

**TNO-rapport****TNO 2019 R11655****Totstandkomingsrapport GeoTOP****Energy**Princetonlaan 6  
3584 CB Utrecht  
Postbus 80015  
3508 TA Utrecht[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

T +31 88 866 42 56

Datum 3 december 2019

Auteur(s) Jan Stafleu  
Denise Maljers  
Freek Busschers  
Jan Gunnink  
Jeroen Schokker  
Jan Hummelman

Aantal pagina's 132

Aantal bijlagen -

Opdrachtgever De directeur Geologische Dienst Nederland

Projectnaam GIP Ondiepe Modelling 2019

Projectnummer 060.38609

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

# Inhoudsopgave

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| <b>1</b> | <b>Inleiding</b> .....   | <b>3</b>   |
| 1.1      | Doel van het rapport .....   | 3          |
| 1.2      | Leeswijzer .....   | 3          |
| 1.3      | Gerelateerde documenten .....  | 3          |
| 1.4      | Modellen in de Basisregistratie Ondergrond .....                           | 4          |
| <b>2</b> | <b>Algemene beschrijving van het model</b> .....                           | <b>6</b>   |
| 2.1      | Het model GeoTOP .....   | 6          |
| 2.2      | Dekkingsgebied en modelgebieden .....                                      | 9          |
| 2.3      | Modelonzekerheden .....  | 11         |
| 2.4      | Doel, gebruik en beperkingen.....  | 14         |
| <b>3</b> | <b>Uitgangspunten en randvoorwaarden, richtlijnen en standaarden</b> ..... | <b>17</b>  |
| 3.1      | Uitgangspunten en randvoorwaarden .....                                    | 17         |
| 3.2      | Richtlijnen en standaarden .....   | 18         |
| 3.3      | Software.....  | 19         |
| <b>4</b> | <b>Brongegevens</b> .....  | <b>20</b>  |
| 4.1      | Inleiding .....  | 20         |
| 4.2      | Boorbeschrijvingen DINO .....  | 20         |
| 4.3      | Geologische Kaart van de Ondiepe Ondergrond .....                          | 26         |
| 4.4      | DGM.....   | 29         |
| 4.5      | REGIS II.....  | 34         |
| 4.6      | Breuken .....  | 34         |
| 4.7      | Actueel Hoogtebestand Nederland.....                                       | 36         |
| 4.8      | Maaiveld- en waterbodemoogten .....  | 37         |
| 4.9      | Diepste bathymetrie van de Waddenzee .....                                 | 38         |
| 4.10     | Bodemkaart van Nederland (BKN) .....                                       | 38         |
| 4.11     | Geomorfologische Kaart van Nederland (GKN) .....                           | 39         |
| 4.12     | Landelijk Grondgebruik Nederland .....                                     | 40         |
| 4.13     | Veencontourkaart en verdwenen veen.....                                    | 42         |
| 4.14     | Topografische kaart.....   | 42         |
| 4.15     | Luchtfoto's .....  | 43         |
| 4.16     | Lithostratigrafische Nomenclator Ondiepe Ondergrond .....                  | 44         |
| <b>5</b> | <b>Procesbeschrijving algemeen</b> .....                                   | <b>46</b>  |
| 5.1      | Inleiding .....  | 46         |
| 5.2      | Datavoorbereiding .....  | 47         |
| 5.3      | Interpretatie.....   | 58         |
| 5.4      | Lagenmodellering .....   | 68         |
| 5.5      | Voxelmodellering .....   | 83         |
| 5.6      | Publicatie .....   | 116        |
| <b>6</b> | <b>Literatuuropgave</b> .....  | <b>130</b> |
| <b>7</b> | <b>Ondertekening</b> .....   | <b>132</b> |

# 1 Inleiding

## 1.1 Doel van het rapport

Dit rapport geeft een gedetailleerde beschrijving van de totstandkoming van het GeoTOP: het beschrijft wat GeoTOP is, op welke brongegevens het is gebaseerd en hoe het gemaakt wordt. Het rapport beperkt zicht tot de totstandkoming van de twee delen (modelgebieden) van het model die het voor de BRO ontwikkelde kwaliteitstoetsingsproces hebben doorlopen. Op hoofdlijnen is de totstandkoming van de vijf oudere modelgebieden die dit kwaliteitstoetsingsproces niet hebben doorlopen echter gelijk.

