

TNO PUBLIEK

Geologische Dienst Nederland
Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
Postbus 80015
3508 TA Utrecht

www.tno.nl

T +31 88 866 42 56

TNO-rapport**TNO 2022 R10803****tTEM metingen t.b.v. detecteren van een
breuk nabij Boerdonk**

Datum	17 mei 2022
Auteur(s)	Dr. J.A.C. Meekes Drs. J.L. Gunnink
Aantal pagina's	17
Opdrachtgever	Koninklijke Smals NV
Projectnaam	tTEM zandwinning Boerdonk
Projectnummer	060.52575

Alle rechten voorbehouden.

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

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

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

© 2022 TNO

Samenvatting

TNO heeft opdracht gekregen van Koninklijke Smals NV voor het uitvoeren van onderzoek met de tTEM methode voor het detecteren van breuken in de ondergrond ten noorden Boerdonk. Smals is voornemens ter plaatse zand te winnen uit de Formatie van Beegden. In het gebied zijn in het verleden breuken gekarteerd, echter de precieze ligging en het verzet ervan is niet precies bekend. Voor het vergunningstraject is het van belang te weten of de breuken in de bovenste tientallen meters een verticaal verzet vertonen. De werkzaamheden die zijn uitgevoerd omvatten het uitvoeren van elektromagnetische (EM) metingen met behulp van tTEM apparatuur, het verwerken van de ingewonnen gegevens tot een model van de elektrische weerstand en de interpretatie naar aspecten die duiden op een breuk met verzet.

Met het tTEM instrument kunnen met een snelheid van circa 10 km/uur metingen worden uitgevoerd die vertaalbaar zijn naar de lithologische samenstelling van de bovenste 50 tot 70 m van de ondergrond. De metingen zijn verwerkt tot een 3D beeld van de elektrische weerstand van de ondergrond, die een goede representatie is voor de lithologische variatie. Gebleken is dat aan maaiveld plaatselijk een zeer dunne klei- of leemlaag voorkomt. De bovenste 16 tot 20 m van de ondergrond bestaat grotendeels uit (grof) zand van de Formatie van Bortel en de Formatie van Beegden. Onder dit grove zand ligt van 20 tot 60 m diepte een zandpakket met meer lutumbijmenging, afgewisseld met lagen grover zand. Vanaf -45 m -NAP (circa 55 m diepte) komt klei voor behorende tot de Formatie van Stramproy. Deze ligt over de gehele lengte van de alle meetprofielen op dezelfde diepte. Er zijn geen verticale sprongen ('verzet') in de diepteligging van de klei van de Formatie van Stramproy waargenomen die duiden op verticaal verzet. Ook in de ligging van de ondieper gelegen sedimentpakketten is geen verticale sprong waargenomen.

De conclusie is dat de tTEM metingen op de ingemeten locaties ten noorden van Boerdonk geen indicaties laten zien zijn die wijzen op het voorkomen van een breuk met verticaal verzet in de bovenste 60 m van de ondergrond.

Inhoudsopgave

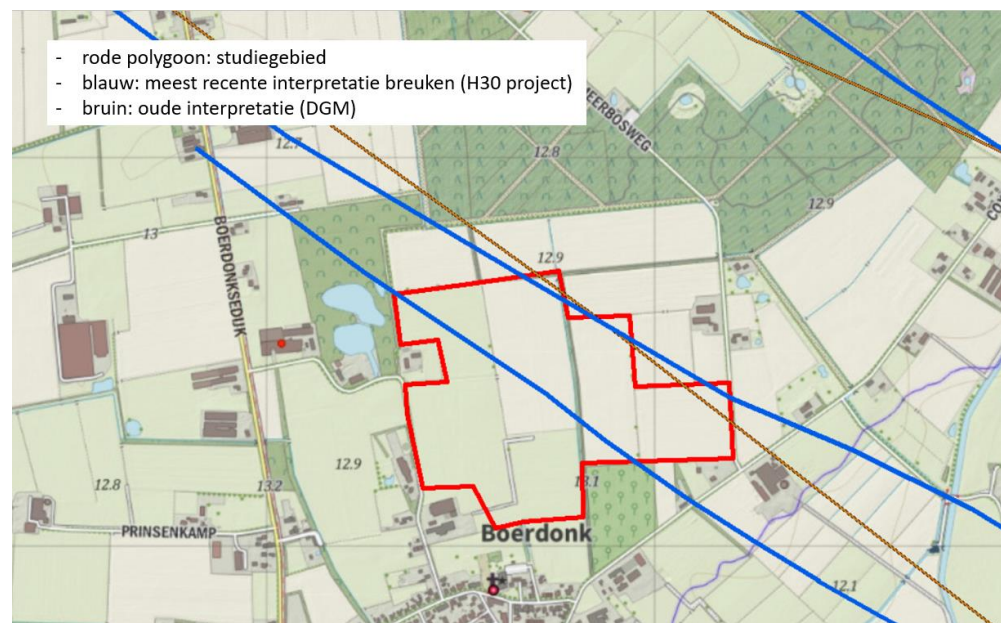
	Samenvatting	2
1	Inleiding	4
2	tTEM methodiek	5
3	Data acquisitie	7
4	Verwerking en inversie van de gegevens	8
4.1	Edit en processen van de data	8
4.2	Inversie van de data	8
4.3	Nabewerking van de data	8
5	Geologische en lithologische context.....	9
5.1	Geologische opbouw van de ondergrond	9
6	Resultaten	10
6.1	Profielresultaten	10
6.2	3D model	12
7	Conclusies.....	16
8	Ondertekening	17

1 Inleiding

TNO Geologische Dienst van Nederland heeft opdracht gekregen van Koninklijke Smals NV voor het uitvoeren van onderzoek met de tTEM methode voor het detecteren van breuken in de ondiepe ondergrond ten noorden Boerdonk. Smals is voornemens ter plaatse zand te winnen uit de Formatie van Beegden. In het gebied zijn in het verleden breuken gekarteerd, echter de precieze ligging en het verzet ervan is niet bekend. Voor het vergunningstraject is het van belang te weten of de breuken in de bovenste tientallen meters een verticaal verzet vertonen. Dit document doet verslag van de werkzaamheden en interpretaties cf. offerte 060.52575-02iv, dd. 10-2-2022.

