



Wiertsema & Partners

RAADGEVEND INGENIEURS

Resultaten sTEM-metingen

Veldonderzoek drinkwaterwinning Schalkhaar

VN-88176-2 | 29 januari 2026



Grondonderzoek



Geotechnisch
Laboratorium



Geomonitoring

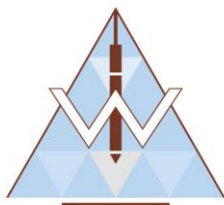


GeoICT



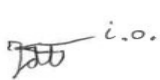
Advies

Wilt u meer informatie over één van onze diensten, kijk dan op [wiertsema.nl](https://www.wiertsema.nl)



Onderwerp: Veldonderzoek drinkwaterwinning Schalkhaar te Schalkhaar
Projectnummer: VN-88176-2
Opdrachtgever: Vitens N.V.
Contactpersoon: mevrouw A. Sprong

Versie	Datum	Omschrijving wijziging
1	29 januari 2026	

Opgesteld door:	J. de Vries, M. Groen
Handtekening:	
Documentnummer:	R106683
Status:	Definitief
Vrijgegeven door:	drs. C.J.A.W. van der Made



Inhoudsopgave

blad

1	Inleiding.....	4
1.1	Aanleiding	4
1.2	Doel.....	5
1.3	Kwaliteitswaarborging	5
1.4	Leeswijzer.....	5
2	Geologische setting.....	6
2.1	Geologische eigenschappen	6
2.2	Geo-elektrische eigenschappen	7
3	Methodologie	16
3.1.1	Geo-elektrische weerstand	16
3.2	Beknopte toelichting meetprincipe	17
3.3	Uitvoering metingen	18
3.4	Interpretatie.....	18
4	Resultaten.....	21
4.1	Uitvoering metingen	21
4.2	Smooth-inversie	21
4.3	Layered-inversie	21
5	Conclusies en aanbevelingen.....	27
5.1	Conclusies	27
5.2	Aanbevelingen	27
6	Referenties.....	28



1 Inleiding

In opdracht van Vitens N.V. te Zwolle heeft Raadgevend Ingenieursbureau Wiertsema & Partners B.V. sTEM-metingen uitgevoerd om een kleilaag (Laagpakket van Zutphen, Formatie van Kreftenheye) te karteren, in de omgeving van de beoogde drinkwaterwinning bij Schalkhaar. Deze informatie zal worden gebruikt voor het opstellen van een grondwatermodel, waarmee de effecten van de winning in kaart zullen worden gebracht.

1.1 Aanleiding

Vitens heeft sinds 1994 een vergunning om twee miljoen kuub water per jaar te onttrekken op drinkwaterwinlocatie Schalkhaar. 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 het Laagpakket van Zutphen (KRZU), 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. Het bovenzijde van het Laagpakket ligt op ca. 0-10 m-NAP en is, indien aanwezig, doorgaans enkele meters dik (tot max. 15 m). Om het Laagpakket van Zutphen in kaart te brengen, zijn ca. tweehonderd sonderingen en enkele tientallen boringen uitgevoerd in de periode 1971 – 1973. Deze gegevens zijn volgens de opdrachtgever nooit verwerkt in een actueel grondwatermodel voor het gebied.

Om deze reden is begin dit jaar een bureaustudie uitgevoerd naar de eigenschappen en de verbreiding van het Laagpakket van Zutphen (zie Wiertsema en Partners, 2025). Hieruit is gebleken dat direct ten Westen van de winning het Laagpakket aaneengesloten aanwezig lijkt te zijn, als een kleilaag van enkele meters dik. Direct ten Oosten van de winning heeft een latere riviergeul het laagpakket echter opgeruimd. Hiermee paste de verbreiding bij de resultaten van een pompproef uit 2021: ten Oosten van de winning zijn namelijk grote (enkele tientallen centimeters) verlagingen van de freatische grondwaterstand waargenomen, terwijl ten Westen van de winning de freatische grondwaterstandsverlaging veel beperkter is.

In een deel van het gebied bestaat echter nog enige onzekerheid over de precieze verbreiding van het Laagpakket van Zutphen. Hiervoor voeren we een gefaseerd onderzoek uit, bestaande uit sTEM-metingen en sonderingen. Deze rapportage bespreekt de resultaten van de eerste fase, de sTEM-metingen.



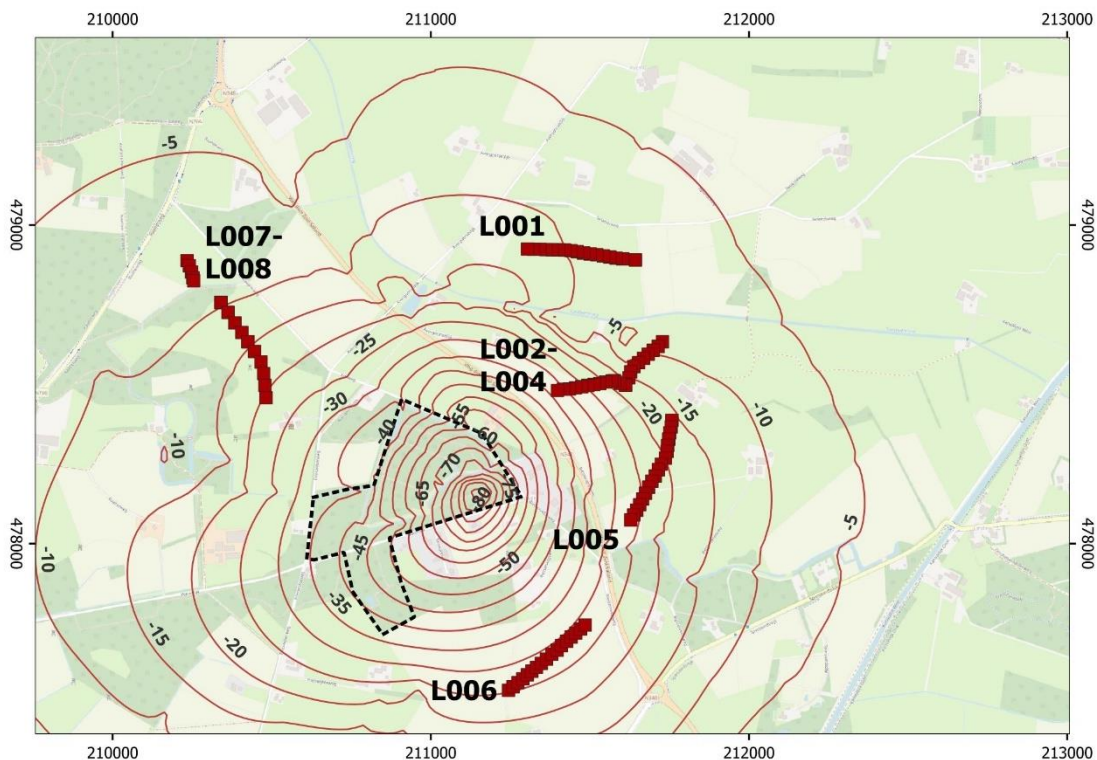


Fig. 1.1. Waterwingebied (zwart polygoon), verlagingscontouren (in cm) en sTEM-profielen

1.2 Doel

Dit onderzoek heeft als doel om het volgende in kaart te brengen:

- Op enkele locaties binnen het vijfcentimeterverlagingscontour bestaat onzekerheid over de verbreiding van het laagpakket van Zutphen. Het gaat hierbij met name om de begrenzingen van het gebied, waar het Laagpakket (vrijwel) volledig is opgeruimd. Verder is er ten Westen van de winlocatie een gebied met een relatief lage onderzoeksdichtheid – ook hier is onderzoek gewenst, om vast te stellen of hier geen geul het Laagpakket heeft opgeruimd.

1.3 Kwaliteitswaarborging

Onze werkzaamheden zijn verricht onder ons kwaliteitsmanagementsysteem NEN-EN-ISO-9001. Onze aandacht voor duurzaamheid hebben we vastgelegd in ons milieumanagementsysteem NEN-EN-ISO-14001 en ons CO₂-managementsysteem conform de CO₂-Prestatieladder niveau 3. Veilig werken hebben wij geborgd in ons VGM-beheersysteem conform VCA** en de Safety Culture Ladder Trede 3.

1.4 Leeswijzer

Na de inleiding in dit eerste hoofdstuk volgen in het tweede hoofdstuk een beknopte beschrijving van de geologie van het gebied en het verwachte meetbeeld. Vervolgens staat in hoofdstuk 3 de methodologie en staan in hoofdstuk 4 de resultaten. Tot slot staan in hoofdstuk 5 de conclusies en aanbevelingen en in hoofdstuk 6 de referenties.

2 Geologische setting

In Wiertsema en Partners (2025) is uitgebreid ingegaan op de geologische eigenschappen van het Laagpakket van Zutphen. In dit hoofdstuk zal daarom slechts een korte beschrijving worden gegeven van de ontstaansgeschiedenis en verbreiding, gevolgd door een beschrijving van historische boorgatmetingen, die relevant zijn voor het interpreteren van de sTEM-metingen.

2.1 Geologische eigenschappen

Het Laagpakket van Zutphen is een hydrologisch slecht doorlatende laag binnen de Formatie van Kreftenheye. De laag is afgezet tijdens het Eemien en het Vroeg-Weichselien, 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. Hierdoor is de rivier in een deel van het gebied deels of volledig opgeruimd. In andere delen is wel erosie opgetreden, maar is het diepere deel van de laag bewaard gebleven.

Het Laagpakket bestaat hoofdzakelijk uit klei. Plaatselijk is tevens een tussenzandlaag (max. enkele meters dik) aangetroffen. Fig. 2.1-2.2 tonen de diepteligging van de boven en onderzijde van het Laagpakket, in m t.o.v. NAP (zie Wiertsema en Partners, 2025). Vervolgens toont fig. 2.3 de cumulatieve dikte van klei en veen binnen het Laagpakket en fig. 2.4 de cumulatieve dikte van zand binnen het Laagpakket. Weergegeven zijn puntgegevens (interpretaties van boringen en sonderingen) en, voor de dikte en de bovenzijde, handgetekende contouren. Daarnaast is in fig. 2.5 de maaiveldhoogte weergegeven. Ter hoogte van de sTEM-profielen is het Laagpakket max. 3.5 m dik. De bovenzijde ligt tussen 8 en 2 m -NAP en de onderzijde ligt tussen 11 en 7 m -NAP. De dikte van het Laagpakket is max. 5 m. Met name in het westen van het gebied kan er een tussenzandlaag aanwezig zijn, met een dikte van max. 5 m bij L006 en max. 3 m bij L007-L008.

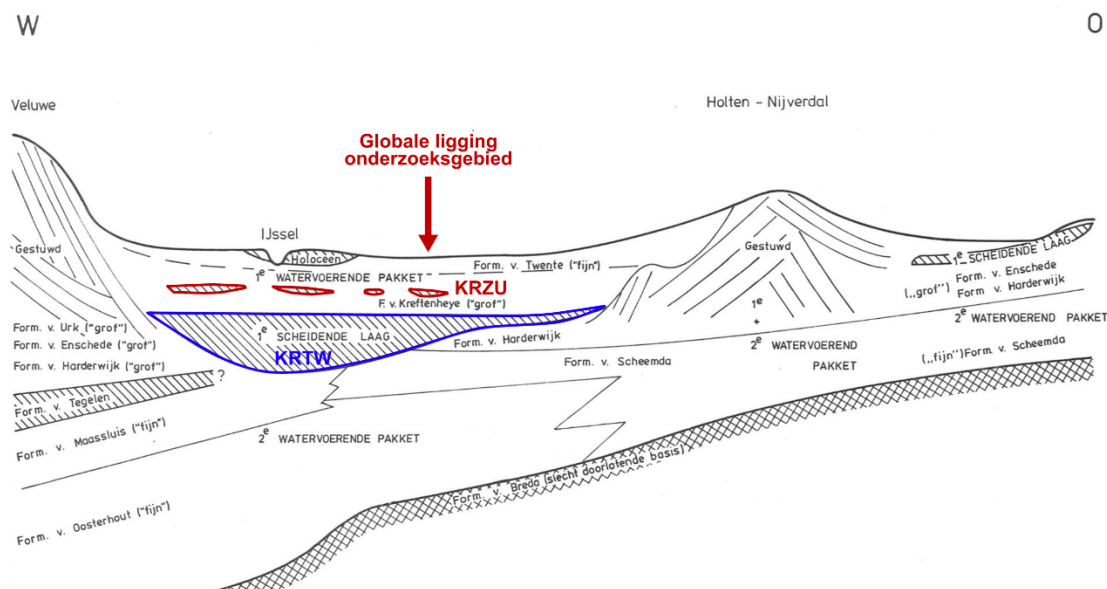


Fig. 2.1. Schalkhaar, Laagpakket van Zutphen: doorsnede IJsseldal. Houtman & Haak DGV-TNO (1985). Het laagpakket van Zutphen is rood omcirkeld. De figuur vermeldt achterhaalde namen van formaties. Deze zijn niet één op één te vertalen zijn naar nieuwe namen, maar op hoofdlijnen zijn de veranderingen: Twente → Bontel, Enschede → Appelscha, Harderwijk en Scheemda → Peize, Tegelen → Waalre.



