

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 2020 R10921

Modellering van de ondergrond van het Drentse Aa projectgebied t.b.v. het TopSOIL project m.b.v. helikopter elektromagnetische metingen.

Datum	29 januari 2020
Auteur(s)	Jan Gunnink
Exemplaarnummer	
Oplage	
Aantal pagina's	41 (excl. Bijlage)
Aantal bijlagen	2
Opdrachtgever	Provincie Drenthe INTERREG TopSOIL
Projectnaam	TopSOIL
Projectnummer	060.23806

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.

© 2020 TNO



Samenvatting

Het Interreg project TopSOIL heeft als doel te onderzoeken welke maatregelen klimaatbestendigheid van regio's kunnen versterken. Een belangrijk aandachtspunt hierbij is de waterhuishouding, zodat extremen in neerslag (zowel te veel als te weinig) kunnen worden opgevangen. Het waterbergend vermogen van de ondergrond speelt hierbij een grote rol. In het Drentse Aa onderzoeksgebied is de aandacht gericht op een meer gedetailleerd beeld van de bovenste tientallen meters van de ondergrond t.b.v. een gedetailleerd inzicht in de mogelijkheden van waterberging / onttrekking.

De ruimtelijke verbreiding en de dikte van lagen die de stroming van grondwater beïnvloeden zijn in kaart gebracht met behulp van een nieuwe techniek, nl. elektromagnetische metingen vanuit een helikopter. Deze techniek is gevoelig voor elektrische weerstand verschillen in de ondergrond, die voor een groot deel afhankelijk zijn van de aanwezigheid van klei. Daarom is deze techniek bij uitstek geschikt om die eenheden op te sporen die de grondwaterstroming beïnvloeden. Het resultaat van de helikopter metingen is een gebieds-dekkende, 3-dimensionale model van de elektrische weerstand van de ondergrond. In combinatie met boringen, geofysische informatie (boorgatmetingen, Hoge resolutie Seismiek), geotechnische informatie (sonderingen) en kennis van de geologische ontstaansgeschiedenis is een 3-dimensionaal voxel model berekend, waarin in iedere voxel de kans op voorkomen van klei is gegeven. Hierop gebaseerd is vervolgens de hydraulische weerstand berekend. De belangrijkste eenheden die de hydraulische weerstand beïnvloeden zijn de kleien uit de Formatie van Peelo en de kleien uit de Eem Formatie.

In het onderzoeksgebied worden tevens afzettingen gevonden die bestaan uit klei-laagjes in een fijn-zandige matrix. Deze afzettingen zijn in het model van de elektrische weerstand te herkennen en zijn tevens voorzien van hydraulische weerstand.

In het onderzoeksgebied komt ondiep (tussen de -150m en - 600m NAP) steenzout voor. In het elektrische weerstandmodel worden op de locatie van de steenzout voorkomens lage weerstanden gemeten, die duiden op een invloed van de dieper gelegen zoutvoorkomens. Nabij Anloo is de invloed van het zout in de ondergrond op de grondwaterkwaliteit mogelijk tot -40m NAP zichtbaar.

Hoge Resolutie Seismiek heeft de ligging van een begraven geul uit de Elster ijstijd aangetoond, waarvan de interpretatie wordt ondersteund door het elektrisch weerstandsmodel.

Het gebruik van de gebieds-dekkende helikopter metingen en de daaruit volgende elektrisch weerstand model zijn zeer nuttig gebleken om een gedetailleerd model van de ondergrond te berekenen. Dit heeft geleid tot nieuwe inzichten omtrent het voorkomen van kleien in de Peelo Formatie en de Eem Formatie en in de verbreiding van "fijne zanden" met klei (-laagjes). Het model van de hydraulische weerstand (tot -50n MAP) dat vervolgens is berekend kan als invoer dienen voor grondwaterstroming modellen.

Validatie m.b.v. sonderingen (uitgevoerd als een separate opdracht van Waterschap Hunze en Aa's) heeft het voorkomen en dikte van de potklei, zoals die uit de helikoptermetingen is vastgesteld, bevestigd.

Inhoudsopgave

Bijlage(n)

A **Vergelijking tussen elektrische weerstand model en Pe-k-1 in REGIS II, v2.2**

B

Samenvatting

Inleiding.....4

Geologische geschiedenis.....6

Gegevens10

Analyse.....20

Conclusies en aanbevelingen.....39

Referenties.....40

Ondertekening.....41

Appendix 1

Vergelijking tussen elektrische weerstand model en Pe-k-1 in REGIS II, v2.2

Appendix 2

Validatie model van de verbreiding van Peeloklei (potklei) in Drentsche Aa gebied



1 Inleiding

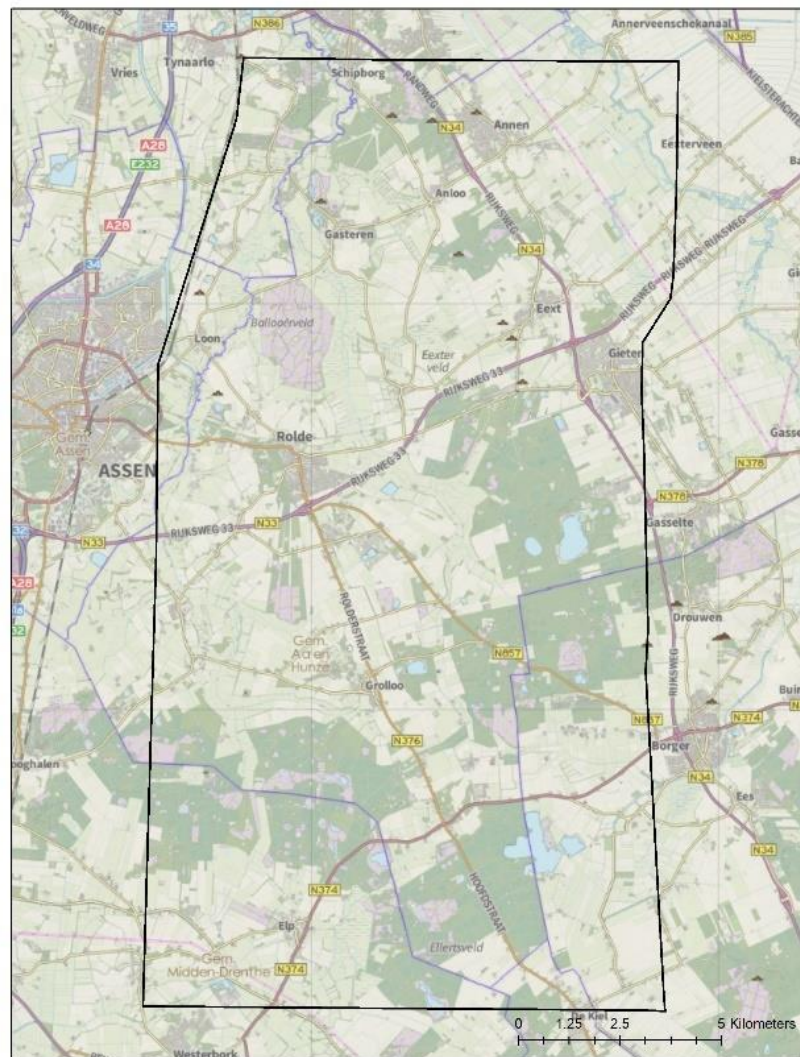
Het Interreg-project Topsoil heeft tot doel de klimaat-bestendigheid te vergroten door onderzoek te initiëren en maatregelen voor te stellen op het gebied van waterhuishouding.

In het TopSOIL onderzoeksgebied Drentse Aa zijn een aantal onderzoeken uitgevoerd die tot doel hebben een beter inzicht te krijgen in de waterhuishouding. In dit rapport worden de resultaten gepresenteerd van het onderzoek naar de opbouw en eigenschappen van de ondergrond in het Drentse Aa gebied tot -50m NAP. Up-to-date informatie van de ondergrond is van groot belang om te kunnen voorspellen wat de effecten van bepaalde maatregelen op de waterhuishouding in een gebied zijn. Een gedetailleerd model van de ondergrond is daarbij een van de uitgangspunten voor de voorspelling van effecten van klimaatverandering (en de effecten van maatregelen) op de waterhuishouding.

In de “klassieke” modellering van de ondergrond wordt puntinformatie (boringen, sonderingen, boorgatmetingen) gecombineerd met geologische kennis van de ontstaanswijze om tot een gebied-dekkend model te komen. Hierbij speelt de data-dichtheid een belangrijke rol in de mate van nauwkeurigheid die bereikt kan worden. De data-dichtheid is in de bovenste paar meter vaak redelijk goed, maar in het diepte bereik dieper dan 5-10m onder maaiveld neemt de data-dichtheid sterk af. Hierdoor zijn de modellen in dit diepte-bereik vaak niet nauwkeurig genoeg om op lokale (en soms zelfs op regionale) schaal te gebruiken.

Aanvullende informatie die op een snelle en relatief goedkope wijze kan worden ingewonnen en een grote data-dichtheid heeft is zeer waardevol om de modellen van de ondergrond te verbeteren. Hiertoe is in het Drentse Aa gebied een helikopter survey uitgevoerd met een geofysische meetmethode, die gebruik maakt van Electro Magnetisme. Hierbij wordt een elektromagnetisch veld opgewekt in de ondergrond en de reactie daarop wordt gemeten. Dit resulteert in een model van de elektrische weerstand van de ondergrond in de diepte. Dit model is vervolgens, samen met de andere gegevens, geanalyseerd tot een 3-dimensionaal model van de belangrijkste karakteristieken van de ondergrond die van belang zijn voor de waterhuishouding. Dit betreft met name de slecht doorlatende sedimenten betreffen, die hebben immers de grootste invloed op de stroming van (grond-) water. In Figuur 1 staat de omtrek van het studiegebied weergegeven.

Het TopSOIL project richt zich met name op de bovenste 10-tallen meters van de ondergrond. In het Drentse Aa gebied is daarom de ondergrens van het model gesteld op -50m NAP. De gebruikte elektromagnetische techniek die is gebruikt is dan ook zo “afgesteld” dat de er een zo hoog mogelijke resolutie in het bovenste delen van de ondergrond wordt verkregen. De resultaten die worden gepresenteerd in deze rapportage zijn geldig tot -50m NAP, behalve als anders aangegeven. Vanwege de resolutie van de helikoptermetingen is een gridcel grootte van 50x50m gekozen, zie verdere uitleg in de paragraaf over de verwerking van de helikopter data.



Figuur 1. Ligging van het studiegebied.

2 Geologische geschiedenis

In dit hoofdstuk wordt een korte beschrijving van de geologische geschiedenis gegeven, voor zover relevant voor de sedimenten die tot -50m NAP voorkomen. De belangrijkste bronnen van informatie zijn Bosch (1990), de Mulder et al. (2003) en de Stratigrafische Nomenclator van de Geologische Dienst Nederland, zoals deze is gepubliceerd op www.dinoloket.nl.

De geologische geschiedenis van de ondergrond van het Drentse Aa gebied die relevant is voor dit project begint in het Laat Perm. In deze geologische periode (250 miljoen jaar geleden) zijn dikke zoutpakketten die behoren tot de Zechstein groep afgezet in een grote binnenzee. Dit heeft geresulteerd in steenzout afzettingen in de diepe ondergrond van Noord-Nederland, die later naar boven zijn gekomen. De zoutafzettingen vertonen nl. plastisch gedrag (onder druk) waardoor er zoutpilaren / zoutkussens kunnen ontstaan die tot relatief dicht onder het oppervlak kunnen voorkomen. Door deze plastische vervorming zijn vaak ook de bovenliggende sedimenten vervormd. In de daaropvolgende tijd zijn gesteenten gevormd die nu diep in de ondergrond liggen, en voor dit onderzoek niet relevant zijn.

In het geologisch tijdvak Paleogeen (66 – 23 miljoen jaar geleden) en het Neogeen (23 – 2.58 miljoen jaar geleden) zijn afzettingen gevormd in een ondiep marien en kustnabije omgeving. Deze sedimenten worden tot de Formatie van Breda gerekend en bestaan uit fijn zand dat rijk is aan glauconiet en kalk, en uit klei met zandige en siltige bijmenging. Op de Formatie van Breda ligt de Formatie van Oosterhout die bestaat uit zand (fijn tot grof) met schelpgruis met soms een bijmenging van klei en glauconiet.

De volgende relevante periode begint in het Pleistoceen (2.58 miljoen jaar geleden), het tijdvak waarin een aantal (zeer) koude periodes voorkomen, de zgn. ijstijden. In het begin van het Pleistoceen zijn dikke pakketten fluviaatiele sedimenten afgezet, die door rivieren vanuit het Noordoosten zijn aangevoerd, de afzettingen van de Formatie van Peize en van Appelscha. Daarna zijn de sedimenten die behoren tot de Formatie van Urk afgezet, dit zijn veelal (grove) zanden van een voorloper van de Rijn. In de Elster ijstijd (465.000 – 418.000 jaar geleden) zijn onder het landijs, dat toen grote delen van Noord-Nederland bedekte, diepe dalen gevormd door water dat onder grote druk van de ijsmassa een uitweg vond door het onderliggend sediment te eroderen. De resulterende dalen (soms tunneldalen genoemd) kunnen een diepte van honderden meters bereiken en vertonen een grillig verloop, zowel lateraal als in de verticaal, waardoor deze moeilijk zijn te karteren. Deze dalen zijn opgevuld met grof materiaal (zand en grind) en op een aantal plaatsen, maar niet overal, komt ook (zware) klei voor, de zgn. "potklei". De potklei is echter niet beperkt tot de tunneldalen, ook buiten de tunneldalen kan (pot) klei zijn afgezet, soms in (lokale) depressies in het toenmalige, onregelmatig geaccidenteerde landschap. Daarnaast zijn in de Elster ijstijd dikke pakketten fijn tot uiterst fijn zand afgezet. Het is niet geheel duidelijk onder welke milieu-omstandigheden dit heeft plaatsgevonden. Bosch et al. (2014) duiden deze als afzettingen gevormd door smeltwateruitbraak, waarbij minder energie betrokken was dan de "klassieke" smeltwateruitbraak (die vaak resulteren in grove afzettingen). In het Drentse Aa gebied komen tunneldalen en potklei voor. De precieze begrenzingen zijn moeilijk vast te stellen op basis van boringen alleen. De sedimenten uit deze ijstijd worden tot de Peelo Formatie gerekend.

Na de Elster ijstijd warmde het klimaat op waarna er weer een sterke afkoeling plaats vond: de Saale ijstijd, 238.000 – 126.000 jaar geleden. Tijdens het eerste deel van de Saale ijstijd zijn lokaal in het Drentse Aa gebied fijne tot matig grove zanden van de Formatie van Drachten afgezet, in een koud klimaat. Het betreffen voornamelijk windafzettingen en lokale rivierafzettingen. De zanden zijn grover dan de fijne zanden van de Formatie van Peelo.

In het latere deel van de Saale ijstijd was het noordelijk deel van Nederland bedekt met landijs, en zijn reliëfvormen in het landschap ontstaan die nu nog te herkennen zijn, o.a. de Hondsrug, en is kleileem afgezet onder en voor het ijs. De keileem is een bekend verschijnsel in het Drentse Aa gebied. Het komt op een aantal plaatsen voor aan de oppervlakte en is daardoor goed karteerbaar. De dikte van de keileem is lastig vast te stellen, maar in het algemeen gaat het om diktes tot max. 5m.

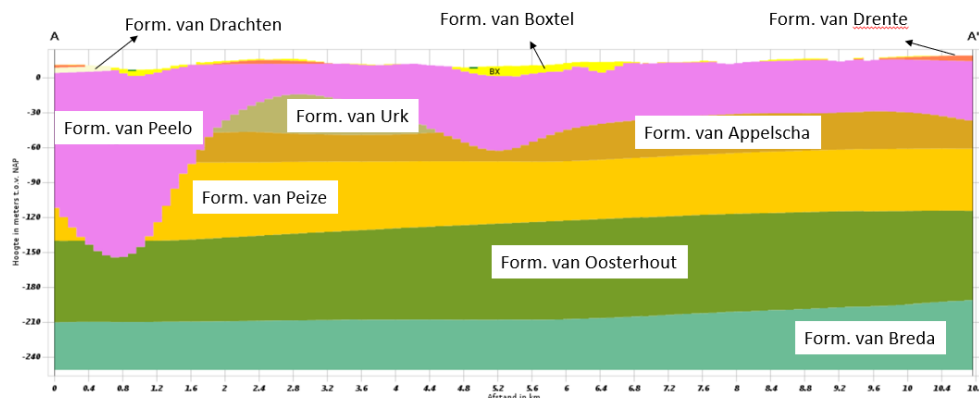
In de warme tijd volgend op de Saale ijstijd, het Eem (126.000 – 116.000 jaar geleden), stijgt de zeespiegel en worden in het Hunzedal mariene sedimenten afgezet, waaronder klei. Gedurende de volgende ijstijd, het Weichsel (116.000 – 11.700 jaar geleden), komt geen ijsdek voor in Nederland, wel worden dekzanden (door de wind afgezette sedimenten) afgezet, behorende tot de Formatie van Boxtel. In de huidige warme tijd, het Holoceen, wordt lokaal veen gevormd en wordt het landschap door grootschalig menselijk ingrepen beïnvloedt.

Resumerend: de belangrijkste afzettingen in het Drentse Aa gebied zijn (van boven naar onder):

- Holocene afzettingen, vnl. in de beekdalen en veen (Holoceen: HL)
- Dekzand, uit het Weichsel ijstijd (Boxtel: BX)
- Keileem, uit de Saale ijstijd (Drente: DR)
- Zanden (wind en rivier afzettingen) (Drachten: DN)
- Tunneldalen, potklei en (fijne) zanden uit de Elster ijstijd (Peelo: PE)
- Rivier afzettingen (voorlopers van de Rijn) (Urk: UR)
- Rivierafzettingen van oostelijke rivieren (Appelscha (AP) en Peize (PZ))
- Kustnabije afzettingen (Oosterhout (OO) en Breda (BR))
- Zoutpilaren die door plastische vervorming uit de diepe ondergrond omhoog zijn gekomen

In Figuur 2 is een dwarsprofiel door het Digitaal Geologisch Model (DGM) weergegeven, met de belangrijkste geologische eenheden. Het profiel loopt van Assen naar Gieten. Wat opvalt is het grote aandeel van de Formatie van Peelo, vaak tot aan maaiveld.

Verticale Doorsnede DGM v2.2



Figuur 2. Representatieve doorsnede door de bovenste 200m, met de belangrijkste geologische Formaties.

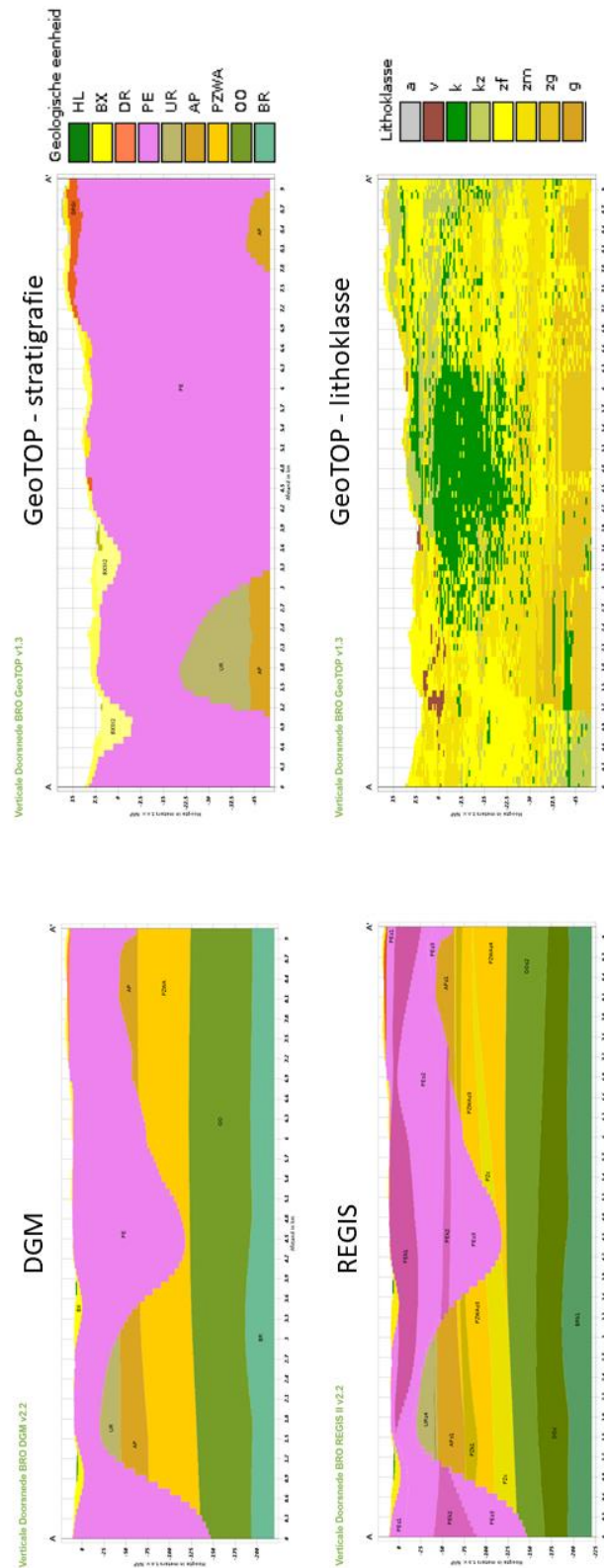
Aanwezige modellen van de ondergrond

In het Drentse Aa gebied zijn 3 modellen van de ondiepe ondergrond aanwezig. Het Digitaal Geologisch Model (DGM) beschrijft de opbouw tot ong. 500m – NAP op Formatie niveau. De lagen zijn ingedeeld naar geologische Formaties, de hoogste ordening binnen de geologische systematiek van de ondergrond. Formaties groeperen sedimenten die ruwweg in eenzelfde tijdsperiode zijn gevormd in een vergelijkbaar milieu (rivier, ijs, zee). Formaties zijn dus niet onderscheidend op grondsoort, er kan zowel klei als zand als grind voorkomen in eenzelfde formatie. Naast boringen worden ook andere datasoorten zoals boorgatmetingen, seismiek, genetisch concept en geologische kennis over de ontstaanswijze ingebracht in de modellering om zo tot een plausibel geologisch model te komen (Gunnink et al. 2013)

Het Regis model verdeelt de Formaties verder in goed doorlatende lagen en slecht doorlatende lagen. Daartoe worden de boringen geïnterpreteerd op basis van de kenmerkende grondsoort en wordt bepaald of deze water doorlatend is of juist niet. Vervolgens wordt een lagenmodel geconstrueerd, waarin naast de geïnterpreteerde boringen ook informatie uit andere bronnen worden betrokken, zoals stijghoogte metingen (Vernes en van Doorn, 2005).