De werkzaamheden die zijn uitgevoerd behelzen het uitvoeren van elektromagnetische (EM) metingen met behulp van tTEM apparatuur, het verwerken van de ingewonnen gegevens tot een model van de elektrische weerstand van de ondergrond en – tot slot – interpretatie van de gegevens naar aspecten die duiden op een tektonische breuk met verticaal verzet van de ondergrondse bodemopbouw.

De metingen zijn uitgevoerd op een aantal percelen en enkele bospaden ten noorden van Boerdonk (zie Figuur 1-1). Op de figuur zijn een aantal breuken ingetekend, zoals deze zijn geëxtrapoleerd vanuit seismische interpretaties in de ruimere omgeving. Op en nabij de percelen is geen seismische data beschikbaar.

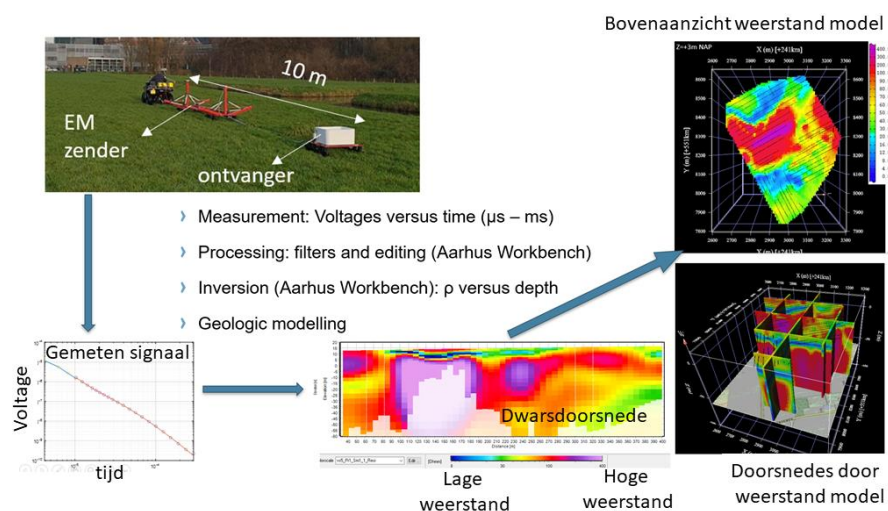


Figuur 1-1: Locatie van de tTEM onderzoekslocatie ten noorden van Boerdonk met vooraf geschatte positie van breuken op basis van verder weg gelegen seismische data.

2 tTEM methodiek

De tTEM methode werkt met behulp van een elektromagnetisch veld. Dit veld wordt uitgezonden door een zendantenne en veroorzaakt elektrische stromen in geleidende elementen in de ondergrond. Deze stromen zijn de bron van een tweede elektromagnetisch veld dat door de ontvanger wordt opgepikt. De zend- en ontvangstantenne worden voortgesleept over het aardoppervlak achter een quad, zodat een profiel van de ondergrond kan worden geconstrueerd (zie Figuur 2-1 voor de methodiek).

De methode maakt gebruik van contrasten in elektromagnetische eigenschappen van sedimentpakketten. Klei¹ is een grondsoort met hoge elektrische geleiding terwijl zandgrond een relatief lage geleiding kent. Daardoor worden in kleilagen grotere stromen opgewekt dan in zandlagen en zijn kleilagen goed zichtbaar in de metingen in een ondergrond met zoet grondwater.



Figuur 2-1: Standaard werkwijze van de tTEM methodiek.

tTEM metingen worden uitgevoerd door de antennes met circa 10 km/uur over het maaiveld voort te slepen. Elke circa 5 m wordt een zogenaamde “sounding” opgenomen: een verloop van spanning tegen de tijd (orde milliseconden). Tijdens de metingen wordt heen en weer gereden op de percelen, zodanig dat een driedimensionaal beeld van de ondergrond van het gehele terrein wordt verkregen. De metingen zijn non-destructief; ook op natte weilanden wordt geen schade aan het gras veroorzaakt.

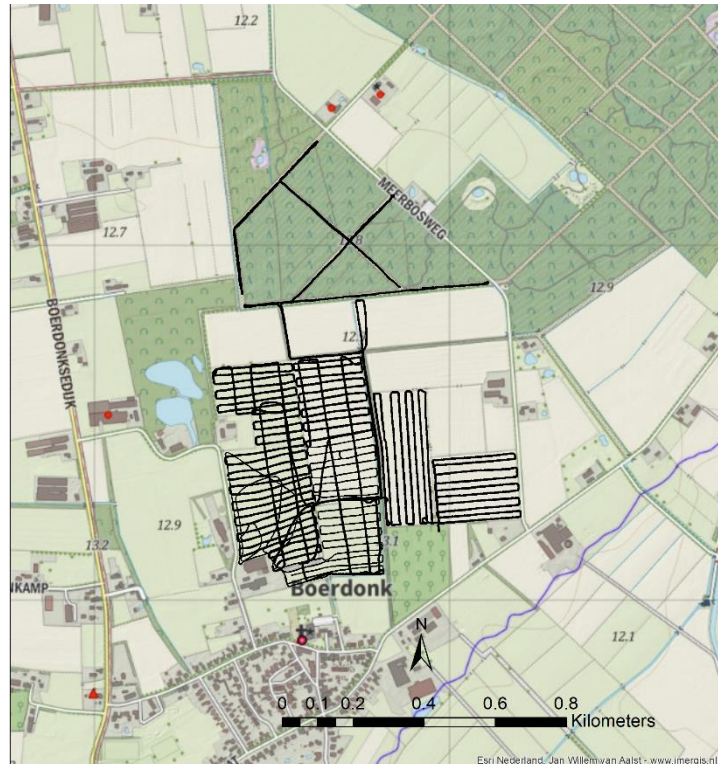
De gegevens zijn vertaalbaar naar de samenstelling van de ondergrond tot circa 45-65 meter diepte afhankelijk van de opbouw van de ondergrond en de samenstelling van het grondwater.

