



Schalkhaar, Laag van Zutphen

Geologische bureaustudie naar de aanwezigheid en aard van een kleipakket t.b.v. grondwaterwinning

VN-88176-1 | 21 juli 2025



Grondonderzoek



Geotechnisch
Laboratorium



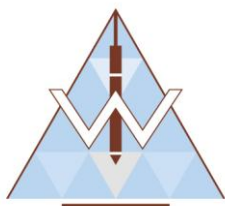
Geomonitoring



GeoICT



Advies



Raadgevend Ingenieursbureau
Wiertsema & Partners B.V.
Feithspark 6, 9356 BZ Tolbert
Postbus 27, 9356 ZG Tolbert
Tel.: 0594 51 68 64
E-mail: info@wieritsema.nl
Internet: www.wieritsema.nl

Onderwerp: Schalkhaar, Laag van Zutphen: Geologische bureaustudie naar de aanwezigheid en aard van een kleipakket t.b.v. grondwaterwinning

Projectnummer: VN-88176-1

Opdrachtgever: Vitens N.V.

Contactpersoon: de heer J. Dunnewolt

Versie	Datum	Omschrijving wijziging
1	21 juli 2025	

Opgesteld door:	J.M.G. Bongers
Handtekening:	i.o. 
Documentnummer:	R103843
Status:	DEFINITIEF
Vrijgegeven door:	drs. C.J.A.W. van der Made



Inhoudsopgave**blad**

1	Inleiding	4
1.1	Aanleiding en doel.....	4
1.2	Locatiebeschrijving	4
2	Het IJsseldal.....	6
3	Eerdere onderzoeken Schalkhaar	14
3.1	Onderzoek RGD 1970-1972.....	14
3.2	Onderzoek RID 1974.....	18
3.3	DGV-TNO 1985.....	19
3.4	Aanvullende sonderingen 1993	20
3.5	Kaarten Waterleidingmaatschappij Overijssel 1990-1993	21
3.6	Pompproef Vitens 2021	22
4	Bijgewerkt model Laag van Zutphen	23
4.1	Aanpak	23
4.2	Basis Laag van Zutphen	25
4.3	Top Laag van Zutphen	28
4.4	Dikte en hydraulische weerstand Laag van Zutphen.....	30
4.5	Ondiepere lagen fijn materiaal	32
5	Interpolatie (J. de Vries).....	33
5.1	Introductie	33
5.2	Methodologie	33
5.3	Resultaten en discussie.....	34
5.4	Limitaties.....	41
6	Conclusies en aanbevelingen	42
6.1	Conclusies	42
6.2	Aanbevelingen.....	42

Bijlagen:

1	Tussenresultaten interpolatie
----------	--------------------------------------



1 Inleiding

1.1 Aanleiding en doel

In opdracht van Vitens N.V. te Zwolle heeft Raadgevend Ingenieursbureau Wiertsema & Partners B.V. een geologische bureaustudie uitgevoerd in een gebied bij Schalkhaar, gemeente Deventer, provincie Overijssel. De aanleiding voor het onderzoek is mogelijke drinkwaterwinning in het gebied. Vitens heeft sinds 1994 een vergunning om er twee miljoen kuub water per jaar te onttrekken. In de periode 2000 tot 2006 is daar in beperkte mate gebruik van gemaakt, waarna de winning is stilgelegd. Redenen daarvoor waren dat er, anders dan verwacht, zuurstof in het water aanwezig bleek en er onzekerheid is over het effect van de winning op de standen van grondwater en oppervlaktewater (Hoogendoorn 2021). Vanwege de stijgende vraag naar drinkwater is deze bron nu toch weer in beeld.

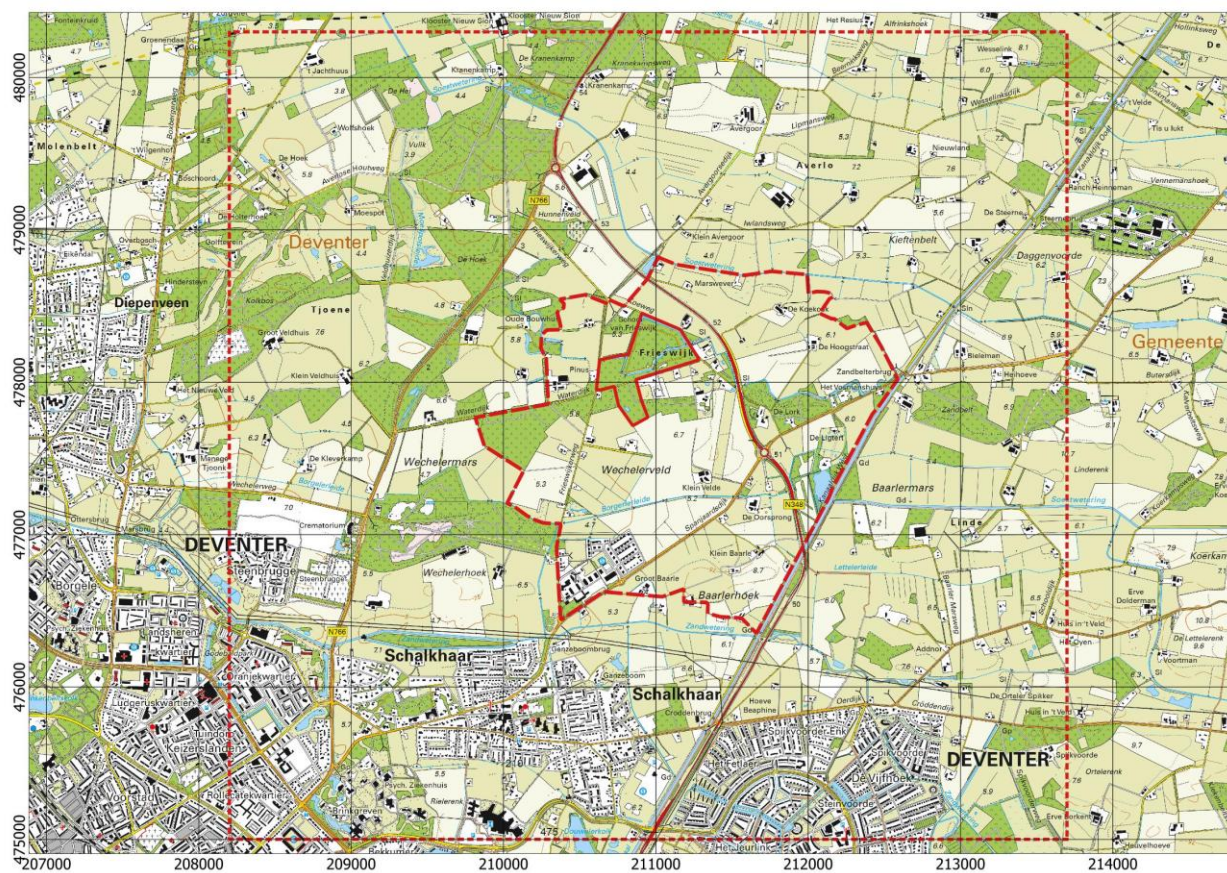
Voor de waterwinning vormt de Laag van Zutphen, ook wel ‘Eemklei’ genoemd, een scheiding tussen het freatische pakket en het dieper gelegen pakket dat men op het oog heeft om water uit te pompen. De toenmalige Rijks Geologische Dienst heeft onderzoek naar deze laag gedaan met behulp van ruim tweehonderd sonderingen en enkele tientallen boringen in de periode 1971 – 1973. Deze gegevens zijn volgens de opdrachtgever nooit verwerkt in een actueel grondwatermodel voor het gebied.

Het doel van de geologische bureaustudie is het verkrijgen van een beter inzicht in de geologische opbouw van het gebied en in het bijzonder van de aanwezigheid, aard, diepte en dikte van het Laagpakket van Zutphen. Het resultaat van de bureaustudie is een model van de Laag van Zutphen en van de hydrologische weerstand ervan. De laatste kan worden gebruikt voor actualisatie van een grondwatermodel van het gebied.

De werkzaamheden zijn verricht onder ons kwaliteitssysteem NEN-EN-ISO-9001 en ons milieu-managementsysteem NEN-EN-ISO-14001. Raadgevend Ingenieursbureau Wiertsema & Partners B.V. is in het bezit van een V&G-beheersysteem VCA** en Veiligheidsladder trede 3.

1.2 Locatiebeschrijving

Waterwingebied Schalkhaar ligt op ongeveer twee kilometer ten noorden van het dorp Schalkhaar bij het buurtschap Frieswijk (zie Figuur 1.1). Het wordt begrensd door de Koeweg in het noordoosten, de Frieswijkweg in het westen en de Waterweg in het zuiden. Het waterwingebied heeft een oppervlakte van ongeveer twintig hectare. Het rondom gelegen grondwaterbeschermingsgebied heeft een oppervlakte van ruim vierhonderd hectare oftewel vier vierkante kilometer. Als onderzoeksgebied is een nog groter gebied genomen van 29 vierkante kilometer. In het bestemmingsplan Buitengebied Deventer 1^{ste} herziening (2017) heeft het waterwingebied bestemming ‘natuur’ met dubbelbestemming ‘waterstaat - intrekgebied’ (bron: omgevingswet.overheid.nl).



Figuur 1.1: Schalkhaar, Laag van Zutphen: Topografische kaart 1:25.000 (bron: Topografische Dienst Kadaster 2025). Het waterwindgebied wordt weergegeven door een doorgetrokken lijn, het waterbeschermingsgebied door een gestreepte lijn en het onderzoeksgebied door een stippellijn.

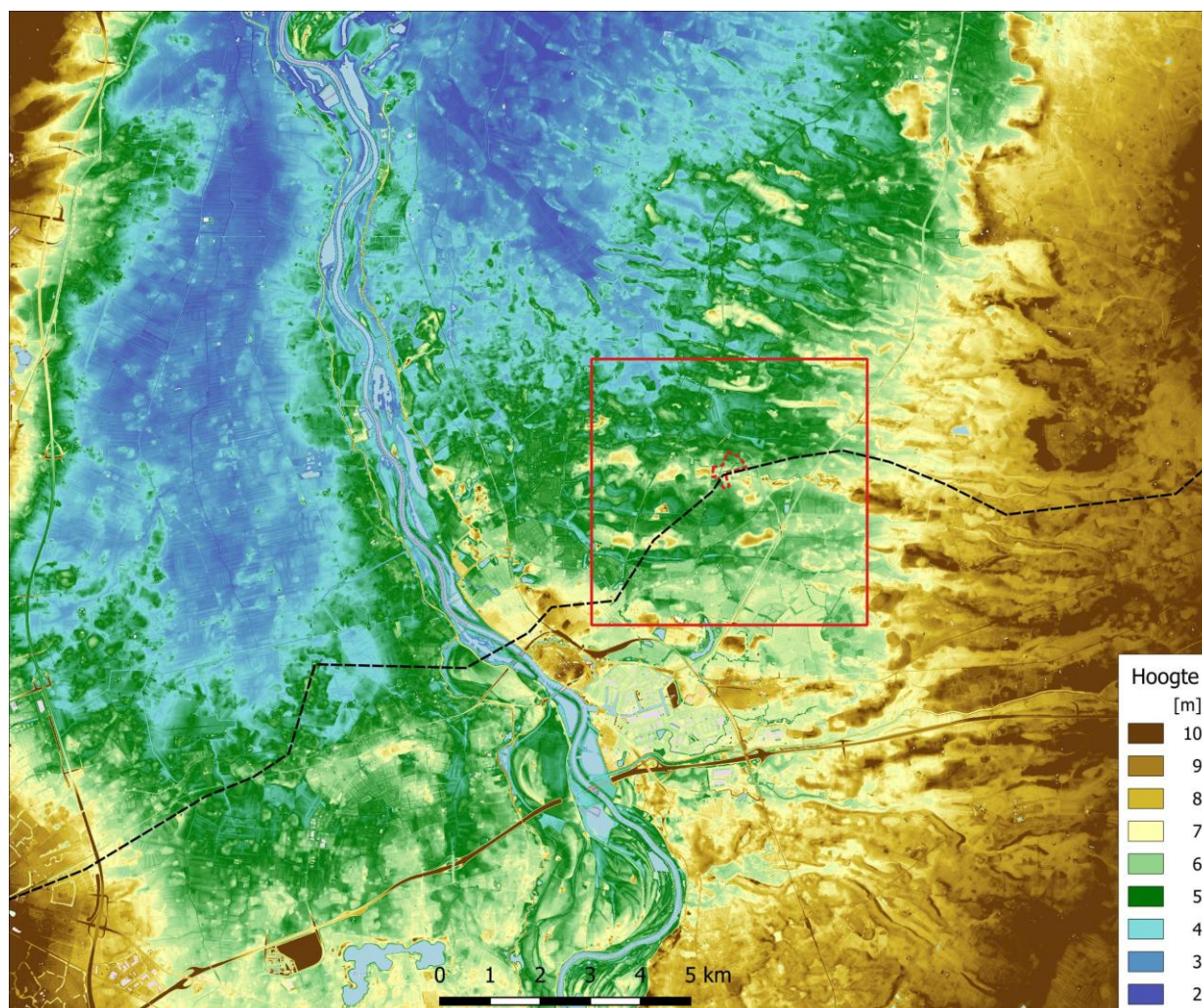


Wiertsema & Partners

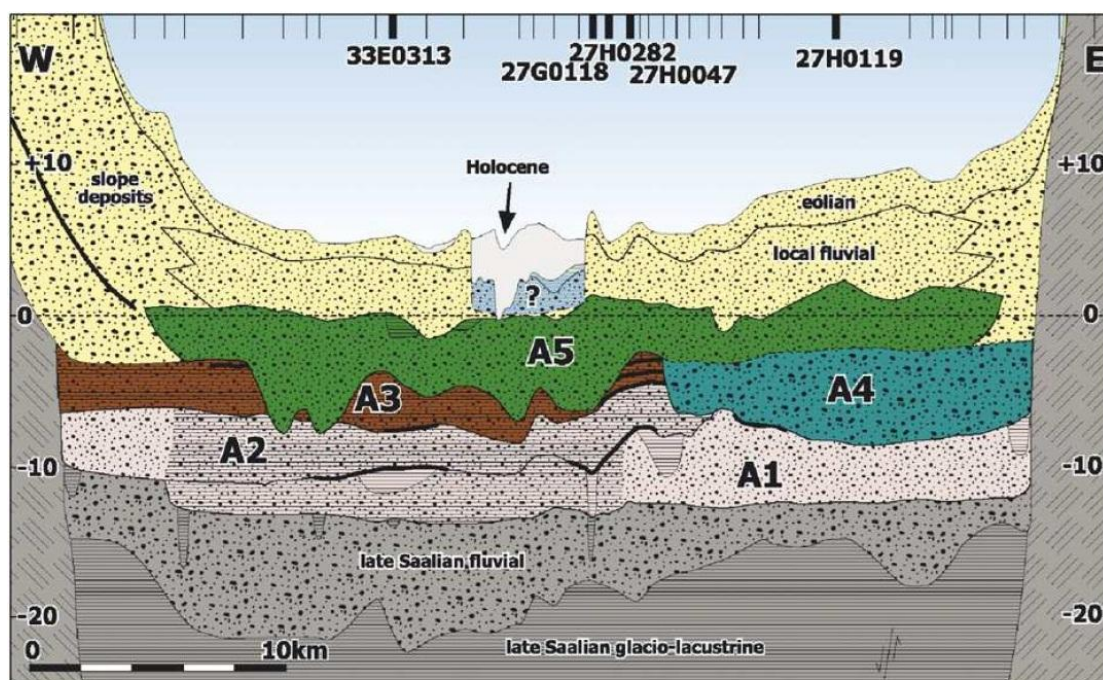
RAADGEVEND INGENIEURS

2 Het IJsseldal

Het plangebied ligt in het IJsseldal tussen de westelijk gelegen Veluwe en de oostelijk gelegen Sallandse Heuvelrug (zie Figuren 2.1 en 2.2).



Figuur 2.1: Schalkhaar, Laagpakket van Zutphen: hoogtekaart gemaakt met behulp van het Actueel Hoogtebestand Nederland 4 uit 2022. Het hoge gebied links is van de Veluwe, het hoge gebied rechts van de Sallandse Heuvelrug. Er tussenin ligt het IJsseldal. De zwart gestreepte lijn geeft de ligging weer van het profiel van Busschers et al. (2007, zie Figuur 2.2).



Lithology

	fine to coarse sands		continuous core
	gravelly coarse sands		DINO core
	silts and clays		fault
	admixed shallow-marine molluscs		sedimentary unit
	glacio-tectonically disturbed		
	peat and organic detritus		

Chronology

Rhine-Meuse deposits

	Late Glacial - Early Holocene
	Late Pleniglacial
	late Middle Pleniglacial
	early Middle Pleniglacial
	Early Pleniglacial
	Early Glacial
	Eemian and/or Early Glacial
	Eemian

Local fluvial, eolian and slope deposits

	Younger Dryas
	Late-Pleniglacial - Late Glacial (locally older)
	younger sediments
	older sediments

Figuur 2.2: Schalkhaar, Laagpakket van Zutphen: doorsnede IJsseldal door het onderzoeksgebied. Voor locatie van het profiel zie Figuur 2.1. Boring 27H0047 is gedaan binnen het waterwingebied aan de Waterdijk. Bron: Busschers et al. (2007).



Wiertsema & Partners

RAADGEVEND INGENIEURS

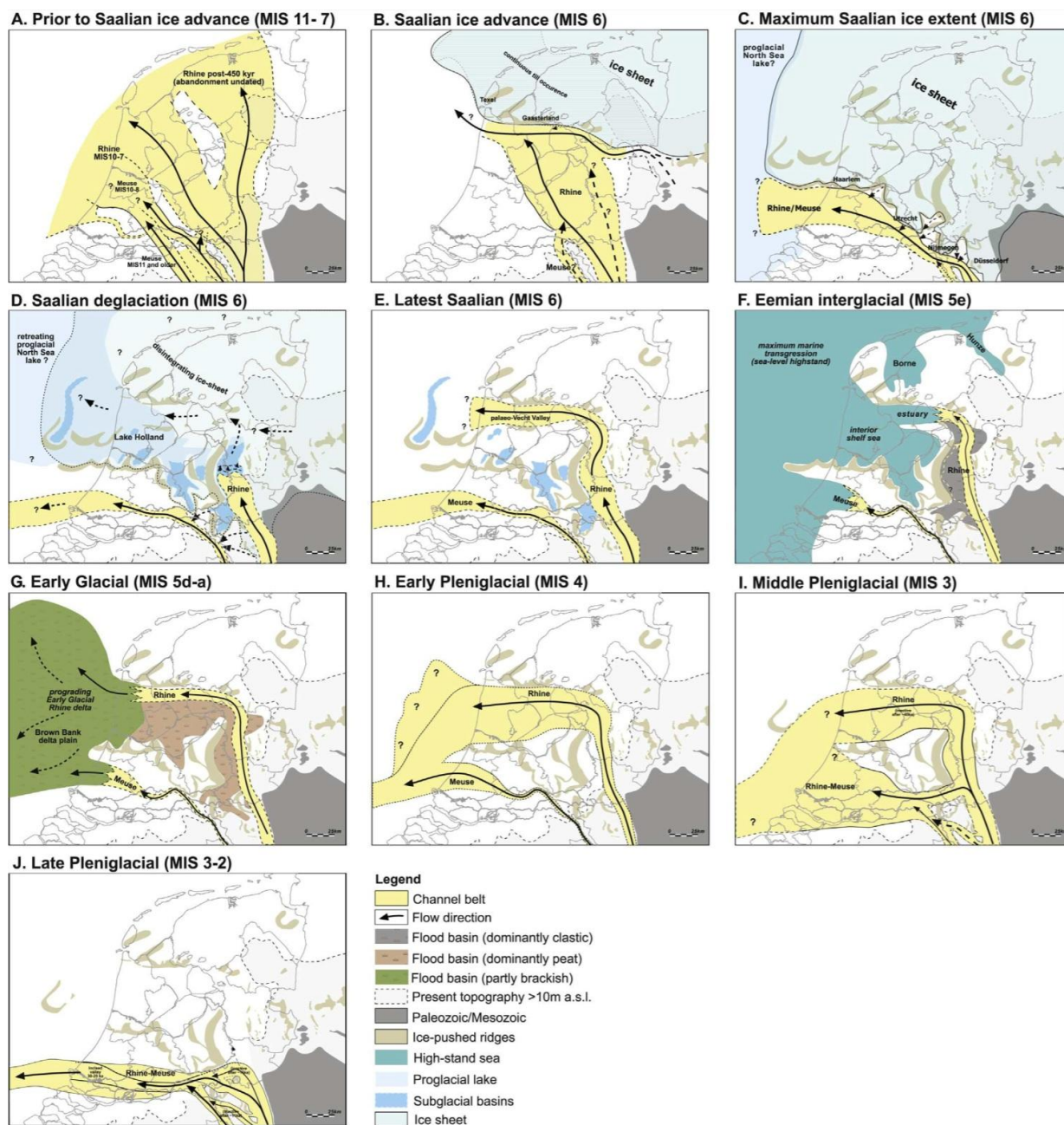
Het IJsseldal is ontstaan tijdens de voorlaatste ijstijd Saalien, omstreeks 150 duizend jaar geleden toen het Scandinavische landijs tot halverwege ons land kwam. Door een geconcentreerde ijstroom werden oudere sedimenten tot dieptes van meer dan honderd meter beneden huidig zeeniveau uitgesleten waardoor een glaciaal bekken ontstond. Aan weerszijden stuwde het ijs oudere rivierafzettingen van vooral zand op tot de heuvels van de Veluwe en de Sallandse Heuvelrug. Voorafgaand aan de ijsbedekking stroomde de Rijn noordwaarts door ons land. Het landijs dwong de rivier enige tijd westwaarts af te buigen, maar na het smelten van het ijs keerde de Rijn terug in noordwaartse richting (zie Figuur 2.3). Ter plaatse van het tegenwoordige IJsseldal mondde de Rijn toen uit in een meer dat was ontstaan op de plek van het glaciaal bekken (Busschers *et al.* 2008). Door aanvoer van riviersediment raakte het meer gaandeweg gevuld met een dik pakket klei (formatie Kreftenheye, laagpakket Twello) waaroverheen nog tijdens het saalien een pakket grof sediment werd afgezet. De overgang van klei naar zand is bij boringen (27H0116, 0412, 0124, 0413, 0123 en 0414) in het waterwingebied aangetroffen rond -31 meter NAP (37 meter beneden maaiveld). Volgens Busschers *et al.* (2007, zie Figuur 2.2) was het IJsseldal aan het eind van het Saalien opgevuld tot ongeveer -12,5 meter NAP.

In de periodes van het Eemien tot en met het Vroeg-Pleniglaciaal (circa 130 tot 60 duizend jaar geleden) bevond de Rijn zich in het oosten van het IJsseldal (Figuur 2.2, oostelijke deel eenheden A1 en A4). In het midden en westen van het dal lagen overstromingsvlaktes (westelijke deel eenheid A1 en eenheden A2 en A3). Er zijn alleen beddingafzettingen bewaard gebleven uit de beginfase van het Eemien (A1) en uit het Vroeg-Pleniglaciaal (A4). Beddingafzettingen uit de tussengelegen periode zijn hoogstwaarschijnlijk geërodeerd door de Rijn tijdens het Vroeg-Pleniglaciaal (A4). Busschers *et al.* (2007) geven de westelijke grens van die Rijnafzettingen weer op ongeveer twee kilometer ten oosten van boring 27H0047. Dat zou betekenen dat het onderzoeksgebied buiten het stroomgebied van de Rijn tijdens het Vroeg-Pleniglaciaal (A4) valt.

