

Energy  
Princetonlaan 6  
3584 CB Utrecht  
Postbus 80015  
3508 TA Utrecht

[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

T +31 88 866 42 56

## **TNO-rapport**

**TNO 2019 R11929**

# **GeoTOP voor Sterke Lekdijk**

Ondergrondmodellering voor de dijktrajecten  
Amerongen-Wijk bij Duurstede, Culemborgse Veer-  
Beatrixsluis en Salmsteke

|                 |                                                                                               |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Datum           | 9 december 2019                                                                               |
| Auteur(s)       | Willem Dabekaussen<br>Renée de Bruijn<br>Romée H. Kars<br>Bart M.L. Meijninger<br>Jan Stafleu |
| Aantal pagina's | 67 (incl. bijlagen)                                                                           |
| Aantal bijlagen | 5                                                                                             |
| Opdrachtgever   |                                                                                               |
| Projectnaam     | Sterke Lekdijk                                                                                |
| Projectnummer   | 060.36249                                                                                     |

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.

© 2019 TNO

## Managementsamenvatting

Binnen het project Sterke Lekdijk, onderdeel van het Hoogwaterbeschermingsprogramma, worden door Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden (HDSR) dijkversterkingen uitgevoerd langs de 55 kilometer lange noordelijke Lekdijk tussen Schoonhoven en Amerongen. De mate waarin dijkversterking nodig is, is sterk afhankelijk van de lokale situatie. De opbouw van de ondergrond speelt hierin een belangrijke rol, omdat faalmechanismen als piping of gebrek aan macrostabiliteit sterk afhankelijk zijn van de samenstelling van de ondergrond onder en rondom de dijk. Ondergrondgegevens zijn beschikbaar in de vorm van boor- en sondeerdata. Hoewel de datadichtheid in het gebied hoog is, is het van belang om een inschatting te kunnen maken van de sedimenten die zich tussen de boor- en sondeerpunten bevinden. Ondergrondmodellen zijn hiervoor zeer geschikt. TNO – Geologische Dienst Nederland (GDN) ontwikkelt en onderhoudt het publiekelijk beschikbare ondergrondmodel GeoTOP, dat gebaseerd is op de boringen uit de landelijke DINO databank aangevuld met handboringen van de Universiteit Utrecht. Vanuit HDSR is er behoefte aan een ondergrondmodel dat gebruik maakt van aanvullende gegevens (met name sonderingen) en waarin een hogere resolutie wordt bereikt dan standaard in GeoTOP het geval is.

In het kader van de Basisregistratie Ondergrond heeft het Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties de GDN opdracht gegeven om een ondergrondmodel van de noordelijke Lekdijk te maken gebaseerd op de bestaande GeoTOP-methodiek. In deze modellering is echter een aantal aanpassingen doorgevoerd, waaronder het meenemen van de meest recente inzichten over de ligging van de Holocene stroomgordels en een verbeterde methode voor het modelleren van de dijklichamen. Verder is een nieuwe methode toegepast om sonderingen mee te nemen in de geologische modellering. Hiertoe worden sondeergegevens vertaald naar lithologie met behulp van een Artificieel Neuraal Netwerk. De datadichtheid in het gemodelleerde gebied is verhoogd door gebruik te maken van zowel boringen als sonderingen uit de DINO databank, nieuw gedigitaliseerde boringen en zanddieptepunten van de Universiteit Utrecht en extra boringen en sonderingen aangeleverd door HDSR. Met deze dataset is een ondergrondmodel geconstrueerd met een hogere resolutie dan standaard in GeoTOP.

Het ondergrondmodel Sterke Lekdijk is een voxelmodel met een resolutie van 25 x 25 x 0.25 m. Het is gemaakt voor de drie dijktrajecten Salmsteke, Culemborgse Veer – Beatrixsluis en Wijk bij Duurstede – Amerongen. Het model beslaat de ondergrond tussen het maaiveld en de bovenkant van het Pleistocene zandpakket en bevat informatie over laagopbouw (stratigrafie) en samenstelling van de ondergrond (lithoklasse) en de modelonzekerheid hiervan. Aan het model zijn de voor dijkfalen relevante geotechnische parameters volumegewicht en doorlatendheid toegekend. Het nieuwe model levert een meer gedetailleerd inzicht in de opbouw van de ondergrond onder de noordelijke Lekdijk dan het standaard GeoTOP model. Door de aanpassingen in methodiek, de verhoogde datadichtheid en de verhoogde resolutie, is veel meer detail zichtbaar in de ligging van faalgevoelige gebieden (zandlichamen in het geval van piping; slappe klei- en veenpakketten in het geval van macrostabiliteit). Het Sterke Lekdijk

ondergrondmodel is een stochastisch model, waardoor het een eerste aanzet zou kunnen zijn voor toepassing in geautomatiseerde geotechnische berekeningen.

# Inhoudsopgave

|           |                                                         |           |
|-----------|---------------------------------------------------------|-----------|
|           | <b>Managementsamenvatting .....</b>                     | <b>2</b>  |
| <b>1</b>  | <b>Inleiding .....</b>                                  | <b>6</b>  |
| <b>2</b>  | <b>Geologische setting .....</b>                        | <b>8</b>  |
| <b>3</b>  | <b>Data .....</b>                                       | <b>12</b> |
| 3.1       | Projectgebied .....                                     | 12        |
| 3.2       | HDSR boringen.....                                      | 17        |
| 3.3       | HDSR sonderingen.....                                   | 17        |
| 3.4       | DINO .....                                              | 17        |
| 3.5       | Universiteit Utrecht – boringen .....                   | 17        |
| 3.6       | Stiboka – ‘top-zand’ .....                              | 18        |
| <b>4</b>  | <b>GeoTOP werkwijze.....</b>                            | <b>19</b> |
| <b>5</b>  | <b>Aanpassingen bestaande GeoTOP werkwijze .....</b>    | <b>24</b> |
| 5.1       | Resolutie .....                                         | 24        |
| 5.2       | Verticale begrenzing van modelgebied .....              | 24        |
| 5.3       | Nieuwe geulenkaart.....                                 | 24        |
| 5.4       | Modellering Antropogeen .....                           | 27        |
| <b>6</b>  | <b>Gebruik van sonderingen .....</b>                    | <b>28</b> |
| 6.1       | Lithologische interpretatie: Robertson .....            | 28        |
| 6.2       | Lithologische interpretatie: neuraal netwerk .....      | 31        |
| 6.3       | Vergelijking methodes lithologische interpretatie ..... | 32        |
| 6.4       | Stratigrafische interpretatie.....                      | 35        |
| <b>7</b>  | <b>Parameters .....</b>                                 | <b>36</b> |
| 7.1       | Methode .....                                           | 36        |
| 7.2       | Volumegewicht .....                                     | 37        |
| 7.3       | Doorlatendheid .....                                    | 38        |
| <b>8</b>  | <b>Resultaten .....</b>                                 | <b>39</b> |
| 8.1       | Stratigrafie en lithoklasse .....                       | 39        |
| 8.2       | Kans op lithoklasse .....                               | 41        |
| 8.3       | Modelonzekerheden .....                                 | 44        |
| 8.4       | Parameters .....                                        | 45        |
| <b>9</b>  | <b>Discussie .....</b>                                  | <b>47</b> |
| 9.1       | Resolutie Sterke Lekdijk .....                          | 47        |
| 9.2       | AAOP nieuw model vs. GeoTOP .....                       | 48        |
| 9.3       | Geulen in nieuw model vs. GeoTOP .....                  | 50        |
| 9.4       | Veenvoorkomens nieuw model vs. GeoTOP .....             | 52        |
| 9.5       | Voorbeeld dijkdoorbraak en ondergrond .....             | 54        |
| <b>10</b> | <b>Aanbevelingen .....</b>                              | <b>55</b> |
| 10.1      | Aanbevelingen voor HDSR.....                            | 55        |
| 10.2      | Aanbevelingen voor modelontwikkeling .....              | 56        |

|           |                                                             |           |
|-----------|-------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>11</b> | <b>Referenties .....</b>                                    | <b>58</b> |
| <b>12</b> | <b>Ondertekening .....</b>                                  | <b>60</b> |
|           | <b>Bijlage A Robertson classificatiediagram .....</b>       | <b>1</b>  |
|           | <b>Bijlage B Validatie neuraal netwerk resultaten .....</b> | <b>1</b>  |
|           | <b>Bijlage C Parameterwaarden volumegewicht .....</b>       | <b>1</b>  |
|           | <b>Bijlage D Parameterwaarden doorlatendheid .....</b>      | <b>1</b>  |
|           | <b>Bijlage E Legenda-eenheden .....</b>                     | <b>1</b>  |

# 1 Inleiding

Binnen het project Sterke Lekdijk voert het Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden (HDSR) dijkversterkingen uit van de noordelijke Lekdijk tussen Amerongen en Schoonhoven, een traject van ongeveer 55 km lang. De mate van benodigde dijkversterking is sterk afhankelijk van de lokale situatie. Zo spelen omgevingsfactoren, maar zeker ook de samenstelling van de ondergrond een belangrijke rol in de sterkte van een dijk. Het verschil in waterdruk aan weerszijden van de dijk dat ontstaat bij extreem hoog en laag water brengt risico's met zich mee voor de sterkte van een dijk, door o.a. de processen piping en afschuiving. Wanneer er doorlatende sedimenten (zand, grind) onder de dijk aanwezig zijn, kan er onder de dijk door grondwaterstroming ontstaan. Piping treedt op wanneer door terugschrijdende erosie deze waterstroom sterker wordt waardoor zand meegevoerd wordt, met ondergraving van de dijk tot gevolg. Anderzijds kunnen slappe lagen (veen, klei) een gevaar zijn voor de macrostabiliteit van een dijk. Een hoge grondwaterdruk kunnen de slappe lagen, met een relatief laag gewicht, gaan opdrukken. Hierin kan een glijvlak ontstaan waarover afschuiving van (een gedeelte van) de dijk plaats kan vinden.

De ondiepe geologie rond het dijktraject van Sterke Lekdijk is sterk beïnvloed door de steeds veranderende ligging van de Rijn gedurende het Holoceen. De afzetting van zandige geulopvullingen, overstromingsklei in de kommen, en de vorming van veen gedurende deze periode heeft gezorgd voor een zeer heterogene verdeling van deze sedimenten in de ondergrond. Om lokaal meer inzicht te verkrijgen in de risico's voor de sterkte van dijken, wordt er in het project Sterke Lekdijk aandacht besteed aan het (visueel) samenbrengen van nieuwe en reeds aanwezige kennis over de ondergrond. Behalve boringen en sonderingen, kunnen ook 3D modellen van de ondergrond hierbij een waardevol inzicht geven.

TNO – Geologische Dienst Nederland (GDN) ontwikkelt en onderhoudt modellen die de opbouw van de Nederlandse ondergrond in drie dimensies weergeven. GeoTOP is het meest gedetailleerde model, waarin voor voxels met een grootte van 100 x 100 x 0.5 meter een voorspelling wordt gedaan van de lithologie. Deze resolutie is gebaseerd op de landelijke dichtheid van boringen van gemiddeld 11 boringen per km<sup>2</sup>. In delen van Nederland zijn (veel) meer boringen beschikbaar, die de mogelijkheid bieden om het model te verfijnen. Hiernaast zijn er grote hoeveelheden sonderingen beschikbaar, die niet in GeoTOP gebruikt zijn, maar wel in belangrijke mate kunnen bijdragen aan lokale verfijning. Gezien de noodzaak bij HDSR om te beschikken over gedetailleerde modellen van de ondergrond is door TNO – GDN het pilot project Sterke Lekdijk opgestart, waarbinnen is gewerkt aan een methode om een GeoTOP-model met een hoger detailniveau te kunnen construeren. Aanvullend op de bestaande GeoTOP-methodiek is in samenspraak met HDSR een aantal aanvullende wensen geïdentificeerd die zijn geïmplementeerd in het nieuwe ondergrondmodel:

- Een hogere resolutie ten opzichte van de 'standaard' resolutie in GeoTOP,
- Het meenemen van informatie uit sonderingen bij de modellering. Deze zijn op en rond de dijken veel beschikbaar.
- Het meenemen van de eigen dataset met historische en recente boringen en sonderingen van HDSR.

- Het meenemen van een aanvullende set handboringen die door de Universiteit Utrecht is gedigitaliseerd in het kader van dit project.
- Behalve een lithologische karakterisatie van de ondergrond is er ook behoefte aan een inschatting van diverse geotechnische parameters, hiervoor is het model geparameteriseerd met doorlatendheid en volumegewicht.

Binnen de Basisregistratie Ondergrond zullen gegevens over de ondergrond, zowel boringen en sonderingen als ondergrondmodellen, worden beheerd en beschikbaar gesteld. Het Sterke Lekdijk project is aangemerkt als een Proof of Concept (PoC), waarin de meerwaarde van tijdig en gecombineerd gebruik van ondergrondgegevens uit de BRO inzichtelijk gemaakt zal worden. De in dit rapport beschreven ondergrondmodellen, gefinancierd vanuit het BRO-programma van het ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties, maken deel uit van een pilot study die volgt op deze PoC.

Van het hele Sterke Lekdijk-traject zijn op dit moment voor drie tracés recente boor- en sondeergegevens aangeleverd door HDSR, te weten de dijktracés Amerongen-Wijk bij Duurstede (WAM), Culemborgse Veer-Beatrixluis (CUB) en Salmsteke (SAM) (zie Figuur 1-1).

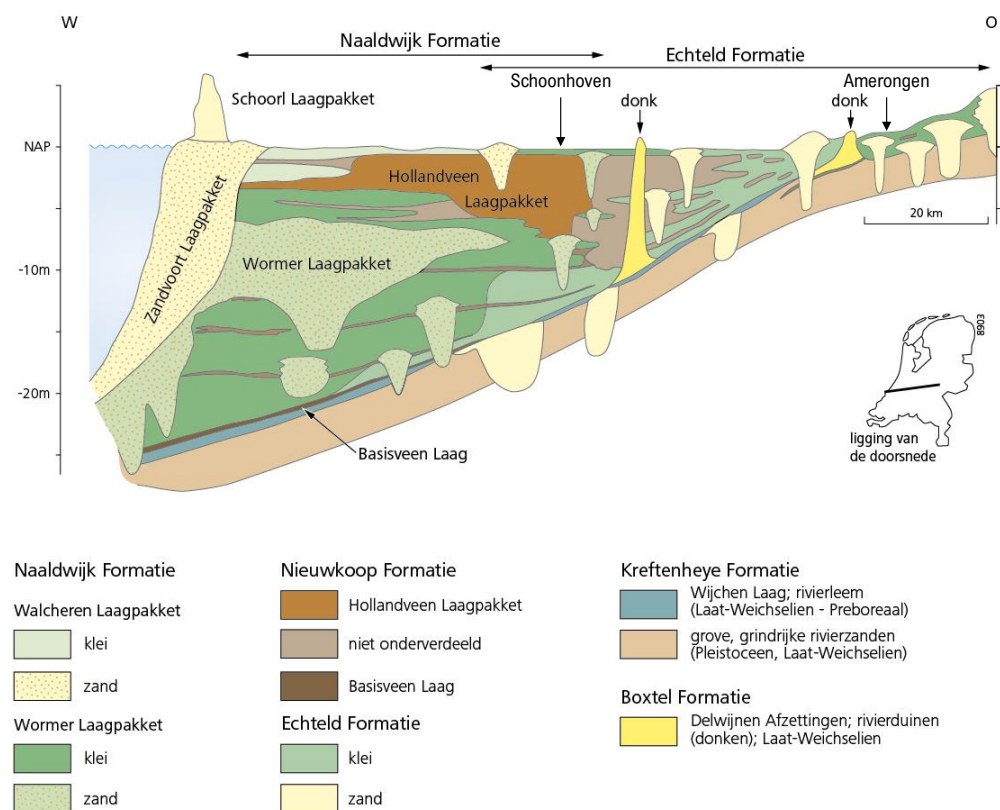


Figuur 1-1 Onderverdeling van het Sterke Lekdijk project in deelprojecten (HDSR, 2019)

In dit rapport beschrijven we de totstandkoming van de modellen van de drie deelgebieden. Daarvoor wordt in Hoofdstuk 2 eerst de geologische achtergrond van het studiegebied toegelicht. De gegevens die zijn gebruikt binnen het project staan beschreven in Hoofdstuk 3. De modellering is uitgevoerd volgens een methode die vergelijkbaar is met die van het GeoTOP ondergrondmodel (Stafleu et al., 2012). Dit model en de manier waarop het gemaakt is wordt kort samengevat in hoofdstuk 4. De aanpassingen die op de GeoTOP werkwijze zijn gedaan, onder andere om met een hogere resolutie te kunnen modelleren en om ook sonderingen mee te nemen, worden beschreven in Hoofdstuk 5 en 6. De wijze waarop parameters aan het ondergrondmodel worden toegekend is toegelicht in Hoofdstuk 7. Hoofdstuk 8 beschrijft de resultaten aan de hand van één van de drie modelgebieden. Deze worden bediscussieerd in Hoofdstuk 9. Het afsluitende Hoofdstuk 9.5 bevat onze aanbevelingen omtrent gebruik en verbetering van het ondergrondmodel.

## 2 Geologische setting

De focus van het ondergrondmodel langs het dijktraject van het project Sterke Lekdijk ligt op de Holocene en de jongste Laat Pleistocene sedimenten in het rivierengebied. Deze sedimenten worden gedomineerd door de afzettingen van de Rijn. Sinds het Laat Pleistoceen is de loop en ook het rivierpatroon meermaals veranderd. Dit heeft geresulteerd in een heterogene verdeling van sedimenten en complexe opbouw van de ondergrond. Onderstaande tekst is gebaseerd op geologische kennis van TNO – GDN en de handboeken van Mulder (2003), Berendsen et al. (2004), en Stouthamer et al. (2015). Figuur 2-1 toont een conceptueel profiel van het rivierengebied met de benamingen van de gebruikte eenheden, die verderop in de tekst worden toegelicht. Per beschreven formatie, laagpakket en laag wordt tussen haken de code gegeven die daarvoor in het model gebruikt wordt.



Figuur 2-1 Schematische doorsnede van de ondergrond langs de lijn Oostvoorne – Arnhem met Holocene en jongste Laat Pleistocene eenheden. Uit Stouthamer et al. (2015). De plaatsnamen Schoonhoven en Amerongen zijn geprojecteerd op deze doorsnede.

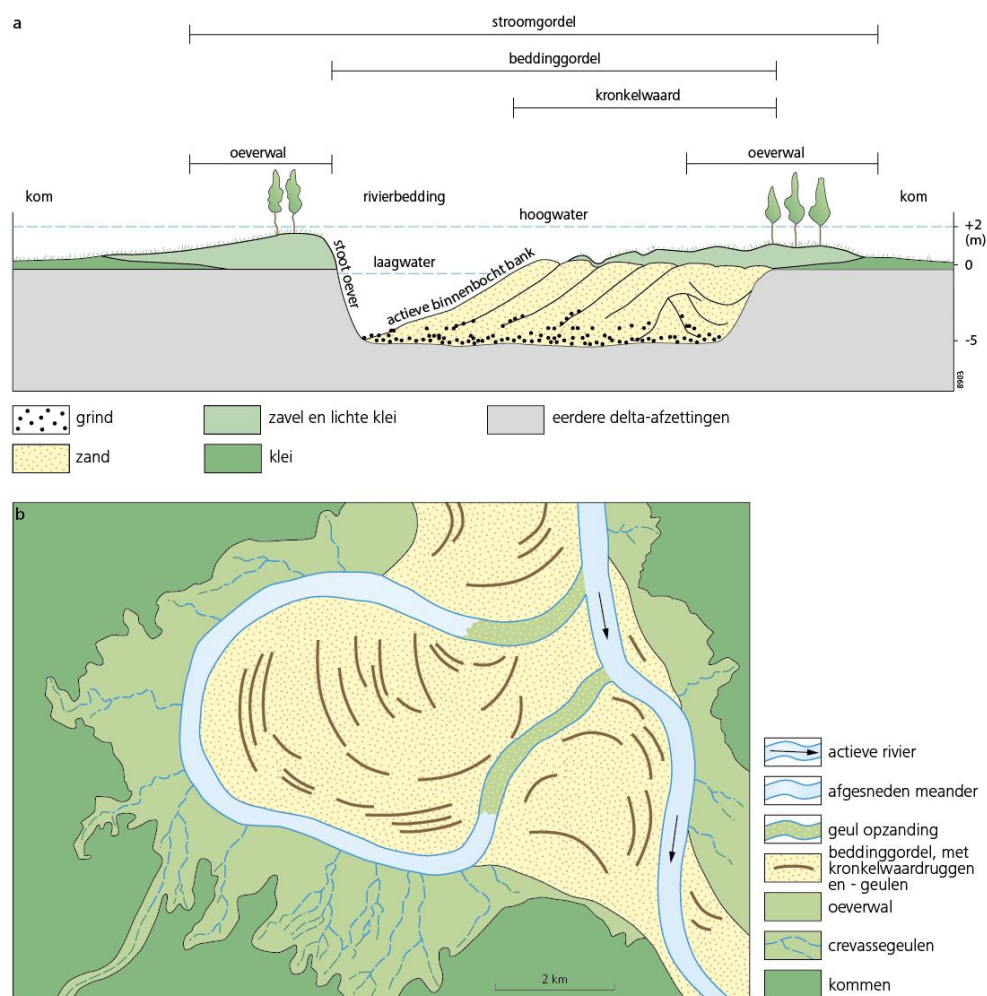
Aan het einde van het Laat-Pleistoceen, rond 20.000 jaar geleden, wordt het landschap gekenmerkt door een brede riviervlakte met een vlechtend riviersysteem. De afzettingen bestaan overwegend uit grof zand en grind en behoren tot de Formatie van Kreftenheye (KR). De dikte van deze afzettingen is in de orde van 10 m of meer. Buiten de riviervlakte is een lokaal door de wind afgezet pakket dekzand aanwezig dat tot 2 m dik kan zijn (Formatie van Bostel, Laagpakket van Wierden; BXWI).

Door een opwarmend klimaat vanaf ~14.000 jaar geleden verandert het karakter van de rivieren als gevolg van een afname in water- en sedimentaanvoer in een meanderend systeem met gedifferentieerde afzettingen, bestaande uit zandige beddingafzettingen en zand, leem en klei op de oeverwallen (Figuur 2-2). Bij hogere waterstanden treden de rivieren buiten hun oevers, waarbij silt en klei worden afgezet op oeverwallen en in de komgebieden. Hierdoor vormt zich een kleilaag in de orde van enkele decimeters tot een enkele meters dik, die over het algemeen lateraal vervolgbaar is, tenzij lokaal onderbroken door insnijdingen van jongere riviergeulen. In restgeulen kan de klei dikker zijn ontwikkeld. De kleilaag, welke een stug karakter kan hebben door bodenvorming, behoort tot de Formatie van Kreftenheye, Laag van Wijchen (KRWY).

Tijdens een relatief korte periode van klimatologische afkoeling gedurende de laatste 1000 jaar van het Laat-Pleistoceen, verandert het karakter van het riviersysteem weer in een vlechtend rivierpatroon, waarbij een verdiepte riviervlakte ontstaat als gevolg van insnijding en verbreding van de rivier. Buiten deze verdiepte riviervlakte ontstaan zeer lokaal rivierduinen op de Wijchen kleilaag, van zand afkomstig uit de rivierbeddingen (Formatie van Boxtel, Laagpakket van Delwijnen; BXDE).

In het Vroeg-Holocene, vanaf 11.700 jaar geleden, verandert het rivierpatroon weer naar meanderend. Buiten de actieve geulen worden weer oever- en komafzettingen gevormd. Deze worden ook tot de Formatie van Kreftenheye, Laagpakket van Wijchen (KRWY) gerekend.

Voortdurende afsmelting van de ijskappen zorgt voor een stijgende zeespiegel en een daaraan gekoppelde stijging van de grondwaterstand. Als gevolg van deze vernatting en toenemende plantengroei ontwikkelen zich in het onderzoeksgebied vanaf ongeveer 8000 jaar geleden uitgestrekte moerassen waarin veenvorming plaatsvindt. Hierdoor is een veenlaag ontstaan welke lateraal vervolgbaar is, hoewel lokaal onderbroken als gevolg van erosie en insnijdingen door jongere meanderende riviergeulen. Door met name inspoeling van overstromingsklei is het veen lokaal kleiig ontwikkeld. De veenlaag wordt gerekend tot de Formatie van Nieuwkoop, Basisveen Laag (NIBA). Door inklinking en oxidatie is de dikte van de oorspronkelijke veenlaag afgenomen tot de huidige dikte in de orde van enkele decimeters tot lokaal een meter. Naar het oosten neemt de dikte van de veenlaag af. Ten oosten van Nieuwegein wordt het veen discontinue en daarom niet meer als aparte eenheid onderscheiden. Fragmenten veen die op dezelfde hoogte liggen worden hier gerekend tot de Formatie van Echteld (zie volgende alinea).



Figuur 2-2 Geomorfologie van een meanderende rivier met gedifferentieerde afzettingen in dwarsprofiel (a) en kaartbeeld (b). Uit Stouthamer et al. (2015).