## 1.2 Leeswijzer

Het rapport start na deze inleiding met een algemene beschrijving van het model gevolgd door een beschrijving van de verschillende onderdelen ervan: geïnterpreteerde boringen, het lagenmodel met toppen en basissen van geologische eenheden en het voxelmodel met geologische en lithologische kenmerken (hoofdstuk 2). In dit hoofdstuk staat ook versie informatie en informatie over het actuele dekkingsgebied van GeoTOP.

Hoofdstuk 3 geeft een overzicht van de belangrijkste uitgangspunten en randvoorwaarden die bij de modellering gehanteerd worden. Vervolgens wordt in hoofdstuk 4 een overzicht gegeven van de bij GeoTOP betrokken brongegevens. Hoofdstuk 5 beslaat het grootste deel van het rapport en geeft een gedetailleerde beschrijving van het proces waarmee GeoTOP wordt gemaakt. Dit proces bestaat uit 5 werkprocessen: 1) Datavoorbereiding; 2) Interpretatie; 3) Lagenmodellering; 4) Voxelmodellering en 5) Publicatie. Bijzonderheden in het maakproces voor specifieke geologische eenheden of modelgebieden worden beschreven in hoofdstuk 6 Detailleringen.

## 1.3 Gerelateerde documenten

De modelgegevens die door de werkprocessen worden gemaakt en door werkproces Publicatie worden uitgeleverd zijn gedefinieerd in de *Gegevenscatalogus BRO GeoTOP model*.

Een voorloper van dit document is het *Rapport GeoTOP modellering* (Stafleu et al., 2012) dat GeoTOP gedetailleerd beschrijft en daarnaast een overzicht geeft van de uit GeoTOP afgeleide producten die (vrijwel) direct toepasbaar zijn bij het analyseren en oplossen van ondergrondvraagstukken. Het rapport is verkrijgbaar via DINOloket.

Een wetenschappelijke publicatie over GeoTOP behandelt het modelgebied Zeeland en gaat o.a. uitvoerig in op de gebruikte stochastische interpolatietechnieken (Stafleu et al., 2011). Ook deze publicatie is verkrijgbaar via DINOloket.

Andere, met GeoTOP verwante ondergrondmodellen van TNO – Geologische Dienst Nederland zijn DGM (Gunnink et al., 2013), REGIS II (Vernes & van Doorn,

2005) en Delfstoffen Online (Van der Meulen et al., 2005). Een vergelijking tussen GeoTOP en Delfstoffen Online is te vinden in Maljers et al. (2015).

#### 1.4 Modellen in de Basisregistratie Ondergrond

GeoTOP is een van de vijf registratieobjecten in het domein *modellen*. Het gaat in dit domein om schattingen of voorspellingen van de opbouw en eigenschappen van de bodem of ondergrond in twee of drie dimensies. Modellen zijn sterk afhankelijk van de hoeveelheid en kwaliteit van de beschikbare ondergrondgegevens zoals boormonsterbeschrijvingen. De kwaliteit van de modellen zal daarom toenemen naarmate er meer voor de modellering bruikbare ondergrondgegevens in de BRO beschikbaar komen.

Naast GeoTOP omvat het domein *modellen* nog vier registratieobjecten, die elk behoren tot een van de in de wet onderkende typen (Tabel 1.4.1).

Tabel 1.4.1: De vijf registratieobjecten in het domein modellen.

| Model                                      | Type                      | Dimensies |
|--|---------------------------|-----------|
| Geomorfologische Kaart van Nederland (GKN) | Geomorfologische modellen | 2D        |
| Bodemkaart van Nederland (BKN)             | Bodemkundige modellen     | 2D        |
| Digitaal Geologisch Model (DGM)            | Geologische modellen      | 3D        |
| REGIS II                                   | Hydrogeologische modellen | 3D        |
| GeoTOP                                     | Geologische modellen      | 3D        |

De Geomorfologische Kaart van Nederland (GKN) is een tweedimensionaal vectormodel met informatie over reliëf, ontstaanswijze en ouderdom van landschapsvormen in Nederland. Daarnaast geeft de kaart aanvullende informatie over afwijkende geologische afzettingen in de bovengrond, eventuele bijzonderheden in het reliëf en beschrijft of de landvorm onder invloed staat van actieve geomorfologische processen zoals stuivende kust- en landduinen en sedimentatie en erosie in en langs de grote rivieren en op slikken en schorren.

De Bodemkaart van Nederland (BKN) is een tweedimensionaal vectormodel van de in Nederland voorkomende bodems. Het model geeft ruimtelijke informatie over de bodemopbouw tot globaal 1 m diepte. Aan elke bodemeenheid zijn eigenschappen gekoppeld. Dit zijn de textuur, het organisch stofgehalte en een aantal andere attributen die tezamen het bodemtype bepalen.