Het DGM en het Regis lagenmodel zijn gebaseerd op een beperkt aantal boringen, die vaak van redelijk tot goede kwaliteit zijn en die min of meer regelmatig verdeeld zijn over Nederland. Het betreft vaak de diepere boringen met goed beschreven en gedocumenteerde beschrijvingen van de sedimenten. In gebieden waar dat nodig is vanwege geringe datadichtheid of complexe geologie zijn ook ondiepe boringen betrokken in de modellering en minder goed / gedetailleerd beschreven boringen. Het GeoTOP model is een 3D voxel model, waarin de ondergrond is onderverdeeld in "blokjes" van 100x100m met een dikte van 0.5m. Van iedere voxel is bekend wat de geologische eenheid is en wat de lithoklasse (~grondsoort) is. In de modellering van het GeoTOP model worden (bijna) alle boringen gebruikt. De modellering resulteert in een stochastisch model, dit betekent dat er voor iedere voxel een kans wordt berekend op iedere grondsoort binnen een geologische eenheid. Tevens wordt een "meest waarschijnlijke lithoklasse" berekend, zie voor meer detail Stafleu et al. (2019). Het GeoTOP model reikt tot maximaal 50m -NAP. In het Drentse Aa gebied is GeoTOP alleen beschikbaar in het meest noordelijk deel (ruwweg ten noorden van lijn Assen – Gieten).

In de navolgende figuren zijn doorsneden door de modellen weergegeven, die een indruk geven van de huidige kennis van de opbouw van de ondergrond in het gebied. Het profiel loopt van Loon, over het Balloerveld naar Eext.



Figuur 3. Dwarsdoorsnede (West-Oost) door DGM, Regis en GeoTOP, ter hoogte van Balloerveld. Voor legenda van de geologische Formaties, zie tekst. De donkere kleuren in het Regis profiel zijn scheidende lagen. De lithoklassen zijn a: antropgeen; v:veen; k:klei; kz: zandige klei; zf: zand, fijn; zm: zand, matig grof; zg: zand, grof; g: grind.

3 Gegevens

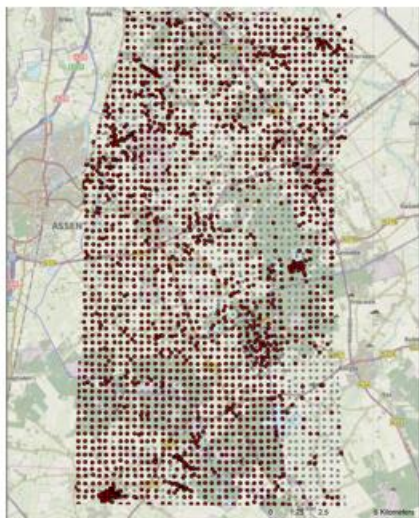
De hier gerapporteerde modellering van de ondergrond van het Drentse Aa gebied is gebaseerd op een combinatie van boringen, boorgatmetingen, helikopter elektro magnetische metingen, seismiek en geologische kennis. In de volgende paragrafen wordt voor ieder data-type de analyse beschreven die is uitgevoerd t.b.v. het doel van de modellering: het in kaart brengen van de samenstelling en hydraulische weerstand van de tot -50m NAP.

Boringen

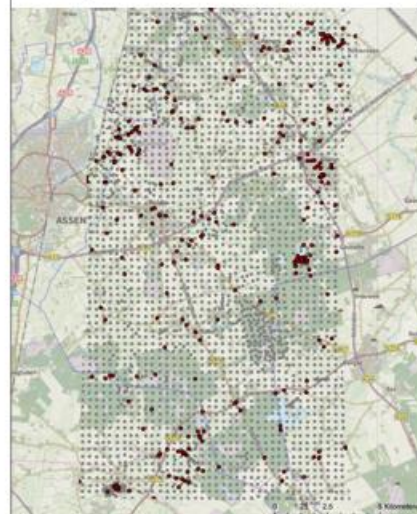
In het studiegebied zijn een groot aantal boringen in de DINO database opgeslagen. In Figuur 4. staan de boringen per diepte interval weergegeven. Opvallend is het groot aantal ondiepe hand-boringen (tot 2m) en de zeer sterk afnemend aantal boringen met de diepte. Het is duidelijk uit deze figuren dat additionele data in het bereik onder 10m zeer waardevol is voor de modellering van de ondergrond.

De boringen zijn door de gebiedsdeskundigen van de Geologische Dienst voorzien van een classificatie in geologische Formaties. Ook zijn, in het kader van de Regis modellering, trajecten in de boringen ingedeeld in goed doorlatende lagen en slecht doorlatende lagen. In Figuur 5 staan de boringen weergegeven waarin de Peelo klei is aangetroffen, samen met de boringen waarin de zgn. PE-k-1 (ruwweg overeenkomend met slecht doorlatende lagen tot -50m NAP van de Peelo Formatie) is geclassificeerd. Wat opvalt is dat er een aantal boringen met Peelo klei voorkomen die niet zijn gebruikt voor de Regis kartering. De reden is waarschijnlijk dat de beschrijving te summier is of dat er reeds beter beschreven boringen in de omgeving zijn gevonden. Verder zijn er een aantal boringen geclassificeerd als PE-k-1, terwijl de boorbeschrijving klei niet de hoofdgrondsoort is. Een verklaring hiervoor en de gevolgen daarvan wordt verderop in dit rapport gegeven.

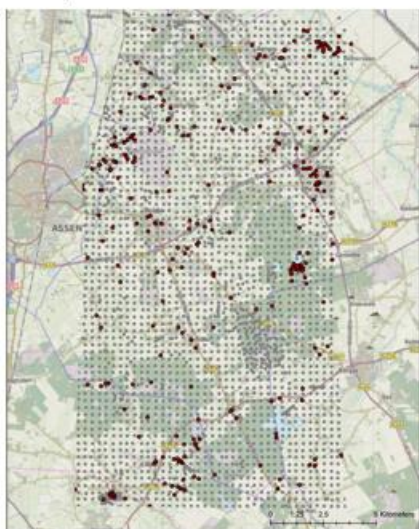
Dieper dan 2m -maaiveld



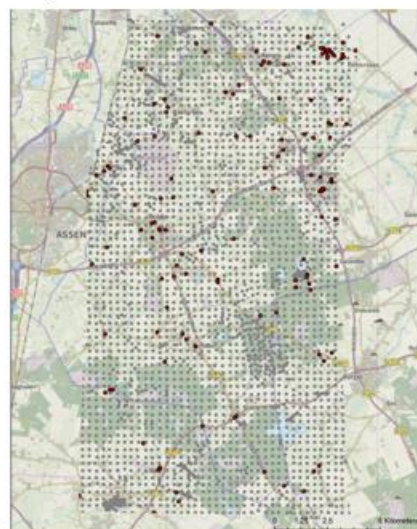
Dieper dan 5m -maaiveld



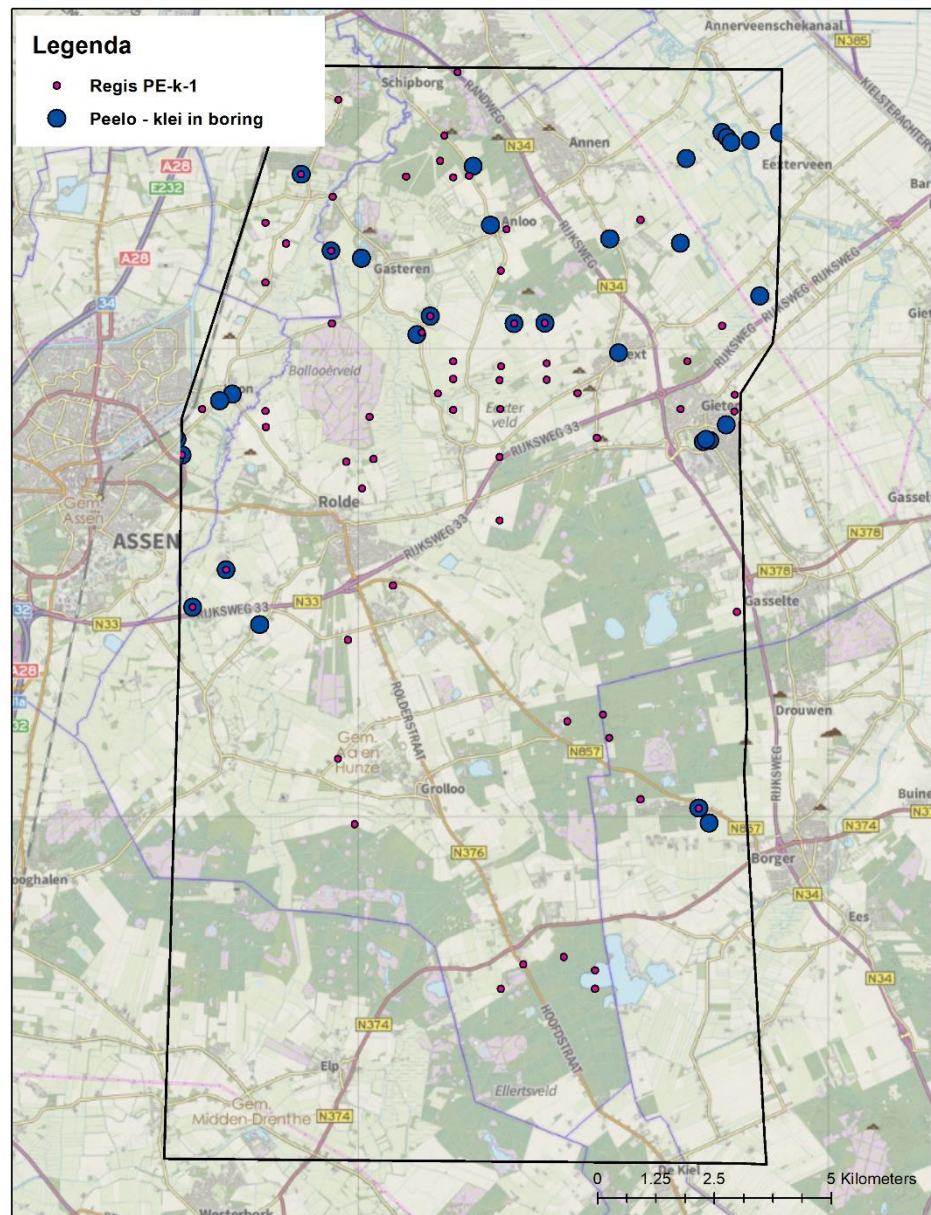
Dieper dan 10m -maaiveld



Dieper dan 30m -maaiveld



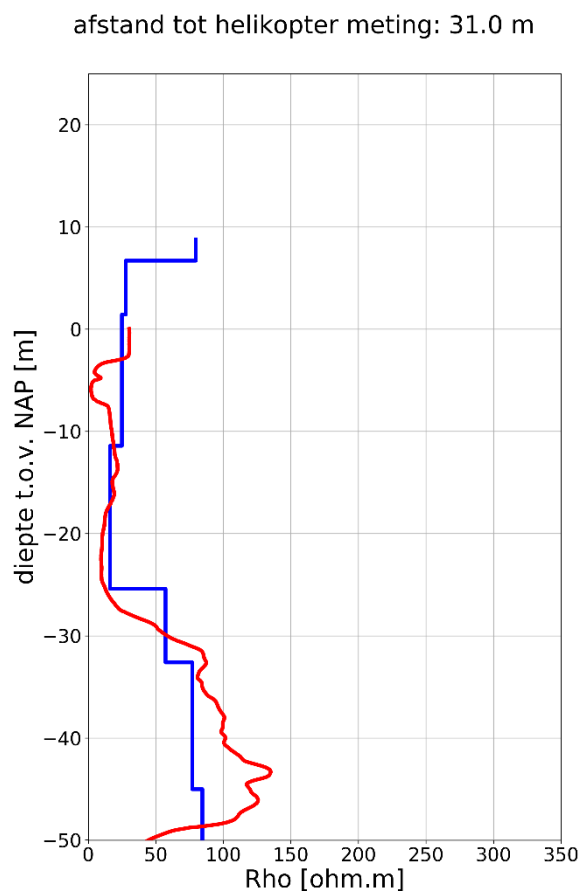
Figuur 4: Ligging van boringen gerangschikt naar einddiepte.



Figuur 5: Boringen met PE-k-1 en boringen met Peelo klei.

Boorgatmetingen

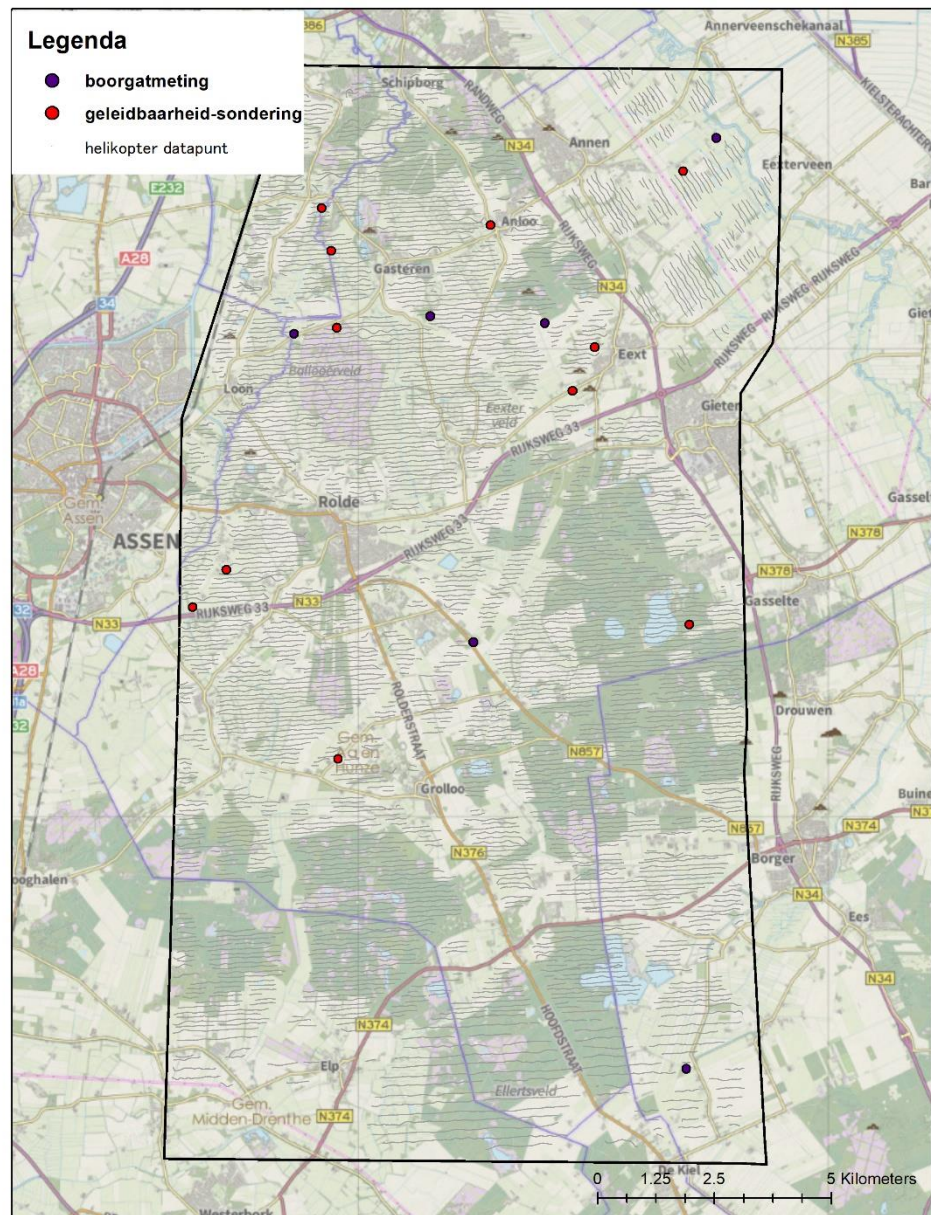
In de DINO database zijn 6 boorgatmetingen bekend in het gebied waarbij elektrische weerstand is gemeten. Deze zijn gebruikt om de inversie van de helikoptermetingen te “sturen”. Er is slechts 1 boorgatmeting binnen 70m van een elektrische weerstand meting vanuit de helikopter, deze is in Figuur 6 weergegeven, samen met het weerstandsmodel van de dichtstbijzijnde helikoptermeting.



Figuur 6. Weerstand volgens de boorgat meting (rode lijn) en dichtstbijzijnde helikopter meting (blauwe lijn).

Sonderingen

Voor het TopSOIL project zijn een aantal geleidbaarheids-sonderingen gezet, met het doel de bodemopbouw en de elektrische geleidbaarheid te meten. In Figuur 7 staan de locaties weergegeven. De locatie keuze moest, vanwege administratieve redenen, worden gemaakt voordat de resultaten van de helikopter metingen bekend was, waardoor deze niet optimaal is gebleken.



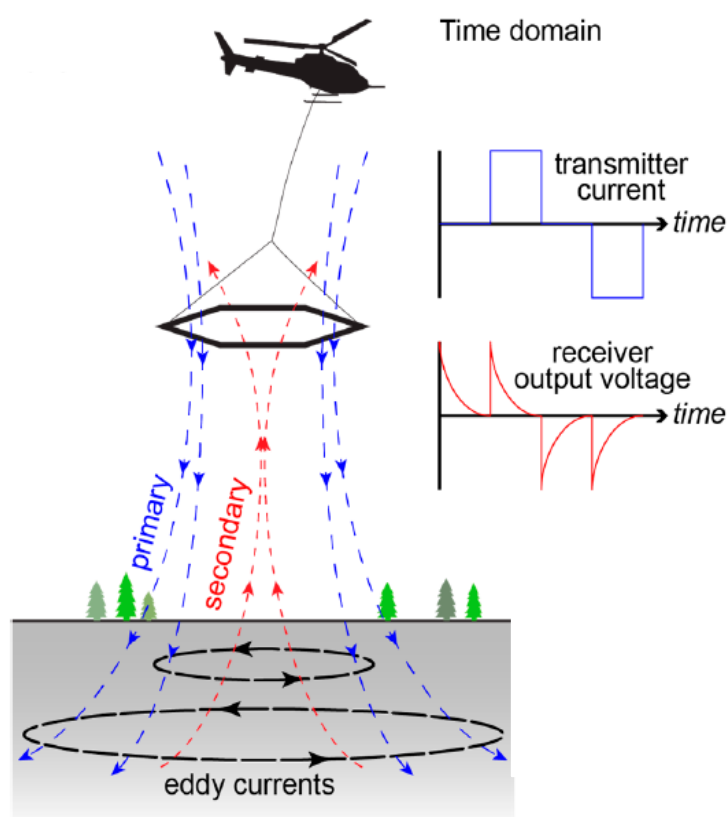
Figuur 7. Locatie van boorgatmetingen, geleidbaarheidsonderingen en helikoptermetingen.

Elektro Magnetische metingen

Door het bedrijf skyTEM Surveys Apps zijn opnames gemaakt met een instrument dat onder een helikopter is bevestigd. De helikopter vliegt met ong. 100 km/h op een afstand van 30-60m boven maaiveld over het gebied in een lijnpatroon waarbij de lijnen 100m van elkaar liggen, in het meest zuidelijk deel 200m, Figuur 7. Op iedere vlieglijn worden een groot aantal metingen gedaan die uiteindelijk worden gemiddeld om tot een representatieve waarde te komen (het zgn. “stacking”). Dit datapunt is representatief voor een gebied van ong. 10 - 20m aan het oppervlak, ong. 60m op een diepte van 50m en daarna olopend tot 100 – 200m in de diepe ondergrond (dieper dan 100m). De grootte van het representatieve oppervlakte is naast de diepte ook afhankelijk van de samenstelling van de ondergrond.

De elektromagnetische techniek bepaalt de weerstand van de ondergrond tegen elektrische stroom. De techniek is met name gevoelig voor goed geleidende sedimenten (klei) en voor de kwaliteit van het grondwater (zout). Daarnaast is de porositeit en de pakking van invloed.

De techniek is gebaseerd op het principe van inductie: een elektrische stroom die door een hoepel loopt wekt een magnetisch veld op, die op zijn beurt weer een elektrische stroom genereert, die daarna weer een magnetisch veld opwekt, enz, enz. Het principe van de techniek is dat een elektrische stroom die door het instrument loopt plotseling wordt uitgeschakeld. De elektrische stroom heeft een magnetisch veld opgewekt in de ondergrond. Zodra de stroom is uitgeschakeld wordt de afname van het opgewekte magnetisch veld in de ondergrond gemeten, zie Figuur 8.



Figuur 8. Principe van elektromagnetische metingen vanuit een helikopter.

De metingen vinden plaats zo spoedig mogelijk nadat de stroom in het instrument is uitgeschakeld in verschillende tijdsintervallen. Het vroegste tijd interval levert gegevens op voor de zeer ondiepe ondergrond, en met oplopende tijd wordt de response van de diepere ondergrond gemeten. De snelheid van "uitdoven" van het magnetisch veld in de ondergrond is een maat voor de geleidbaarheid van de ondergrond en daarmee voor de samenstelling van het sediment of de grondwater kwaliteit. Indien zoet grondwater wordt verondersteld zijn het met name de lutum

deeltjes in de grondsoort (met name klei¹) die voor de elektrische geleiding zorgen. De meettechniek is zo aangepast zodat een zo gedetailleerd mogelijk beeld van de ondiepe ondergrond (tot -50m NAP) wordt verkregen.

De resultaten van de metingen zijn voor ieder meetpunt een zgn. “afname-curve” van de magnetische veldsterkte in de tijd. Door middel van een inversie techniek wordt de curve omgezet naar een 1D lagenmodel, waarbij iedere laag een dikte en een weerstand krijgt. Bij de uitvoering van de inversie techniek moeten een groot aantal beslissingen worden genomen wat betreft parameters in de berekening, die (sommige meer, andere minder) van invloed zijn op het resultaat.

De eerste stap in de verwerking van de gegevens is het verwijderen van ongewenste effecten van verstoringen die worden veroorzaakt door invloeden van kabels, leidingen en daar waar de helikopter op een grote hoogte moest vliegen vanwege de aanwezigheid van aaneengesloten bebouwing. Deze “opgeschoonde” dataset wordt verondersteld de response van de ondergrond weer te geven op het opgelegde Electro Magnetische veld.

Inversie procedure

De inversie, om vanuit de opgeschoonde meetdata naar de weerstand van de ondergrond tegen elektrische stroom te komen, is uitgevoerd m.b.v. de Arhus Workbench. Met deze software is in eerste instantie een “smooth inversion” uitgevoerd (door Arhus University), waarbij het doel is om overgangen in elektrische geleidbaarheid geleidelijk te laten verlopen. De resultaten geven een goed inzicht in de elektrische eigenschappen van de verschillende sedimenten en geven inzicht in de regionale verschillen van de weerstand. In deze inversie is geen rekening gehouden met *a-priori* kennis van de ondergrond en zijn andere datasoorten niet betrokken. Doordat de overgangen in deze “smooth inversion” geleidelijk verlopen lijkt deze inversie methode minder geschikt in gebieden waar meer abrupte overgangen tussen sedimenten voorkomt, zoals met name in het noorden van het studie gebied. Daar zijn klei voorkomens te verwachten (de zgn. potklei en ook kleien uit de Eem Formatie) die direct naast of op zandige sedimenten liggen. Er zijn dus zowel lateraal als verticaal relatief scherpe grenzen tussen klei en zand te verwachten. Daarom is ervoor gekozen om een zgn. “layered” inversie uit te voeren in de Workbench, waarbij er meer abrupte overgangen tussen lagen met verschillende elektrische weerstand kunnen worden gemodelleerd. Daarnaast zijn boringen en boorgatmetingen beschikbaar die de aanwezigheid van goed geleidende sedimenten weergeven. De boorgatmetingen met elektrische weerstand zijn als sturende informatie gebruikt in de inversie. De boringen zijn omgewerkt tot “pseudo-boorgatmetingen”: aan de zandige trajecten is een hoge elektrische weerstand toegekend, aan de kleiige trajecten een lage weerstand, die afhangt van de boorbeschrijving. De pseudo-boorgatmetingen hebben minder invloed in de inversie berekening dan de werkelijke boorgatmetingen. De invloed van de sturende informatie neemt snel af met de afstand (op grote afstand – meer dan 100m – heeft een boring / boorgatmeting weinig tot geen invloed op de inversie) en in gevallen waar de informatie elkaar tegenspreekt geeft de inversie de voorkeur aan de helikopter meting.

