn drooggevalen waardoor er sprake is van verrijking van het grondwater met sulfaat.²⁵ Deze pyriethoudende bodemlagen zijn ontstaan doordat grondwater sulfaat heeft opgelost uit de onderliggende Eemklei (zie paragraaf 4.1).

Het gehalte aan voedingsstoffen is ook gemeten. De concentraties nitraat in het grondwater zijn over het algemeen laag. Er is een grote variatie aangetroffen in de fosforgehaltes in het grondwater. Aan de zuidoostkant van het gebied is het laag, net als op meetlocaties 9 (Bondte Vos) en 14 (broekbos). Op de andere locaties is het gehalte aan fosfor en kalium hoger. Dit suggereert uitspoeling uit landbouwgrond. Op locatie 10 is het fosforgehalte zeer hoog, meer dan 50 micromol/l. Omdat het water nagenoeg overal ijzerrijk is, en er meer ijzer dan fosfor in het water zit, zal het fosfor aan ijzer worden gebonden als het grondwater in contact komt met zuurstof. Dan is deze voedingsstof niet beschikbaar, wat gunstig is als er vegetaties van voedselarme omstandigheden, zoals nat schraalland, zijn of ontwikkeld gaan worden. Zo is het grondwater van de natuurterreinen Bondte Vos (meetlocaties 9) en het broekbos (locatie 14) zeer ijzerrijk. Dit zal bijdragen aan het zeer lage fosforgehalte daar.

De bevindingen met betrekking tot de (grond)waterkwaliteit zijn dat het grondwater vooral in het zuidoostelijke deel van het gebied gunstig is voor de ontwikkeling van grondwater gevoede natte schraallanden, vochtige hooilanden of broekbos. De mate van buffering bepaalt, onder voedselarme condities, welk vegetatietype tot ontwikkeling kan komen. Naast de buffering van het grondwater is ook de buffering van de bodem essentieel en is de periode dat het grondwater in de wortelzone komt van invloed op de vegetatieontwikkeling.²⁶

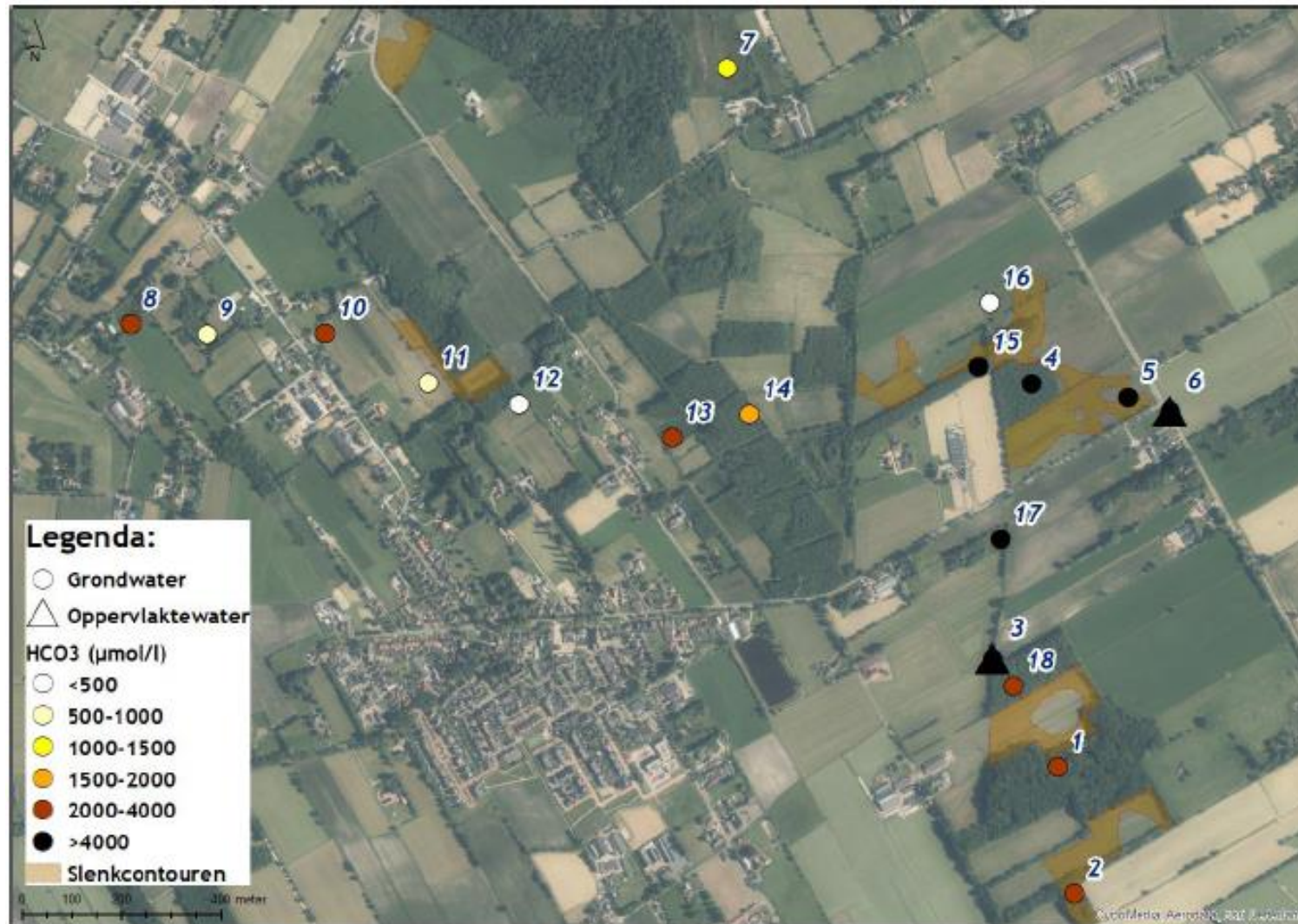
Het westelijk deel van het gebied is minder gebufferd en rijker aan fosfor. Wel is het grondwater hier lokaal ook rijker aan ijzer. Dat is positief omdat hieraan fosfor gebonden kan worden zodat deze voedingsstof nauwelijks beschikbaar is voor planten en er schrale groeiomstandigheden heersen. De lage nitraat- en sulfaatconcentraties zijn gunstig.