2.2 Geo-elektrische eigenschappen

Boorgatmetingen geven inzicht in de dikte, diepteligging en geo-elektrische weerstand van grondlagen, alsmede de waterkwaliteit en het kleigehalte (zie hoofdstuk 3). Hiermee kunnen ze worden ingezet voor het interpreteren van de sTEM-metingen. In de omgeving van de sTEM-metingen zijn vijf boorgatmetingen beschikbaar (fig. 2.5). In het onderzoeksgebied is er echter maar één meting (B27H0114), die inzicht geeft in de geo-elektrische eigenschappen van KRZU (zie tabel 2.1). Deze boorgatmeting is weergegeven in figuur 2.6. Te zien is dat KRZU bestaat uit twee kleilagen (2 en 3 m dik) en een tussenzandlaag (2 m dik). De weerstand van de bovenste kleilaag lijkt ca. 25 Ohm-m te zijn. Dit is een relatief lage weerstand voor een kleilaag, die past bij een komklei. De weerstand van de onderste kleilaag lijkt geleidelijk op te lopen met de diepte (toenemend zandgehalte?) en is gemiddeld ca. 35 Ohm-m. Verder loopt de weerstand van het zand boven de KRZU langzaam op richting het maaiveld, tot max. ca. 75 Ohm-m. De weerstand van het zand onder KRZU is ca. 70 Ohm-m.

Om te bepalen in welke mate B27H0114 representatief is voor KRZU, is tevens één boorgatmeting van bij het puttenveld bij Diepenveen weergegeven (fig. 2.7). Hier is KRZU volgens de beschrijving een stuk dikker. De geo-elektrische weerstand van KRZU is hier 30-35 Ohm-m. het onderliggende zand heeft hier een iets hogere weerstand, ca. 80 Ohm-m. Beide verschillen zijn klein en kunnen zowel verband houden met verschillen in lithologie (grover zand / zanderige klei = hogere weerstand) en waterkwaliteit (hogere chloridegehalte). Vergelijkbare variaties kunnen waarschijnlijk eveneens verwacht worden in de omgeving van Schalkhaar.

Verder zijn ook twee boorgatmetingen weergegeven, waar KRZU dunne is dan de LN-sonde (1.64 m; fig. 2.8) en waar KRZU niet bij is beschreven (fig. 2.9). Wat opvalt bij de laatstgenoemde, is dat de gammastralingsintensiteit hier wel een piek toont op het gangbare diepteniveau voor KRZU. Ook de weerstand toont een kleine teruggang. Wellicht dat KRZU hier wel aanwezig is, maar is gemist bij het boren. Verder geven beide metingen inzicht in de weerstand van het zand onder het gangbare diepteniveau van KRZU. De LN-suggereert dat deze tussen de 60 en 75 Ohm-m schommelt.

Al met al suggereren de boorgatmetingen dat 25-35 Ohm-m een gangbare weerstand is voor KRZU, 60-80 Ohm-m voor het onderliggende zand. Deze waardes zullen als uitgangspunt worden genomen voor het startmodel bij de layered-inversie (zie hoofdstuk 3).



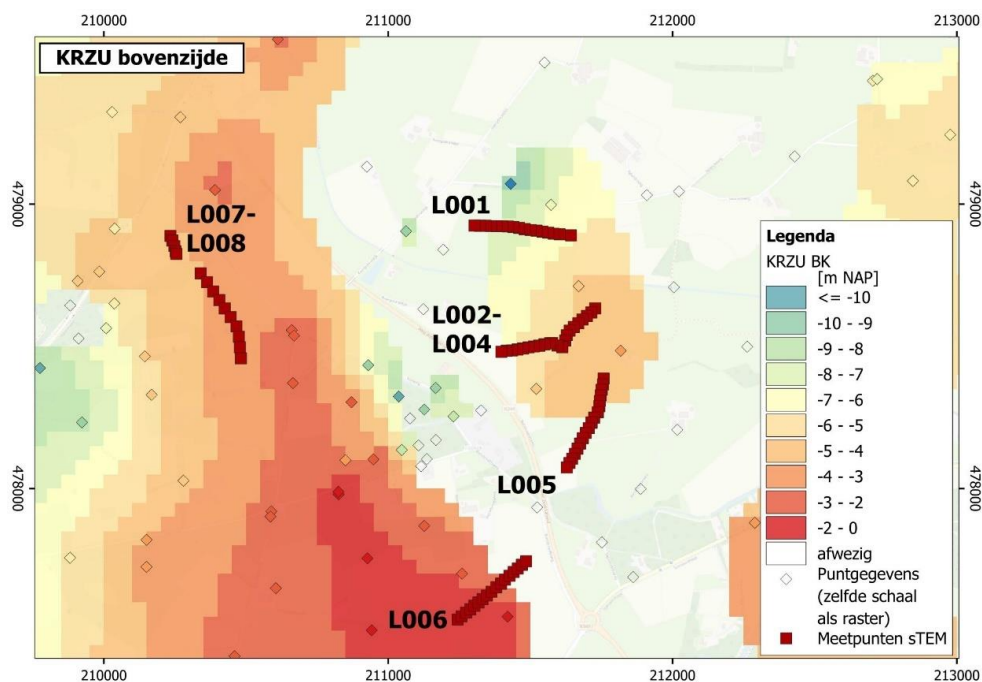


Fig. 2.1: sTEM-profielen op een kaart van de ligging van de bovenzijde van KRZU (Wiertsema en Partners, 2025). Hierbij dient er rekening mee te worden gehouden dat de interpolatie gebaseerd is op een relatief klein aantal onderzoekspunten en plaatselijk een vertekend beeld kan geven (wat de aanleiding vormt voor dit vervolgonderzoek).

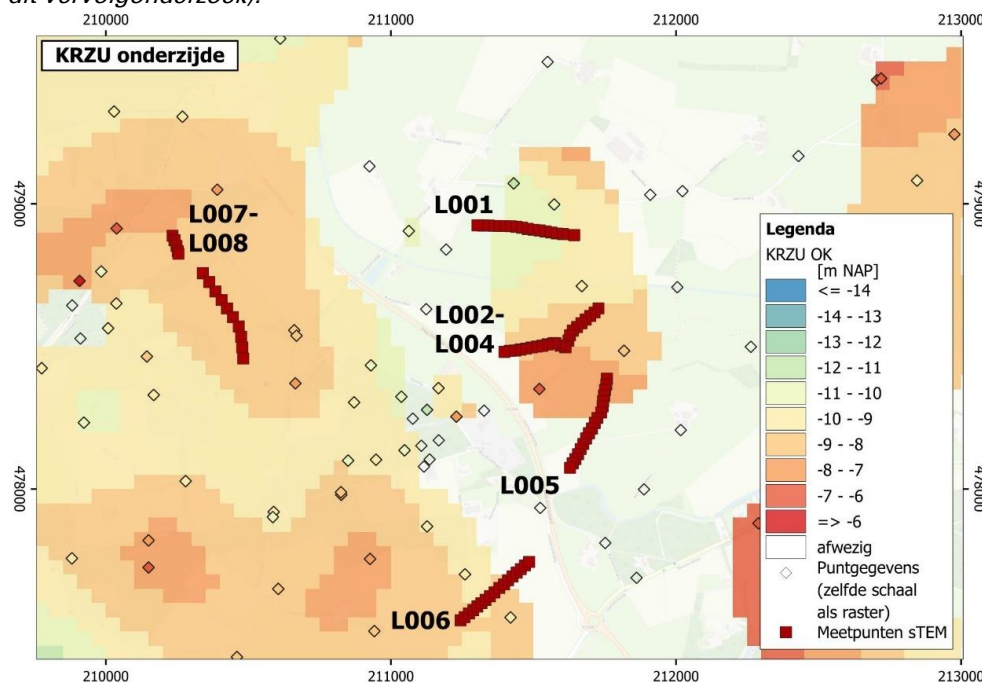


Fig. 2.2: sTEM-profielen op een kaart van de ligging van de onderzijde van KRZU (Wiertsema en Partners, 2025).

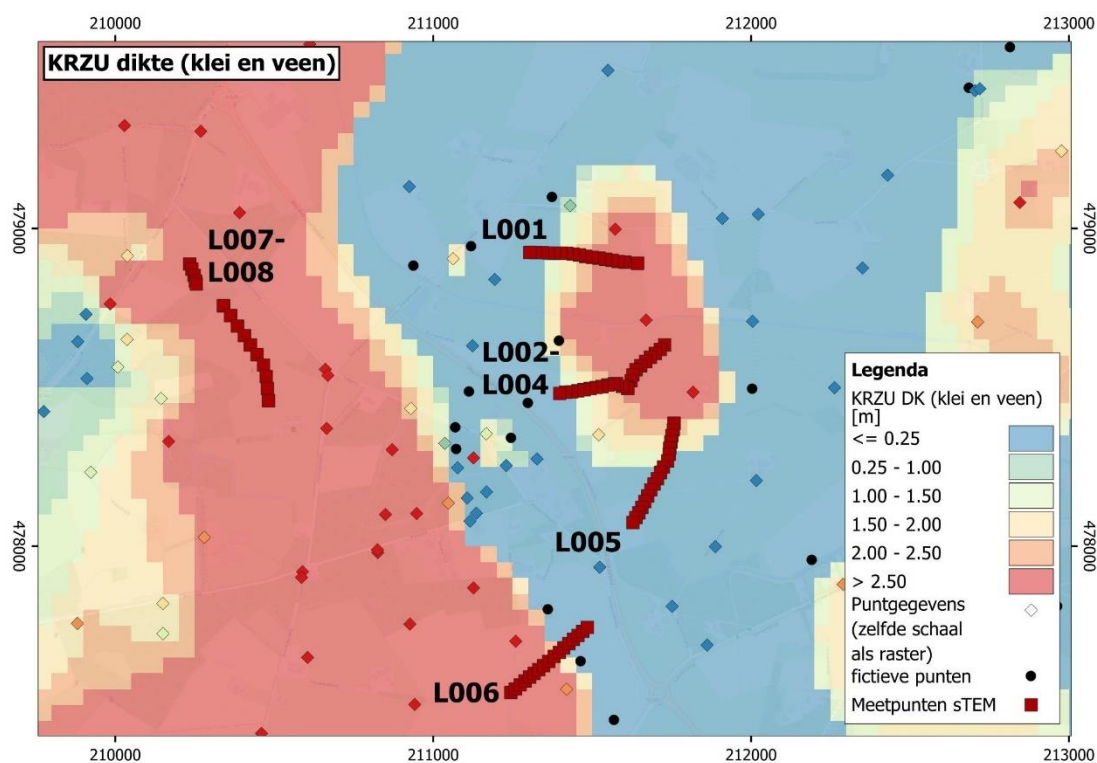


Fig. 2.3: sTEM-profielen op een kaart van de ligging van de dikte van KRZU (Wiertsema en Partners, 2025).