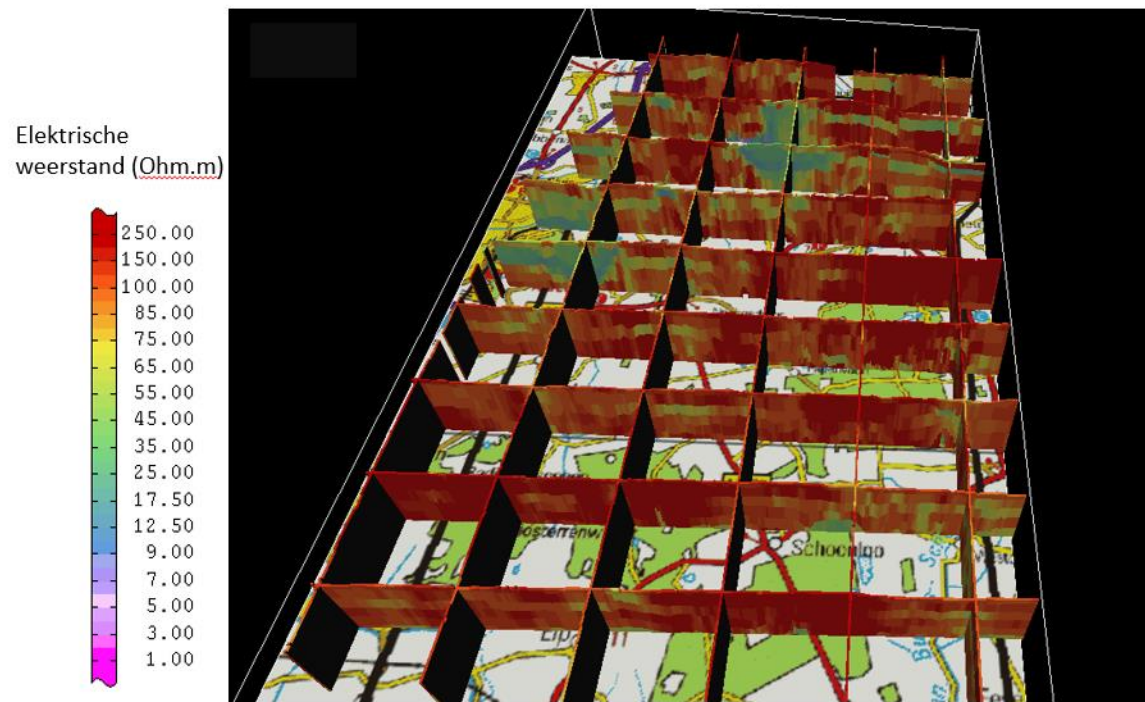
¹ Klei is de verzamelnaam voor sedimenten die een bepaald aandeel lutum-deeltjes bevatten. Het zijn de lutum deeltjes die de geleidbaarheid voor elektrische stroom veroorzaken. Hoe hoger het lutum gehalte, hoe beter de geleidbaarheid. Lutum zijn deeltjes kleiner dan 2µm die “plaatvorming” zijn en een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

De gelaagde inversie methode staat toe dat zowel de weerstand als de dikte van de resulterende lagen variëren, zodat een zo goed mogelijke fit met de ruwe data wordt verkregen. In de inversie wordt tevens rekening gehouden met de omliggende metingen, de zgn. “spatial constrained inversion”. Daarmee wordt gezorgd dat de resultaten van de inversie ruimtelijk consistent zijn.

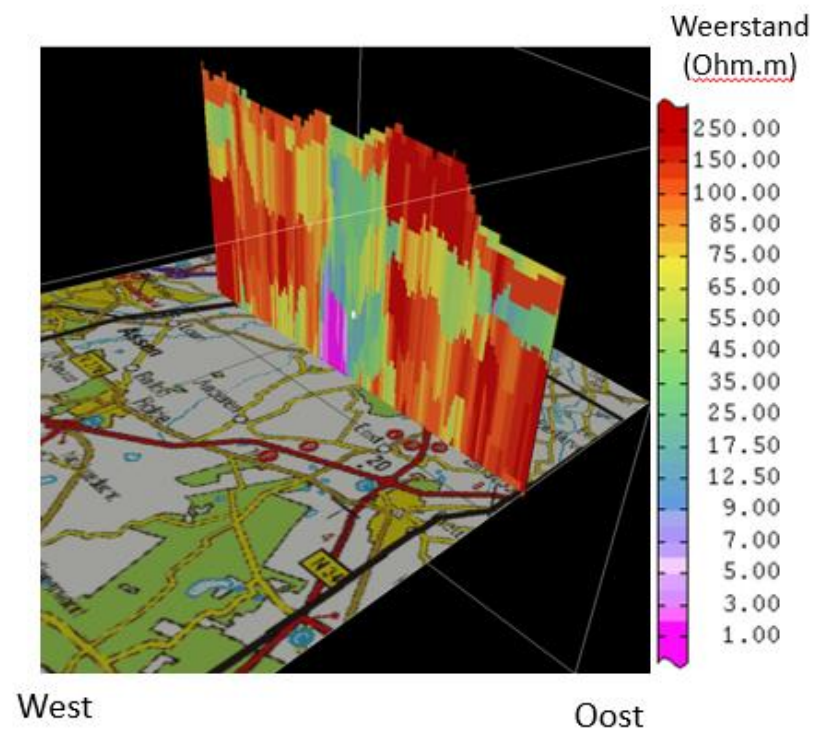
Het resultaat van de gelaagde inversie is dat op ieder meetpunt een model beschikbaar is van het verloop van de elektrische weerstand met de diepte. In de gelaagde inversie zijn 8 lagen onderscheiden, waarbij voor ieder punt de meest optimale dikte van de laag en de weerstand is bepaald, gegeven de metingen van de afname van het magnetisch veld in de tijd, de omliggende metingen, de sturende informatie uit de boorgatmetingen en boringen. Dit pseudo 1-dimensionale model van de weerstand², is vervolgens geïnterpoleerd om te komen tot een gebied dekkend 3-dimensionaal voxel model van de weerstand van de ondergrond. De interpolatie is uitgevoerd in 2 stappen. Eerst zijn de laaggrenzen geïnterpoleerd, zodat een lagenmodel ontstaat van de 8 onderscheiden inversie lagen. Binnen het volume van iedere laag is vervolgens de elektrische weerstand geïnterpoleerd. Op deze manier heeft de elektrische weerstand van de ene laag bij de interpolatie geen invloed op die van een bovenliggende of onderliggende laag. De interpolatie van zowel de laaggrenzen als de weerstand is uitgevoerd met behulp van Kriging.

In de onderstaande figuren staan een aantal doorsneden van het 3D model van de elektrische weerstand weergegeven. In het algemeen valt op dat er een aantal gebieden zijn te zien met een lage weerstand, grote delen, met name in het zuiden, vertonen een hoge elektrische weerstand, met weinig ruimtelijke variatie. Tevens zijn een tweetal “hot-spots” te zien met een zeer lage weerstand.

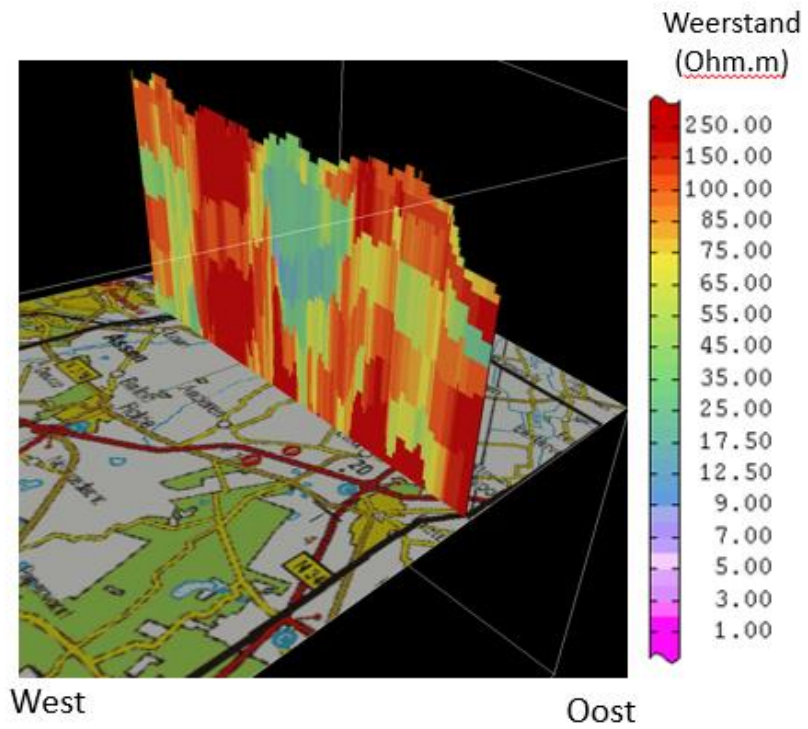
² Pseudo 1-dimensionaal omdat in de inversie wel degelijk rekening gehouden is met de omliggende data; het resultaat is een model voor een specifieke x,y coördinaat, daarom wordt het toch beschouwd als een 1-d model



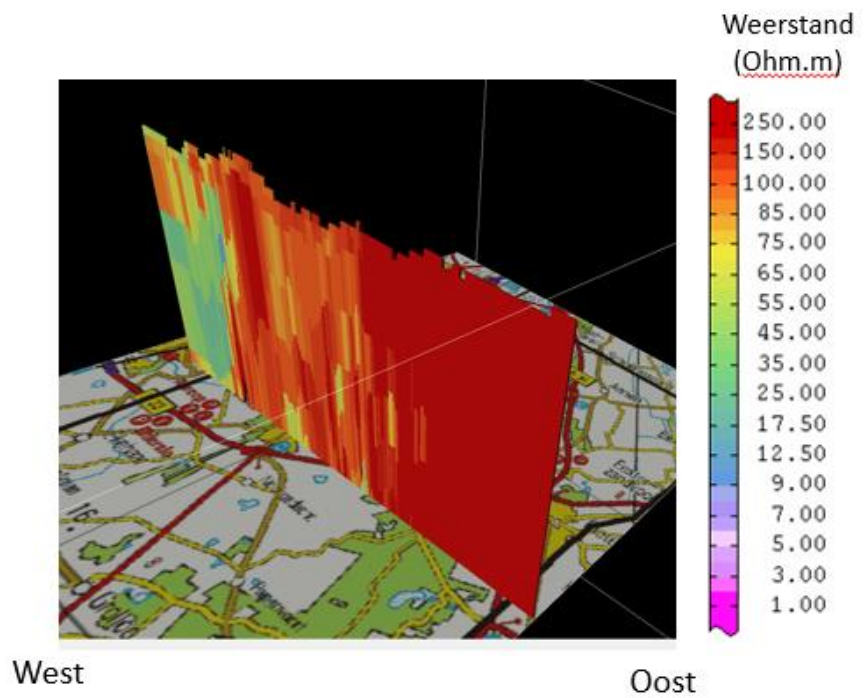
Figuur 9. Elektrische weerstand model tot 50m -NAP in het Drentse Aa gebied, gezien van zuid naar noord.



Figuur 10. Dwarsdoornede (van west naar oost) ter hoogte van Anloo door het elektrisch weerstand model. Maximale diepte is 50m – NAP.



Figuur 11. Dwarsdoorsnede door het elektrische weerstand model ter hoogte van Eext.



Figuur 12. Dwarsdoorsnede door het elektrisch weerstandmodel ter hoogte van Rolde.

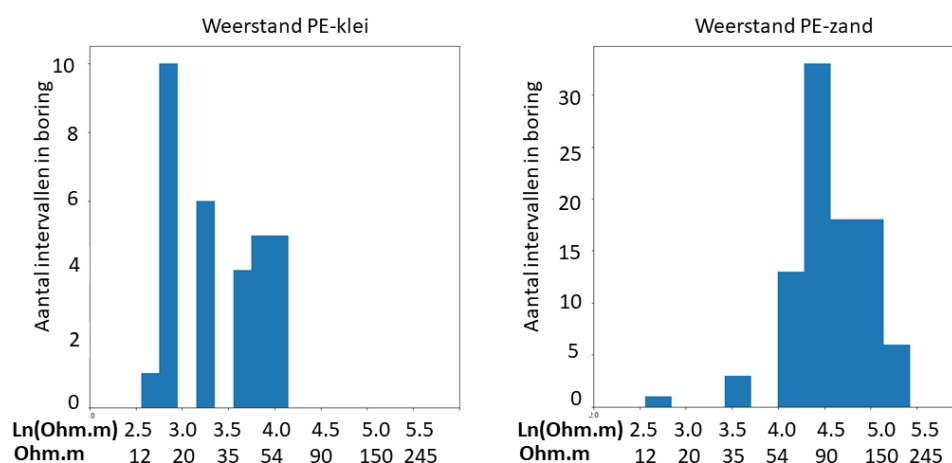
4 Analyse

Het 3-dimensionale model van de elektrische weerstand van de ondergrond levert waardevolle informatie over de ligging van eenheden met een hoge en een lage elektrische weerstand.

Deze elektrische weerstanden zijn vervolgens geïnterpreteerd naar een model van relevante sedimenten en hun geologische duiding, met de nadruk op de belangrijkste geohydrologische eenheden die de grondwaterstroming beïnvloeden. Daartoe zijn alle boringen geselecteerd met intervallen die zijn geclassificeerd als behorende tot die geologische eenheden die verondersteld worden de verticale waterstroming te belemmeren: Peelo Formatie, Eem Formatie en de keileem, die behoort tot de Formatie van Drente, laagpakket van Gieter.

Peelo kleien

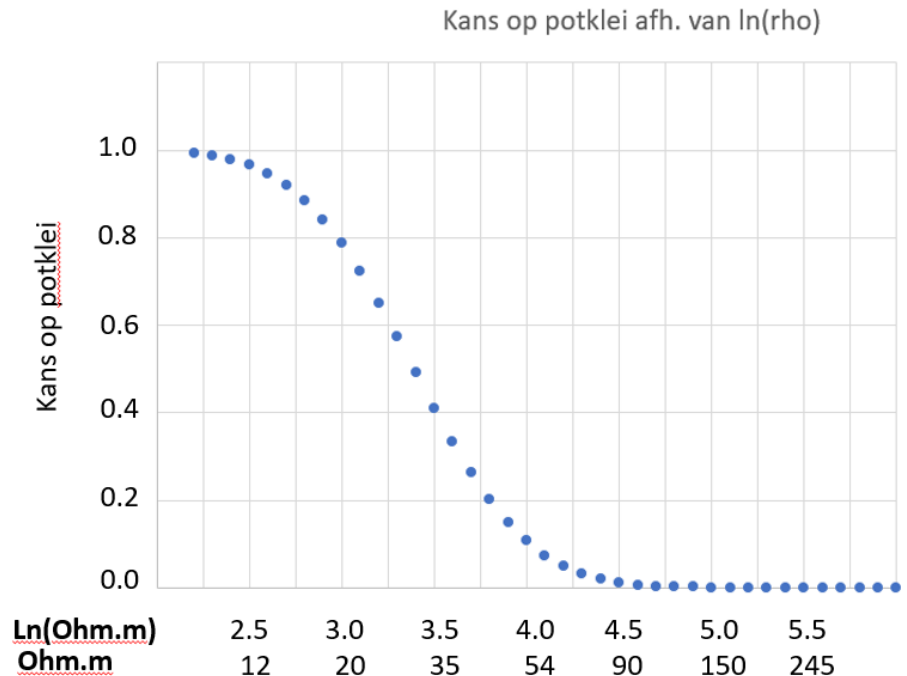
Binnen de verzameling boringen die zijn geclassificeerd als behorende tot de Peelo Formatie is een splitsing gemaakt tussen de intervallen die als hoofdgrondsoort klei zijn beschreven en alle zandige intervallen. De dikte van het interval is maximaal 2m. Voor ieder interval is (binnen een straal van 70m) gezocht naar het dichtstbijzijnde elektrische weerstand. De straal van 70m is gekozen omdat zo de boring altijd in een gridcel van het model (50x50m) zal vallen. Het resultaat is een verzameling van weerstanden voor de kleiige intervallen en voor de zandige intervallen, zie Figuur 13. Het is duidelijk dat het om twee verschillende populaties gaat, die slechts een geringe overlap vertonen. Om de vergelijking te kunnen maken is van de weerstand de logaritme genomen (Ln).



Figuur 13. Relatie tussen elektrische weerstand en klei voorkomen voor in de Formatie van Peelo.

De relatie tussen klei voorkomen en elektrische weerstand is gemodelleerd door een statistische verdeling te schatten tussen de logaritme van de weerstand en het voorkomen van klei. Deze relatie is geïnterpreteerd als de kans op klei, gegeven

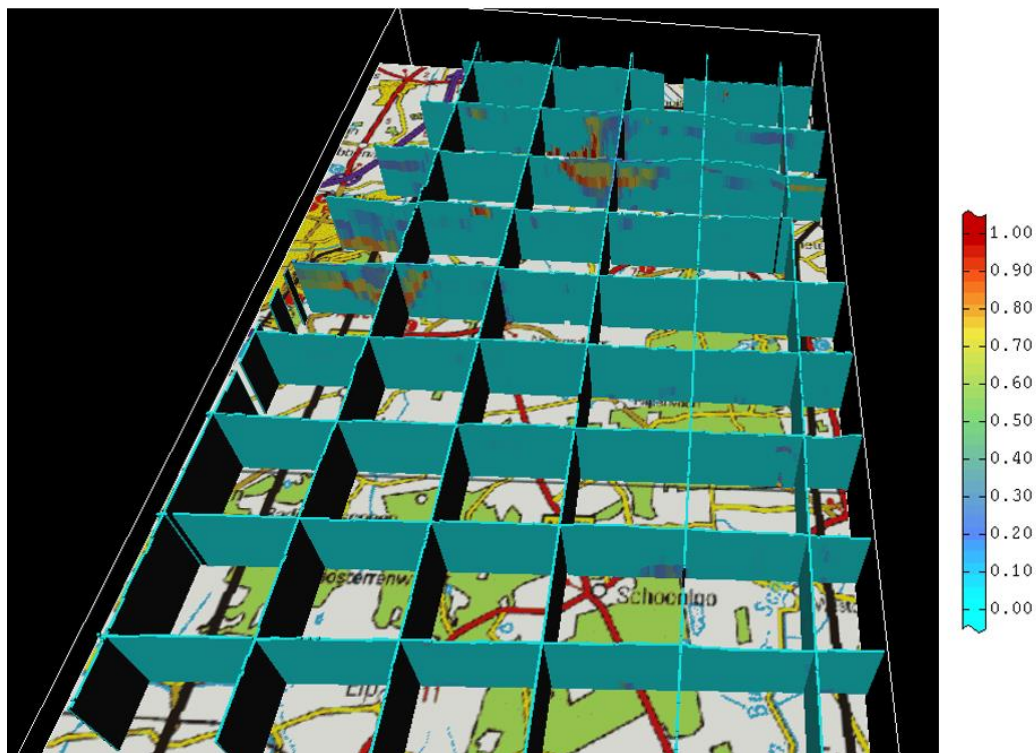
een bepaalde elektrische weerstand, Figuur 14. Deze relatie is vervolgens toegepast op het model van elektrische weerstand, zodat voor iedere voxel in het gebied de kans op klei bekend is.



Figuur 14. Statistische relatie tussen elektrische weerstand en kans op klei in de Formatie van Peelo.