In het begin van het Holocene verandert het karakter van het riviersysteem in een meanderend patroon met gedifferentieerde afzettingen. De waterafvoer en het sedimenttransport wordt hierdoor geconcentreerd langs een aantal hoofdgeulen. Overige kleine geulen verlanden. Daarnaast verandert als gevolg van relatieve zeespiegelstijging geleidelijk het gedrag van de rivieren, waardoor niet langer insnijding, maar opvulling van rivierdalen plaatsvindt. Door de accumulatie van sediment in het rivierdal kan de rivierloop zich gaan verleggen. De vroegere rivierlopen zijn over het algemeen bewaard gebleven als zandige geulafzettingen en zandige, kleiige oeverafzettingen (Figuur 2-3). Het overstromen van de rivieren leidt tot de vorming van een grote overstromingsvlakte die een groot deel van de tijd onder water blijft staan. In deze moerasgebieden vindt veenvorming plaats, met afzetting van klei tijdens overstromingen. Daardoor ontwikkelt zich een dik pakket van komafzettingen, waarin klei- en veenlagen elkaar afwisselen (Figuur 2-3). Deze lagen zijn lateraal goed vervolgbaar, maar kunnen worden onderbroken als gevolg van een verlegging van een rivierloop, die het pakket insnijdt en lokaal erodeert. De fluviatile afzettingen, d.w.z. de geul-, oever- en komafzettingen, worden gerekend tot de Formatie van Echteld (EC1 en EC2, afhankelijk van hun positie ten opzichte van het later beschreven Hollandveen Laagpakket). De zandige geulafzettingen

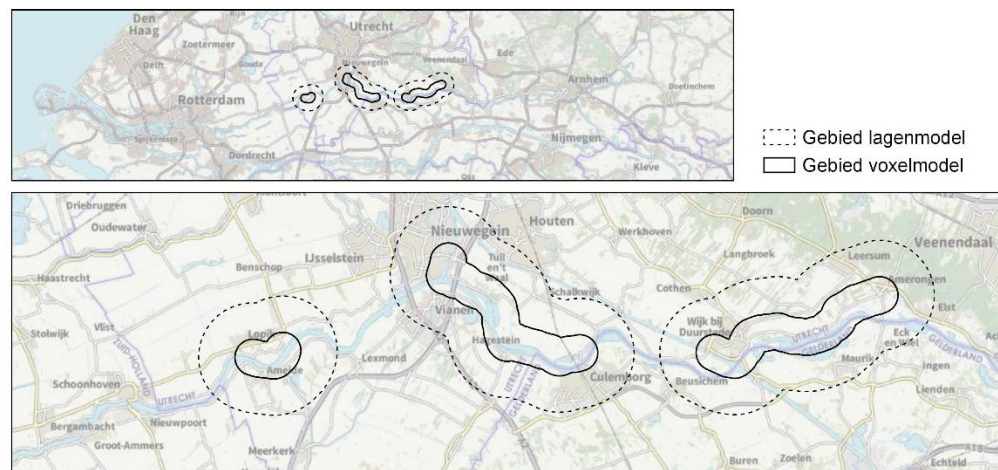


## 3 Data

### 3.1 Projectgebied

Bij de begrenzing van het projectgebied is uitgegaan van de ligging van de noordelijke Lekdijk. De precieze positie van de dijk is door HDSR aangeleverd in de vorm van kruin- en teenlijnen. Op basis van het dijktraject is een buffer genomen die de laterale begrenzing van het model vormt. Er zijn in dit project twee gebieden gedefinieerd:

- een gebied van 3 kilometer rondom het dijktraject voor het maken van een model dat de bovenkant en onderkant van de verschillende geologische eenheden beschrijft (het lagenmodel),
- een gebied van 1 kilometer rondom het dijktraject, waarbinnen de lithologie (zand, klei, veen) wordt gemodelleerd (het voxelmodel).



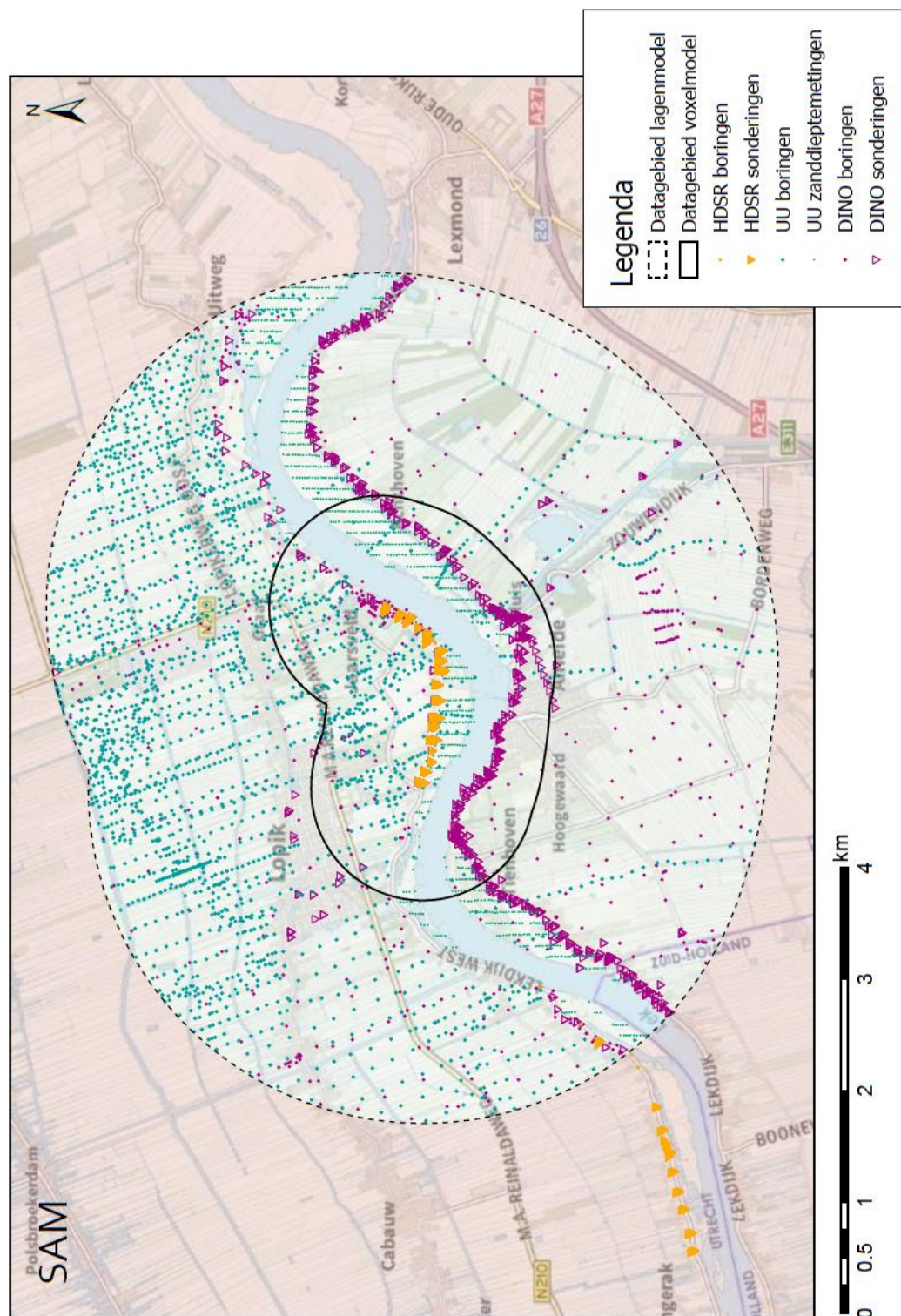
Figuur 3-1 Overzicht gemodelleerde deelgebieden, v.l.n.r. SAM, CUB en WAM.

Alle datapunten die binnen de omtrek van de 3 km buffer vallen zijn meegenomen in de lagenmodellering, om context te verschaffen en eventuele randeffecten in het model op korte afstand van de dijk te voorkomen. Omdat HDSR voornamelijk is geïnteresseerd in de ondergrond direct onder en rondom de dijk, is het 3D voxelmodel beperkt tot een 1 km buffer rondom de drie dijktrajecten SAM, CUB en WAM (Figuur 3-1). Alle data binnen deze smallere buffer is dus meegenomen in de 3D-voxelmodellering. Data per projectgebied zijn weergegeven in Tabel 3-1 en Figuur 3-2, Figuur 3-3 en Figuur 3-4 voor respectievelijk SAM, CUB en WAM. De datatypen zijn beschreven in paragrafen 3.2 tot en met 3.6.

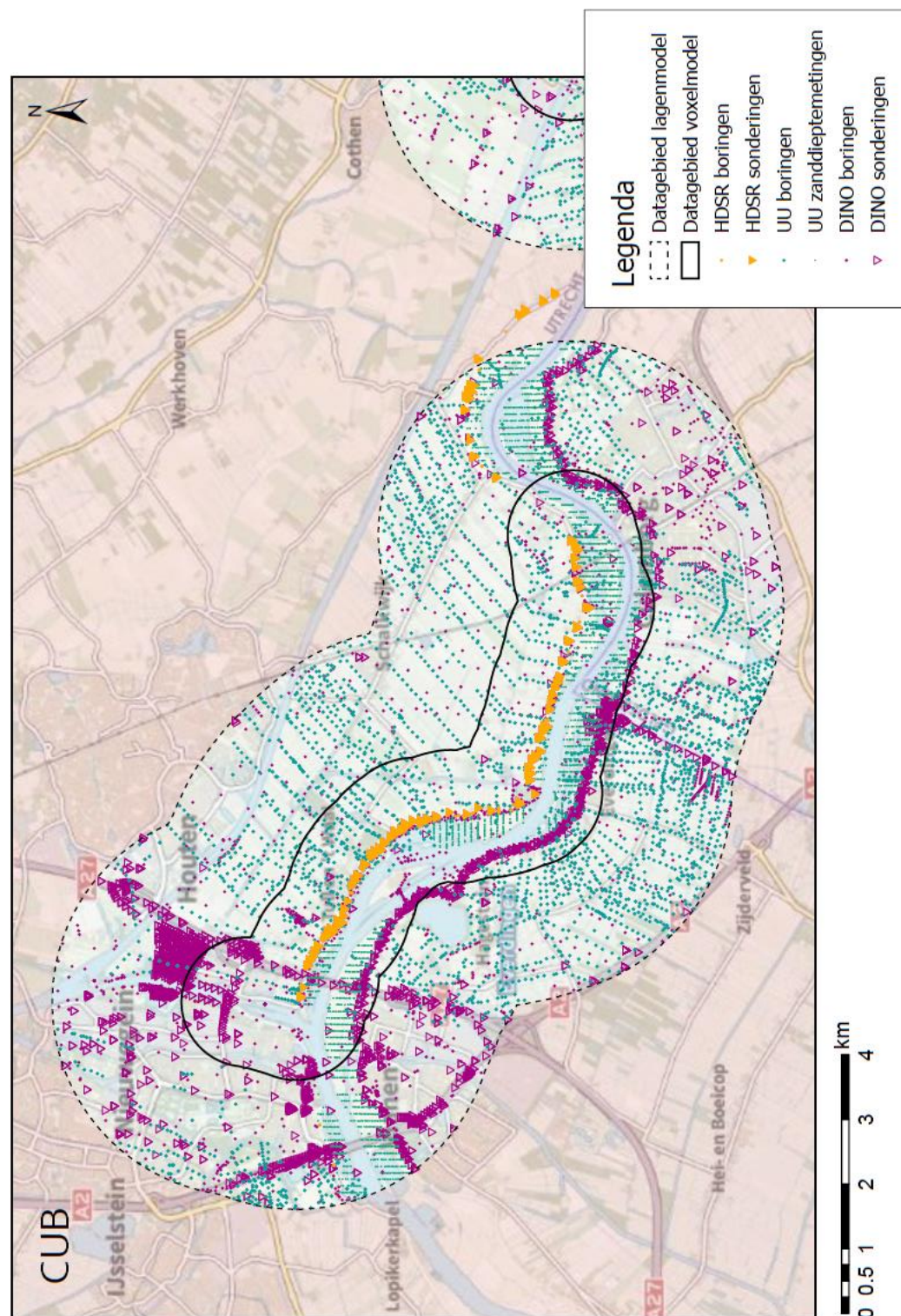
Het ondergrondmodel wordt gemaakt voor de Holocene eenheden en enkele ondiep gelegen Laat Pleistocene geologische eenheden (Hoofdstuk 2). Omdat deze niet overal op dezelfde diepte liggen, varieert de ondergrens van het model van enkele meters - NAP bij Amerongen tot ongeveer 20 m onder NAP bij Schoonhoven. De bovengrens van het model ligt aan maaiveld.

Tabel 3-1 Overzicht van het aantal gebruikte boringen en sonderingen in het gehele projectgebied (de drie trajecten) en uitgesplitst per dijktraject.

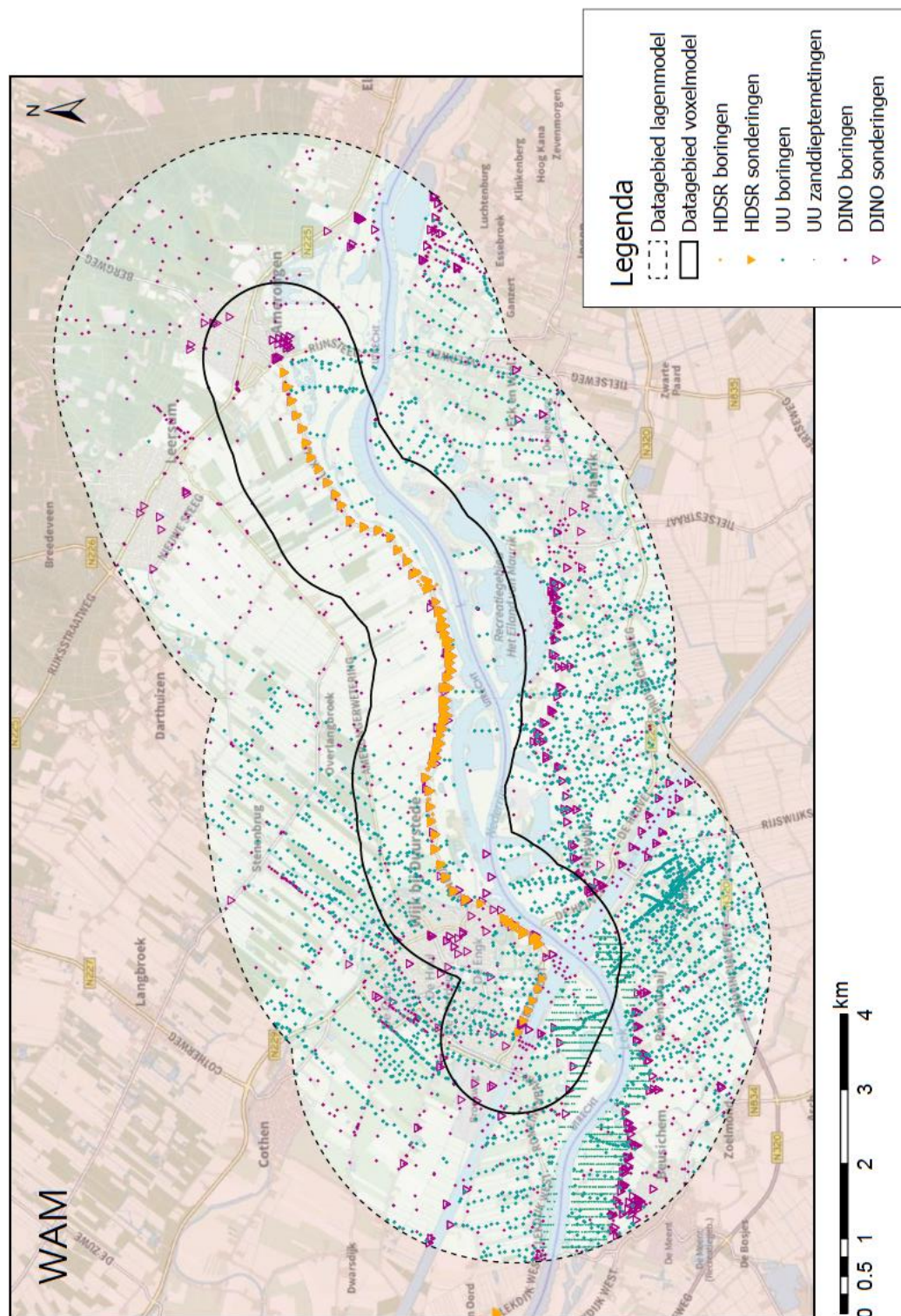
| bron                            | type data                | <i>lagenmodel</i>  |      |       |      | <i>voxelmodel</i>  |      |      |      |
|---------------------------------|--------------------------|--------------------|------|-------|------|--------------------|------|------|------|
|                                 |                          | project-<br>gebied | SAM  | CUB   | WAM  | project-<br>gebied | SAM  | CUB  | WAM  |
| HDSR                            | <i>boring</i>            | 988                | 213  | 344   | 431  | 786                | 114  | 251  | 421  |
|                                 | <i>sondering</i>         | 1126               | 236  | 624   | 266  | 942                | 197  | 486  | 259  |
| UU                              | <i>boring</i>            | 8781               | 2285 | 3448  | 3048 | 1899               | 443  | 876  | 580  |
|                                 | <i>zanddiepte meting</i> | 4310               | 864  | 2496  | 950  |                    |      |      |      |
| DINO                            | <i>boring</i>            | 4911               | 772  | 2521  | 1618 | 2095               | 250  | 1236 | 609  |
|                                 | <i>sondering</i>         | 2222               | 517  | 1342  | 363  | 1191               | 354  | 640  | 197  |
| <b>totaal aantal datapunten</b> |                          | 22338              | 4887 | 10775 | 6676 | 6913               | 1358 | 3489 | 2066 |



Figuur 3-2 Ondergronddata binnen projectgebied Salmsteke.



Figuur 3-3 Ondergronddata binnen projectgebied Culemborgse Veer – Beatrixsluis.



Figuur 3-4 Ondergronddata binnen projectgebied Wijk bij Duurstede – Amerongen.

### 3.2 HDSR boringen

HDSR heeft resultaten aangeleverd van een aantal grondonderzoeken (boringen en sonderingen) die zijn uitgevoerd sinds 1970. Daarnaast zijn er recentelijk boringen gezet langs de verschillende dijktrajecten in het kader van het project Sterke Lekdijk. Al deze boorgegevens zijn, waar nodig na bewerking, ingeladen in de DINO databank, zodat ze worden meegenomen in de modellering. Er zijn in totaal 988 boringen van HDSR aan het model toegevoegd (zie Tabel 3-1).

### 3.3 HDSR sonderingen

Anders dan in het GeoTOP ondergrondmodel, zijn in dit ondergrondmodel van delen van de Lekdijk sondeergegevens meegenomen. Sondeergegevens zijn deels door HDSR aangeleverd en komen deels uit DINO (zie paragraaf 3.4). Evenals de boorgegevens, komen de sondeergegevens uit zowel recente grondonderzoekscampagnes als uit oudere onderzoeken (sinds 1970). Er zijn in totaal 1288 sonderingen van HDSR aan het model toegevoegd (zie Tabel 3-1).

### 3.4 DINO

Net als bij het bestaande GeoTOP model, is de belangrijkste bron van gegevens de DINO databank. DINO staat voor Data en Informatie van de Nederlandse Ondergrond en is de landelijke centrale opslag voor geowetenschappelijke gegevens over de diepe en ondiepe ondergrond ([www.dinoloket.nl](http://www.dinoloket.nl)). Er zijn uit DINO 4911 boringen en 2222 sonderingen in het model opgenomen (zie Tabel 3-1).

De gegevens uit DINO worden gebruikt wanneer de kwaliteit voldoende is voor de voxelmodellering. Deze selectie geschiedt automatisch, waarbij getest wordt boringen standaardattributen als coördinaten, maaiveld en einddiepte hebben. Ook zijn bijvoorbeeld boringen met extreem dikke intervallen (ordegrootte 5 tot 10 meter of meer) te grof beschreven en niet in de modellering meegenomen. Uit de DINO sondeergegevens wordt ook een selectie gemaakt: de boringen die worden gebruikt moeten digitaal beschikbaar zijn en coördinaten en een maaiveldhoogte bevatten.

### 3.5 Universiteit Utrecht – boringen

Naast de gegevens uit de DINO databank, hebben we ook gebruik gemaakt van de uitgebreide Laaglandgenese databank van de Universiteit Utrecht (UU), waarin boorbeschrijvingen staan die in de loop der jaren zijn verzameld door studenten en wetenschappelijk personeel. Deze boringen zijn veelal met de hand gedaan en hebben daardoor een beperkt dieptebereik, maar leveren desalniettemin een schat aan ondergrondinformatie op, omdat zij in groot detail beschreven zijn. Binnen het Sterke Lekdijkproject is door Universiteit Utrecht gewerkt aan het updaten van de databank door het digitaliseren van boorbeschrijvingen. Het betreft de meest recente publiekelijk beschikbare databank (Cohen, 2017), aangevuld met actuele UU-boringen die nog niet zijn gepubliceerd. Deze nieuwste versie van de database

is meegenomen in de modellering. Binnen de drie te modelleren gebieden zijn dit 8781 boringen (zie Tabel 3-1).

### **3.6 Stiboka – ‘top-zand’**

Naast het bijwerken van de databank met universiteitsboringen, heeft de UU ook een gedigitaliseerd rapport aangeleverd dat de top van de eerste zandlaag in de uiterwaarden langs de Lek in kaart brengt. Dit rapport dateert uit 1957 en is geschreven door Stichting voor Bodemkartering (Stiboka) te Wageningen. De zanddieptemetingen zijn in het projectgebied gedaan in de vorm van raaien van in totaal 4310 punten (zie Tabel 3-1). Deze punten geven geen informatie over de dikte van het bovenste zandpakket, maar geven wel goed weer waar er zandige (geul)afzettingen te vinden zijn en hoe diep deze liggen onder de daarboven afgezette komleien of oeverwalafzettingen. De zanddieptepunten zijn niet publiekelijk beschikbaar.

## 4 GeoTOP werkwijze

Dit hoofdstuk geeft een korte samenvatting van GeoTOP en de manier waarop het model wordt gemaakt. Een uitgebreide beschrijving van het modelleerproces kan worden gevonden in Stafleu et al. (2012); een formele productspecificatie wordt gegeven in Stafleu (2016). De aanpassingen op de GeoTOP werkwijze staan beschreven in Hoofdstuk 5 (resolutie, modelbegrenzing, geulen en antropogeen) en Hoofdstuk 6 (gebruik van sonderingen) van dit rapport.

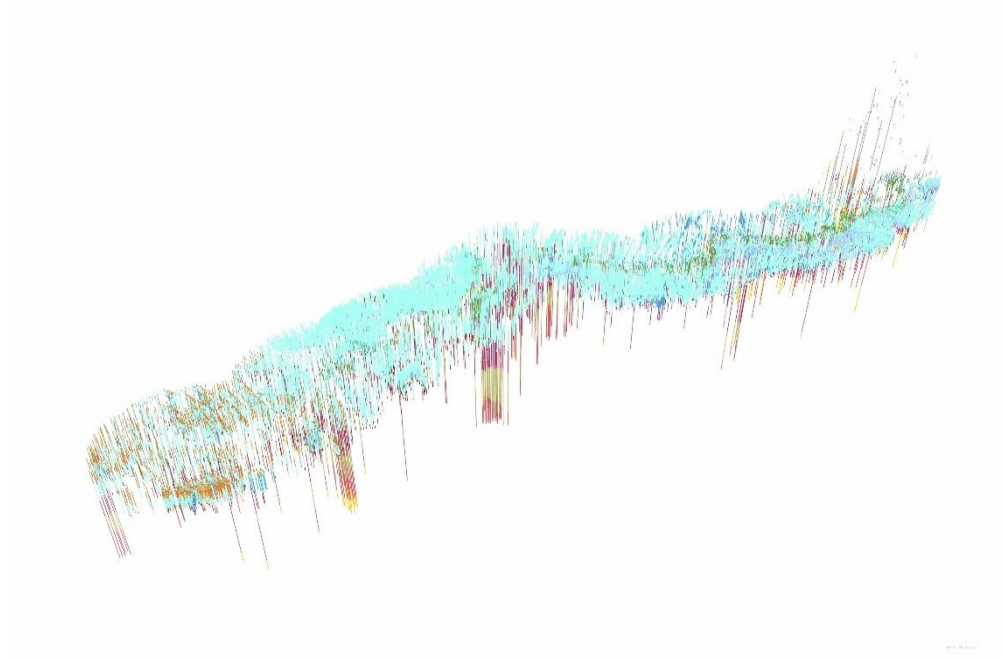
GeoTOP is een 3D geologisch model van de laagopbouw en grondsoort (bijvoorbeeld klei, zand, veen) van de ondiepe ondergrond van Nederland tot een diepte van maximaal 50 m onder NAP. In GeoTOP is de ondergrond onderverdeeld in een regelmatig 3D grid (raster) van aaneengesloten voxels (volumecellen) van 100 x 100 m in de horizontale richtingen en 0,5 m in de verticaal. In het model zijn aan elke voxel eigenschappen gekoppeld. Dit zijn de lithostratigrafische c.q. geologische eenheid (laag) waartoe een voxel behoort, de lithoklasse (grondsoort) die representatief is voor de voxel en een aantal attributen die tezamen een maat van modelonzekerheid vormen. Behalve voxels bevat GeoTOP ook een gedetailleerd lagenmodel en de geïnterpreteerde boormonsterbeschrijvingen die bij het maken van het model gebruikt zijn.

- **Lithostratigrafie** betekent het rangschikken van gesteentelagen in eenheden zoals formaties en laagpakketten op basis van lithologische kenmerken (waaruit bestaat het materiaal?), verbreiding (waar komt de eenheid voor?) en positie (wat is de ligging ten opzichte van andere eenheden?). Lithostratigrafische eenheden worden formeel gedefinieerd in de Stratigrafische Nomenclator van de Ondiepe Ondergrond van Nederland.
- In GeoTOP wordt de term **geologische eenheid** gebruikt in plaats van lithostratigrafische eenheid omdat niet elke eenheid in het model één-op-één overeenkomt met een lithostratigrafische eenheid volgens de Nomenclator. Het kan namelijk voor de modellering nodig zijn om twee of meer lithostratigrafische eenheden samen te nemen tot één geologische eenheid. De tegenovergestelde situatie, waar een lithostratigrafische eenheid wordt gesplitst in een of meerdere geologische eenheden komt ook voor. In het geval van Sterke Lekdijk zijn de apart gemodelleerde geulsystemen van de Formatie van Echteld een voorbeeld van de laatstgenoemde situatie.
- Lithologische kenmerken worden in GeoTOP weergegeven door middel van **lithoklassen**, waarin lithologie (grondsoort) en zandkorrelgrootteklassen zijn gecombineerd in één classificatie.

