

tTEM onderzoek bodemweerstand Noordhoek

TNO 2026 R10596 – 2 april 2026

tTEM onderzoek bodemweerstand Noordhoek

Auteur	J. L. Gunnink
Rubricering rapport	TNO Public
Aantal pagina's	15 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	1
Opdrachtgever	Tennet
Projectnummer	060.68013

Alle rechten voorbehouden

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

© 2026 TNO

Inhoudsopgave

1	Inleiding.....	4
1.1	Bodemweerstand.....	4
1.2	Onderzoeksgebied	4
2	De metingen.....	6
3	Resultaten.....	8
4	Conclusies en aanbevelingen.....	13
4.1	Conclusies.....	13
4.2	Aanbevelingen.....	13
5	Ondertekening	14
Bijlage		
Bijlage A:	Resultaten van de drie geïnverteerde lijnen, zie bijgevoegde digitale files	15

1 Inleiding

1.1 Bodemweerstand

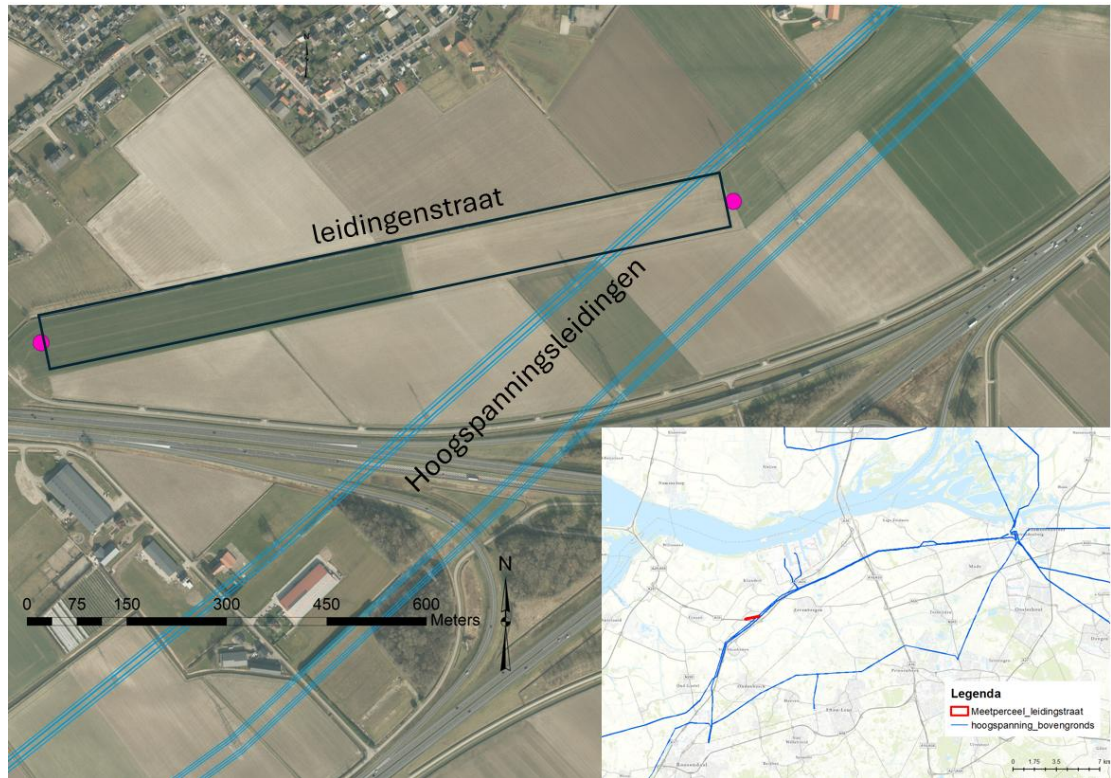
De elektrische weerstand van de bodem is een eigenschap die van belang is voor de aarding van ondergrondse infrastructuur. Tennet is van plan om ondergronds een transportleiding voor elektriciteit aan te leggen ten westen van Zevenbergen bij de plaats Noordhoek. Deze elektriciteitskabel zal komen te liggen in de zgn. leidingstraat, Figuur 1, waar reeds andere transportleidingen liggen, o.a. voor transport van gas en water. Om de elektrische bodemweerstand te meten t.b.v. de aarding heeft Tennet aan TNO gevraagd om te onderzoeken of de tTEM techniek hiervoor gebruikt kan worden. De term tTEM staat voor “towed Transient ElectroMagnetics”. Achter een quad wordt meetapparatuur voortgetrokken waarmee elektromagnetische velden worden opgewekt en waarmee de respons van de ondergrond wordt gemeten. Deze data kan worden verwerkt tot een model van de elektrische weerstand van de bodem.