Het oppervlaktewater is op twee locaties bemonsterd aan de oostzijde van het onderzoeksgebied. De samenstelling lijkt heel erg op die van het nabijgelegen bemonsterde grondwater. Locatie 6 (Rubberbeek bij Peerweg) bevat wel wat meer sulfaat, fosfor en nitraat dan het nabijgelegen grondwater.²⁷ Waarschijnlijk wordt dit veroorzaakt door toevoer/uitspoeling vanuit de landbouwpercelen bovenstrooms, oostelijk van de Peerweg.

²⁵ Visscher et al., 2023; zie Bijlage.

²⁶ Visscher et al., 2023; zie Bijlage.

²⁷ Visscher et al., 2023; zie Bijlage.



Figuur 25. Buffering (HCO₃⁻) in het grond- en oppervlaktewater (31 jan 2023). Bron: B-WARE, Visscher et al, 2023; zie bijlage.



5.5 Gebiedsopbouw: dwarsprofielen

In een dwarsprofiel wordt ingezoomd op de toplaag van het gebied. In de twee dwarsprofielen van Zwarte Broek wordt de relatie gelegd tussen hoogteligging, bodem en water. Het geeft ruimtelijk inzicht in het verloop van grondwaterstanden en de aanwezigheid van watergangen en hun invloed op de grondwaterstand. Ook zijn gegevens van bestaande peilbuizen geïntegreerd. Het dwarsprofiel toont de opbouw van de bodem in de boorpunten en de aanwezigheid van afwijkende lagen in de ondergrond. Het bodemtype is benoemd, waarmee een koppeling gelegd kan worden met de landschapsecologische positie ten tijde van de bodemvorming en met referenties voor de bij dat bodemtype behorende hydrologische omstandigheden. Daarnaast geeft het dwarsprofiel informatie over het pH-profiel van de bodem en waar vrije kalk in de bodem is aangetroffen. Dat is in de profielen omcirkeld.

Wanneer een rode lijn (zuurgrens) ontbreekt, heeft het hele bodemprofiel een pH van $<5,5$.

In beide profielen gaat het hoofdzakelijk om zandgronden. Ook is er op diverse locaties zand opgebracht in het verleden. De bovenste meter is heel heterogeen, en er zijn lokaal storende lagen aanwezig van leem, veen of beide. De oranje stippellijnen duiden de zones met veen en leem in de diepere ondergrond. Dat wisselt af met gedeelten zonder storende lagen. In zones waar deze lagen ontbreken, kan regionaal toestromend grondwater in principe richting de oppervlakte stromen: kwel. Deze hypothetische stroombanen zijn met blauwe pijlen ingetekend, op basis van metingen aan de waterkwaliteit. De dikte en omvang van een pijl geeft een indicatie van de omvang.