Het Digitaal Geologisch Model (DGM) is een driedimensionaal lagenmodel van de Nederlandse ondergrond tot een diepte van ongeveer 500 m onder NAP, met lokaal uitschieters tot 1200 m. De bodemlagen in dit deel van de ondergrond bestaan hoofdzakelijk uit onverharde sedimenten, waarin de grondsoorten klei, zand, grind en veen voorkomen. De lagen worden op basis van verschillen in lithologie en andere eigenschappen ingedeeld in lithostratigrafische eenheden. DGM is een model van de opbouw en de samenhang (geometrie) van deze lithostratigrafische eenheden. De diepteligging van de onder- en bovenkant en de dikte van de eenheden worden vastgelegd in gridbestanden (rasters) met een celgrootte van 100 bij 100 m. Behalve de laaginformatie bevat DGM ook de geïnterpreteerde boormonsterprofielen die bij het maken van het model gebruikt zijn.



REGIS II is een driedimensionaal lagenmodel van de goed doorlatende en slecht doorlatende lagen in de ondergrond, tot een gemiddelde diepte van ca. 500 m onder NAP, met lokaal uitschieters tot 1200 m. Goed doorlatende en slecht doorlatende lagen worden in REGIS II hydrogeologische eenheden genoemd; dit zijn lagen met min of meer uniforme hydraulische eigenschappen. De hydrogeologische eenheden vallen samen met, of zijn onderdeel van, de in DGM onderscheiden lithostratigrafische eenheden. De diepteligging van de onder- en bovenkant en de dikte van de eenheden worden vastgelegd in gridbestanden (rasters) met een celgrootte van 100 bij 100 m. Naast de geometrische gegevens bevat het model voor elke eenheid ook gegevens over de doorlatendheid. Tot slot bevat REGIS II ook de geïnterpreteerde boormonsterprofielen die bij het maken van het model gebruikt zijn.

## 2 Algemene beschrijving van het model

### 2.1 Het model GeoTOP

GeoTOP is een registratieobject in het domein modellen. Het gaat in dit domein om schattingen of voorspellingen van de opbouw en eigenschappen van de bodem of ondergrond in twee of drie dimensies.

GeoTOP is een driedimensionaal 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 driedimensionaal grid (raster) van aaneengesloten voxels (volumezellen) van 100 x 100 m in de horizontale richtingen en 0,5 m in de verticaal. Aan elke voxel zijn 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.

De termen lithostratigrafie, geologische eenheid en lithoklasse worden hieronder toegelicht:

- **Lithostratigrafie** is de indeling van de ondergrond in formaties (de fundamentele lithostratigrafische eenheid), die op hun beurt kunnen worden onderverdeeld in laagpakketten en lagen. Opeenvolgende formaties kunnen worden ingedeeld in groepen en opeenvolgende groepen in supergroepen. Formaties, laagpakketten en lagen worden gedefinieerd op basis van onderscheidende lithologische kenmerken (uit welke materialen bestaat de eenheid en hoe onderscheidt de eenheid zich in dat opzicht van onder- en bovenliggende eenheden?). Verder is de ruimtelijke relatie met andere eenheden onderdeel van de definitie: meerdere formaties kunnen vergelijkbare of gelijke kenmerken hebben, maar als ze gescheiden zijn toch individueel benoemd worden. Formaties en onderdelen daarvan moeten karteerbaar zijn, wat wil zeggen (1) dat de basis en top moeten kunnen worden herkend (bijvoorbeeld in een boring of ontsluiting), en (2) dat ze kunnen worden gerepresenteerd op de kaart of in het model naar keuze. Dit laatste hangt voornamelijk samen met schaal. Groepen en supergroepen zijn als samenstellingen van formaties uiteraard per definitie karteerbaar. Een geologische kaart of een geologisch model is de ruimtelijke uitwerking van deze criteria, het schaalt lithostratigrafisch geïnterpreteerde gegevens op naar het voorkomen van de eenheid in respectievelijk twee of drie dimensies. Nederlandse Lithostratigrafische eenheden worden formeel gedefinieerd in de [Stratigrafische Nomenclator van de Ondiepe Ondergrond van Nederland](#). In het geval van formeel gedefinieerde eenheden wordt Formatie, Laagpakket, Laag, Groep of Supergroep met een hoofdletter geschreven.
- In GeoTOP wordt de term **geologische eenheid** gebruikt in plaats van lithostratigrafische eenheid omdat niet elke eenheid in het model één-op-