Volgens Busschers *et al.* (2007) ligt ter plaatse van het onderzoeksgebied tussen ongeveer -3 en -8 meter NAP een pakket gronden dat een afwisseling kent van fijn tot grof zand, klei, veen en gyttja. In de stratigrafische nomenclatuur van TNO – Geologische Dienst Nederland wordt dit gerekend tot de Formatie van Kreftenheye, Laagpakket van Zutphen (zie Figuur 2.4). Het onderste deel van het pakket dateert waarschijnlijk uit het Eemien, het bovenste deel uit het Vroeg-Weichselien oftewel het begin van de laatste ijstijd. Het werd toen weliswaar kouder, maar er was nog geen sprake van de extreme kou die later optrad. Het onderste deel van het pakket wordt gekenmerkt door afzettingen met een sterk organische component. Daarboven ligt meer klastisch materiaal dat wijst op sterkere aanvoer door de Rijn bijvoorbeeld in de vorm van crevasses (kleine, doodlopende riviertakken). Het bovenste deel van het pakket, dat in de doorsnede van Figuur 2.2 wordt gerekend tot eenheid A3 (Vroeg-Weichselien), kent weer meer organisch materiaal. Het bestaat uit een afwisseling van humeuze kleilagen, detrituslagen (afzettingen lokale waterstromen?) en veenlagen. Blijkbaar was de aanvoer van Rijnafzettingen naar de overstromingsvlakte in deze periode minder.

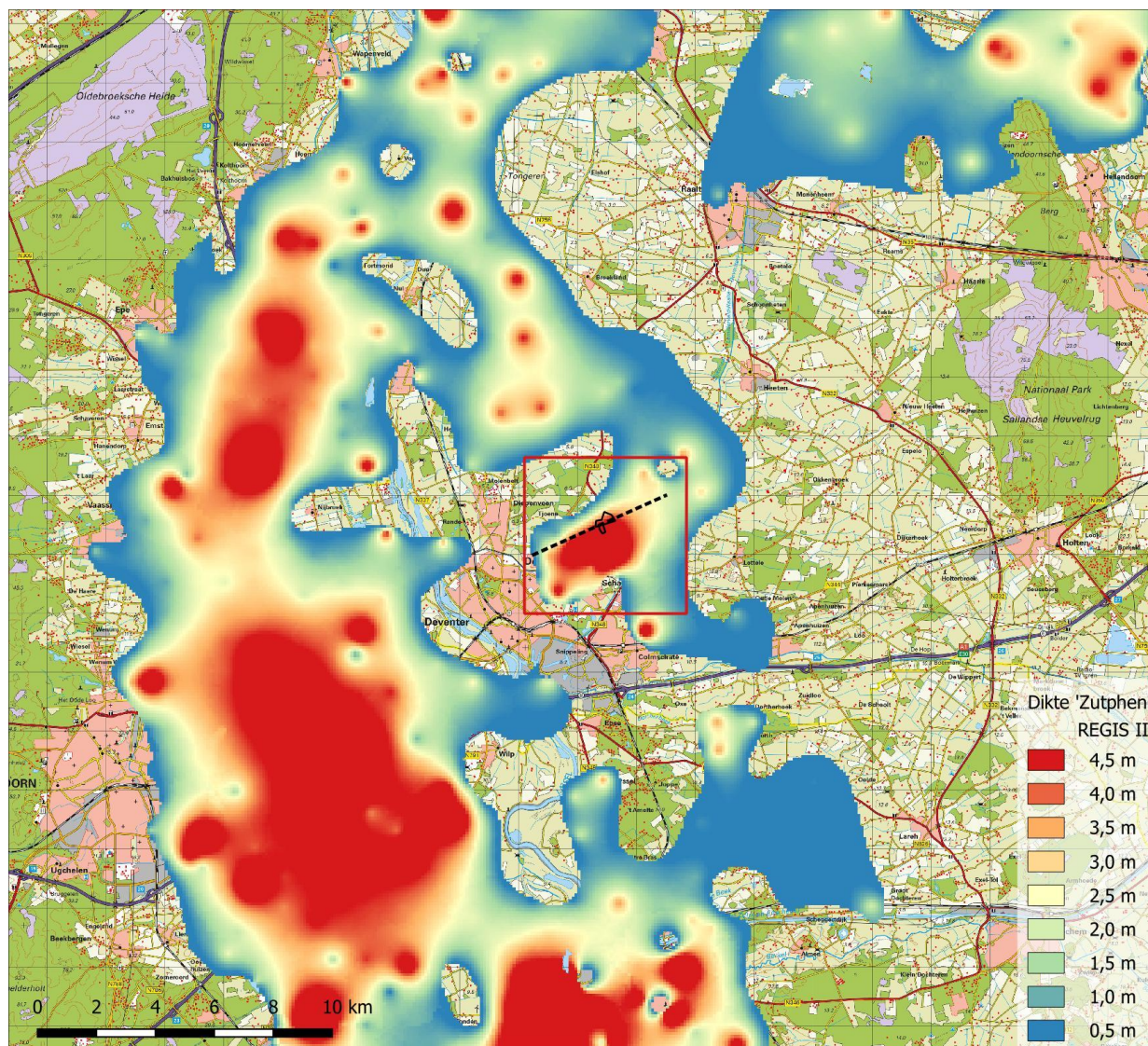
Op het pakket fijne gronden volgt een pakket fijn tot grof zand met plaatselijk enig grind. Het betreffen geulafzettingen van de Rijn uit het begin van het Midden-Pleniglaciaal. De Rijn kende toen een vlechtend patroon van verschillende geulen die door het hele IJsseldal migreerden. Figuur 2.2 (eenheid A5) laat zien dat de geulen plaatselijk voor erosie van het onderliggende pakket fijne gronden gezorgd heeft. Omstreeks 50 duizend jaar geleden kreeg de Rijn zuidelijk van het IJsseldal een tweede tak die westwaarts naar zee stroomde net als tegenwoordig. Nadat de nieuwe Rijntak belangrijker werd, was het rond 40 duizend jaar geleden afgelopen met afvoer van Rijnwater door het IJsseldal (zie Figuur 2.3 en Busschers *et al.* 2007). Pas vanaf de Vroege Middeleeuwen keerde een deel van het Rijnwater terug in de vorm van de Gelderse IJssel.





Figuur 2.3: Schalkhaar, Laagpakket van Zutphen: paleogeografische reconstructies van de benedenloop van de Rijn tijdens Midden- en Laat-Pleistoceen. Bron: Peeters et al. (2015).

Figuur 2.4 geeft de ligging en dikte weer van het Laagpakket van Zutphen volgens model REGIS II. Het pakket heeft een dikte van vele meters in het westen van het IJsseldal en ontbreekt op grote delen in het oosten. In het midden en zuiden van het onderzoeksgebied lijkt 'Zutphen' meters dik te zijn. In het noordwesten wordt de laag niet weergegeven. REGIS geeft als verticale doorlaatfactor (kv) waarden in het onderzoeksgebied die licht variëren tussen 0,015 en 0,053 meter per dag met als mediaan 0,023 meter per dag (zie Figuur 2.5). Voor de hydraulische weerstand (c-waarde) van 'Zutphen' geeft REGIS wat grotere verschillen binnen het onderzoeksgebied (zie Figuur 2.5). Hiervoor zal een relatie gelden met de dikte van het pakket die mede bepalend is voor de weerstand en gedefinieerd is als dikte gedeeld door verticale doorlaatfactor. Figuren 2.6 tot en met 2.8 geven eveneens een indruk van de geohydrologische opbouw van het IJsseldal en ter plaatse van het waterwingebied.

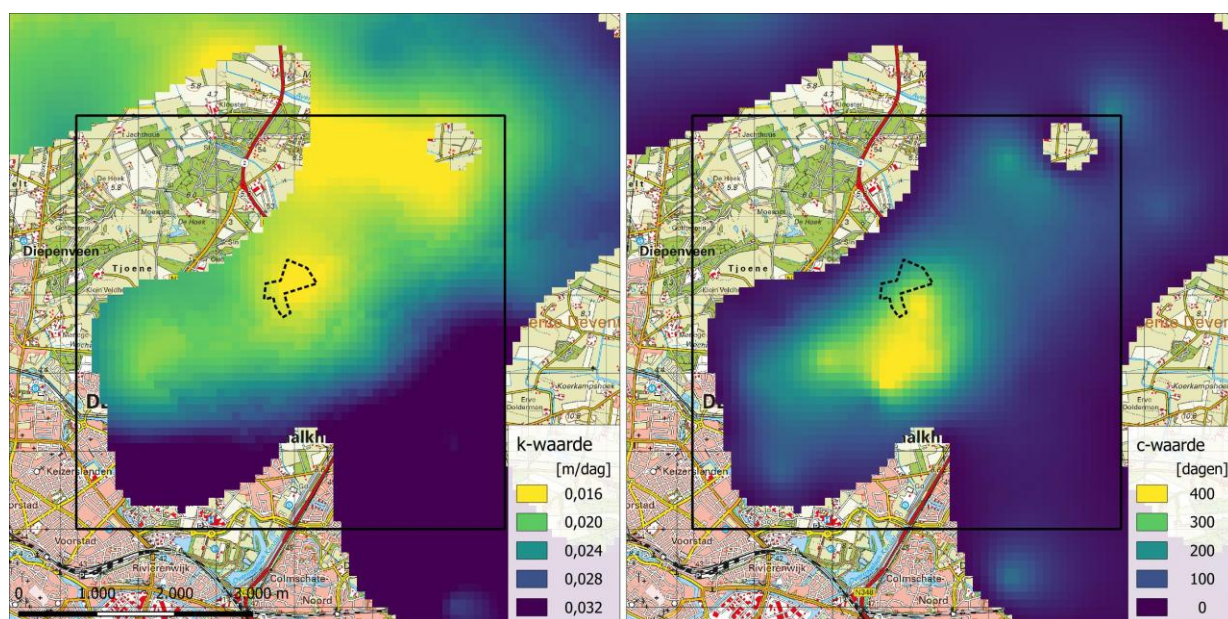


Figuur 2.4: Schalkhaar, Laagpakket van Zutphen: dikte Laagpakket van Zutphen volgens REGIS II. De gestreepte lijn over het waterwingebied geeft de ligging weer van een profiel van REGIS II dat is afgebeeld in Figuur 2.7. Bron: TNO – Geologische Dienst Nederland (www.dinoloket.nl).

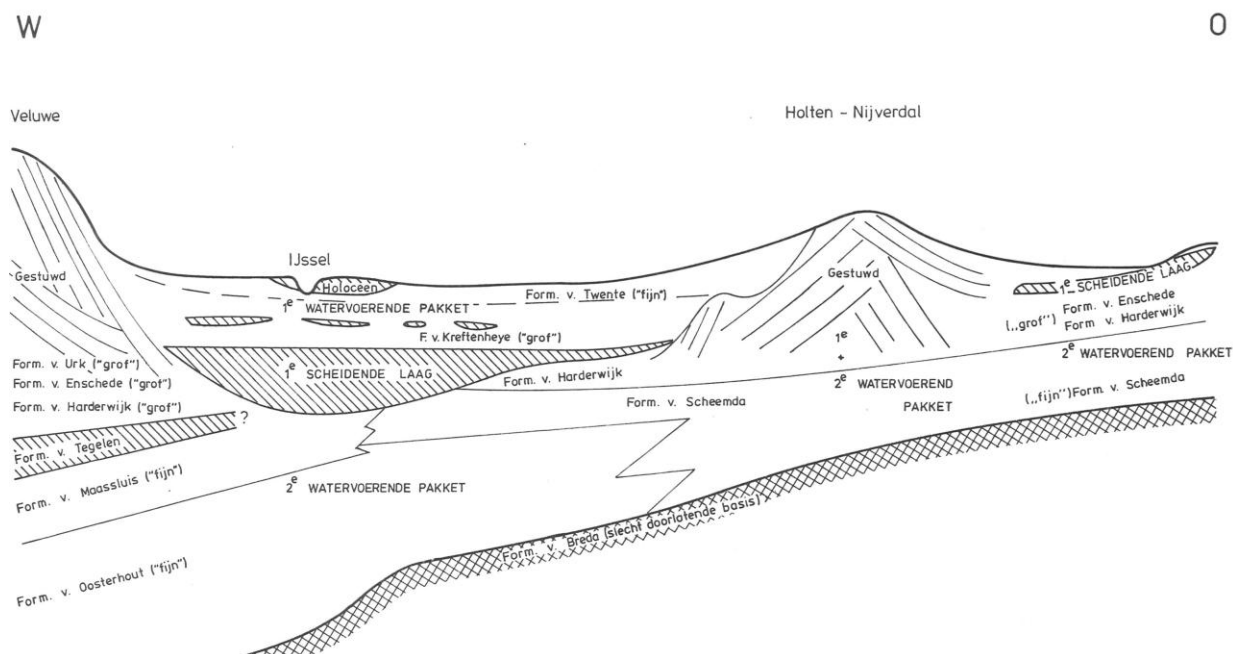


Wiertsema & Partners

RAADGEVEND INGENIEURS



Figuur 2.5: Schalkhaar, Laagpakket van Zutphen: verticale doorlaatfactor (k) en weerstand (c) van het Laagpakket van Zutphen volgens REGIS II. Bron: TNO – Geologische Dienst Nederland (www.dinoloket.nl).

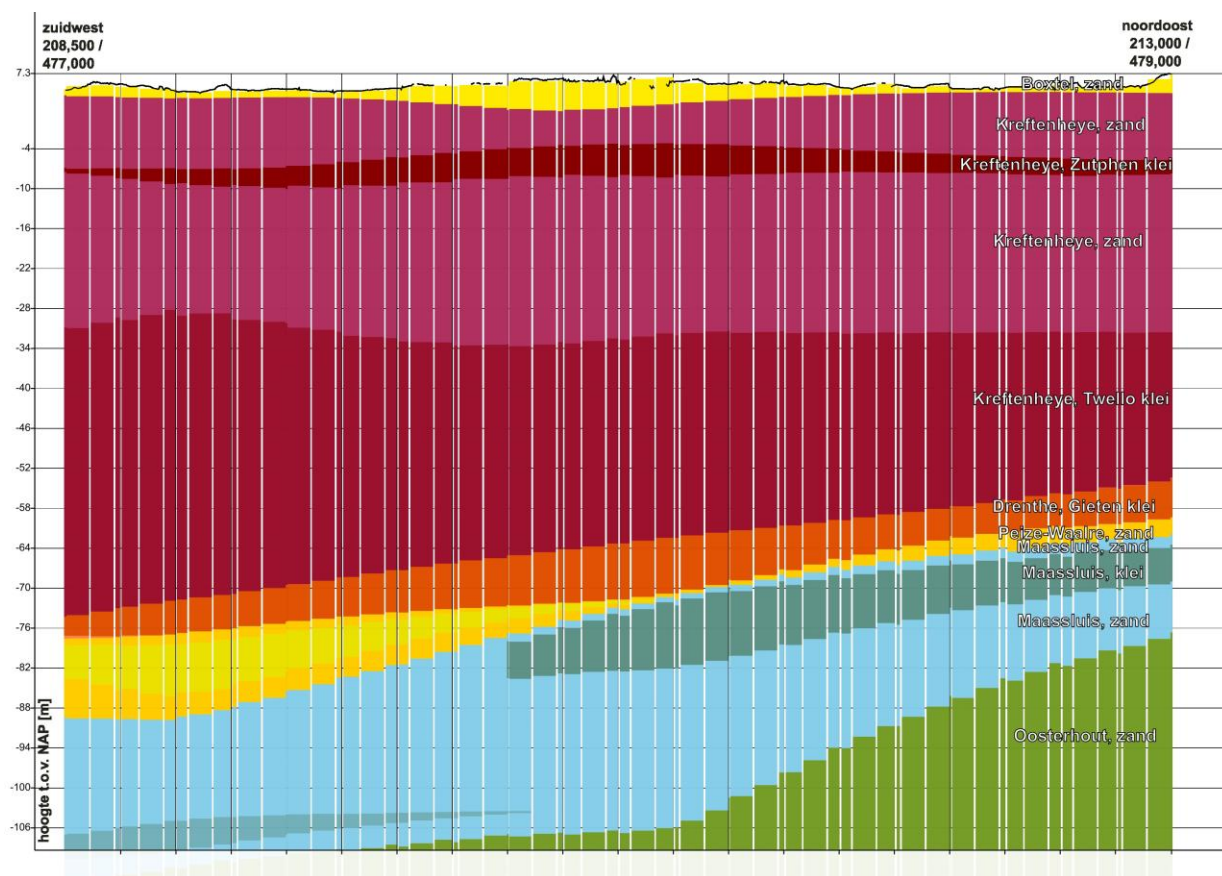


Figuur 2.6: Schalkhaar, Laagpakket van Zutphen: doorsnede IJsseldal. Houtman & Haak DGV-TNO (1985). De figuur vermeldt achterhaalde namen van formaties. Deze zijn niet één op één te vertalen zijn naar nieuwe namen, maar op hoofdlijnen zijn de veranderingen: Twente → Bontel, Enschede → Appelscha, Harderwijk en Scheemda → Peize, Tegelen → Waalre.



Wiertsema & Partners

RAADGEVEND INGENIEURS

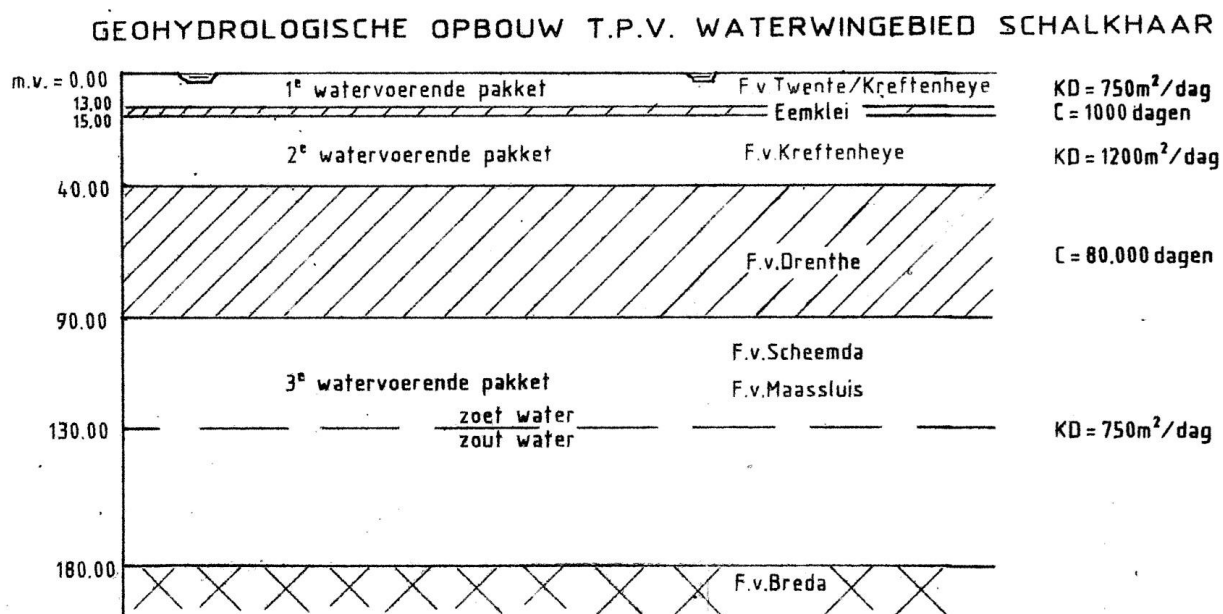


Figuur 2.7: Schalkhaar, Laagpakket van Zutphen: profiel door het onderzoeksgebied volgens het model REGIS II. Voor locatie van het profiel zie Figuur 2.4. Bron: TNO – Geologische Dienst Nederland, Dinoloket.



Wiertsema & Partners

RAADGEVEND INGENIEURS

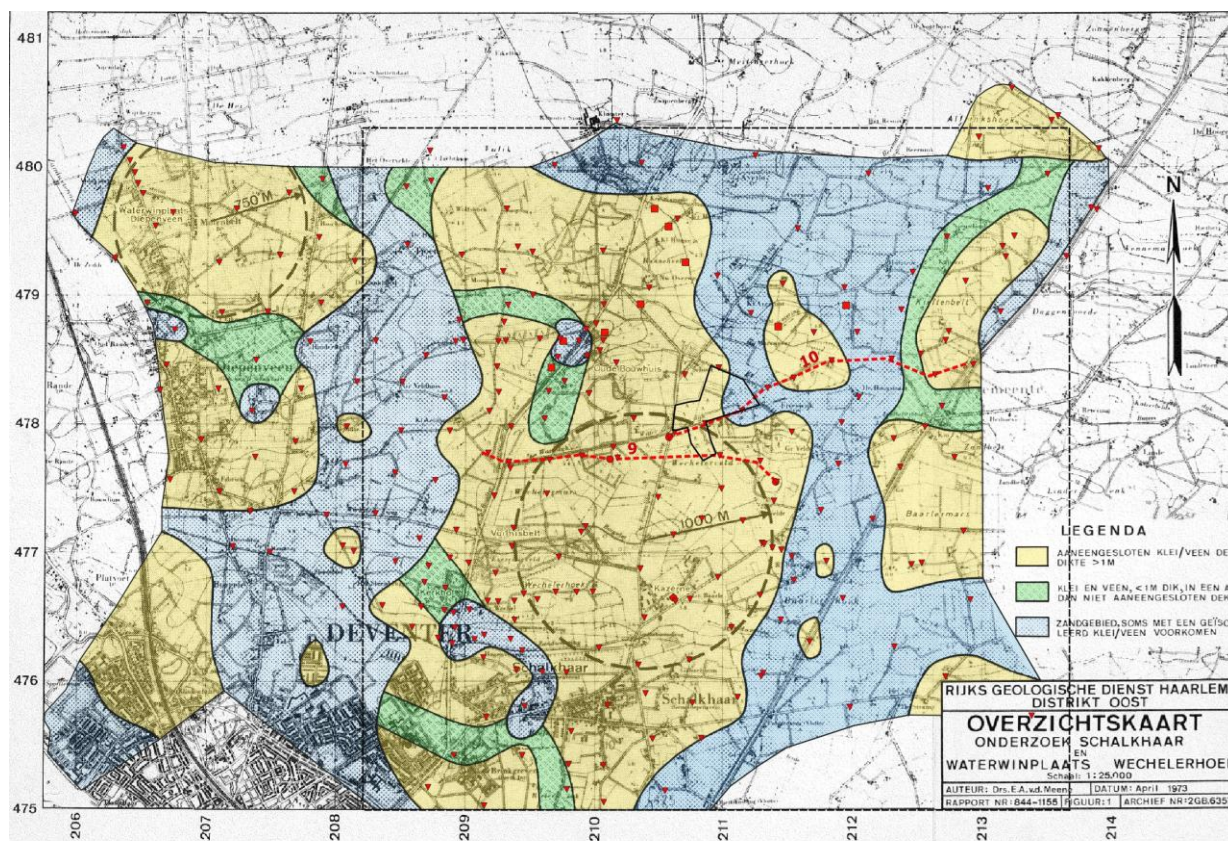


Figuur 2.8: Schalkhaar, Laagpakket van Zutphen: schematische weergave van de aanwezige watervoerende pakketten (aquifers) met een indicatie van de doorlatendheid (kD-waarde) en van aanwezige slecht doorlatende lagen (aquitards) met een indicatie van de hydraulische weerstand (c-waarde). Voor de Eemklei / Laag van Zutphen is een dikte aangenomen van 2 meter en een weerstand van 1000 dagen wat betekent dat daarvoor als doorlaatfactor (k) een waarde van 0,002 meter per dag is aangenomen. Voor de tegenwoordige benamingen van de vermelde formaties zie toelichting Figuur 2.6. Eemklei = Laagpakket van Zutphen, Drenthe (hier weergegeven) = Laagpakket van Twello. Let op: de tekening betreft een tweedimensionale weergave van een puntlocatie. Bron: WMO 1990.