Tennet heeft TNO op 4 december 2025 opdracht gegeven om het tTEM, zoals geoffreerd in 060.68013-01iv tTEM Tennet: “Proef bruikbaarheid tTEM techniek” uit te voeren.

De werkzaamheden en de resultaten van het onderzoek worden in dit rapport beschreven.

1.2 Onderzoeksgebied

Het onderzoek is uitgevoerd op de leidingstraat bij Noordhoek, ten westen van Zevenbergen. Op deze locatie zijn zowel objecten boven de grond als in de grond aanwezig die de metingen kunnen verstoren. Externe magnetische velden (afkomstig van hoogspanningsleidingen) en metalen objecten – zowel boven als onder de grond – zijn van invloed op de tTEM metingen. Het doel van het onderzoek is om na te gaan of er vanuit de tTEM metingen een betrouwbaar model van de elektrische weerstand kan worden verkregen in de leidingstraat, gezien de mogelijke verstoringen van de bovengrondse en ondergrondse (elektriciteits-) leidingen. Tevens kan worden bepaald hoe groot de afstand is waarop de verstoring zich voordoet.



Figuur 1: Ligging van het deel van de leidingenstraat waar het onderzoek is uitgevoerd, ten zuiden van Noordhoek, nabij Zevenbergen.

2 De metingen

In Figuur 2 staat de opstelling van het tTEM meetsysteem weergegeven. De quad rijdt met een snelheid van ong. 15 km/h in lijnen over het veld. De zender (rode apparaat) stuurt een elektromagnetisch signaal uit dat - nadat de stroom wordt uitgezet- in de ondergrond een tweede elektromagnetisch veld opwekt, d.m.v. wervelstromen. De witte ontvanger registreert de sterkte van het tweede elektromagnetisch veld. Er wordt gemeten in tijdsintervallen van microseconden, te beginnen direct nadat de stroom is uitgezet die het elektromagnetisch veld genereert. De eerste metingen geven informatie over het ondiepe deel, de latere metingen over het diepere deel van de ondergrond. De meetcyclus wordt 50 maal per seconde uitgevoerd tijdens het rijden met de quad en levert (na middeling) iedere 5m een meting op die vervolgens worden verwerkt tot elektrische weerstand. tTEM werkt met een zgn. “dual moment” techniek. Dit houdt in dat eerst een zwak elektromagnetisch veld wordt opgewekt, waarmee de bovenste 10-25 meter goed kan worden bemeaten. Vervolgens wordt een sterker elektromagnetisch veld gebruikt om dieper metingen uit te voeren. Om deze twee metingen goed op elkaar aan te laten sluiten is er een overlap.