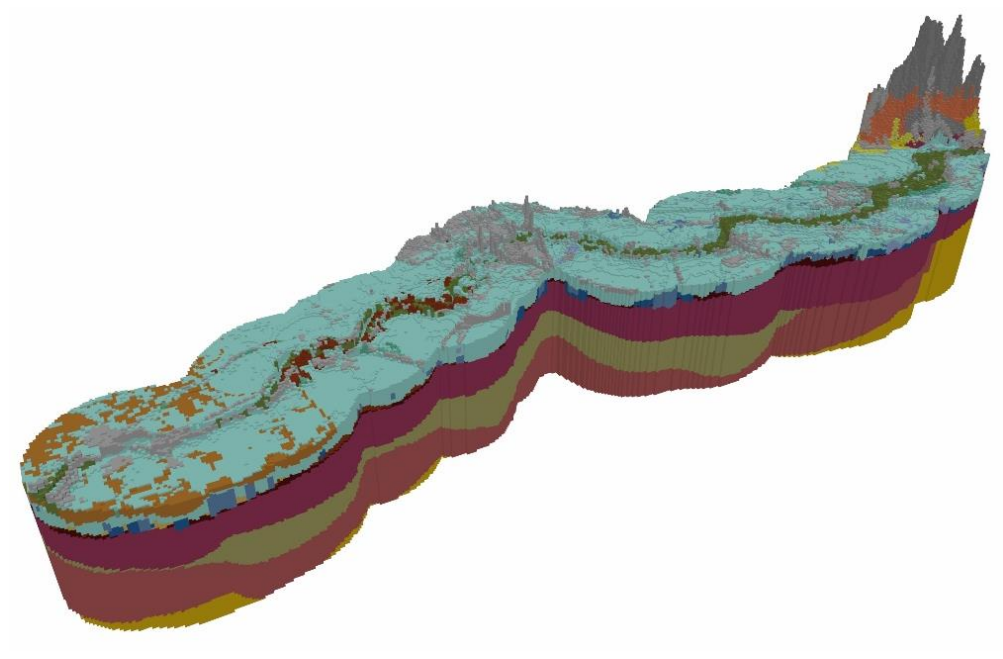
GeoTOP bestaat uit de volgende producten die ontstaan uit een gestandaardiseerd werkproces:

- De interpretatie van de boormonsterbeschrijvingen in **geologische eenheden** en in **lithoklasse-eenheden**. Elke boormonsterbeschrijving is onderverdeeld in intervallen van gelijke geologische eenheid. Daarbinnen zijn de intervallen verder opgedeeld in intervallen van een gelijke lithoklasse.
- **Breuken**. Per breuksegment is aangegeven in welke basis van een geologische eenheid dit breuksegment nog invloed heeft.
- Een **lagenmodel** waarbij de ondergrond is weergegeven als een stapeling van geologische eenheden die begrensd zijn door een top- en een basisvlak. Beide vlakken worden weergegeven als een raster met cellen van 100 x 100 m. Elke rastercel heeft de hoogteligging van top respectievelijk basis in m ten opzichte van NAP als attribuut. Uit de top- en basisrasters is een dikteraster afgeleid met de dikte van de geologische eenheid in m. Tot slot zijn er voor zowel top als basis standaarddeviatierasters beschikbaar die de modelonzekerheid van het lagenmodel representeren.
- Een **voxelmodel** waarbij de ondergrond in voxels van 100 x 100 x 0,5 m ingedeeld is. Elke voxel heeft een aantal attributen, namelijk de geologische eenheid, de meest waarschijnlijke lithoklasse en een aantal attributen die tezamen een maat van modelonzekerheid vormen.

De onderlinge samenhang van de geïnterpreteerde boormonsterbeschrijvingen, lagenmodel en voxelmodel is geïllustreerd in Figuur 4-1 t/m Figuur 4-4.



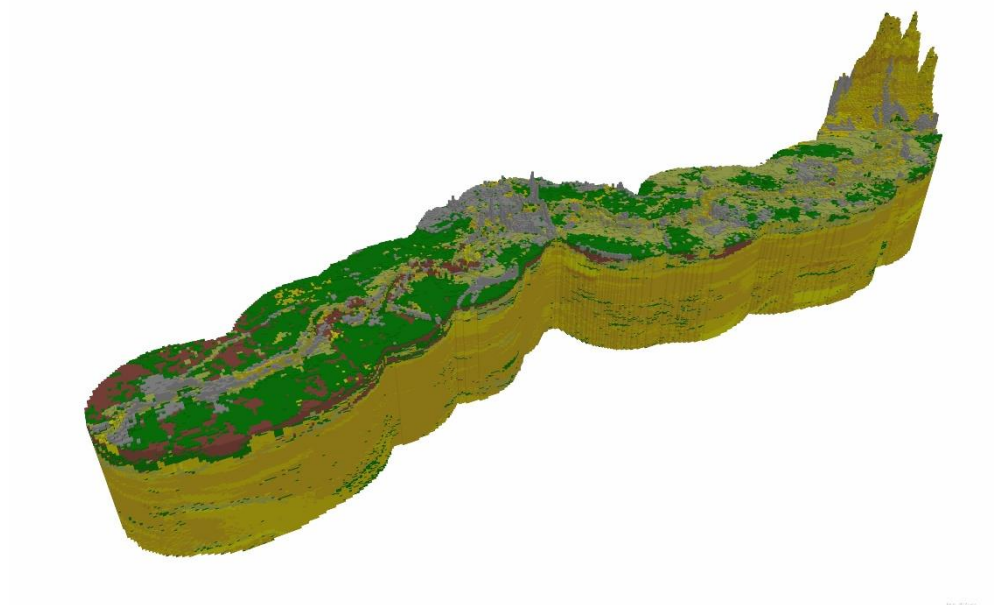
Figuur 4-1 3D weergave van boormonsterbeschrijvingen langs de Lek waarbij de kleuren verschillende geologische eenheden weergeven.



Figuur 4-2 3D weergave van het GeoTOP-lagenmodel langs de Lek, gebaseerd op de geïnterpreteerde boormonsterbeschrijvingen van Figuur 4.1 De basis van elke weergegeven laag is het resultaat van een ruimtelijke interpolatie van de in de boormonsterbeschrijvingen aangetroffen basissen van de betreffende geologische eenheid.



Figuur 4-3 3D weergave van boormonsterbeschrijvingen langs de Lek waarbij de kleuren verschillende lithoklassen weergeven.

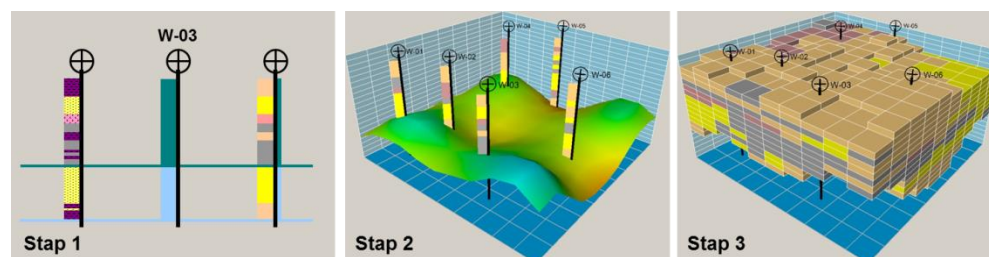


Figuur 4-4 3D weergave van een voxelmodel waarbij de kleuren van de voxels de lithoklasse weergeven. De lithoklasse indeling in de voxels is het resultaat van een ruimtelijke interpolatie van de lithoklassen in de geïnterpreteerde boormonsterbeschrijvingen binnen de verschillende geologische eenheden.

Het belangrijkste uitgangspunt voor GeoTOP zijn de boormonsterbeschrijvingen in de DINO-databank, in het modelgebied 'Rivierengebied' aangevuld met boorbeschrijvingen van de Universiteit Utrecht. Elk van deze boormonsterbeschrijvingen geeft vaak gedetailleerde informatie over de opbouw van de ondergrond op één specifieke locatie. Uit het feit dat we de beschikking hebben over circa 455.000 boormonsterprofielen (DINO) op een totaal landoppervlak van Nederland van 41.000 km<sup>2</sup>, kunnen we afleiden dat aan het aardoppervlak iets meer dan 10% van de voxels doorboord is. Met de diepte neemt dit percentage snel af. Dit betekent dat we voor verreweg de meeste voxels in het

model een schatting moeten maken op basis van in de omgeving van de voxel aanwezige boormonsterprofielen. Dit wordt gedaan met behulp van stochastische interpolatietechnieken.

De eerste stap in het constructieproces van GeoTOP is de interpretatie van boormonsterbeschrijvingen (Figuur 4-5).



Figuur 4-5 De belangrijkste stappen in het constructieproces van GeoTOP. Stap 1 – interpreteren van boorbeschrijvingen; stap 2 – modelleren van stratigrafische grensvlakken (lagenmodel); stap 3 – modelleren van lithoklassen (voxelmodel).

De interpretatie omvat het onderverdelen van de boormonsterbeschrijvingen in geologische eenheden en in lithoklasse-eenheden. Bij de interpretatie in geologische eenheden, die voor een groot deel met behulp van Python-scripts wordt uitgevoerd, zijn behalve lithologische criteria ook verbreidingskaarten met het voorkomen van de verschillende geologische eenheden van belang.

In de tweede modelleerstep worden grensvlakken geconstrueerd. Deze vlakken vormen de boven- en onderkant van de geologische eenheden. Elke voxel in het model kan nu eenvoudig aan de juiste geologische eenheid worden gekoppeld. In de derde en laatste stap worden stochastische interpolatietechnieken gebruikt om de voxels van elk van de geologische eenheden aan een lithoklasse te koppelen.

Het gebruik van stochastische interpolatietechnieken resulteert in meerdere verschillende, maar in statistisch opzicht even waarschijnlijke, realisaties van het voxelmodel. In GeoTOP worden 100 van dergelijke realisaties berekend. Uit deze 100 realisaties wordt vervolgens een **meest waarschijnlijke lithoklasse** afgeleid (TNO, 2014a). Daarnaast wordt voor elke voxel de **kans** op een bepaalde lithoklasse berekend door het aantal keer dat de lithoklasse in de realisaties is geschat te tellen en het resultaat te delen door 100. Deze kansen zijn een maat voor de onzekerheid in het model. Tot slot bevat het voxelmodel twee maten van modelonzekerheid (TNO, 2014b). Dit zijn:

- Modelonzekerheid van geologische eenheid – de mate waarin het model in staat is om een eenduidige schatting te geven van de geologische eenheid waartoe de voxel behoort;
- Modelonzekerheid van lithoklasse – de mate waarin het model in staat is om een eenduidige schatting te geven van de voor de voxel representatieve lithoklasse.

In beide gevallen wordt de modelonzekerheid uitgedrukt als een getal van 0 tot 1 waarbij 0 staat voor een zeer lage modelonzekerheid (het model is goed in staat een eenduidige schatting te geven) en 1 voor een zeer hoge (het model is niet in staat om een eenduidige schatting te geven).

## 5 Aanpassingen bestaande GeoTOP werkwijze

### 5.1 Resolutie

Het GeoTOP model bestaat uit cellen (voxels) van 100 bij 100 m breed en 0,5 m hoog. De keuze van de voxelgrootte heeft te maken met de hoeveelheid beschikbare data. Als er weinig gegevens beschikbaar zijn en er grote afstand tussen verschillende datapunten zit, zullen kleinere cellen niet meer informatie geven dan grote cellen. In het gebied rond de Lekdijk is een grote hoeveelheid data beschikbaar uit zowel uit de DINO databank, de UU databank en data van HDSR (Hoofdstuk 3). In dit gebied is het daarom zinvol om een hogere modelresolutie te hanteren. Daarnaast is het voor de gebruiker HDSR ook nuttig om het ondergrondmodel in groter detail te kunnen raadplegen. In overleg met HDSR is gekozen voor een voxelgrootte van 25 x 25 x 0.25 meter – een resolutie die 32 keer zo hoog als die van GeoTOP.

### 5.2 Verticale begrenzing van modelgebied

Een belangrijk verschil met de bestaande GeoTOP werkwijze is de in dit project gebruikte verticale begrenzing: waar het GeoTOP model de ondergrond modelleert tot 50 m onder NAP, hebben we hier gekozen om vooral de Holocene afzettingen te modelleren. De oudste (en dus onderste) eenheden die we modelleren zijn de Formatie van Kreftenheye, Laagpakket van Wijchen (KRWY) en de Formatie van Bostel, Laagpakket van Delwijnen (BXDE).

Het modelleren van alleen de Holocene afzettingen was in dit project zinvol omdat de datadichtheid in het projectgebied het hoogst is in de bovenste lagen van de ondergrond. Die hogere datadichtheid is nodig voor het vullen van de in vergelijking met GeoTOP kleinere voxels. Het modelleren van diepere eenheden met een hogere resolutie heeft geen zin omdat de datadichtheid niet groter is. Daarnaast is het voor HDSR vooral van belang om een gedetailleerd beeld te krijgen van de ondiepe Holocene lagen, omdat deze bepalend zijn voor het type dijkversterking dat moet worden toegepast. Daar waar diepere geologie wel belangrijk is, kan het model van Sterke Lekdijk worden gecombineerd met modellen met een dieper bereik (bijv. GeoTOP of REGIS II v2.2).

### 5.3 Nieuwe geulenkaart

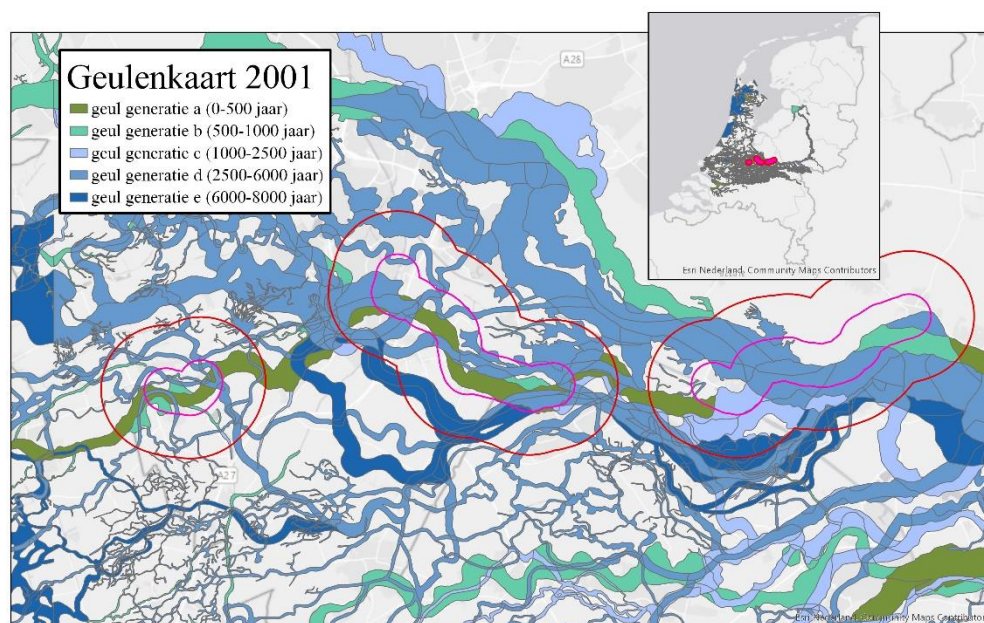
Voor GeoTOP is gebruik gemaakt van de verbreidingen van verschillende geologische eenheden. Nederland is een deltagebied waarin de aanvoer van sediment voornamelijk wordt verzorgd door de Rijn en de Maas. De jonge sedimenten afgezet door deze rivieren behoren tot de Formatie van Echteld. Deze formatie bevat zowel voor zandige geulafzettingen als het slappere klei en veen uit de komgebieden (Hoofdstuk 2).

Voor de doeleinden van HDSR is het van cruciaal belang om juist deze grote verschillen die erg lokaal voorkomen, goed in kaart te hebben. De zandige geulafzettingen zouden namelijk processen zoals piping kunnen faciliteren, en de slappere (veen- en klei-) pakketten zouden juist een grote invloed kunnen hebben op (het gebrek aan) macrostabiliteit van een dijk. Om zulke sterke verschillen en de

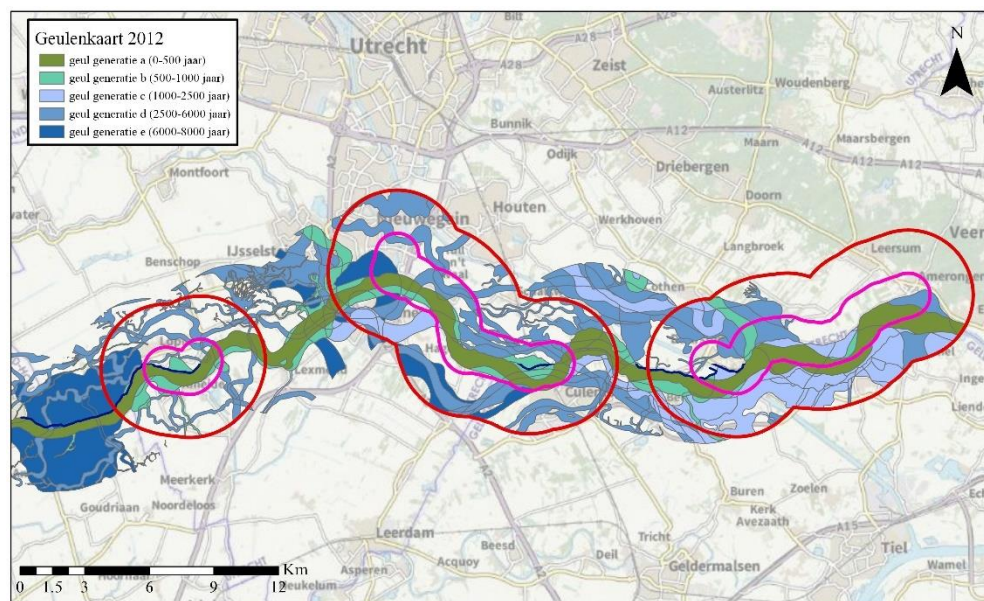
scherpe overgang in lithologie goed te kunnen modelleren, wordt de ligging van begraven geullichamen in de ondergrond apart meegenomen.

Het rivierengebied is in de loop der jaren uitgebreid onderzocht en bemonsterd door studenten en onderzoekers van de Universiteit Utrecht, wat heeft geresulteerd in een gedetailleerde kaart van de verbreiding van de begraven geulen. In GeoTOP is daarvoor gebruik gemaakt van het Basisbestand Paleogeografie van de Rijn-Maas Delta uit 2001 (Figuur 5-1; Berendsen en Stouthamer, 2001). Dit zijn GIS-bestanden met toelichting, waarin geografische ligging van verschillende geulen is gekoppeld aan de ouderdom van het begin en einde van de levensduur van die geul.

In deze studie hebben we gebruik gemaakt van het vernieuwde Digitaal Basisbestand Paleogeografie van de Rijn-Maas Delta (Cohen en Stouthamer, 2012). Dit bestand is ge-update en uitgebreid ten opzichte van dat uit 2001. Een belangrijk verschil is de toevoeging van geulen gekarteerd op basis van het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN) dat bij het samenstellen van de versie uit 2001 nog niet beschikbaar was.



Figuur 5-1. Geulenkaart uit 2001 met het projectgebied rood omlijnd. De inzet toont de verbreiding van de geulen in heel Nederland. Dit is de geulenkaart die in GeoTOP is toegepast.



Figuur 5-2. Uitsnede van het vernieuwde basisbestand binnen de 3 km buffer rondom de noordelijke Lekdijk. Kleuren reflecteren de verschillende geulgeneraties.

Ten behoeve van de lagenmodellering zijn de geulen op basis van hun ouderdom ingedeeld in een vijftal geulgeneraties (Figuur 5-2). Daarvan wordt gebruik gemaakt bij het modelleren van de diepte van de geulen voor het lagenmodel. Daarbij wordt in de boringen gezocht naar geulafzettingen; voor oudere geulgeneraties wordt dieper onder het maaiveld gezocht dan voor jongere generaties.

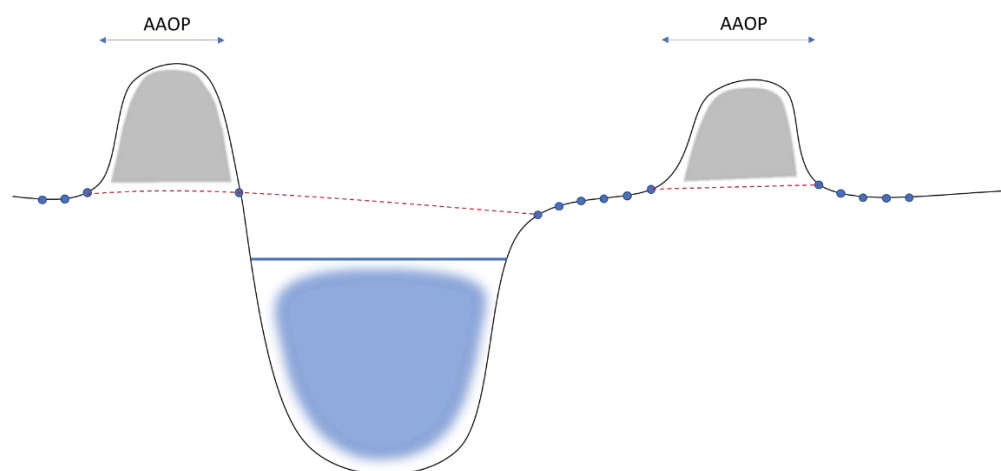
## 5.4 Modellerings Antropogeen

De bovenste laag in het lagenmodel is de antropogene ophooglaag (AAOP), waaronder o.a. vuilstorten, ophooglagen in het stedelijk gebied en dijklichamen vallen. Vanwege de toepassing van het Sterke Lekdijk ondergrondmodel, is het wenselijk dat deze laag zo goed mogelijk in het model terecht komt.

Bij het maken van het lagenmodel wordt voor iedere te modelleren eenheid een verspreidingskaart gemaakt, waarin is weergegeven waar de betreffende eenheid in de ondergrond verwacht mag worden. Voor de meeste eenheden in het model is gebruik gemaakt van de reeds gekarteerde verspreidingen uit GeoTOP Rivierengebied. Het antropogeen vormt hierop een uitzondering: de verspreiding uit GeoTOP is aangepast op basis van verschillende bronnen, waardoor de kartering van AAOP veel gedetailleerder is geworden.

- HDSR heeft dijkteenlijnen aangeleverd voor de Lekdijk, waardoor de ligging van de dijk precies in de verspreiding van AAOP kon worden opgenomen.
- Zomerdijken zijn toegevoegd op basis van de dijkenkaart van Nederland (LOLA Landschape Architects, 2007) in combinatie met het AHN.
- Snelwegen zijn toegevoegd op basis van selectie van de A-wegen uit digitaal topografisch bestand TOP10NL (Kadaster, 2013) met daaromheen een smalle bufferzone.
- Overige aanvullingen betreffen snelwegtaluds en andere hooggelegen structuren, die handmatig zijn toegevoegd op basis van het AHN.

De onderkant van de antropogene laag onder de dijk is vastgesteld middels een verbeterde methode, door het maaiveld rondom de dijk onder de dijk door te trekken (interpolatie; Figuur 5-3). Daar waar de grens tussen AAOP en de onderliggende laag in boringen en sonderingen herkenbaar is, wordt ook deze gebruikt bij het vaststellen van de onderkant van de laag. Omdat over de zeer heterogene samenstelling van o.a. de dijken te weinig bekend is om deze van een lithoklasseindeling te voorzien, wordt aan de gehele laag AAOP de lithoklasse 'antropogeen' toegekend (zie ook de toelichting in Hoofdstuk 2 en paragraaf 9.2).



Figuur 5-3 Schematische weergave van de interpolatie van basis AAOP (rode gestippelde lijn) op basis van maaiveldpunten (blauwe punten) rondom de dijken aan weerszijden van de Lek.

## 6 Gebruik van sonderingen

De extra aangeleverde data in dit project bestaat voor een groot gedeelte uit sonderingen. Sonderingen leveren primair informatie over eigenschappen die interessant zijn vanuit geotechnisch oogpunt, zoals de sterkte van de ondergrond. Wat meer verscholen in de sondeercurves ligt ook informatie over lithologische kenmerken, een potentieel zeer waardevolle bron van informatie voor de geologische modellering. Om sonderingen in te kunnen passen in de GeoTOP-werkwijze zijn de sondeercurves vertaald naar lithoklassen. Hiervoor zijn twee methodes verkend: de Robertson classificatie methode en een Artificieel Neuraal Netwerk (ANN). Beide methodes worden hieronder beschreven en de uitkomsten met elkaar vergeleken. Het hoofdstuk sluit af met een korte notitie over de stratigrafische interpretatie van sonderingen.