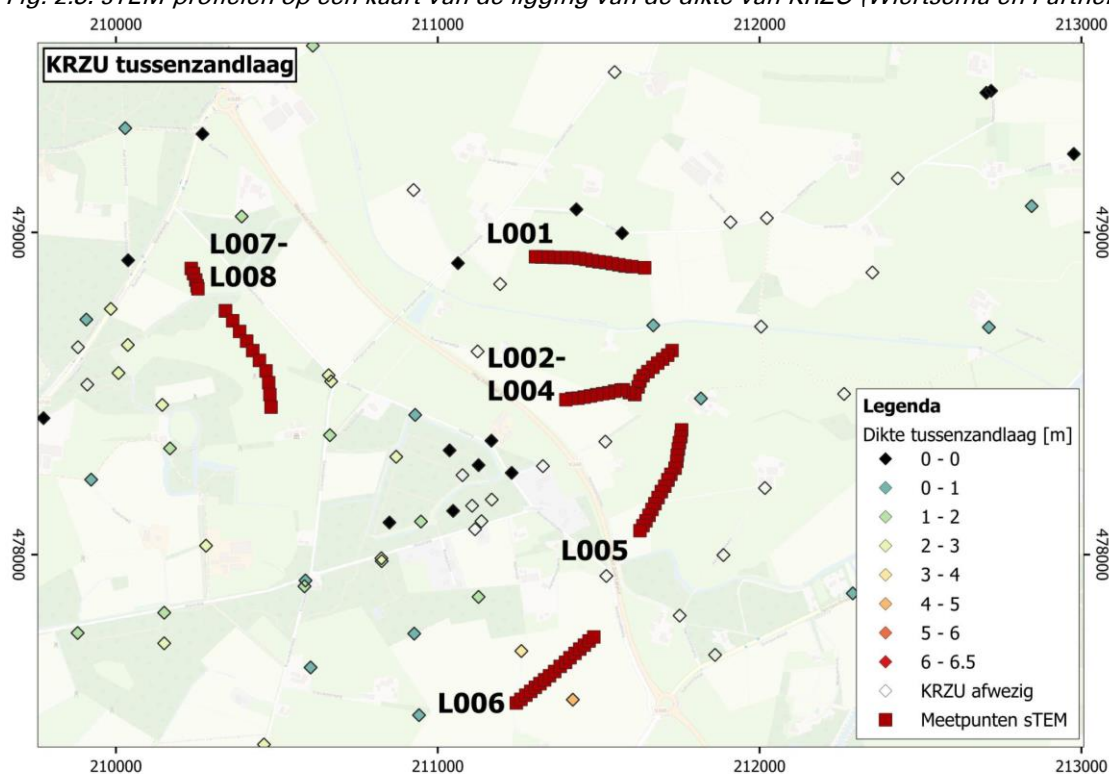


Fig. 2.4: sTEM-profielen op een kaart van de dikte van zandlagen binnen KRZU (Wiertsema en Partners, 2025).

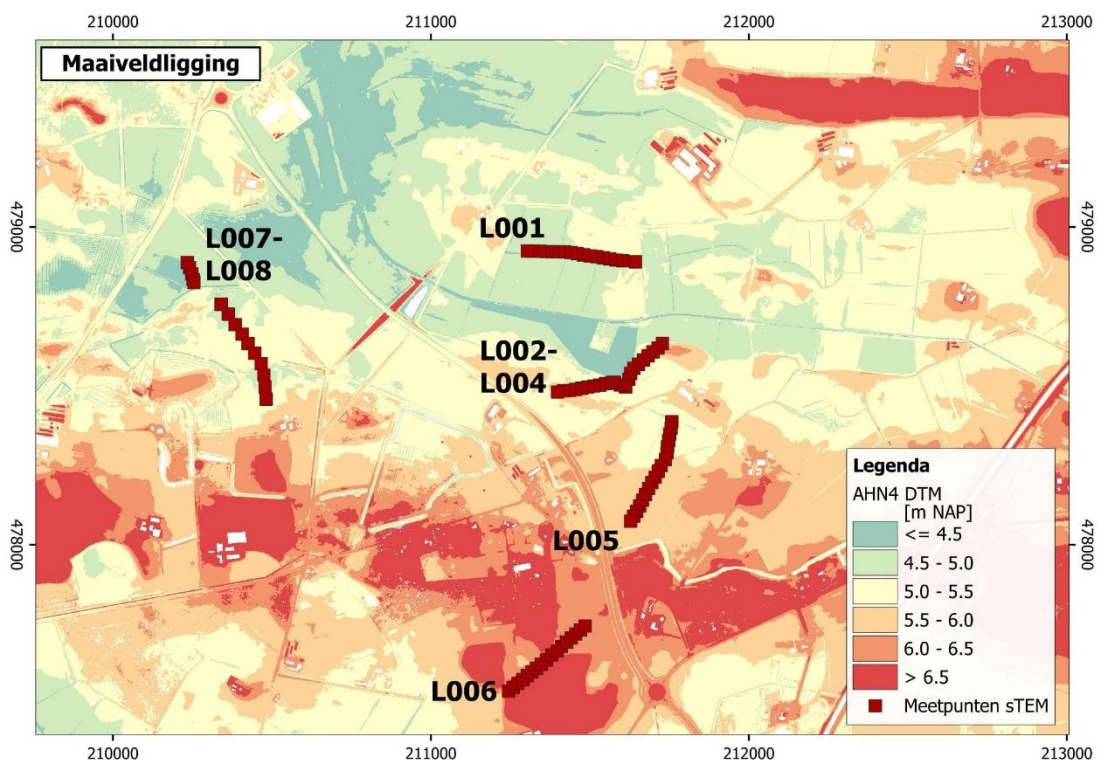


Fig. 2.4: sTEM-profielen op een hoogtekkaart (AHN4).

Tabel 2.1: overzicht boorgatmetingen in projectgebied, waarbij is aangegeven of ze wel of niet bruikbaar zijn en indien nee, waarom.

ID boring	Wel/niet bruikbaar	Toelichting
B27H0114	Wel	N/A
B27H0116	Niet	Groot verschil tussen LN en SN, wat suggereert dat de meting onbetrouwbaar is
B27H0123	Niet	KRZU afwezig
B27H0124	Niet	KRZU te dun (1 m) t.o.v. elektrode-afstand sonde (1.64 m)
B27H0282	Niet	Geen weerstand gemeten



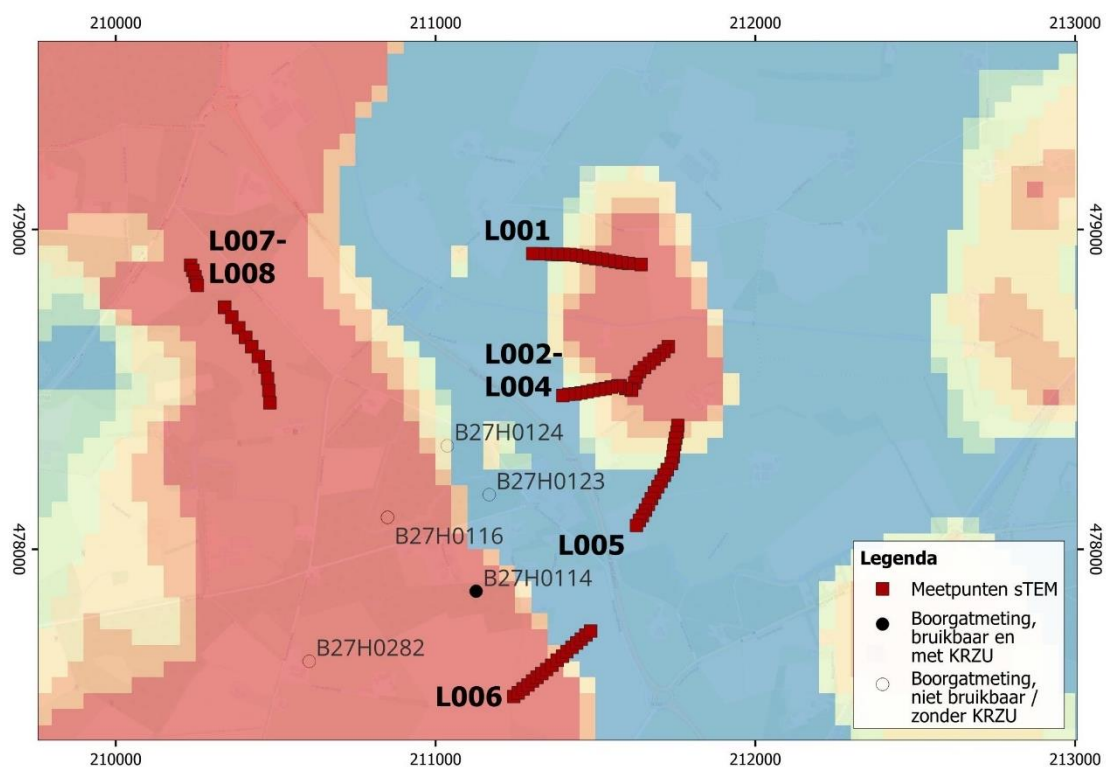
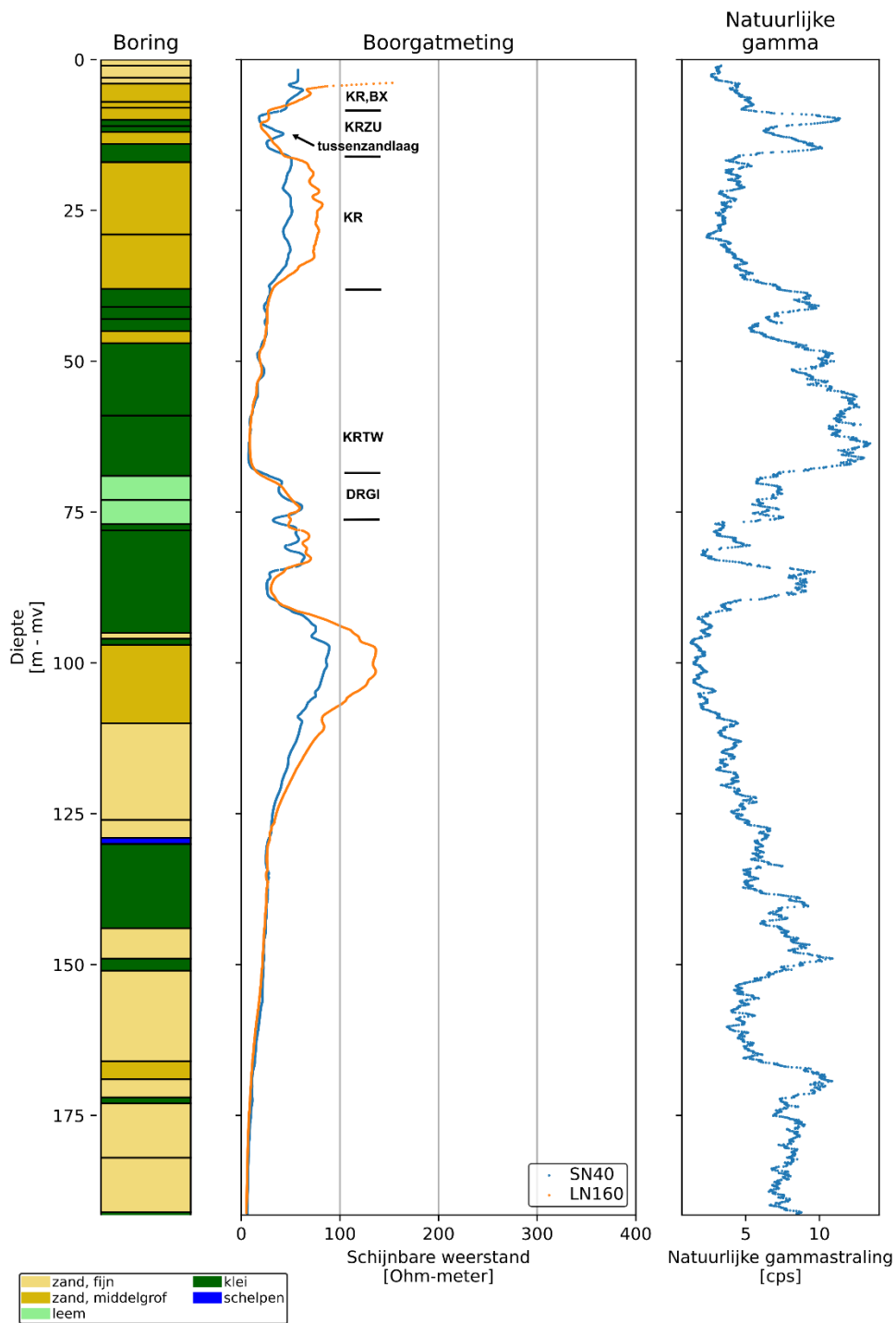