3 Eerdere onderzoeken Schalkhaar

3.1 Onderzoek RGD 1970-1972



Figuur 3.1: Schalkhaar, Laagpakket van Zutphen: sonderingen en boringen (rode driehoeken en cirkels) uitgevoerd in de periode 1970 – 1972 door de Rijks Geologische Dienst. Op basis van de resultaten heeft de RGD het gebied in drie eenheden verdeeld (zie legenda en tekst). De gestreepte rode lijnen geven de ligging weer van de profielen van Figuur 3.2. Bron: Meene (1973).

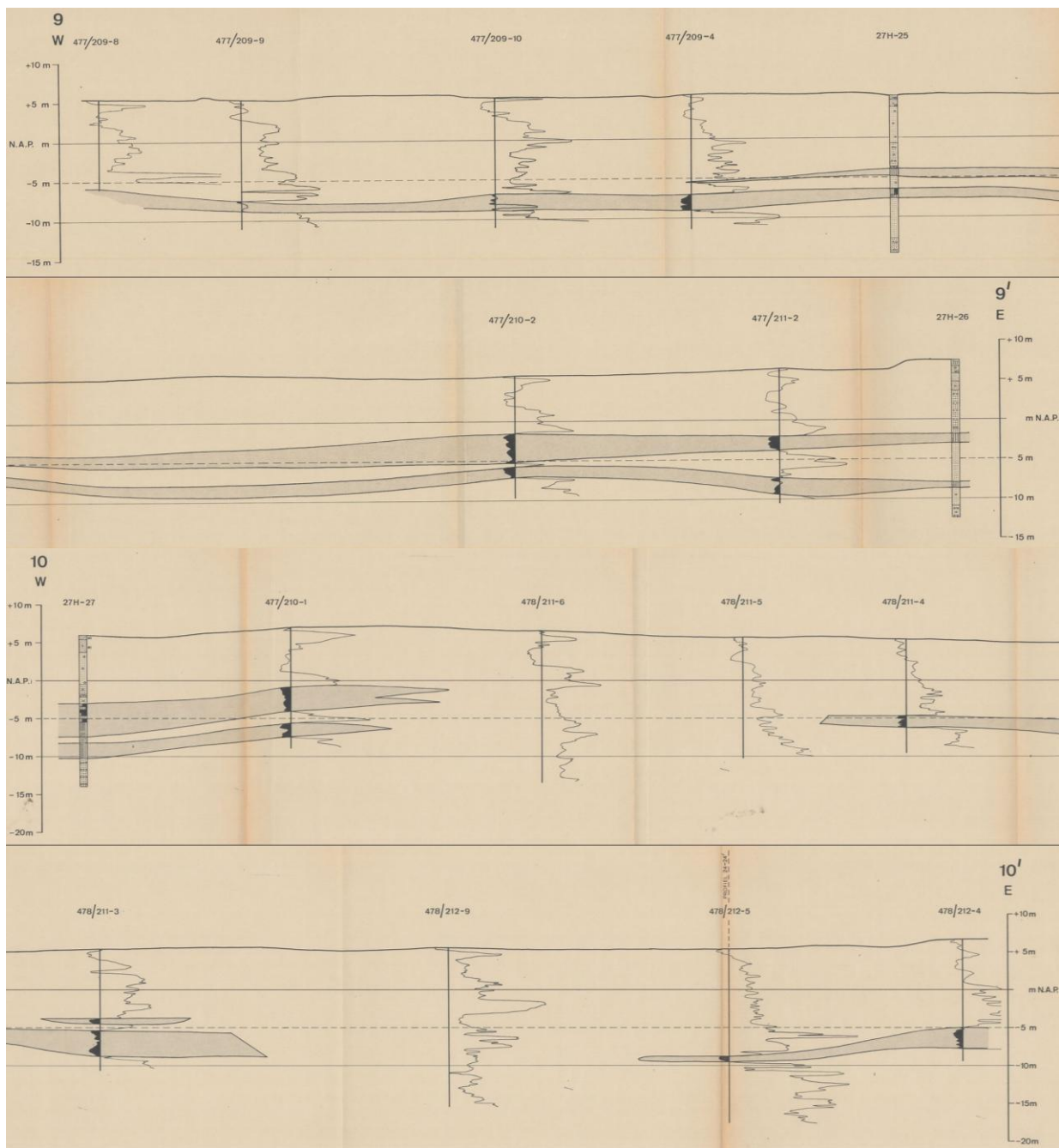
In de periode van 1970 – 1972 is door de Rijks Geologische Dienst (RGD) een onderzoek uitgevoerd naar het voorkomen van klei- en veenlagen in een gebied van ongeveer 35 km² dat bestaat uit het huidige onderzoeksgebied van 29 km² met nog een deel westelijk ervan (zie Figuur 3.1). Het onderzoek bestond uit 222 sonderingen uitgevoerd door de firma N.V. Verenigde Grondboorbedrijven Van Es-Rossmark, hetgeen neerkomt op een dichtheid van ongeveer één sondering per zestien hectare. De meeste sonderingen reiken tot dieptes die variëren tussen vijftien en twintig meter beneden maaiveld. Meene (RGD, 1973) noemt een aandeel van vijftien procent van de sonderingen dat beperkt bruikbaar is, omdat deze vanwege te grote conusdruk en kleef ondieper dan gewenst geëindigd zijn of omdat de interpretatie moeilijkheden opleverde. Destijds was het nog gangbaar om mechanisch te sonderen, wat betekent dat de conusweerstand bovengronds werd gemeten en niet door de conus zelf. Maar gezien de curves van de sonderingen, die subtiële variaties over geringe dieptes laten zien, was de registratie van de weerstand al wel automatisch en niet meer door aflezing van een meter door de sondeermeester (bron: W&P, de heren G. van Wijk en J. Dijkstra). Meene vermeldt dat ‘vooral vanaf dieptes van drie tot vijf meter beneden maaiveld een duidelijk



Wiertsema & Partners

RAADGEVEND INGENIEURS

onderscheid tussen klei- / veenlagen en zand kon worden gemaakt. Het bleek mogelijk te zijn om drukken kleiner dan $40 \text{ kg} / \text{cm}^2$ (4 MPa) te vertalen in klei- / veenlagen.'



Figuur 3.2: Schalkhaar, Laagpakket van Zutphen: profielen 9 en 10 weergegeven in twee delen (Meene, RGD 1973). De profielen gaan van west naar oost over het waterwingebied. De curves zijn van sonderingen, de boorstaten van boringen. Met verticale assen wordt een conusweerstand weergegeven van 4 MPa . De delen links ervan zijn op basis van hun kleinere weerstand door Meene aangemerkt als 'Eemkleilaag'. Voor locatie van de profielen zie Figuur 3.1.



Wiertsema & Partners
RAADGEVEND INGENIEURS

Behalve de sonderingen zijn enkele tientallen boringen uitgevoerd door de Rijks Geologische Dienst District Oost. Achttien zijn gedaan in de vorm van pulsboringsen en een onbekend aantal als spuitboringsen, ook wel zuigboringsen genoemd. De monsters van de pulsboringsen (27G102-103, 115-118 en 27H025-033, 045-047) zijn door de RGD beschreven. De maaiveldhoogtes van de sonderingen zijn geschat met behulp van een hoogtepuntenkaart, de hoogtes van de boringen zijn gemeten.

Op basis van de sonderingen en boringen is het onderzoeksgebied verdeeld in drie delen (zie Figuur 3.1):

1. Aaneengesloten klei- / veendek van > 1 meter
2. Klei en veen, < 1 meter dik, in een al dan niet aaneengesloten dek
3. Zandgebied, soms met een geïsoleerd klei / veen voorkomen

Figuur 3.2 laat west-oost-profielen 9 en 10 zien die getekend zijn op basis van de sonderingen en boringen. Over profiel 9 schrijft Meene (1973): 'Profiel 9 – 9' toont twee klei- / veenlagen, die worden gescheiden door een zandlaag. Uit de boorbeschrijvingen blijkt dat dit zand grof is. Het moet zijn neergelegd door een krachtig stromende watermassa, die met zand beladen over de onderste klei- / veenlaag stroomde. Er moet rekening mee worden gehouden, dat deze stroom de klei- / veenlaag plaatselijk heeft opgeruimd.' Profiel 10 laat ook een Laagpakket van Zutphen zien die bestaat uit twee klei- / veenlagen met ertussen een zandlaag. In het oosten van het profiel ontbreekt de bovenste kleilaag en aan weerszijden van het midden ontbreekt het Laagpakket van Zutphen volledig. Mogelijk speelt erosie ten tijde van afzetting van de tussengelegen zandlaag een rol zoals hierboven genoemd door Meene. Maar omdat ook de bovenste kleilaag er ontbreekt, is zeker dat op een later moment riviergeulen door het gebied gelopen zullen hebben. Profielen 9 en 10 laten zien dat het Laagpakket van Zutphen in het oosten hoger ligt dan in het westen, wat ook zichtbaar is op profielen 2, 3, 6, 7 en 12 (niet afgebeeld).

Bij het onderzoek van de RGD is van 43 monsters de doorlatendheid bepaald (zie Tabel 3.1). Het gaat vrijwel allemaal om monsters van klei of veen uit het Laagpakket van Zutphen. Monster 27G-0102 14,80 – 15,20 meter bestaat volgens de beschrijving voor de helft uit zand hetgeen de hogere doorlaatfactor van 0,52 meter per dag verklaart. Monster 27G-0103 43,30 – 43,70 meter is niet afkomstig uit het Laagpakket van Zutphen maar volgens REGIS II uit de top van het diepere Laagpakket van Twello. REGIS geeft als verticale doorlaatfactor in het onderzoeksgebied waardes die variëren tussen 0,015 en 0,053 meter per dag (zie Figuur 2.5). Op basis van de uitkomsten van Tabel 3.1 zouden die waardes kunnen gelden voor de meer doorlatende delen, maar is de klei en veen van het Laagpakket van Zutphen in het algemeen veel minder doorlatend.



Tabel 3.1: Schalkhaar, Laag van Zutphen: resultaten doorlatendheidsproeven uitgevoerd door de heer K.E. Wit, ICW-Wageningen, juni 1971 . Bron: Meene (1973). De percentages bij de grondsoort geven het geschatte lutumgehalte weer van de klei.

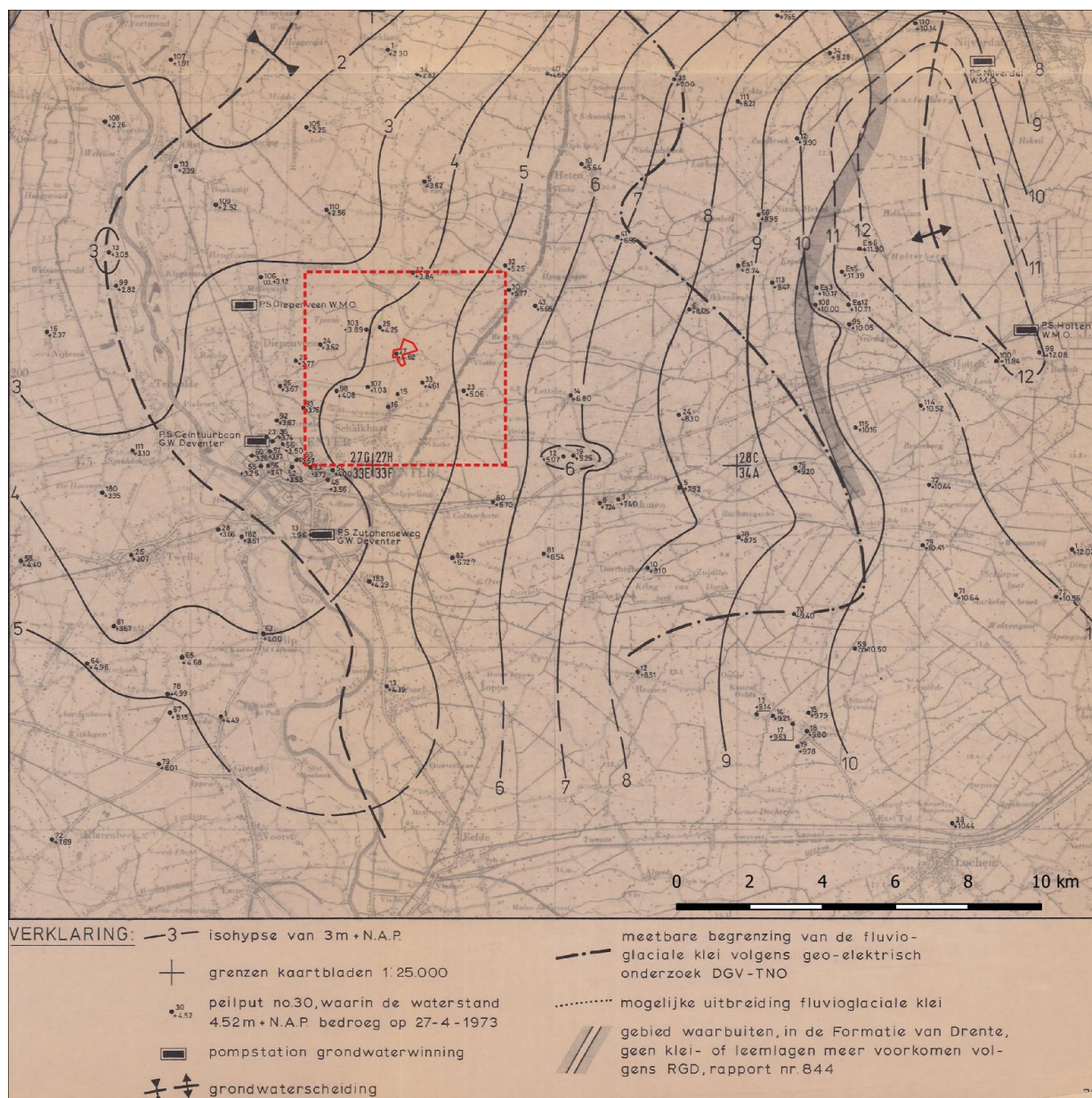
boring	diepte	doorlaatfactor k	grondsoort	opmerking
27G-0102	09,60 – 10,00 m	0,00024 m/d	klei 25%	iets zeer fijn zandig
	10,00 – 10,40 m	0,0010 m/d	veen	laagje klei en zand
	10,40 – 10,80 m	0,0065 m/d	klei 18%	veel schelpresten
	11,20 – 11,60 m	0,0039 m/d	klei 20%	enkele zandlaagjes
	12,00 – 12,40 m	0,014 m/d	klei 15%	veel schelpresten
	12,80 – 13,20 m	0,000089 m/d	klei >40%	veenlagen
	13,20 – 13,60 m	0,14 m/d	klei 20%	veel schelpresten,
	13,60 – 14,00 m	0,00073 m/d	id.	id.
	14,00 – 14,40 m	0,00095 m/d	klei 15%	sterk zandig, schelpresten
	14,40 – 14,80 m	0,0015 m/d	id.	id.
	14,80 – 15,20 m	0,52 m/d	id.	sterk zandig, 14,8-15,0 zand
	16,30 – 16,70 m	0,0026 m/d	klei 26%	dunne zandlaag
	16,70 – 17,10 m	0,002 m/d	id.	id., met onderin zand
27G-0103	43,30 – 43,70 m	0,00061 m/d	klei 12%	sterk zandig
27H-0025	09,30 – 09,70 m	0,00079 m/d	klei	zeer vet, plantenresten
	09,70 – 10,10 m	0,0022 m/d	id.	id.
	11,80 – 12,20 m	0,0054 m/d	klei	sterk fijnzandig, zandlaagjes
	12,20 – 12,60 m	0,00092 m/d	id.	id.
	12,60 – 13,00 m	0,000054 m/d	klei	zeer fijnzandig, 12,8-13,0 zand
27H-0026	09,30 – 09,70 m	0,000063 m/d	klei >40%	-
	09,70 – 10,10 m	0,000079 m/d	klei >40%	-
	10,10 – 10,50 m	0,000064 m/d	klei	gelaagd
	10,50 – 10,90 m	0,036 m/d	zand	slibhoudend, kleilaagje
	15,40 – 15,80 m	0,000059 m/d	klei	schelpengruis, plantenresten
	15,80 – 16,20 m	0,0011 m/d	klei 18%	sterk zandig
27H-0027	16,20 – 16,60 m	vervallen		
	09,00 – 09,40 m	0,00035 m/d	klei 25%	venig
	09,40 – 09,80 m	0,00017 m/d	klei	venig
	09,80 – 10,20 m	0,00043 m/d	veen	amorf
	10,20 – 10,60 m	0,029 m/d	veen	amorf, soms zwak kleiig
	10,60 – 11,00 m	0,033 m/d	klei 25%	venig
	11,00 – 11,40 m	0,0094 m/d	veen	kleiig
	11,40 – 11,80 m	0,0043 m/d	klei 15%	sterk zandig, veenlaagjes
	11,80 – 12,20 m	0,0058 m/d	klei 12%	sterk zandig, veenlaagjes
	12,20 – 12,60 m	0,0032 m/d	klei 15%	sterk zandig, veenlaagjes
	12,60 – 13,00 m	0,00098 m/d	klei 20-25%	venig
	13,00 – 13,40 m	0,0014 m/d	klei 12%	sterk zandig, veenlaagjes
	14,20 – 14,60 m	0,00094 m/d	klei 18%	sterk zandig
	14,60 – 15,00 m	0,0014 m/d	klei 20%	sterk zandig
	15,00 – 15,40 m	0,00017 m/d	klei 20%	sterk zandig, schelpgruis
	15,40 – 15,80 m	0,00011 m/d	klei 15%	sterk zandig, schelpgruis
	15,80 – 16,20 m	0,0013 m/d	klei 12%	sterk zandig, schelpgruis



3.2 Onderzoek RID 1974

Parallel aan het onderzoek van de Rijks Geologische Dienst bij Schalkhaar is begin jaren '70 een geohydrologische verkenning in Salland uitgevoerd door het toenmalige Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening (R.I.D., Lamsvelt 1974). Men heeft voor het gebied tussen ongeveer Zwolle, Ommen, Deventer en Holten een isohypsenkaart getekend voor het diepe grondwater tussen het laagpakket van Twello en het plaatselijk hierboven gelegen laagpakket van Zutphen (zie Figuur 3.3). Volgens de kaart loopt de stijghoogte binnen het onderzoeksgebied af van ongeveer 5 meter NAP in het oosten tot 4 meter in het noordwesten. De isohypsenkaart van het grondwater boven de formatie van Zutphen (niet afgebeeld) vertoont binnen het onderzoeksgebied een zeer sterk vergelijkbaar beeld.

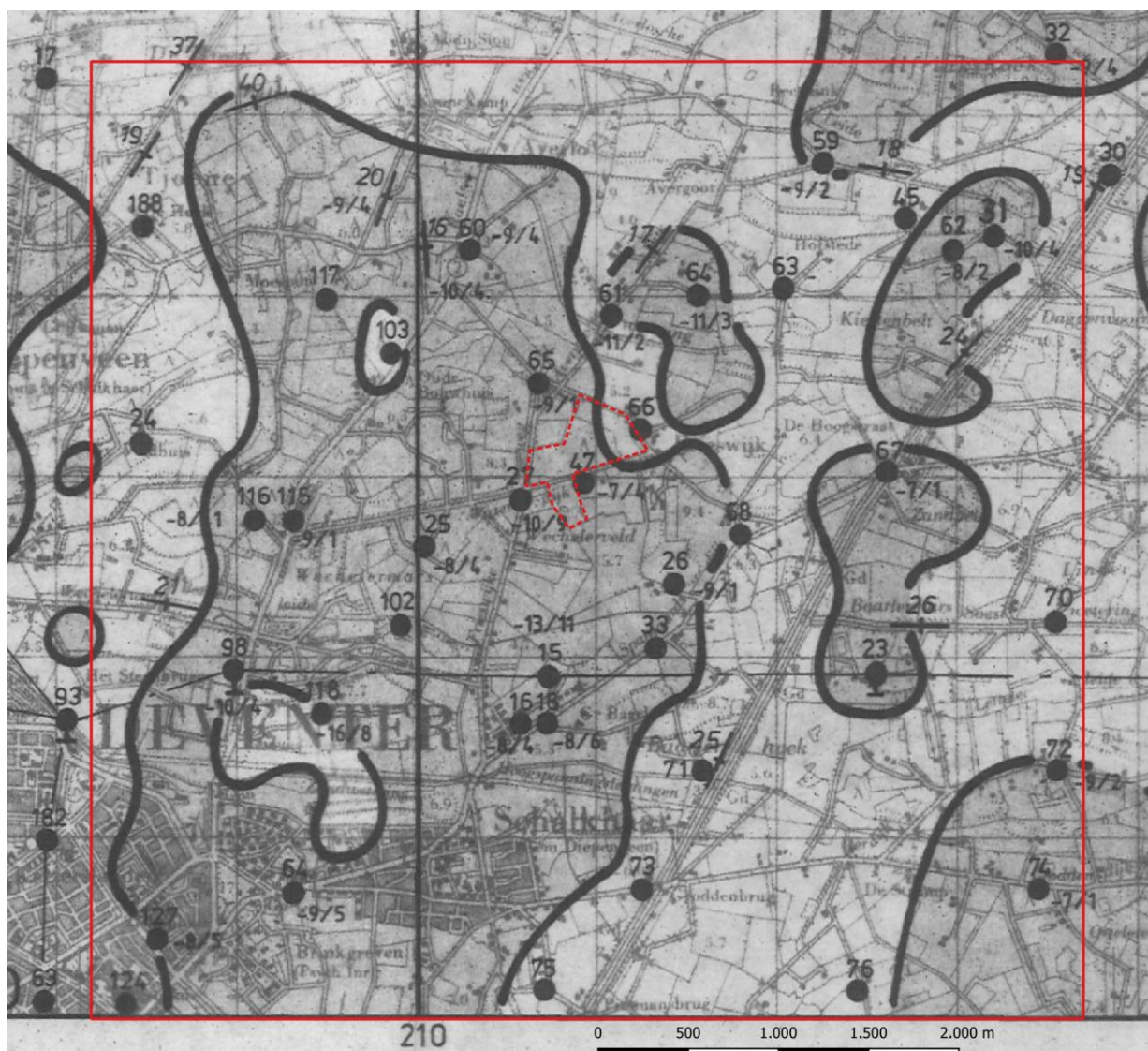
Tevens heeft men een kaart gemaakt van het doorlaatvermogen (kD) van hetzelfde pakket dat door de R.I.D. 'jong-pleistocene zanden' wordt genoemd. Daarvoor zijn zowel pompproeven gedaan als laboratorium-analyses van het zand. In het onderzoeksgebied zijn één pompproef uitgevoerd en twee laboratorium-analyses. De pompproeven zijn uitgevoerd op negentien locaties met één pompput en één waarnemingsput waarbij de stijghoogte één etmaal gemeten werd. Met hydrologische formules zijn de waterstandsverlagingen vertaald naar doorlaatvermogen. Bij de laboratorium-analyses is gebruik gemaakt van een methode van het I.C.W. te Wageningen om het doorlaatvermogen van grond te bepalen op basis van: mediane korrelgrootte, slibgehalte, sorteringsgraad en grindgehalte. Het resultaat is een kaart van het R.I.D. (niet afgebeeld) waarop het zand tussen de laagpakketten van Twello en Zutphen in het onderzoeksgebied een doorlaatvermogen heeft van ongeveer 2000 m²/dag. Bij een aantal putten heeft men op basis van de pompproef ook een weerstandswaarde (c) berekend. Voor put 27H-15 (210,700 / 476,850) in het zuiden van het onderzoeksgebied kwam hier een c-waarde uit van circa 860 dagen voor het pakket tussen 'Twello' en 'Zutphen' van 14 tot 40 meter beneden maaiveld.