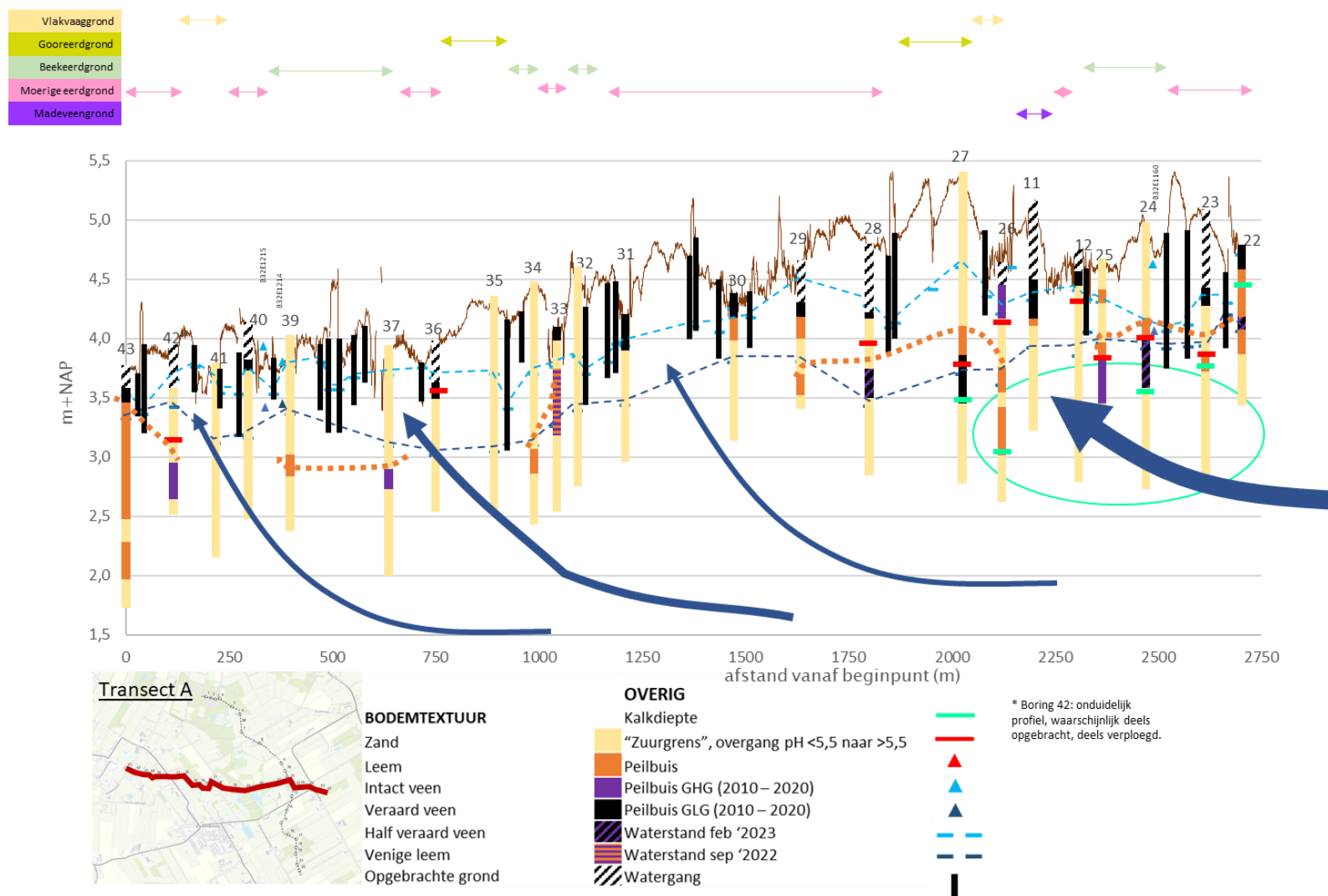


5.5.1 Transect A

Transect A loopt van oost naar west over 2,8 km. Afstand. De ondergrond bestaat veelal uit zand, maar in enkele zones zijn op enige diepte veen- en leemlagen aangetroffen (figuur 26). Deze zones zijn in figuur 26 aangeduid met oranje stippellijnen. De veen-/leemlagen spelen vermoedelijk een belangrijke rol in de hydrologie van Zwarte Broek. Enerzijds stagneert water op deze laag, anderzijds is het zandpakket boven deze laag relatief dun waardoor het systeem gevoelig is voor uitdroging. Aannemelijk is dat het ontbreken van leem ter hoogte van boringen 11 en 12 zorgt dat grondwater uit het oosten hier omhoog komt en aangrenzend heeft geleid tot de aanwezigheid van veengrond bij A26.

In het oosten gaat het om een relatief sterke grondwaterstroming vanaf de regionale kwelhellings, die deels onder de Rubberbeek doorloopt naar het westen (hoofdstuk 6 gaat daar verder op in). Hier in het oosten is vrije kalk in de bodem aanwezig. In het uiterste oosten is dat nabij maaiveld (boring 22). Maar vanaf de Rubberbeek is kalk beperkt tot in de ondergrond, en is de bovengrond tot behoorlijke diepte ontkalkt. Op enige diepte is de pH al wel hoger dan 5,5 ('zuurgrens' in de doorsnede). Westelijker er van is de bodem kalkarmer, en is de bodem bijna overal zuurder dan pH 5,5.

In het midden en westen van het Zwarte Broek zijn twee andere plekken waar geen storende laagjes in de bodem zitten en het regionale grondwater omhoog kan komen (blauwe pijlen in figuur 26). De veelheid aan sloten vangt het grondwater echter af en verlaagt de waterstand. Het systeem is hier omgeslagen van kwel naar infiltratie. Hoofdstuk 6.3 gaat daar verder op in. De regionale stroom geeft wel enige tegendruk: er is wat opbolling van de grondwaterstand tussen de sloten.



Figuur 26: Dwarsprofiel van Transect A met bodemopbouw, – typen, waterstanden en watergangen.



5.5.2 Transect B

Dit dwarsprofiel loopt van noord naar zuid (figuur 27). Het toont de gebiedsopbouw kijkend vanuit de Gelderse Vallei naar de Veluwe toe. Zwarte Broek blijkt op een regionale kwelhellingslijn te liggen. Dit dwarsprofiel loopt parallel aan die helling. Het regionale grondwater stroomt dus als het ware van achter het figuur recht naar de lezer toe, wat gesymboliseerd is met de pijlen die *niet* in perspectief zijn weergegeven.

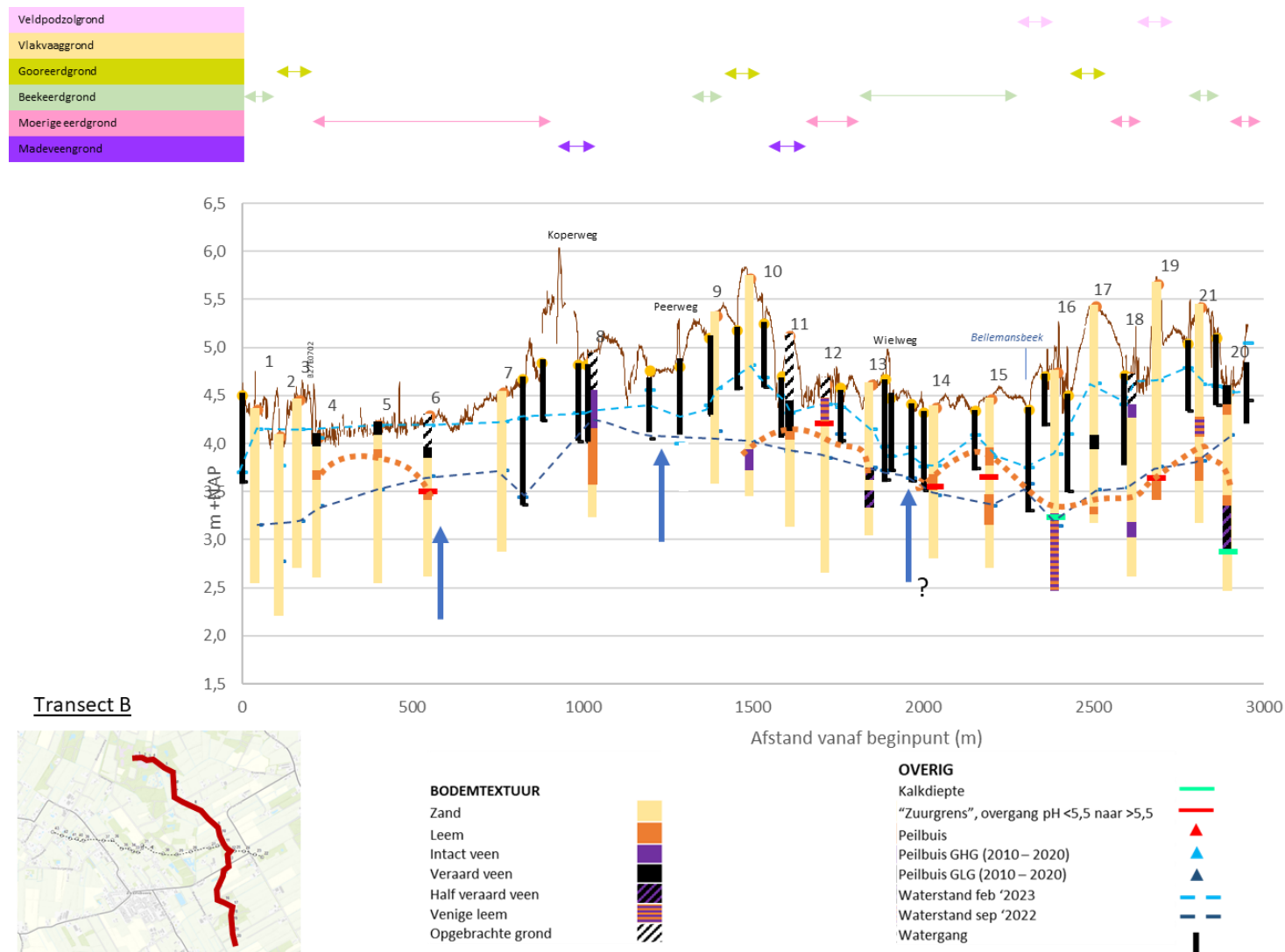
In het natuurlijke systeem, voor de ontginning en ontwatering, zal het grondwater hier hoog hebben gestaan en tot veenvorming hebben kunnen leiden. In veel profielen van lagere delen is dan ook een moerige of venige bovengrond aangetroffen: moerige eerdgronden en madeveengrond zijn in dit transect veel voorkomende bodemtypen (figuur 27). Het dwarsprofiel loopt ten westen van de Rubberbeek en Appelse Beek. Het ligt daarmee ‘benedenstrooms’ van deze gegraven watergangen die de kwelstroom uit het oosten deels onderscheppen en afvangen (zie transect A en pH- en EGV-metingen).