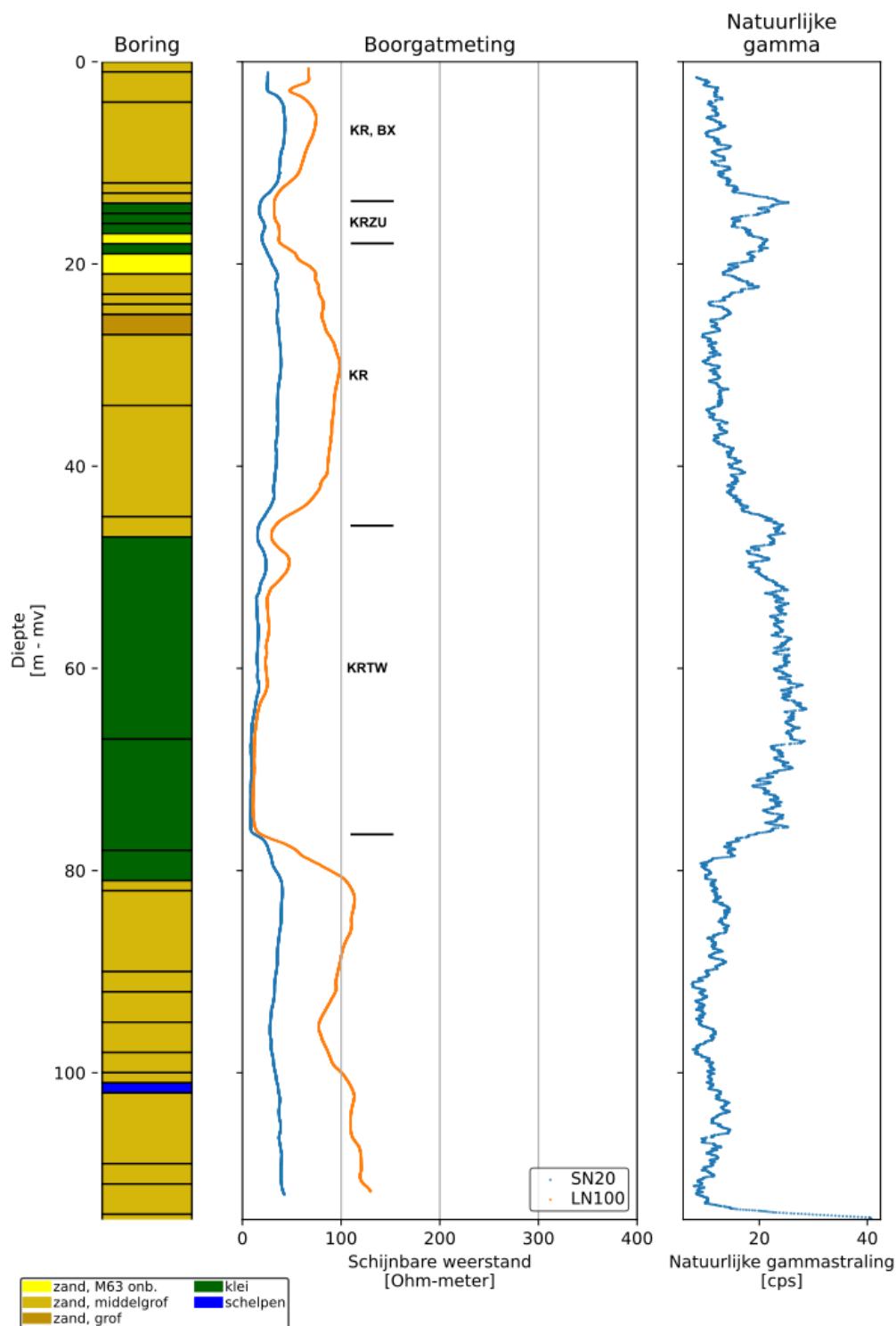
Fig. 2.5: boorgatmetingen in projectgebied

B27H0114 (11-JUL-89)

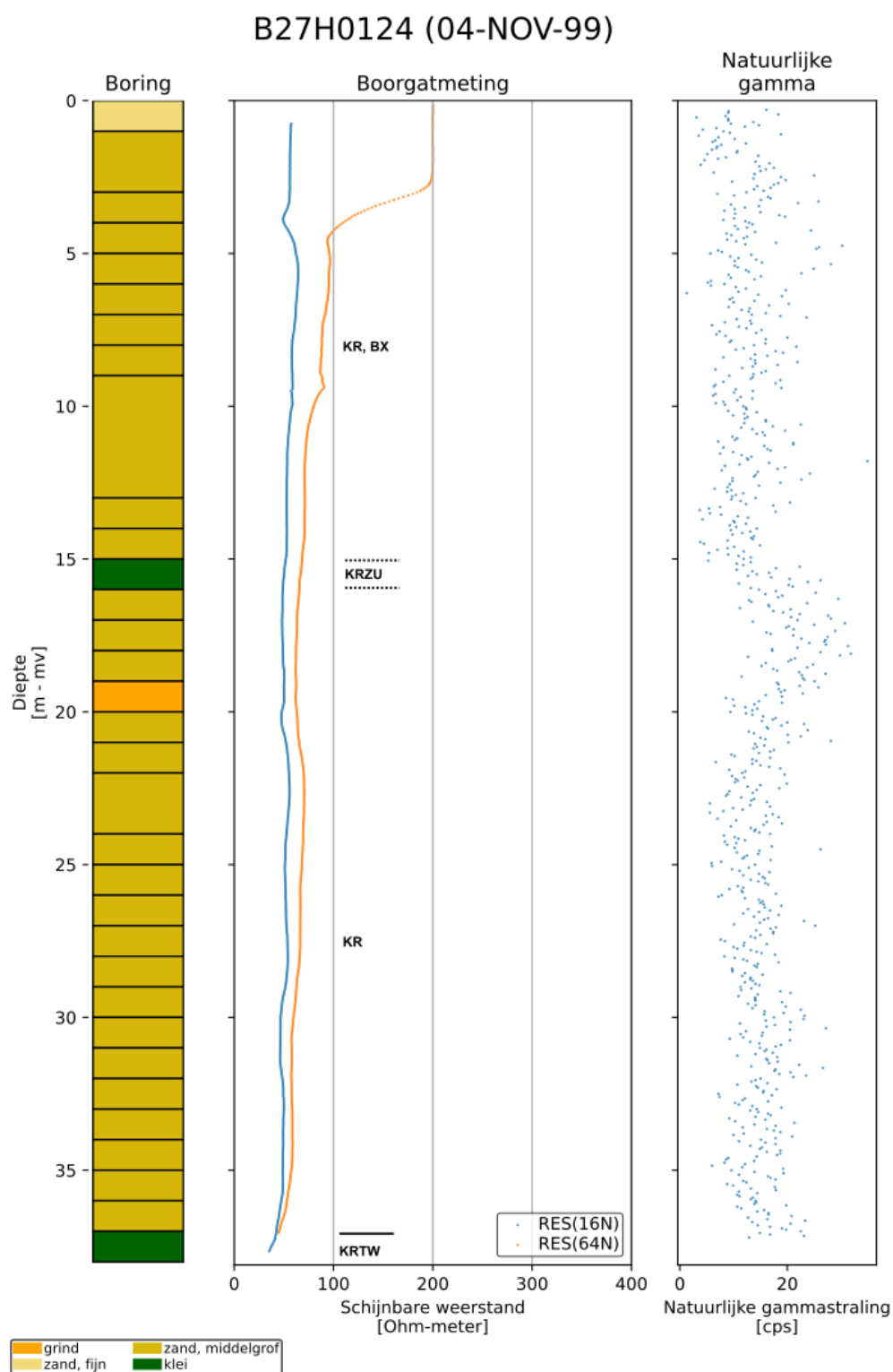


Figuur 2.6: boorgatmeting, uitgevoerd in de nabijheid van winlocatie Schalkhaar. KR: Formatie van Kreftenheye; TW: Laagpakket van Twello; ZU: Laagpakket van Zutphen; BX: Formatie van Bostel; DRGL: Formatie van Drente, Laagpakket van Gieten (keileem); SN: short-normal; LN: long-normal.

B27G0173 (01-NOV-79)

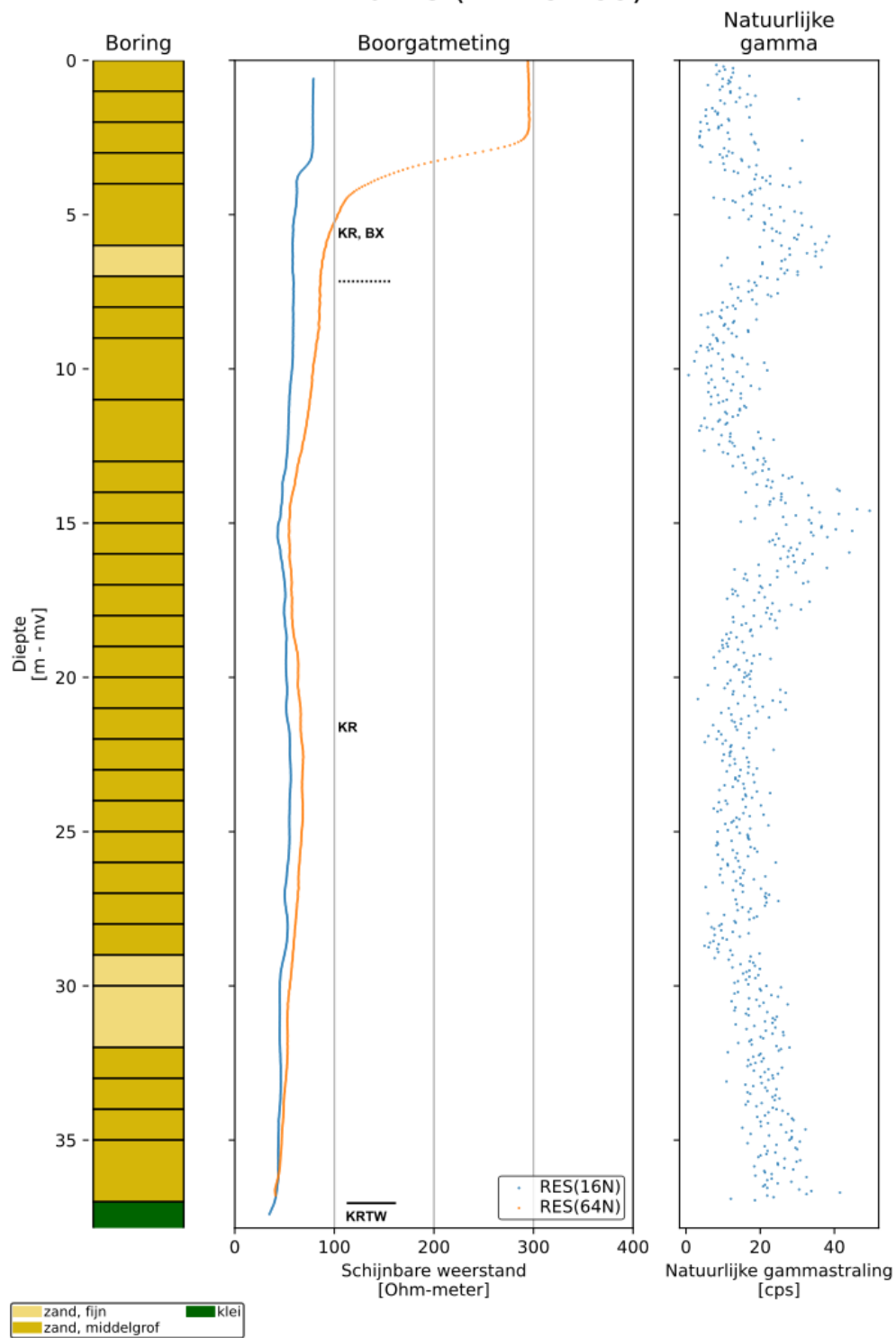


Figuur 2.7: een boorgatmeting, uitgevoerd in de nabijheid van winlocatie Diepenveen. Voor gebruikte afkortingen zie fig. 2.6.