Figuur 3.3: Schalkhaar, Laagpakket van Zutphen: isohypsenkaart van het grondwater tussen laagpakketten Twello en Zutphen (indien aanwezig) getekend op basis van stijghoogtes gemeten op circa 185 punten op 27 april 1973. Waar in de legenda gesproken wordt van 'fluvioglaciale klei' wordt het laagpakket van Twello bedoeld. Bron: Lamsveld (1974, bijlage 2).

3.3 DGV-TNO 1985

De Dienst Grondwaterverkenning TNO heeft in 1985 kaartbladen 27 oost en 28 west van de Grondwaterkaart van Nederland gepubliceerd. Figuur 3.4 toont een uitsnede van een kaart van de basis en dikte van eemklei-afzettingen die tegenwoordig 'Laag van Zutphen' genoemd worden.



Figuur 3.4: Schalkhaar, Laag van Zutphen: kaart Dienst Grondwaterverkenning TNO (Houtman & Haak 1985, bijlage 8) met 'Basis en dikte van Eemklei-afzettingen in het eerste watervoerende pakket'. Bijvoorbeeld boring 47 bij het waterwingebied heeft volgens deze kaart een basis op -7 meter NAP en een dikte van 4 meter. In de donkere gebieden komt de Eemklei mogelijk aaneengesloten voor.

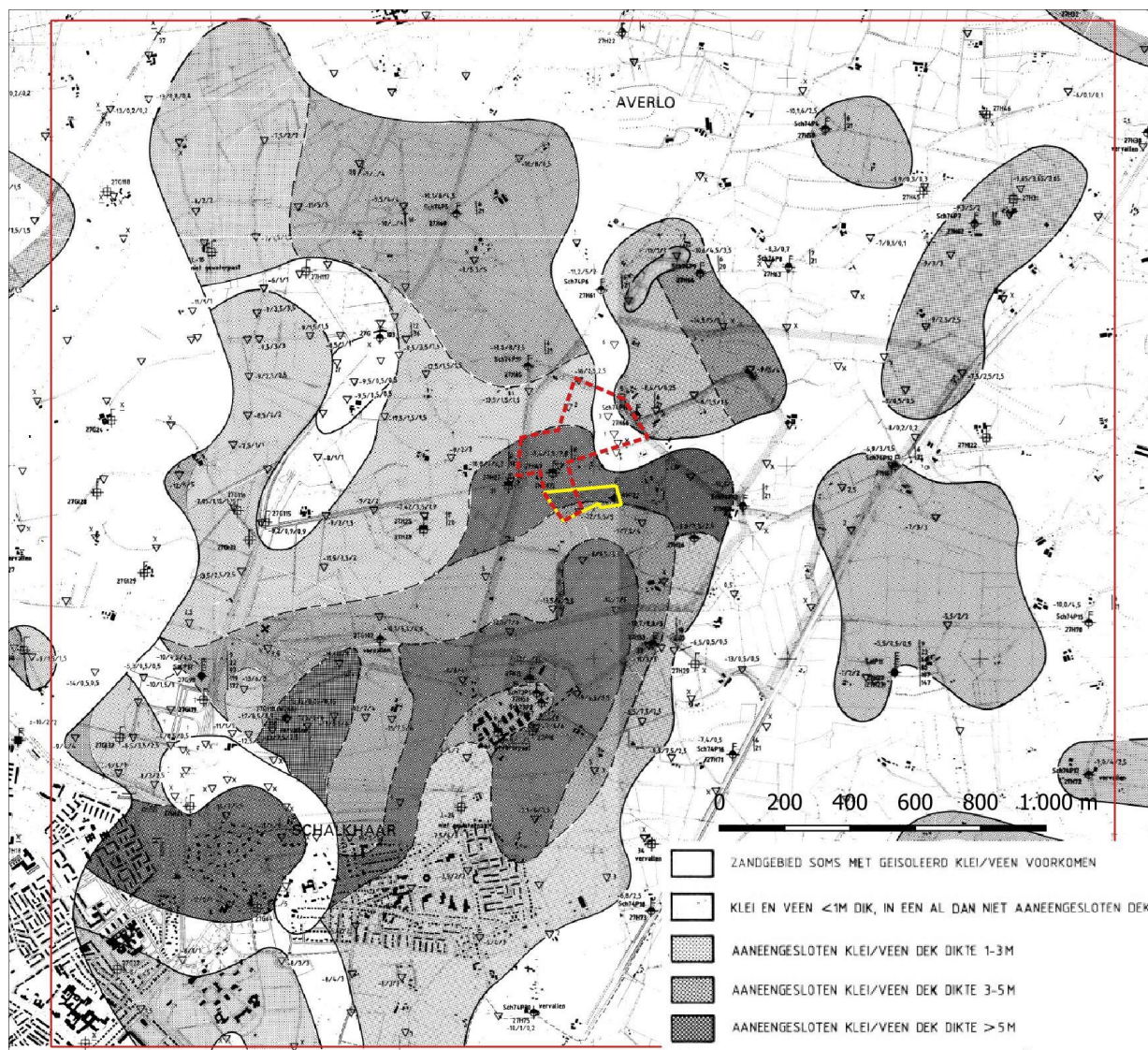
3.4 Aanvullende sonderingen 1993

Op 24 mei 1993 zijn in opdracht van de Waterleiding Maatschappij Overijssel zes aanvullende sonderingen uitgevoerd bij het waterwingebied Schalkhaar. Drie ervan zijn binnen het waterwingebied gedaan en drie op korte afstanden rondom. Bij de sonderingen is niet alleen de conusweerstand bepaald zoals in 1970-1972, maar ook de wrijvingsweerstand. De weerstanden zijn volgens toelichting van de uitvoerder Van Es-Rossmark bv continu elektrisch gemeten en geregistreerd (Koops 1993).



3.5 Kaarten Waterleidingmaatschappij Overijssel 1990-1993

De opdrachtgever beschikt over een serie kaarten van de Waterleidingmaatschappij Overijssel uit met name 1990. Figuur 3.5 toont één van deze kaarten waarop het voorkomen en de dikte van de Eemklei / de Laag van Zutphen is getekend. De kaart laat een gewijzigde versie zien van een kaart uit 1990 die is aangepast op basis van de resultaten van de zes aanvullende sonderingen die genoemd zijn in Paragraaf 3.4.



Figuur 3.5: Schalkhaar, Laag van Zutphen: kaart verbreiding en dikte Eemklei. WMO eerste versie 6 – 4 – 1990, gewijzigde versie 26 – 8 – 1993. Het onderscheid tussen de eerste twee legenda-eenheden is niet goed zichtbaar op de kaart. Met geel is een gebied aangeduid dat volgens de legenda eigendom was van de WMO.



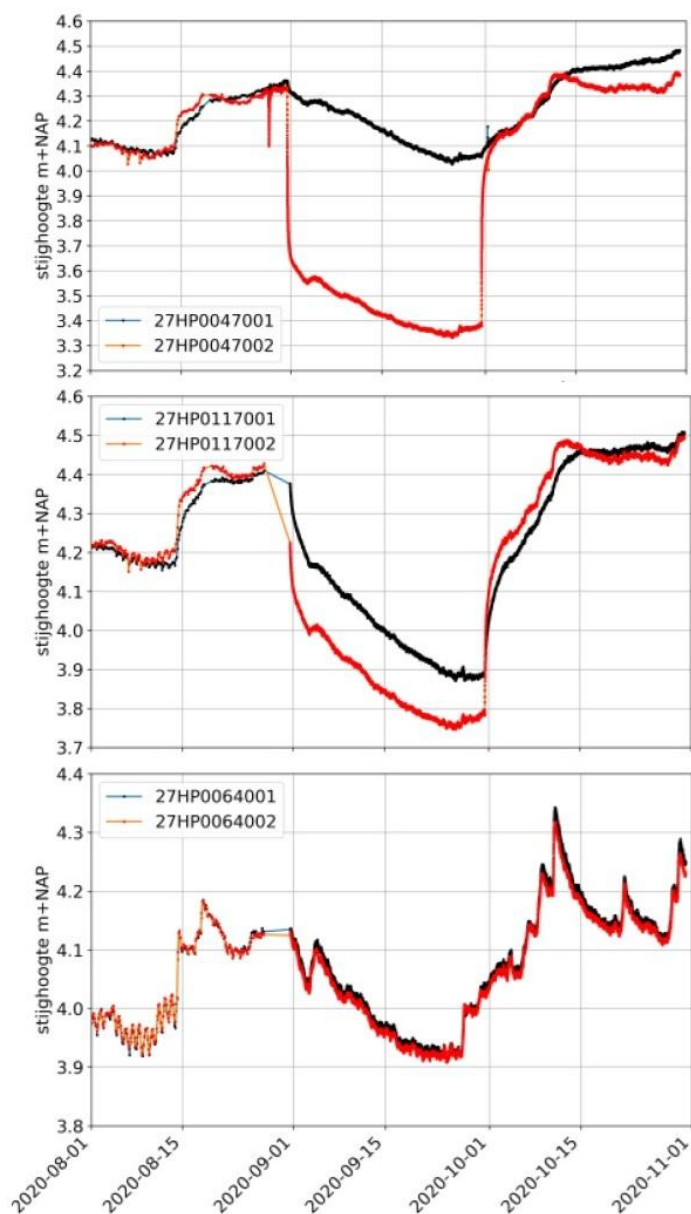
Wiertsema & Partners

RAADGEVEND INGENIEURS

3.6 Pompproef Vitens 2021

In september 2021 is in opdracht van Vitens een pompproef uitgevoerd in het waterwingebied (Hoogendoorn 2021). Figuur 3.6 toont van vier peilbuizen het verloop van de stijghoogte in de zandlaag onder (rood) en boven (zwart) de Laag van Zutphen. Bij peilbuis 27HP0047 daalde de stijghoogte onder 'Zutphen' veel sterker dan erboven wat wijst op een grote hydraulische weerstand. Bij peilbuis 27HP0064 daarentegen volgen de stijghoogtes elkaar, hoogstwaarschijnlijk door afwezigheid van 'Zutphen'. Bij peilbuis 27HP0117 lag het verloop van beide curves tussen de twee hiervoor genoemde in. Dit kan betekenen dat de Laag van Zutphen wel aanwezig is, maar een geringe weerstand heeft bijvoorbeeld door beperkte dikte. Een andere mogelijkheid is dat 'Zutphen' ter plaatse wel aanwezig is, maar op korte afstand verderop ontbreekt. De grafieken laten ook zien dat de verlaging van stijghoogte ter plaatse van peilbuis 27HP0047 in het waterwingebied enkele malen groter is dan bij peilbuis 27H0064 die op driekwart kilometer noordoostelijk van het waterwingebied ligt. Volgens Hoogendoorn (2021) doofde de verlaging door de

waterwinning uit op een afstand van ruim anderhalve kilometer.



Figuur 3.6: Schalkhaar, Laagpakket van Zutphen: enkele resultaten pompproef. De grafieken geven stijghoogtes weer in de periode augustus, september en oktober, dus tijdens de pompproef en in de maanden ervoor en erna. De rode lijn is de stijghoogte in de watervoerende laag onder de Laag van Zutphen, de zwarte lijn de grondwaterstand (freatisch) in het zand boven 'Zutphen'. Bron: Hoogendoorn (2021).



Wiertsema & Partners

RAADGEVEND INGENIEURS

4 Bijgewerkt model Laag van Zutphen

4.1 Aanpak

De belangrijkste bron van informatie over de Laag van Zutphen bestaat uit de ruim tweehonderd sonderingen die in de periode 1970-1972 zijn uitgevoerd door de Rijks Geologische Dienst (Meene 1973, zie Paragraaf 3.2). Behalve deze sonderingen is voor het onderzoek ook gebruik gemaakt van latere sonderingen. Verreweg de meeste zijn gedaan in het zuiden zoals voor aanleg van de wijk Het Fetlaer en het Deventer Ziekenhuis. In verband met de grote dichtheid is er op die plekken voor gekozen om ongeveer dertig procent van de beschikbare sonderingen te onderzoeken. Naar verwachting zal onderzoek van meer sonderingen niet of nauwelijks leiden tot veranderingen in geïnterpreteerde patronen van de Laag van Zutphen. Behalve sonderingen zijn bij het onderzoek ook diepe boringen onderzocht, waarvan de hoogste concentratie aanwezig is in of bij het waterwingebied. Een aantal sonderingen en boringen is toegankelijk via Dinoloket en BROloket en een aantal alleen via Geoloket (Wiertsema & Partners bv). De sonderingen van de RGD uit 1970-1972 zijn alleen beschikbaar als scans van documenten uit die tijd. Het totale aantal sonderingen in het onderzoeksgebied dat gebruikt is bedraagt ongeveer 350, het aantal boringen 80. Daarmee is de gemiddelde dichtheid van punten 0,15 per hectare, oftewel één meting per zeven hectare.

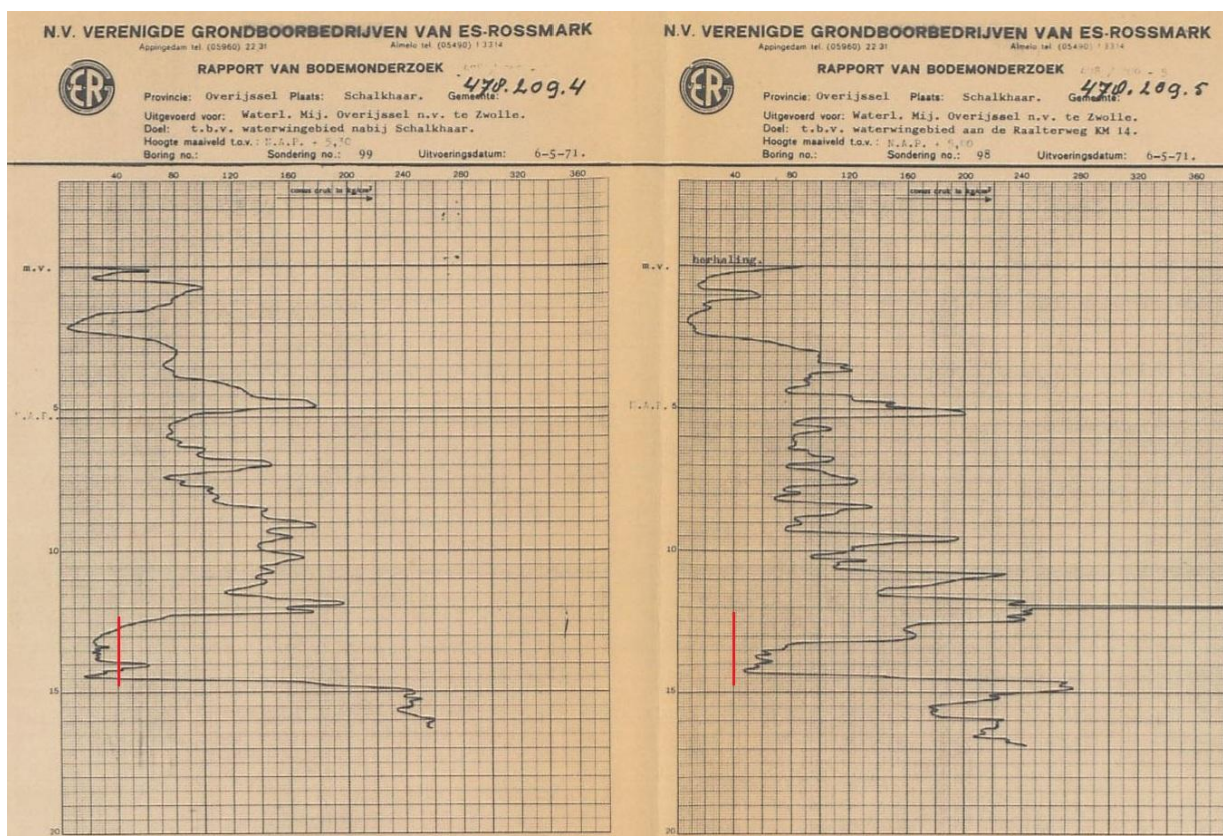
Van de sonderingen en boringen zijn van de Laag van Zutphen bepaald: basis en top ten opzichte van NAP, totale dikte (top minus basis), opgetelde dikte zandlagen binnen 'Zutphen' en opgetelde dikte klei- en veenlagen. Bij het onderzoek zijn twee aannames overgenomen van de RGD: het Laagpakket van Zutphen bevindt zich tussen NAP en -17 meter NAP en de grens tussen zand en klei / veen ligt bij een conusweerstand van 4 MPa. Doorgaans worden lagere waardes als grens genomen, maar de gekozen weerstand lijkt toch betrouwbaar aangezien de RGD hiervoor de resultaten van sonderingen en boringen vergeleken heeft. Sonderingen en boringen die de diepte van -17 meter NAP niet halen zijn alleen meegenomen in het onderzoek als het niveau van de Laag van Zutphen waarschijnlijk wel bereikt is, waarvoor gekeken is naar diepere metingen dicht in de buurt (zie bijvoorbeeld Figuur 4.8).

Bij het onderzoek is geen gebruik gemaakt van VES-metingen of boorgatmetingen. In Dinoloket staan binnen een kilometer afstand van het waterwingebied twee VES-metingen, een geo-elektrische meetmethode waarbij de grond niet geroerd hoeft te worden. De metingen bleken echter beperkt bruikbaar voor onderzoek naar de Laag van Zutphen, onder meer doordat het met de metingen niet mogelijk is om diktes en laterale variaties in aanwezigheid van lagen klei of veen vast te stellen. In DINO-loket is een veelvoud aan boorgatmetingen beschikbaar. Maar deze zijn allemaal uitgevoerd bij boringen waarvan goede beschrijvingen zijn, waardoor analyse van de schijnbare weerstand en de natuurlijke gammastraling nauwelijks iets toevoegen. Wel laten de metingen duidelijke pieken van gammastraling en elektrische weerstand zien ter hoogte van de Laag van Zutphen, ook als deze volgens de boorbeschrijving relatief dun is.

De basis en top van de Laag van Zutphen zijn benodigde parameters voor modellering van grondwaterstroming in het gebied. Het verschil tussen beide is de dikte van 'Zutphen'. Om de weerstand hiervan te bepalen zijn zandlagen afgetrokken van de dikte, omdat die niet of nauwelijks bijdrage aan de hydraulische weerstand. Door de dikte van resterende lagen klei en veen te delen door de verticale doorlaatfactor (kv-waarde) van klei en veen is de hydraulische weerstand (c-waarde) berekend. Als verticale doorlaatfactor is de mediaan genomen van waarden in het onderzoeksgebied volgens REGIS II dat is opgebouwd uit een raster met vakken van honderd bij honderd meter (zie Figuur 2.5): 0,023 meter per dag. In werkelijkheid varieert deze waarde uiteraard binnen de Laag van Zutphen. Ook lijkt de waarde een overschatting van de doorlaatfactor gezien de bevindingen van ICW-Wageningen uit 1971 (zie Tabel 3.1). De werkelijke hydraulische weerstanden van de Laag van Zutphen zullen dus groter zijn. Maar voor

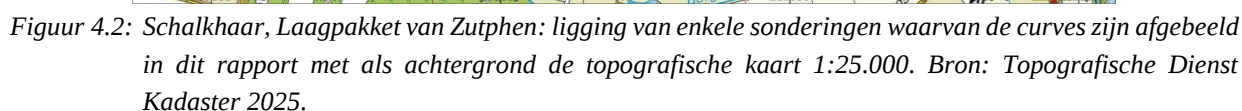
het doel van dit onderzoek verwachten we dat de gehanteerde doorlaatfactor volstaat.

Op de verschillende kaarten staan met behulp van kleuren de waardes weergegeven zoals bepaald bij de sonderingen en boringen. De getekende lijnen en polygonen zijn interpretaties die in veel gevallen de waarden van de sonderingen en boringen niet volgen. Een voorbeeld is sondering 478209008 die van 0 tot -0,5 meter NAP een laag van waarschijnlijk fijn materiaal heeft die te ondiep lijkt te zijn voor de Laag van Zutphen (zie Figuur 4.8). Tijdens de periodes voor en na vorming van 'Zutphen' kan er bijvoorbeeld zeer plaatselijk klei of veen zijn afgezet in een verlaten riviergeul (zie ook Paragraaf 4.5). De sonderingen laten ook voorbeelden zien waarbij ter hoogte van de Laag van Zutphen wel een verlaging aanwezig is van de conusweerstand, maar niet tot onder 4 MPa (zie Figuur 4.1). De verlaging zal het gevolg zijn van een fijnere samenstelling van de grond ter plaatse die gelijktijdig gevormd is met de Laag van Zutphen. Maar als de laag onvoldoende kleiig of venig is, dan wordt deze niet tot 'Zutphen' gerekend, maar tot de formatie van Kreftenheye zonder nadere indeling in een laagpakket. De oorzaak dat de afzetting ter plaatse relatief zandig is, kan bijvoorbeeld zijn dat er voorafgaand aan de vorming van de Laag van Zutphen een zandkop lag.