In het zuidelijk deel van het transect zijn van boring 10 tot en met boring 22 redelijk consistent leem- en veenlagen in de ondergrond aangetroffen. Bij boring 16 en 20 is vrije kalk aangetroffen, maar op aanzienlijke diepte. De dichtheid aan (diepe) sloten tussen boring 13 en 14 is hoog. Het kan zijn dat de veen-/leemlaag hier bij de Wielweg ontbreekt en (dieper) grondwater omhoog kan komen, waardoor de watergangen hier zijn gelegd. Of de veen-/leemlaag is ook hier aanwezig, waarbij hij mogelijk is doorsneden door de watergangen. Dit is niet onderzocht.

De zandlaag boven de storende lagen wordt nog maar beperkt gevoed met grondwater.

De vele sloten en diepe beek bovenstrooms hebben de flank effectief ontwaterd. Er is daardoor geen voeding meer van (zwak) gebufferd water meer naar lagere delen en de grondwaterstand is decimeters lager dan passend bij de historisch gevormde bodemtypen hier (veen- en beekerdgronden). Het systeem is omgeslagen van kwel naar infiltratie. De toplaag van veen is veraard, want het is ‘s zomers droog (boringen 4–6, 11, 20). Het veen bij boringen 8 en 18 is begraven onder opgebracht zand. Ook hier is de zomerstand veel te laag. De historische veenlagen in de ondergrond bij 10, 16, 18 en 20 lijken nog veilig.

Voor behoud en herstel van natuurwaarden en het natuurlijk hydrologisch systeem is herstel van de toestroming van grondwater vanaf de hogere flank uiterst noodzakelijk.



Figuur 27: Dwarsprofiel van Transect B met bodemopbouw, – typen, waterstanden en watergangen.



6 Synthese

6.1 Zwarte Broek ligt op een kwelhelling

Het projectgebied Zwarte Broek helt licht naar het westen. Aan de oostkant gaat het projectgebied Zwarte Broek vrij scherp over in een steilere helling van de hoger gelegen dekzandgronden in de oostelijke Gelderse Vallei. Hier maakt het maaiveld als het ware een knik. De grens van die knik loopt min of meer noordwest-zuidoost. Hier loopt raai B.

De regionale grondwaterstromingsrichting is haaks op deze helling gericht, en het grondwater wil juist in die knik uittreden. Dit fenomeen wordt een 'kwelhelling' genoemd, en Zwarte Broek bevindt zich op zo'n kwelhelling.

Met name in het oostelijke deel het dichtst bij de maaiveldknik zijn jaarrond hoge pH- en EGV-waarden gemeten en kwelverschijnselen zichtbaar in de watergangen. Hier is in potentie een grote toestroom van kalkrijk regionaal grondwater. Maar ook de rest van het gebied moet van nature grondwatergevoed zijn geweest, te zien aan de bodemtypen: moerige eerdgronden, veengronden en beekeerdgronden duiden op water aan maaiveld en op kwel.