### 6.1 Lithologische interpretatie: Robertson

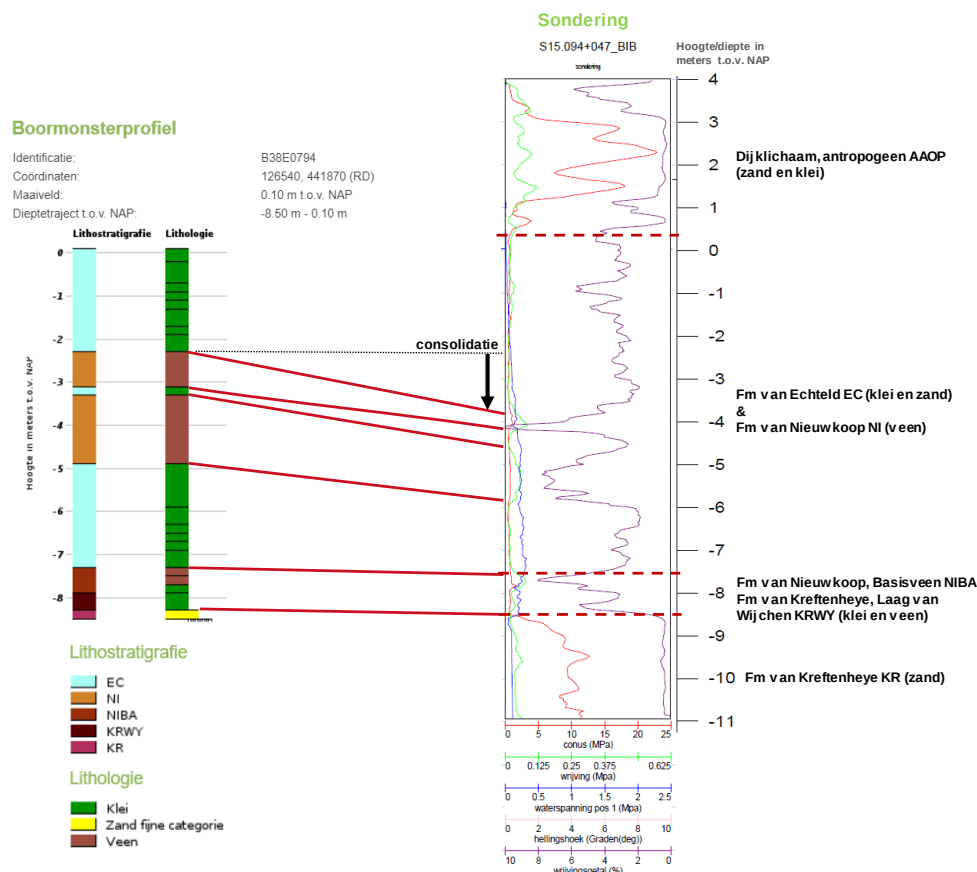
Voor het dijktracé Salmsteke is gebruik gemaakt van het classificatiesysteem van Robertson (2010) om de lithologische samenstelling van de ondergrond af te leiden uit sonderingen. Het Robertson classificatiesysteem is een diagram met een 'soil behaviour type' index, waarbij een sondeermeetwaarde (de conuswaarde en het wrijvingsgetal) in één van negen gedefinieerde 'soil behaviour type' zones valt. Er bestaan ook andere classificatiesystemen, maar deze methode wordt, met name in de geotechniek, het meest gebruikt. Het classificatiesysteem van Robertson (2010) is niet optimaal voor de Nederlandse ondergrond. Zo worden typische Nederlandse grondsoorten als Holocene veen en potklei niet correct geclassificeerd. Geodataspecialist Fugro heeft voor het gebruik in de Nederlandse ondergrond het classificatiesysteem op een paar punten aangepast (Nohl en de Boer, 2008; Koster et al., 2012). Deze aanpassing van het classificatiesysteem is ten dele ook toegepast bij de vertaling van sondeerwaarden naar de lithoklassen zoals die in het GeoTOP model gebruikt worden.

Voor een optimale lithologische classificatie worden sondeerwaarden (conus- en wrijvingsweerstand) idealiter genormaliseerd, oftewel gecorrigeerd voor de druk van de bovenliggende sedimenten en de grondwaterspanning, zodat gelijksoortig materiaal op verschillende diepten een gelijksoortige sondeerwaarde vertoont. Voor het normaliseren van de conus- en wrijvingsweerstand is de waterspanning nodig. Een deel van de Sterke Lekdijk-dataset bevat echter sonderingen waarbij geen waterspanning is gemeten, waardoor normalisatie van de sondeerwaarden niet mogelijk is. Robertson (2010) heeft echter aangetoond dat de verschillen tussen genormaliseerde en niet-genormaliseerde sondeerwaarden relatief klein zijn en dat ze weinig van invloed zijn op de lithologische classificatie in de bovenste 10 m tot 15 m onder het maaiveld. De meeste sonderingen in de dataset vallen binnen dit dieptedomein.

De lithologische indeling uit het classificatiesysteem van Robertson komt niet helemaal overeen met de lithoklassen uit de voxelmodellering in GeoTOP en de Sterke Lekdijk. Om het Robertson classificatiesysteem toch toepasbaar te maken voor het model is gebruik gemaakt van een aantal sondering-boringparen om een correlatie te leggen tussen lithologie en lithoklasse uit de boring en de corresponderende sondeerwaarden (conus-, wrijving en wrijvingsgetal). Hiervoor is

gekeken naar ongeveer tien sondering-boringparen (onderlinge afstand < 10 m) langs de Lekdijk in het gebied tussen Schoonhoven en Jaarsveld. Figuur 5.1 toont een voorbeeld van zo'n sondering-boringpaar.

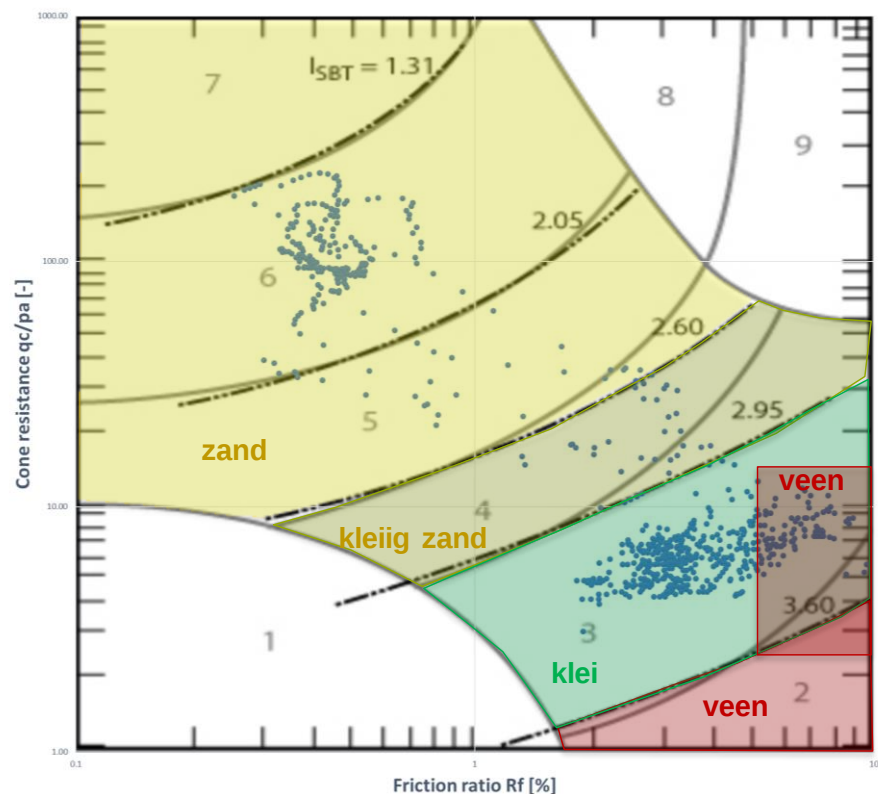
In het model worden vier lithoklassen onderscheiden welke van belang zijn voor de correlatie met het Robertson classificatiesysteem, namelijk: zand, klei, kleilig zand en zandige klei en organisch materiaal (veen). Bij het interpreteren van sonderingen maken we geen onderscheid tussen verschillende zandklassen (fijn, midden en grof).



Figuur 6-1. Een voorbeeld van een sondering-boringpaar langs het dijktracé Salmsteke, met een onderlinge afstand van ongeveer 10 m. De boring (links) is afkomstig uit DINOloket (datum boring onbekend) en toont lithologische en stratigrafische informatie. De boring is zeer waarschijnlijk langer geleden uitgevoerd; het maaiveld op deze locatie ligt als gevolg van ophoging tegenwoordig 2,8 m hoger. De sondering (rechts) is in 2017 in opdracht van HDSR uitgevoerd. Deze toont curves voor de conusweerstand (rood), wrijving (groen), waterspanning (blauw) en wrijvingsgetal (paars) versus de diepte. De stratigrafische interpretatie van de sondering is handmatig uitgevoerd. Rode lijnen geven de stratigrafische/lithologische correlaties tussen de boring en de sondering weer. De stratigrafie van de boring en de sondering lijkt sterk op elkaar, m.u.v. de diepte en dikte van de bovenste veenlagen. De dikte- en diepteverschillen van deze veenlagen zijn waarschijnlijk ten dele het gevolg van inklinking (consolidatie) als gevolg van een bijna 4 meter dik zandpakket dat vóór 2017 neer gelegd is om de dijk te versterken.

Figuur 5.1 toont hoe meetwaarden van één sondering via classificatie gecorreleerd zijn aan de lithoklassen uit het model. Op basis van de boorbeschrijvingen en corresponderende sondeerwaarden is een correlatie gelegd tussen de Robertson 'soil behaviour type' zones (2 t/m 7) en de lithoklassen die in het model komen. Deze vertaling is vervolgens toegepast op de overige sonderingen rondom de Sterke Lekdijk. In Bijlage A staat de formule van het aangepaste Robertson (2010) classificatiesysteem welke gebruikt is om de sondeerwaarden van de sonderingen om te zetten naar de Robertson 'soil behaviour type' zones en de lithoklassen van het Sterke Lekdijk ondergrondmodel.

Vermeld dient te worden dat een aantal sonderingen in de bovenste halve meter tot een meter onder het maaiveld afwijkend gedrag vertonen, d.w.z. een hogere wrijvingsweerstand en een relatief hoger wrijvingsgetal dan verwacht. Dit gedrag kan het gevolg zijn van uitdroging van de grond als gevolg van een variërende grondwaterspiegel. Dit kan voor de bovenste meter resulteren in een afwijkende lithoklasse-aanduiding (bijvoorbeeld veen in plaats van kleiig zand of zand).



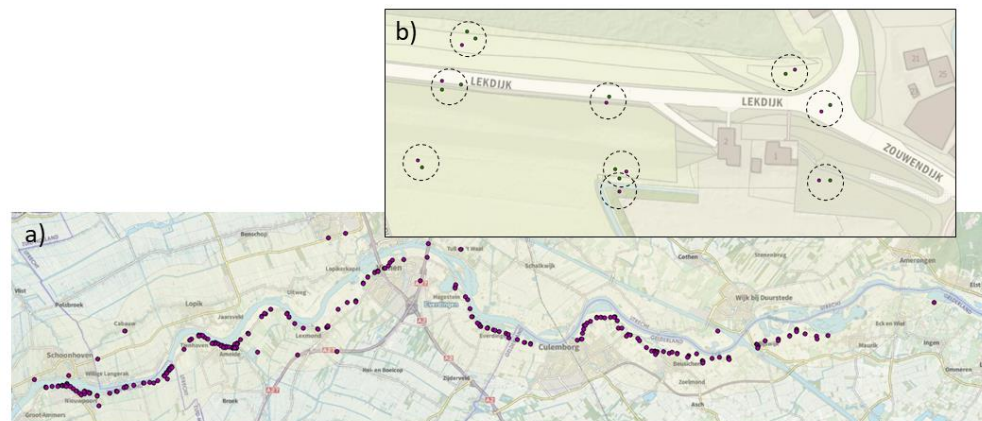
Figuur 6-2. Robertson (2010) classificatiediagram met daarop gesuperponeerd de lithoklassen zand (geel), kleiig zand (licht bruin), klei (groen) en veen (rood). De rode rechthoek 'veen' is een van de aanpassingen van Fugro op het Robertson classificatie diagram voor de Nederlandse ondergrond (Nohl en de Boer, 2008; Koster et al., 2012). De verticale en horizontale assen van het diagram zijn respectievelijk niet-genormaliseerde conus en wrijvingsgetal (logaritmisch). De blauwe punten zijn de sondeerwaarden van sondering S15.94+047\_bib in Figuur 5.1. De sondeerwaarden vallen in de 'soil behaviour type' zones 5-6-7 (siltig grindig zand / leem), 4 (leem / siltige klei), 3 (siltige klei / klei), en 2 (veen / organisch materiaal) van het Robertson

(2010) classificatie diagram. Deze correleren met de lithoklassen van de Sterke Lekdijk voxelmodellering en GeoTOP (in gekleurde letters).

## 6.2 Lithologische interpretatie: neuraal netwerk

Een Artificieel Neuraal Netwerk (ANN) wordt vaak ingezet om patronen te herkennen in een grote dataset. Aangezien sondeerwaarden sterk afhankelijk zijn van het afzettingsmechanisme en de geologische geschiedenis van de sedimenten waaraan wordt gemeten, zullen de grenswaarden tussen de verschillende lithoklassen niet voor ieder gebied gelijk zijn. In dit project is een ANN getraind, met als specifiek doel het maken van goede vertaling van sondeermetingen naar lithoklasse voor de Holocene sedimenten in het Sterke Lekdijk gebied.

In het Sterke Lekdijk gebied is een groot aantal boringen en sonderingen aanwezig. Training van een ANN is uitgevoerd met vlak bij elkaar gelegen boringen en sonderingen, waarbij de waarden die worden gemeten in een sondering worden verondersteld overeen te komen met de lithologie uit de naastgelegen boring. Hiervoor is gekeken naar alle sonderingen uit de BRO database en alle boringen uit de DINO database die voorkomen binnen 3 km van de noordelijke Lekdijk tussen Amerongen en Schoonhoven, met een maximale onderlinge afstand van 10 meter (zie Figuur 6-3b). Er zijn 231 van deze boring-sonderingparen aanwezig (zie Figuur 6-3a). Al deze paren zijn gebruikt voor de training.



Figuur 6-3 Voor training van het ANN zijn de 231 boring-sonderingparen gebruikt (a) die gescheiden zijn met een onderlinge afstand minder dan 10 m (b). Paars: sondering, groen: boring.

Door training kan een ANN leren om verbanden te leggen tussen input- en target parameters. In dit project is het ANN getraind om lithoklasse te voorspellen aan de hand van sondeermetingen, waarbij de volgende parameters zijn gebruikt voor input en target:

### Input (sondeermeting)

Conus  
Kleef (wrijving)  
Waterspanning ( $u_2$ ) - optioneel  
Diepte t.o.v. maaiveld  
Diepte t.o.v. NAP



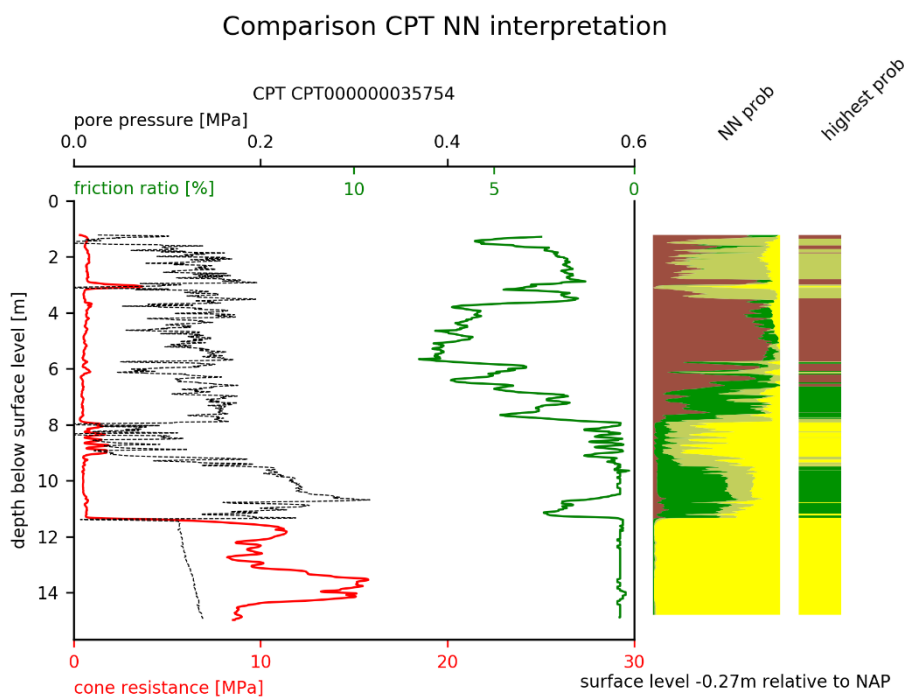
### Target (lithoklasse)

Veen  
Klei  
Kleig zand en zandige klei  
Zand\*

*\*In een sondering is de korrelgrootte van zand slecht te herkennen. Daarom zijn de GeoTOP lithoklassen zand fijn, zand midden, zand grof en grind samengebracht tot de versimpelde lithoklasse 'zand'.*

ANN's zijn er in vele kleuren en smaken. De in dit onderzoek gebruikte methode is gebaseerd op ervaringen in eerdere projecten (Van Maanen et al., 2017, en Van Maanen et al., *in prep.*). Er is gebruik gemaakt van een ANN design met een *input layer*, twee *hidden layers* van 15 *nodes*, en een *output layer*. Training vindt plaats volgens het Newton conjugate-gradient algorithm zoals geïmplementeerd in de Python package *ffnet* (Wojciechowski, 2011).

Na training is het ANN in staat om ook voor sonderingen buiten de trainingset een vertaling te maken van sondeerwaarden naar lithoklasse. Een voorbeeld hiervan is gegeven in Figuur 6-4, waar de sondeerwaarden door het ANN worden vertaald in een kans voor elke lithoklasse (*NN prob*). Hieruit volgt dat de lithoklasse met de hoogste kans (*highest prob*) de beste vertaling geeft die het ANN kan maken van de sondeermetingen.

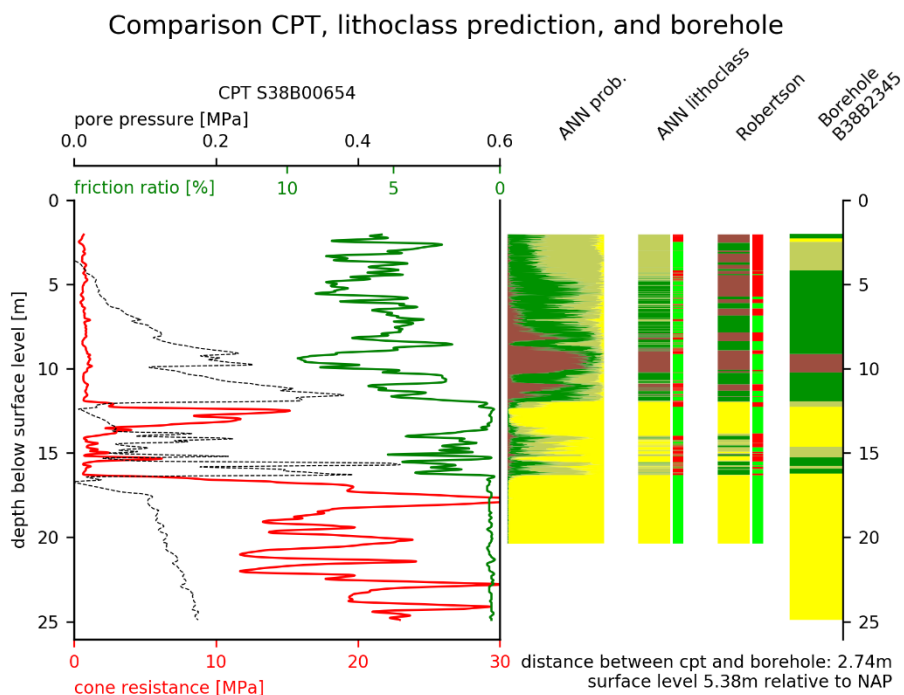


Figuur 6-4 Voorbeeld van de interpretatie van een sondering naar lithoklasse met het ANN (voor legenda lithoklassen, zie Bijlage E).

### 6.3 Vergelijking methodes lithologische interpretatie

De juistheid van de vertaling van sondeerwaarden naar lithoklassen kan worden gekwantificeerd door de resultaten te evalueren voor de boring-sonderingparen uit de trainingset. In Figuur 6-5 is een sondering weergegeven met naastgelegen boring. De lithoklassen zoals voorspeld aan de hand van Robertson (2010) kunnen hier worden vergeleken met de werkelijke lithoklassen zoals aangetroffen in de boring, waarbij de trajecten zijn gemarkeerd waarvoor de lithoklasse overeenkomt of juist afwijkt. Om eenzelfde beoordeling toe te passen voor de voorspelling van het ANN is gebruik gemaakt van kruisvalidatie. Hiervoor is 20 keer een nieuw ANN

getraind aan de hand van 95% van de trainingset, waarbij de overige 5% niet deelneemt aan de training. Voor de sonderingen uit de achtergehouden 5% van de paren is vervolgens de vertaling gemaakt naar lithoklasse met behulp van het getrainde ANN. Dit is 20 keer herhaald om zo voor elke sondering in de trainingset een vertaling naar lithoklasse te verkrijgen, zonder dat de betreffende data al is gebruikt voor training.



Figuur 6-5. Vergelijking tussen een sondering, kruisvalidatie uitkomst van de lithoklasse voorspelling met een ANN (*ANN lithoclass*), lithoklasse voorspelling met Robertson 2010 (*Robertson*), en de naast gelegen boring (voor legenda lithoklassen, zie Bijlage E). Voor *ANN lithoclass* en *Robertson* is de overeenkomst weergegeven met de boring (groen: voorspelde lithoklasse is hetzelfde als in boring, rood: voorspelde lithoklasse is niet hetzelfde als in boring)

Voor de trajecten tussen de 2 m en 20 m beneden maaiveld is de prestatie van de twee classificatiemethodes beoordeeld. Per lithoklasse is de vertaling van de sondeermetingen naar lithoklasse vergeleken met de lithoklasse zoals verkregen uit boringen. Er zijn hierin steeds vier mogelijkheden (Fawcett, 2006): de sondering voorspelt dat de lithoklasse aanwezig is en dit is ook zo in de boring (*True Positive*, *TP*), of de boring geeft een andere lithoklasse (*False Positive*, *FP*). Andersom kan voor een sondeermeting die *niet* als de betreffende lithoklasse is geclassificeerd, in de boring ook een andere lithoklasse aanwezig zijn (*True Negative*, *TN*), of uit de boring blijkt dat op deze diepte juist wel deze lithoklasse aanwezig is (*False Negative*, *FN*).

Per lithoklasse kan nu het aandeel van sondeermetingen waar de correcte lithoklasse is voorspeld, de *precision*, worden berekend volgens:

$$precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

Andersom kan het aandeel van een boring dat correct wordt voorspeld, de *recall*, kan worden berekend volgens:

$$recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

In Tabel 6-1 zijn het aantal metingen waar de lithoklasse voorkomt in de boring, de *precision* en *recall* weergegeven voor classificatie op basis van de Robertson methode en met het ANN. Hoe hoger de *precision* en *recall*, des te beter presteert de classificatiemethode. Voor de lithoklassen veen, klei en kleig zand en zandige klei is de *precision* van het duidelijk ANN hoger. De *recall* is voor de meeste lithoklassen vergelijkbaar, maar voor kleig zand en zandige klei presteert ANN duidelijk beter dan Robertson (2010). Een uitwerking in meer detail van deze data is gegeven in Bijlage B.

Tabel 6-1 Aantal metingen in de trainingset, *precision* en *recall* voor classificatie van sonderingen volgens de Robertson methode en met het ANN.

| lithoklasse                       | Robertson     |                  |               | ANN           |                  |               |
|-----------------------------------|---------------|------------------|---------------|---------------|------------------|---------------|
|                                   | <i>Aantal</i> | <i>precision</i> | <i>recall</i> | <i>Aantal</i> | <i>precision</i> | <i>recall</i> |
| <i>Veen</i>                       | 13578         | 0.31             | 0.59          | 13673         | 0.68             | 0.61          |
| <i>Klei</i>                       | 40994         | 0.42             | 0.59          | 41739         | 0.63             | 0.58          |
| <i>kleig zand en zandige klei</i> | 47571         | 0.44             | 0.44          | 47644         | 0.62             | 0.68          |
| <i>zand</i>                       | 13795         | 0.92             | 0.9           | 138269        | 0.92             | 0.93          |

De classificatie met het ANN presteert kwantitatief gezien beter dan Robertson. Maar de *precision* en *recall* zijn voor de niet-zand lithoklassen met waarden tussen de 0.6 en 0.7 niet heel hoog. Is de vertaling naar lithoklasse goed genoeg? Er is een aantal factoren waardoor de naar lithoklasse vertaalde sondering niet overeen hoeft te komen met de naastgelegen boring, zonder dat dit betekent dat de vertaling naar lithoklasse fout is. Voorbeelden hiervan zijn:

1. Sonderingen laten kleinere laagafwisselingen zien die in boringen in grotere trajecten zijn samengenomen.
2. De 10 meter afstand tussen de boringen en sonderingen in de trainingset kan er voor zorgen dat (dunne) lagen net op een andere diepte worden aangetroffen of diktes van lagen kunnen variëren.
3. Niet alle grondbeschrijvingen van boringen zijn van even hoge kwaliteit. Goede sondeerinterpretatie worden dan vergeleken met een slecht beschreven boring.

De prestaties van het ANN zoals uitgedrukt in *precision* en *recall* kunnen dus worden gezien als een ondergrens. Dit blijkt ook uit visuele inspectie van vele sonderingen, waar het vertrouwen uit volgt dat deze methode goed gebruikt kan worden voor de classificatie van de Holocene sedimenten in dit gebied. Om die reden is het ANN toegepast op de sonderingen in het hele Sterke Lekdijk gebied voor de vertaling van sonderingwaarden naar lithoklassen.