¹ Klei is de verzamelnaam voor sedimenten die een bepaald aandeel lutum-deeltjes bevatten. Het zijn de lutum deeltjes die de geleidbaarheid voor elektrische stroom veroorzaken. Hoe hoger het lutum gehalte, hoe beter de geleidbaarheid. Lutum zijn deeltjes kleiner dan 2 μm die “plaatvorming” zijn en een elektrische lading bezitten. In dit rapport wordt van klei worden gesproken als geleidend sediment.

Op kantoor worden de veldmetingen ingevoerd in het Aarhus Workbench softwarepakket, waarmee de gegevens kunnen worden verwerkt. In dit pakket wordt de data bewerkt voor het verbeteren van de signaal-ruisverhouding en worden ook de delen van de data verwijderd die beïnvloed zijn door niet-geologische objecten, zoals metalen hekwerken, ondergrondse leidingen en kabels en door meetfouten gerelateerd aan de apparatuur. Uit de opgeschoonde data wordt ter plaatse van elke individuele sounding een 1D model van de opbouw van de soortelijke elektrische weerstand van de ondergrond bepaald. Tot hoe diep dit model reikt is afhankelijk van de opbouw van de ondergrond, de grondwaterstand en de grondwaterkwaliteit, en varieert van circa dertig tot een kleine honderd meter. De aldus verkregen 1D modellen worden geëxporteerd en in het geostatistische programma ISATIS® ingevoerd. Hierin kunnen interpolaties worden uitgevoerd van 1D naar 3D beelden en verticale en horizontale doorsneden door de data worden gemaakt.

3 Data acquisitie

De opdrachtgever heeft voorafgaande aan het veldwerk een KLIC-melding uitgevoerd voor informatie over kabels en leidingen in het gebied. De Meerbosweg is net buiten het gebied van het KLIC verzoek gebleven, hier worden wel leidingen verwacht (de tTEM-data tonen die ook aan). De tTEM veldmetingen zijn uitgevoerd op 10 maart 2022. Aanvankelijk zou eerder worden gemeten, echter door de vele regen in februari waren de velden te nat om te worden bereiden.



Figuur 3-1: De locaties van de opgenomen tTEM lijnen op de percelen en in het bosgebied ten noorden ervan.

Een aantal percelen en enkele paden in het bos, zoals aangegeven in Figuur 3-1 zijn ingemeten waarbij in totaal circa 16 km profiel is opgenomen, bestaande uit 3170 metingen met een gemiddelde onderlinge afstand van 5 m. Tijdens de opnames zijn enkele technische problemen met de apparatuur opgetreden; na de processing bleek dat de data voor de verschillende percelen, lees meetsessies, een enigszins verschillende bias heeft. Dit heeft echter geen invloed op analyse van de breukdetectie.

4 Verwerking en inversie van de gegevens

4.1 Editen en processen van de data

Naast de verwijdering van de genoemde verstoringen door niet-geologische objecten, worden ook delen van de metingen verwijderd waarbij mogelijk de afstand tussen zender en ontvanger niet geheel zeker is, zoals bij scherpe bochten. Het processen van de data betreft onder meer het toepassen van een middeling van de gegevens om de signaal-ruis verhouding te vergroten. Hiervoor wordt een standaard set aan routines ingezet.

4.2 Inversie van de data

Het omzetten van de ruwe veldgegevens (spanning tegen tijd) naar het 1D model van de soortelijke elektrische weerstand van de ondergrond wordt inversie genoemd. De inversie geschiedt door een model te veronderstellen en hiervoor de theoretische, ook genoemd synthetische, data te berekenen en deze te vergelijken met de gemeten data. Door de modelparameters zodanig te veranderen dat de verschillen tussen de synthetische en velddata zo klein mogelijk wordt het optimale model gevonden (gegeven de randvoorwaarden van bijvoorbeeld het aantal modellen en de complexiteit van de ondergrond).

Het verschil tussen de synthetische data van het optimale model en de velddata kan worden gezien als een maat voor de kwaliteit van de data. Indien dit verschil hoog is, is de data op die locatie minder betrouwbaar. Voor iedere veldwerklocatie wordt de kwaliteit van de inversie per meting weergegeven in een kaart van de zogenaamde 'mismatch'. Als deze kleiner dan 1 is heeft de inversie een passend model kunnen vinden. Voor een mismatch groter dan 1 is dat minder het geval. Daarnaast worden in het inversieproces beperkingen opgelegd aan de grilligheid van het model. Bij een 'smooth' inversie kunnen de waarden van de weerstand van opeenvolgende lagen niet snel variëren.

4.3 Nabewerking van de data

De 1D modellen die uit de Aarhus Workbench komen zijn in het geostatistische softwarepakket ISATIS® geladen. Met behulp van de kriging techniek is van deze 1D punten, die circa 5 m uit elkaar liggen, een driedimensionaal voxelmodel gemaakt.

5 Geologische en lithologische context

5.1 Geologische opbouw van de ondergrond

De ondergrond op de veldwerkllocatie bestaat uit de volgende formaties (bron: REGIS II v2.2 en GeoTOP model, beide beschikbaar op www.dinoloket.nl), van boven naar beneden:

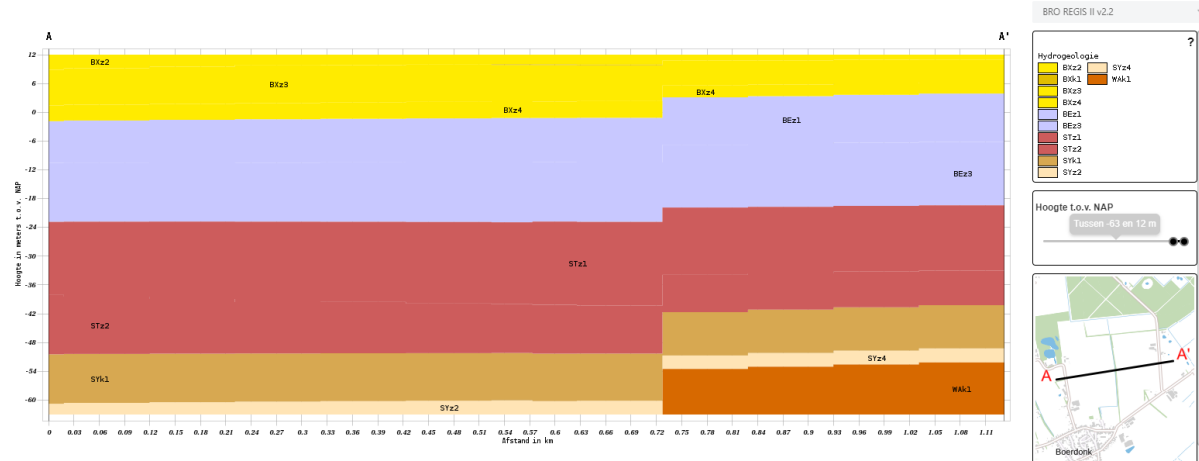
- Formatie van Boxtel: kleinschalige beek- en windafzettingen vooral zandig ontwikkeld;
- Formatie van Beegden: Pleistocene Maasafzettingen, bestaande uit grindhoudend, grof zand;
- Formatie van Sterksel: Rijn- en Maasafzettingen bestaande uit fijn tot grof zand en kleilagen.
- Formatie van Stramproy: fluviaal en eolische afzettingen waarin op deze locatie bovenin een duidelijke kleilaag wordt verwacht

Contrasten in soortelijke elektrische weerstand worden verwacht op de overgang tussen:

- De fijne zanden van de Formatie van Boxtel en de grove zanden van de Formatie van Beegden op circa 12 m -mv;
- De zanden van de Formatie van Sterksel en de daaronder liggende klei van de Formatie van Stramproy op circa 60 m -mv.

Indien in de ondergrond een breuk aanwezig is zal op de tTEM profielen een verticaal verzet zichtbaar moeten zijn in de genoemde contrasten.

Verticale Doorsnede BRO REGIS II v2.2

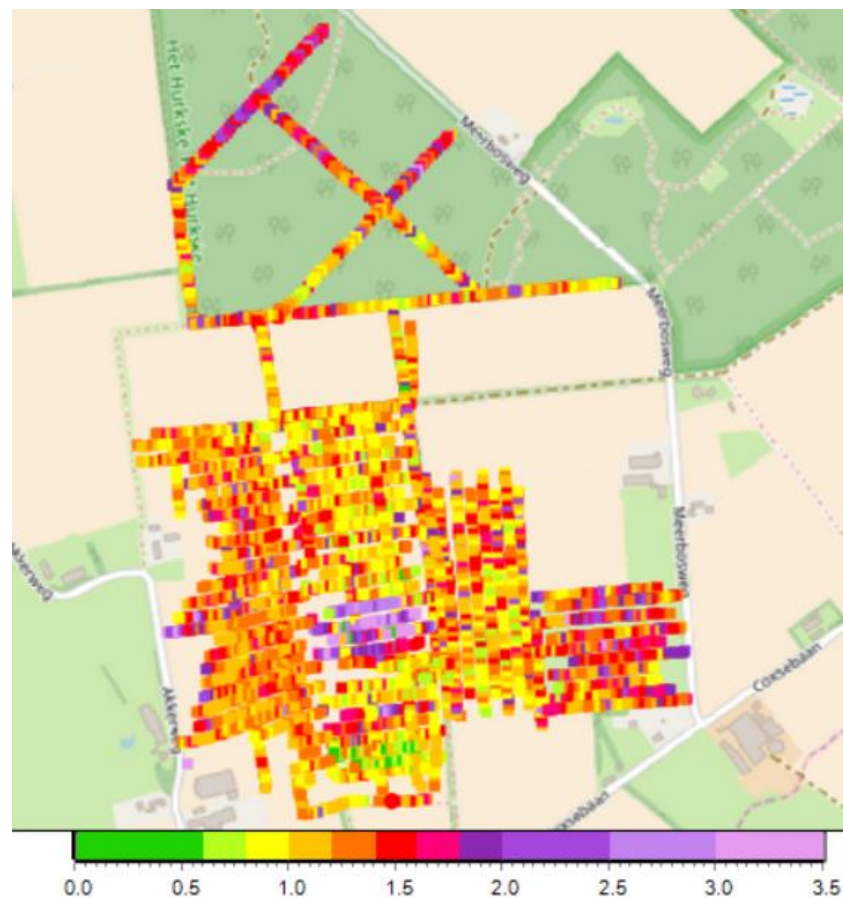


Figuur 5-1. Verticale west-oost doorsnede door het REGIS II v2.2 model over de onderzoekslocatie. In het model wordt de aanwezigheid van een verticale breuk verondersteld.

6 Resultaten

6.1 Profielresultaten

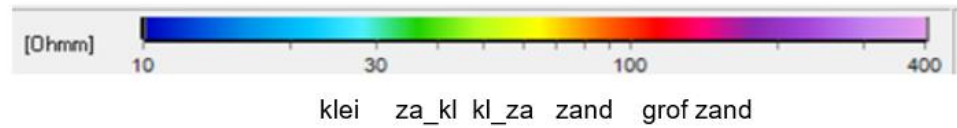
De in paragraaf 4.2 genoemde mismatch van de 1D punten zijn weergegeven op het kaartje van Figuur 6-1. Enkele gebieden tonen paarsgekleurde punten, hier zijn de tTEM data minder betrouwbaar. Het is niet bekend wat de slechte datakwaliteit in het midden van de onderzoekslocatie heeft veroorzaakt.



Figuur 6-1: Locatie van de modelpunten en de mismatch. Modelpunten met mismatch-waarden lager dan 1-1.4 zijn bruikbaar (groen, gele en oranje punten).

In figuur 6-1 is te zien dat laterale veranderingen samenvallen met perceelsgrenzen. Dit is toe te schrijven aan kleine verschillen tussen de meetsessies, die per perceel plaatsvonden. Het voor de onderzoeksvraag relevante beeld van de ondergrond verandert echter hierdoor niet.