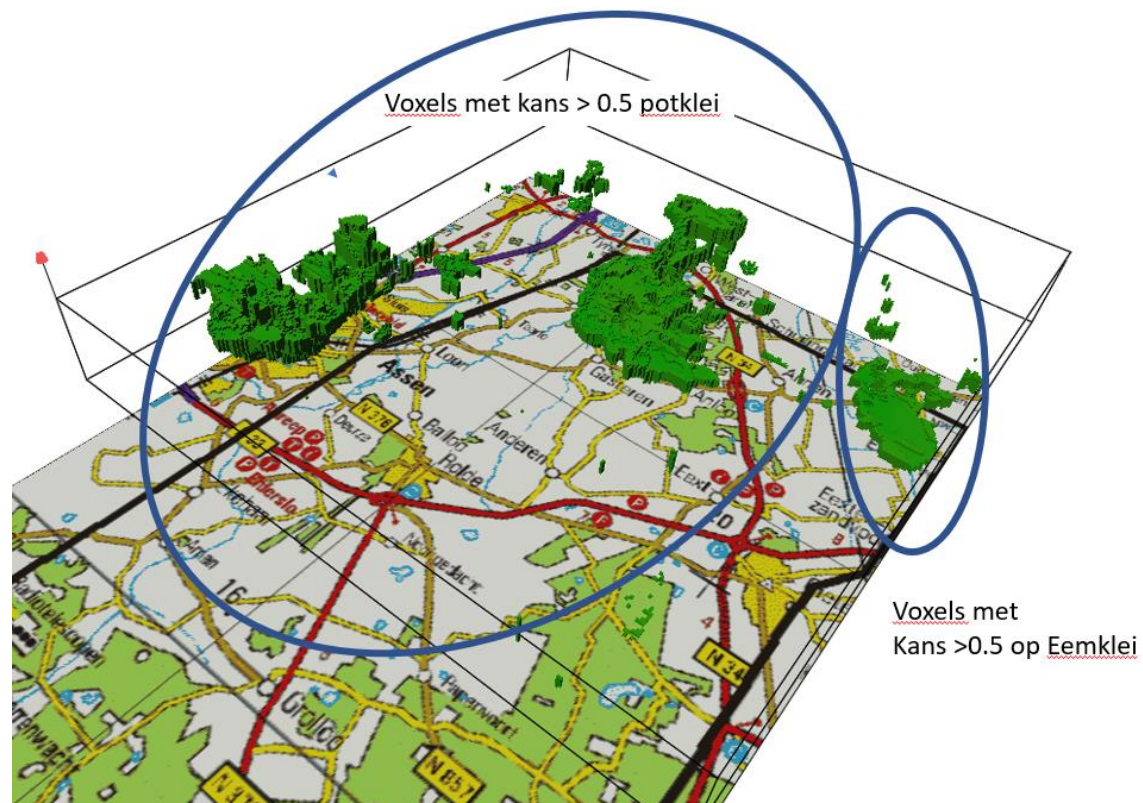
Resultaat

In Figuur 15 is het resultaat te zien van de toepassing van de relatie in Figuur 14 op het elektrische weerstand model. Er zijn gebieden aan te wijzen die een ruimtelijk consistent beeld van voorkomen van potklei laten zien. In het oosten van het studiegebied, in het Hunzedal, wordt ook een verhoogde kans op klei aangetroffen, dit zijn echter geen Peelo kleien maar klei die behoort tot de Eem Formatie. Omdat er slechts 2 boringen met Eem klei in een straal van 70m van een helikopter meting zijn gevonden, is het model van de klei uit Figuur 14 ook gebruikt voor de Eem kleien. Tevens is te zien dat in grote delen van het studiegebied, met name in het zuidelijke deel, de kans op klei voorkomen gering is. De keileem kon niet worden gedetecteerd door de helikopter techniek: de keileem is vaak te dun (< 2-3m) en is sterk zandig, waardoor het contrast in elektrische weerstand met de onderliggende zanden niet aanwezig is



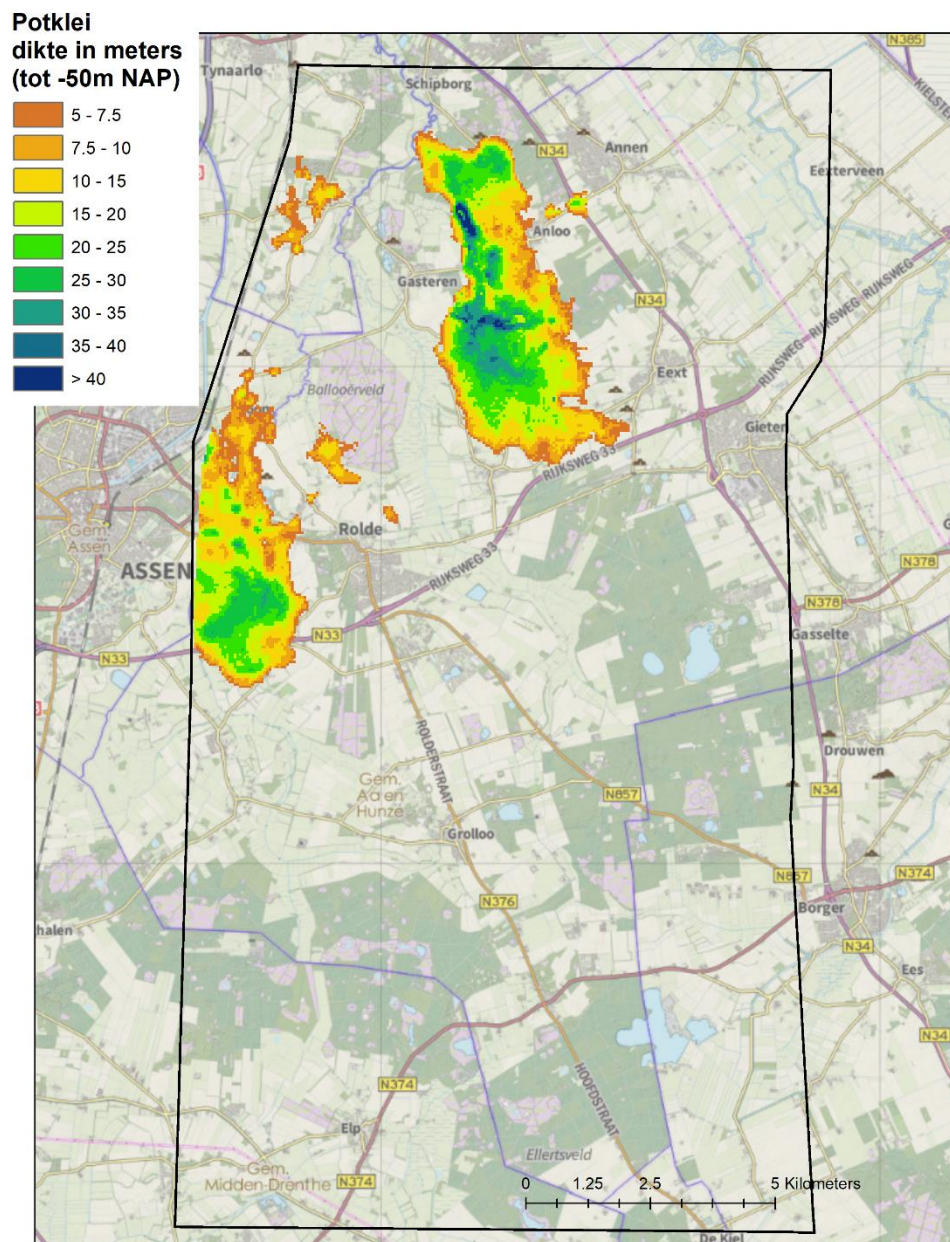
Figuur 15 . Model van de kans op klei.

In Figuur 16 zijn de resultaten weergegeven in een 3D aanzicht, waarbij alle voxels zijn geselecteerd die een kans op klei > 0.5 hebben. Het is duidelijk dat de Peelo - kleien in een afgebakend gebied voorkomen, in een plausibel geologisch afzettingspatroon, nl. een gebied dat in vorm en grootte vergelijkbaar is met eerdere detailstudies van dit soort afzettingen (zie bijv. Gunnink & Siemon, 2015).

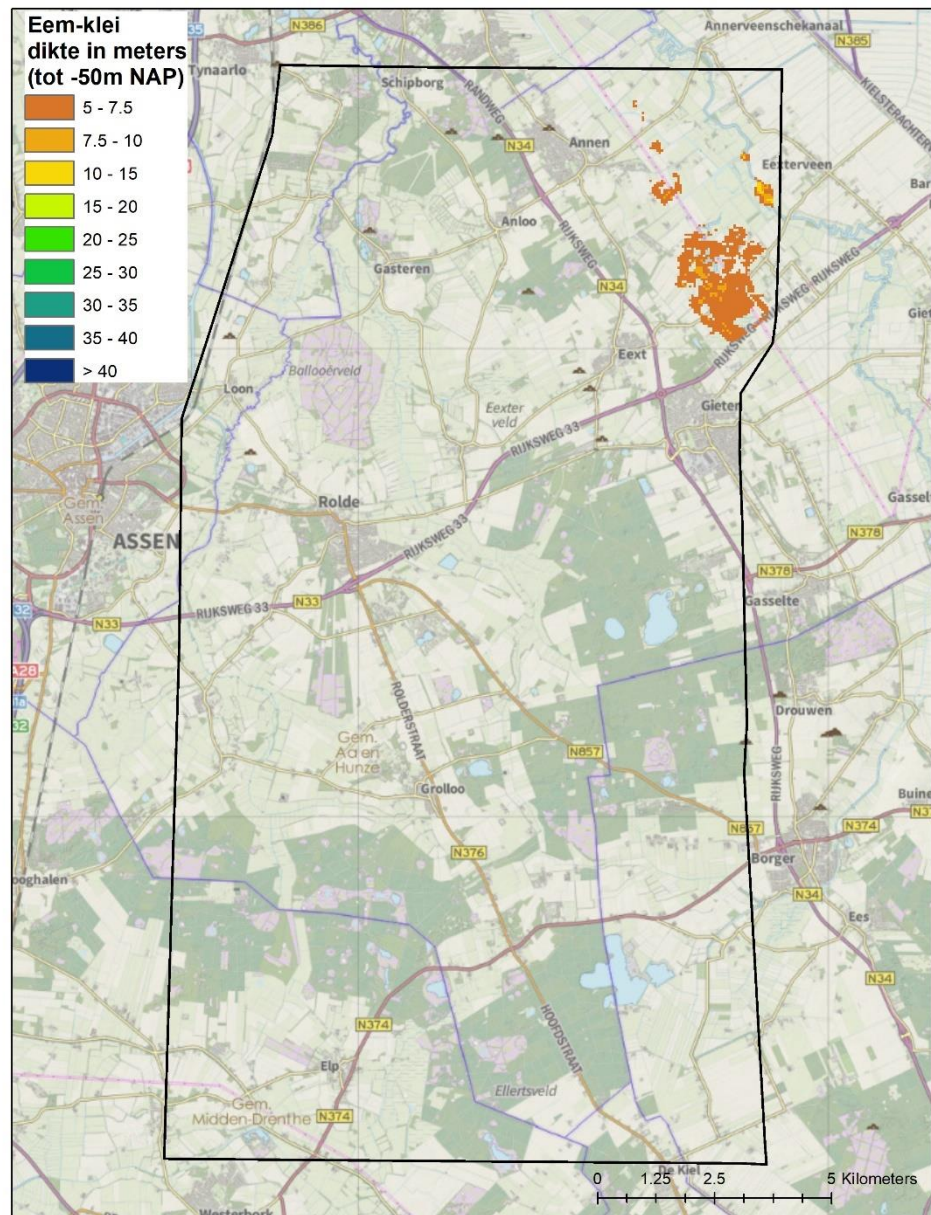


Figuur 16. Gebieden met een kans > 0.5 op klei.

Op basis van het bovenstaande model is een dikke kaart van de potklei en van de Eem klei (afgebakend op basis van de verbreiding, nl in het Hunzedal, en op basis van de bijna horizontale ligging, die duidt op een mariene oorsprong, conform de ontstaansgeschiedenis van dit sediment) berekend. Dit is gedaan door voor alle voxels in het model de kans van klei voorkomen te vermenigvuldigen met de dikte van de voxel. Daarna is deze dikte "klei per voxel" opgeteld tot een totale dikte, zie Figuur 17. De minimum dikte is gesteld op 5m, dit vanwege de resolutie van het weerstandsmodel, die afneemt met de diepte.



Figuur 17. Dikte potklei, gebaseerd op het elektrisch weerstand model.

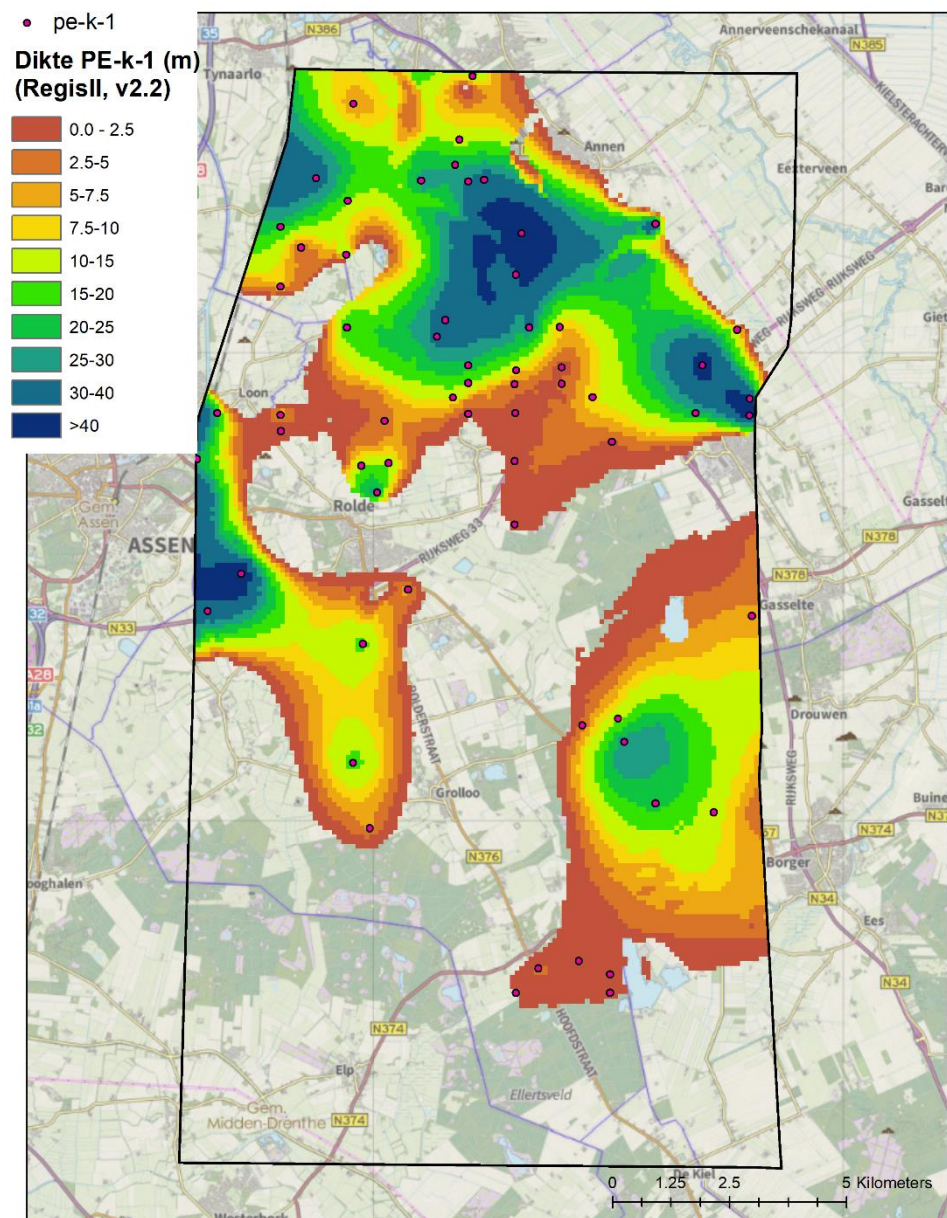


Figuur 18. Dikte Eem-klei, gebaseerd op het elektrisch weerstand model.

Vergelijking met REGIS II, v2.2

Wat opvalt is dat het model van de potklei, gebaseerd op de elektrische weerstand, scherp begrensd is en afwijkt van de verbreiding van de PE-k-1, zoals die in Regis is gemodelleerd, zie Figuur 19. De modellering van Regis is voornamelijk gebaseerd op boringen en er is een nadere analyse uitgevoerd op de boringen die zijn gebruikt in de Regis modellering van de PE-k-1. Veelal wordt de boring beschreven als hoofdgrondsoort zand, (zeer) fijn, sterk slib-houdend, grijsachtig en soms met de toevoeging kleilaagjes. Op basis van deze informatie heeft de (hydro-)geoloog die de interpretatie heeft uitgevoerd besloten om dit interval te classificeren als behorende tot de PE-k-1. Het elektrische weerstand model geeft geen

aanleiding om klei te veronderstellen op deze locaties, de elektrische weerstand valt niet in het bereik van kleien zoals die in de grafiek, Figuur 13, is weergegeven. Het lijkt erop dat de begrenzing van de potklei zoals gebaseerd op het elektrisch weerstand model, redelijk strak is en dat de boringen met fijn zand, slib-houdend en soms klei laagjes niet de “klassieke” potklei vertegenwoordigen, maar een ander afzettingsmilieu vertegenwoordigen. Het gevolg is dat de verbreiding van Peelo klei, zoals gebaseerd op de helikoper metingen, veel geringer is dan die van PE-k-1. In Appendix 1 worden een aantal locaties in detail nagegaan.

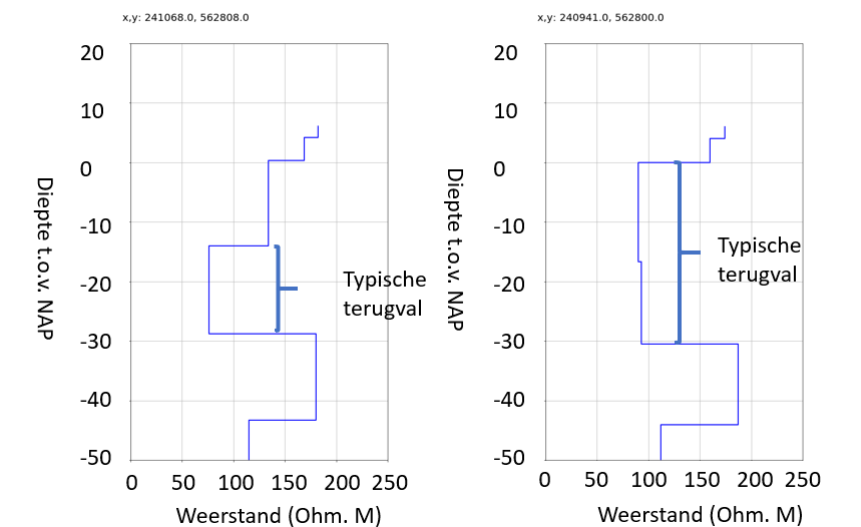


Figuur 19. Dikte van de Peelo klei 1, volgens het Regis II, v 2.2 model.

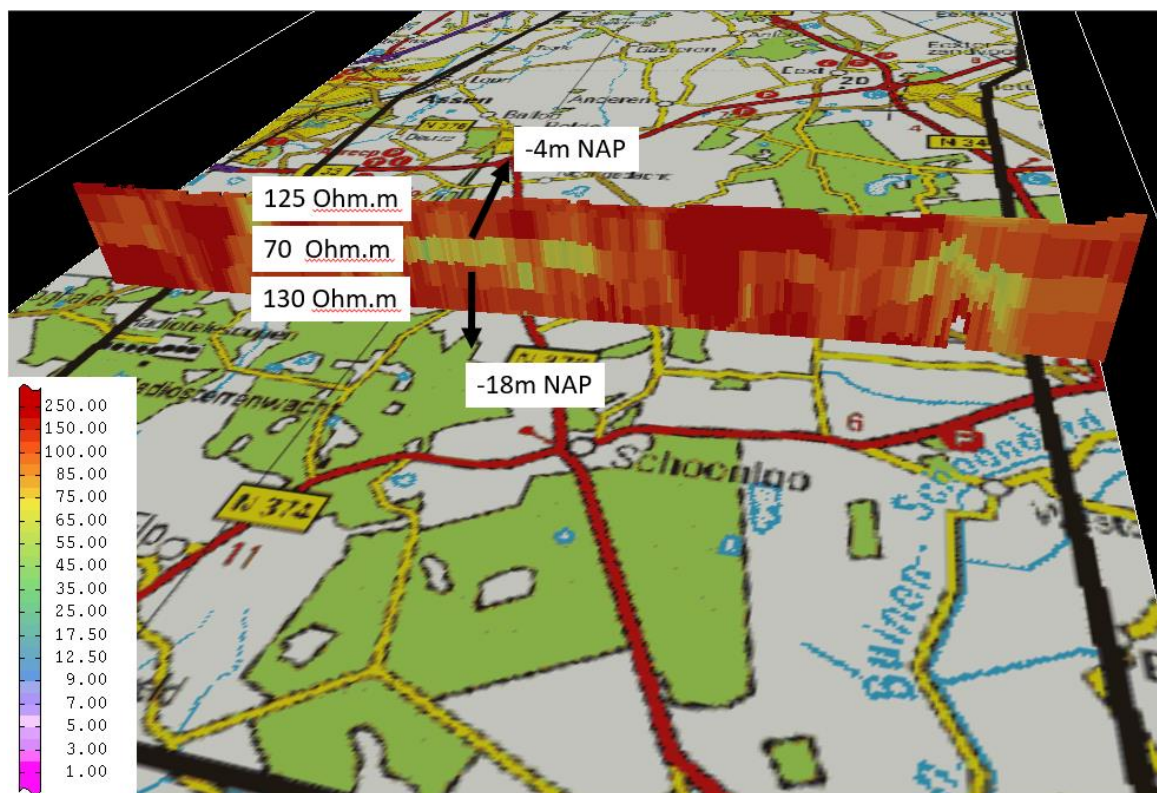
(Ultra-) fijne zanden

In de hydrologische modellen die in het Drentse Aa gebied worden gebruikt wordt vaak aangenomen dat er in bepaalde delen van het gebied een laag met een hoge hydraulische weerstand bestaat in de bovenste 20-50m van de ondergrond. Deze laag wordt in de hydrologische modellering ingebracht omdat anders de hydrologische modellen niet correct zijn te kalibreren. Deze laag met een relatief hoge hydraulische weerstand wordt gerelateerd aan de zgn. (ultra-) fijne zanden, die in de Peelo afzettingen worden gevonden (Bosch et al, 2013). In het veld worden deze sedimenten door boormeesters herkend, en doordat ze fluweelzacht aanvoelen worden ze ook wel “poesjeszanden” genoemd. Het is niet duidelijk of deze (ultra-) fijne zanden inderdaad de oorzaak van de hoge hydraulische weerstand zijn. Eerder onderzoek heeft uitgewezen dat deze zanden niet eenduidig in de DINO database aanwezig zijn en derhalve moeilijk te karteren zijn op basis van boringen. Ook is het de vraag of deze fijne zanden wel de oorzaak zijn van de verhoogde hydraulische weerstand. De aanwezige gegevens in de GDN database van doorlatendheden geven hiertoe geen aanleiding, de mediaan van de doorlatendheid van fijn zand is 2m/d.

In de resultaten van de skyTEM inversie blijkt dat er in delen van het gebied de elektrische weerstand een typische terugval vertoont. Deze terugval in elektrische weerstand is vaak niet groot in absolute waarden (vaak een terugval van rond de 125 - 150 Ohm.m naar 70 - 100 Ohm.m) maar is wel duidelijk zichtbaar in de verticale weerstandsprofielen, zie Figuur 20 en 21.



Figuur 20. Terugval in elektrische weerstand.

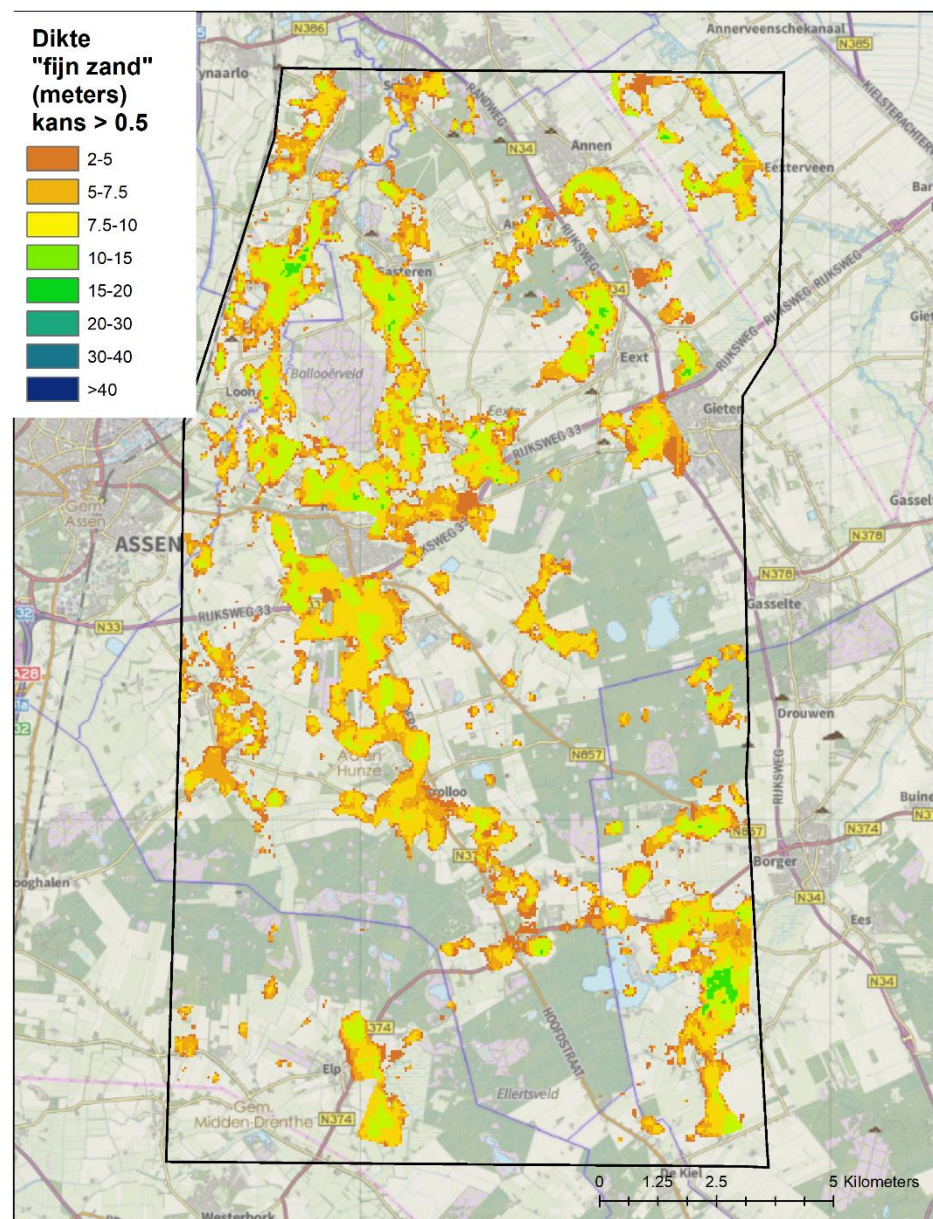


Figuur 21. “Typische terugval” ter hoogte van het dorp Amen.