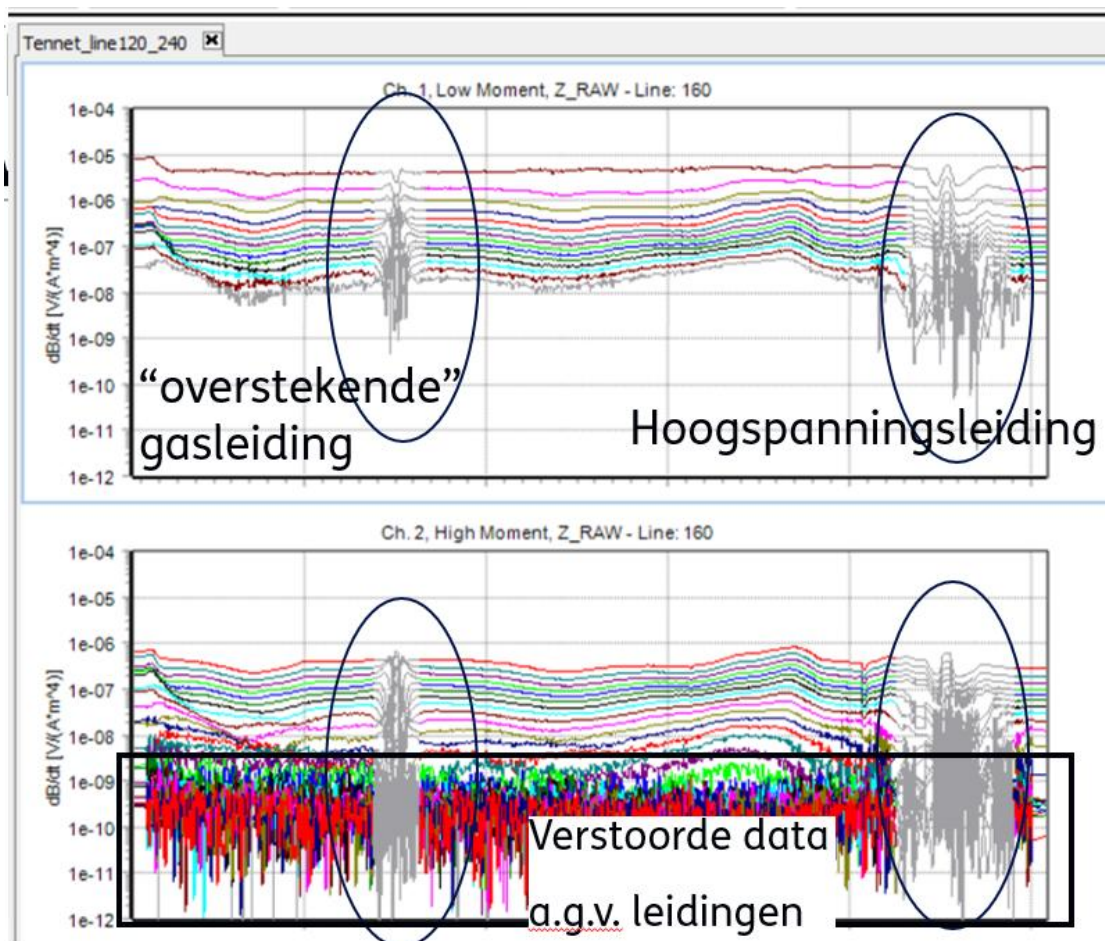


Figuur 2: Opstelling van het tTEM systeem: quad met daarachter het meetapparaat dat het elektromagnetisch signaal uitzendt; het witte instrument meet de response van de bodem. Tennet heeft voorafgaand aan de metingen gedetailleerde kaarten geleverd van de ligging van de leidingen in de leidingstraat. Ook heeft Tennet toestemming geregeld voor betreding van het terrein.