Figuur 2.8: boorgatmeting, uitgevoerd in de nabijheid van winlocatie Schalkhaar. 'RES16' en 'RES64' komen resp. overeen met de short-normal en long-normal. Voor verdere gebruikte afkortingen zie fig. 2.6.

B27H0123 (11-NOV-99)



Figuur 2.9: boorgatmeting, uitgevoerd in de nabijheid van winlocatie Schalkhaar 'RES16' en 'RES64' komen resp. overeen met de short-normal en long-normal. Voor verdere gebruikte afkortingen zie fig. 2.6.

3 Methodologie

Als eerste zal kort worden ingegaan op het meetprincipe en de uitvoering van de metingen. Vervolgens is beschreven hoe de metingen zijn geïnterpreteerd.

3.1.1 Geo-elektrische weerstand

Elektrische weerstand wordt meestal uitgedrukt in Ohm-meter. De inverse van de elektrische weerstand is geleidbaarheid (in Siemens per meter). De elektrische weerstand van de ondergrond is afhankelijk van een aantal parameters, waaronder bodemtype, porositeit, tortuositeit, saturatiegraad, temperatuur en grondwatersamenstelling. De invloed van deze factoren zal hieronder worden verduidelijkt.

De ondergrond in Nederland heeft doorgaans een weerstand tussen de 1 en 1000 Ohm-meter. Klei heeft een relatief lage weerstand, veelal tussen de 10 en 30 Ohm-meter. Hierbij hebben mariene kleien doorgaans een lagere weerstand en fluviatiele kleien een hogere. Zand heeft van zichzelf een erg hoge weerstand; droog zand heeft meestal een weerstand van meer dan 1000 Ohm-meter. De weerstand van verzadigd zand is een stuk lager en is afhankelijk van de geleidbaarheid van het poriewater. Hierbij spelen dus ook de porositeit, tortuositeit, en cementatiefactor een rol, naast de verzadigingsgraad. Deze relatie wordt beschreven door de Wet van Archie. Hiervan bestaat eveneens een vereenvoudigde versie, waarin de hiervoor genoemde grondeigenschappen worden samengevoegd tot de 'formatiefactor':

Formatieweerstand [Ohm-m] = Formatiefactor [-] * waterweerstand [Ohm-m].

In Nederlandse ondergrond gebruikelijke formatiefactoren variëren van ca. 1 tot 5. Hierbij is 1 typerend voor veen, 2.5 voor fijn, siltig zand en 6 voor grind. Doorgaans zal een grofzandige afzetting dus een hogere formatieweerstand hebben dan een fijnzandige zandafzetting, bij gelijkblijvende waterkwaliteit.

Afhankelijk van de formatiefactor en de watergeleidbaarheid kan de formatieweerstand van zand dus sterk variëren (zie tabel 3.1). Op klei is de Wet van Archie niet toepasbaar, omdat kleideeltjes zelf geleidend zijn en de aanname van een zeer slecht geleidende matrix dus niet toepasbaar is. Als laatste dient opgemerkt te worden dat niet alleen het zoutgehalte bepalend is voor de watergeleidbaarheid. Ook andere ionen (bijvoorbeeld nitraten) leiden tot een hogere watergeleidbaarheid en daarmee ook een hogere formatiegeleidbaarheid.

Al met al verschillen de weerstanden van de verschillende bodemtypes sterk, met name omdat de grondwaterkwaliteit eveneens een zeer grote rol speelt. Als gevolg kunnen verschillende bodemsoorten dezelfde weerstand hebben (e.g., zand met brakwater en klei). Dit bemoeilijkt het interpreteren van geofysische metingen. Er is daarom meestal informatie uit een sondering, boring of boorgatmeting nodig om de bodemlagen af te leiden uit de geofysische data.



Tabel 3.1: gemiddelde waarden elektrische weerstand Nederlandse ondergrond

Bodemtype	Ohm-m
Droog zand	>1000
Verzadigd zand met zoet water	40 – 400
Verzadigd zand met brak water	5 – 40
Verzadigd zand met zeewater	2
Klei	10 – 30
Klei (Fm. van Breda)	<5
Veen	20-500

3.2 Beknopte toelichting meetprincipe

TDEM staat voor Time-Domain ElectroMagnetics, oftewel het beschrijven van elektromagnetische golven in het tijdsdomein. Bij deze methode wordt er kortstondig (d.w.z., enkele tientallen microsecondes) intermitterend een stroompuls op een circuit gezet, de zender. De stroompuls wekt een elektromagnetisch veld op. Dit kort aanwezige (primaire) elektromagnetische veld induceert een wervelstroom in de ondergrond, die op hun beurt weer een elektromagnetisch veld opwekt. Dit (secundaire) veld wekt, indien het sterk genoeg is, vervolgens een stroom op in een ontvangstspoel aan het maaiveld. Het meetinstrument meet deze stroom als een voltage in de tijd per intermitterende stroompuls. Dit kan vervolgens worden omgerekend in een schijnbare weerstand.

De sterkte van de geïnduceerde stroom in de ondergrond is afhankelijk van de geleidbaarheid van de ondergrond: in een relatief sterke geleider zal een hogere stroom worden geïnduceerd, wat vervolgens resulteert in een sterker secundair elektromagnetisch veld en een sterkere stroom in de ontvangstspoel. Verder is de tijd een maat voor de diepte: de respons van de diepste gelegen lagen komt als laatste aan bij de ontvanger.

Het hierboven beschreven proces voltrekt zich zeer snel, binnen enkele tientallen millisecondes. Zodra er geen secundair veld meer aanwezig is, kan de zender een nieuwe stroompuls geven en kan er dus opnieuw worden gemeten. Eén meting is dus een middeling van meerdere metingen.

TDEM kan voor verscheidene toepassingen worden ingezet. Ten eerste voor diepe karteringen (tot ca. 300 m). Hierbij onderscheidt TDEM zich van boringen door zijn snelheid en beperkte impact op het landschap en van VES-metingen door zijn snelheid, relatief kleine footprint en gevoeligheid voor lage weerstanden (kleilagen, brak/zout grondwater), maar beperkte gevoeligheid voor hoge weerstanden (zand met zoet grondwater). Als tweede kan de methode worden ingezet voor ondiepe pseudo-2D-karteringen, waarvoor het bij dit project is ingezet. Opnieuw onderscheidt de TDEM zich van sonderingen en boringen door zijn snelheid, en beperkte impact op het landschap en van ERT-metingen door zijn hogere snelheid. Ten opzichte van deze methodes heeft TDEM wel een lagere resolutie.



3.3 Uitvoering metingen

Voor dit project is gebruikt gemaakt van een sTEM profiler. Dit is een relatief nieuwe ontwikkeling in TDEM-instrumentatie (Time Domain Electro Magnetics). Bij eerdere toepassingen heeft dit systeem zich al bewezen als een snelle methode om weerstandsprofielen te maken. Zoals gezegd is het systeem bijv. een stuk sneller dan een standaard ERT-opstelling (weerstandsmetingen met elektrodes).



Figuur 3.1. Voorbeelden van metingen met de sTEM profiler, Ethiopië (links) en Sellingeren, midden en rechts)

Het gebruikte EM-systeem (sTEM profiler) werkt met twee draagbare antennes (een zender en een ontvanger) i.p.v. met kabels die moeten worden uitgerold, zoals bij TDEM instrumenten als de WalkTEM, die we voor het onderzoek voor de nieuwe winning in Schalkwijk hebben gebruikt. Het dieptebereik van deze opstelling is, afhankelijk van de geleidbaarheid en achtergrondruis, gemiddeld 70 m (in tegenstelling tot de WalkTEM, die tot ca. 300 m komt). Een enkele meting duurt onder normale omstandigheden minder dan 1 minuut en wordt via een wifi-sigitaal vanuit een app op de telefoon in gang gezet. Tijdens het meten kan de kwaliteit van de meting worden bekeken. De meettijd (stacking) kan worden aangepast afhankelijk van de achtergrondruis.

3.4 Interpretatie

Het omzetten van de meetdata in een weerstandslagenmodel voltrekt zich d.m.v. een inversie. Hiervoor wordt een aantal stappen doorlopen (figuur 3.1):

1. Het filteren van de datapunten: aan het eind van een meting (i.e. het diepste deel) overstemt de ruis soms het meetsignaal; deze punten dienen verwijderd te worden. Bij dit project konden vrijwel alle datapunten gebruikt worden;
2. Het vergelijken van de ruwe data. Hierin is al een duidelijke tweedeling te herkennen, waarbij bij L001_S002 de schijnbare weerstanden aan het begin van de meting een stuk lager zijn dan bij L001_S014;
3. Het uitvoeren van een smooth-inversie. Dit is een inversie met een groot aantal lagen (bijv. 30), met een vaste dikte/diepte. Deze inversie geeft slechts een trend aan, niet de werkelijke formatieweerstand en diepte. Deze inversie wordt gebruikt voor een eerste vergelijking en het vaststellen van een lagenmodel. In fig. 3.1 is te zien dat de smooth-inversie van de twee voorbeeldmetingen duidelijk verschillen: L001_S002 toont een teruggang in weerstand, die qua diepteliggering overeenkomt met KRZU, L001_S014 bevat deze niet;



4. Het samenstellen van een lagenmodel. Dit is een model met een beperkt aantal lagen, waarmee een ondergrond met discrete lagen (zoals een kleilaag met daaronder en -boven zand, zoals waarvan hier sprake is) kan worden benaderd. Bij een dergelijk model zijn randvoorwaarden uit boringen en boorgatmetingen nodig, om tot een geologisch passend model te komen (zie hoofdstuk 2). Met deze gegevens wordt een startmodel opgesteld, waarin lagen een bepaalde diepteligging en weerstand hebben en een bandbreedte, waarin deze mogen variëren (van 'vast' tot 'vrij'). Als eerste is een model met KRZU gebruikt (laag met 'vaste' weerstand van 25 Ohm-m). Te zien in fig. 3.1 is dat dit model bij L001_S002, maar niet bij L001_S014. Vervolgens is een model zonder KRZU toegepast. Dit past wel bij L001-S014, maar resulteert bij L001_S002 in een model met een relatief lage weerstand (38 Ohm-meter) voor een hoofdzakelijk zandige toplaag, die bovendien niet past bij de trend in de smooth.
5. Het vergelijken van de verschillende metingen en het waar nodig bijschaven van de interpretaties.