In figuur 6-3 en 6-4 worden een aantal tweedimensionale tTEM profielen getoond. De kleuren in de profielen betreffen soortelijke elektrische weerstand. Deze kunnen, als grove benadering lithologisch worden geïnterpreteerd op basis van de in Figuur 6-2 gegeven indicatieve relatie tussen weerstand en lithologie.

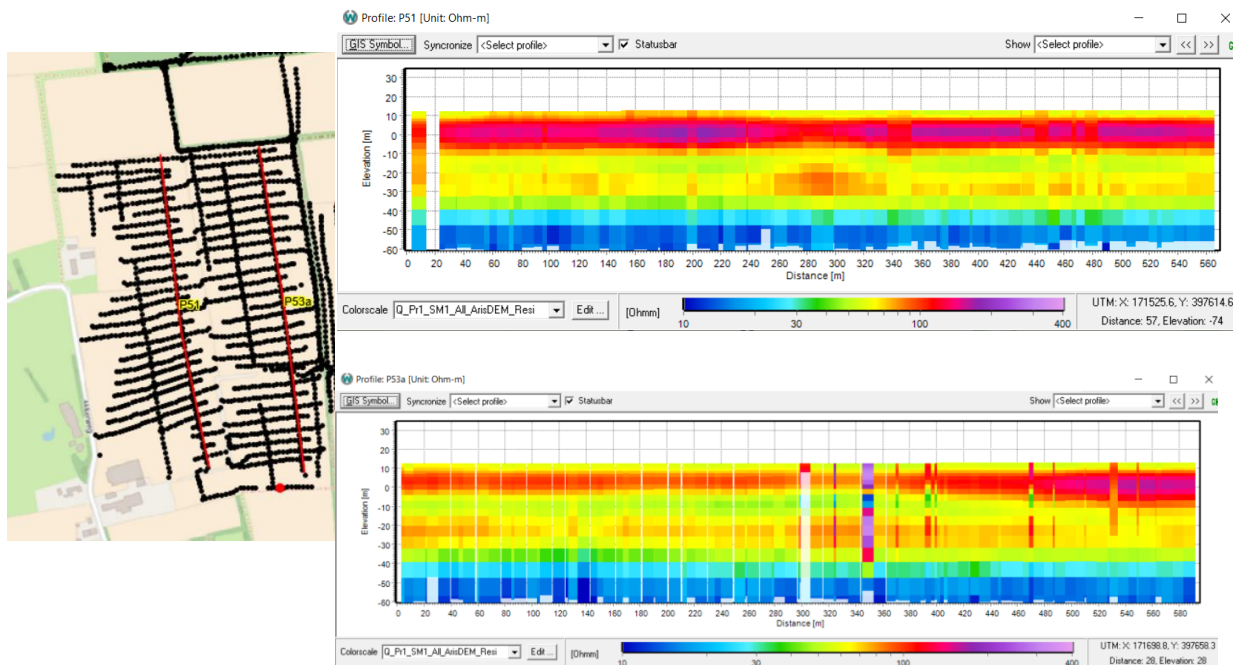


Figuur 6-2: Indicatieve relatie tussen elektrische weerstand en lithologie in een ondergrond met zoet water. Kleigronden hebben een weerstand <30 Ohm.m, grof zand >100 Ohm.m; za_kl = zandige klei, kl_za = kleiig zand.

Twee noord-zuid georiënteerde tTEM profielen zijn weergegeven in Figuur 6-3. Het algemene beeld dat naar voren komt is:

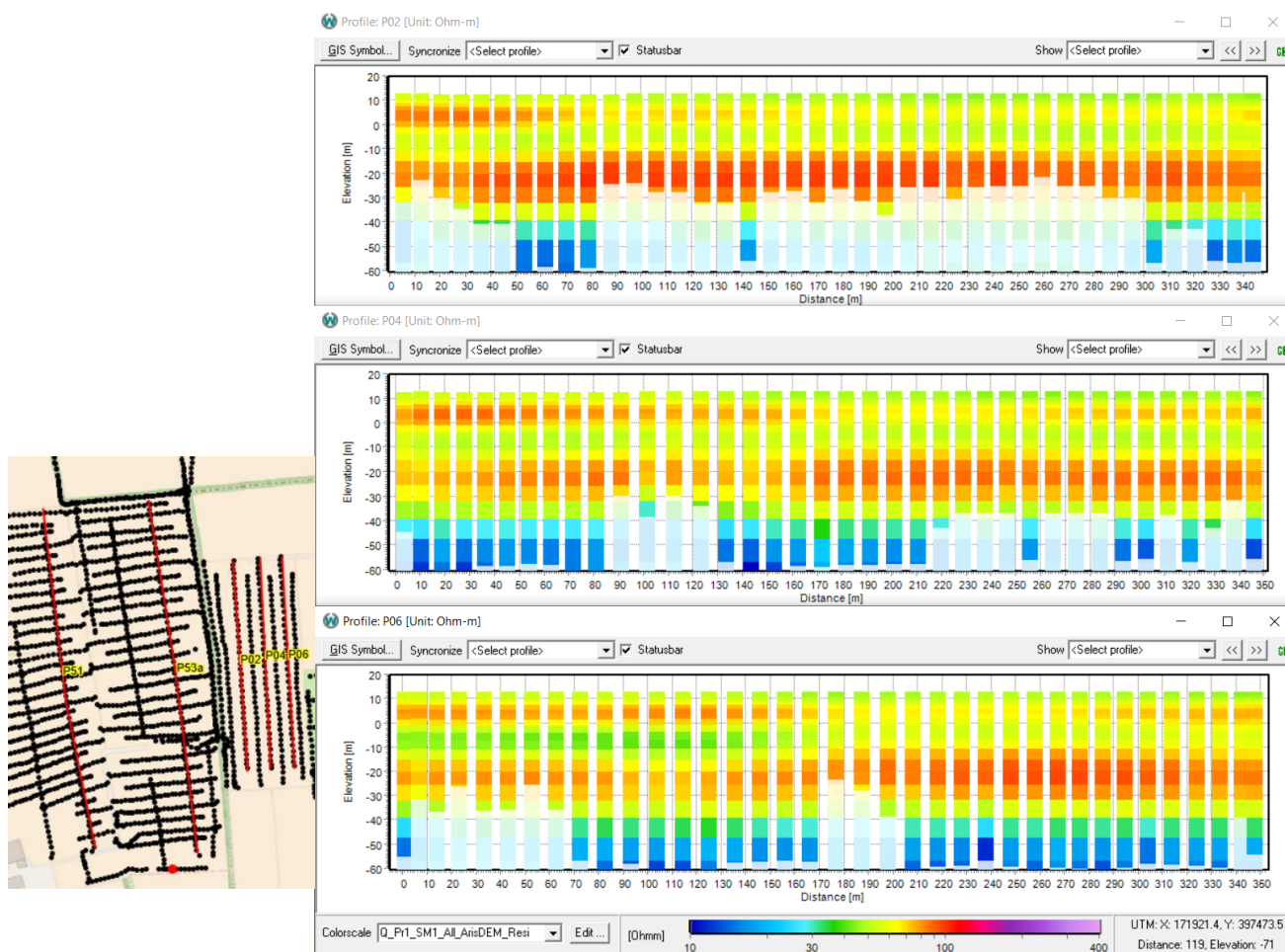
- Er komt aan maaiveld plaatselijk een zeer dunne klei- of leemlaag voor;
- De bovenste 16 tot 20 m bestaat grotendeels uit (grof) zand van de Formatie van Boxtel en de Formatie van Beegden. Er is geen duidelijk elektromagnetisch onderscheid zichtbaar tussen deze twee formaties;
- Onder dit grove zand ligt van 20 tot 60 m diepte een zandlaag met meer lutumbijmenging afgewisseld met lagen grover zand;
- Vanaf -45 m -NAP (circa 55 m diepte) komt klei voor behorende tot de Formatie van Stramproy. Deze ligt over de gehele lengte van de profielen op dezelfde diepte.