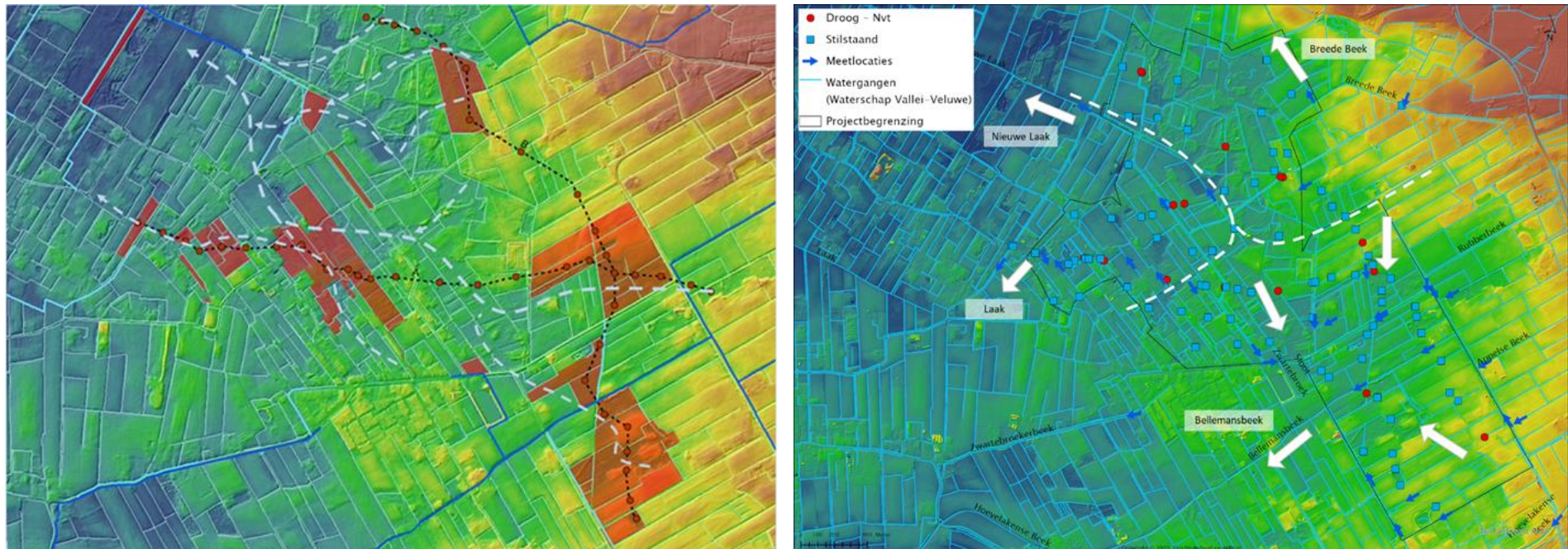
Op een kwelhelling is er van nature een permanente aanvoer van grondwater. Dat zorgt voor van nature permanent hoge grondwaterstanden en aan maaiveld uittredend grondwater.

Rond de Rubberbeek en Breede Beek is er een dalvormige laagte die een inham in die hogere gronden vormt. Dat betekent dat het grondwater afbuigt naar dat dal en dat er daar in die dalkop dus extra sterke toestrooming is. Het grondwater komt daar van drie kanten toegestroomd: oost, noord en zuid. Niet voor niets dat deze beken in het verleden hoger de helling op zijn gegraven.

6.2 Hydrologische deelsystemen

Van nature vond het water een weg door de verschillende geulen en laagten richting het noordwesten (zie ook paragraaf 4.2). Door aanleg en intensivering van het afwateringssysteem is dit veranderd en zijn er nu op basis van de stromingsrichtingen in de watergangen drie watersystemen te onderscheiden (Figuur 28). De afstromingsrichting is daarbij bijna overal veranderd ten opzichte van de natuurlijke afwateringsrichting. In bijlage 2 is dit te zien in de gecombineerde kaarten van figuur 28.

Uit de dwarsprofielen, grondwaterstanden en waterkwaliteit komt naar voren dat het Zwarte Broek van nature grondwatergevoed is maar dat door ontwatering het kwelsysteem is omgeslagen naar een infiltratiesysteem. Vooral in het westen bereikt het basenhoudende grondwater de wortelzone niet meer en uit zich dat lagere pH- en EGV-metingen.



Figuur 28: Links de natuurlijke waterstromingen op basis van hoogte en kavelstructuur (afstroming via laagten, onderbroken pijlen). Rechts de globale huidige waterscheidingen (witte onderbroken lijn) tussen de grofweg drie deelsystemen van de actuele oppervlaktewatersystemen: Brede Beek, Nieuwe Laak / Laak en het systeem van de Bellemansbeek (met Rubberbeek en Appelse beek als nieuwe bovenlopen).

Rubberbeek

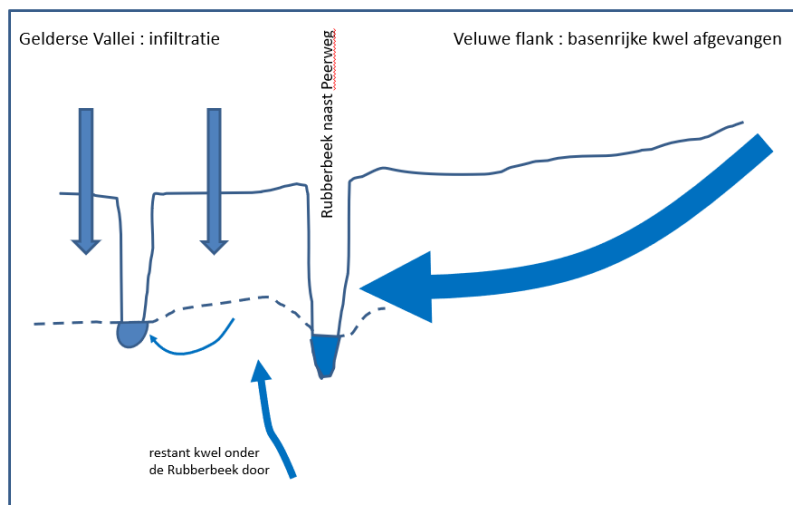
Het grootste en voor Zwarte Broek belangrijkste deelsysteem is dat van de Rubberbeek aan de oostkant van de Bellemansbeek. Het dal van de Rubberbeek loopt door in de natuurontwikkelingsgebieden ten westen van de Peerweg naar de Bellemansbeek. Het onderzoek wijst erop dat hier potentieel een aanzienlijke toestroming is van zeer kalkrijk grondwater. Waarom dat water momenteel vaak niet meer doorwerkt in de wortelzone wordt in de volgende paragraaf besproken.