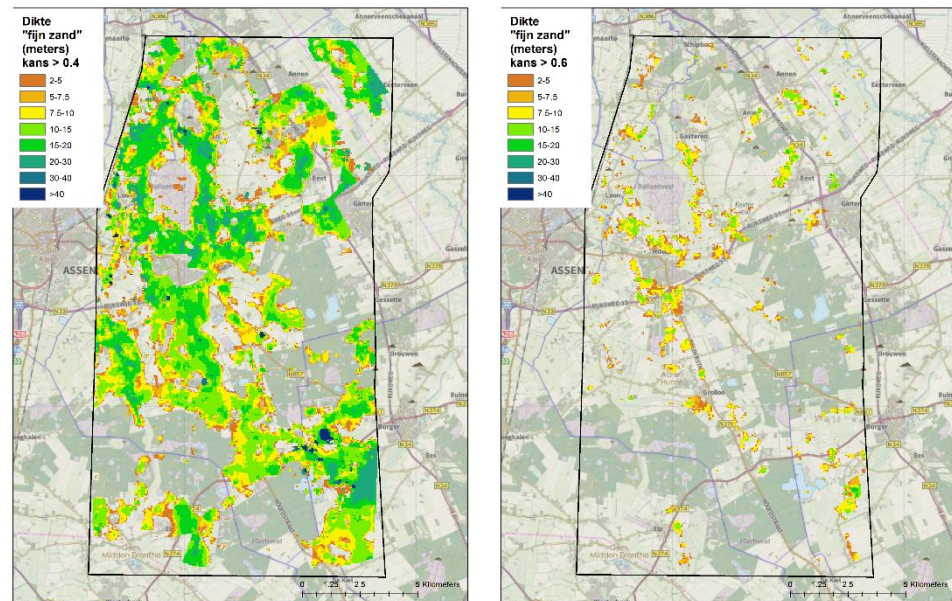
De meest waarschijnlijke reden voor de terugval in elektrische weerstand is een toename van elektrisch geleidende deeltjes in het sediment, in dit geval dunne klei / leem (laagjes) in een verder zandig sediment. De aanwezigheid van klei is tevens een verklaring zijn voor de verminderde hydraulische doorlatendheid. De terugval van 130-150 Ohm.m naar 70 Ohm.m is als volgt te modelleren. Stel dat maximaal 10% van de dikte van het “terugval-interval” klei / leem is, de rest van het interval is zand. Met een elektrische weerstand van 15 Ohm.m voor de klei / leem en 130 Ohm.m voor het zand, is de elektrische weerstand voor het interval 73 Ohm.m, wat overeenkomt met de gemiddelde weerstand in dit interval. Om gebieden met typische terugval-patroon te karteren is in de verticale weerstandsprofielen van de helikopter metingen gezocht naar het voorkomen van deze typische terugval tot -50m NAP. Door middel van patroon herkenning zijn deze bepaald in alle weerstandsprofielen, waarbij de uitkomst de kans is op voorkomen van de “terugval” en de top en basis hiervan. Deze kansen zijn vervolgens geïnterpoleerd voor het gehele gebied en een selectie is gemaakt van die aaneengesloten intervallen waar de kans op de typische terugval groter is dan 0.5, zie Figuur 22. Tevens zijn kaarten gemaakt met de kans op voorkomen van 0.4 en 0.6, Figuur 23.

Ter verificatie zijn sonderingen in het gebied geanalyseerd op het voorkomen van een opeenvolging van zand en klei laagjes. De conusweerstand is een goede indicatie van het voorkomen van kleilaagjes in zand omdat deze een typisch patroon laten zien. In het gebied zijn 95 sonderingen aangetroffen in de databases van de Geologische Dienst, waarvan het 90% is gesitueerd langs de N33. Echter, het merendeel van de sonderingen is niet diep genoeg om de top van het pakket van fijn zand met kleilaagjes te detecteren.

De verbreiding van de gebieden waar de kans groter dan 0.5 op een terugval in elektrische weerstand is, laat een aaneengesloten gebied zien in een drainage-achtig patroon, voornamelijk noord-zuid georiënteerd. Het ruimtelijk patroon van deze terugval sedimenten komt deels overeen met de overheersende oriëntatie van de diepe insnijdingen uit de Elster ijstijd. Ook de locatie van de zanden komt voor een deel overeen met de ligging van de geulen, nl. aan de randen. Het vermoeden bestaat dat de fijne sedimenten zijn afgezet in samenhang met de vorming van de geulen en de latere opvulling ervan. Hierna zal nog wel meer onderzoek naar gedaan moeten worden. In samenwerking met gebied-specialisten zal verder worden onderzocht of de gevonden patronen samenvallen met de gebieden waar verhoogde hydraulische weerstand wordt verondersteld.



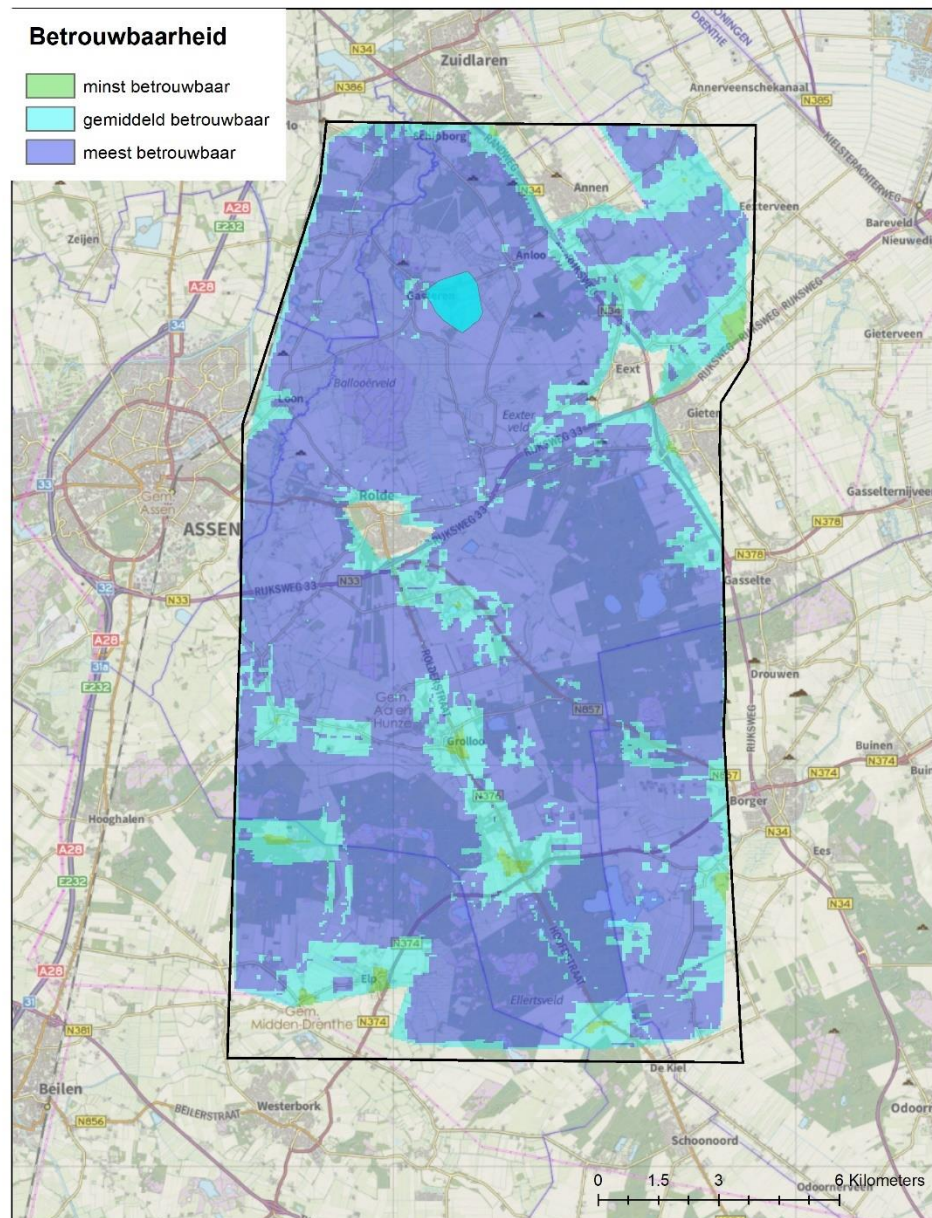
Figuur 22. Dikte van "fijn zand", gebaseerd op typische terugval. Kans op fijn zand > 0.5



Figuur 23. Dikte van "fijn zand", gebaseerd op typische terugval. Kans op fijn zand > 0.4 (links) en kans > 0.6 (rechts)

Betrouwbaarheid

De betrouwbaarheid van de bovenstaande analyses is afhankelijk van een aantal factoren die vaak niet eenduidig zijn te kwantificeren. Om toch een indruk te krijgen van de betrouwbaarheid is de belangrijkste bron van vlak-dekkende informatie, de helikopter metingen, gebruikt. Voor iedere locatie (gridcel van 50mx50m) is berekend hoeveel omliggende datapunten van de helikoptermeting zijn gebruikt. Dit resultaat is vervolgens in 3 klassen ingedeeld: zijn meer dan 6 waarnemingen gebruikt dan wordt het resultaat betrouwbaar verondersteld, tussen 3 en 8 waarnemingen matig betrouwbaar en minder dan 3 helikopter waarnemingen minst betrouwbaar. In Figuur 24 staat het resultaat weergegeven, waarin de effecten van de wegen en dorpen in het gebied op de helikopter metingen duidelijk zichtbaar is.

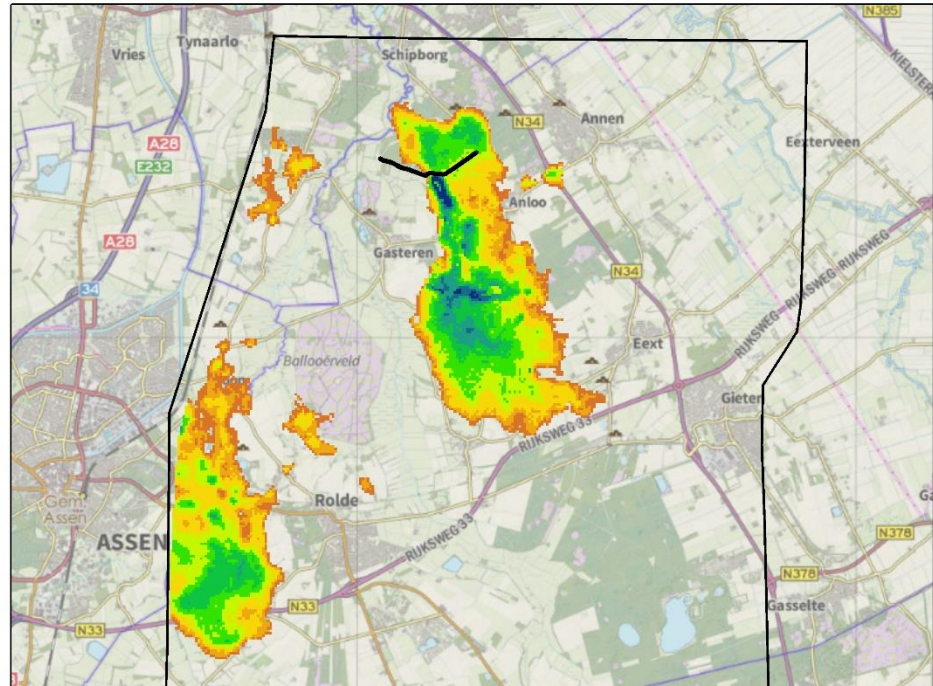


Figuur 24. Betrouwbaarheid-indicatie, afgeleid van de dichtheid van helikopter metingen. Toegevoegd als gemiddeld betrouwbaar is het gebied bij Anloo waar de elektrische weerstand $< 2 \text{ Ohm.m}$ is binnen -50m NAP.

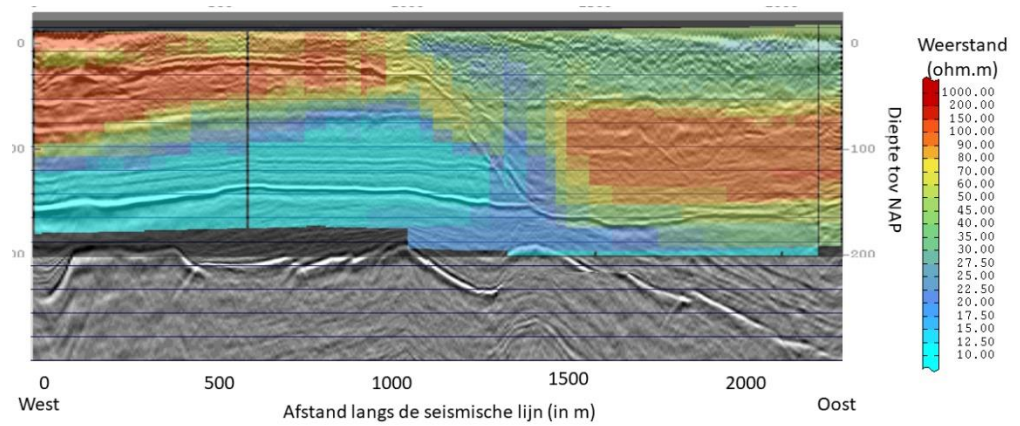
Hoge Resolutie Seismiek

In het najaar van 2019 is door de GDN een hoge resolutie seismische lijn geschoten in het noorden van het gebied, zie Figuur 25. De locatie van deze lijn is bepaald door de aanwezigheid van potklei in het model van de ondergrond, die mogelijk samenhangt met een ingesneden geul uit de Elster ijstijd. In tegenstelling tot de seismiek die wordt gebruikt in de olie en gas industrie is de hoge resolutie seismiek in staat om ondiepe structuren in beeld te brengen. De eerste resultaten, zie Figuur 25, laten een duidelijke structuur zien die wijst op een (rel.) ondiepe geul in de ondergrond, diepte maximaal ong. 170m beneden maaiveld. De vergelijking

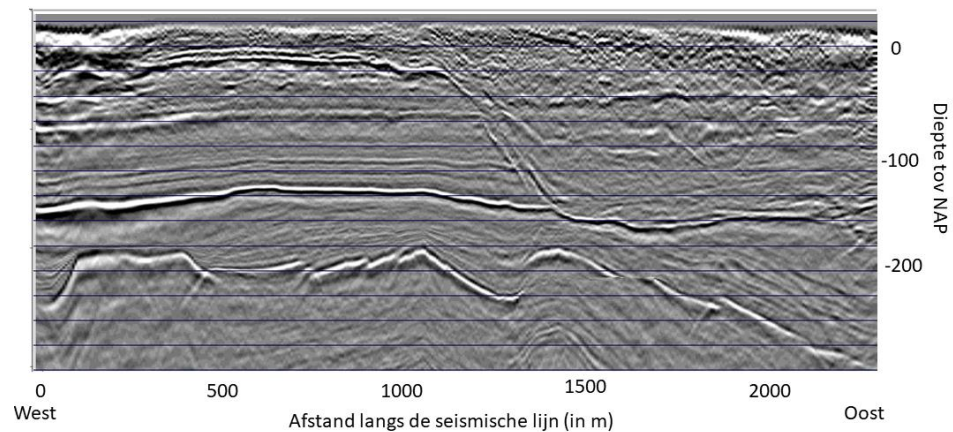
met de elektrische weerstand metingen laat zien dat de structuren goed overeenkomen. De gecombineerde analyse van de elektrische weerstand en de seismiek geeft vertrouwen dat inderdaad op deze locatie een ingesneden geul zich bevindt die gedeeltelijk met klei is opgevuld.



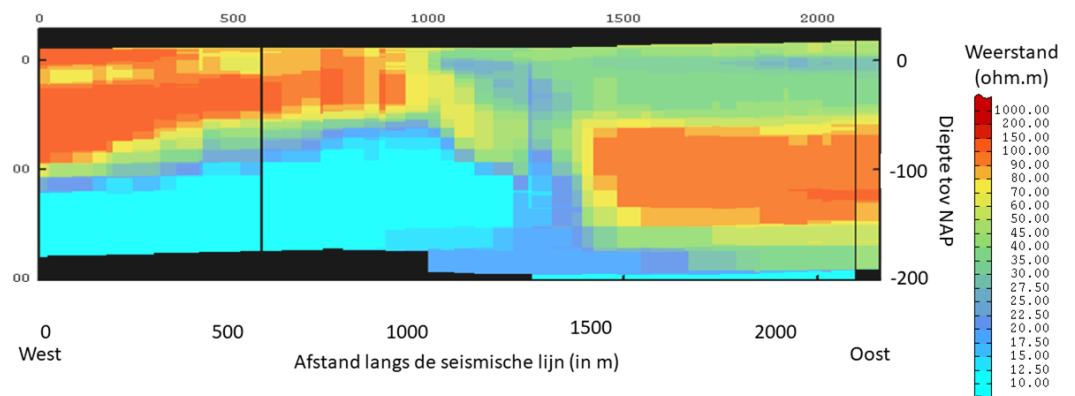
Figuur 25a. Ligging van de Hoge Resolutie Seismiek (HRS) lijn, deels over de verbreiding van de potklei.



Figuur 25b. Gecombineerde resultaten van de HRS en de elektrische weerstand.



Figuur 25c. Resultaat van de Hoge Resolutie Seismiek

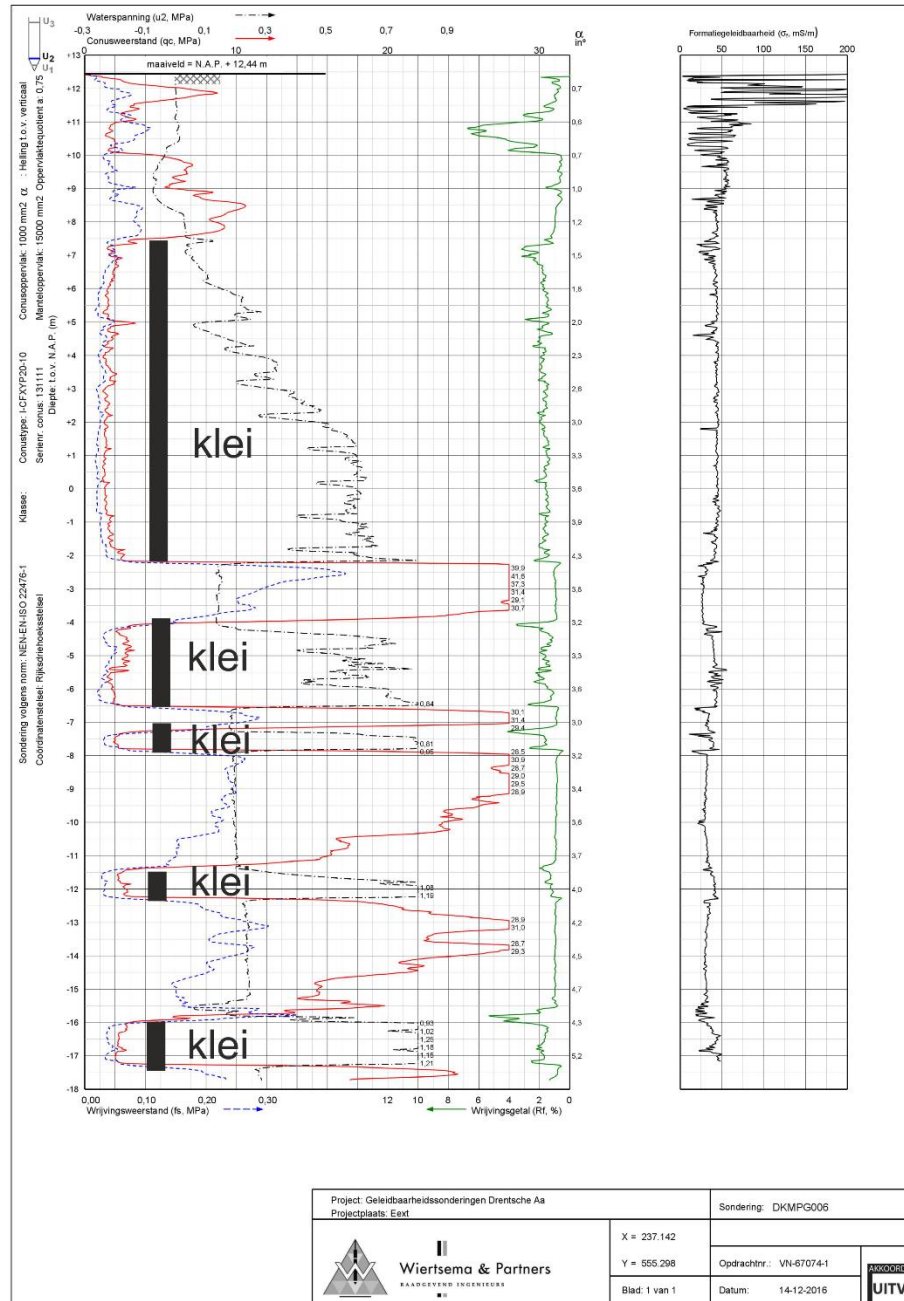


Figuur 25d. Elektrische weerstand op de locatie van de seismische lijn.

Sonderingen

De resultaten van de geleidbaarheids-sonderingen laten niet een eenduidig beeld zien van het verloop van de elektrische weerstand die kan worden gerelateerd aan het voorkomen van (pot-) klei. De gebruikte techniek, waarbij de weerstand wordt gemeten met een instrument op de sondeerconus en de daarna uitgevoerde kalibratie heeft niet geleid tot bruikbare resultaten. Wel zijn de traditionele gegevens van de sondering (conusweerstand en plaatselijke wrijving) waardevol gebleken. Als voorbeeld kan Figuur 26 dienen, deze sondering is in het westen van het gebied gezet, in het potklei voorkomen bij Assen. Uit deze grafiek blijkt dat de opbouw van het sediment bestaat uit een afwisseling van lagen met een hoge conus weerstand (zand) en met een lage conus weerstand (klei). Van +7 m NAP tot -2m NAP wordt klei gevonden, daarna 2m zand, daarna weer klei, en vervolgens een afwisseling van klei en zand. Tot de einddiepte van de sondering (-17m NAP) komt in totaal 14m pot-klei voor en 10m zand (de rest zijn andere sedimenten). Indien aangenomen wordt dat "echte" potklei een weerstand heeft van 10 Ohm.m en zand 130 Ohm.m dan komt de totale weerstand voor dit traject op 16 Ohm.m. Dit is in goede overeenstemming met de weerstand die in Figuur 13 wordt gevonden voor potklei voorkomen vanuit de boringen. Hieruit kan worden geconcludeerd dat

de potklei voorkomens voor een deel bestaan uit tamelijk continue klei voorkomens, maar dat er ook een afwisseling van klei en zand voorkomt, die duidt op snel wisselende afzettingsomstandigheden.