Tevens laat profiel P53a zien dat – langs deze lijn – de bovenste laag grof zand in het midden dunner is en vooral naar het zuiden toe dikker wordt.



Figuur 6-3: Noord-zuid georiënteerde tTEM profielen P51 en P53a en een kaartje met de ligging ervan. Lage weerstanden worden weergegeven in blauw, overeenkomend met klei; hoge weerstanden in donkerrood en paars (grof zand); de tussenliggende weerstanden betreffen een mengvorm van deze twee grondsoorten. Vanaf 45 m -NAP komt over de gehele lengte van de profielen klei van de Formatie van Stramproy voor.

Figuur 6-4 toont drie tTEM profielen gelegen in het oostelijke perceel. De profielen tonen een vergelijkbare opbouw van de bodem als die van het westelijke perceel (Figuur 6-3). Op grotere diepte zijn een aantal trajecten lichtgekleurd, deze data zijn minder betrouwbaar. Evengoed kan worden gesteld dat de overgang tussen hoge en lage weerstanden over de gehele lengte van de profielen rond de -45 m NAP ligt.



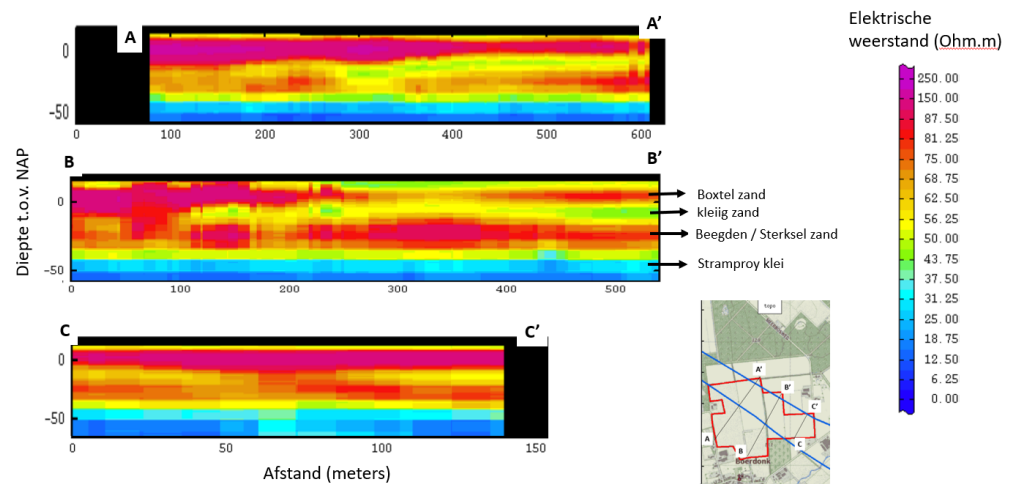
Figuur 6-4: Drie noord-zuid georiënteerde tTEM profielen P02, P04 en P06 in het oostelijk gelegen perceel. De lichte, grijsblauwe kleuren op grotere diepte duiden aan dat de resultaten op die diepte minder betrouwbaar zijn.

Het verticale verzet zoals dat in het Regis model wordt getoond is in de orde van 6 - 9 m. Dit is iets groter dan de geschatte verticale resolutie van de tTEM op een diepte van 45 m (ong. 5 m). Bij aanwezigheid van een breuk zou in het naar boven geschoven gebied de Stramproy klei hoger moeten voorkomen. Dat is niet het geval. De verticale resolutie van de tTEM neemt toe tot ca. 1 m nabij het maaiveld. Ook in de ondiepere aanwezige lithologische lagen zijn geen patronen van verschuiving waargenomen die duiden op verticaal verzet.