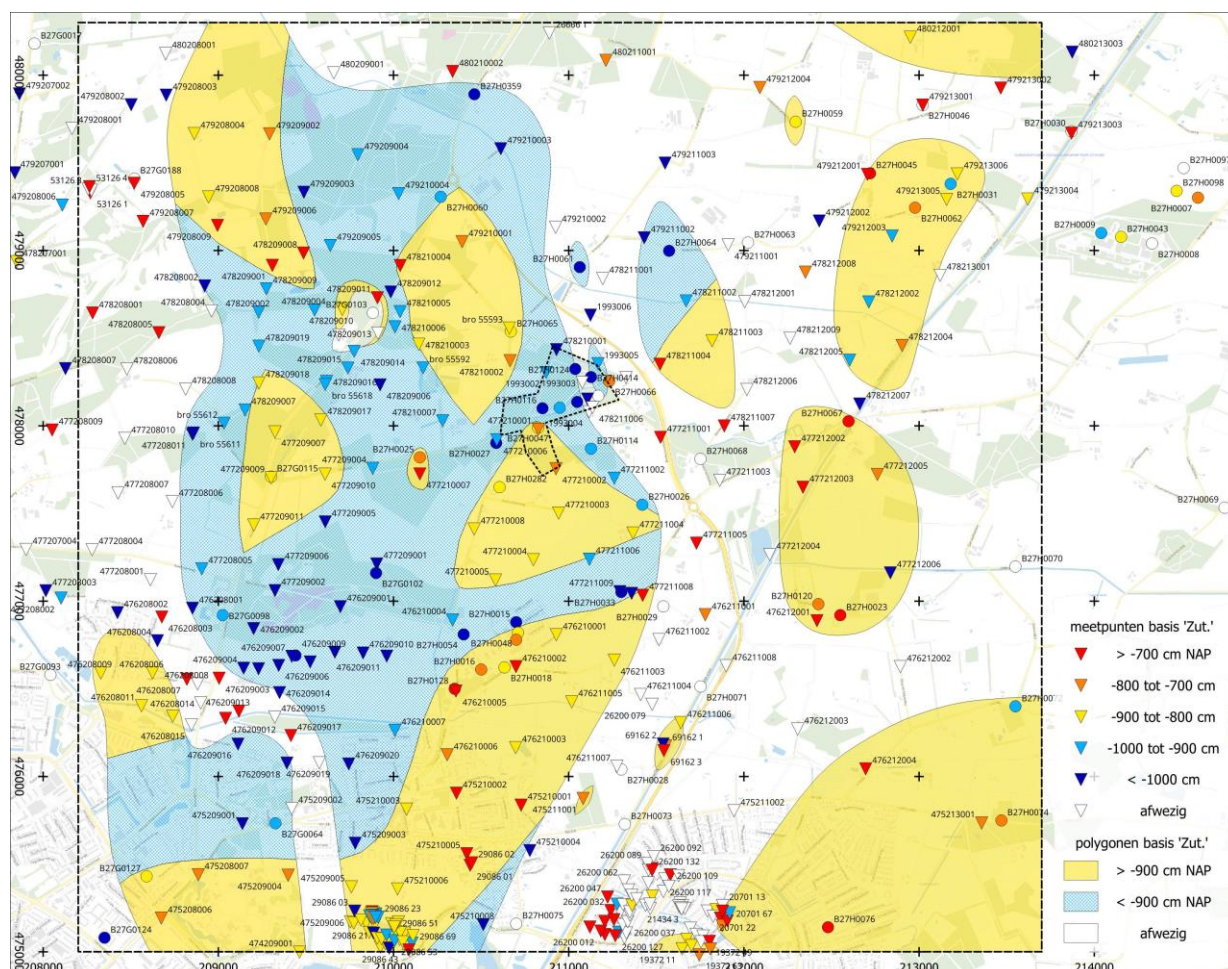
Figuur 4.1: Schalkhaar, Laagpakket van Zutphen: curves conusweerstand sonderingen 478.209.4 en 5 van de RGD (Meene 1973). Beide curves vertonen een lage conusweerstand rond ongeveer -8 tot -9 meter NAP. Bij de linker komt de weerstand wel onder 4 MPa (rode lijn), maar bij de rechter niet. Op beide plekken lijken komafzettingen van de Rijn te zijn gevormd, maar ter plaatse van de linker sondering worden deze gerekend tot de Laag van Zutphen en ter plaatse van de rechter sondering niet vanwege een te hoge zandigheid. Voor locatie van de sonderingen, zie Figuur 4.2.





Figuur 4.3 geeft binnen het onderzoeksgebied de basis weer van de Laag van Zutphen zoals vastgesteld bij de beschikbare sonderingen en boringen. De delen waar de Laag van Zutphen ontbreekt zijn begrensd door zwarte lijnen. In ongeveer 54% van het onderzoeksgebied is een restant van ‘Zutphen’ aanwezig, in 46% is de laag volledig geërodeerd. Enkele sonderingen geven volgens de methodiek van de RGD (zie Paragraaf 4.1) wel waarden voor de basis van ‘Zutphen’, maar in de interpretatie is aangenomen dat de laag niet aanwezig is. Een voorbeeld is sondering 478211007 (niet afgebeeld) waarvan de conusweerstand alleen onder 4 MPa reikt tussen 0 en -2,5 meter NAP. Een ander voorbeeld is 479211003 (niet afgebeeld) waar de conusweerstand op een relatief grote diepte van -13,5 tot -14,0 meter onder 4 MPa komt. Bij sonderingen 478209005 (zie Figuur 4.1) en 478209013 (niet afgebeeld) lijkt de Laag van Zutphen wel aanwezig gezien de aanwezigheid van een dip in de conusweerstand op een gangbare hoogte. Maar omdat de weerstand bij beide sonderingen niet onder de 4 MPa komt, is op de kaart van Figuur 4.3 aangegeven dat de laag ontbreekt.

Een tweede patroon dat uit de interpretatie van de basis van 'Zutphen' blijkt, is een systeem van 'eilanden' bij en westelijk van het waterwingebied die van elkaar gescheiden worden door lagere delen. Waarschijnlijk geeft dit een indruk van de morfologie van het gebied zoals achtergelaten door de vlechtende Rijn aan het begin van het Eemien toen de rivier overging naar een meanderend systeem in het oosten van het dal. De geel gekleurde 'eilanden' lijken rivierrassen te zijn die doorsneden worden door blauw gekleurde lagere delen van voormalige geulen. De foto's in Figuur 4.4 van hedendaagse vlechtende rivieren geven een indruk van hoe een vlechtende rivier eruit ziet. Tenslotte zijn in het gebied mogelijk kleine duinen gevormd aan het begin van het Eemien toen de Rijn ging meanderen in het oosten van het IJsseldal en ter plaatse van het onderzoeksgebied een uitgestrekte kale zandvlakte achterbleef. De zandverstuivingen zullen naar verwachting geen grote vormen hebben aangenomen, doordat het zand door de lage ligging in het dal doorgaans nat zal zijn geweest. De dichtheid van sonderingen en boringen is onvoldoende om met grotere zekerheid iets te zeggen over duinvorming in het gebied.



Figuur 4.3: Schalkhaar, Laag van Zutphen: beschikbare sonderingen (driehoeken) en boringen (cirkels) in het onderzoeksgebied. Met kleuren is de hoogte ten opzichte van NAP weergegeven van de basis van de Laag van Zutphen. De zwarte lijnen markeren de gebieden waar de Laag van Zutphen niet meer aanwezig is. Binnen het deel waar 'Zutphen' wel bewaard gebleven is, is een onderscheid gemaakt tussen delen waar deze hoger en delen waar deze lager lijken te liggen dan -900 cm NAP.



Wiertsema & Partners

RAADGEVEND INGENIEURS



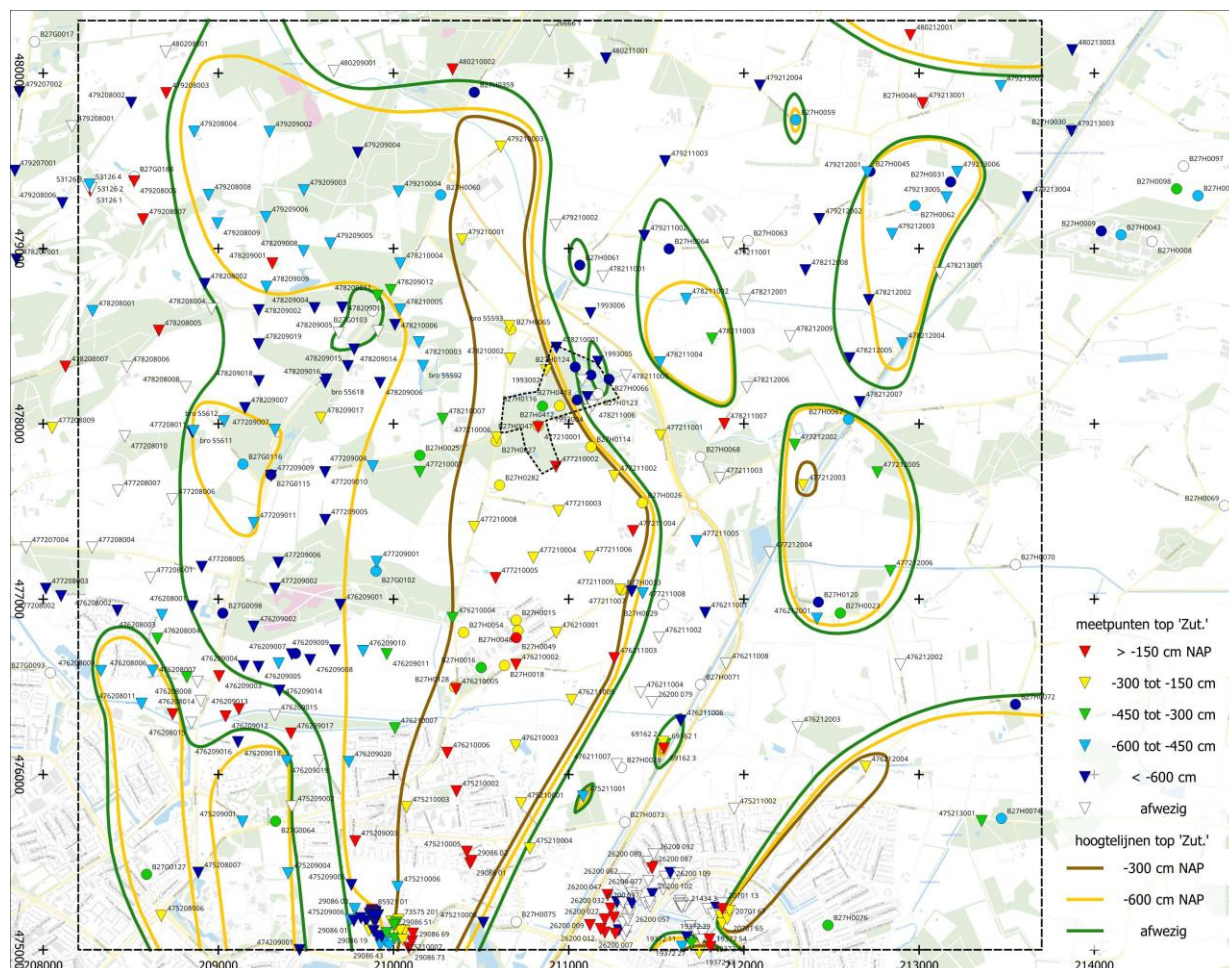
Figuur 4.4: Schalkhaar, Laag van Zutphen: foto's van hedendaagse vlechtende rivieren. Boven de Waimakariri op het zuidereiland van Nieuw-Zeeland, onder de Platte River in Nebraska, Verenigde Staten (bronnen respectievelijk: <https://canterburykayaking.co.nz/> en <https://greatplains.audubon.org/platte-river>).



Wiertsema & Partners
RAADGEVEND INGENIEURS

4.3 Top Laag van Zutphen

Tijdens het Eemien en het Vroeg-Weichselien werd de Laag van Zutphen gevormd als komafzetting van een meanderende Rijn (zie Hoofdstuk 2). Tijdens het Midden-Pleniglaciaal nam de hoeveelheid aangevoerd sediment van de Rijn toe, veranderde het patroon van de rivier van meanderend in vlechtend en ontwikkelden zich geulen buiten het oosten van het IJsseldal waar de rivier tienduizenden jaren gelegen had. In gebieden in het westen en oosten van het onderzoeksgebied lijkt een grote geul van de vlechtende Rijn te hebben gelopen, aangezien de Laag van Zutphen daar vrijwel volledig is opgeruimd (zie Figuur 4.5).



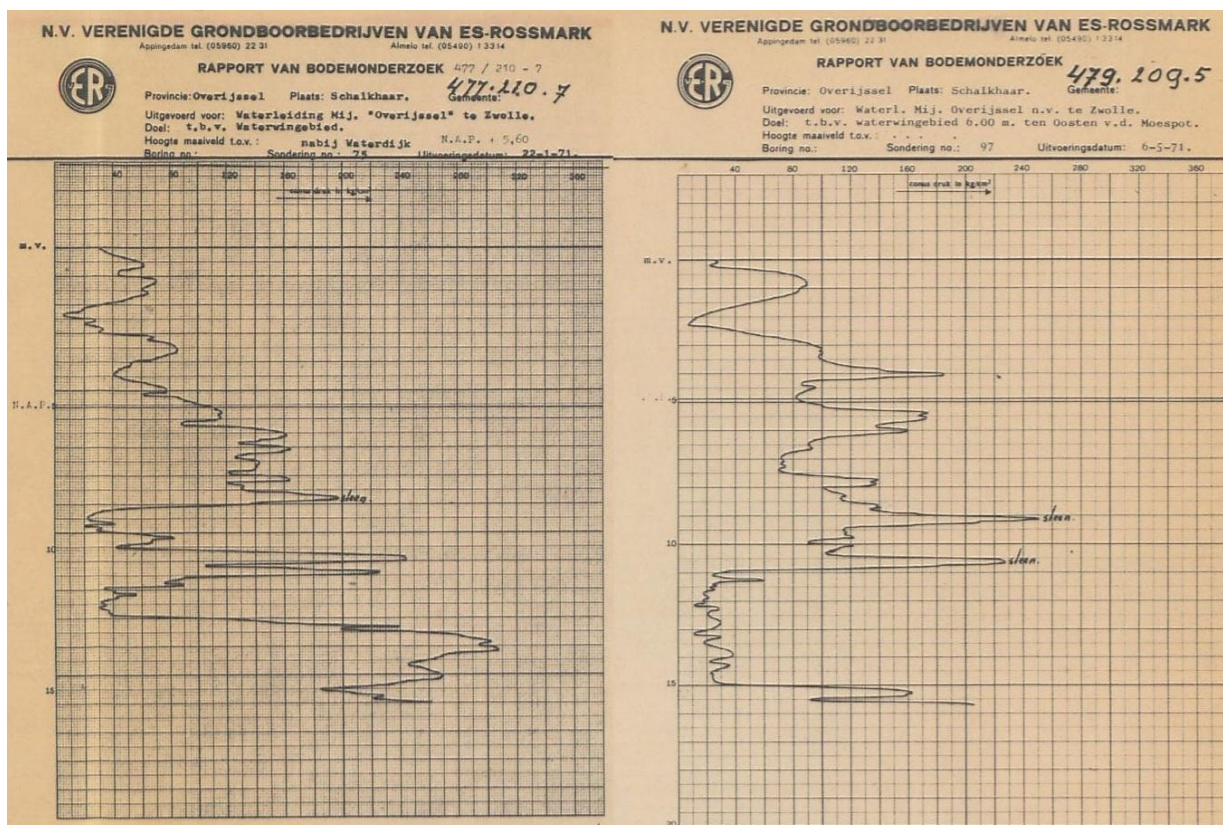
Figuur 4.5: Schalkhaar, Laag van Zutphen: sonderingen (driehoeken) en boringen (cirkels) in het onderzoeksgebied. Met kleuren is de hoogte ten opzichte van NAP weergegeven van de top van de Laag van Zutphen. De groene lijn markeert het gebied waar 'Zutphen' niet meer aanwezig is. De bruine en gele lijnen geven hoogtes van -300 en -600 centimeter NAP weer van de top van de Laag van Zutphen.



Wiertsema & Partners

RAADGEVEND INGENIEURS

Door het midden van het onderzoeksgebied ligt van zuid naar noord een zone waar de top van Zutphen relatief hoog ligt met waarden boven -300 centimeter NAP (zie Figuur 4.5 bruine lijnen). Hier lijkt niet of nauwelijks erosie te zijn opgetreden van de Laag van Zutphen. In de zone tussen de groene en bruine lijnen is een restant van 'Zutphen' bewaard gebleven, maar ligt de top lager dan -300 centimeter NAP. De lagere ligging zal in het westen vermoedelijk deels het gevolg zijn van een sterkere bodemdaling zoals in Paragraaf 4.2 ook is aangevoerd als verklaring voor een lagere ligging van de basis van 'Zutphen'. Daarnaast kan in deze gebieden de lagere ligging van de top worden toegeschreven aan erosie door de Rijn tijdens het Midden-Pleniglaciaal. Dat 'Zutphen' er niet volledig is opgeruimd kan komen doordat er geen diepe Rijngeulen gelegen hebben. Een andere mogelijkheid is dat de Rijn hier gestroomd heeft in een latere fase waarin het maaiveld van het IJsseldal door sterke aanvoer van zand omhoog geklommen was. Daardoor was het diepste deel van 'Zutphen' buiten bereik van erosieve geulen komen te liggen. Dat 'Zutphen' in een zone van zuid naar noord door het midden van het gebied grotendeels bewaard lijkt te zijn gebleven lijkt eveneens te komen doordat daar pas grote geulen gelopen hebben toen het IJsseldal al meters was opgehoogd, waardoor ze niet of nauwelijks meer tot in 'Zutphen' reikten. Figuur 4.6 geeft twee voorbeelden van sonderingen waar de conusweerstand op de overgang van 'Zutphen' naar bovenliggende afzettingen sterk oploopt. In beide gevallen heeft men handmatig vermeld dat op de overgang een steen aanwezig is. Dat betreft hoogstwaarschijnlijk grind dat is afgezet op de bodem van een vlechtende riviergeul.



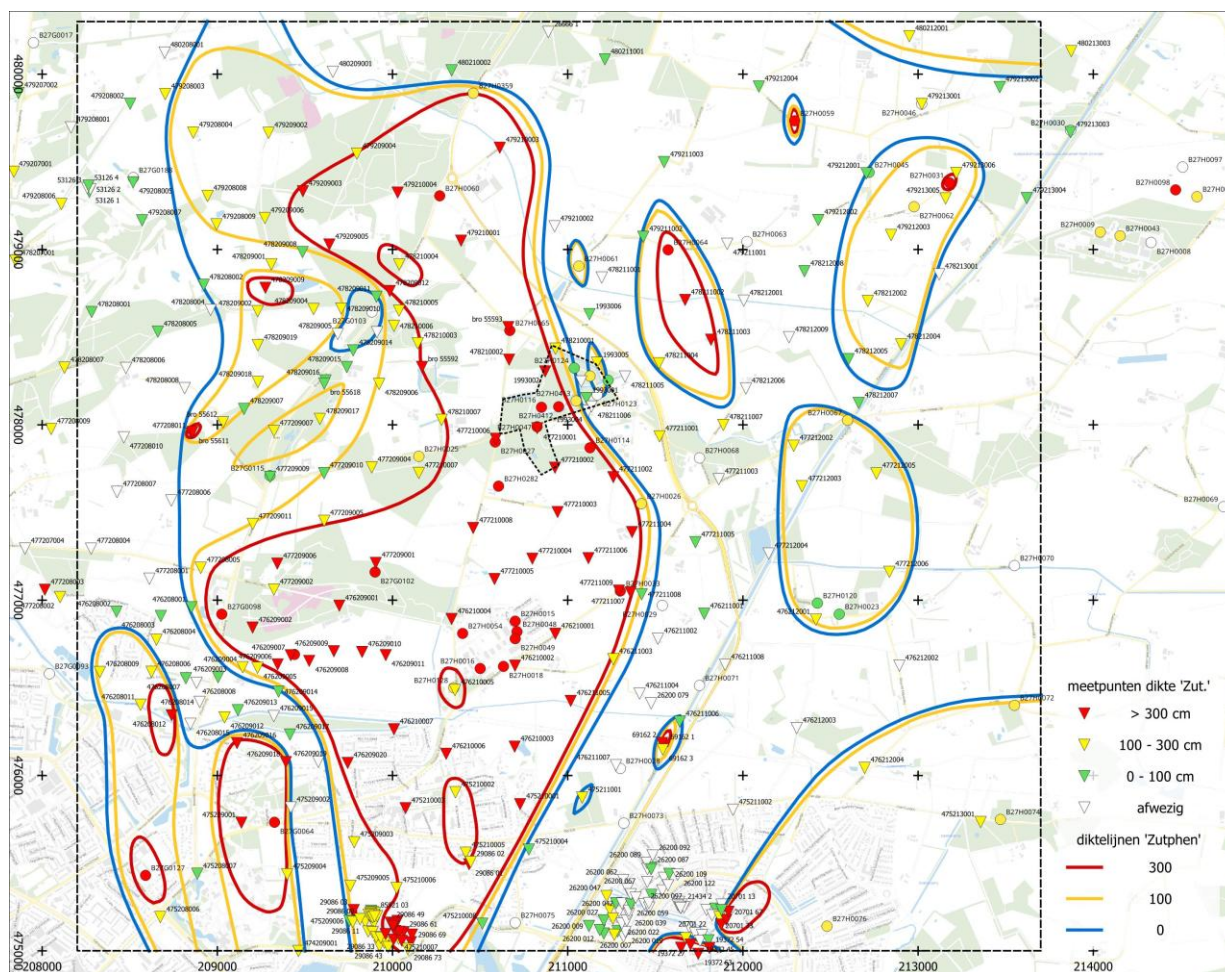
Figuur 4.6: Schalkhaar, Laag van Zutphen: curves conusweerstand van twee sonderingen uitgevoerd in 1971. Bron: Meene RGD (1973). Voor locaties van de sonderingen zie Figuur 4.2.

4.4 Dikte en hydraulische weerstand Laag van Zutphen

Voor bepaling van de dikte van de Laag van Zutphen kunnen eenvoudig de top en de basis van elkaar worden afgetrokken. Maar het uiteindelijke hoofddoel van het onderzoek is het bepalen van de hydraulische weerstand waaraan zandlagen niet of nauwelijks bijdragen. Daarom geeft Figuur 4.7 alleen de opgetelde dikte weer van lagen klei en veen bij de sonderingen en boringen volgens de methodiek beschreven in Paragraaf 4.1. Uit het eerdere werk door de RGD (Meene 1973) blijkt dat de laag van Zutphen in het centrale deel bestaat uit een laag klei, een laag zand en opnieuw een laag klei (zie profielen Figuur 3.2). De lagen hebben diktes die plaatselijk oplopen tot enkele meters. De klei is deels venig, met name bovenin (zie Hoofdstuk 2). De klei zal niet-erosief op het onderliggende zand zijn afgezet. De bovenste kleilaag is door latere erosie minder goed bewaard gebleven dan de onderste (zie Paragraaf 4.3).