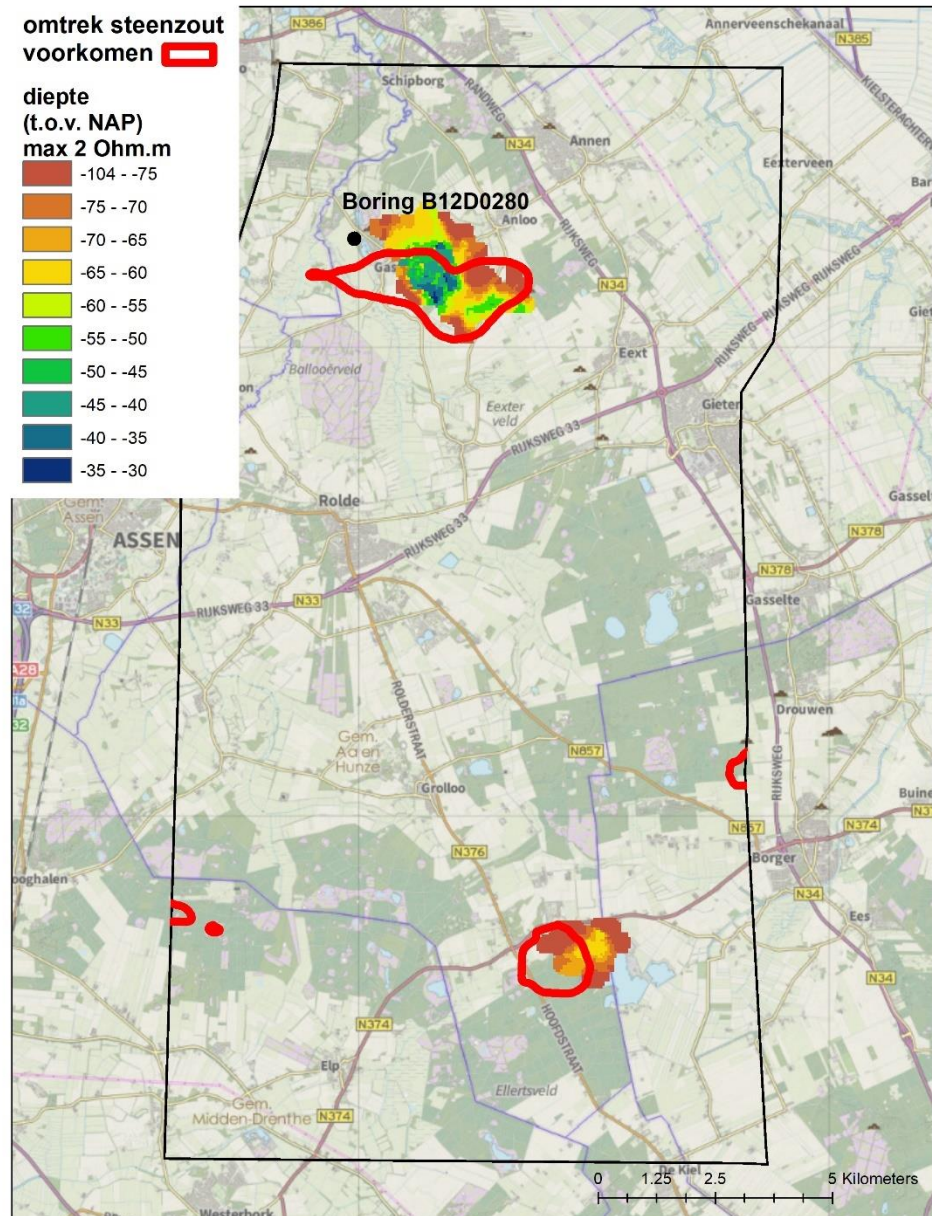
Figuur 26. Geleidbaarheidsondering met potklei.

Zout voorkomens

In delen van de ondergrond van het Drentse Aa gebied worden zoutvoorkomens aangetroffen. Deze stammen uit een ver geologisch verleden, zijn diep in de ondergrond begraven geraakt en zijn door langzame vervloeiing (halokinese) naar

boven gekomen. In de seismiek zijn deze zoutkoepels of zoutkussens als prominente fenomenen zichtbaar. De elektromagnetische techniek is zeer gevoelig voor het voorkomen van zout grondwater, en gezien het voorkomen van steenzout relatief ondiep in de ondergrond kan niet worden uitgesloten dat in de buurt van deze zoutvoorkomens het grondwater brak of zout is. In de seismische profielen over de zoutkoepel van Anloo is de ligging van de top van het zout geïnterpreteerd op ongeveer 800m -NAP. In de Electro Magnetische metingen is een gebied met zeer lage elektrische weerstand te zien, vaak lager dan 2 Ohm, zie Figuur 27. De locatie van deze lage weerstanden komt goed overeen met de ligging van het zout, zoals in de seismiek gevonden. Echter, de top van de zeer lage weerstand is gelegen op 36m -NAP. Dit is veel ondieper dan de seismiek aangeeft. Tevens is in grondwaterput B12D0280 een gehalte van 3200 mg/L CL- gemeten (zout grondwater) op een diepte van -66m NAP, en op 53m -NAP het gehalte Cl- 940 mg/L (brak grondwater). Op 32m -NAP is het grondwater zoet. Er zijn dus sterke aanwijzingen dat de kwaliteit van het grondwater wordt beïnvloedt door de diepe voorkomens van steenzout. Het mechanisme waarmee het diepe voorkomen van zout wordt getransporteerd naar het ondiepe grondwater is niet helder. Smit et al. (2018) hebben een theorie beschreven, waarin de stroming van diep grondwater naar boven wordt geforceerd door ondiepe zoutstructuren, die impermeabel worden verondersteld.

De seismische informatie van het zoutkussen bij Schoonloo wijst op een diepteligging van de top van het zoutvoorkomen op -140m NAP. In het elektrische weerstand model zijn geen aanwijzingen gevonden dat het zoutvoorkomen ondieper dan -50m NAP invloed heeft op de grondwaterkwaliteit, zie Figuur 27. De kartering van de klei voorkomens in het gebied met zout in de diepe ondergrond wordt bemoeilijkt door de kwaliteit van het grondwater. In de analyse zijn alle gebieden met een weerstand lager dan 2 Ohm beschouwd als beïnvloedt door de zout grondwater en daardoor niet gerekend tot de kleien. In de betrouwbaarheid kaart, Figuur 24, is het gebied waar de weerstand < 2 Ohm.m is weergegeven als "gemiddeld betrouwbaar", omdat niet is uit te sluiten dat de kwaliteit van grondwater daar toch beïnvloedt is door het zout in de ondergrond en dat daarom de kleidiktes overschat zijn.



Figuur 27. Diepteligging van de elektrische weerstand < 2 Ohm.m, samen met de ligging van de het steenzout voorkomen en de grondwaterput met hoge saliniteit in het grondwater op -66 tot -55m NAP.

Hydraulische parameterisatie

Een belangrijk doel van het TopSOIL project is beter inzicht te krijgen in de mogelijkheden die de ondergrond biedt om de gevolgen van klimaat verandering te kunnen voorspellen en maatregelen te nemen om deze gevolgen op te vangen. Hierbij wordt met name aan de waterhuishouding gedacht en is het in detail kennen van de weerstand-biedende lagen in de ondergrond een belangrijke stap. Voor het berekenen van de effecten worden hydrologische modellen gebruikt met als belangrijke parameter de doorlatendheid. Met name de verticale doorlatendheid en de reciproke ervan – hydraulische weerstand – zijn belangrijke parameters in de

modellering van grondwaterstroming. Daarom is de logische volgende stap om het geologisch model te voorzien van verticale doorlatendheid en afgeleide kaarten van de hydraulische weerstand te maken.

De Geologische Dienst Nederland beschikt over een database van doorlatendheid aan ongestoorde monsters voor een groot aantal geologische Formaties en grondsoorten. De verticale doorlatendheid van de aanwezige grondsoorten in het Drentse Aa gebied is uit deze database genomen. Hierbij is, voor zover relevant, een opschaling van monsterschaal naar modelschaal (voxel) uitgevoerd. Dit is met name van belang voor de sedimenten die op de voxel schaal een grote heterogeniteit in grondsoorten laten zien. In het algemeen is het voor de zandige afzettingen niet nodig om een complexe opschaling uit te voeren en kan worden volstaan met een gemiddelde, waarbij een correctie is uitgevoerd voor de spreiding van de meetwaarden, voor details zie Stafleu en Gunnink (2016). Voor de potklei is de verticale doorlatendheid genomen uit Gunnink en Siemon (2015). De verticale doorlatendheid van iedere voxel met potklei is afhankelijk gemaakt van het aandeel klei, zoals dat is bepaald door middel van het model van de elektrische weerstand, zie Figuur 14. Vervolgens is de hydraulische weerstand voor het aandeel potklei en voor het aandeel zand bepaald en is deze gesommeerd om een hydraulische weerstand van potklei te kunnen bepalen.

Tabel 1. Verticale doorlatendheid voor de eenheden in het Drentse Aa gebied.

Formatie	lithoklasse	kv (m/d)	c (d/m)
Peelo	klei	6.91E-04	1450
Peelo	zandige klei	1.40E-03	715
Peelo	fijn zand	0.5	2
Eem	klei	3.50E-03	285

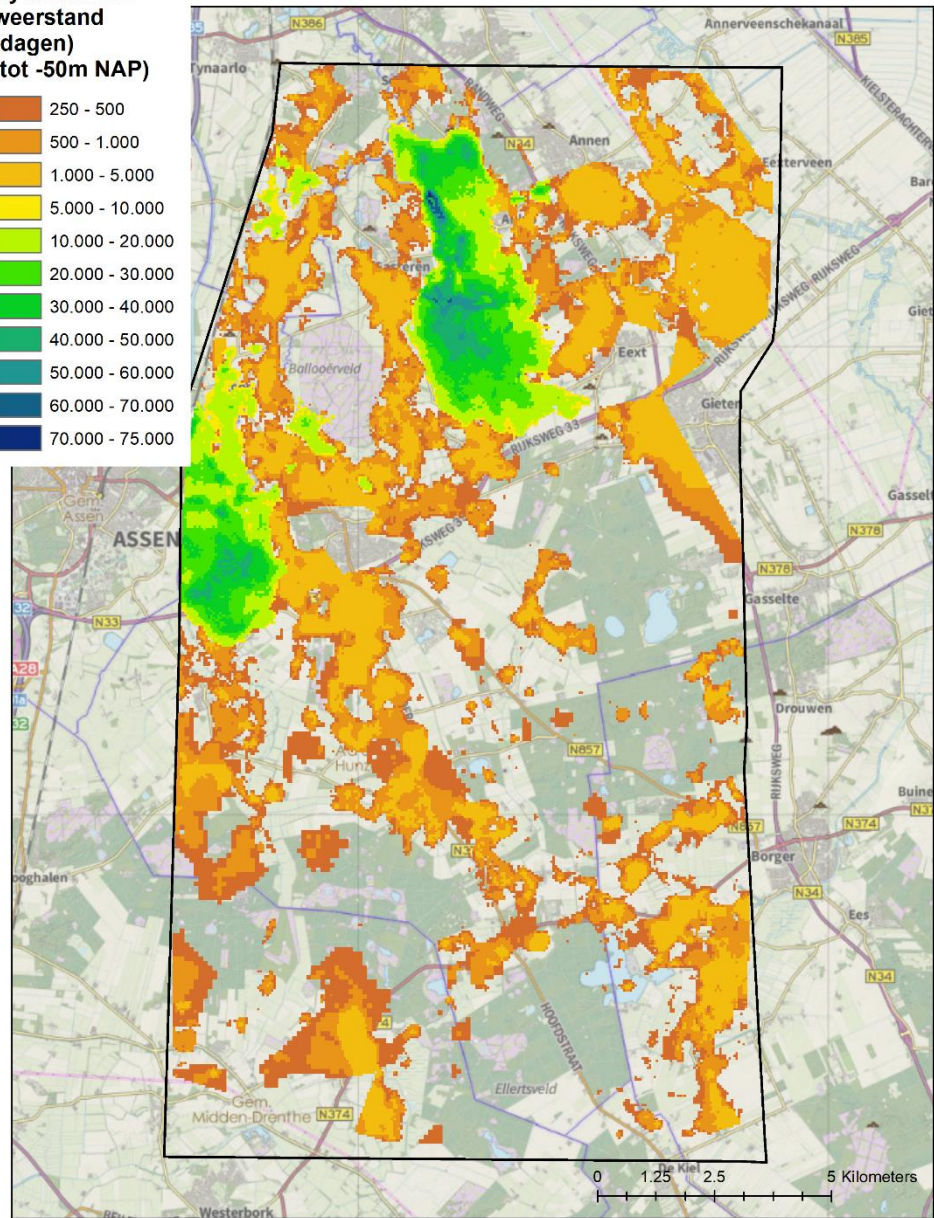
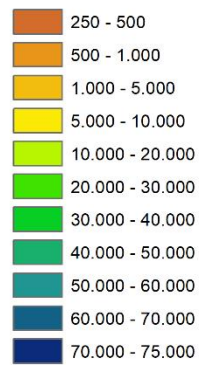
In tabel 1 staan de gebruikte verticale doorlatendheden voor de verschillende eenheden vermeld. Zoals te verwachten heeft de potklei een zeer lage doorlatendheid, evenals de Eem kleien. De doorlatendheid van de fijne zanden is bepaald door aan te nemen dat (max.) 10% van het volume bestaat uit zandige klei; de hydraulische weerstand is overeenkomstig berekend.

De methode om de hydraulische weerstand van de Eem klei te berekenen is gelijk aan die van de potklei, met de waarde voor verticale doorlatendheid voor de Eem klei uit tabel 1.

De hydraulische weerstand voor de keileem is overgenomen van het huidige REGIS II, v 2.2 model, waarbij de relatie van Bakker, 1984 (die de hydraulische weerstand afhankelijk maakt van de dikte van de keileem) is gebruikt. In de delen van het gebied waar uitsluitend zanden voorkomen (dus geen potklei, fijne, "terugval" zanden of keileem) is aangenomen dat de hydraulische weerstand gering is (< 250 dagen).

De gesommeerde hydraulische weerstand, tot 50m -NAP, is weergegeven in Figuur 28. De voorkomens van potklei bij Anloo en bij Assen vertonen een hydraulische weerstand van 10.000 dagen (~30 jaar) aan de randen tot meer dan 50.000 dagen (~ 135 jaar) in het centrale gedeelte. Dit betekent in de praktijk dat de ondergrond niet doorlatend is. Buiten de potklei voorkomens wordt de weerstand bepaald door die van de fijne zanden (300 – 1.750 dagen) en de keileem.

**Hydraulische
weerstand
(dagen)
(tot -50m NAP)**



Figuur 28. Hydraulische weerstand tot -50m NAP.

5 Conclusie

De gebied-dekkende gegevens van de elektrische weerstand van de ondergrond, zoals die is gemeten m.b.v. helikopter metingen zijn zeer waardevol gebleken om de verbreiding en dikte van de klei voorkomens in het studie gebied te modelleren. Dit heeft een gedetailleerd beeld van de dikte en de hydraulische weerstand van de zgn. potklei en de klei in de Eem formatie (in het Hunzedal) opgeleverd. Daarnaast zijn sedimenten herkend in de resultaten van de helikopter metingen die duiden op de aanwezigheid van klei (-laagjes) in een fijn-zandige matrix. Deze zgn. "fijne zanden" worden verondersteld een hydraulische weerstand te hebben doordat de aanwezigheid van klei de verticale doorlatendheid beïnvloedt. De parameterisatie met verticale doorlatendheid heeft geresulteerd in een model van de hydraulische weerstand van de ondergrond tot -50m NAP. Dit model kan een bijdrage leveren aan de detaillering van modellering van de grondwaterstroming in het gebied. Hoge Resolutie Seismiek heeft de ligging van een begraven geul uit de Elster ijstijd aangetoond, welke goed overeenkomt met de resultaten van de helikopter metingen. Verder zijn er aanwijzingen gevonden van de invloed van steenzout voorkomens op de grondwaterkwaliteit in de bovenste 50-70m. Om de resultaten van de modellering te verifiëren wordt aanbevolen om technieken in te zetten die in het ondiepe bereik een hoge resolutie hebben. Een nieuw ontwikkelde techniek, tTEM genoemd, is gebaseerd op hetzelfde principe als de helikopter metingen. Het meetapparaat wordt achter een quad voortgetrokken, waardoor een hogere resolutie kan worden verkregen. De resultaten hiervan kunnen worden gebruikt om te vergelijken met die van de helikopter metingen. Daarnaast kunnen bestaande technieken, zoals Hoge Resolutie Seismiek en sonderingen worden ingezet om de huidige resultaten te verifiëren.

De kaartbeelden van de hydraulische weerstand kunnen door gebiedsdeskundigen worden beoordeeld op plausibiliteit. Door de resultaten te gebruiken in grondwaterstromingsmodellen wordt duidelijk of met de gemodelleerde hydraulische weerstanden een betere kalibratie kan worden verkregen.

6 Referenties

Bakker, T.W.M., 1984. Het Dwingelderveld geohydrologie, Staatsbosbeheer en Natuurmonumenten, SBB, december 1984, 1984-29

Bosch, J.H.A., 1990. Toelichting bij de Geologische kaart van Nederland 1:50.000. Blad Assen West (12W) en Blad Assen Oost (12O). Rijks Geologische Dienst, Haarlem.

Bosch, J.H.A., R. Harting & J.L. Gunnink, 2014. Lithologische karakterisering van de ondiepe ondergrond van Noord-Nederland (Topsysteem hoofdgebied 5). TNO-rapport TNO2014-R10680, 269 pp.

Gunnink, J.L. B. Siemon, 2105. Applying airborne electro-magnetics in 3D stochastic geohydrological modelling for determining groundwater protection. Near Surface Geophysics, 2015, 13, 45-60.

Gunnink, J.L., D. Maljers, S.F. van Gessel, A. Menkovic & H.J. Hummelman, 2013. Digital Geological Model (DGM): a 3D raster model of the subsurface of the Netherlands. Netherlands Journal of Geosciences – Geologie en Mijnbouw 92, p. 33-46.

Mulder, F.J., de, M.C. Geluk, I.L. Ritsema, W.E. Westerhoff en T.E Wong, 2003. De ondergrond van Nederland. Wolters-Noordhoff, Groningen / Houten

Smit, F, F Magri en E Bregman, 2018. Coupling eart surface processes and geological structures to explain environmental features as observed onshore Northern Netherlands. SEG Technical Program Expanded Abstracts.

Stafleu, J., D. Maljers, F.S. Busschers, J.L. Gunnink, J. Schokker en J.H. Hummelman, 2019. Totstandkomingsrapport GeoTOP. TNO-rapport TNO 2019 R 11655.

Vernes, R.W. en Th.H.M. van Doorn, 2005. Van gidslaag naar hydrogeologische eenheid. Toelichting op de totstandkoming van de dataset REGIS II. TNO-rapport NITG 05-038-B, 69 pp

7 Ondertekening

Utrecht, mei 2020

TNO

Naam en paraaf tweede lezer



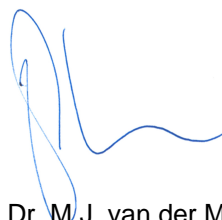
Dr. R.H. Kars

Ondertekening

Autorisatie vrijgave



Drs. J.L. Gunnink
Auteur



Dr. M.J. van der Meulen
Research manager

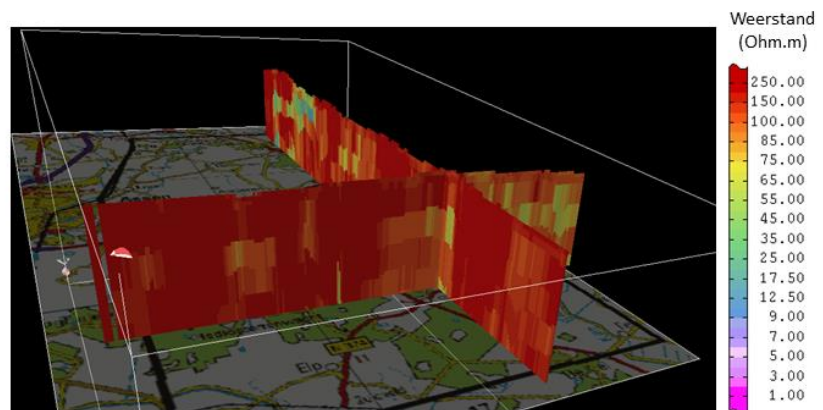
A Vergelijking tussen elektrische weerstand model en Pe-k-1 in REGIS II, v2.2

Vergelijking tussen elektrische weerstand model en Pe-k-1 in REGIS II, v2.2

Het model van de verbreiding en dikte van de potklei, gebaseerd op de elektrische weerstand, wijkt sterk af van de verbreiding van de PE-k-1, zoals die in Regis is gemodelleerd, zie Figuur 19. Een reden is reeds genoemd: een aantal boringen die worden geclassificeerd als behorend tot de PE-k-1 zijn beschreven als hoofdgrondsoort zand, (zeer) fijn, sterk slibhoudend, grijsachtig en soms met de toevoeging kleilaagjes. Op basis van deze informatie heeft de (hydro-) geoloog die de interpretatie heeft gedaan besloten om dit interval te classificeren als behorende tot de PE-k-1. In het model van de elektrische weerstand zijn vaak op deze locaties geen aanwijzingen voor klei te vinden, de elektrische weerstand is vaak ruim boven de 70 Ohm.m. Zoals in Figuur 13 is te zien is de kans op klei dan zeer gering. Het beeld van de verbreiding van de potklei lijkt scherp afgebakend te zijn en de dikke pakketten klei lijken beperkt te zijn tot geul insnijdingen, zoals blijkt uit de Hoge Resolutie Seismiek. De boringen met fijn zand, slibhoudend en soms klei laagjes vertegenwoordigen niet de “klassieke”, aaneengesloten klei voorkomens, die zo karakteristiek zijn voor de potklei, daarvoor is de elektrische weerstand te hoog.

In een aantal boringen komt klei uit de Formatie van Peelo voor, die niet wordt ondersteund door de helikopter metingen. Bijvoorbeeld, in het zuiden van het gebied, bij de plaats Borger, wordt een boring aangetroffen met intervallen die als (pot-)klei zijn beschreven (boring B12G0081 met 11.5m potklei). Daarnaast zijn in de omgeving ook een aantal boringen die als fijn zand met klei laagjes zijn beschreven. Een voorbeeld is boring B12G0044, met een interval (van 23 – 38 onder maaiveld) dat is beschreven als “zand, fijn, slibhoudend, grijs” en dat is geclassificeerd als Peelo klei.