6.2 3D model

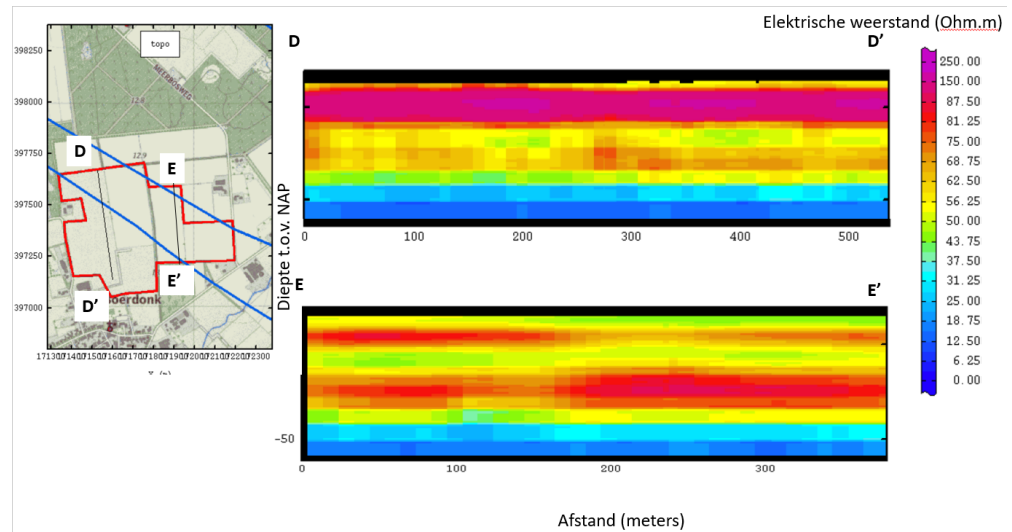
De individuele inversie resultaten (1D) zijn in het geostatistische softwarepakket ISATIS® geïnterpoleerd naar een 3D voxel model. Door dit 3D model zijn

dwarsprofielen getrokken met een zuidwest-noordoost oriëntatie, loodrecht op de verwachte ligging van de breuken. In Figuur 6-5 worden drie van deze profielen getoond, gelegen verspreid over het ingemeten gebied, tot een diepte van ongeveer 60 m -NAP.



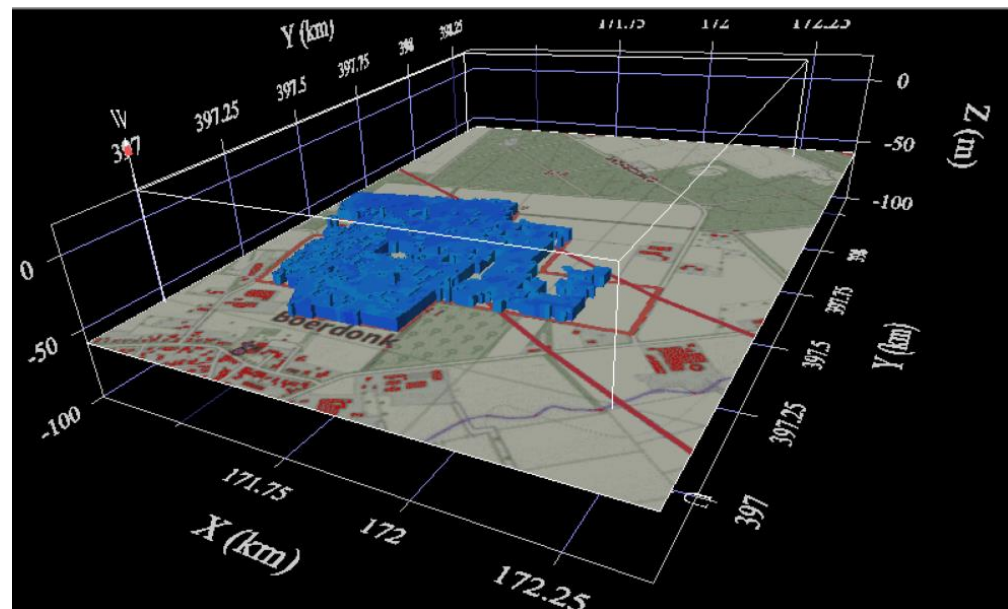
Figuur 6-5. Drie dwarsdoorsneden door het 3D voxel model, die de ruimtelijke verdeling van de elektrische weerstand laten zien. De top van de klei van de Formatie van Stramproy ligt overal op dezelfde diepte; er is daarom geen aanleiding om op basis van deze profielen verticale breukwerking te veronderstellen.

De profielen tonen de laterale variatie in elektrische weerstand welke een weergave is van de lithologische opbouw van de ondergrond. De stratigrafische interpretatie aangegeven in profiel B – B' is gebaseerd op de regionale kennis van de geologische opbouw. Op alle profielen is op een diepte van -45m NAP de overgang naar lage weerstanden zichtbaar, welke duidt op de aanwezigheid van de klei van de Formatie van Stramproy. De bovenzijde van dit kleipakket ligt overal op dezelfde diepte. Er zijn ook in deze profielen geen indicaties gevonden die duiden op verticaal verzet van de lagen in de ondergrond en dus op de aanwezigheid van een breuksysteem. Figuur 6-6 laat twee profielen met een noord-zuid oriëntatie zien. Ook op deze profielen ligt de top van de Formatie van Stramproy overal op dezelfde diepte. Tevens is in de ondiepere lagen geen verzet te zien.



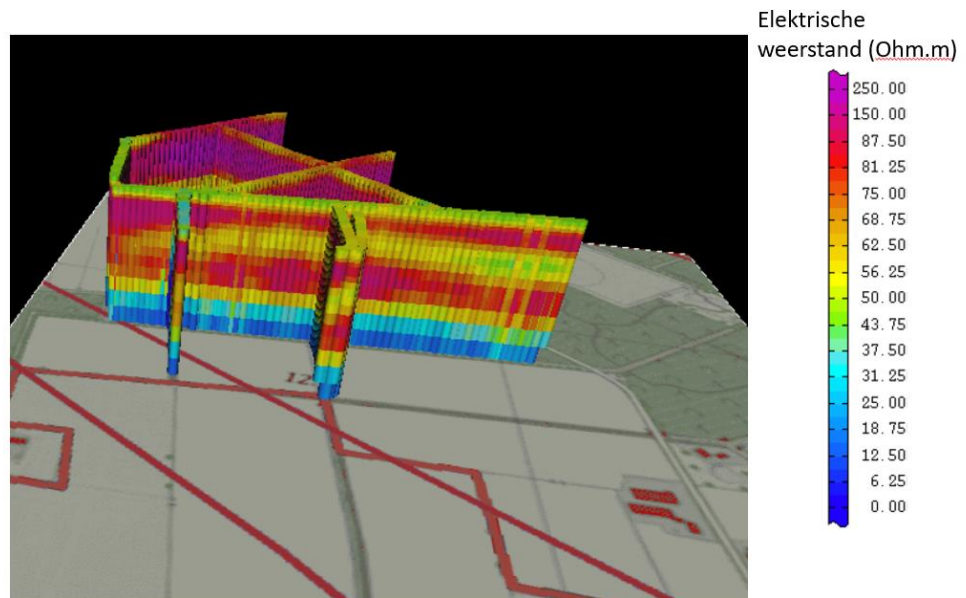
Figuur 6-6 Twee dwarsprofielen (noord-zuid) door het 3D voxelmodel. De top van de klei van de Formatie van Stramproy (lage elektrische weerstand) ligt overal op ongeveer 45m - NAP). Er zijn geen aanwijzingen dat in de ondergrond een breuk met verticaal verzet aanwezig is.