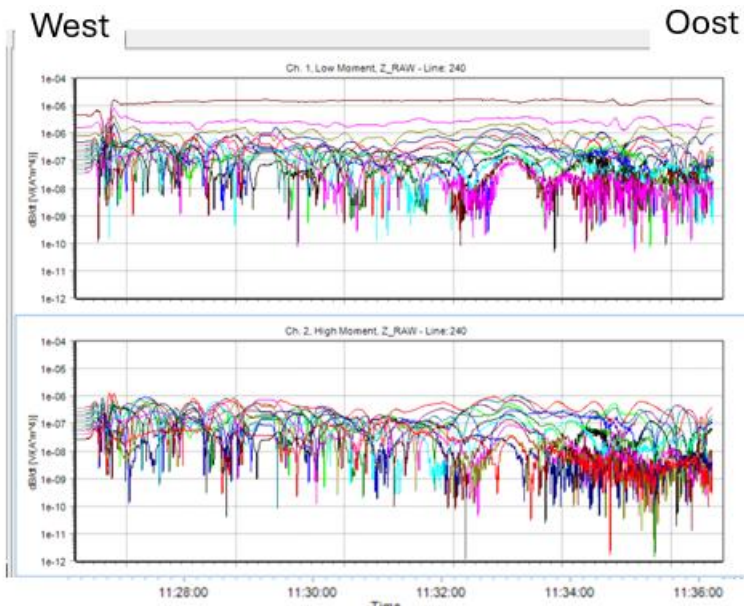
De metingen met de tTEM zijn door TNO op 17 december 2025 uitgevoerd in de leidingstraat. Het terrein was goed begaanbaar met de quad en er waren geen bijzonderheden tijdens de metingen. De metingen zijn uitgevoerd in een aantal parallelle lijnen in de lengterichting van de leidingstraat tot tussen de twee hoogspanningsleidingen. Op deze manier kan zowel de invloed van de hoogspanningsleiding als de invloed van de leidingen die aanwezig zijn aan de noordkant en zuidkant van de leidingstraat worden bepaald.

3 Resultaten

De tTEM metingen zijn verwerkt tot modellen van de elektrische weerstand van de ondergrond. De metingen zijn verwerkt in specialistische software ([AGS Workbench - Sequent](#)). Met deze software kan ook worden nagegaan of metingen zijn beïnvloed door externe oorzaken en tot hoever deze invloed rijkt. In Figures 3 en 4 zijn voorbeelden opgenomen van de verwerking en het verwijderen van verstoorde meetgegevens voorafgaand aan de bepaling van de elektrische weerstand. Het betreft data die op een meetlijn zijn opgenomen. In de data is goed te zien dat de metingen dichtbij de bovengrondse hoogspanningsleidingen sterk worden verstoord: de gekleurde lijnen die parallel aan elkaar horen te lopen en min of meer horizontaal, veroorzaken op sommige locaties ernstige verstoring. Tot een afstand van 30 - 50 meter (gemeten loodrecht op de hoogspanningsleiding) is deze verstoring zichtbaar in de metingen en kan er daarom in dat gebied geen model van de elektrische weerstand worden bepaald. De invloed van de hoogspanningsleiding op de metingen is complex, en niet eenduidig vooraf te bepalen. Dit blijkt o.a. uit het feit dat de afstand waarop de verstoring zichtbaar is niet constant is. Verder is te zien dat de metingen worden verstoord door de ondergrondse leidingen aan de noord- en zuidkant van de leidingstraat. In het midden van de leidingstraat zijn de metingen het minst verstoord.