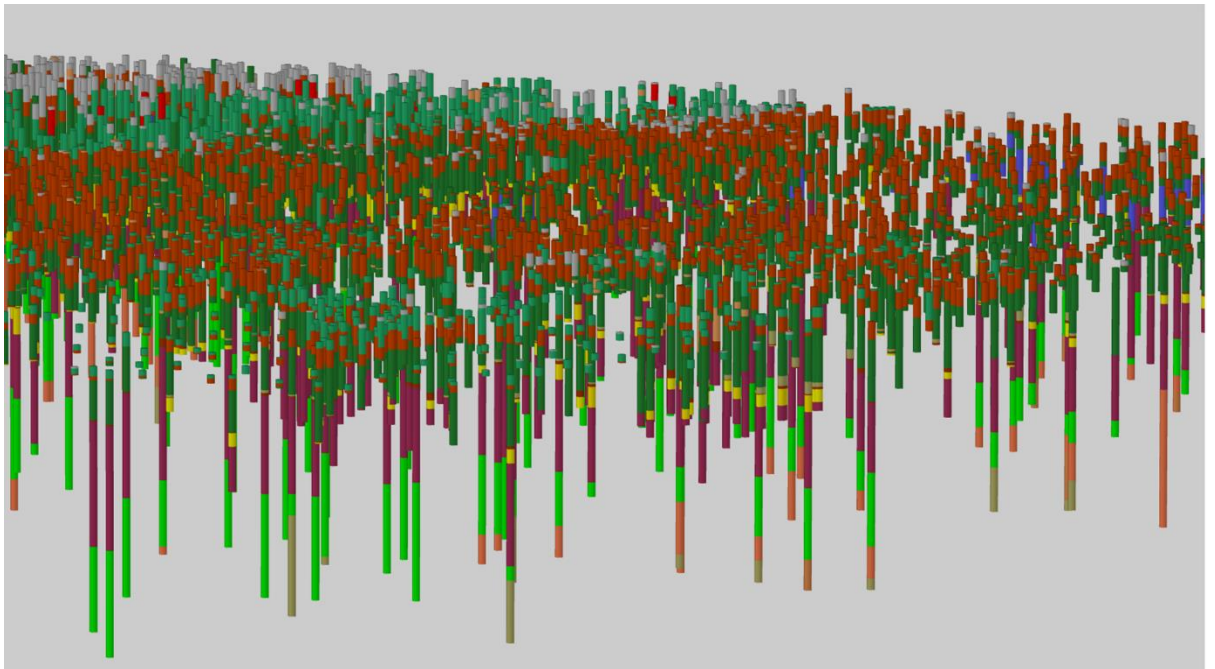
één overeenkomt met een lithostratigrafische eenheid volgens de Nomenclator. Het kan namelijk voor de modellering nodig zijn om twee of meer lithostratigrafische eenheden samen te nemen tot één geologische eenheid. De tegenovergestelde situatie, waar een lithostratigrafische eenheid wordt gesplitst in een of meerdere geologische eenheden komt ook voor.

- Lithologische kenmerken worden in GeoTOP weergegeven door middel van **lithoklassen**, waarin lithologie (grondsoort) en zandkorrelgrootteklassen zijn gecombineerd in één classificatie.