## 6.4 Stratigrafische interpretatie

De stratigrafische interpretatie van boringen in GeoTOP verloopt voor de ondiepe, Holocene eenheden op geautomatiseerde wijze. Door middel van scripts worden boorintervallen doorzocht op kenmerken als lithologie, diepteligging, stratigrafische positie en soms ook op bijmenging klei, silt, zand of humus. Per stratigrafische eenheid zijn hiervoor één of meerdere scripts opgesteld. Die worden serieel doorlopen. Voor het ondergrondmodel van Sterke Lekdijk wordt dezelfde methode gehanteerd.

De automatische stratigrafische interpretatie van sonderingen is op dezelfde wijze uitgevoerd als die van de boringen. Nadat de sonderingen zijn ingedeeld in intervallen van verschillende lithoklassen, worden zij als 'pseudoboringen' behandeld en samengevoegd met de boringen. De gehele dataset aan boringen en 'pseudoboringen' wordt stratigrafisch geïnterpreteerd met behulp van de serie scripts. In de sonderingen is door het ANN (paragraaf 6.2) alleen hoofdlithologie vastgesteld, en geen bijmenging, zoals in sommige (maar lang niet alle) boringen. Visuele inspectie en vergelijking met een beperkte set handmatig geïnterpreteerde sonderingen wijst uit dat de stratigrafische eenheden in dit project over het algemeen goed zijn te onderscheiden op basis van hoofdlithologie. De automatisch geïnterpreteerde dataset met stratigrafie vormt de input voor de verdere lagen- en voxelmodellering (zie Hoofdstuk 4, 5 en 6).

## 7 Parameters

Volumegewicht en doorlatendheid zijn belangrijke parameters voor faalmechanismen van dijken. Daarom zijn deze parameterwaarden als attribuut aan de voxels van het Sterke Lekdijk-ondergrondmodel toegevoegd. Met de visualisatie hiervan kan men meer inzicht verwerven in de ruimtelijke variatie van volumegewicht en doorlatendheid in de ondergrond dan bij interpolatie binnen een laag het geval is. De hieronder beschreven toekenning van parameter maakt gebruik van een relatief eenvoudige benadering, en geven een illustratie van de meerwaarde en mogelijkheden van het model. Mogelijk kan op langere termijn, bij verdere uitwerking van de methode, het geparameteriseerd voxelmodel ook kwantitatief gebruikt worden voor berekeningen aan piping en macrostabiliteit van dijken.

Voor het inschatten van parameterwaarden van een bepaalde laag, wordt gebruik gemaakt van metingen aan monsters uit boringen. Door het modelleren van stratigrafische eenheden en lithoklassen in een voxelmodel komt tussen boringen en ter plaatse van sonderingen aanvullende informatie beschikbaar over de meest waarschijnlijke opbouw van de ondergrond. Daardoor kunnen we de heterogeniteit van de ondergrond beter meenemen bij het toekennen van ondergrondparameters tussen de boor- en sondeerlocaties in.

### 7.1 Methode

De toekenning van parameters is gebaseerd op de gemodelleerde stratigrafie (laag in het lagenmodel) en lithoklasse. Voor elke combinatie van stratigrafie en lithoklasse stellen we parameterwaarde vast voor nat en droog volumegewicht en voor horizontale en verticale K-waarde (resp. V-nat, V-drg, K-hor en K-vert; voorbeeld in Tabel 7-1). Deze parameters worden vastgesteld op basis van gemeten waarden van HDSR in het geval van volumegewicht, en op basis van toegekende waarden uit andere modellen in het geval van doorlatendheid. De complete lijsten met parameterwaarden zijn opgenomen in Bijlagen C en D van dit rapport. Parameterwaarden worden toegekend op basis van de stratigrafie en de meest waarschijnlijke lithoklasse die voor een voxel is gemodelleerd.

Tabel 7-1. Parameterwaarden voor stratigrafische eenheden 'EC' en 'NIHO'. Per lithoklasse is een parameterwaarde vastgesteld. Merk op dat de parameterwaarden voor dezelfde lithoklasse kan verschillen per stratigrafische eenheid.

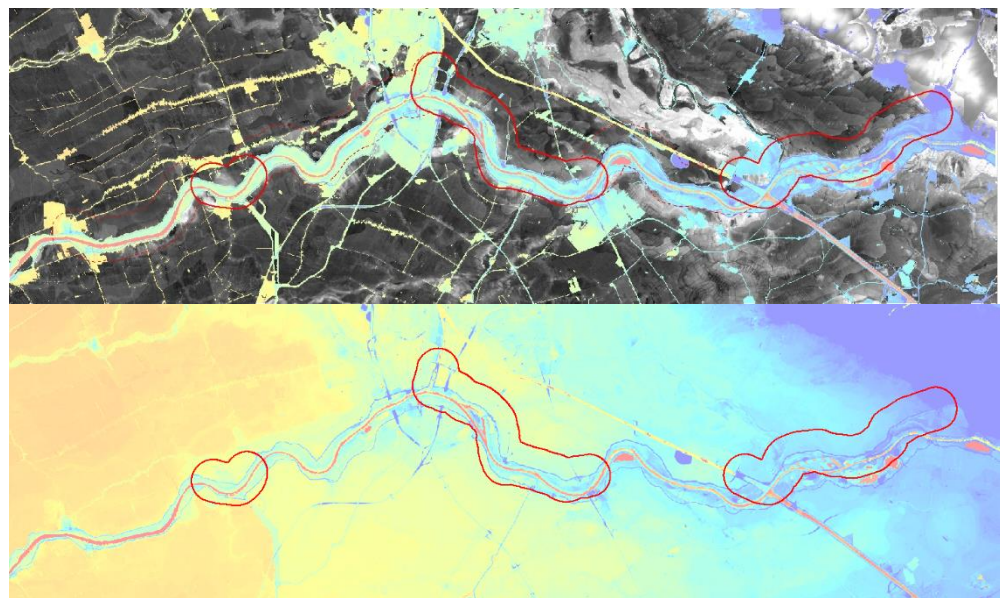
| lithoklasse | Formatie van Echteld |       |        |        | Hollandveen Laagpakket (NIHO) |       |        |        |
|-------------|----------------------|-------|--------|--------|-------------------------------|-------|--------|--------|
|             | V-nat                | V-drg | K-hor  | K-vert | V-nat                         | V-drg | K-hor  | K-vert |
| veen        | 11.24                | 2.99  | 0.049  | 0.049  | 11.24                         | 3.34  | 0.25   | 0.0004 |
| klei        | 16.63                | 10.98 | 0.0046 | 0.0046 | 16.63                         | 10.98 | 0.0029 | 0.0046 |
| klei zandig | 18.21                | 13.42 | 0.04   | 0.04   | 18.21                         | 13.42 | 0.0525 | 0.0314 |
| zand fijn   | 18.73                | 13.90 | 4.4    | 4.4    | 18.73                         | 13.90 | 0.74   | 0.5    |
| zand midden | 18.93                | 14.84 | 11.5   | 11.5   | 18.93                         | 14.84 | 6.29   | 11.5   |
| zand grof   | 19.59                | 16.69 | 29.5   | 29.5   | 19.59                         | 16.69 | 24.2   | 29.5   |
| grind       | 19.59                | 16.69 | 29.5   | 29.5   | 19.59                         | 16.69 | 24.2   | 29.5   |

## 7.2 Volumegewicht

De volumegewichten die zijn toegekend aan het ondergrondmodel zijn afgeleid uit metingen die zijn uitgevoerd ten behoeve van de Dijkversterking Centraal Holland (Arcadis, 2015). Hierbij zijn de lithologische beschrijvingen per monster vertaald naar lithoklasse. Op basis van de locatie, diepteligging en lithologie van het monster is bepaald tot welke stratigrafische eenheid het monster behoort (dus tot welke laag in het lagenmodel). Daarna is op basis van alle monsters per eenheid een volumegewicht en bijbehorende standaarddeviatie vastgesteld.

Volumegewicht is mede-afhankelijk van de grondwaterstand: 'droog' volumegewicht van boven de freatische grondwaterspiegel is anders dan nat volumegewicht van hetzelfde materiaal daaronder. De grondwaterstand die van belang is kan verschillen per faalmechanisme. Er is afgesproken met HDSR om voorlopig met het gemiddelde van gemiddeld hoog grondwater (GHG) en gemiddeld laag grondwater (GLG) te werken.

Door HDSR zijn voor de parameterisering een GHG- en GLG-grid beschikbaar gesteld. Deze zijn afkomstig uit het model Hydromedah (datum onbekend), aangeleverd in 25 x 25 meter resolutie met waarden ten opzichte van maaiveld (maaiveldhoogte onbekend). Het gemiddelde is daarom omgerekend naar waarden t.o.v. NAP middels het 25 x 25 meter maaiveld uit het lagenmodel. Het gebruik van het maaiveldgrid uit deze onafhankelijke bron kan leiden tot enige onnauwkeurigheid in de grondwaterstand. Daarnaast zijn de Hydromedah grondwatergrids niet geheel vlakdekkend (Figuur 7-1). Cellen zonder waarde zijn geïnterpoleerd in softwarepakket Isatis, middels een *moving average* en *random path* interpolatie. De nieuwe vlakdekkende grids voor GHG en GLG zijn gebruikt om een gemiddelde grondwaterstand uit af te leiden. Gridcellen zonder waarde komen vooral in stedelijk gebied, bij water en onder wegen en dijken.



Figuur 7-1 GHG in m - maaiveld (boven, zwart-wit) en geïnterpoleerde gemiddelde grondwaterstand in m + NAP (boven en onder, kleur). Artefacten als gevolg van interpolatie zijn herkenbaar als oranje en blauwe lijken en vlekken op de kaart en

betreffen vooral dijken en grote wegen (grondwater te hoog ingeschat) en wateroppervlak (grondwater te laag ingeschat). Het projectgebieden zijn roodmlijnd.

Voor elke voxel wordt volumegegewicht toegekend door te kijken tot welke stratigrafie en lithoklasse deze behoort, en of deze boven of onder de grondwaterspiegel ligt. Dan wordt de 'natte' of 'droge' waarde toegekend die bij deze combinatie hoort. Voor sommige stratigrafie-lithoklasse combinaties is geen meetwaarde beschikbaar. In die gevallen is voor volumegegewicht een waarde uit een vergelijkbare eenheid uit het gebied gebruikt. Daar waar ook dit niet mogelijk was, zijn waarden die door Deltares zijn vastgesteld voor Groningen aangenomen (Bommer et al., 2017). Dit is niet feilloos: parameterwaarden kunnen variëren van gebied tot gebied. De lijst met alle toegekende parameters (Bijlage C) is ter controle aan HDSR voorgelegd. Dit heeft niet geleid tot wijzigingen.

Volumegegewicht varieert in de huidige methode niet als functie van diepte. Het is al wel mogelijk om diepteligging indirect mee te nemen, door dieper gelegen stratigrafische eenheden bijvoorbeeld een hoger volumegegewicht toe te kennen dan ondiepere eenheden, omdat diepere eenheden sterker gecompacteerd zullen zijn. Vooralsnog zijn standaarddeviaties rondom volumegegewicht niet in het model opgenomen.

### 7.3 Doorlatendheid

Doorlatendheid (K-waarde) is een maat voor de snelheid waarmee water door een medium stroomt. Aan ondergrondmodel Sterke Lekdijk zijn waarden toegekend voor de horizontale en verticale doorlatendheid per stratigrafie-lithoklasse-combinatie. De waarden zijn gebaseerd op de doorlatendheden in de catalogus van REGIS II, een hydrogeologisch lagenmodel van Nederland. Deze catalogus geeft een  $k_h$  en  $k_v$  voor elke in REGIS II aanwezige combinatie van stratigrafie en lithoklasse. De lijst met parameters (Bijlage D) is voorgelegd aan HDSR. Dit heeft niet geleid tot wijzigingen in de parameterwaarden.

NB. Omdat doorlatendheid van de gemodelleerde lithoklassen ordegrootten kan verschillen, is niet de doorlatendheid zelf, maar de natuurlijke logaritme (ln-waarde) van deze parameter toegekend.

## 8 Resultaten

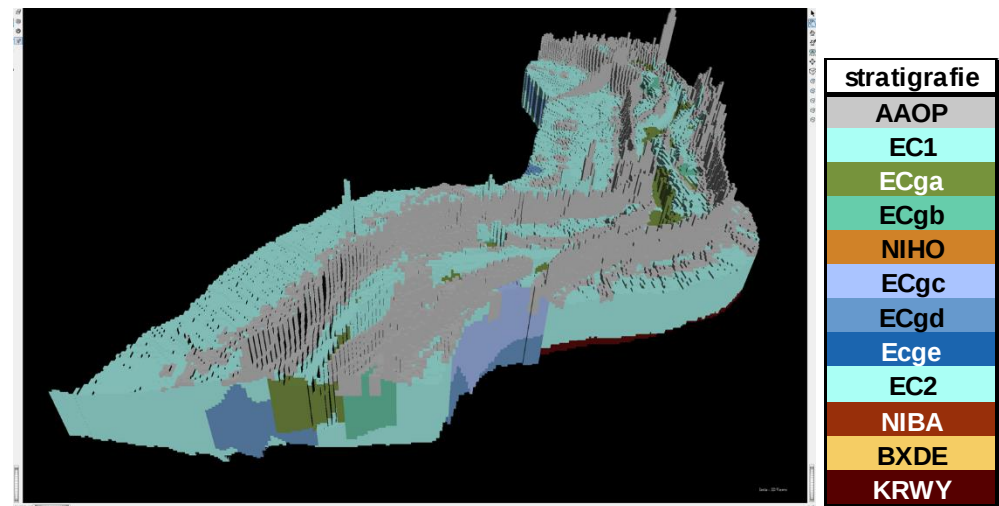
In dit hoofdstuk worden de resultaten van de stratigrafische interpretatie en modellering gepresenteerd en toegelicht aan de hand van figuren van het model voor dijktraject Wijk bij Duurstede - Amerongen. In alle figuren is de verticale schaal 50 keer overdreven.

### 8.1 Stratigrafie en lithoklasse

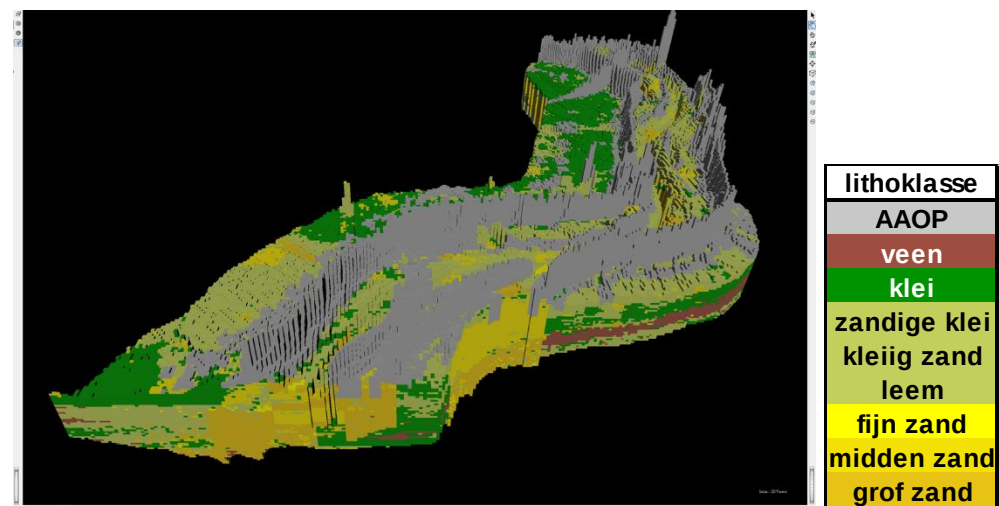
In het model is een twaalfstal stratigrafische eenheden opgenomen, namelijk van boven naar beneden de eenheden AAOP, EC1, NIHO, EC2, NIBA, BXDE en KRWY, en de geulgeneraties A t/m E (paragraaf 5.3). Een toelichting op deze eenheden is te vinden in Hoofdstuk 2. Bijlage D bevat een tabel met vertaling van de codes naar volledige namen van de eenheden en de bijbehorende legendakleuren.

In Figuur 8-2 is het resultaat van de lagenmodellering en de meest waarschijnlijke lithoklasse te zien. Het getoonde modelgebied bestaat voor het grootste deel uit de Formatie van Echteld (hier EC2), waarin verschillende generaties geulen aanwezig zijn. Op sommige plekken vinden we hieronder KRWY, maar een groot deel van het model ligt direct op oudere afzettingen die niet worden gemodelleerd. Het Hollandveen Laagpakket (NIHO) en de Basisveen Laag (NIBA) komen langs dijktraject WAM niet voor. Een groot deel van de structuren aan maaiveld zijn antropogeen.

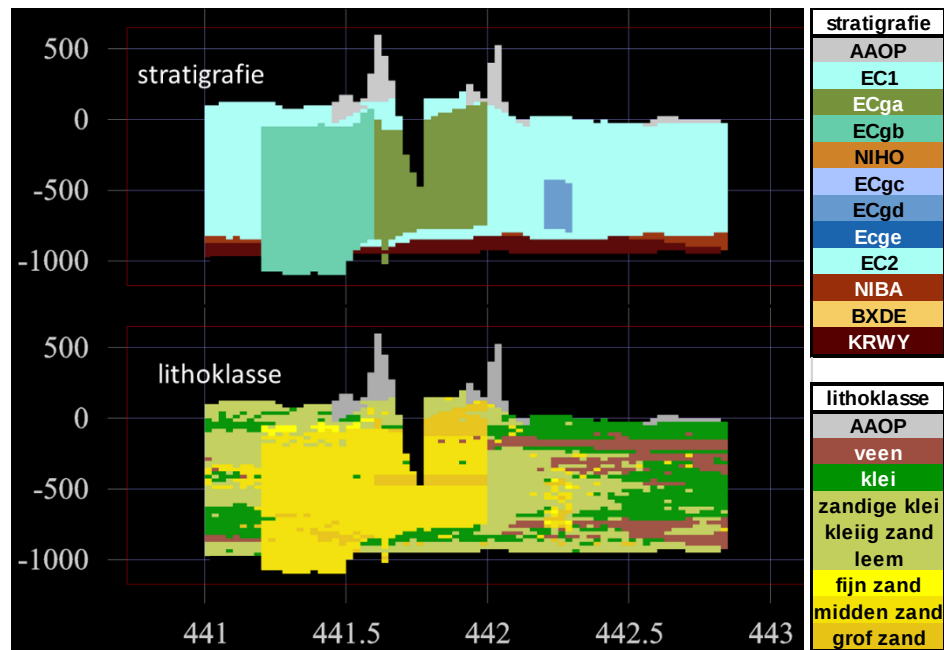
De geulen in het model zijn aan de zijkanten verticaal begrensd. De top en basis kennen geen scherpe grens: de diepteligging hiervan kan golven. In het lithoklassenmodel is duidelijk te zien dat binnen deze scherpe grenzen vooral zand (in drie korrelgrootteklassen) gemodelleerd wordt. De hoge resolutie laat toe dat binnen de geulen korrelgroottetrends naar voren komen, maar alleen waar de data die suggereert, bij hoge datadichtheid en goede datakwaliteit (paragraaf 9.3). Buiten de geulen is de lithologie meer gevarieerd: hier zien we een afwisseling van duidelijk vervolgbare kleiige en venige lagen, met (lokale) voorkomens van zandige klei of kleig zand. In de KRWY is vooral zandige klei en klei gemodelleerd. Op de verdeling van lithoklassen in het model wordt verder ingegaan in de volgende paragraaf (8.2).



Figuur 8-1 Westaanzicht met dwarsdoorsnede, gekleurd naar stratigrafische eenheid.



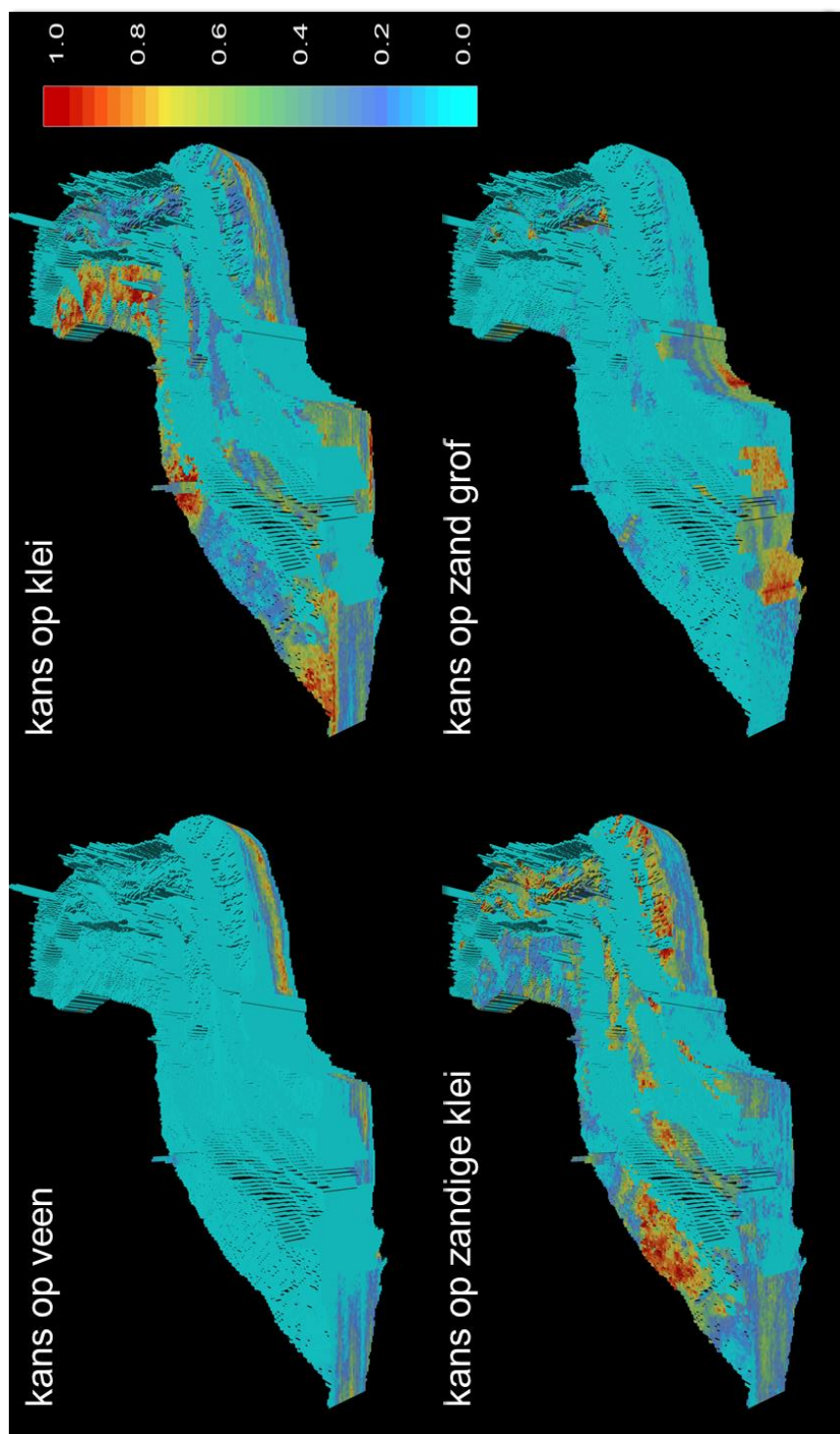
Figuur 8-2. Westaanzicht met dwarsdoorsnede, gekleurd naar meest waarschijnlijke lithoklasse (onder). Verticale schaal is 50 keer overdreven.



Figuur 8-3 Stratigrafie (links) en lithoklasse (rechts) van een noord-zuid dwarsprofiel door Salmsteke ( $Y = 124812.5$ ) met legendakleuren als in Bijlage E. Verticale schaal is 50 keer overdreven. Zie de gelijkenis met Figuur 2-2.