6.3 Systeem omgeslagen van kwel naar infiltratie

Er is een forse toestroom van grondwater. Door de van nature gebrekkige afvoer en aanwezigheid van slecht doorlatende ondiepe veen- en leemlagen is het gebied van nature snel nat. De kwelstroom naar het Zwarte Broek wordt tegenwoordig in belangrijke mate weggevangen door allerlei gegraven watergangen. Het gebufferde grondwater komt niet meer in de buurt van het maaiveld en de wortelzone, waardoor het systeem is omgeslagen naar een infiltratiesysteem van mineraalarm en zuur regenwater. Dit uit zich in te lage grondwaterstanden, neerslaglenzen (lagere EGV en pH in het grondwater dan in de watergangen), droogvallende sloten en de kalk- en zuurgrens die in veel bodems ontbreekt omdat het hele bodemprofiel zuurder is dan pH 5,5. Vergeleken met het sterk gebufferde grondwater (pH 6,5–7,5) is dat behoorlijk laag, en liggen er grote kansen voor herstel van buffering van deze gebieden na het nemen van hydrologische maatregelen.

De bodem is door de ontwatering veel droger en zuurder geworden. In de dwarsprofielen is te zien welke sloten een sterk ontwaterend effect hebben. De watergang ten noorden van de Koperweg, voor boorpunt 7 (dwarsprofiel B), heeft een grote invloed. Een hoge dichtheid aan sloten duidt op van nature natte omstandigheden, waar het grondwater nu wordt afgevoerd en de waterstanden zijn verlaagd. In dwarsprofiel A is zo'n cluster aan sloten te zien tussen boringen 31 en 32, die over de gehele boring uit zand zijn opgebouwd, zonder storende lagen. Dit zandprofiel, de dichtheid aan sloten én de toplaag van veraard veen van boring 31 maken het aannemelijk dat hier van nature zeer natte omstandigheden zijn geweest van toestromend grondwater.



Rubberbeek

Heel veel effect heeft de Rubberbeek. Deze ligt op de knik in de kwelhelling, langs de Peerweg/Leemweg. Dit deel van de Rubberbeek vangt haast al het uit het oosten toestromende kalkrijke grondwater af. Figuur 29 schetst de situatie daar. Uitzonderlijk is, dat een restant van de regionale grondwaterstroom onder de Rubberbeek doorgaat, en niet geheel wordt afgevangen. In dwarsprofiel A is dat met een dikke blauwe pijl aangeduid. Dit water heeft op enige afstand van de Rubberbeek invloed op de watersamenstelling en waterstand. Dat is precies in het natuurontwikkelingsgebied van Zwarte Broek. De kansen voor natuurontwikkeling worden zeer sterk verhoogd als het hydrologische systeem hier verder hersteld wordt door de (gegraven) Rubberbeek te verondiepen.

Figuur 29 Schematisatie van de Rubberbeek aan de voet van de kwelhelling: afvang van kwel, omslag naar infiltratie



6.4 Doelgat: verdroging en verzuring staan optimale vegetatieontwikkeling in de weg

Door de kalkrijke bodem en het kalkrijke grondwater is de situatie in Zwarte Broek uniek. Onder invloed van toestromende kalkrijke kwel kunnen bijzondere, grondwatergevoede natuurwaarden voorkomen, zoals blauwgrasland en elzenbroekbos. Die natuurtypen vereisen de zelfde standplaats maar worden anders beheerd (gehooïd of niet beheerd). Enkele soorten uit dit soort natte gebufferde milieus zijn aanwezig in Zwarte Broek, maar dat is lokaal en schaars. Voorbeelden zijn bosbies, holpijp, waterviolier, elzenzegge en gewone dotterbloem, brede orchis, en schildereprijs.

De potenties zijn enorm hoog in en rond Zwarte Broek. Verdroging leidt er echter toe dat de condities op dit moment veel minder geschikt zijn voor herstel of ontwikkeling van zulke vegetaties. Daarbij is ook het grondwatertype van belang: kalkrijk grondwater of mineraalarm regenwater. Het verschil tussen de grondwaterstand waarbij de bodemtypen zijn ontstaan (“referentiewaterstanden”) en de huidige waterstand wordt het ‘doelgat’ genoemd. Figuur 30 toont schematisch wat dat doelgat is.

In figuur 31 is te zien hoe groot het doelgat per boorlocatie is, op basis van de gemeten grondwaterstand en de referentiegrondwaterstanden voor de aangetroffen bodemtypen. Dit geeft dus vooral de mate van verdroging weer. Het geeft niet aan of dat water een passende mineralenrijkdom en pH heeft voor die bodemtypen. Voor de punten waar de dwarsprofielen van Transect A en B (zie 5.4) een bodem-pH geeft lager of gelijk aan 6 (de pH van regenwater) is sprake van een regenwaterlens en verzuring. Deze locaties zijn in figuur 31 geel omcirkeld.

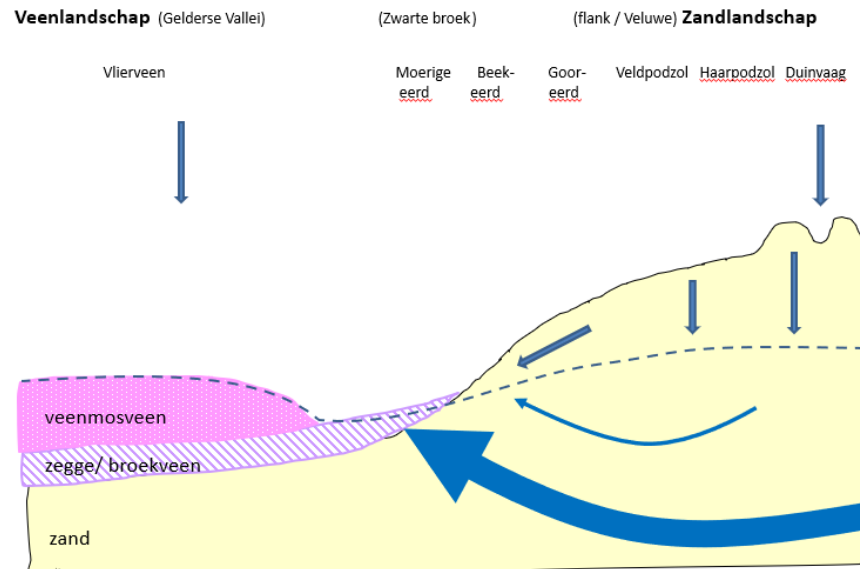
Er is een groot gat tussen de actuele en referentiegrondwaterstand op de oostflank (zie figuur 31). De kwel waaronder de bodems zich hebben gevormd, is weggevangen. Dit gebied is in figuur 31 blauw omcirkeld.