Voor de zandlaag in het midden van de Laag van Zutphen, die vermoedelijk is aangevoerd door crevasses van de Rijn, lijkt de kans op erosieve afzetting groter dan bij afzetting van de kleilagen. Een duidelijke aanwijzing voor erosieve afzetting zou zijn dat de onderste kleilaag ontbreekt terwijl de bovenste wel aanwezig is. Sonderingen 478209008 (zie Figuur 4.8), 475209003 en 475210002 (beide niet afgebeeld) zijn hiervan voorbeelden, maar het lijken uitzonderingen te zijn. Een mogelijke verklaring is dat crevasses doorgaans relatief ondiep zijn, in het bijzonder in het deel dicht bij de rivier waar ze uit komen. Daardoor zal plaatselijk wel een deel van de onderliggende klei zijn geërodeerd, maar is waarschijnlijk het grootste deel van de onderste kleilaag nog aanwezig. Bij de drie genoemde sonderingen is de onderste kleilaag mogelijk wel gevormd, maar later door een crevasse geërodeerd. Een andere mogelijkheid is dat de onderste kleilaag er helemaal niet is afgezet doordat er aan het begin van het Eemien een zandkop lag van bijvoorbeeld een duin. Een derde mogelijkheid is dat de laag van Zutphen ter plaatse wel gevormd is, maar door erosie tijdens het pleniglaciaal volledig is opgeruimd. In dat geval kan de dip in de conusweerstand een kleiige afzetting in een verlaten riviergeul zijn. Sondering 478210006 (zie Figuur 4.8) vertoont een dip op een vergelijkbare diepte als bij sondering 478209008, maar heeft eronder een grotere dip die erop wijst dat de onderste kleilaag daar wel bewaard gebleven is. Opvallend is dat bij de tussengelegen zandlaag twee maal staat vermeld dat er stenen inzitten. Als de zandlaag is afgezet door een crevasse, dan zouden die stenen tot grote afstand van de hoofdgeul van de Rijn zijn gevoerd. Daarom moet er ook rekening mee worden gehouden dat de piek in de curve van sondering 478209008 boven de onderste kleilaag van een geul van de Rijn uit het pleniglaciaal is en dat de dip erboven bijvoorbeeld een restgeulvulling betreft van fijner materiaal.

De opgetelde dikte van lagen klei en veen wordt gebruikt voor bepaling van de weerstand (c-waarde) van de Laag van Zutphen. Als een doorlaatfactor (k-waarde) genomen wordt van 0,023 meter per dag (zie Paragraaf 4.1) dan zijn de weerstanden bij diktes van 100 en 300 centimeter (zie Figuur 4.7) respectievelijk 43 en 130 dagen. Uit onderzoek van ICW uit 1971 (zie Paragraaf 3.2) blijkt dat de werkelijke doorlaatfactor in het algemeen kleiner zal zijn en de weerstanden dus groter.

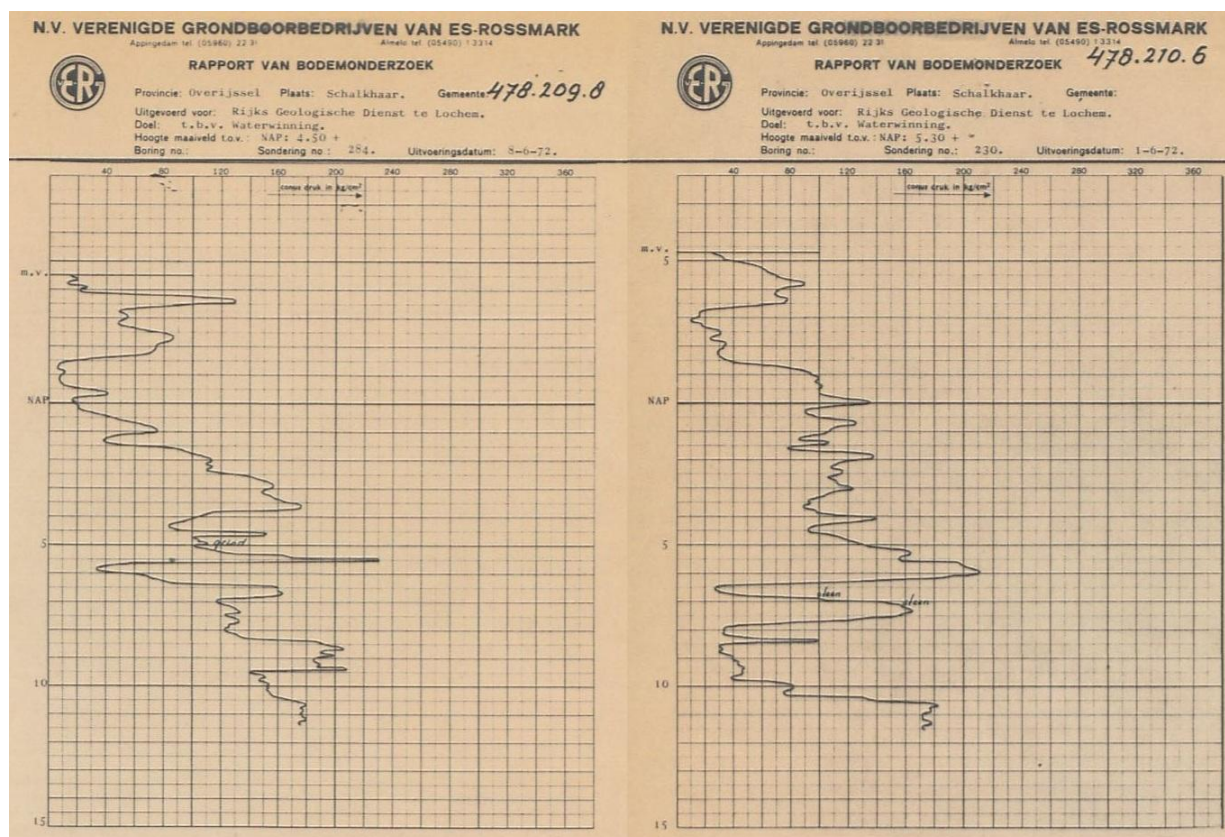


Figuur 4.7: Schalkhaar, Laag van Zutphen: sonderingen en boringen in het onderzoeksgebied. Met kleuren wordt de opgetelde dikte van lagen klei en veen weergegeven volgens de methode beschreven in Paragraaf 4.1. Op basis van de waarden zijn lijnen van gelijke dikte getekend.



Wiertsema & Partners

RAADGEVEND INGENIEURS



Figuur 4.8: Schalkhaar, Laag van Zutphen: curves conusweerstand van twee sonderingen uitgevoerd in 1972. Bron: Meene RGD (1973). Voor locaties van de sonderingen zie Figuur 4.2. Beide sonderingen laten een dip van de conusweerstand zien rond -6 meter NAP. Bij de linker is hieronder geen tweede dip aanwezig, bij de rechter volgt eronder een tweede grotere dip. Bij de piek van de tussengelegen zandlaag staat twee maal vermeld dat er stenen inzitten.

4.5 Ondiepere lagen fijn materiaal

De curves van sonderingen uitgevoerd in de periode 1970-1972 vertonen een opvallende dip in de conusweerstand rond twee tot drie meter boven NAP (zie Figuren 3.2, 4.1, 4.6 en 4.8). Deze lage waarden zijn ook vastgesteld in sonderingen die na het jaar 2000 zijn uitgevoerd. De meest voor de hand liggende verklaring is aanwezigheid van klei of veen, maar dat is bij boringen in het onderzoeksgebied nauwelijks aangetroffen op dit niveau. Een mogelijke oorzaak is de aanwezigheid van zand met een verhoogd gehalte organische stof, silt of klei. Volgens REGIS II ligt het niveau van de dip ongeveer op de overgang van de formatie van Kreftenheye naar de hierop gelegen formatie van Boxtel. Deze overgang is uit de periode waarin de Rijn steeds minder water ging afvoeren door het IJsseldal en het gebied uiteindelijk helemaal verliet omstreeks 40 duizend jaar geleden (Busschers et al. 2007, zie Hoofdstuk 2).

In het westen van de Deventer wijk Het Fetlaer is bij een concentratie sonderingen een dip aanwezig in de conusweerstand rond -1 meter NAP. De conusweerstand komt bij deze sonderingen over een diepte van ongeveer een meter onder een waarde van 2 MPa. In Figuur 4.5 staan de sonderingen met een rode kleur midden onderin de kaart met projectnummer 26200 (W&P). De laag met fijn materiaal ligt te hoog om deze te interpreteren als Laag van Zutphen. Vermoedelijk gaat het om een afzetting in een verlaten geul uit het Midden-Pleniglaciaal. Naar verwachting is de verspreiding van de laag niet groot, waardoor ook de hydrologische relevantie ervan beperkt is.

5 Interpolatie (J. de Vries)

5.1 Introductie

Voor de grondwatermodellering zijn vlakdekkende gegevenslagen vereist van de dikte, bovenzijde en onderzijde van het Laagpakket van Zutphen. Een dergelijke laag kan op verschillende manieren worden gegenereerd:

- Handmatig: zeer tijdrovend en geeft geen inzicht in de mate van onzekerheid / bias;
- Determistische interpolatie (bijv. IDW of spline): relatief ongecompliceerd, maar geeft geen inzicht in mate van onzekerheid;
- Probalistische interpolatie (bijv. Kriging): geeft inzicht in mate van onzekerheid, maar zinvolle toepassing is complexer.

Voor dit project is gekozen voor Kriging. Bij deze interpolatiemethode wordt in de eerste stap een variogram opgesteld. Dit instrument beschrijft het ruimtelijk verband tussen de verschillende meetpunten, waarbij met name wordt gekeken tot op welke afstand punten nog met elkaar correleren. Het variogram wordt vervolgens gebruikt om bij de interpolatie gewichten toe te kennen aan de datapunten.

De uitkomsten van interpolatie sluiten doorgaans niet volledig aan bij een handmatige interpretatie. De berekening is immers puur wiskundig en houdt geen rekening met aannames op basis van afzettingsmilieu of facies. Daarom is ervoor gekozen om op locaties waar de resultaten significant afwijken van het verwachte patroon fictieve punten toe te voegen aan de dataset. Op deze locaties is aanvullend onderzoek gewenst, tenzij deze zich buiten het invloedsgebied van de winning bevinden (zie hoofdstuk 6).

5.2 Methodologie

Voor het interpoleren van de boven en -onderzijde zijn de volgende stappen doorlopen:

1. Plotten van data als een distance-difference plot. Hieruit kan het volgende worden opgemaakt:
2. In hoeverre er fouten in de dataset zitten;
3. In welke mate er sprake is van ruimtelijke autocorrelatie (in welke mate dicht bij elkaar liggende punten op elkaar lijken);
4. Wat een logische *range* zou zijn;
5. Bepalen van passende parameters voor *binning*
6. Methode en, afhankelijk van de methode, het aantal *bins* en de maximale *lag*-afstand
7. Kiezen van een passende variogramestimator. Dit is met name afhankelijk van in welke mate er outliers aanwezig zijn. Indien hier sprake van is, kan ervoor worden gekozen om met een robuustere estimator te werken;
8. Kiezen van een passend variogrammodel, en of er met een *nugget* moet worden gewerkt;
9. Interpolatie o.b.v. *Ordinary Kriging*;
10. Toepassen van een masker. Hiervoor geïnterpoleerde diktekaart gebruikt;
11. Vergelijking van resultaat met handgetekende contourenkaarten en het waar nodig toevoegen van fictieve punten.
12. Het opnieuw doorlopen van stappen 1 t/m 6, totdat het gewenste eindresultaat bereikt is.

Voor de diktekaart van klei en veen binnen het Laagpakket is de uitvoering complexer. Dit omdat *Ordinary Kriging* ervan uitgaat dat de data normaal verdeeld is. In het projectgebied is het Laagpakket van Zutphen op veel plekken echter afwezig. Een representatieve dataset van de dikte van het Laagpakket zal dus nooit op een normaalverdeling vallen. In sommige gevallen kan dit worden verholpen door de data te transformeren (bijv. met een logaritmische

transformatie). Het Laagpakket wordt echter gekenmerkt door zeer scherpe overgangen, wat de verdeling nog onregelmatiger maakt (tenzij er een onevenredig aantal punten in de overgangszone zou zijn uitgevoerd). Hierdoor is een transformatie evenmin een oplossing (naast dat het terug transformeren van de resultaten niet eenvoudig zou zijn).

Er is daarom gekozen voor een aanpak bestaande uit twee interpolatieslagen: bij de eerste slag is een kaart gemaakt van de waarschijnlijkheid van het voorkomen van het Laagpakket (van 0 tot 1), gevolgd door *Ordinary Kriging*, waarbij alleen de punten met een dikte groter dan 0 zijn meegenomen. De uiteindelijke dikte is als volgt bepaald:

$$D(x, y) = \begin{cases} 0, & P(x, y) < 0.5 \\ P(x, y) * D^+(x, y), & P(x, y) \geq 0.5 \end{cases}$$

D = dikte in meters

D^+ = voorspelde dikte o.b.v. positieve data

P = kans op aanwezigheid (0-1)

Al met al zijn de volgende stappen doorlopen voor de diktekaart:

Omzetten van diktes in booleaanen;

Uitvoeren van Ordinary Kriging op de booleaanen

Uitvoeren van Ordinary Kriging op alle positieve datapunten;

Combineren van kaarten uit stappen 2 en 3 volgens de hierboven beschreven formule;

Het iteratief toevoegen van fictieve punten en opnieuw uitvoeren van Kriging.

Hierbij zijn natuurlijk, net zoals voor de kaart van de boven- en onderzijde, de juiste binmethodes en de juiste variogrammodellen bepaald.

De interpolatie is uitgevoerd in Python (v. 3.12), waarbij gebruik is gemaakt van onderstaande modules:

- Scikit-GStat v. 1.0.21 (Mälicke, 2022)
- GSTools v. 1.7.0 (Müller et al., 2022)
- Rasterio v. 1.4.3 (Gillies et al., 2013)

5.3 Resultaten en discussie

Alle tussenresultaten (distance-difference-plots, variogrammodellen, kaarten zonder masker) zijn opgenomen in bijlage 1. De resultaten van Indicator Kriging voor de aanwezigheid van klei en/of veen binnen het Laagpakket van Zutphen zijn gepresenteerd in Figuur 5.1. Dit figuur bestaat uit tien verschillende subfiguren, waarin met zwarte vlakken is aangegeven in welke gebieden er een zekere mate van onzekerheid bestaat over het wel/niet voorkomen van klei of veen binnen het laagpakket. Vervolgens is de diktekaart zonder fictieve punten gepresenteerd in Figuur 5.2 en met fictieve punten in Figuur 5.3. De kaarten van de boven- en onderzijde staan respectievelijk in Figuren 5.4 en 5.5. Voor de gecombineerde diktekaart zijn geen onzekerheden berekend, omdat dit erg complex is (zie Paragraaf 5.4 Limitaties).

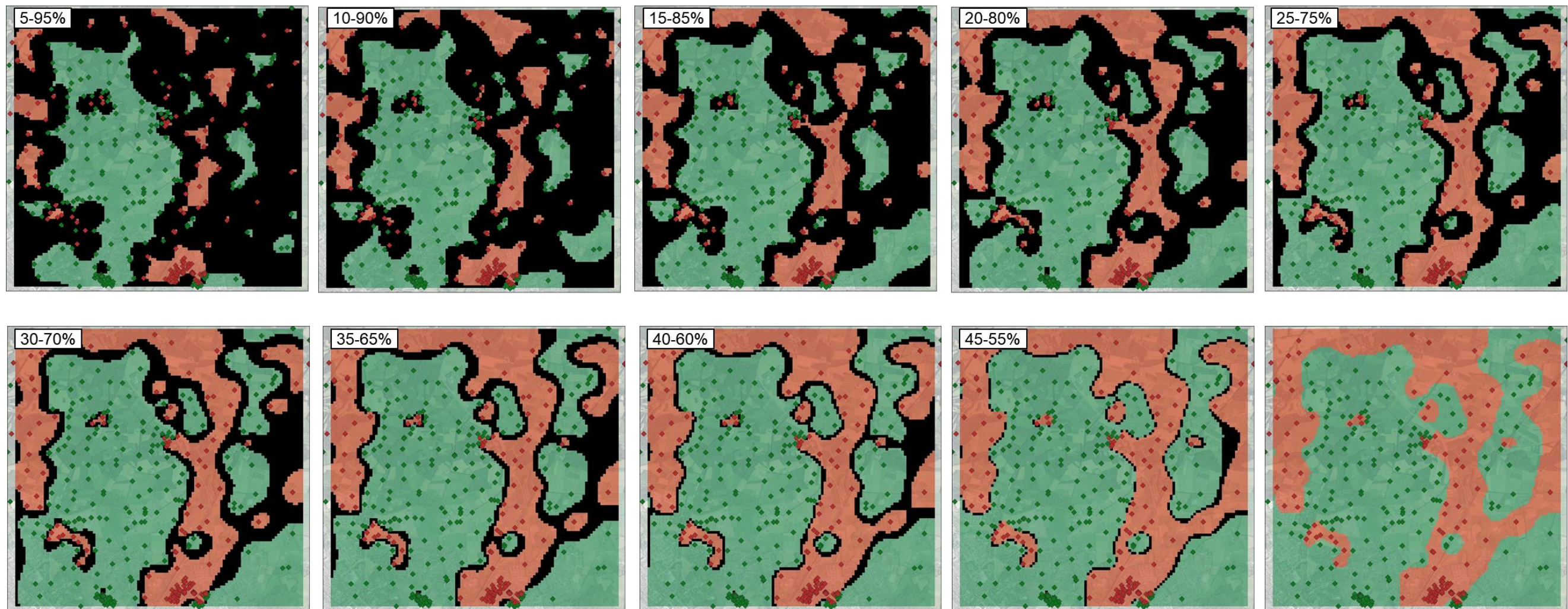
Uit Figuur 5.1 kan worden opgemaakt dat in een redelijk groot deel van het gebied nog een aanzienlijke mate van onzekerheid bestaat over het wel/niet voorkomen van klei/veen binnen KRZU. Zoals verwacht betreft dit voornamelijk de overgangsgebieden. Ook geven de kaarten aan dat de uitkomsten betrekkelijk ongevoelig zijn voor de arbitraire *cut-off* van 50%: met een *cut-off* van tussen de 40% en 60% zou waarschijnlijk een weinig afwijkend resultaat worden behaald.



Al met al zijn aan de diktekaart circa zestig fictieve punten toegevoegd, om tot het gewenste resultaat te komen. Het gaat hierbij met name om locaties waar we verwachten dat het Laagpakket afwezig is. Bij de kaarten van de onder- en bovenzijde is de keuze gemaakt om geen fictieve punten toe te voegen. Hier zijn weliswaar verschillen aanwezig, maar deze zijn relatief beperkt in verhouding tot de verwachte impact op de uitkomsten van de modelberekeningen.

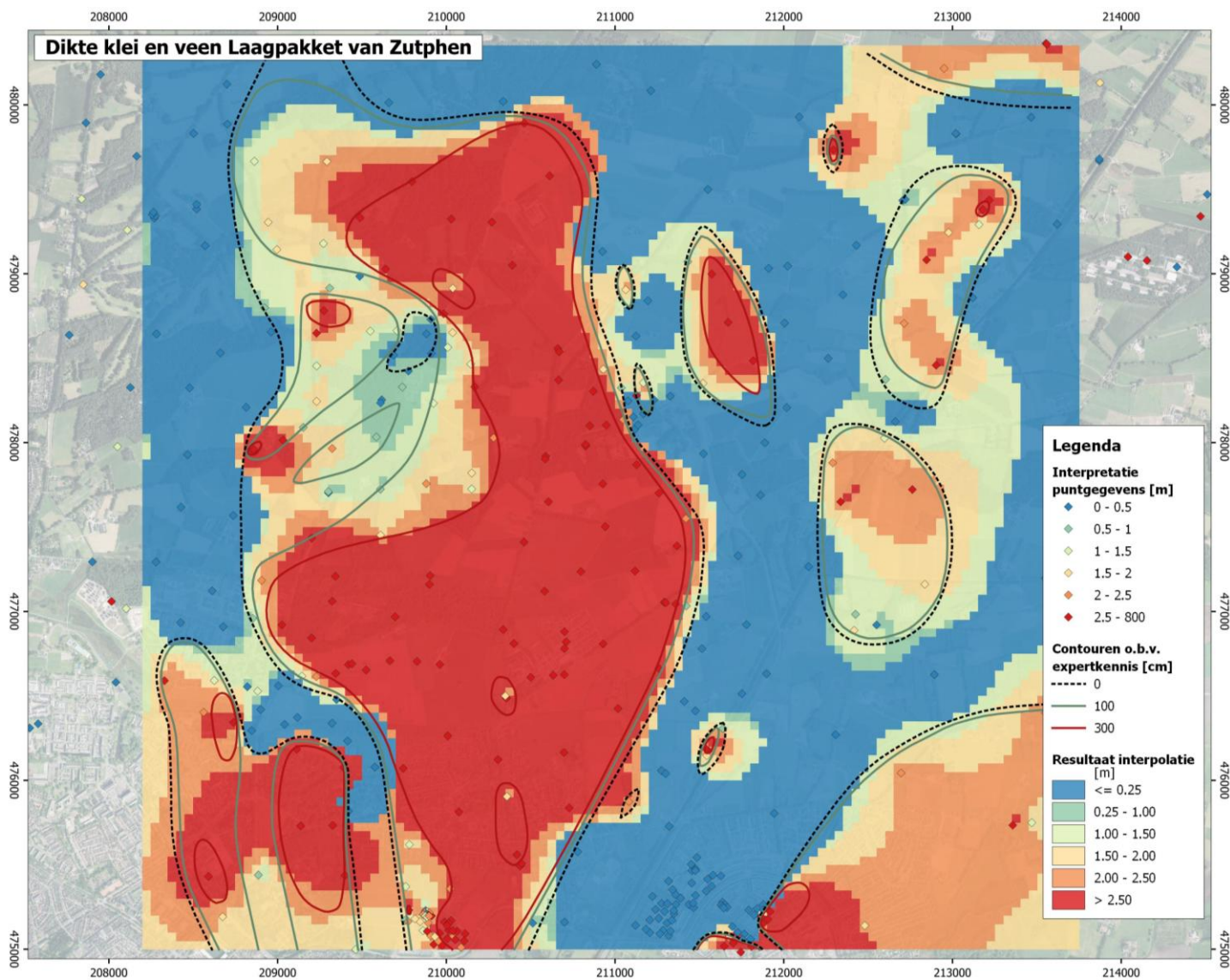
Voor de kaarten van de boven- en onderzijde loopt de standaarddeviatie van de interpolatie (zie Bijlage 1) snel op tot enkele meters zodra men zich verder van een meetpunt bevindt. Hierbij geldt wel dat je op basis van expertkennis in bepaalde delen van het gebied – bijvoorbeeld het middendeel – een lagere mate van onzekerheid zou verwachten.