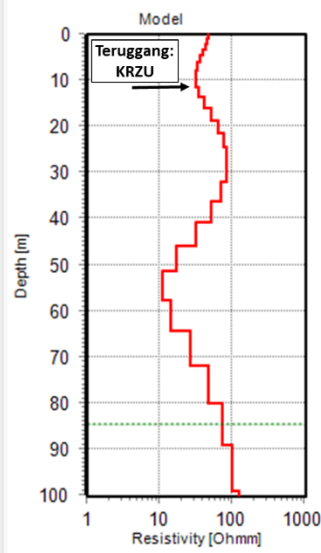
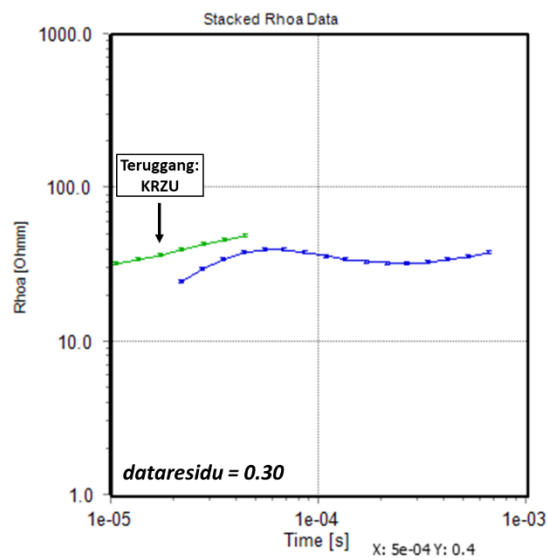
Bij het inverteren speelt equivalentie een rol, met name bij de layered-inversie. Dit houdt in dat meerdere weerstandslagenmodellen bij de data kunnen passen. De smooth-inversie is daarom leidend. Daarnaast speelt het tevens een rol bij de vertaling van het weerstandsmodel naar lithologie en waterkwaliteit.

Een voorbeeld van equivalentie in het weerstandslagenmodel is reeds gegeven in fig. 3.1: bij L001_S002 is in principe ook een layered-model zonder kleilagen inpasbaar. Voor deze meting lijkt een model met kleilaag echter waarschijnlijker, omdat dit model het beste overeenkomt met de (onbevooroordeelde) smooth-inversie.

Equivalentie bij het vertalen van het weerstandsmodel naar lithologie en waterkwaliteit speelt met name een rol bij lage weerstanden: een weerstand van 25 Ohm-meter kan bijv. zowel geassocieerd zijn met klei, als met zand met brak water (zie tabel 3.1). Op basis van de lithostratigrafische opbouw van het gebied dient de worden besloten wat het meest aannemelijk is. Gezien de relatief ondiepe onderzoeksdiepte en de locatie van dit project, zal brak of zout water (vrijwel) geen rol spelen bij dit project. Wel dient er rekening te worden gehouden met verschillen in waterkwaliteit als gevolg van landbouwactiviteiten: met name nitraat kan nl. leiden tot aanzienlijk verhoogde watergeleidbaarheden.

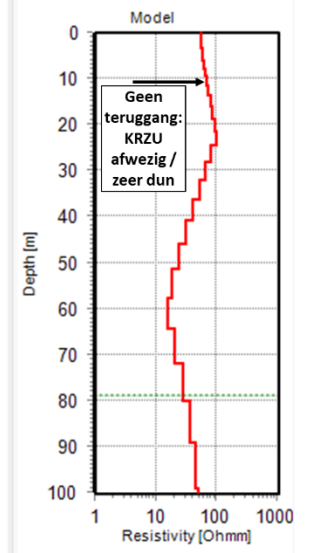
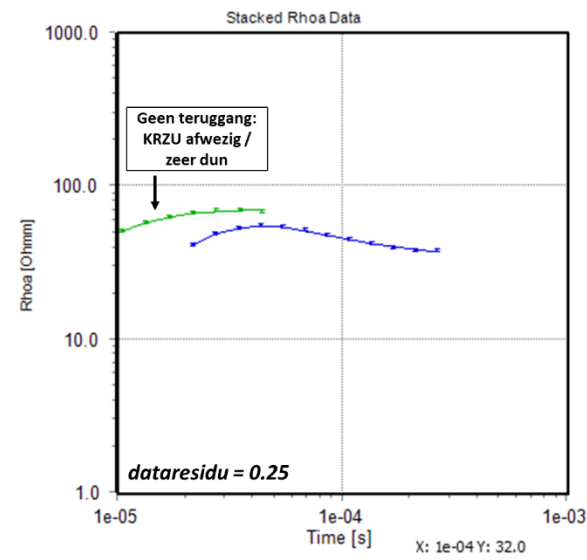
L001 S002

Smooth-model

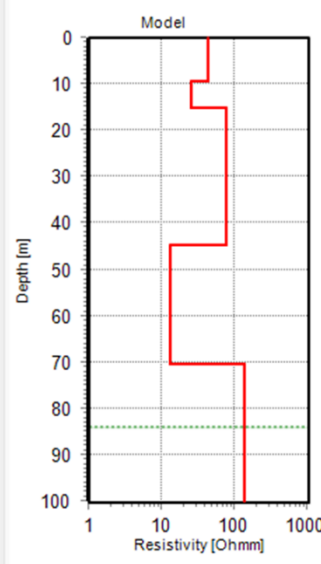
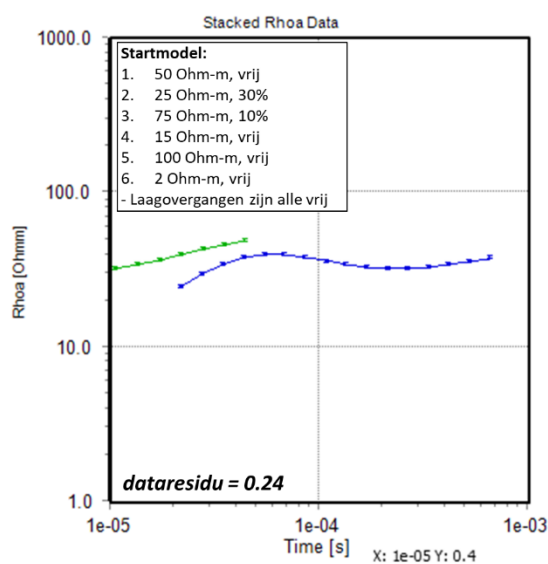


L001 S015

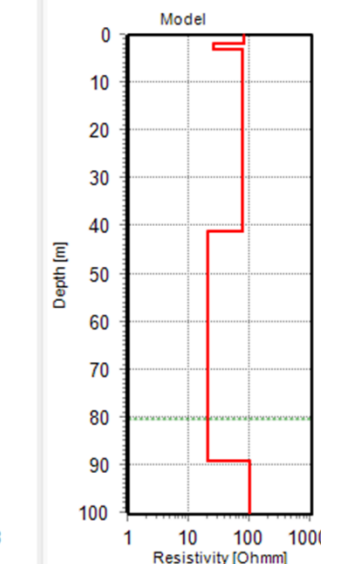
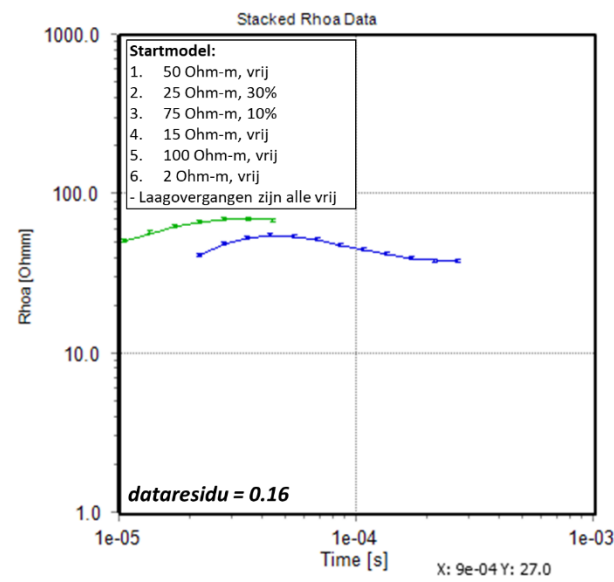
Smooth-model



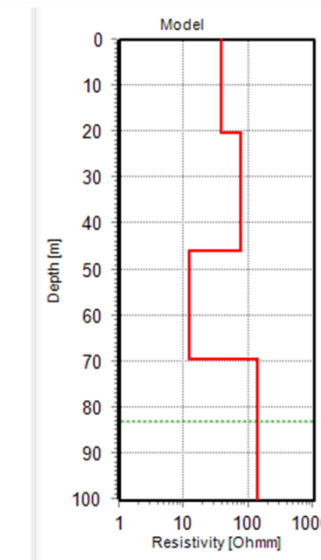
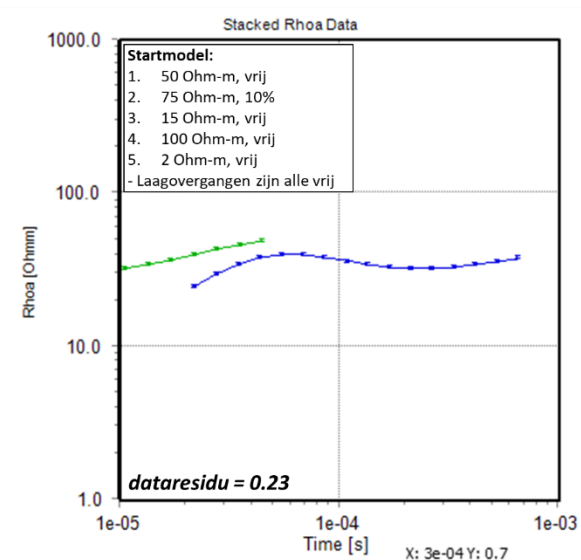
Layered-model (met KRZU)



Layered-model (met KRZU)



Layered-model (zonder KRZU)



Layered-model (zonder KRZU)

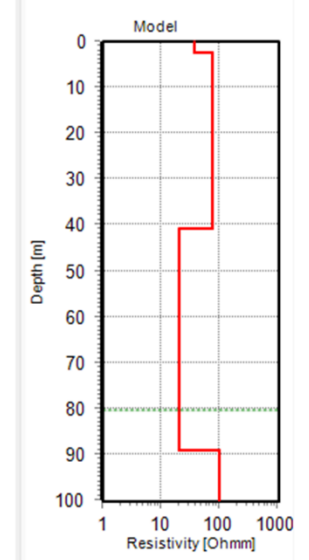
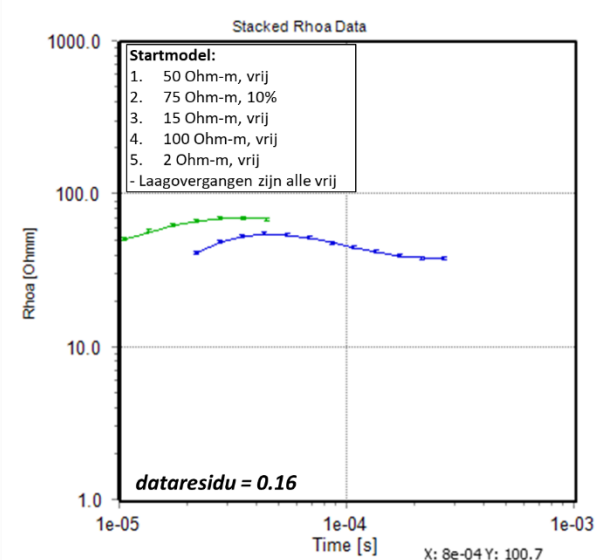
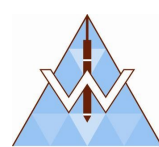


Fig. 3.1: voorbeeld van interpretatiestappen van een meting met en een meting zonder KRZU. De dataresidu is in alle gevallen lager dan de standaarddeviatie van de data en kan daardoor niet worden gebruikt om modellen van elkaar te onderscheiden.



Wiertsema & Partners
RAADGEVEND INGENIEURS

4 Resultaten

4.1 Uitvoering metingen

De metingen zijn uitgevoerd op woensdag 14 januari 2026. Het was die dag net boven nul en droog. Vlak voor het veldwerk heeft het enige tijd gevoren, waarbij er enkele tientallen centimeters sneeuw is gevallen. De dooi had zich ingezet op maandag de 12^e en tijdens het veldwerk was alle sneeuw reeds verdwenen. Door al het smeltwater was het gebied bijzonder drassig.