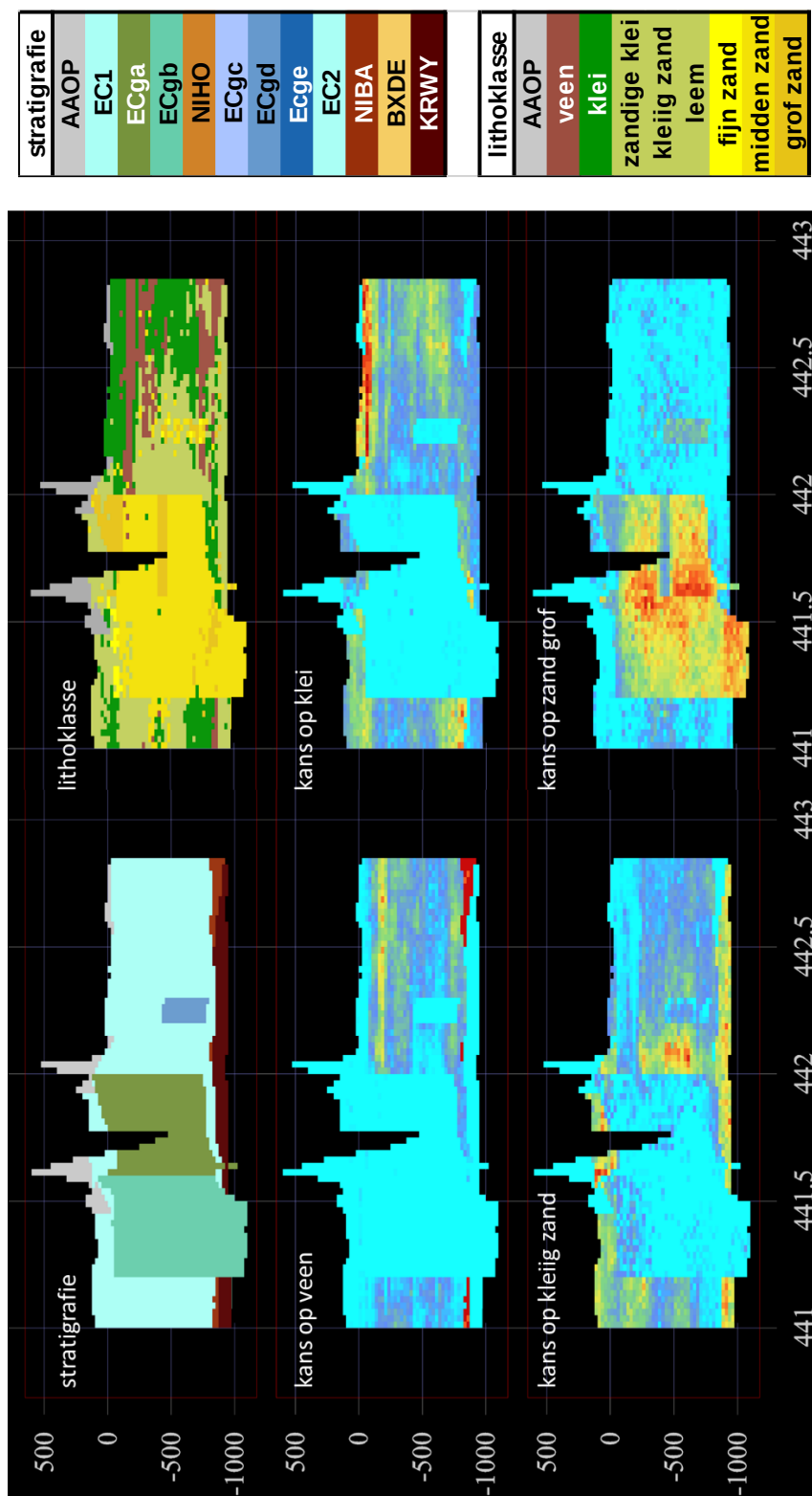
## 8.2 Kans op lithoklasse

Op basis van de 100 lithoklassensimulaties die zijn uitgevoerd, is per voxel uitgerekend wat de kans is op elk van de lithoklassen. Bij wijze van voorbeeld is de kans op een aantal van deze lithoklassen weergegeven in Figuur 8-4. Aan het oppervlak laat Figuur 8-4 zien dat de kans op zandige klei relatief hoog is op enkele plekken nabij de actieve geul en afzettingen van de jongste geulgeneratie (A). In dit projectgebied (WAM) zien we een hogere kans op zandige klei aan en stroomafwaarts van de buitenbochten. Ook op diepte is vaak rondom de begraven geulen een verhoogde kans op zandige klei te zien. Het betreft hier oever- en crevasse-afzettingen. De kans op klei is aan het oppervlak het hoogst op wat grotere afstand van de rivier, waar je komafzettingen verwacht. In dit gebied zien we ook klei-afzettingen relatief dichtbij de actieve geul, stroomopwaarts van de buitenbochten. Dit duidt erop dat hier minder crevasses gevormd zijn. De kans op veen is aan het oppervlak meestal het grootst op enige afstand van de actieve rivier. Binnen dit model van 1 kilometer rondom de dijk zien we dit aan het oppervlak niet terug, maar op enige diepte is wel een duidelijke veenlaag herkenbaar.



Figuur 8-4. Westaanzicht met dwarsdoorsnede door het voxelmodel van WAM, met kans op verschillende lithoklassen. Verticale schaal is 50 keer overdreven.

*Voorbeeld: De gradatie van rood via geel naar lichtblauw over enige afstand tussen gebieden met hoge kans op klei en die met hoge kans op zandige klei, suggereert een geleidelijke overgang tussen deze lithoklassen die aannemelijk is voor crevasse-afzettingen en voor de overgang naar het komgebied. Een dergelijke geleidelijke overgang kan ook voortkomen uit onzekerheid als gevolg van lage datadichtheid.*

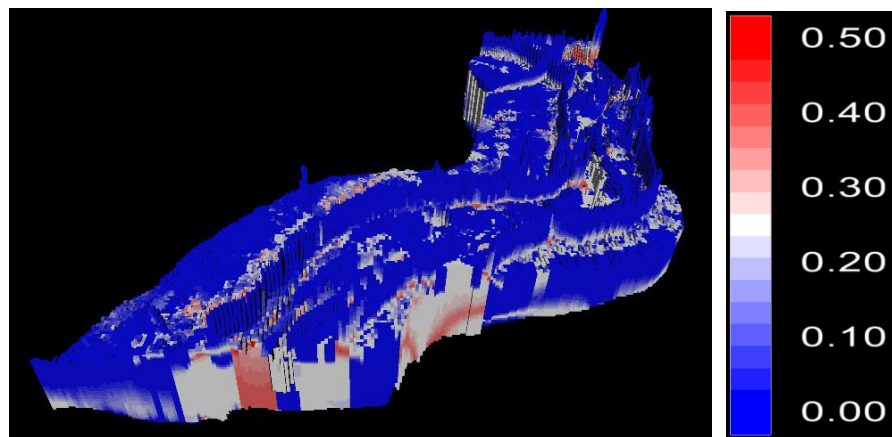


Figuur 8-5 Noord-zuid dwarsdoorsnede door Salmsteke (Y = 124812.5) van stratigrafie, lithoklasse en kans op verschillende lithoklassen. Diepte in cm op de verticale as en Y-coördinaat / 1000 op de horizontale as. Verticale schaal is 50 keer overdreven en kleurschaal kansen als in Figuur 8-4.

### 8.3 Modelonzekerheden

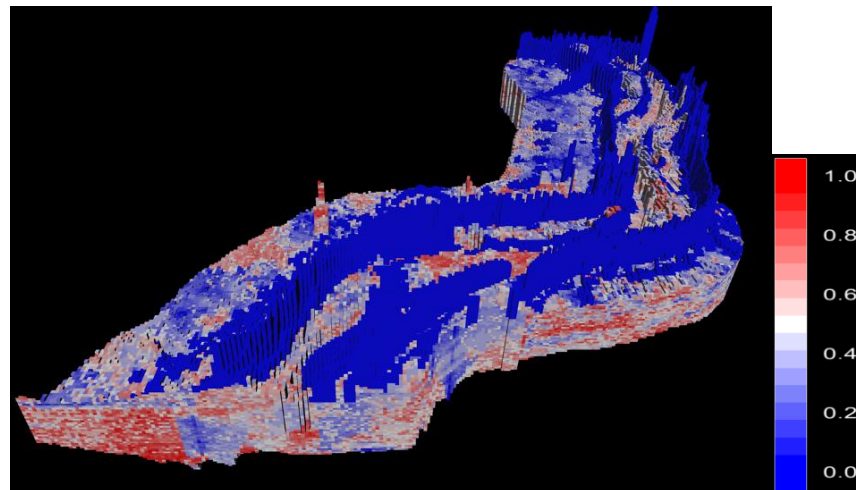
Het voxelmodel kent twee maatstaven van modelonzekerheid (TNO, 2014b): de modelonzekerheid van geologische eenheid en de modelonzekerheid van lithoklasse (zie voor uitleg Hoofdstuk 4). Onzekerheden in de kwaliteit van boringen en sonderingen zijn hierin niet opgenomen.

Figuur 8-6 geeft een voorbeeld van de modelonzekerheid van geologische eenheid. Midden in een laag is het model over het algemeen beter in staat te schatten tot welke eenheid een voxel behoort dan vlakbij de top of basis van de laag. De modelonzekerheid is midden in een laag daarom lager dan nabij de top of basis. In de nabijheid van boringen waarin een laagovergang is gevonden is de modelonzekerheid ook relatief laag. Daar waar geen boring nabij is, is de modelonzekerheid meestal hoger, omdat het model daar minder goed in staat is om de positie van de laagovergang te schatten.



Figuur 8-6. Modelonzekerheid van geologische eenheid. Verticale schaal is 50 keer overdreven.

De modelonzekerheid van lithoklasse is geïllustreerd in Figuur 8-7. Deze modelonzekerheid is afhankelijk van de datadichtheid van boringen en sonderingen, en van de variatie in lithoklasse die daarin wordt aangetroffen (de heterogeniteit van de afzettingen).



Figuur 8-7. Modelonzekerheid van lithoklasse. Verticale schaal is 50 keer overdreven.

De modelonzekerheden kennen twee belangrijke beperkingen:

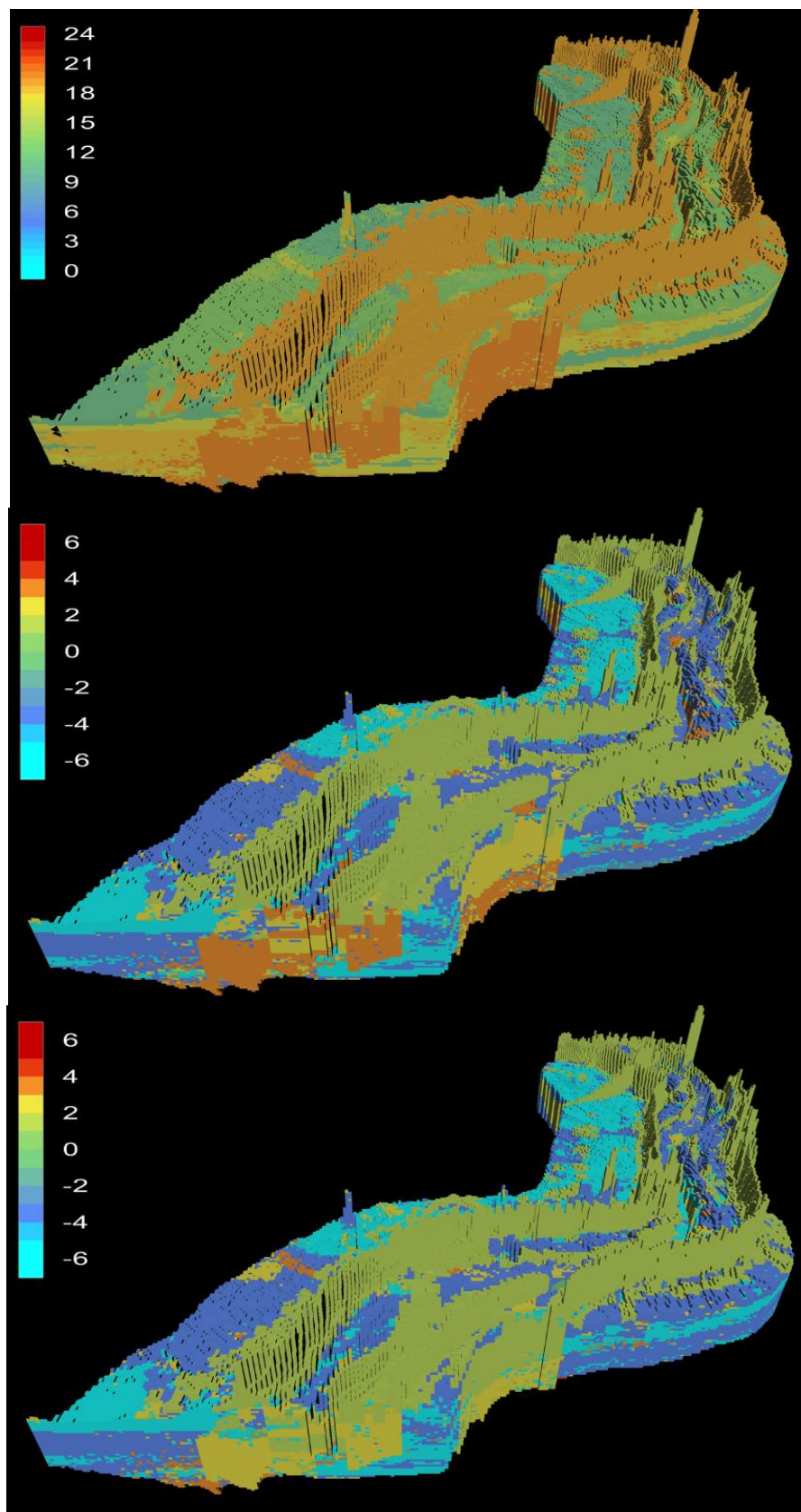
- De modelonzekerheid is gebaseerd op de in het model gebruikte stochastische interpolatietechnieken. Deze technieken houden niet expliciet rekening met onzekerheidsmarges in de gebruikte brongegevens (boorbeschrijvingen, sonderingen en verbreidingskaarten).
- Buiten de verbreiding van een geologische eenheid is de kans op die eenheid altijd 0. Dit betekent dat de modelonzekerheid van geologische eenheid geen onzekerheidsinformatie over de laterale verbreiding van de geologische eenheid bevat.

#### 8.4 Parameters

De parameters volumegewicht en horizontale en verticale doorlatendheid (Figuur 8-8) zijn toegekend op basis van stratigrafie en meest waarschijnlijke lithoklasse. Hiermee is ook binnen stratigrafische lagen geologisch onderbouwde variatie in parameterwaarden aangebracht – zie Figuur 8-2, stratigrafie ter vergelijking.

Over het algemeen is volumegewicht het hoogst in de zandige pakketten, waarbij grover zand een relatief hoge waarde heeft toegekend gekregen (zie Figuur 8-2, lithoklasse). In de afwisseling tussen veen en klei is te zien dat aan klei een hoger volumegewicht is toegekend dan aan veen. Zandige klei in de KRWY – een relatief diep gelegen eenheid die na afzetting rijpingsprocessen heeft doorgemaakt – heeft een groter volumegewicht dan diezelfde lithoklasse in EC2. Daarnaast hebben klei en kleiig veen in de EC2 aan maaiveld (dus boven de grondwaterspiegel) een lager volumegewicht dan klei en kleiig veen uit dezelfde eenheid op enige diepte.

De hoogste doorlatendheden zijn toegekend aan zandige pakketten, en de laagste doorlatendheden aan klei. Verschillen in horizontale en verticale doorlatendheid zijn in de huidige weergave te zien voor zandige pakketten. Deze hebben over het algemeen een hoge doorlatendheid, die het grootst is in horizontale richting.



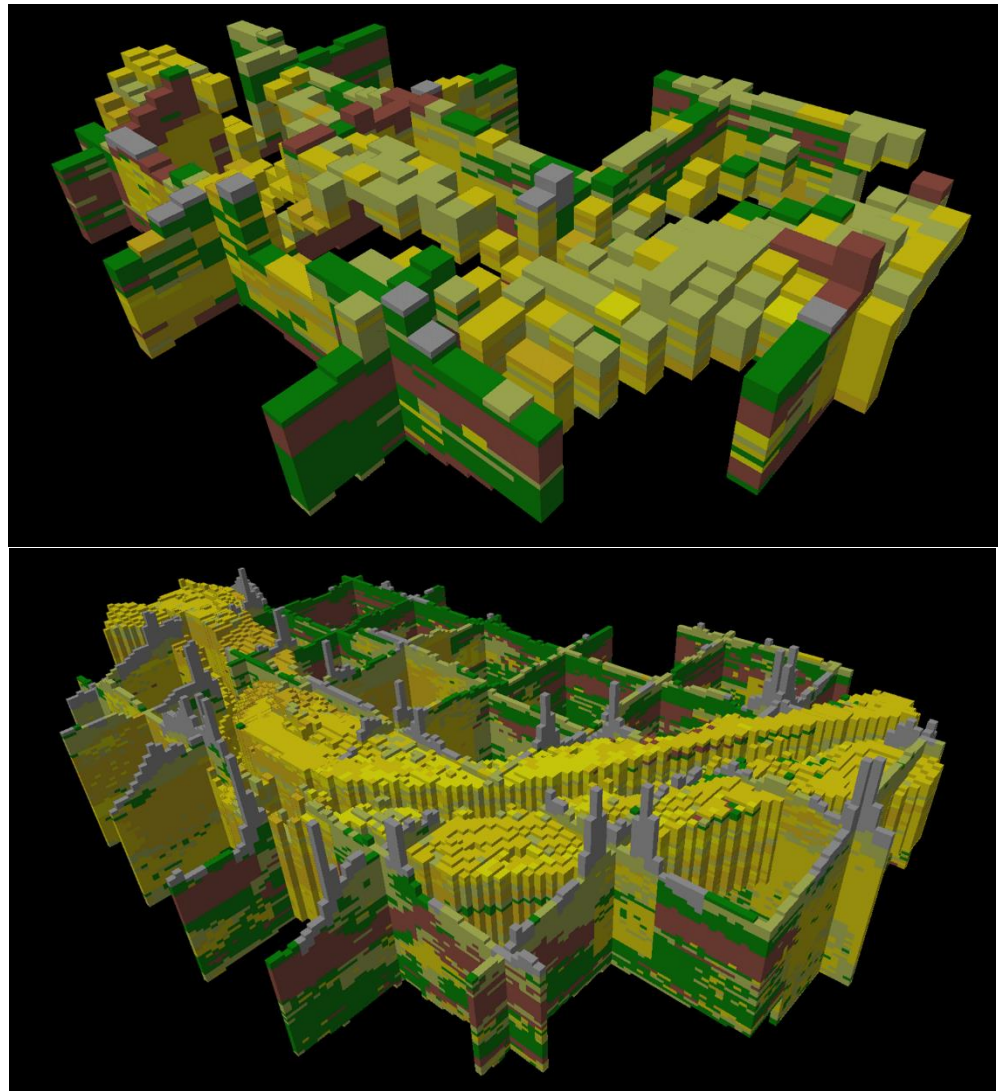
Figuur 8-8. Volumegewicht (boven) en de natuurlijke logaritme van horizontale (midden) en verticale (onder) doorlatendheid. Verticale schaal is 50 keer overdreven.

## 9 Discussie

De aanpassingen in de modelering ten opzichte van de 'standaard' GeoTOP werkwijze heeft geleid tot een aantal veranderingen in het model. In onderstaande tekst wordt een aantal van deze verschillen behandeld.

### 9.1 Resolutie Sterke Lekdijk

Met de 32 keer hogere resolutie ten opzichte van GeoTOP is in de deelgebieden veel meer detail aangebracht in het model (Figuur 9-1, Figuur 9-2 en Figuur 9-4). De hogere resolutie maakt het mogelijk te profiteren van de hoge datadichtheid in het projectgebied, evenals van de dunne boorintervallen van gedetailleerd beschreven boringen (zoals die van Universiteit Utrecht) en de 2 cm resolutie die in de meeste sonderingen gehanteerd wordt. Hierdoor is binnen stratigrafische eenheden preciezer onderscheid te maken tussen lithologische lagen (paragraaf 9.4), en het biedt mogelijkheden voor het modelleren van korrelgroottetrends in geulen (paragraaf 9.3).

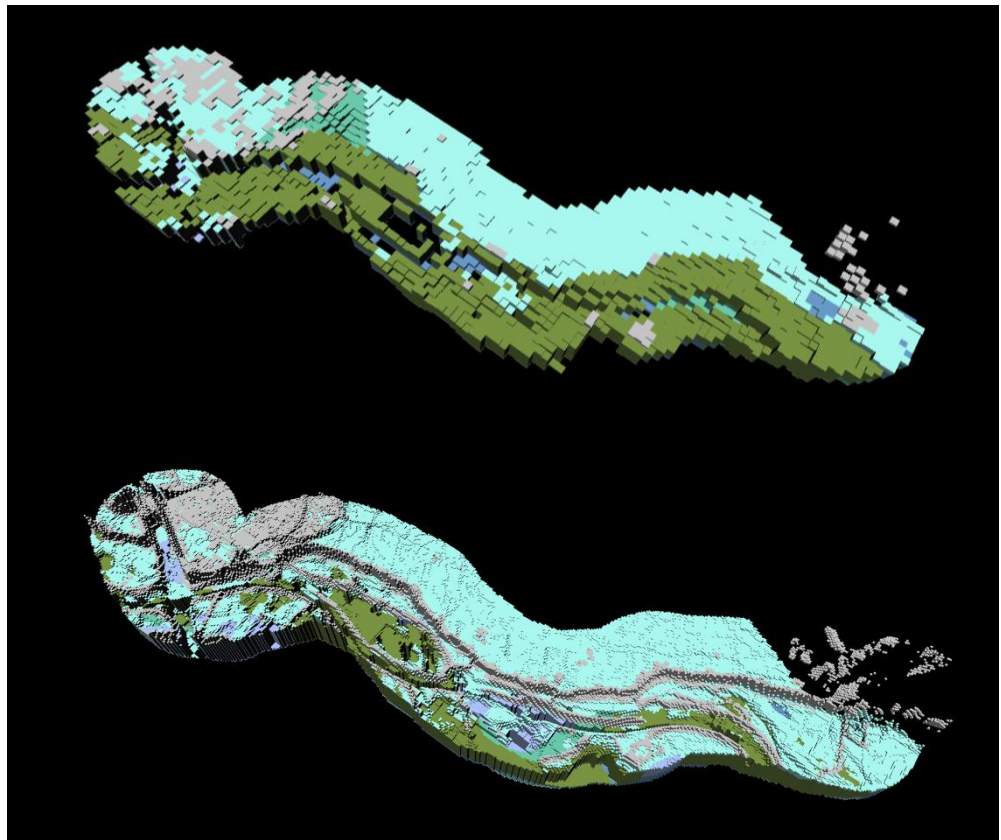


Figuur 9-1 Zuidoost-aanzicht van deelgebied Salmsteke: hekdiagrammen van lithoklasse in resolutie van 100 x 100 x 0,5 meter (boven) en 25 x 25 x 0,25 meter (onder), met daarin de jongste geulgeneratie A volledig weergegeven. Beide figuren beslaan hetzelfde gebied.

## 9.2 AAOP nieuw model vs. GeoTOP

In het model zijn aanpassingen gedaan aan de modellering van het antropogeen (AAOP; paragraaf 5.4). Dit leidt ertoe dat dijken, bebouwd gebied en andere antropogene werken in groter detail in het model zijn opgenomen (Figuur 9-2). De samenstelling van antropogene is zeer heterogeen. Hoewel er in dijken veel sondeergegevens beschikbaar zijn, is het moeilijk om deze te interpreteren. Historische aanpassingen, zoals ophoging voor wijkaanleg en dijkverleggingen door de eeuwen heen, zijn vaak niet gedocumenteerd of niet centraal beschikbaar. Daarnaast volgen menselijke aanpassingen niet de geologische patronen die we in natuurlijke afzettingen kennen. De natuurlijke ruimtelijke samenhang in de ondergrond kunnen we voor antropogene afzettingen dus niet gebruiken in de lithoklassensimulaties. Om deze redenen wordt aan AAOP-voxels geen lithoklasse toegekend. Het is wél belangrijk te weten waar we antropogeen materiaal kunnen

vinden, zodat duidelijk is waar kennis ontbreekt. De verbetering van AAOP in het Sterke Lekdijk lagenmodel biedt deze informatie.



Figuur 9-2. Antropogeen (grijs) rondom dijktraject Wijk bij Duurstede – Amerongen in zuidoost-aanzicht in GeoTOP-resolutie vóór aanpassingen (boven) en in meest recente model na aanpassingen (onder). Bovenstaande figuren hebben dezelfde schaal.

### 9.3 Geulen in nieuw model vs. GeoTOP

#### *Verbeterde geulvoorkomens*

Er is een verbetering doorgevoerd van de geulen in het nieuwe ondergrondmodel voor de Lekdijk: het nieuwe model gebruikt het opnieuw samengestelde Basisbestand Paleogeografie van de Rijn-Maasdelta (het “geulenbestand”) van Universiteit Utrecht uit 2012 in plaats van het bestand uit 2001 (paragraaf 5.3). Een belangrijk verschil tussen de versies betreft de toevoeging of aanscherping van de ligging van ondiepe geulen op basis van het AHN. Er zijn nu meer geulen gekarteerd en in het model opgenomen. De hogere resolutie van het model laat tevens een betere weergave van geulen toe (zie Figuur 9-1). Voor de smalle slingerende voorkomens is dit een belangrijk verschil, omdat verloop van bochten nu vloeiender in het is model opgenomen.

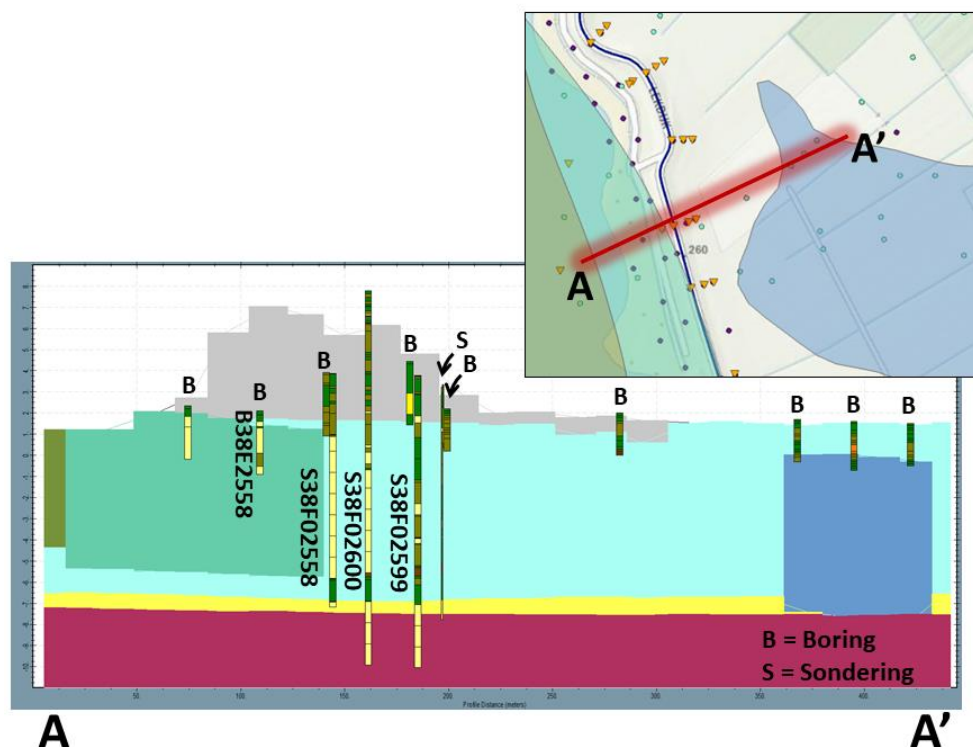
#### *Laterale begrenzing van geulen*

Er is wel een kanttekening bij de gekarteerde ligging van de geulen in het geulenbestand. De begrenzing van een geul in de ondergrond ligt altijd tussen boringen in, en het is onmogelijk te zeggen waar precies. Door de Universiteit Utrecht is hiervan een inschatting gemaakt, maar de nauwkeurigheid daarvan zal lang niet altijd de horizontale modelresolutie van 25 meter halen. De grenzen van geulen (en dus de overgangen van zand naar slap materiaal in de ondergrond) liggen dus niet altijd exact daar waar ze gemodelleerd zijn. Hoeveel de ligging kan afwijken is afhankelijk van de datadichtheid op de betreffende diepte.