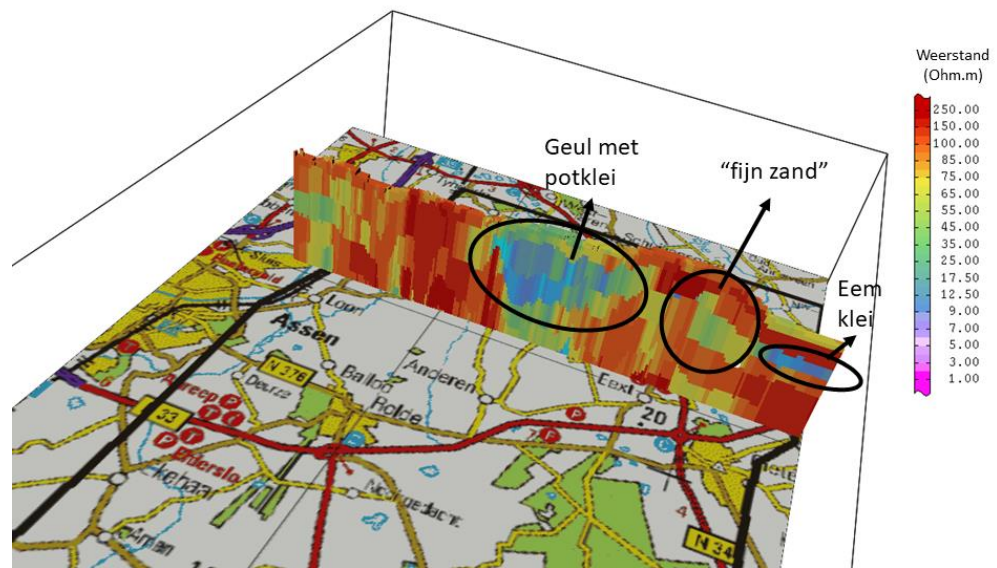
In Figuur A1 is een dwarsdoorsnede te zien, waarbij het kruispunt van de profielen ligt ten Noordwesten van Borger, ter hoogte van de boring B12G0081. Er zijn in dit gebied slechts hoge elektrische weerstanden gemeten (> 70 Ohm.m) die niet duiden op de aanwezigheid van klei. Het lijkt er derhalve op dat de boring met potklei geïsoleerd voorkomt, zonder een duidelijk regionale verbreiding. Een mogelijke verklaring is dat de het landschap in de Elster ijstijd, nadat het ijsdek is verdwenen, sterk geaccidenteerd was als gevolg van erosie onder het ijs, met lokale depressies waarin klei kon bezinken. Deze lokale klei voorkomens kunnen per abuis worden gezien als een regionaal klei voorkomen. Echter, het elektrische weerstand model van de ondergrond laat te hoge weerstanden zien om regionale klei voorkomens te veronderstellen.



Figuur A1. Elektrische weerstand ten noord-westen van Borger, ter hoogte van boring B12G0081.

Ten noorden van Assen komen een tweetal boringen (B12D0269 en B12D0281) voor waarin potklei is beschreven. De geringe dikte (<3m) en het feit dat er in de potklei zandlaagjes zijn beschreven resulteert erin dat de helikopter metingen dit niet aantoont. Hier geldt waarschijnlijk ook dat het een lokaal voorkomen van potklei van een geringe dikte betreft. Verder worden de boringen die in de omgeving staan en die als PE-k-1 zijn geclassificeerd beschreven als fijn zand met “leemkluitjes”, waaruit niet eenduidig blijkt dat het om potklei gaat.

In het Noordoosten van het gebied, ten oosten van de Hondsrug, komen een aantal boringen voor waarin, volgens de Regis classificatie, intervallen zijn aangetroffen die tot de PE-k-1 zijn gerekend. De basis van de PE-k-1 in dit gebied ligt tussen de -20 en -40m NAP. In Figuur A2 staat de elektrische weerstand weergegeven in een dwarsprofiel over dit gebied, ten noorden van Gieten. De elektrische weerstand geeft geen aanleiding tot het veronderstellen van klei, de weerstanden zijn groter dan 60 Ohm.m. Er is wel een terugval in elektrische weerstand te zien, deze is gerekend tot de zgn. "fijne zanden", waarin een beperkt aandeel klei / leemlaagjes voorkomt.



Figuur A2. Dwarsdoorsnede over boringen met PE-k-1 in het Hunzedal.

B Integrale weergave van TNO rapport: “Validatie model van de verbreiding van Peeloklei (potklei) in Drentsche Aa gebied”

Inleiding

In opdracht van het Waterschap Hunze en Aa's zijn 16 sonderingen gezet in 5 korte raaien om de verbreiding van de potklei te valideren, zoals die is bepaald op basis van helikoptermetingen. Het waterschap wil graag weten of de grens van de potklei accuraat genoeg is om te gebruiken ten behoeve van afbakening van gebieden voor berekening met grondwater. Grondwateronttrekking onder een (dikke) potklei zal relatief weinig invloed hebben op de freatische grondwaterstand. Door de firma Wiertsema & Partners zijn in het begin van 2020 deze sonderingen gezet en uitgeleverd aan de Basis Registratie Ondergrond (BRO).

De potklei (formeel: Formatie van Peelo, laagpakket van Niewolda) is opgebouwd uit massieve klei- en leem lagen met ongeveer 70% fijne fractie (< 63µm) en 3% organische stof. Afhankelijk van de sedimentaire geschiedenis en de locatie ten opzichte van het centrum van het depositiebekken bestaat de potklei uit meer of minder klei/leem met ingeschakelde zandlagen. De sedimentatie heeft plaatsgevonden in een gletsjermeer, dat is gevormd doordat de gletsjer een depressie heeft uitgesleten. In het diepste deel van de depressie bezinken de meest fijne sedimenten, klei en leem, terwijl in minder diepere delen, op de flanken van de depressie, (fijn) zand wordt afgezet. Dit gehele complex van sedimenten wordt tot de Formatie van Peelo, laagpakket van Niewolda gerekend.

Uitwerking

In de bijgevoegde figuren in de appendix staan de resultaten weergegeven. We hebben de interpretatie van de sonderingen vergeleken met de resultaten van het 3D model van de kans op potklei (en de elektrische weerstand) uit de helikopter metingen. Voor iedere sondeerraai is het bijbehorende diepteprofiel uit het 3D model geploteerd. De conusweerstand (in rood) en het wrijvingsgetal (in blauw) zijn als functie van de diepte getekend op het profiel. Verder zijn enkele karakteristieken weergegeven die uit het helikopter model zijn berekend, zoals de gesommeerde dikte van de potklei op de locatie van de sondering, zowel voor het diepte-interval van de sondering als over de gehele diepte (tot -50m NAP). Ook de grens van de potklei verbredening uit het helikoptermodel is weergegeven.

Resultaten

In gebieden waar continue helikoptermetingen aanwezig zijn blijkt dat de sonderingen goed overeenkomen met de interpretatie van de helikoptermetingen. Sondeerraai 1-2-3-4, 11-12-13 en 14-15-16 laten zien dat de interpretatie van de sonderingen goed overeenkomen met het model van de dikte van de potklei, zoals die uit de helikoptermetingen blijkt. In een paar gebieden zijn helikoptermetingen verwijderd, vanwege bijv. de aanwezigheid van een hoogspanningsleiding, waardoor het model van de dikte van de potklei wordt gebaseerd op interpolaties van dichtstbijzijnde helikoptermetingen. Dit levert een minder betrouwbaar resultaat op, waardoor de vergelijking met de sonderingen ook minder betrouwbaar is. Dit geldt bij sondering 6 en 7, en met name bij sondering-raai 8-9-10.

Sondeerraai 1-2-3-4

Sondeerraai 1-2-3-4 laat een scherpe overgang zien van het ontbreken van potklei in sonderingen 1, 2 en 3 naar het voorkomen van dikke potklei in sondering 4. De dikte van de potklei uit de helikoptermetingen verandert snel rond sondering 4; op de locatie van sondering 4 komt over de diepte van de sondering bijna 10m potklei voor (er zijn enkele zandinschakelingen aanwezig), terwijl een tiental meters naar het westen de dikte oploopt tot 17m, volgens het model dat is gebaseerd op de helikoptermetingen.

Sondeerraai 5-6-7

In sondeerraai 5-6-7 is in sondering 5 een duidelijke potklei aanwezig. Sondering 6 en 7 zijn vergelijkbaar aan elkaar, waarbij in sondering 6 een aantal potklei lagen zijn te herkennen met tussenliggend ingeschakelde zanden, terwijl in sondering 7 twee dunne potklei lagen voorkomen. Het is duidelijk dat de dikte van de potklei afneemt, wat ook uit de helikoptermetingen blijkt. Op de locatie van sondering 6 en met name 7 zijn de helikoptermetingen verwijderd, waarschijnlijk vanwege de invloed van de kabels en leidingen langs de weg. Toch blijkt uit het elektrische weerstand model en de daaruit afgeleide dikte van de potklei dat de deze redelijk goed overeenstemt met de interpretatie van de sonderingen.

Sondeerraai 8-9-10

Op de locatie van sondeerraai 8-9-10 laat het model van de kans op potklei een duidelijke afname zien van west naar oost, die ook te zien is in de sonderingen. Sondering 8 laat een duidelijke laag potklei zien (van 7m NAP tot 4m NAP), terwijl daaronder het sondeerbeeld incidenteel dunne laagjes potklei laten zien (rond 3m en van -2 tot -3.5m). De totale dikte van de potklei is geringer dan het model van de kans op potklei voorspelt. Sondering 8 ligt op de overgang van een hoge kans op potklei (0.9) naar een minder hoge kans (0.7). Verder zijn in dit gebied helikoptermetingen verwijderd vanwege verstoringen, door -waarschijnlijk- een hoogspanningsleiding en de kabels en leidingen langs de Anderense weg. Daardoor is de grens van het potklei voorkomen hier minder zeker. Dit geldt tevens voor sondering 9: van 8m tot 4m komt potklei voor, het model van de dikte van de potklei gebaseerd op de helikoptermetingen schat hier 8m potklei. In sondering 10 wordt geen potklei aangetroffen, conform de interpretatie van de helikopter

metingen. Voor een groot deel van dit gebied is de betrouwbaarheid van het diktemodel van de potklei als gemiddeld bepaald.

Sondeerraai 11-12-13 en sondeerraai 14-15-16

De sondeerraai 11-12-13 laat zien dat de grens van de potklei, gebaseerd op de helikoptermetingen, wordt bevestigd door de sonderingen. Dit geldt tevens voor sondeerraai 14-15-16, waar alleen sondering 16 een duidelijke potklei te zien geeft, terwijl in sondering 14 en 15 geen potklei wordt aangetroffen.

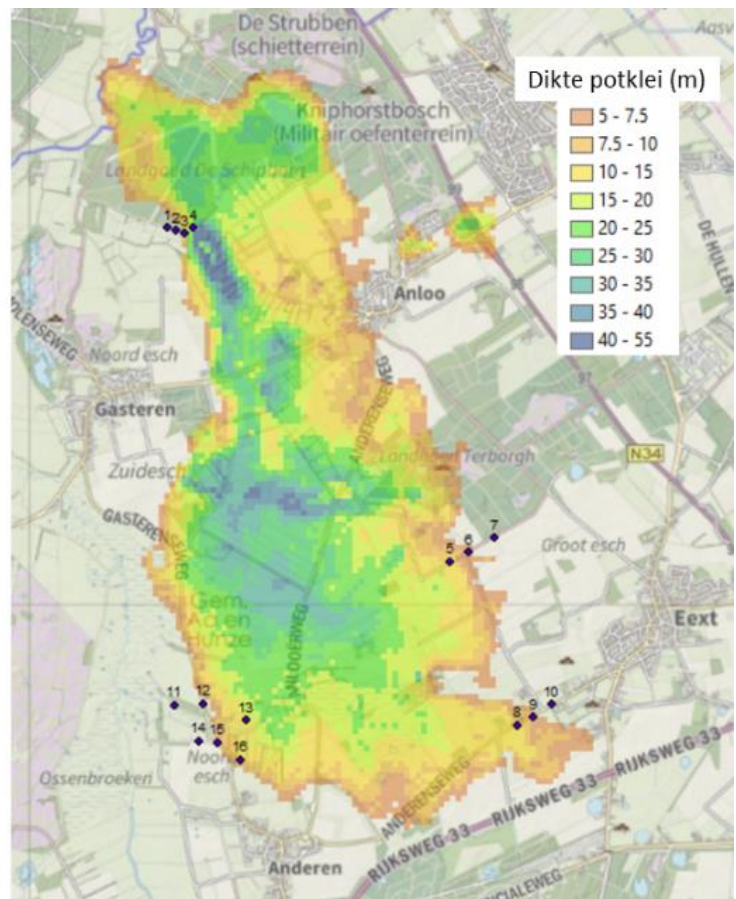
Verder zijn er nog twee profielen gemaakt van west naar oost over het gehele voorkomen van de potklei: profiel 14-15-13-8-9-10 en profiel 11-12-5-6-7, ter verduidelijking van de onderlinge relaties van potklei voorkomens.

Conclusie

De verbreiding en dikte van de potklei, zoals die op de helikoptermetingen is gebaseerd, is gevalideerd met een 5-tal korte sondeerraaian. Hieruit blijkt dat in gebieden waar continue helikoptermetingen aanwezig zijn, de verbreiding van de potklei wordt bevestigd door de sonderingen. Daar waar helikoptermetingen zijn verwijderd (vanwege verstoringen door bijv. kabels en leidingen of door hoogspanningsleiding) moet rekening worden gehouden met een grotere onzekerheid.

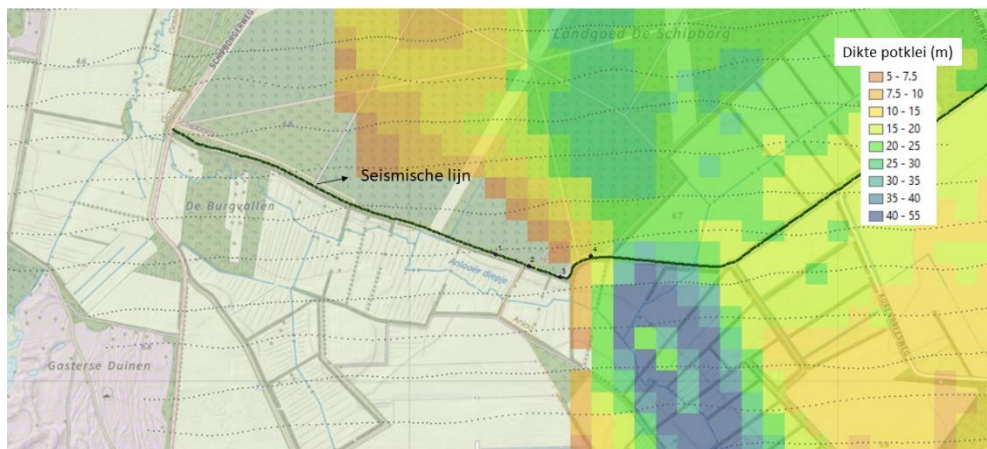
Figuren behorende bij appendix 2

Locatie sonderingen

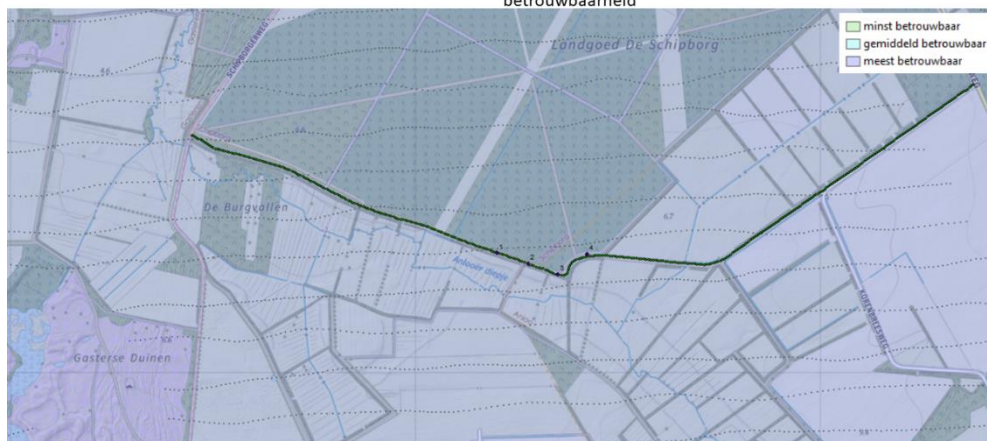


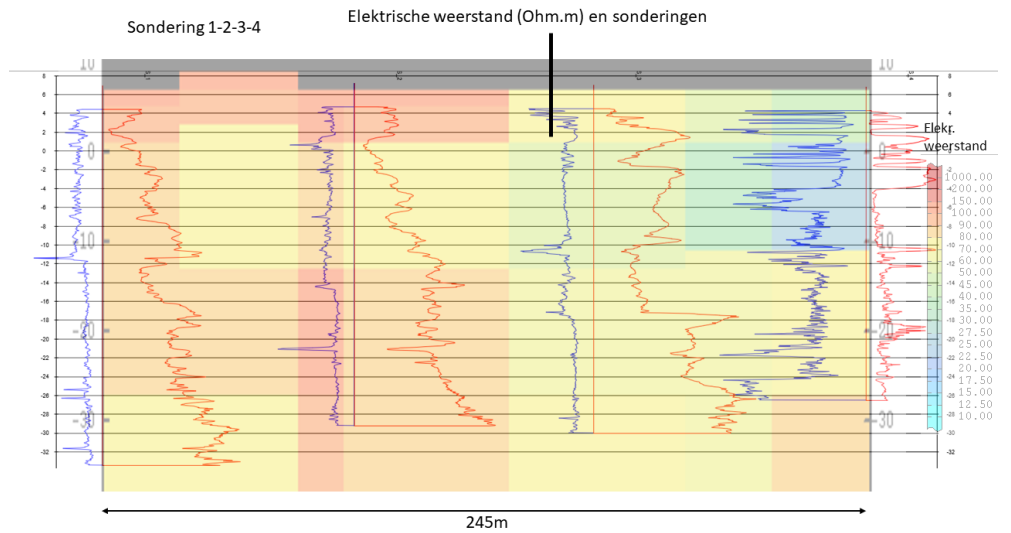
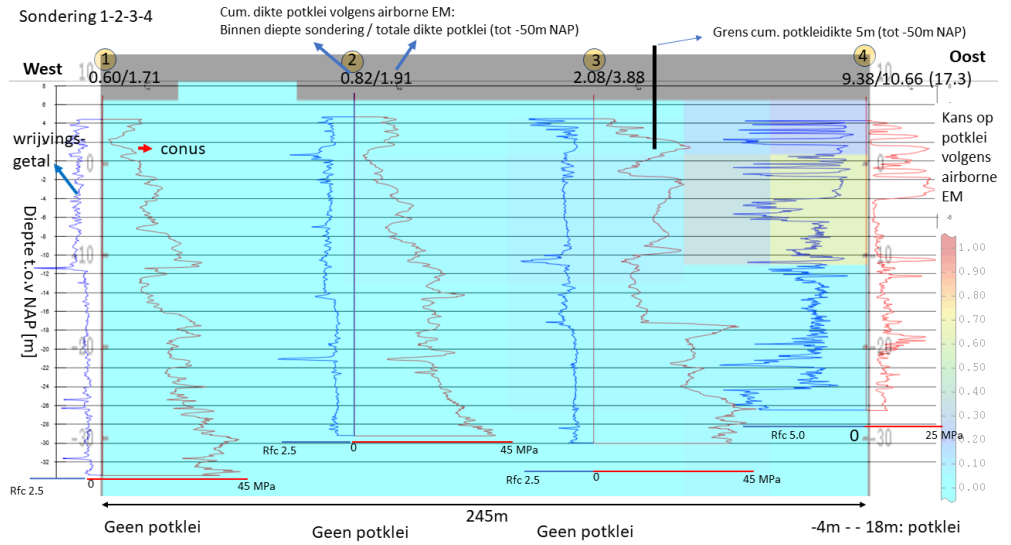
Sondering 1-2-3-4

Dikte potklei (meters)