In Figuur 6-7 is een 3D aanzicht van de top van het kleipakket van de Formatie van Stramproy weergegeven (bovenzijde van de lage weerstanden op circa 45 m - NAP). Ook in deze figuur is geen sprong in de ligging van de top van het pakket te zien die zou kunnen duiden op de aanwezigheid van breukwerking.

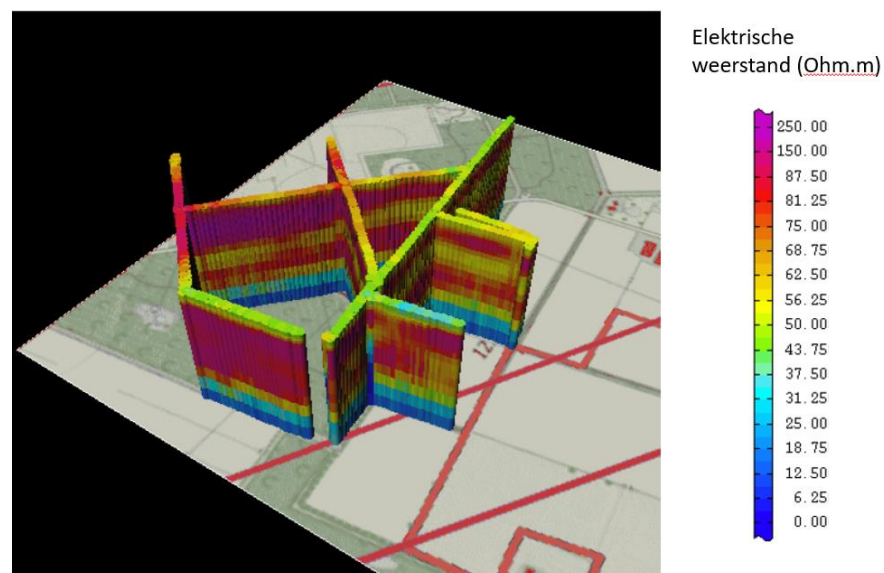


Figuur 6-7. 3D aanzicht (naar het noorden kijkend) van de voxels met een elektrische weerstand lager dan 20 Ohm.m, welke de top van de kleilaag aanduidt. De vlakke ligging van deze laag laat geen verticale sprongen zien, wat een sterke aanwijzing is voor de afwezigheid van breukwerking.

Ten noorden van de ingemeten percelen zijn tTEM metingen gedaan in het bos (op de bospaden). Omdat daar de afstand tussen de meetlijnen te groot is kan ter plaatse geen 3D model worden gemaakt. Figuur 6-8 en 6-9 tonen een 3D weergave van de 2D lijnen. Het algemene beeld van de verticale opbouw van de elektrische weerstand is in het bosgebied niet anders dan op de percelen ten zuiden ervan. Ook hier is geen aanwijzing op breukwerking, de lagen vertonen geen plotselinge veranderingen in diepteligging.



Figuur 6-8. 3D weergave van de elektrische weerstand op 2D meetlijnen in het bosgebied. Weergegeven is het dieptebereik tot circa 60m -NAP. De top van de klei van de Formatie van Stramproy ligt op circa 45 m -NAP.



Figuur 6-9. 3D beeld van de elektrische weerstand op 2D meetlijnen in het bosgebied. Weergegeven is het dieptebereik tot 60m -NAP. De top van de klei van de Formatie van Stramproy ligt op alle lijnen op circa 45 m -NAP.

7 Conclusies

De tTEM techniek is ingezet om mogelijke breukwerking, die zich manifesteert in een verticale sprong in de diepteligging van sedimenten in de ondergrond, op te sporen. In één werkdag zijn op een aantal percelen en op een aantal bospaden ten noorden van de percelen metingen verricht. De resultaten van de tTEM metingen laten variatie zien in elektrische weerstand die is te relateren aan verschillende grondsoorten, met name zand en klei.

Er komt aan maaiveld plaatselijk een zeer dunne klei- of leemlaag voor. De bovenste 16 tot 20 m van de ondergrond bestaat grotendeels uit (grof) zand van de Formatie van Bortel en de Formatie van Beegden. Onder dit grove zand ligt van 20 tot 60 m diepte een zandlaag met meer lutumbijmenging afgewisseld met lagen grover zand. Vanaf 45 m -NAP (circa 55 m diepte) komt klei voor behorende tot de Formatie van Stramproy. Deze ligt over de gehele lengte van de profielen op dezelfde diepte.

Er zijn geen verticale sprongen ('verzet') in de diepteligging van de klei van de Formatie van Stramproy sedimenten waargenomen die duiden op verticaal verzet. Ook de ondieper gelegen sedimentpakketten vertonen geen plotselinge verandering in diepteligging die zou kunnen wijzen op verticaal verzet.

De conclusie is dat de tTEM metingen op de ingemeten locaties ten noorden van Boerdonk geen indicaties laten zien zijn die wijzen op het voorkomen van een breuk met verticaal verzet in de bovenste 60 m van de ondergrond.

8 Ondertekening

Naam en ondertekening 2^e lezer

Dr. M.A.J. Bakker

Ondertekening

Autorisatie vrijgave

Dr. J.A.C. Meekes
Auteur

Drs. D. Maljers
Research Manager