De voor het model gebruikte geulenkarte van Universiteit Utrecht uit 2012 is niet bijgewerkt aan de hand van de complete set boringen en sonderingen van DINO en HDSR uit het modelgebied. In sommige gevallen wijkt het lagenmodel daardoor af van wat in boringen en sonderingen te zien is. Een voorbeeld hiervan is te zien in Figuur 9-3 (zie ook het bijschrift). Hieruit blijkt dat het toevoegen van nieuwe data waardevol is en een (lokaal) onjuiste of achterhaalde kartering aan het licht kan brengen. Die kan dan in eventuele volgende iteraties van het model worden verbeterd. Dit geldt voor alle eenheden, maar is in het geval van Sterke Lekdijk met name voor geulen van belang.

De onvolkomenheden in de (geul)kartering worden in het voxelmodel ten dele gecompenseerd, doordat de lithoklasse die wordt gemodelleerd gebaseerd is op de lithoklasse in nabijgelegen boringen en sonderingen. Als er dus een kleiige/venige boring binnen de gekarteerde geul staat, wordt rondom die boring geen geulzand, maar klei en veen gemodelleerd. Hiermee worden afwijkingen in verbreidingen en eventuele fouten in het lagenmodel gebufferd.

Naast de onzekerheid over de precieze ligging van de gekarteerde geulen (en de lokale fouten hierin), bestaat de kans dat er geulafzettingen in de ondergrond aanwezig zijn, die helemaal niet zijn gekarteerd. Het is mogelijk dat een zandlichaam niet is aangeboord en niet op het AHN te zien is, of dat zand niet als geul is geïnterpreteerd. Dit geldt in bijzonder voor eventuele dieper gelegen geullichamen, die minder tot uitdrukking komen aan het oppervlak. Deze ongekarteerde geulen worden niet opgevangen door de lithoklassenmodellering.



Figuur 9-3 Profiel over een geulen en boringen en sonderingen in CUB.

**LATERALE BEGRENZING:** de geulverbreding van geulgeneratie B blijkt bij toevoegen van sondeerdata te kunnen worden bijgewerkt. De sonderingen S38F02558 en S38F02600 vallen buiten de verbreding, maar bevatten beiden nog een dik pakket zand. De daadwerkelijke grens van de geul ligt dus iets oostelijker, onder de dijk tussen sonderingen S38F02600 en S38F02599.

**VERTICALE BEGRENZING:** de boringen ter plaatse van de geul reiken tot enkele meters beneden maaiveld en bereiken niet de geulbasis. De sonderingen S38F02558 en S38F02600, die hier helaas buiten de UU-verbreding vallen, bereiken de geulbasis wel, en tonen aan tussen de geulbasis en het Pleistocene zand nog een kleilaag aanwezig is. Het betreft hier dus een ongefundeerde geul, hetgeen uit boringen alleen niet duidelijk werd. Sonderingen (die wel binnen de geulverbreding vallen) geven hier waardevolle extra informatie.

#### *Verticale begrenzing van geulen*

In de lagenmodellering wordt de diepteligging van geulgeneraties vastgesteld door in boringen en sonderingen te zoeken naar een zandpakket (zonder te dikke kleilige intervallen hiertussen). In deze zoekmethode (stratigrafiescripts) zijn verbeteringen aangebracht ten opzichte van de modellering in GeoTOP, waardoor artefacten in de diepteligging van geulen bijvoorbeeld onder dijken zijn komen te vervallen. Ook het toevoegen van sonderingen is hier waardevol. In tegenstelling tot boringen, bereiken sonderingen vaak een diepte van enkele tientallen meters. De diepteligging van de geulbasis is hierdoor in sonderingen beter in te schatten, waardoor op meer plekken duidelijk is of een aangeboorde of gesondeerde geul gefundeerd is of niet.

De top en basis van geulen wordt bepaald door middel van interpolatie tussen boringen waarin geulstratigrafie is toegekend. Doordat datadichtheid afneemt met diepte, is de berekende basis van een geul (in het bijzonder in het geval van diepe geulen en geulen van oudere generaties) vaak gebaseerd op punten die ver uit elkaar liggen. Als gevolg hiervan kan het model niet altijd met zekerheid voorspellen of een geullichaam gefundeerd is of niet. De modelonzekerheid van geologische

eenheid biedt hierin enig inzicht. Deze is nabij boringen relatief laag, en op enige afstand van boringen hoger. Met de huidige methode van lagenmodelleren wordt overigens ook geen verticaal onderscheid tussen elkaar snijdende geulgeneraties binnen een boring of sondering.

#### *Scherpe en geleidelijke grenzen van geulen en andere zandvoorkomens*

Omdat geulen erosief zijn, is de overgang van geul naar niet-geul een scherpe grens in de ondergrond. Deze scherpe overgang wordt ook gemodelleerd. Omdat het een grens in het lagenmodel betreft – geulgeneraties worden immers als aparte lagen gemodelleerd – zien we ook in de lithoklassenmodellering een harde grens terug, met hoofdzakelijk zand in de geulen en overwegend slapper materiaal daarbuiten.

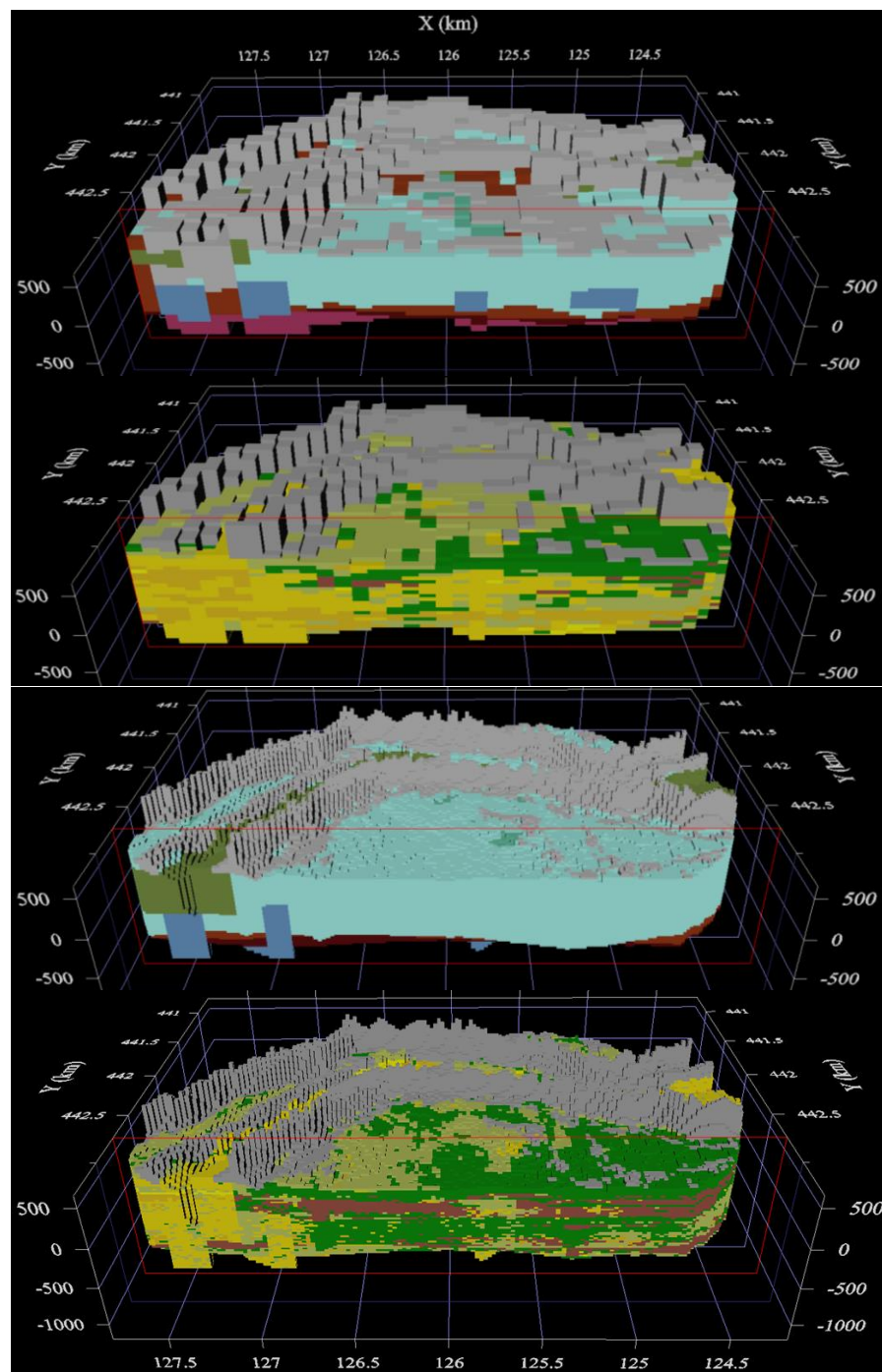
Daar waar zand is aangeboord, maar geen geul is gekarteerd, is het zand in de ondergrond minder scherp begrensd. In plaats van de afgebakende, lintvormige structuur van de gekarteerde geulgeneraties, zijn zandvoorkomens in andere eenheden als het ware als wolk gemodelleerd. Ze zijn terug te zien als een verhoogde kans op zand. Niet-gekarteerde geulen zijn daarmee, weliswaar zonder scherpe grenzen, wel indirect in het model opgenomen. Ook hier buffert de lithoklassenmodellering onvolkomenheden in het lagenmodel. Zandvoorkomens buiten de geulgeneraties zijn overigens lang niet altijd ongekarteerde geulen: ze kunnen bijvoorbeeld ook duiden op crevasses of, aan het oppervlak, antropogene afzettingen die niet in de laag antropogeen zijn opgenomen.

#### *Korrelgroottetrends*

De grotere verticale resolutie van het model biedt meer mogelijkheid om trends in de geulopvulling te herkennen. In theorie verwacht je in geulen een fining-upward trend. Dergelijke trends zijn vooral goed te herkennen dichtbij boringen met gedetailleerde boorbeschrijvingen, waarin de korrelgrootte van zand beschreven staat. Dit is niet altijd het geval. Waar informatie over korrelgrootte die niet voorhanden is, zien we de trends niet terug. In de huidige voxelmodellering is geen conceptuele sturing opgenomen met betrekking tot de verdeling van de verschillende (zandige) lithoklassen binnen een geullichaam: de boordata zijn dus 100% sturend.

## **9.4 Veenvoorkomens nieuw model vs. GeoTOP**

Komafzettingen worden gekenmerkt door een afwisseling van kleiige en venige lagen (Hoofdstuk 2), die lateraal overgaan in oeverwalafzettingen, of scherp afgesneden worden door een recente geul. De grote verticale resolutie van het model maakt het mogelijk om in de komgebieden van de Formatie van Echteld meer dunne veen- en kleilagen te onderscheiden (Figuur 9-4). Het slappe pakket wordt dus beter gekarakteriseerd, waardoor ook de parameterisering beter verloopt.



Figuur 9-4. Noord-aanzicht van een dwarsdoorsnede door Salmsteke: v.b.n.o. GeoTOP resolutie stratigrafie, GeoTOP resolutie lithologie; Sterke Lekdijk resolutie stratigrafie, Sterke Lekdijk resolutie lithologie.

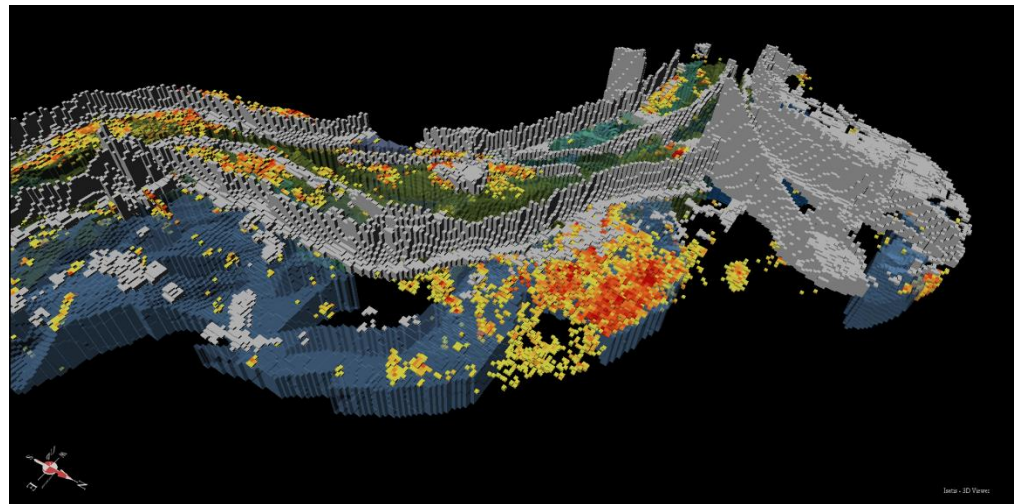
*NB. De zandige klei die de veenlagen op hoge resolutie soms onderbreekt kan lokaal worden gerelateerd aan een geul van generatie D met een west-oost-oriëntatie net ten zuiden van de dwarsdoorsnede. Deze geul wordt in de doorsnede enkele keren aangesneden (stratigrafie; blauw).*

## 9.5 Voorbeeld dijkdoorbraak en ondergrond

Dijkfalen door piping zal preferent plaatsvinden op locaties waar een zandig opgevuld geullichaam onder een dijk doorloopt. Bij een dijkdoorbraak zullen in het binnendijkse gebied ter hoogte van de dijkdoorbraak zandige klei en kleiig zand worden afgezet, in scherp contrast met de klei en veen uit het doorgaans rustige komgebied. In het ondergrondmodel zijn de mogelijke sporen van dijkdoorbraken uit het verleden terug te vinden.

Bij Tull en 't Waal hebben in het verleden meerdere malen dijkdoorbraken en dijkdoorstekingen plaatsgevonden (website [Oud Houten](#)). Doorstekingen vonden plaats in 1482 en 1787 en dijkfalen als gevolg van kruierend ijs trad op in 1624, met in datzelfde jaar een doorbraak van de nieuwe dijkkring. Doorbraken zijn dus niet noodzakelijkerwijs een gevolg van de opbouw van de ondergrond. Mogelijk is dit wel het geval bij de doorbraak van de nieuwe dijkkring. De mogelijke oorzaak en de gevolgen van de dijkdoorbraken zijn terug te zien in het ondergrondmodel (Figuur 9-5). Ter hoogte van Tull en 't Waal zijn onder de dijk oude geullichamen aanwezig, die mogelijk (mede) geleid hebben tot het doorbreken van de nieuwe dijkkring. Ter plaatse van de dijkdoorbraken is een verhoogde kans op de lithoklasse 'zandige klei, kleiig zand en leem' zichtbaar.

Door visualisatie van het ondergrondmodel kunnen dergelijke effecten, mogelijke oorzaken en kwetsbare plekken inzichtelijk gemaakt worden. Dit biedt de mogelijkheid om de gevolgen van dergelijke bekende doorbraken in de ondergrond te herkennen, en om eventueel op te sporen waar dijkdoorbraken zouden kunnen voorvallen of zijn voorgevallen, wanneer dit onbekend is.



Figuur 9-5 Noordoostaanzicht van het ondergrondmodel ter hoogte van Tull en 't Waal, met AAOP in grijs, geulgeneraties transparant en kans op lithoklasse zandige klei/kleiig zand/leem van geel (70%) tot donkerrood (100%). Lagere kans op zandige klei/kleiig zand/leem is niet weergegeven.

## 10 Aanbevelingen

### 10.1 Aanbevelingen voor HDSR

Het ondergrondmodel rondom de noordelijke Lekdijk biedt de mogelijkheid om de ondergrond te visualiseren. Geologische eenheid (stratigrafie) en meest waarschijnlijke lithoklasse geven een goede en snelle eerste indruk van de opbouw van het gebied. Door de verhoogde resolutie is de samenhang tussen stratigrafische en lithologische lagen inzichtelijker, waardoor het gemakkelijker wordt een gebied in korte tijd te begrijpen.

Het is waardevol om in aanvulling hierop ook de kans op de verschillende eenheden te raadplegen. Hiermee kan extra inzicht in de genese van het gebied worden verschaft (bijvoorbeeld door te kijken naar scherpte van lithologische overgangen), en het geeft een beeld van onzekerheid en heterogeniteit van de ondergrond.

Voor het vaststellen van de meest waarschijnlijke lithoklasse en de kansen op lithoklasse, zijn 100 realisaties van de ondergrond gesimuleerd. Bij het uitvoeren van berekeningen geotechnische berekeningen op basis van het ondergrondmodel kan hiervan gebruik worden gemaakt. Dit kan op directe wijze door berekeningen te doen aan alle 100 realisaties, of door afgeleiden hiervan te gebruiken, zoals de P10 en P90. Door stochastisch te rekenen kan de onzekerheid van het model beter worden meegenomen.

Aan de voxels van het ondergrondmodel zijn waarden toegekend voor de parameters volumegewicht en horizontale en verticale doorlatendheid. De toekenning van parameters op basis van het ondergrondmodel biedt de mogelijkheid om hierin geologisch onderlegde ruimtelijke variatie aan te brengen. Die variatie weerspiegelt de heterogeniteit van de ondergrond. De waarden zijn toegekend ter illustratie van de meerwaarde en mogelijkheden van het model. Ze zijn vastgesteld middels een eenvoudige benadering. We bevelen aan de waarden aan te scherpen op basis van o.a. regio-specifieke meetmonsters en ze van een onzekerheid (bijv. standaarddeviatie) te voorzien. Zie voor meer gedetailleerde informatie paragraaf 10.2.

Het ondergrondmodel van de Sterke Lekdijk kent ook beperkingen. Voor het modelleren van geologische eenheden is uitgegaan van hun reeds bestaande gekarteerde verbreidingen, die niet altijd de nauwkeurigheid van de modelresolutie van 25 m behalen. In het geval van geulen bijvoorbeeld, kan dit betekenen dat de overgang van zand (binnen de geul) naar slapper materiaal (buiten de geul) niet exact ligt waar deze is gemodelleerd in het lagenmodel. In het voxelmodel wordt dit weer ten dele gecompenseerd (paragraaf 9.3).

Onzekerheid over laterale grenzen van geologische eenheden is niet inbegrepen in de berekende waarde voor modelonzekerheid. Er zijn ook andere oorzaken waardoor het model kan afwijken van de werkelijkheid, zelfs daar waar de berekende modelonzekerheid laag is. Dit kan (lokaal) veroorzaakt worden door bijvoorbeeld een slechte boring, een beschrijving van mindere kwaliteit of een verkeerde stratigrafische interpretatie.

## 10.2 Aanbevelingen voor modelontwikkeling

Bij de ontwikkeling van ondergrondmodel Sterke Lekdijk heeft nadruk gelegen op twee aspecten, namelijk (1) de 32x hogere resolutie van het ondergrondmodel ten opzichte van GeoTOP, en (2) het toevoegen van sonderingen als nieuw datatype in de modellering, wat leidde tot een sterk verhoogde datadichtheid. Onderstaande tekst beschrijft enkele modeltechnische punten waarop het model in de toekomst verder verbeterd zou kunnen worden.

### *Geologie*

Op basis van de data die beschikbaar is gesteld vanuit HDSR en Universiteit Utrecht, en de naar lithoklasse vertaalde sonderingen, is het mogelijk geworden om verbreidingen van geologische eenheden (d.w.z. gebieden waar ze voorkomen) aan te scherpen. Dit karteerwerk dient handmatig te worden uitgevoerd en is tijdrovend. Het gebruiken van de aangepaste verbreidingen als input voor een volgend model kan lokaal tot verbetering leiden, bijvoorbeeld m.b.t. de ligging van geulen. Een meer geautomatiseerde oplossing zou kunnen zijn om rekening te houden met boringen en sonderingen die binnen de geulverbreiding liggen, maar waar geen geulzand is aangetroffen. De afwezigheid van een geullichaam op deze locaties zou dan in de lagenmodellering moeten worden meegenomen.

### *Sonderingen en artificieel neurale netwerk (ANN)*

De vertaling van sonderingen naar lithoklasse met een ANN kan nog verder worden ontwikkeld. Verbeteringen kunnen worden behaald door:

- Meer of andere gegevens van sonderingen mee te geven als informatie aan het ANN. Voordehand liggend is bijvoorbeeld de locatie van een sondering.
- Het trainen van het ANN op het herkennen van de overgang tussen Holocene (geul)zand en het onderliggende Pleistocene zand. Het ANN is nu alleen getraind om sondeermetingen te vertalen naar vier afzonderlijke lithoklassen, zonder onderscheid in zand naar korrelgrootte. Het onderscheid tussen verschillende zandklassen (fijn, midden, grof) is moeilijk te maken, maar het onderscheiden tussen Holocene en Pleistocene zand lukt mogelijk wel.
- Het toevoegen van boor-sondeerparen voor het dijktraject WAM. Het ANN in dit project is getraind op basis van de in de BRO database aanwezige sonderingen. Ten tijde van training was de data voor dijktraject WAM hierin niet aanwezig. Het toevoegen van boor-sondeerparen uit dit gebied kan een verbeterd ANN opleveren.

Het verwerken van nieuwe boringen en sonderingen is een tijdsintensief proces. De modellering zal efficiënter kunnen worden uitgevoerd als sonderingen al in een vroeg stadium door de opdrachtgever zelf aan de BRO en/of de DINO databank worden aangeleverd.

De berekening van een gedetailleerd voxelmodel kost veel rekenkracht en -tijd. Een kortere rekentijd kan wellicht worden bereikt door gebruik te maken van een voxelmodel met voxels van variabele grootte: kleine voxels en dus een

gedetailleerd model daar waar veel data beschikbaar is, grotere voxels en dus minder detail daar waar minder data beschikbaar is.

#### *Parameters*

Aan het ondergrondmodel zijn de parameters volumegewicht en horizontale en verticale doorlatendheid toegekend op basis van de combinatie van voxelattributen stratigrafie en meest waarschijnlijke lithoklasse, en verschillende bronnen.

Mogelijke verbeteringen zijn:

- Parameterwaarden zijn toegekend op basis van een set meetwaarden uit slechts een deel van het stroomgebied van de Lek of op basis van data uit andere gebieden in Nederland (in het geval van volumegewicht) en op waarden uit het geohydrologisch model REGIS II (in het geval van doorlatendheden). De betrouwbaarheid van deze waarden kan worden verhoogd door meer meetdata te gebruiken, die bij voorkeur afkomstig is uit het modelgebied. Het is daarbij van belang te bepalen tot welke stratigrafie en lithoklasse de meetmonsters behoren.
- Bij gebruik van de parameters in berekeningen wordt aanbevolen om meer gegevens in het voxelmodel op te nemen, zoals de spreiding of standaarddeviatie rond een parameterwaarde.
- Parameterwaarden zijn in het huidige model alleen toegekend op basis van de meest waarschijnlijke lithoklasse. Die is echter gebaseerd op 100 simulaties van lithoklassen in de afzonderlijke realisaties, die elk even waarschijnlijk zijn en waarbinnen een ruimtelijke samenhang bestaat. Om een beter beeld te krijgen van onzekerheid en variatie in parameterwaarden op een bepaalde locatie, kunnen ook deze 100 realisaties worden geparameteriseerd. Dit maakt het model geschikter voor (stochastische) berekeningen. Een alternatief hiervoor is het gebruiken van bijvoorbeeld de P10 en P90 van de parameterwaarden.
- Voor het bepalen van volumegewicht boven en onder de grondwaterspiegel is nu het gemiddelde van GHG en GLG gebruikt. Bij het evalueren van (of rekenen met) volumegewicht dient te worden nagegaan of dit inderdaad het grondwaterniveau is dat voor het betreffende faalmechanisme het meest van belang is. Daarnaast zou het beter zijn de grondwaterstand ten opzichte van NAP te berekenen met het maaiveld uit het grondwatermodel in plaats van dat uit het ondergrondmodel, omdat deze (licht) van elkaar kunnen afwijken.
- Volumegewicht varieert nog niet als functie van diepte. Wellicht is het interessant te bekijken of hier nog stappen in gemaakt kunnen en dienen te worden.

## 11 Referenties

Arcadis, 2015. Dijkversterking Centraal Holland: Toetsing A-Keringen, bijlage 4: eindrapport grond en laboratoriumonderzoek INPIJN.

Berendsen, H.J.A., Cohen, K.M., Stouthamer, E., 2001. Palaeogeographic development of the Rhine-Meuse delta, The Netherlands, Assen, Koninklijke Van Gorcum, 268 p. Basisbestand 2001 als beschikbaar via <https://easy.dans.knaw.nl/ui/datasets/id/easy-dataset:52125/tab/2>.

Berendsen, H.J.A., 2004. De vorming van het land. Serie: Fysische geografie van Nederland.

Bommer, J.J., Dost, B., Edwards, B., Kruiver, P.P., Meijers, P., Ntinalexis, M., Rodriguez-Marek, A., Ruigrok, E., Spetzler, J., Stafford, P.J., 2017. V4 Ground-Motion Model (GMM) for Response Spectral Accelerations, Peak Ground Velocity, and Significant Durations in the Groningen Field. Verkrijgbaar via de website [www.namplatform.nl](http://www.namplatform.nl).