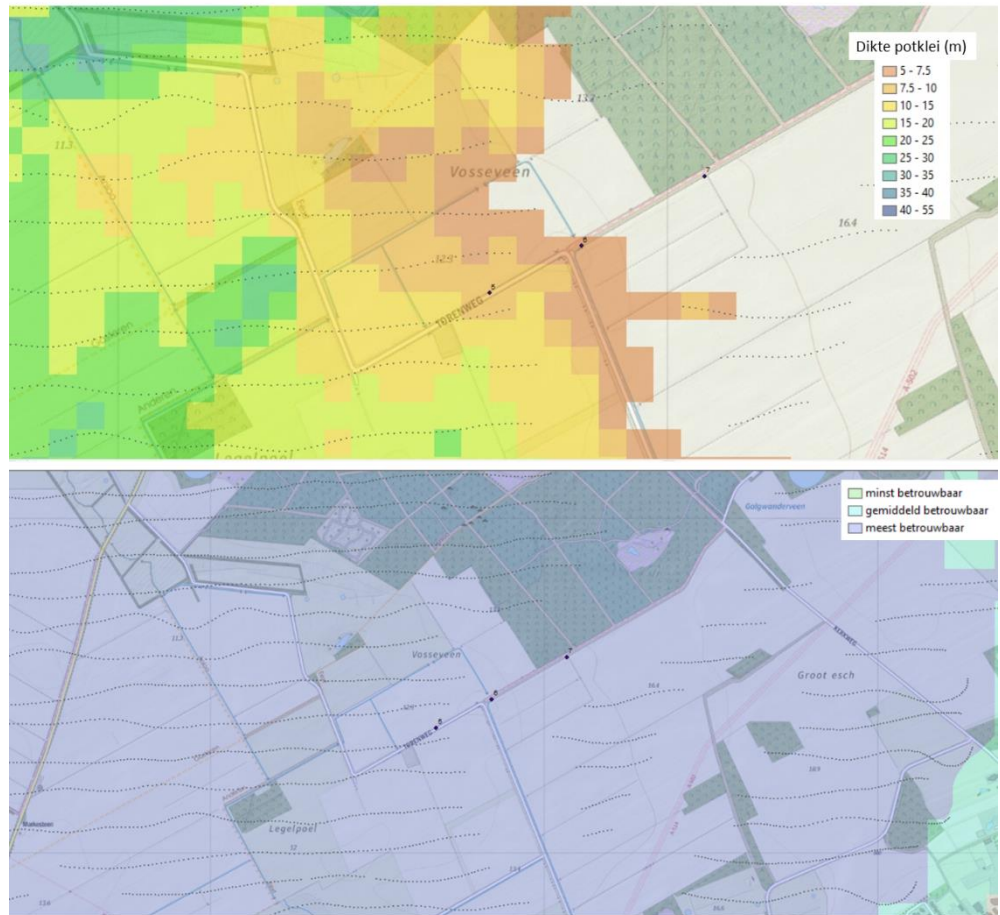


betrouwbaarheid

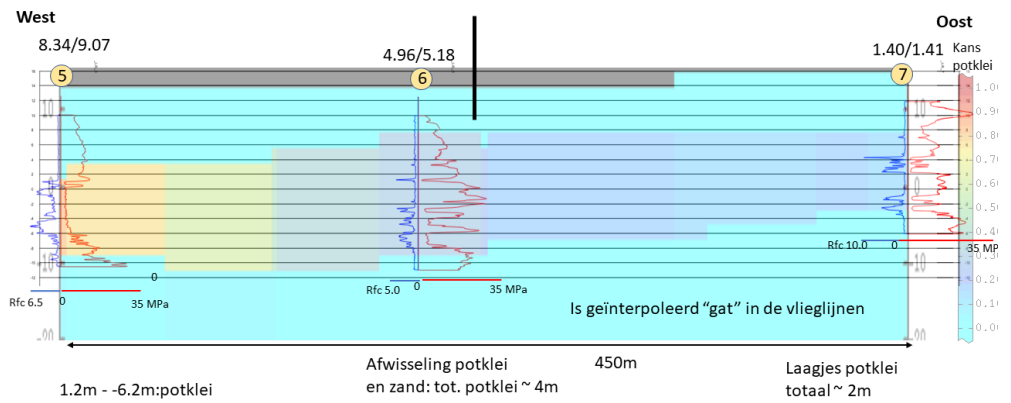




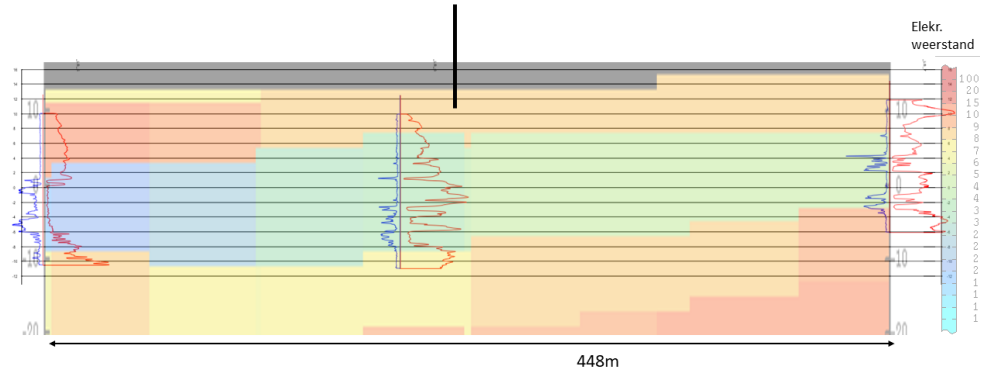
Sondering 5-6-7

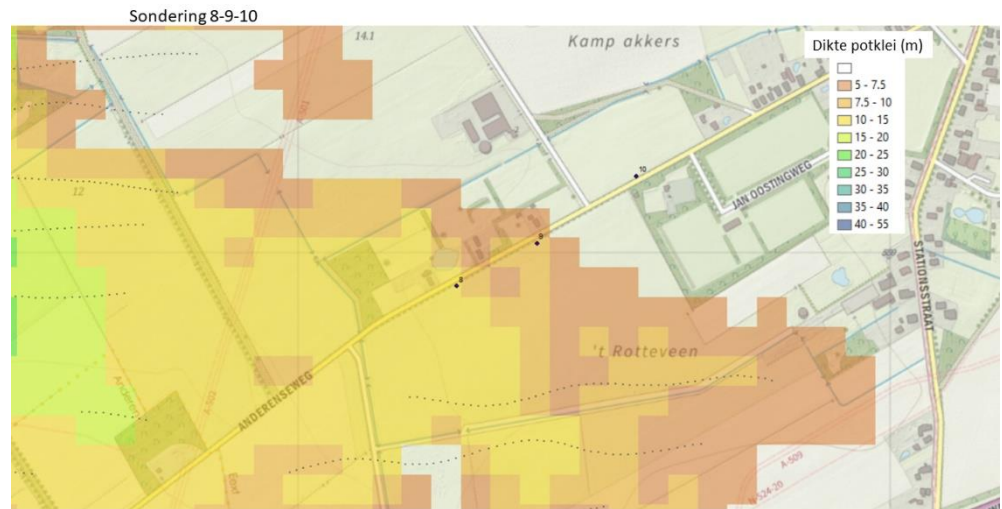


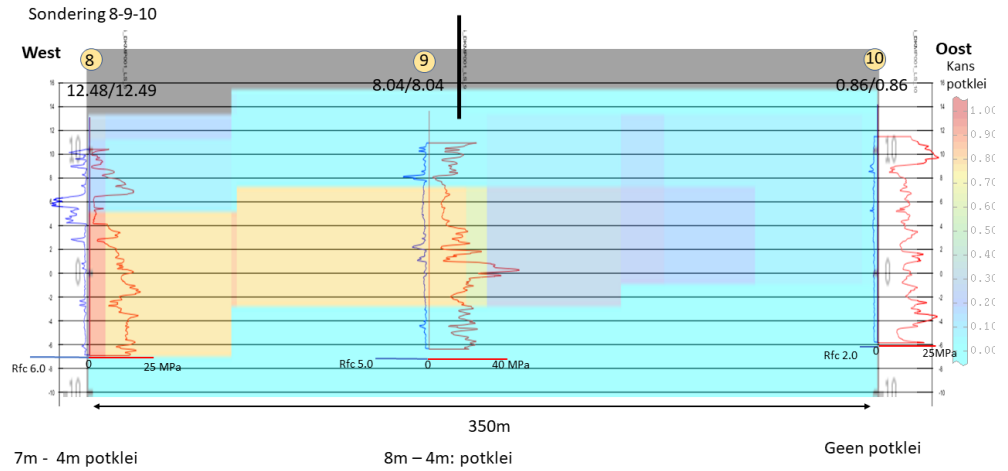
Sondering 5-6-7



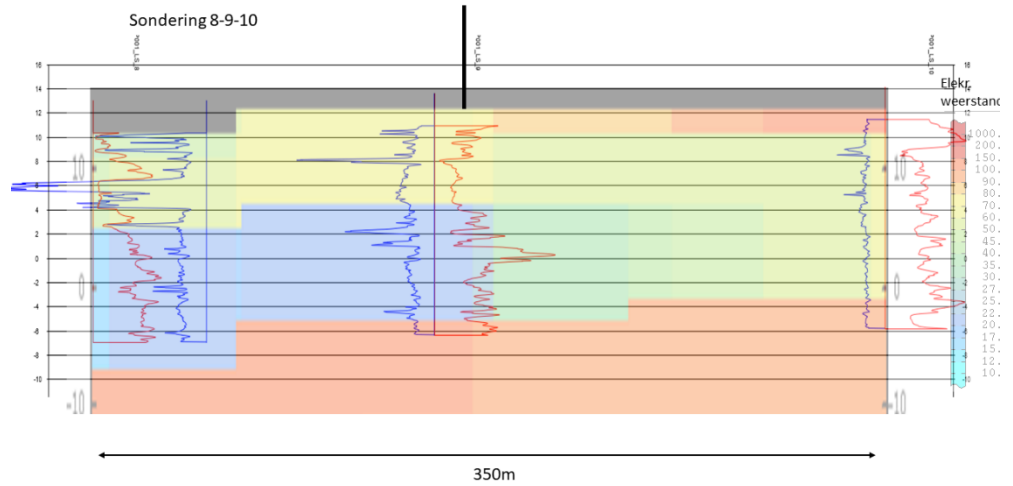
Sondering 5-6-7





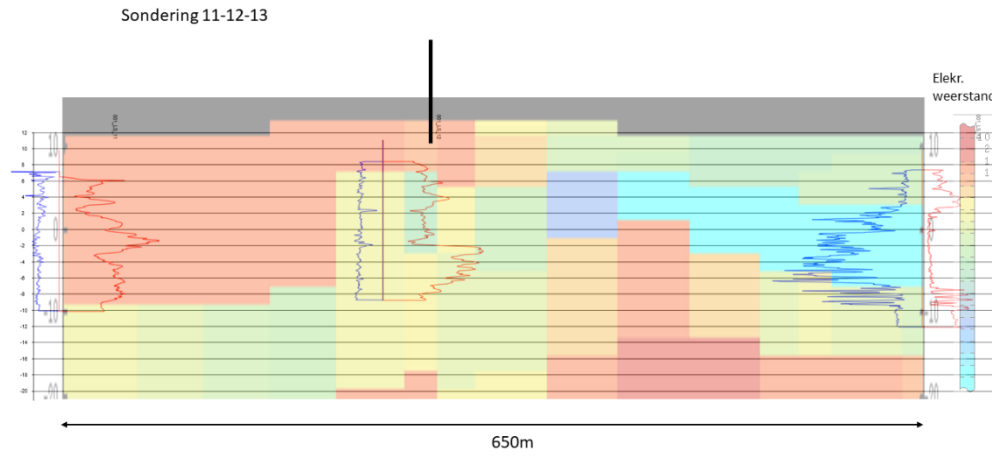
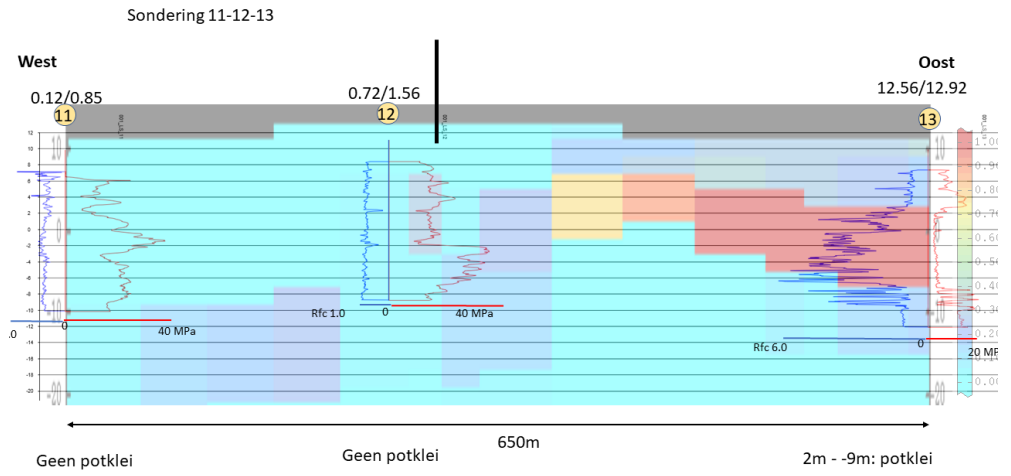


Deze sondeer-raai ligt rel. ver van de skyTEM metingen, in een gebied met "gemiddelde betrouwbaarheid". Dit verklaart waarom sondering 9 en 10 slechts een geringe dikte potklei laat zien, terwijl de dikte volgens het skyTEM model wel aanzienlijk is. Sondering 8 ligt precies op de grens van hoge kans (0.9) en matige kans (0.7) op potklei.

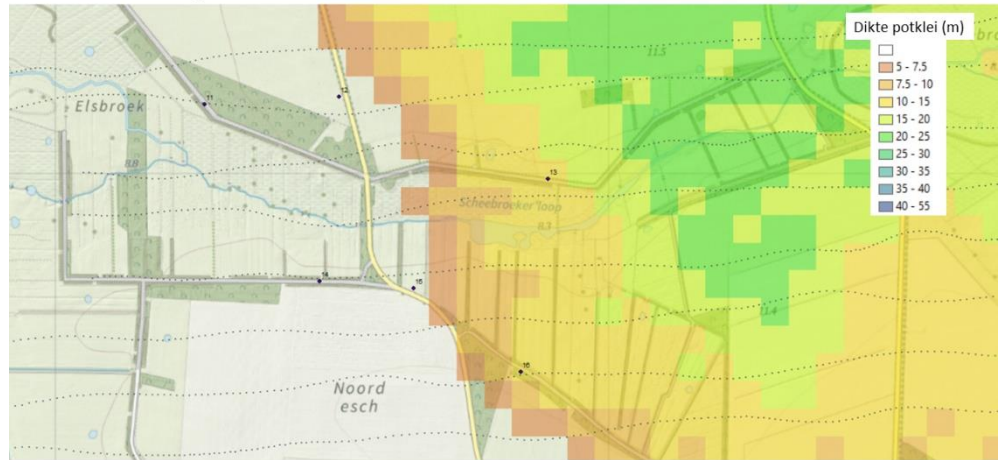


Sondering 11-12-13

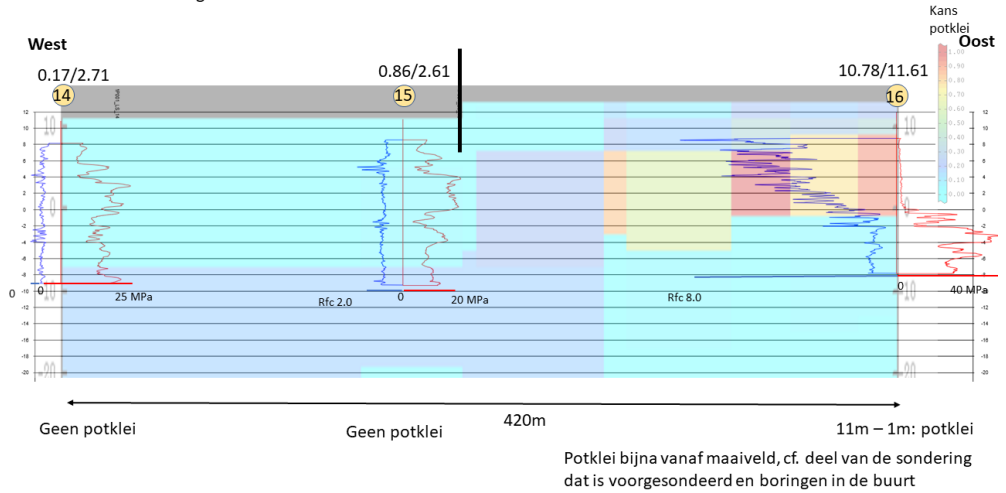




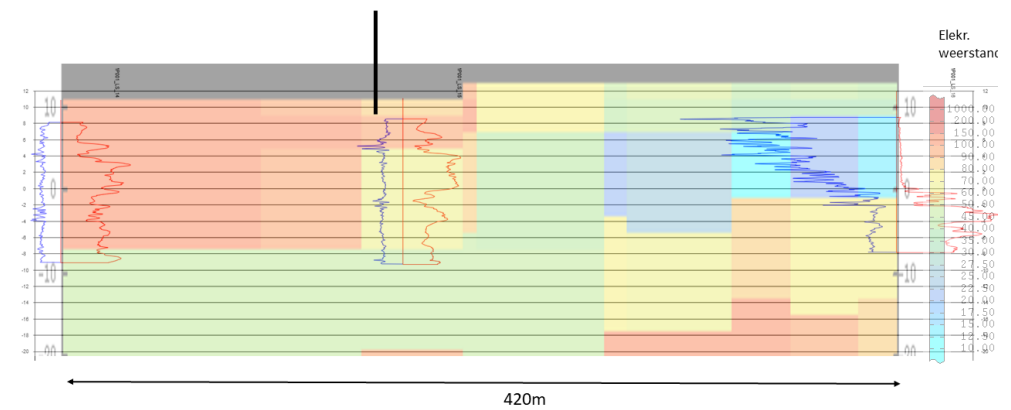
Sondering 14-15-16



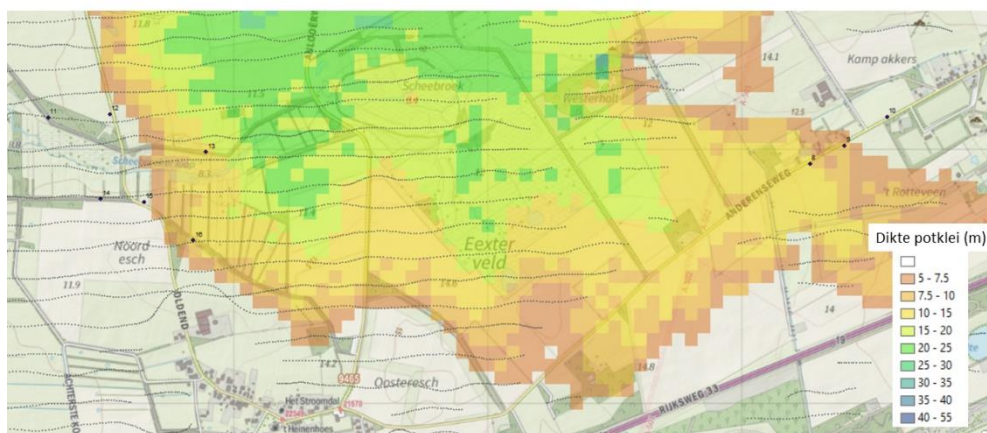
Sondering 14-15-16



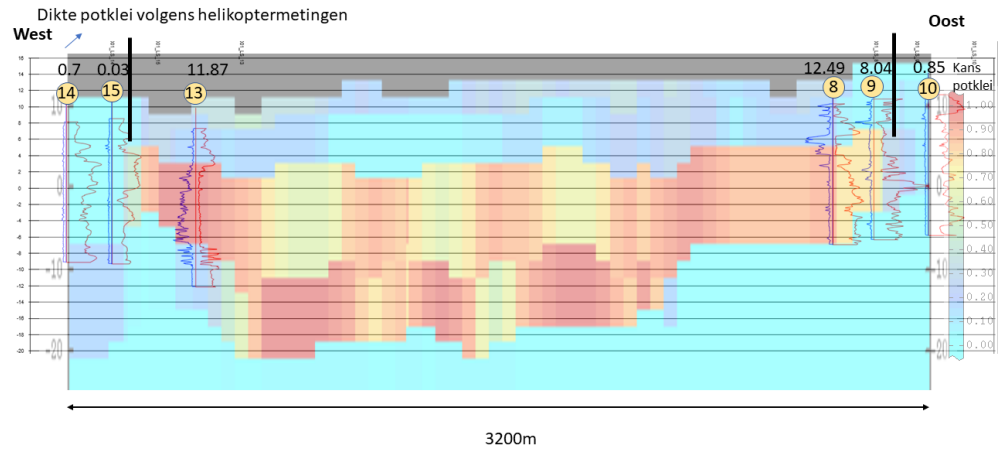
Sondering 14-15-16



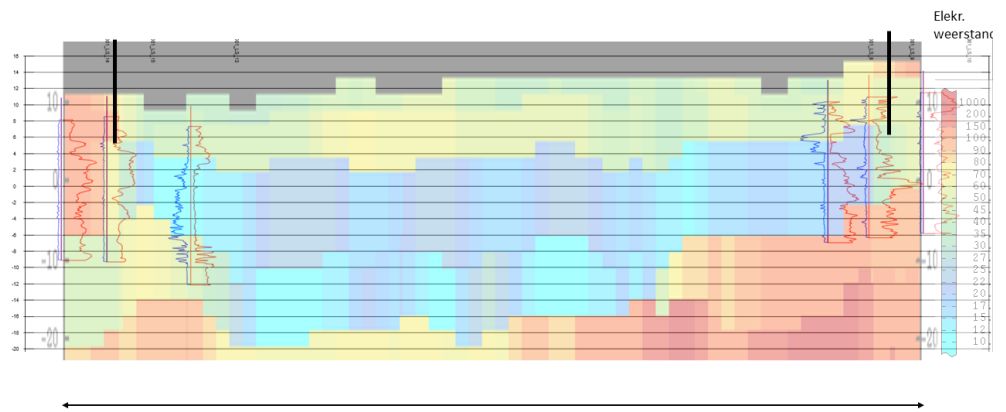
Sondering 14-15-13-8-9-10



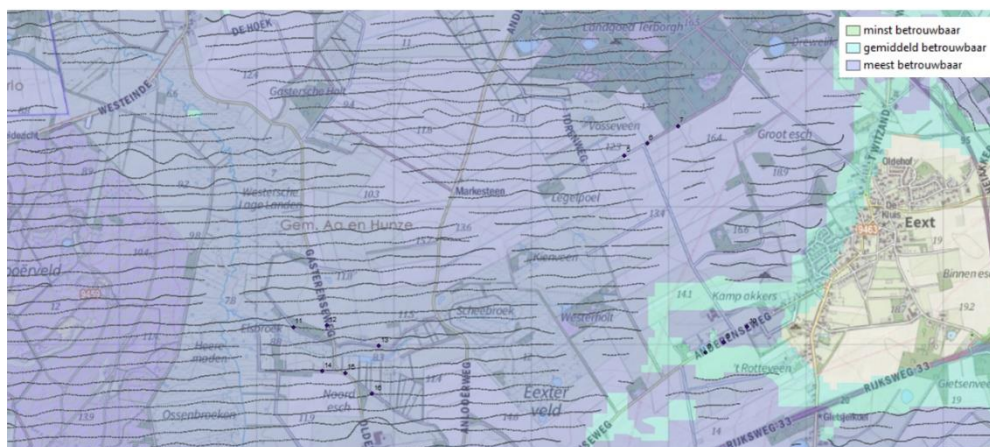
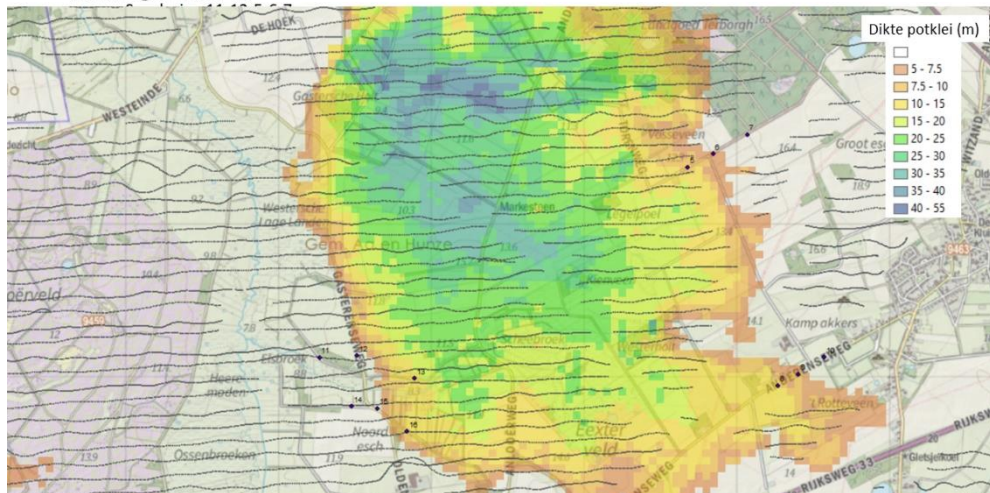
Sondering 14-15-13-8-9-10



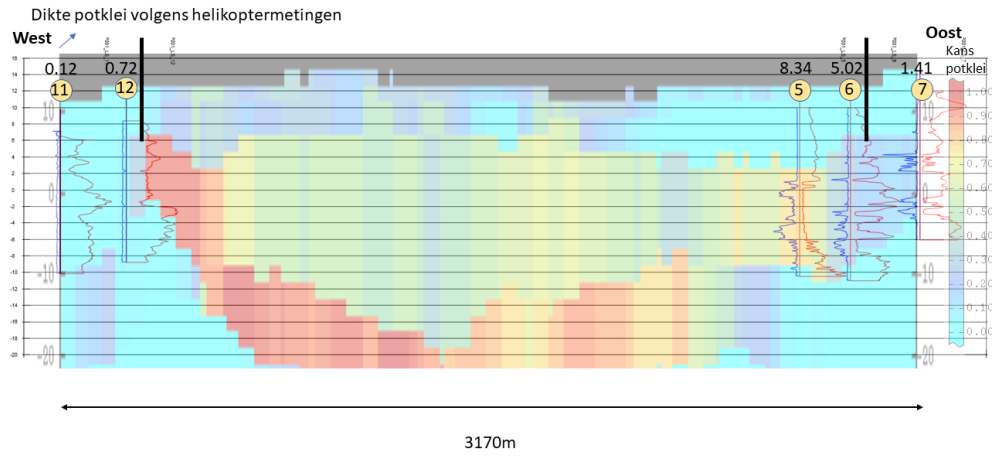
Sondering 14-15-13-8-9-10



Sondering 11-12-5-6-76



Sondering 11-12-5-6-7



Sondering 11-12-5-6-7