De uitvoering van de metingen is goed verlopen. Zoals verwacht had het Zutphen-laagpakket voldoende contrast en dikte om hem van het boven- en onderliggende zand te onderscheiden. Daarnaast was de hoeveelheid ruis minimaal. De metingen waren dus van een goede kwaliteit, waarbij we tot een relatief grote diepte een toereikende signaal-ruisverhouding hebben.

4.2 Smooth-inversie

Als eerste is een smooth-inversie uitgevoerd, waarbij bij alle metingen dezelfde instellingen zijn gebruikt (dertig lagen tussen het maaiveld en 150 m-mv). In figuur 4.1 is een voorbeeld gegeven van één van de metingen. Te zien is dat zowel het Laagpakket van Zutphen als het Laagpakket van Twello duidelijk te herkennen is in de metingen, met hier tussen in het watervoerende pakket, waaruit men bij Schalkhaar wenst te winnen. De zoet-zoutgrens is niet bereikt, hiervoor zou men met een grotere zender moeten werken (met de WalkTEM).

Van de overige metingen is alleen het ondiepe deel gepresenteerd, waarop bij dit project de nadruk ligt. Deze zijn als figuren gepresenteerd in figuur 4.3. De ligging van de profielen is weergegeven in profiel 4.2. Net zoals bij de voorbeeldmeting in figuur 4.1 kan bij deze profielen de aanwezigheid van de klei duidelijk worden opgemaakt. Bij de meeste profielen komt de verbreiding overeen met de voorspelde verbreiding (Wiertsema en Partners, 2025), maar bij L005 lijkt de klei volledig afwezig te zijn.

4.3 Layered-inversie

Vervolgens is een layered-inversie uitgevoerd, ten eerste op metingen, waar op basis van de smooth KRZU wordt verwacht. Hierbij is als eerste een startmodel met KRZU gebruikt, waarbij de weerstand van KRZU (25 Ohm-m) en het onderliggende zand (65-75 Ohm-m) mocht variëren binnen een bandbreedte van resp. 30% en 10%. De toplaag (startwaarde 50 Ohm-m) mocht vrij variëren.

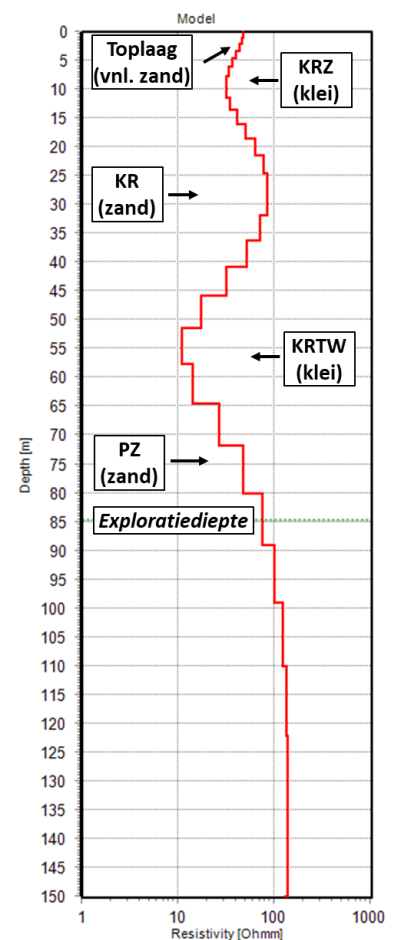


Fig. 4.1: voorbeeld van een smooth-inversie (L001S002)

Bij vrijwel alle metingen resulteerde dit in een laagindeling, die past bij aangrenzende boringen en boorgatmetingen; enkele metingen weken sterk af van aangrenzende metingen wat betreft de weerstand van de toplaag. Bij deze metingen is tevens een bandbreedte opgelegd aan de toplaag (10%), waarbij als startwaarde de waarde van één van de aangrenzende metingen is gebruikt.

Bij metingen, waar op basis van de smooth geen klei wordt verwacht, is in eerste instantie geverifieerd of hier niet alsnog KRZU kan worden ingepast (d.w.z., in welke mate er sprake is van equivalentie). Hiervoor is de hierboven aanpak gevolgd. Doorgaans kon bij deze metingen de kleilaag wel worden ingepast, maar ligt deze op een diepte, die niet bij KRZU past (zie bijv. fig. 3.1), of is deze zeer dun. Dit bevestigt dus het beeld van de smooth. Bij deze metingen is daarom met een startmodel zonder kleilaag gewerkt. Opnieuw mocht de toplaag (startwaarde 50 Ohm-meter) vrij variëren in weerstand. De (zand)laag hieronder had eveneens opnieuw een startwaarde van 65-75 Ohm-meter en mocht in weerstand met 10% variëren. Ook hier weken enkele metingen weken sterk af van aangrenzende metingen; deze zijn opnieuw geïnverteerd met een in weerstand beperkte toplaag (zie vorige alinea).

De resultaten hiervan zijn gepresenteerd in figuur 4.4. Het verkregen beeld sluit goed aan bij de resultaten van de smooth-inversie. Ook sluit het goed aan bij de boorgatmeting van B27H0114 (fig. 4.5). Wel dient hierbij opgemerkt te worden dat de geleidbaarheidssonderingen mogelijk aanleiding geven tot een verdere verfijning van de layered-inversie, met name ten aanzien van de dikte en diepteligging van lagen, en niet zozeer ten aanzien van de laterale verbreiding.

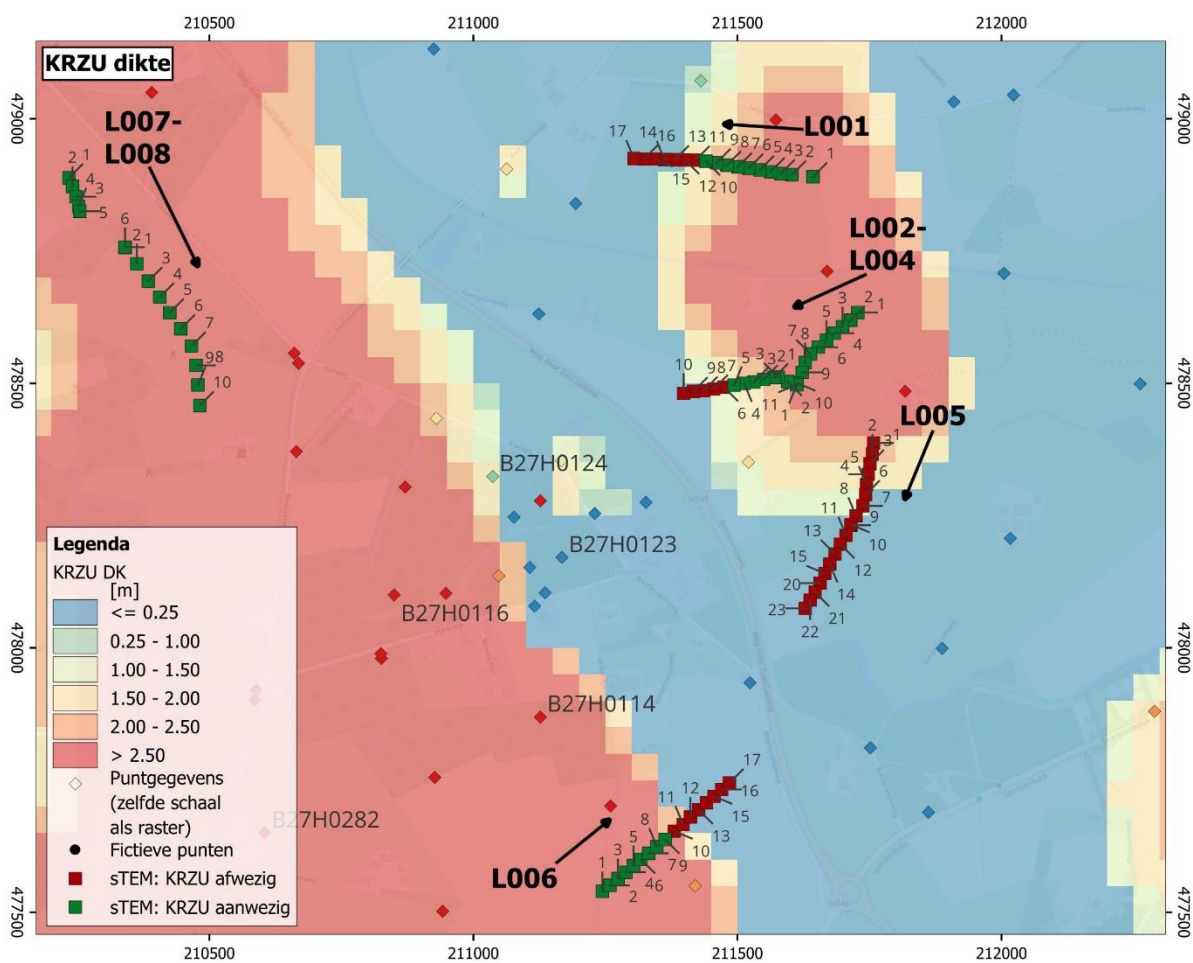


Fig. 4.2: overzichtskartaal van meetpunten. Met een pijl is de looprichting aangegeven. Daarnaast geeft de kleur van de punten aan of er wel of geen klei is aangetroffen.



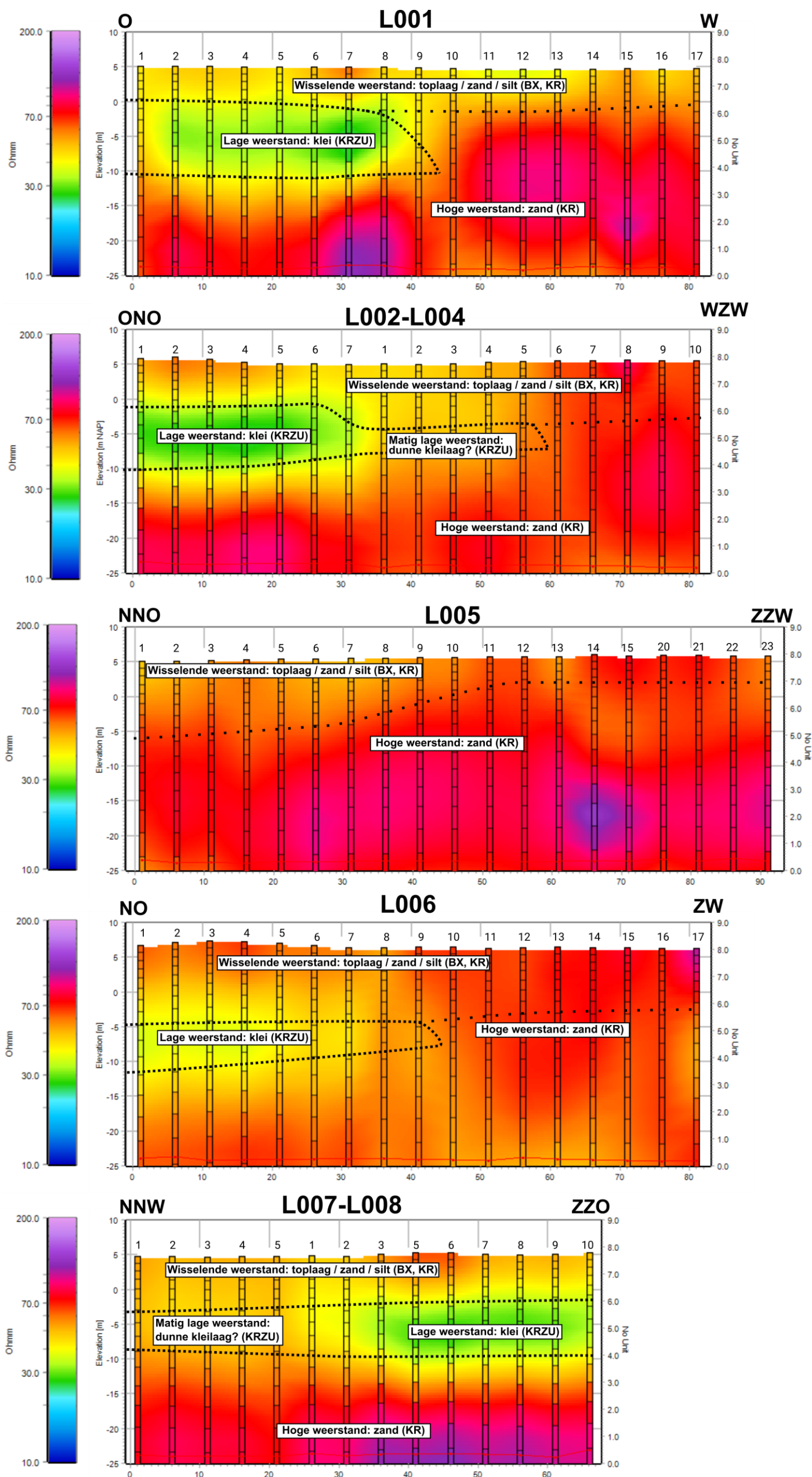


Fig. 4.3: resultaten smooth-inversie. De zwarte stippellijnen dienen ter ondersteuning bij het interpreteren van de figuren en geven een globale laagindeling aan.