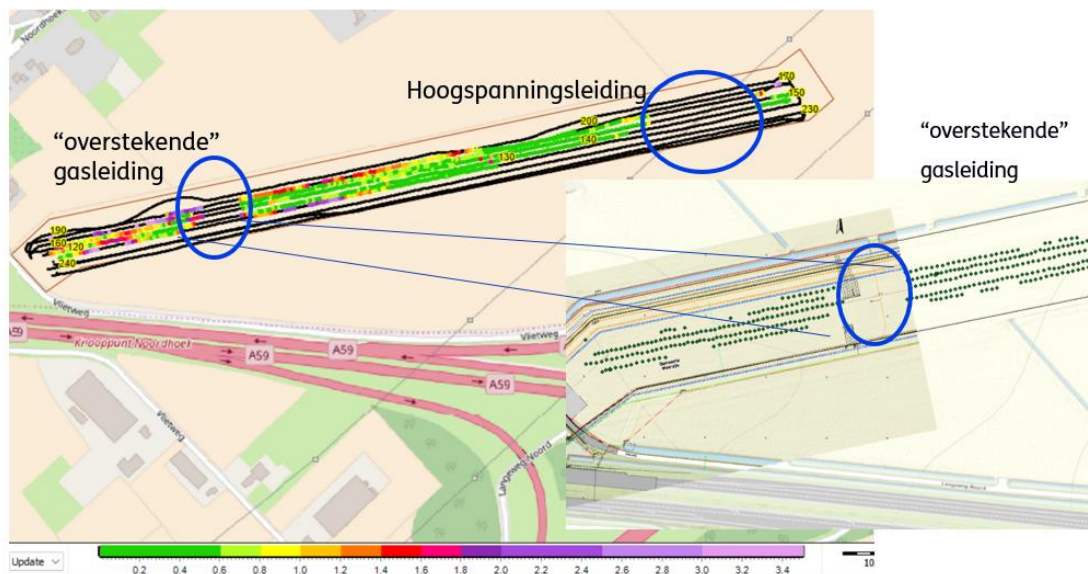


Figuur 3: Lijn 160, in het midden in de leidingstraat met voor een groot deel goede meetdata; de meetdata (gekleurde lijnen) lopen relatief vlak en er zijn weinig kruisende lijnen in het bovenste paneel (zgn. "low moment"). Alleen bij de hoogspanningsleiding en de gasleiding is verstoring te zien. Het onderste paneel ("high moment") laat meer verstoorde metingen zien, met name in het diepere deel. Het deel met de vlak lopende lijnen komt wat diepteligging betreft voor een groot deel overeen met het bovenste paneel. In beide panelen is de invloed van de hoogspanningsleiding en de gasleiding goed zichtbaar. Op de x-as staat de tijd weergegeven.



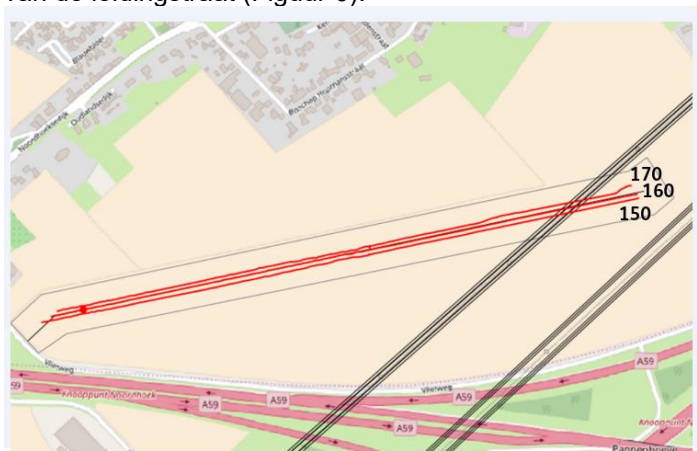
Figuur 4: Lijn aan de zuidkant van de leidingstraat, dichtbij ondergrondse leidingen (o.a. waterleiding). Zowel bovenste paneel ("low moment") als onderste paneel ("high moment") laten sterk verstoord meetsignaal zien. Deze metingen zijn niet bruikbaar. Op de x-as staat de tijd weergegeven.

De metingen worden verwerkt tot een model van de elektrische weerstand in de diepte. In het begin van de rekenmethode wordt een model van de elektrische weerstand aangenomen en wordt nagegaan of dit model past bij de metingen die zijn gedaan. Het model wordt net zo lang aangepast totdat het goed past op de metingen. Dit proces heet inversie. De software berekent een "misfit" tussen het model en de metingen. Dit is een maat voor de kwaliteit van de inversie. Een misfit kleiner dan 1 wordt als goed beschouwd. In Figuur 5 is te zien dat een groot deel van de middelste lijn in de leidingstraat aan dit criterium voldoet.



Figuur 5: Indicatie van de betrouwbaarheid van het bodemweerstandmodel; de kleuren groen en geel (waarde < 1) geven weer waar een goede fit van de metingen aan het model zijn berekend, de hogere waarden zijn minder betrouwbaar. Rond de hoogspanningsleiding en gasleiding zijn data verwijderd vanwege storende invloed.