Resultaten Indicator Kriging: Kans op klei/veen KRZU

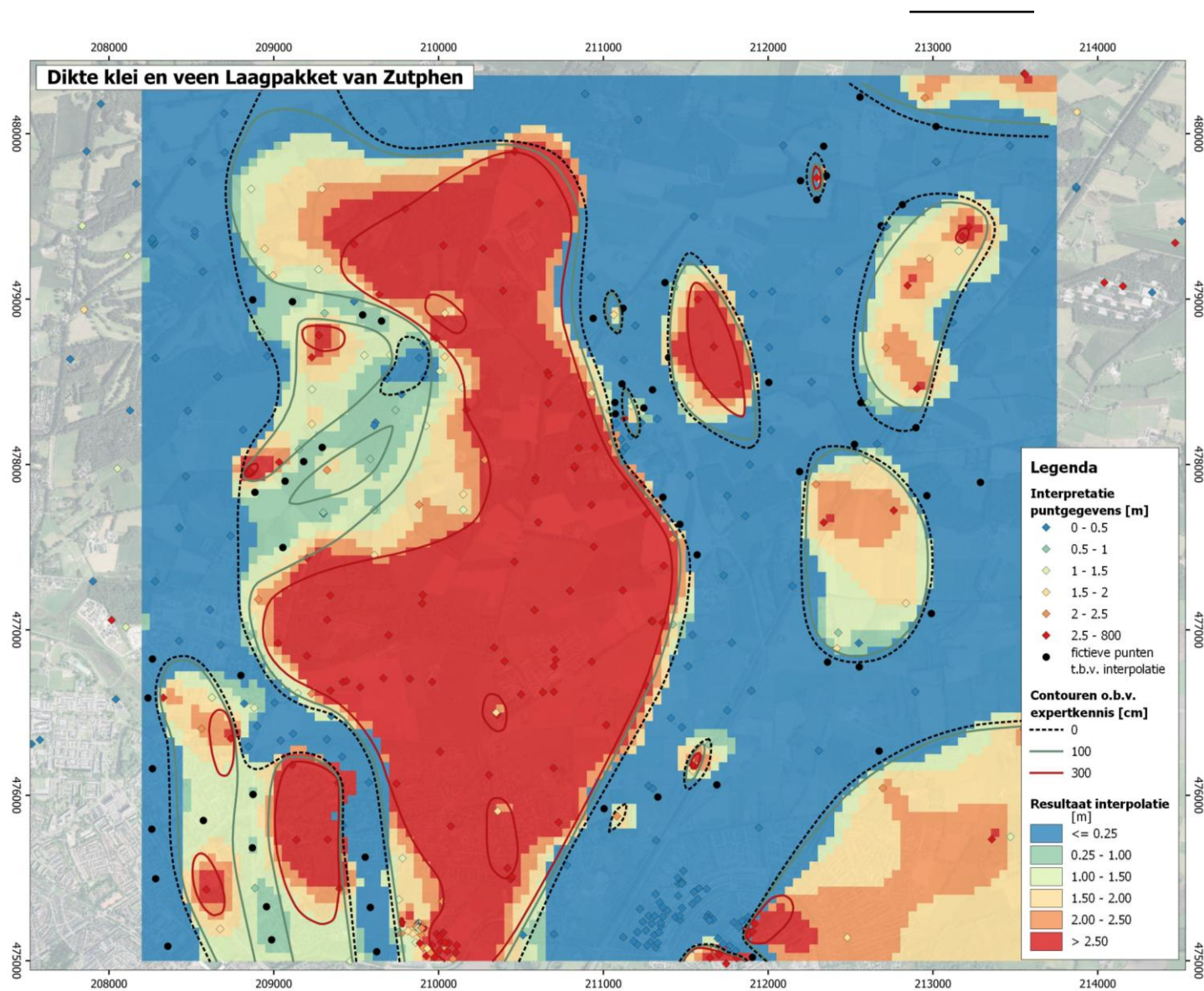


Figuur 5.1: Schalkhaar, Laag van Zutphen: de resultaten van Indicator Kriging: groene/rode stippen: klei/veen van KRZU resp. wel/niet aanwezig; groene/rode vlakken: resp. meer dan 50 of minder dan 50 procent kans op klei/veen van KRZU. Zwarte vlakken: 'onzekere' gebieden, waarvan de kans op klei overeenkomt met de bij elk subfiguur aangegeven percentages.

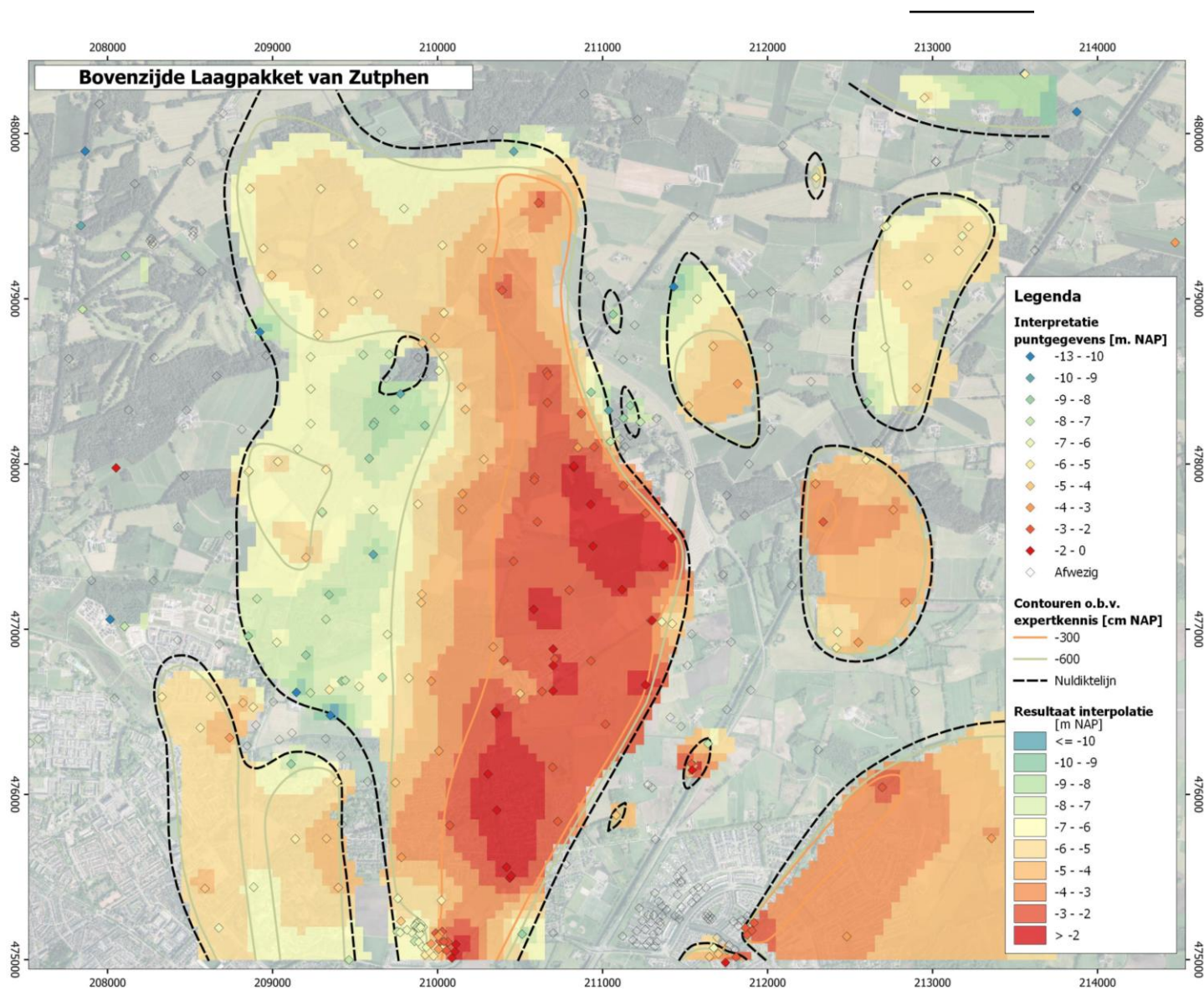




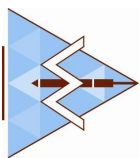
Figuur 5.2: Schalkhaar, Laag van Zutphen: diktekaart van klei en veen binnen het laagpakket van Zutphen



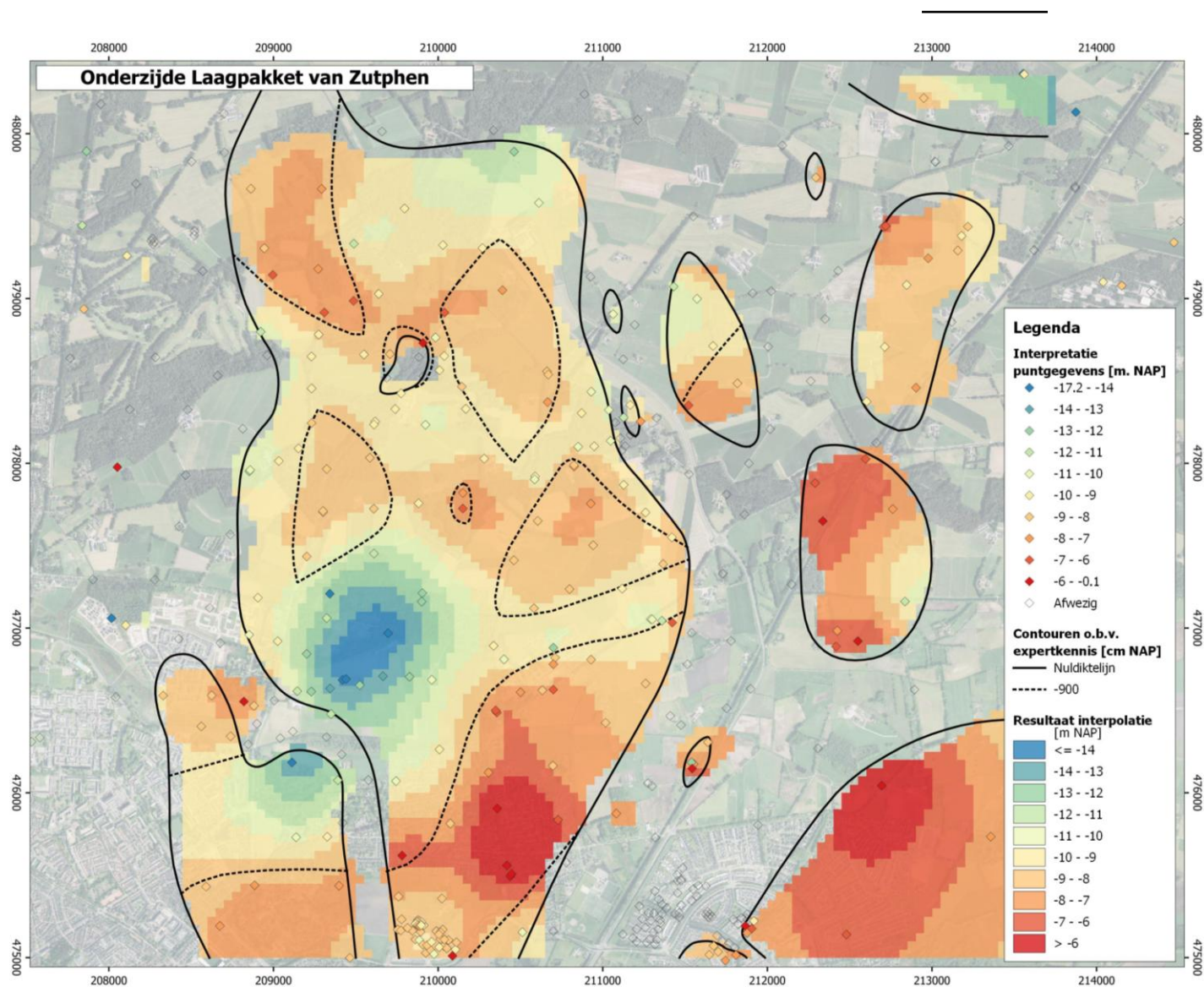
Figuur 5.3: Schalkhaar, Laag van Zutphen: diktekaart van klei en veen binnen het laagpakket van Zutphen, incl. fictieve punten



Figuur 5.4: Schalkhaar, Laag van Zutphen: kaart van de bovenzijde van het Laagpakket van Zutphen



Wiersma & Partners
RAADGEVEND INGENIEUR



Figuur 5.5: Schalkhaar, Laag van Zutphen: kaart van de onderzijde van het Laagpakket van Zutphen

5.4 Limitaties

Voor de diktekaart heeft het werken met een harde *cutoff* als gevolg dat de begrenzingen van KRZU erg scherp zijn. Wel lijkt dit te passen bij het afzettingsmilieu van deze eenheid. Verder is 0.5 een logische, maar arbitraire grens voor wel/geen KRZU. Dit zou kunnen worden bijgesteld.

Zoals gezegd zijn voor de diktekaart geen onzekerheden berekend, onder ander omdat de impact van de harde *cut-off* lastig te kwantificeren is. Ook dient hier rekening te worden gehouden met errorpropagatie en de mate van afhankelijkheid (covariantie) van de twee kaarten, die gecombineerd worden. Gezien de complexiteit is dit vooralsnog achterwege gelaten.

De weergegeven onzekerheid van de kaarten van de boven- en onderzijde is de modelonzekerheid en er is geen rekening gehouden met de onzekerheid van de onderzoeksgegevens. Uitzondering hierop is de modellaag voor de onderzijde van KRZU – hier was een model zonder *nugget* niet inpasbaar en is er impliciet, tot op zekere hoogte, dus wel rekening gehouden met data-onzekerheid.

Voor de diktekaart is beoordeeld in hoeverre het zinvol is om rekening te houden met ruimtelijke anisotropie. De anisotropie bleek echter dusdanig gering (ratio van 0.94), dat dit als onnodig complicerend is beschouwd.

Verder bestaan er mogelijkheden om meer rekening te houden met het stromingspatroon van de rivier, bijv. door:

- Het onderzoeksgebied in deelgebieden op te delen en per deelgebied richtingsgebonden variogrammen op te stellen;
- Kriging gecombineerd met *Locally Varying Anisotropy* (LVA) (zie bijv. Li et al., 2024).

Met dergelijke benaderingen zouden waarschijnlijk minder fictieve punten nodig zijn om een kaart te verkrijgen die beter aansluit bij de geologische realiteit van deze eenheid. Deze methoden zijn echter relatief complex en vereisen daarnaast meer aannames.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

In ruim de helft van het 29 km² grote onderzoeksgebied is een restant bewaard gebleven van de Laag van Zutphen, een hydrologisch slecht doorlatende laag binnen de Formatie van Kreftenheye. De laag bevindt zich tussen ongeveer NAP en -17 meter NAP, oftewel ongeveer tussen 6 en 23 meter diepte beneden maaiveld. De basis van 'Zutphen' ligt in het algemeen in het westen lager dan in het oosten, vermoedelijk als gevolg van een verschil in bodemdaling sinds de vorming van de laag. De basis vertoont een patroon van eilanden met een iets hogere ligging van de basis die van elkaar gescheiden worden door delen met een iets lagere ligging. Waarschijnlijk gaat het om een patroon van de vlechtende rivier de Rijn aan het begin van het Eemien, toen de rivier overging naar een meanderend patroon oostelijk van het onderzoeksgebied.

Tijdens het Eemien en het Vroeg-Weichselien vormde zich de Laag van Zutphen, hoofdzakelijk als komafzetting van een meanderende Rijn. Tijdens het Midden-Pleniglaciaal kreeg de rivier opnieuw een vlechtend patroon waarbij geulen door het onderzoeksgebied gingen lopen. In het westen en een groot deel van het oosten van het onderzoeksgebied hebben deze geulen de Laag van Zutphen volledig opgeruimd. In andere delen is wel erosie opgetreden, maar is het diepere deel van de laag bewaard gebleven. In een zone in het midden van zuid naar noord lijkt nauwelijks erosie van de Laag van Zutphen te zijn geweest waardoor de top er relatief hoog ligt. Het patroon van de dikte van de Laag van Zutphen lijkt sterk op het patroon van de hoogte van de top van 'Zutphen'. In het westen en in een groot deel van het oosten is de laag volledig geërodeerd. In de zone in het midden van het onderzoeksgebied hebben de lagen klei en veen diktes die ruim boven de drie meter uitkomen.

6.2 Aanbevelingen

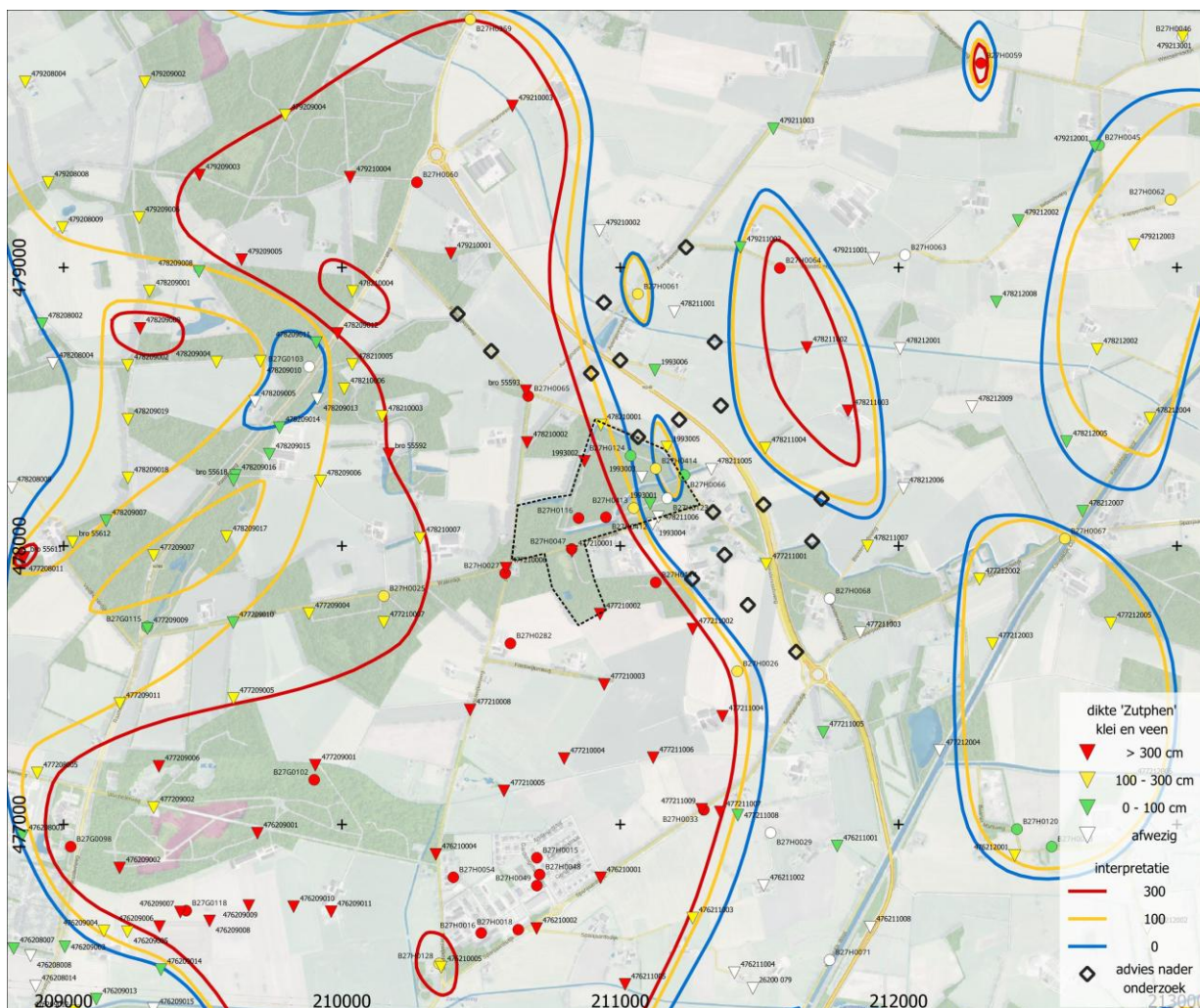
In de huidige fase van het project kunnen alleen nog algemene adviezen gegeven worden over nader onderzoek bij het waterwingebied Schalkhaar. Concretere voorstellen kunnen worden gedaan als de uitkomsten van de hydrologische modellen op basis van het huidige bureauonderzoek beschikbaar zijn en als de opdrachtgever meer duidelijkheid heeft over de toekomst van de waterwinning te Schalkhaar.

Het huidige bureauonderzoek heeft aanwijzingen opgeleverd dat boven de Laag van Zutphen nog een laag van cohesief materiaal aanwezig is zoals klei, veen of silt / leem. Omdat deze laag hydrologisch relevant kan zijn, adviseren wij om het bureauonderzoek uit te breiden waarbij informatie verzameld wordt van samenstelling, dikte en verspreiding van de laag. Dit onderzoek zou gefaseerd kunnen worden gedaan waarbij bijvoorbeeld eerst in een beperkt deel rondom het waterwingebied gekeken wordt voordat beslist wordt of het zinvol is om uit te breiden tot het hele onderzoeksgebied van 29 km².

De opdrachtgever heeft aangegeven ter plaatse van de zes productieboringen in het waterwingebied boorgatmetingen te willen laten doen. Deze kunnen meer duidelijkheid geven over de aanwezigheid van kleiafdichtingen. Hierbij moet worden vermeld dat, indien er met bentoniet met magnetiet is gewerkt, de gegevens van de geleidbaarheidsmodule hoogstwaarschijnlijk onbruikbaar zullen zijn (de gammastralingsintensiteit zou hierdoor niet beïnvloed moeten zijn).

Wij adviseren veldonderzoek uit te voeren dat zich in eerste instantie vooral richt op de delen met de grootste onzekerheid met betrekking tot de dikte van klei en veen van de Laag van Zutphen in de nabije omgeving van het waterwingebied. Zuidwestelijk van het waterwingebied wijzen de resultaten van het huidige onderzoek op een

aaneengesloten laag klei en veen van 'Zutphen', waardoor wij daar op dit moment geen aanleiding zien voor het verzamelen van nieuwe informatie. Noordoostelijk van het waterwingebied daarentegen lijken over korte afstanden grote verschillen te zijn in aan- en afwezigheid van 'Zutphen' die het bij de interpolatie ook nodig maakten om relatief veel fictieve punten toe te voegen (zie Figuur 5.3). Om de kaarten zoals getekend in Hoofdstuk 4 van dit rapport met meer zekerheid te kunnen maken, adviseren wij om circa achttien sonderingen uit te voeren (zie Figuur 6.1). De resultaten van de sonderingen zullen meer duidelijkheid geven over de aanwezigheid en de begrenzingen van voormalige geulen die de klei en het veen van 'Zutphen' hebben opgeruimd. Door te sonderen met kleef en waterdruk zullen de sonderingen ook meer informatie leveren over de opbouw van de Laag van Zutphen zoals de aanwezigheid van lagen veen en zand.



Figuur 6.1: Schalkhaar, Laag van Zutphen: advieskaart nader onderzoek met behulp van sonderingen. Voorgestelde locaties van de sonderingen worden weergegeven door ruiten.

Naar aanleiding van de grondwatermodellering, eventuele uitbreiding van het bureauonderzoek en de resultaten van sonderingen op delen bij het waterwingebied waar de onzekerheid over aan- / afwezigheid van de Laag van Zutphen groot is, kan gekozen worden voor nader veldonderzoek. Door op enkele sondeerlocaties mechanische boringen te doen met gestoken monsters kunnen de sonderingen beter worden geïnterpreteerd en kan laboratoriumonderzoek gedaan worden naar bijvoorbeeld de korrelgrootteverdeling en de doorlatendheid van de grond. Op delen waar geen



Wiertsema & Partners

RAADGEVEND INGENIEURS

sonderingen mogelijk waren, bijvoorbeeld doordat de grondeigenaar geen sondeertruck toestaat op het land, kan geofysisch onderzoek misschien helpen. We denken in het bijzonder aan het instrument s-TEM dat met behulp van een elektromagnetisch veld een stroom opwekt in de grond die sterker zal zijn naarmate een dikkere kleilaag aanwezig is. Deze methode lijkt ook geschikt om snel enkele profielen te maken over een volledige voormalige rivierloop wat waardevolle nieuwe informatie kan opleveren. Ook zou s-TEM gebruikt kunnen worden om op het deel zuidwestelijk van het waterwingebied steekproefsgewijs te controleren of de Laag van Zutphen er inderdaad aaneengesloten is.