Wiertsema & Partners
RAADGEVEND INGENIEURS

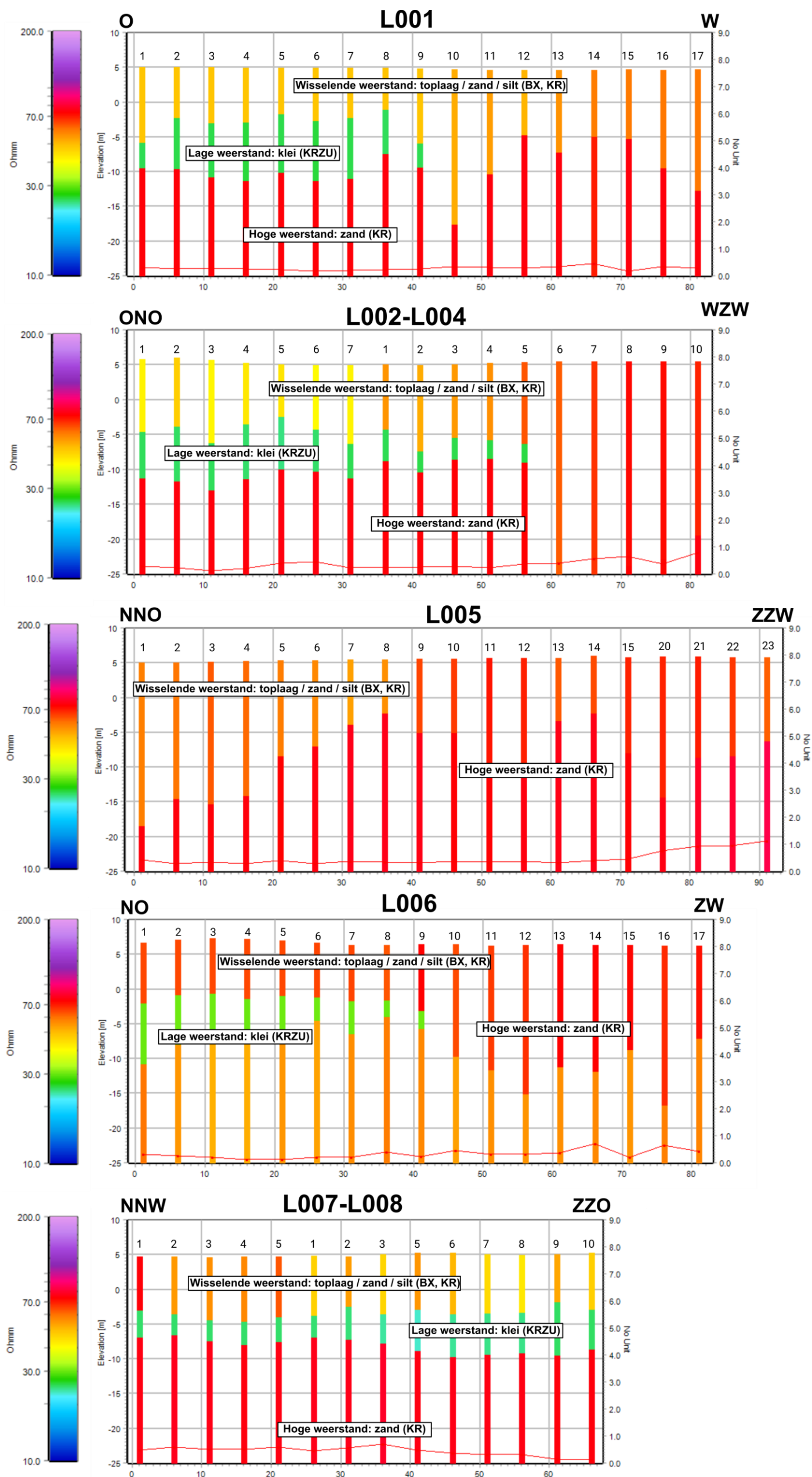


Fig. 4.4: resultaten layered-inversie.

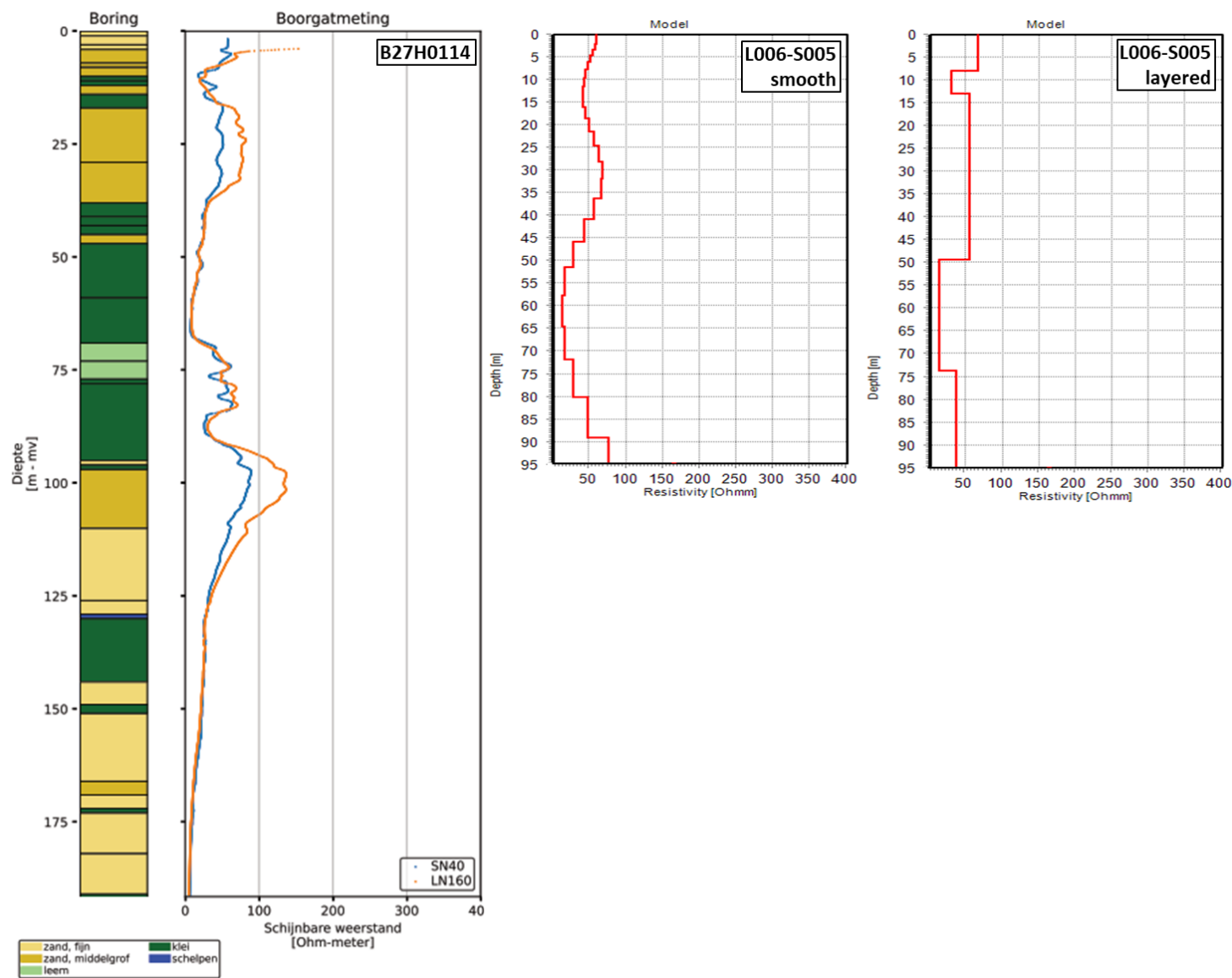


Fig. 4.5: vergelijking tussen boorgatmeting en nabijgelegen STEM-meting (afstand ca. 300 m).

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

- Al met al zijn de sTEM-metingen geslaagd: binnen een dag hebben we ca. anderhalve kilometer profiel kunnen inmeten, waarbij we weinig last hadden van ruis en KRZU een goed contrast bleek te hebben;
- De smooth-inversie geeft reeds een duidelijk inzicht in de verbreiding van het Laagpakket van Zutphen en geeft aan dat de resultaten goed overeen komen met de bureaustudie. Bij L005 lijkt de verbreiding sterk af te wijken van het verwachte: hier lijkt KRZU afwezig te zijn. Gezien de grote afstand tussen de historische sonderingen en boringen is dit niet onverwacht. Op deze zal de verbreiding van KRZU worden aangepast a.d.h.v. de sTEM-metingen;
- De layered-inversie is nog voorlopig, omdat deze indien nodig nog wordt aangepast na het uitvoeren van de twee reeds ingeplande geleidbaarheidssonderingen. De huidige versie van de layered-inversie sluit echter goed aan bij de smooth-inversie en de bestaande gegevens en zou op termijn de mogelijkheid bieden tot het verwerken van de sTEM-resultaten in een grondwatermodel of geologisch model.
- De exploratiediepte is gemiddeld 100m, waarbij dus ook het dieper gelegen Laagpakket van Twello is aangetroffen. Het onderliggende zand wordt bij een deel van metingen bereikt, waardoor er van dit zand geen betrouwbare geo-elektrische weerstand kan worden bepaald. Ook de zoet zout grens is niet bereikt. Voor diepere metingen, waarbij tot aan de zoet-zoutgrens wordt gemeten, kan de WalkTEM worden ingezet.

5.2 Aanbevelingen

- Zoals reeds besproken, zullen er twee geleidbaarheidssonderingen op de sTEM-profielen worden uitgevoerd. Uit deze sonderingen kan het verband tussen lithologie en geleidbaarheid worden afgeleid. Nadat deze zijn uitgevoerd, zullen de sTEM-profielen definitief worden gemaakt. Het voornemen is om dan tevens de sTEM-resultaten om te zetten in kaart(lag)en (dikte, boven- en onderzijde);
- Om meer inzicht te krijgen in de samenstelling van het ondiepe grondwater, is het voorstel om bij een deel van de handboringen peilbuizen te plaatsen. Bij deze peilbuizen kan vervolgens de stijghoogte en watergeleidbaarheid worden gemeten en kan een watermonster worden genomen, waarop een chemische wateranalyse kan worden bepaald (o.a. t.b.v. het bepalen van het chloride- en nitraatgehalte).
- Bij zo goed als alle metingen is tevens het Laagpakket van Twello bereikt en is dus ook het watervoerende pakket, waaruit zal worden gewonnen, in kaart gebracht. Evt. kunnen wij dit deel van de metingen eveneens uitwerken, bijv. om inzicht te krijgen in de doorlatendheid van het watervoerende pakket en de dikte van het Laagpakket van Twello.



6 Referenties

Wiertsema en Partners (2025). *Schalkhaar, Laag van Zutphen. Geologische bureaustudie naar de aanwezigheid en aard van een kleipakket t.b.v. grondwaterwinning* (R103843)