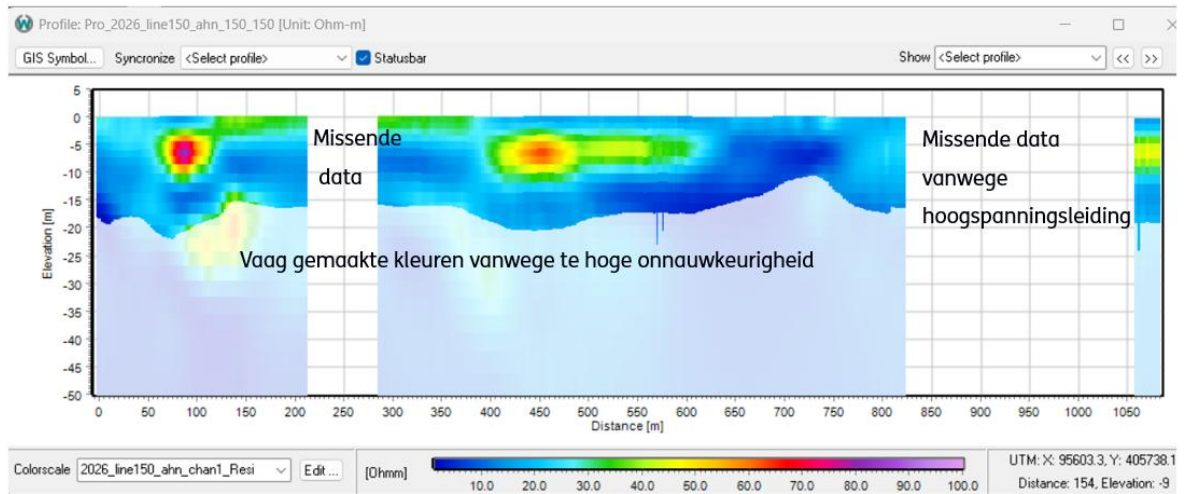
In Figuur 7 wordt de bodemweerstand getoond in de diepte van de drie lijnen in het midden van de leidingstraat (Figuur 6).



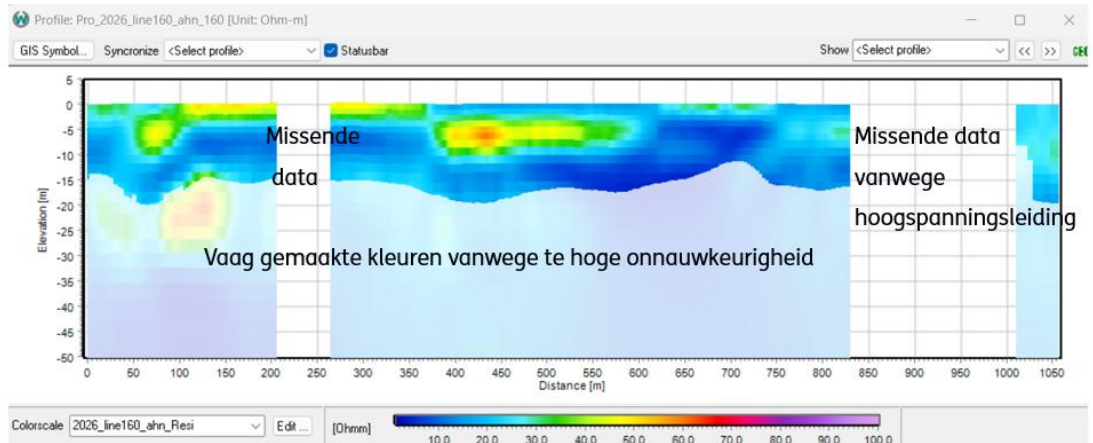
Figuur 6: Locatie van de 3 lijnen met goede meetdata

De metingen resulteren in een model van de bodemweerstand tot ong. 20m diepte. De reden dat niet dieper kon worden gemeten is dat vooral het deel van het systeem dat dieper kan meten (“high moment”) wordt beïnvloed door kabels en leidingen, zie Figuur 3 en 4. Wat verder opvalt is dat locaties voorkomen waar de bodemweerstand hoger is. Dit wordt mogelijk veroorzaakt door het voorkomen van meer zand in de ondergrond. Het gebied was vroeger een getijdegebied, waar zandige delen in kleine krekken kunnen voorkomen die een hogere weerstand (rode kleur in Figuur 7) hebben.