Een onderzoek dat relatief groot is wat betreft tijd en kosten is het uitvoeren van een nieuwe pompproef ter toetsing van de kartering van de Laag van Zutphen en eventueel ondiepere cohesieve lagen waarbij extra peilbuizen worden geplaatst. Hetzelfde geldt voor uitbreiding van bovengenoemde vormen van onderzoek naar de rest van het 29 km² grote onderzoeksgebied.



Literatuur

Busschers, F. S., Kasse, C., Van Balen, R. T., Vandenberghe, J., Cohen, K. M., Weerts, H. J. T., Wallinga, J., Johns, C., Cleveringa, P. & Bunnik, F. P. M. 2007: Late Pleistocene evolution of the Rhine in the southern North-Sea Basin: imprints of climate change, sea-level oscillations and glacio-isostasy. *Quaternary Science Reviews* 26, 3216–3248.

Busschers, F.S., Van Balen, R.T., Cohen, K.M., Kasse, C., Weerts, H.J.T., Wallinga, J., Bunnik, F.P.M., 2008. Response of the Rhine-Meuse fluvial system to Saalian ice-sheet dynamics. *Boreas* 37, 377e398.

Hoogendoorn, J. 2021. Winproef Schalkhaar. Projectnummer 201068. Vitens, 21 juni 2021.

Houtman, H. & A.M. Haak 1985. Grondwaterkaart van Nederland, Heerde & Almelo bladen 27 oost en 28 west. Dienst Grondwaterverkenning TNO. Delft – Oosterwolde, september 1985.

Hunter, J. D. (2007). *Matplotlib: A 2D graphics environment*. *Computing in Science & Engineering*, 9(3), 90–95. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>

Kempen, B., Brus, D. J., & de Vries, F. (2015). Operationalizing digital soil mapping for nationwide updating of the 1: 50,000 soil map of the Netherlands. *Geoderma*, 241, 313-329.

Koops, H. 1993. Geotechnisch onderzoek t.b.v. Pompstation te Schalkhaar. Van Es-Rossmark bv. Zwolle, 1 juni 1993.

Lamsvelt, K.G. 1974. Verslag van de werkzaamheden en resultaten van de geohydrologische verkenning van Salland door Werkgroep C van de Werkgroep Hydrologisch Onderzoek Overijssel (met 8 bijlagen). Bladen 21GH, 22C, 27EFGH, 28AC, 33EF, 34A. Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening. Rapport 1974-11.

Li, Z., Zhang, X., Zhu, R., Clarke, K. C., Weng, Z., & Zhang, Z. (2024). *Direct kriging: A direct optimization based model with locally varying anisotropy*. *Journal of Hydrology*, 639, 131553. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131553>

Mälicke, M. (2022). *SciKit-GStat 1.0: A SciPy-flavored geostatistical variogram estimation toolbox written in Python*. *Geoscientific Model Development*, 15, 2505–2532. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-2505-2022>

Meene, E.A. 1973. Hydrologisch Onderzoek Overijssel, onderdelen Schalkhaar (opdracht 844) en Wechelerhoek (opdracht 1155). Rijks Geologische Dienst. Haarlem 2 mei 1973.

Müller, S., Schüler, L., Zech, A., & Heße, F. (2022). *GSTools v1.3: A toolbox for geostatistical modelling in Python*. *Geoscientific Model Development*, 15, 3161–3182. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-3161-2022>

Peeters, J., F.S. Busschers & E. Stouthamer 2015. Fluvial evolution of the Rhine during the last interglacial-glacial cycle in the southern North Sea basin: A review and look forward. *Quaternary International* 357, p. 176-188.

Gillies, S., Ward, B., & Petersen, A. S. (2013). *Rasterio: Geospatial raster I/O for Python programmers*. <https://github.com/mapbox/rasterio>.

Terwisscha van Scheltinga, R. 2021. Statistische analyse van winproef Schalkhaar. Projectnummer 201068-02. Vitens, 1 oktober 2021.

Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., Burovski, E., Peterson, P., Weckesser, W., Bright, J., van der Walt, S. J., Brett, M., Wilson, J., Millman, K. J., Mayorov, N., Nelson, A. R. J., Jones, E., Kern, R., Larson, E., Carey, C. J., ... SciPy 1.0 Contributors. (2020). *SciPy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in Python*. *Nature Methods*, 17(3), 261–272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>

Waterleiding Maatschappij Overijssel 1993. Waterwingebied Schalkhaar, Verbreiding en dikte Eemklei. Getekend J.B. 6 april 1990, gewijzigd G.F. 26 augustus 1993.

Bijlage 1

B1 Tussenresultaten interpolatie

Bovenzijde KRZU

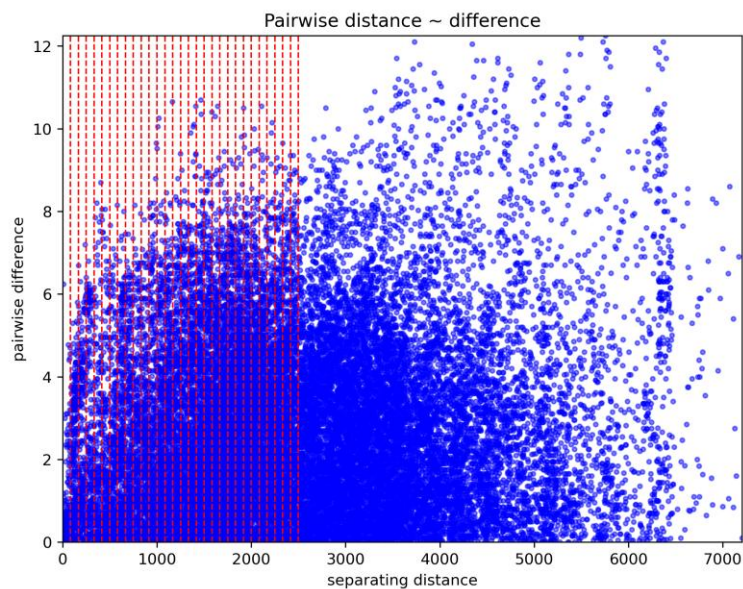


Fig. B1.1: distance-difference-plot

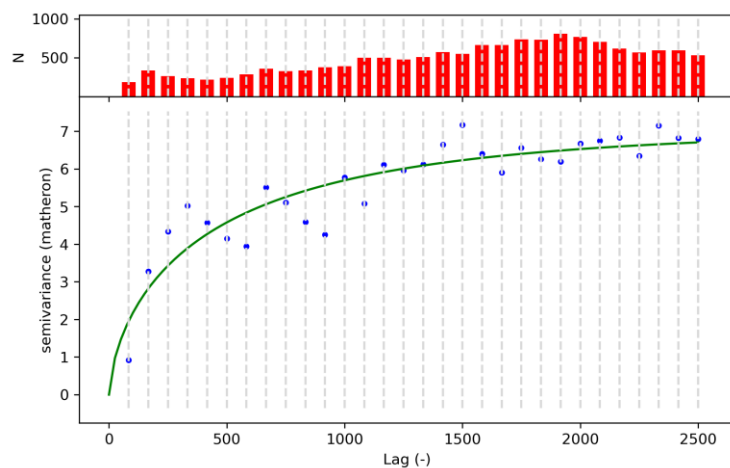


Fig. B1.2: variogrammodel (30 bins o.b.v. k-means-clustering, Cressie-Hawkins-estimator, max. lag 2500, zonder nugget, *stable* model)



Wiertsema & Partners
RAADGEVEND INGENIEURS

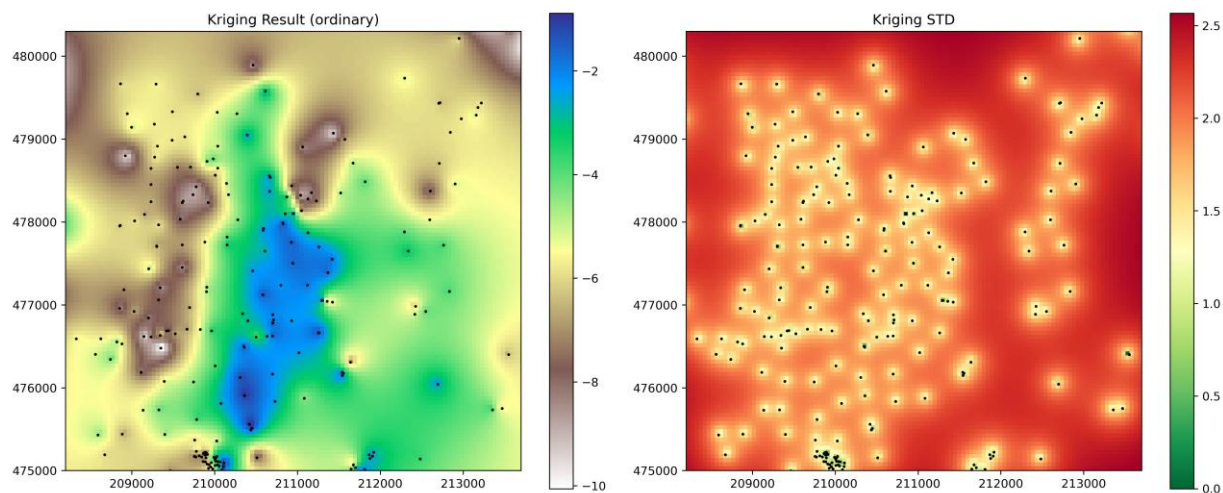


Fig B1.3: kaarten van interpolatieresultaten. Links de voorspelde waarden in m t.o.v. NAP, rechts de standaarddeviatie

Onderzijde KRZU

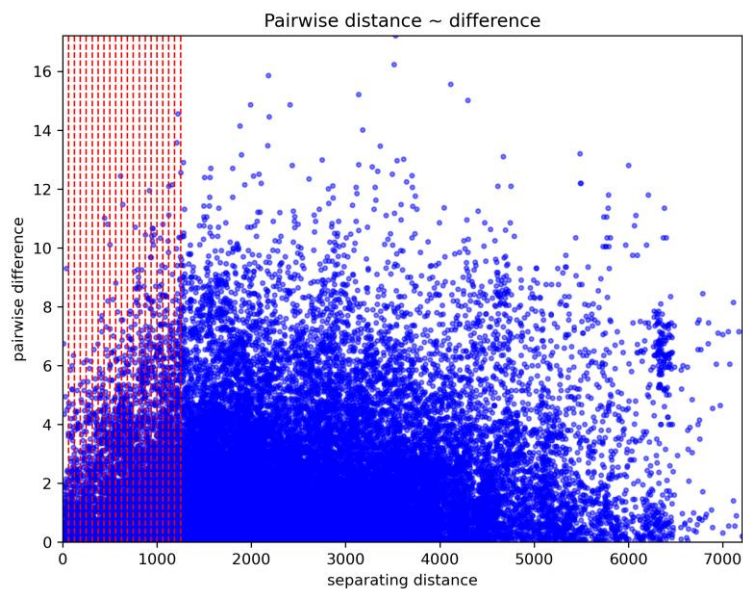


Fig. B1.4: distance-difference-plot

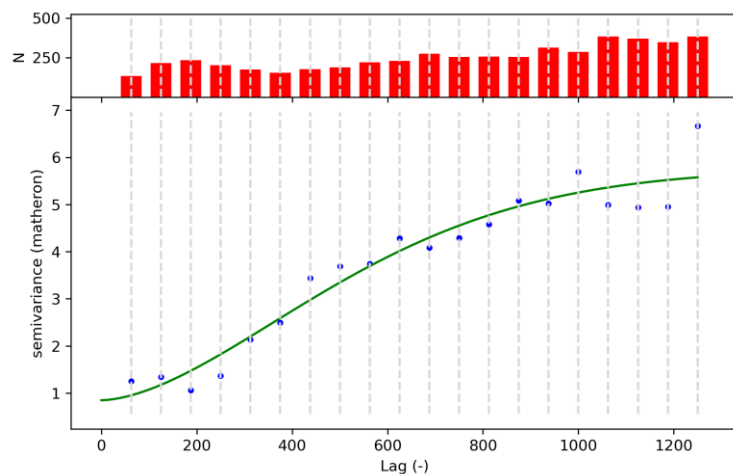


Fig. B1.5: variogrammodel (30 bins o.b.v. K-means clustering, Cressie-Hawkins-estimator, max. lag 1500, met nugget, *stable* model)

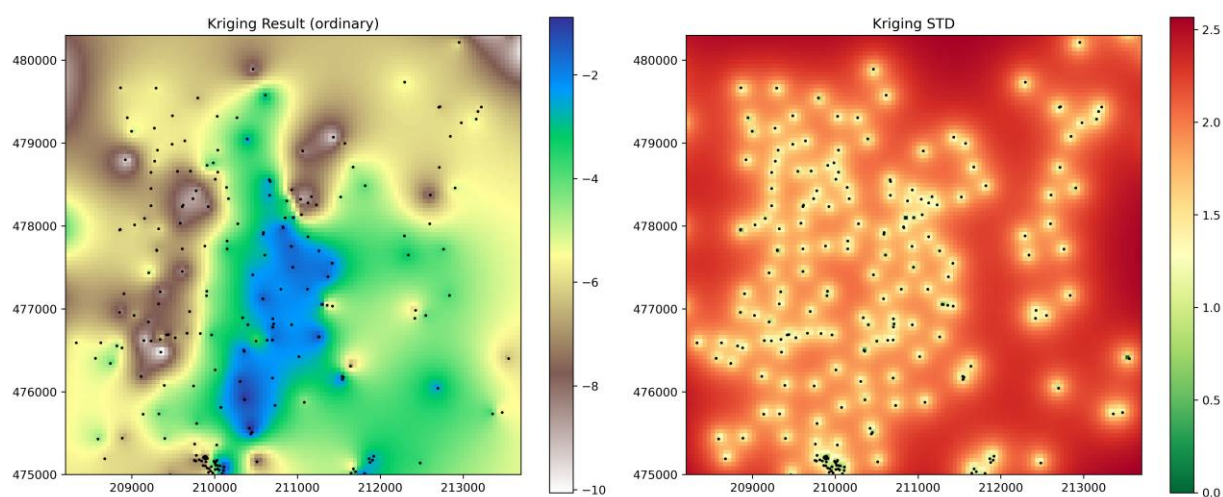


Fig B1.6: kaarten van interpolatieresultaten. Links de voorspelde waarden in m t.o.v. NAP, rechts de standaarddeviatie

Dikte klei en veen binnen KRZU

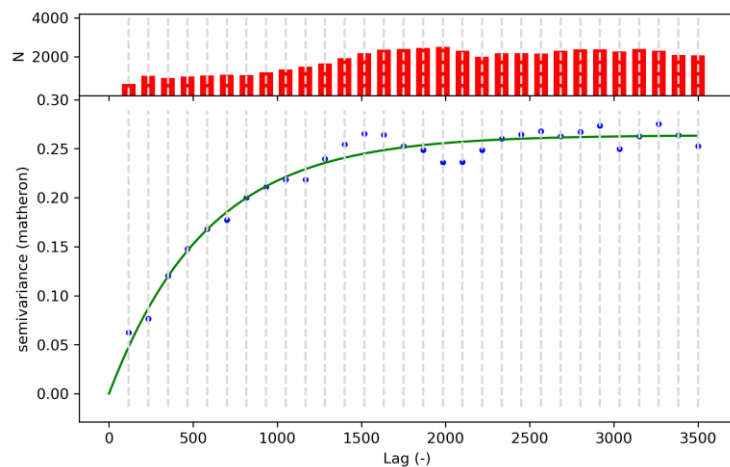


Fig. B1.7: variogrammodel van aanwezigheid KRZU (30 bins o.b.v. *even widths*, Matheron-estimator, max. lag 3500, met nugget, *stable* model)

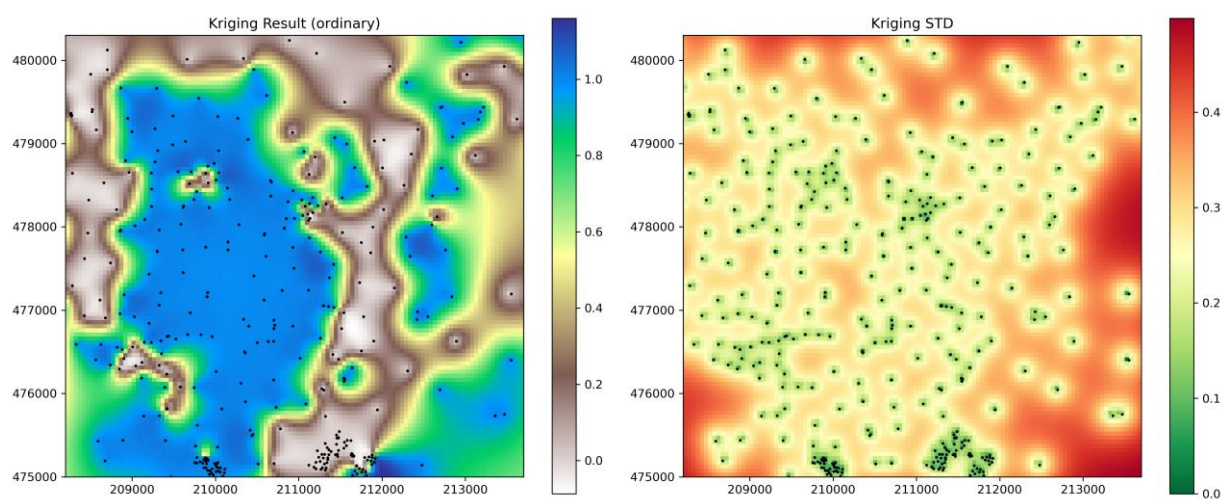


Fig B1.8: kaarten van interpolatieresultaten. Links de voorspelde waardes (kans op aanwezigheid, eenheidsloos), rechts de standaarddeviatie

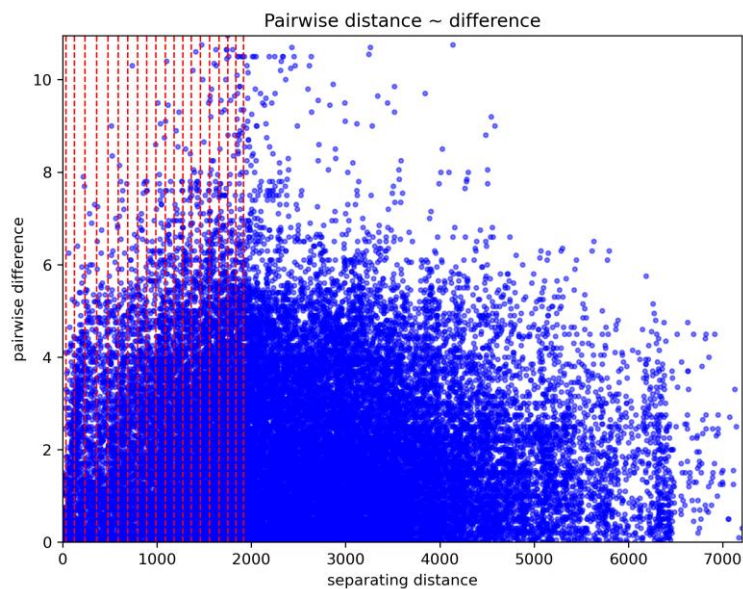


Fig B1.9: distance-differenceplot voor dichte KRZU (alleen positieve punten)

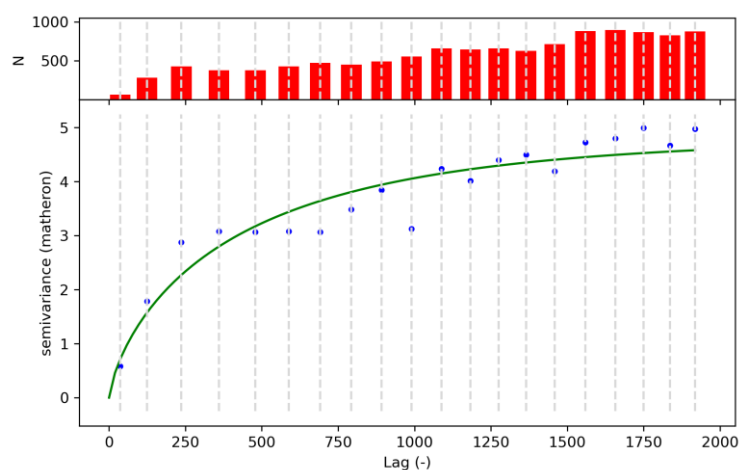


Fig B1.9: variogrammodel voor dichte KRZU, alleen positieve punten (20 bins o.b.v. *k-means* clustering, Matheron-estimator, max. lag 2000, zonder nugget, *stable* model)

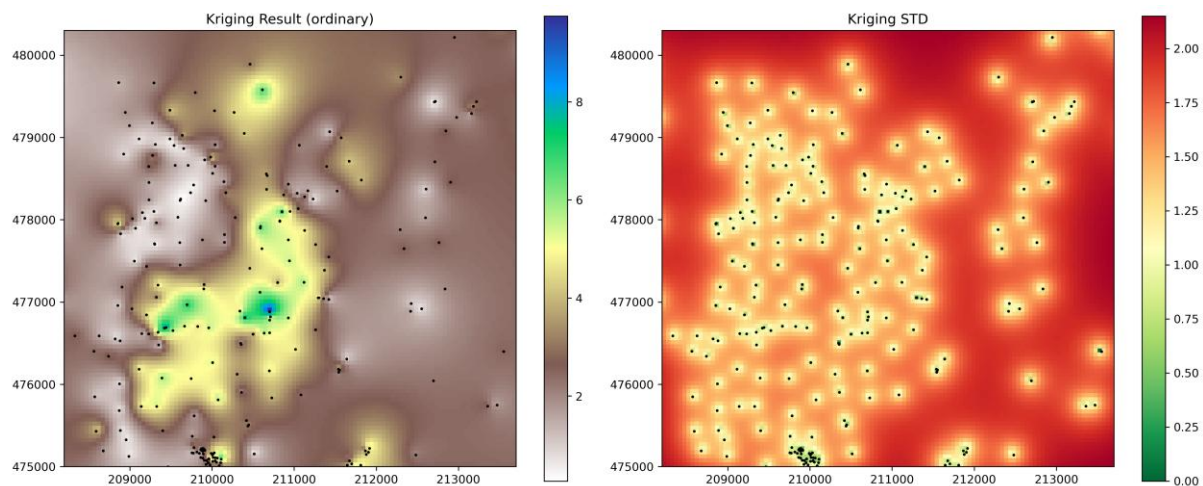


Fig B.10: kaarten van interpolatieresultaten, dikte KRZU , alleen positieve punten. Links de voorspelde waarden in m, rechts de standaarddeviatie