Bij de broekbossen in het zuiden van het gebied is een enorm gat: ook hier is de aangetroffen grondwaterstand tot 80 cm te laag ten opzichte van de referentiewaarde in de droge zomersituatie (GLG). Bovendien speelt hier het probleem dat door de lage waterstanden pyriethoudende bodemlagen droogvallen, wat zich uit in zeer hoge sulfaatconcentraties in het grondwater, een zeer sterke pH-daling en veenaafbraak. Herstel van de hydrologische situatie is urgent om de biodiversiteit te versterken en het gebied klimaatrobust te maken.

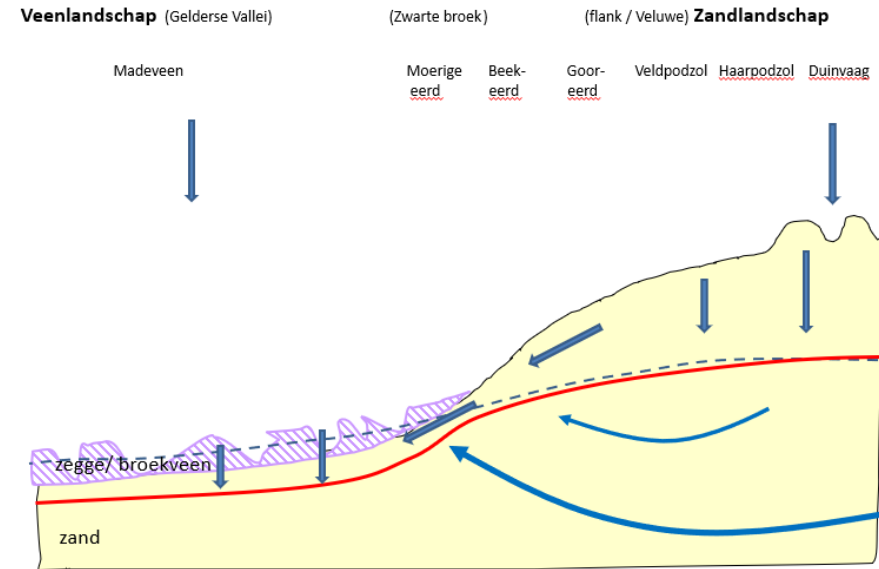
In het midden en westen van het Zwarte Broek is de situatie zeer wisselend. Dit hangt samen met de gevarieerde bodemopbouw. Het doelgat is klein bij de Koperweg-noord, Bondte Vos-west en het dal van de Rubberbeek ten oosten van de Peerweg/Leemweg).