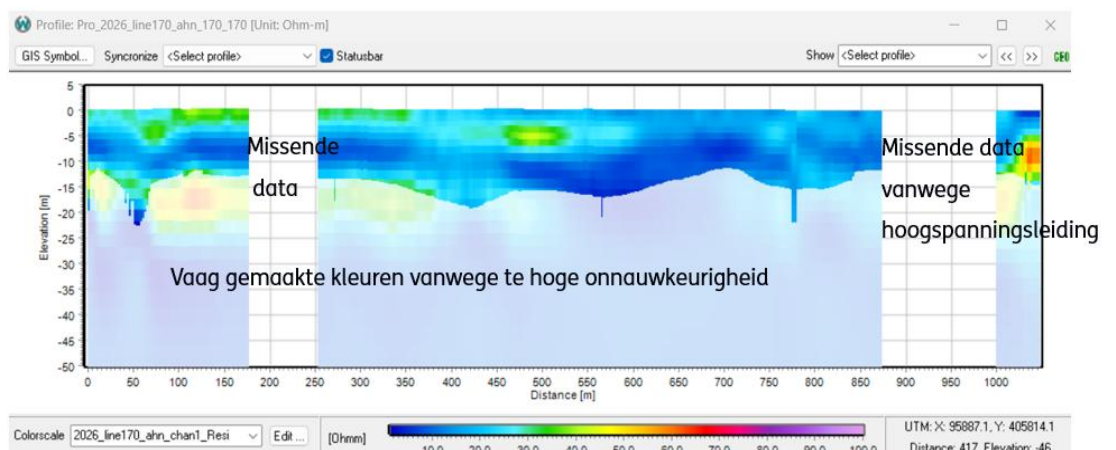
West **Lijn 150. Bodemweerstand in Ohm meter.** Oost



West **Lijn 160 op de middellijn van de leidingstraat; bodemweerstand in Ohm meter.** Oost