Cohen, K.M., Stouthamer, E., 2012. Digitaal Basisbestand Paleogeografie van de Rijn-Maas Delta. DANS, <https://doi.org/10.17026/dans-x7g-sjtw>

Cohen, K.M., 2017. Laaglandgenese boringendatabase Universiteit Utrecht. DANS, <https://doi.org/10.17026/dans-zcv-knya>.

Erkens, G. 2009. Addendum 1. Geological sections across the Lower Rhine valley (Germany) and Rhine-Meuse delta (The Netherlands). Addendum to: Erkens G., 2009. Sediment dynamics in the Rhine catchment. Quantification of fluvial response to climate change and human impact. ISBN: 978-90-6809-431-2. Publisher: Utrecht University.

Fawcett, T., 2006. Introduction to ROC analysis. Pattern Recognition Letters. 27. 861-874. 10.1016/j.patrec.2005.10.010.

HDSR, 2019. [www.hdsr.nl](http://www.hdsr.nl)

Kadaster, 2013. TOP10NL, digitaal topografisch bestand - versie februari 2013. DANS. <https://doi.org/10.17026/dans-zdm-4b54>

Koster, K., Profittlich, M., van der Meer, M., Kars, H., 2012. Het nut van sonderen voor de Nederlandse archeologie. Archeobrief, Vol. 4, 22-26.

Dijkenkaart van Nederland, onderdeel van het boek Dijken van Nederland, LOLA Landscape Architects, Rijkswaterstaat, Voormalige ministeries VROM & LNV 2007, TU Delft, Esri Nederland

Mulder, E.F., 2003. De ondergrond van Nederland. Noordhoff Uitgevers B.V. EAN: 9789001605148.

Nohl, W., de Boer, E., 2008. Sonderingen breder bruikbaar door nieuwe presentatiewijze. Extra dimensie sondeergrafieken: classificatie van grondsoorten en -lagen. [http://info.fugro.nl/archief/2008\\_12/content.asp](http://info.fugro.nl/archief/2008_12/content.asp).

Oud Houten website: <https://www.oudhouten.nl/nieuwe-tijd/dijkdoorbraak-lekdijk/>

Robertson, P.K., 2010. Soil Behaviour Type from the CPT: An Update. 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, Vol. 2, 575-583.

Stafleu, J., Maljers, D., Busschers, F.S., Gunnink, J.L., Schokker, J., Dambrink, R.M., Hummelman, J.H. en Schijf, M.L., 2012. GeoTOP modellering, TNO-rapport TNO-2015-R10991, 214 p. Verkrijgbaar via DINOloket ([www.dinoloket.nl](http://www.dinoloket.nl)).

Stafleu, J., 2016. Productspecificatie Ondergrondmodel GeoTOP v1.3. TNO-rapport 2016-R10577, 55 p. Verkrijgbaar via DINOloket ([www.dinoloket.nl](http://www.dinoloket.nl)).

Stouthamer, E., Cohen, K.M. en Hoek, W.Z., 2015. De vorming van het land. Geologie en geomorfologie.

TNO, 2014a. Berekenen van de meest waarschijnlijke lithoklasse in GeoTOP. Verkrijgbaar via DINOloket ([www.dinoloket.nl](http://www.dinoloket.nl))

TNO, 2014b. Modelonzekerheid in GeoTOP. Verkrijgbaar via DINOloket ([www.dinoloket.nl](http://www.dinoloket.nl))

Van Maanen, P.P., Schokker, J., Harting, R., de Bruijn, R., 2017. Nationwide lithological interpretation of cone penetration tests using neural networks, 19th EGU General Assembly, Vienna, Austria.

Van Maanen, P.P., Harting, R., Schokker, J., Koster, K., *in preparation*. Geological Interpretation of Cone Penetration Test Data by Artificial Neural Networks to Model the Subsurface of the Netherlands in 3D.

Wojciechowski, M., 2011. Application of artificial neural network in soil parameter identification for deep excavation numerical model. Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences 18 (4), 303-311

## 12 Ondertekening

Utrecht, december 2019

TNO

Naam en paraaf tweede lezer



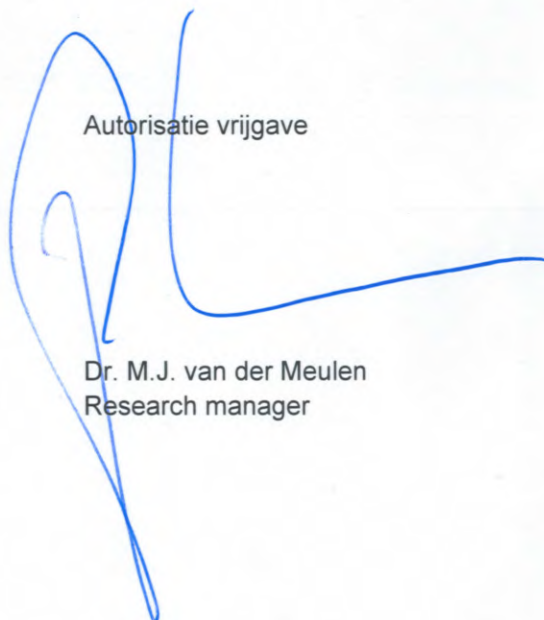
Dr. F. Busschers

Ondertekening



MSc. W. Dabekaussen  
Auteur

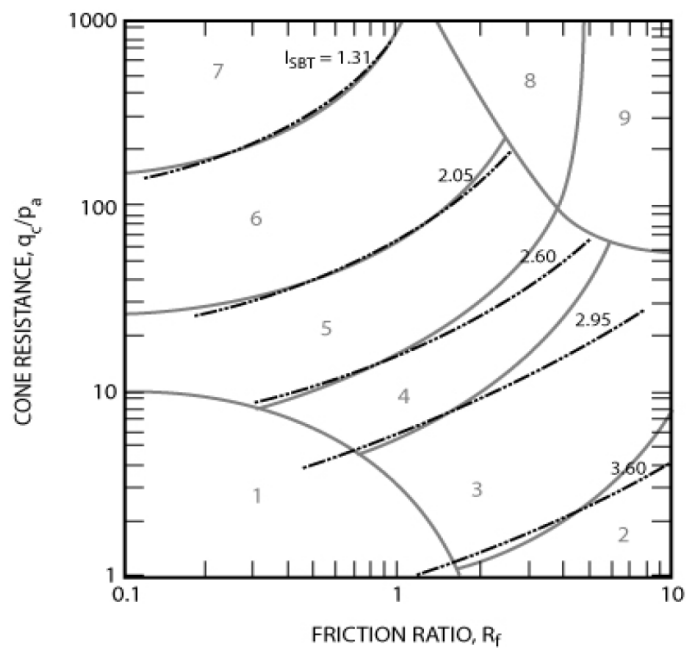
Autorisatie vrijgave



Dr. M.J. van der Meulen  
Research manager

## Bijlage A Robertson classificatiediagram

Deze bijlage bevat de formule van het aangepaste Robertson (2010) classificatiesysteem, welke is gebruikt om de sondeerwaarden om te zetten naar de Robertson 'soil behaviour type' zones en de lithoklassen van het GeoTOP model.



| Zone | Soil Behaviour Type (SBT)                          |
|------|----------------------------------------------------|
| 1    | <i>Sensitive fine-grained</i>                      |
| 2    | <i>Clay - organic soil</i>                         |
| 3    | <i>Clays: clay to silty clay</i>                   |
| 4    | <i>Silt mixtures: clayey silt &amp; silty clay</i> |
| 5    | <i>Sand mixtures: silty sand to sandy silt</i>     |
| 6    | <i>Sands: clean sands to silty sands</i>           |
| 7    | <i>Dense sand to gravelly sand</i>                 |
| 8    | <i>Stiff sand to clayey sand*</i>                  |
| 9    | <i>Stiff fine-grained*</i>                         |

\* Overconsolidated or cemented

Figuur A-1. Figuur uit Robertson (2010). Niet-genormaliseerde 'soil behaviour type' (SBT) diagram gebaseerd op een dimensieloze conus weerstand ( $q_c/p_a$ ) en wrijvingsgetal  $R_f$  met contourlijnen van de 'soil behaviour type' index  $I_{SBT}$ .

Het Robertson (2010) classificatie systeem is op een punt aangepast. Er is extra voorwaarde ingebracht om Holocene veen lagen beter te kunnen classificeren. Voor  $q_c < 1,5$  MPa en  $R_f > 5$  % wordt de grond als veen geclassificeerd.

De grenzen van de 'soil behaviour type' zones worden wiskundig zo goed mogelijk benaderd met onderstaande formule:

$$I_{SBT} = [(3.47 - \log(q_c/p_a))^2 + (\log(R_f) + 1.22)^2]^{0.5}$$

Waarin:

$q_c$  = gemeten conus weerstand

$p_a$  = atmosferische druk = 1 bar = 100 kPa = 0.1 MPa

$R_f$  = wrijvingsgetal =  $(f_s/q_c) \cdot 100\%$

$f_s$  = gemeten wrijvingsweerstand

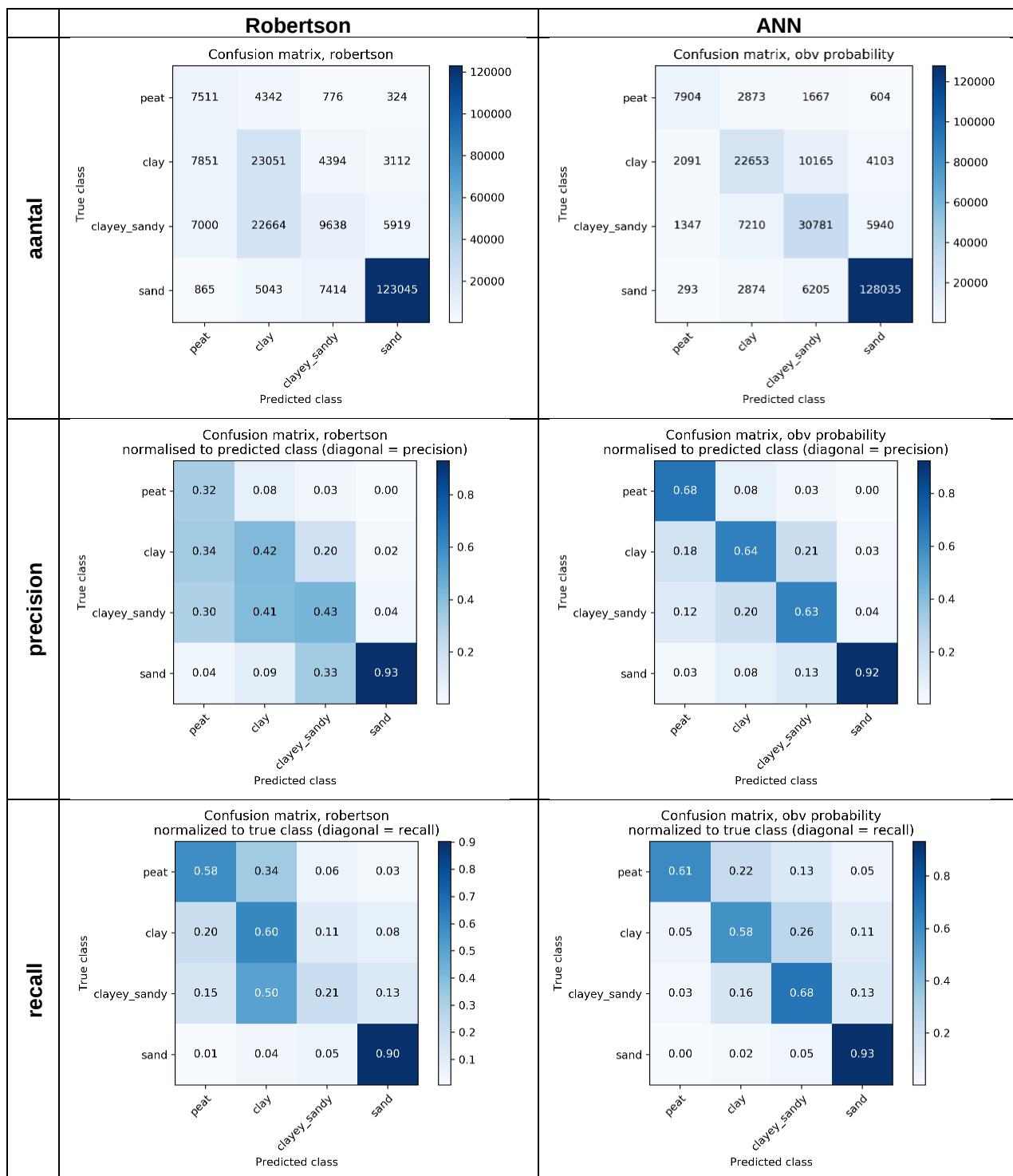
| <b>I<sub>SBT</sub> grens/contourlijn waarde</b> | <b>Robertson SBT Zone</b> | <b>GeoTOP lithoklasse</b> |
|-------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| <1.31                                           | 7                         | Zand                      |
| <2.05                                           | 6                         | Zand                      |
| <2.60                                           | 5                         | Zand                      |
| <2.95                                           | 4                         | Kleig zand / zandige klei |
| <3.60                                           | 3                         | Klei                      |
| >3.60                                           | 2                         | Veen                      |
| $q_c < 1,5 \text{ MPa}$ en $R_f > 5 \%$         | 2                         | Veen                      |

Tabel A-1. Correlatie tabel voor Robertson 'soil behaviour type' zones en GeoTOP lithoklassen.

## Bijlage B Validatie neuraal netwerk resultaten

Voor elke naar lithoklasse vertaalde sondeermeting in de trainingset kan worden bepaald in welke combinatie van de lithoklasse zoals beschreven in een boring (*true class*) en de lithoklasse zoals voorspeld door de classificatiemethode (*predicted class*) deze voorkomt. Visueel kan dit worden weergegeven in een confusion matrix. Voor classificatie met Robertson en een ANN geeft onderstaande matrix van confusion matrixen inzicht in de juistheid van classificatie (zie hoofdstuk 6.3 voor uitleg over de begrippen *precision* en *recall*), onderverdeeld in:

- het aantal metingen
- het aantal metingen genormaliseerd naar de voorspelling van de sonderingen (met de *precision* op de diagonaal)
- het aantal metingen genormaliseerd naar de lithoklasse zoals in de boring (met de *recall* op de diagonaal).



## Bijlage C Parameterwaarden volumegewicht

Onderstaande tabel bevat de parameterwaarden voor droog en nat volumegewicht. Daar waar geen HDSR-monsters beschikbaar waren, zijn waarden overgenomen van andere eenheden en uit Bommer et al., 2017.

| stratigrafie | lithoklasse               | droog | nat   | bron                 |
|--------------|---------------------------|-------|-------|----------------------|
| AAOP         | Antropogeen               | 5     | 5     | HDSR                 |
| EC1 en EC2   | Organisch (veen)          | 2.99  | 11.24 | o.b.v. monsters EC   |
|              | Klei                      | 10.98 | 16.63 | o.b.v. monsters EC   |
|              | Kleilig zand/zandige klei | 13.42 | 18.21 | o.b.v. monsters EC   |
|              | Fijn zand                 | 13.9  | 18.73 | o.b.v. monsters geul |
|              | Medium zand               | 14.84 | 18.93 | o.b.v. monsters EC   |
|              | Grof zand                 | 16.69 | 19.59 | o.b.v. monsters geul |
|              | Grind                     | 21    | 21    | Bommer et al., 2017  |
| EC-geulen    | Organisch (veen)          | 3.34  | 11.21 | o.b.v. monsters NIBA |
|              | Klei                      | 10.98 | 16.63 | o.b.v. monsters EC   |
|              | Kleilig zand/zandige klei | 13.42 | 18.21 | o.b.v. monsters EC   |
|              | Fijn zand                 | 13.9  | 18.73 | o.b.v. monsters geul |
|              | Medium zand               | 15.93 | 19.69 | o.b.v. monsters geul |
|              | Grof zand                 | 16.69 | 19.59 | o.b.v. monsters geul |
|              | Grind                     | 21    | 21    | Bommer et al., 2017  |
| NIHO         | Organisch (veen)          | 3.34  | 11.24 | o.b.v. monsters NIHO |
|              | Klei                      | 10.98 | 16.63 | o.b.v. monsters EC   |
|              | Kleilig zand/zandige klei | 13.42 | 18.21 | o.b.v. monsters EC   |
|              | Fijn zand                 | 13.9  | 18.73 | o.b.v. monsters geul |
|              | Medium zand               | 14.84 | 18.93 | o.b.v. monsters EC   |
|              | Grof zand                 | 16.69 | 19.59 | o.b.v. monsters geul |
|              | Grind                     | 21    | 21    | Bommer et al., 2017  |
| NIBA         | Organisch (veen)          | 3.34  | 11.21 | o.b.v. monsters NIBA |
|              | Klei                      | 4.7   | 12.5  | o.b.v. monsters NIBA |
|              | Kleilig zand/zandige klei | 13.42 | 18.21 | o.b.v. monsters EC   |
|              | Fijn zand                 | 13.9  | 18.73 | o.b.v. monsters geul |
|              | Medium zand               | 14.84 | 18.93 | o.b.v. monsters EC   |
|              | Grof zand                 | 16.69 | 19.59 | o.b.v. monsters geul |
|              | Grind                     | 21    | 21    | Bommer et al., 2017  |
| BXDE         | Organisch (veen)          | 11.4  | 11.4  | Bommer et al., 2017  |
|              | Klei                      | 14.4  | 14.4  | Bommer et al., 2017  |
|              | Kleilig zand/zandige klei | 16.9  | 16.9  | Bommer et al., 2017  |
|              | Fijn zand                 | 19.4  | 19.4  | Bommer et al., 2017  |
|              | Medium zand               | 21    | 21    | Bommer et al., 2017  |
|              | Grof zand                 | 21    | 21    | Bommer et al., 2017  |
|              | Grind                     | 21    | 21    | Bommer et al., 2017  |
| KRWY         | Organisch (veen)          | 3.34  | 10.8  | o.b.v. monsters KRWY |
|              | Klei                      | 10.45 | 16.23 | o.b.v. monsters KRWY |
|              | Kleilig zand/zandige klei | 11.13 | 16.67 | o.b.v. monsters KRWY |
|              | Fijn zand                 | 13.9  | 18.73 | o.b.v. monsters geul |
|              | Medium zand               | 16.67 | 20.1  | o.b.v. monsters EC   |
|              | Grof zand                 | 16.69 | 19.59 | o.b.v. monsters geul |
|              | Grind                     | 21    | 21    | Bommer et al., 2017  |

## Bijlage D Parameterwaarden doorlatendheid

Onderstaande tabel bevat de parameterwaarden voor horizontale en verticale doorlatendheid (resp. kh waarde en kv-waarde) zoals die zijn toegekend per stratigrafie-lithoklasse-combinatie. De waarden zijn afkomstig uit REGIS II.

| stratigrafie | lithoklasse              | kh waarde (m/d) | kv waarde (m/d) | ln kh  | ln kv  |
|--------------|--------------------------|-----------------|-----------------|--------|--------|
| AAOP         | Antropogeen              | 5               | 5               | 1.609  | 1.609  |
| EC1 en EC2   | Organisch (veen)         | 0.049           | 0.049           | -3.016 | -3.016 |
|              | Klei                     | 0.0046          | 0.0046          | -5.382 | -5.382 |
|              | Kleiig zand/zandige klei | 0.04            | 0.04            | -3.219 | -3.219 |
|              | Fijn zand                | 4.4             | 4.4             | 1.482  | 1.482  |
|              | Medium zand              | 11.5            | 11.5            | 2.442  | 2.442  |
|              | Grof zand                | 29.5            | 29.5            | 3.384  | 3.384  |
|              | Grind                    | 85              | 85              | 4.443  | 4.443  |
| EC-geulen    | Organisch (veen)         | 0.049           | 0.049           | -3.016 | -3.016 |
|              | Klei                     | 0.0046          | 0.0046          | -5.382 | -5.382 |
|              | Kleiig zand/zandige klei | 0.04            | 0.004           | -3.219 | -5.521 |
|              | Fijn zand                | 4.4             | 0.44            | 1.482  | -0.821 |
|              | Medium zand              | 16.2            | 3.2             | 2.785  | 1.163  |
|              | Grof zand                | 21.6            | 10.8            | 3.073  | 2.380  |
|              | Grind                    | 85              | 85              | 4.443  | 4.443  |
| NIHO         | Organisch (veen)         | 0.25            | 0.25            | -1.386 | -1.386 |
|              | Klei                     | 0.00291         | 0.00291         | -5.840 | -5.840 |
|              | Kleiig zand/zandige klei | 0.0525          | 0.0525          | -2.947 | -2.947 |
|              | Fijn zand                | 0.74            | 0.52            | -0.301 | -0.654 |
|              | Medium zand              | 6.29            | 4.4             | 1.839  | 1.482  |
|              | Grof zand                | 24.2            | 17              | 3.186  | 2.833  |
|              | Grind                    | 85              | 85              | 4.443  | 4.443  |
| NIBA         | Organisch (veen)         | 0.0004          | 0.0004          | -7.824 | -7.824 |
|              | Klei                     | 0.0046          | 0.0046          | -5.382 | -5.382 |
|              | Kleiig zand/zandige klei | 0.0314          | 0.0314          | -3.461 | -3.461 |
|              | Fijn zand                | 0.71            | 0.5             | -0.342 | -0.693 |
|              | Medium zand              | 11.5            | 11.5            | 2.442  | 2.442  |
|              | Grof zand                | 29.5            | 29.5            | 3.384  | 3.384  |
|              | Grind                    | 85              | 85              | 4.443  | 4.443  |
| BXDE         | Organisch (veen)         | 0.049           | 0.049           | -3.016 | -3.016 |
|              | Klei                     | 0.0046          | 0.0046          | -5.382 | -5.382 |
|              | Kleiig zand/zandige klei | 0.04            | 0.004           | -3.219 | -5.521 |
|              | Fijn zand                | 4.4             | 0.44            | 1.482  | -0.821 |
|              | Medium zand              | 16.2            | 3.2             | 2.785  | 1.163  |
|              | Grof zand                | 21.6            | 10.8            | 3.073  | 2.380  |
|              | Grind                    | 85              | 85              | 4.443  | 4.443  |
| KRWY         | Organisch (veen)         | 0.049           | 0.049           | -3.016 | -3.016 |
|              | Klei                     | 0.0046          | 0.0046          | -5.382 | -5.382 |
|              | Kleiig zand/zandige klei | 0.04            | 0.02            | -3.219 | -3.912 |
|              | Fijn zand                | 4.4             | 4.4             | 1.482  | 1.482  |
|              | Medium zand              | 13.2            | 13.2            | 2.580  | 2.580  |
|              | Grof zand                | 58.8            | 58.8            | 4.074  | 4.074  |
|              | Grind                    | 85              | 85              | 4.443  | 4.443  |

## Bijlage E Legenda-eenheden

Onderstaande legenda's bevatten de officiële coderingen en kleuren voor de eenheden in het ondergrondmodel voor de Lekdijk. Deze komen overeen met de kleuren die in GeoTOP gebruikt worden.

Tabel E.-1 . Lijst met stratigrafische eenheden in het model.

| Naam                                        | Code | Nummer in voxelmodel | R   | G   | B   | Kleur |
|---------------------------------------------|------|----------------------|-----|-----|-----|-------|
| Antropogeen                                 | AAOP | 1000                 | 200 | 200 | 200 |       |
| Fm van Echteld ( <i>boven Hollandveen</i> ) | EC1  | 1070                 | 170 | 255 | 245 |       |
| Fm van Echteld, geulgeneratie A             | ECga | 6000                 | 118 | 147 | 60  |       |
| Fm van Echteld, geulgeneratie B             | ECgb | 6100                 | 102 | 205 | 171 |       |
| Fm van Nieuwkoop, Hollandveen Laagpakket    | NIHO | 1090                 | 208 | 130 | 40  |       |
| Fm van Echteld, geulgeneratie C             | ECgc | 6200                 | 170 | 196 | 255 |       |
| Fm van Echteld, geulgeneratie D             | ECgd | 6300                 | 102 | 153 | 205 |       |
| Fm van Echteld, geulgeneratie E             | ECge | 6400                 | 27  | 101 | 175 |       |
| Fm van Echteld ( <i>onder Hollandveen</i> ) | EC2  | 2010                 | 170 | 255 | 245 |       |
| Fm van Nieuwkoop, Basisveen Laag            | NIBA | 1030                 | 152 | 47  | 10  |       |
| Fm van Bostel, Laagpakket van Delwijnen     | BXDE | 3045                 | 245 | 205 | 100 |       |
| Fm van Kreftenheye, Laag van Wijchen        | KRWY | 4000                 | 86  | 0   | 0   |       |

Tabel E. -1. Lithoklassen onderscheiden in het model.

| Naam                              | Code | Nummer in voxelmodel | Korrelgrootte(mediaan)                        | R   | G   | B   | Kleur |
|-----------------------------------|------|----------------------|-----------------------------------------------|-----|-----|-----|-------|
| Antropogeen                       | A    | 0                    | -                                             | 200 | 200 | 200 |       |
| Organisch materiaal (veen)        | V    | 1                    | -                                             | 157 | 78  | 64  |       |
| Klei                              | K    | 2                    | -                                             | 0   | 146 | 0   |       |
| Kleiig zand, zandige klei en leem | KZ   | 3                    | -                                             | 194 | 207 | 92  |       |
| Fijn zand                         | ZF   | 5                    | $\geq 63 \mu\text{m}$ en $< 150 \mu\text{m}$  | 255 | 255 | 0   |       |
| Midden zand                       | ZM   | 6                    | $\geq 150 \mu\text{m}$ en $< 300 \mu\text{m}$ | 243 | 225 | 6   |       |
| Grof zand                         | ZG   | 7                    | $\geq 300 \mu\text{m}$                        | 231 | 195 | 22  |       |