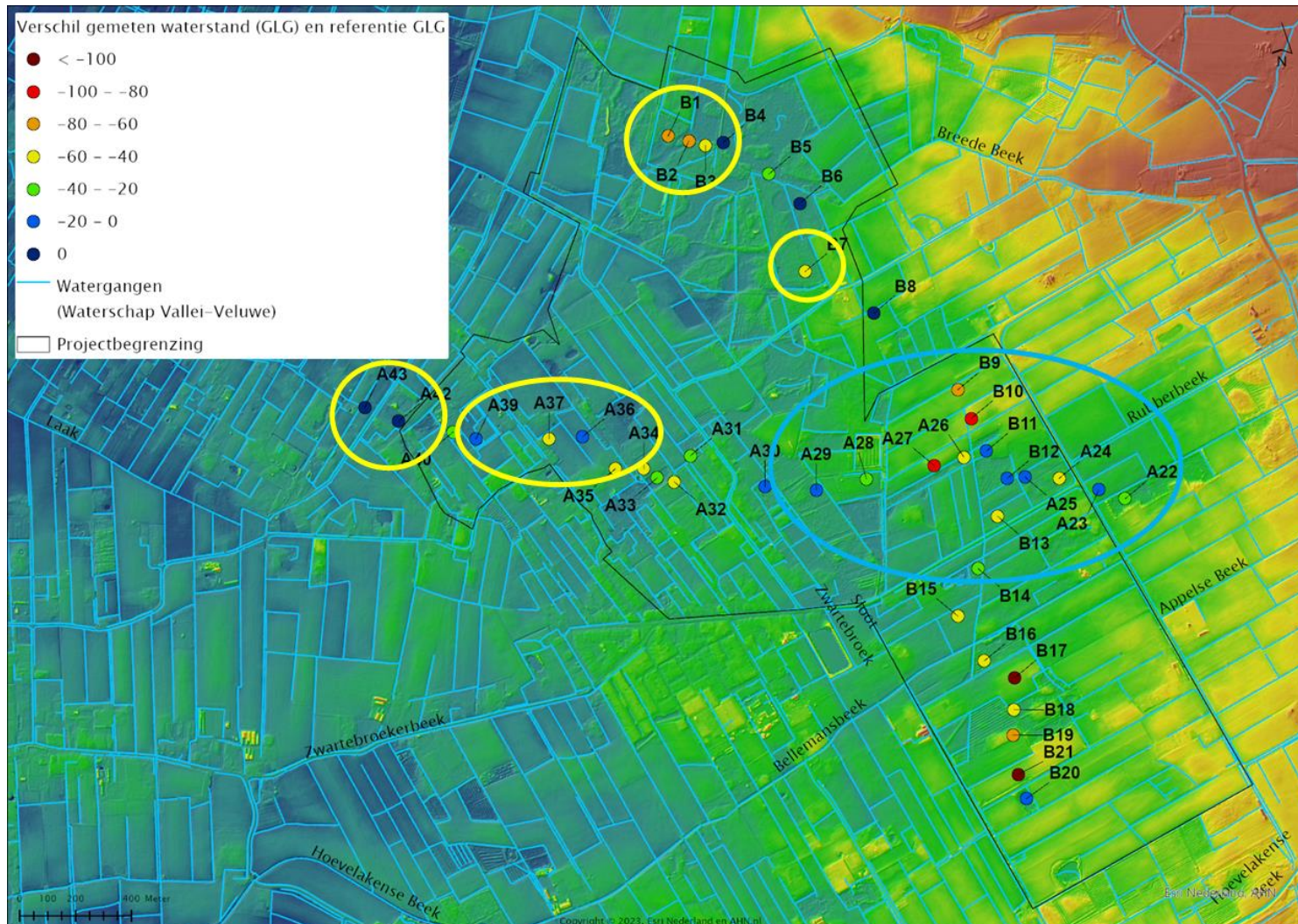
Oorspronkelijk watersysteem



Doelgat watersysteem



Figuur 30. Schematische weergave van waterstromen en het doelgat in Zwarte Broek: het verschil tussen de referentiegrondwaterstand van bodemtypen (links, blauwe stippellijn) met de daadwerkelijke grondwaterinvloed in het huidige watersysteem (rechts. Sloten en gegraven beken zijn rechts weggelaten). De rode lijn geeft aan tot waar de grondwaterinvloed is teruggedrongen: het doelgat.



*Figuur 31. Vershil tussen de gemeten zomerwaterstand en de referentie GLG van de bodem ter plekke.
Geel omcirkeld zijn de plekken met een regenwaterlens (pH onder 6,0). Blauw omcirkeld is het gebied waar kwel is weggevangen*



Literatuurlijst

- **De Bakker, H. & J. Schelling, 1981.** Systeem van bodemclassificatie voor Nederland : de hogere niveaus en codering van bodemtypen overeenkomstig de legenda van de bodemkaart van Nederland 1:50.000. Wageningen University & Research.
- **Berendsen, H.J.A., 2005.** Landschappelijk Nederland: de fysisch-geografische regio's. Koninklijke Van Gorcum.
- **Canaletto uitgeverij, 1984.** Topographische kaart van de Veluwe en de Velwezoon van M.J. de Man (1802-1812). Alphen a/d Rijn.
- **Eelerwoude, 2022.** Beknopte landschapsecologische systeemanalyse Landgoed Groot Grevengoed. Concept.
- **Grift, J., 2015.** Veen in de Vallei. Een interdisciplinair onderzoek naar de landschappelijke ontwikkeling van de veenontginningen in de Noordelijke Gelderse Vallei en de ontginning Zwarteboek. Masterscriptie, Rijksuniversiteit Groningen.
- **Jongmans, A.H., M.W van den Berg, M.P.W Sonneveld, G.J.W.C Peek en R.M. van den Berg van Saparoea, 2018.** Landschappen van Nederland. Geologie, bodem en landgebruik. Wageningen Academic Publishers.
- **Kemmers, R. H., S.P.J. Van Delft, M.C. Van Riel, P.W.F.M. Hommel, A.J.M. Jansen, B. Klaver & H. Smeenge, 2011.** De landschapssleutel: een leidraad voor een landschapsanalyse (No. 2140). Alterra.
- **Kieskamp, A.A.M. & H. Smeenge, 2023.** Zwarteboek inrichtingsplan. Coöperatie Bosgroep Midden Nederland u.a., Ede.
- **KNMI, 2022.** Zomer 2022 (juni, juli, augustus) en Winter 2022-2023 (december, januari, februari). Geraadpleegd via www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/maand-en-seizoensoverzichten/2022/zomer en www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/maand-en-seizoensoverzichten/2023/winter
- **Smeenge, H., A.A.M. Kieskamp, M. Van Os, G.H. Bulten, W. Zwaneveld, R. Van Rosmalen, D. Bokeloh, M. Kruit & B. Van Geel., 2021.** Landgoed Oldenaller stroomgebied Veldbeek: landschapsecologische systeemanalyse. Bosgroep Midden-Nederland, Ede.
- **Spek, T. en J. Reyntjes, 2018.** Inrichting- en beheeradvies Landgoed Sligtenhorst-Zuid. Provincie Gelderland.
- **Ten Cate, J.A.M., A.F. van Holst, H. Kleijer & J. Stolp, 1995.** Handleiding bodemgeografisch onderzoek; richtlijnen en voorschriften. Deel D: interpretatie van bodemkundige gegevens voor diverse vormen van bodemgebruik. Technisch document / DLO-Staring Centrum; No. 19-D). SC-DLO.
- **Visscher, A., M van Mullekom & F. Smolders, 2023.** Bodem- en hydrochemisch onderzoek Zwarteboek. Rapport RP-22.089.23.2 Onderzoekscentrum B-ware bv, Nijmegen.
- **Vos, P.C., J. Bazelmans, H.J.T. Weerts en M.J. van der Meulen, (red.) 2011.** Atlas van Nederland in het Holoceen, Amsterdam.



Bijlagen



Bijlage 1 **Bodem– en hydrochemisch onderzoek Zwartebroek B–Ware**

Visscher, A., M van Mullekom & F. Smolders, 2023. **Bodem– en hydrochemisch onderzoek Zwartebroek.**
Rapport RP–22.089.23.2 Onderzoekscentrum B–ware bv, Nijmegen.

Losse bijlage.



Bijlage 2 Veranderingen in stromingsrichting