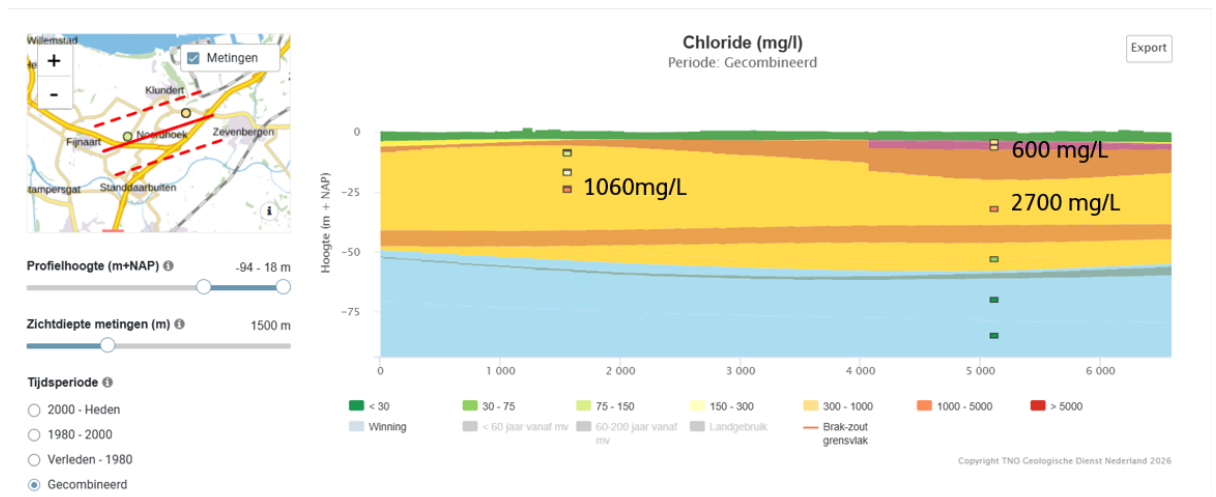


West **Lijn 170; bodemweerstand in Ohm meter.** Oost



Figuur 7: Bodemweerstand van de drie meetlijnen in het midden van de leidingstraat. Zie voor ligging Figuur 6. De afstand waarop de hoogspanningsleiding invloed heeft op de metingen is 30 – 50m.

Een belangrijke factor in de bodemweerstand is het zoutgehalte in het grondwater. Een hoog zoutgehalte zorgt voor een goede geleiding en dus een lage bodemweerstand. Het zoutgehalte in het grondwater is op de locatie niet bekend, wel zijn er metingen in de buurt ([Grondwaterkwaliteit in Beeld](#)). In Figuur 8 staat een profiel weergegeven met daarin twee metingen, ten noordoosten en ten zuidwesten van de tTEM meetlocatie. Hieruit blijkt dat het zoutgehalte verhoogd is (grens zoet-brak water is 300 mg/L), ook op geringe diepte. Dit kan mede de oorzaak zijn dat de bodemweerstand relatief laag is.



Figuur 8: Chloride gehalte in het grondwater nabij de onderzoek locatie. Gehaltes groter dan 300 mg/L duiden op brak grondwater en hebben invloed op de bodemweerstand.

4 Conclusies en aanbevelingen

4.1 Conclusies

De tTEM metingen in de leidingstraat bij Zevenbergen hebben geleid tot een model van de elektrische weerstand van de bodem tot ong. 20m diepte. De invloed van de bovengrondse hoogspanningsleiding is zichtbaar in de data tot een afstand van 30-50m, gemeten loodrecht op de hoogspanningsleiding. De ondergrondse leidingen die in de leidingstraat liggen hebben ook invloed op de metingen. In het midden van de leidingstraat waren de resultaten voor een groot gedeelte bruikbaar. De metingen dichterbij de ondergrondse leidingen, die aan de noord- en zuidzijde van de leidingstraat liggen, waren niet bruikbaar.

4.2 Aanbevelingen

Het doel van Tennet is om de bodemweerstand te bepalen in de gehele leidingstraat. De storende invloed van bovengrondse hoogspanningsleidingen en andere, ondergrondse leidingen belemmert dit.

Een aanbeveling is om te onderzoeken of de invloed van deze verstoringen op de tTEM metingen van tevoren kunnen worden gemodelleerd. Op die manier kan wellicht dichterbij de verstoringen worden gemeten.

Verder wordt aanbevolen om de resultaten van de tTEM metingen te vergelijken met de huidige meetmethoden die worden gebruikt om de bodemweerstand te meten. Deze vergelijking kan de waarde van de verschillende meetmethoden verduidelijken.

Ook wordt aanbevolen om op een andere locatie met verstoringen vergelijkbare tTEM metingen uit te voeren om na te gaan of de conclusies uit dit onderzoek breder gelden dan alleen de huidige meetlocatie. Variatie in de opbouw en samenstelling van de ondergrond kan een rol spelen, en wellicht ook de variatie in stroomsterkte van de hoogspanningsleiding.

5 Ondertekening

Utrecht, 2 april 2026

dr. B. Paap (TNO-GDN)
(Tweede lezer)

Autorisatie Vrijgave:
Utrecht, 2 april 2026

Utrecht, 2 april 2026

drs. J.L. Gunnink (TNO-GDN)
Auteur

A. Asschert, MSc. (TNO-GDN)
Research Manager a.i.

Bijlage A

Resultaten van de drie geïnverteerde lijnen, zie bijgevoegde digitale files

Energy & Materials TransitionEnergy & Materials Transition

Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
www.tno.nl