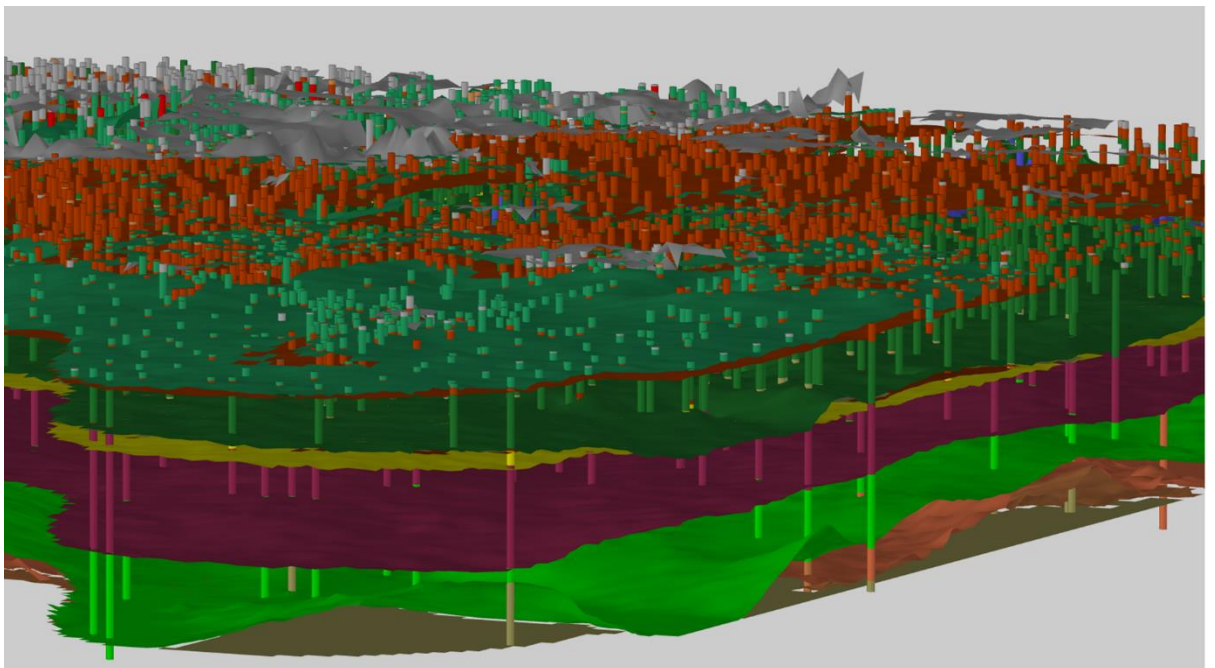
GeoTOP bestaat uit de volgende in de BRO opgenomen producten die ontstaan uit een gestandaardiseerd werkproces:

- De interpretatie van de boormonsterbeschrijvingen in **geologische eenheden** en in **lithoklassen**. 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.

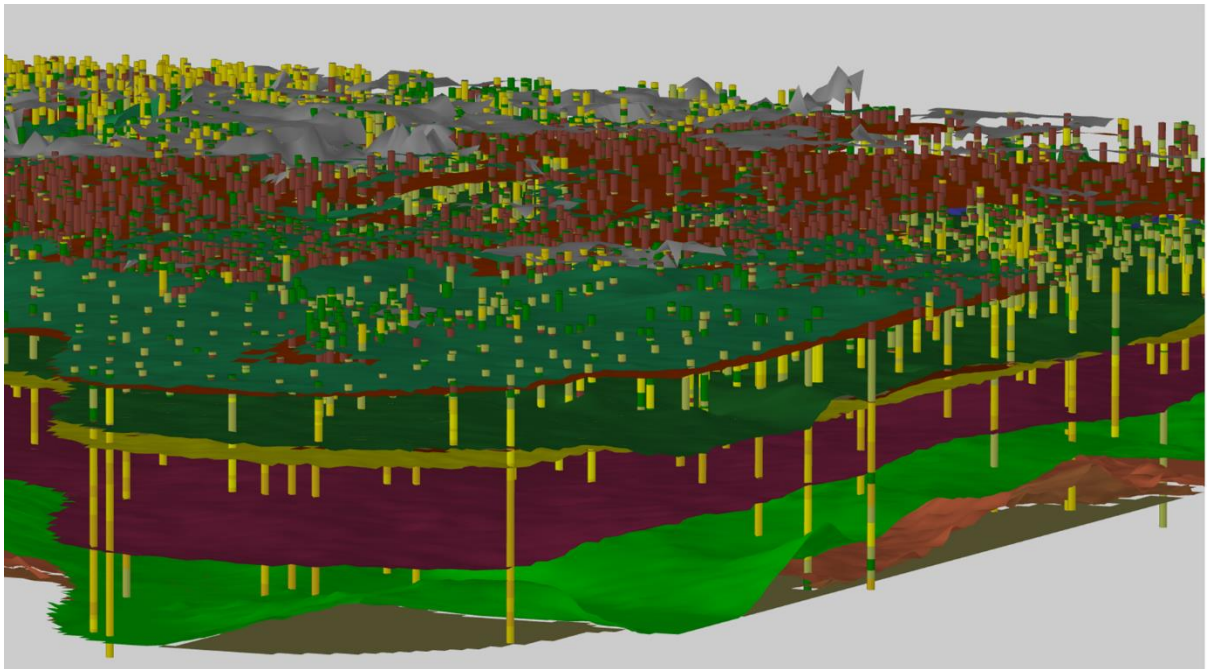
De onderlinge samenhang van de in de BRO opgenomen geïnterpreteerde boormonsterbeschrijvingen, lagenmodel en voxelmodel is geïllustreerd in Figuur 2.1.1 – 2.1.4.



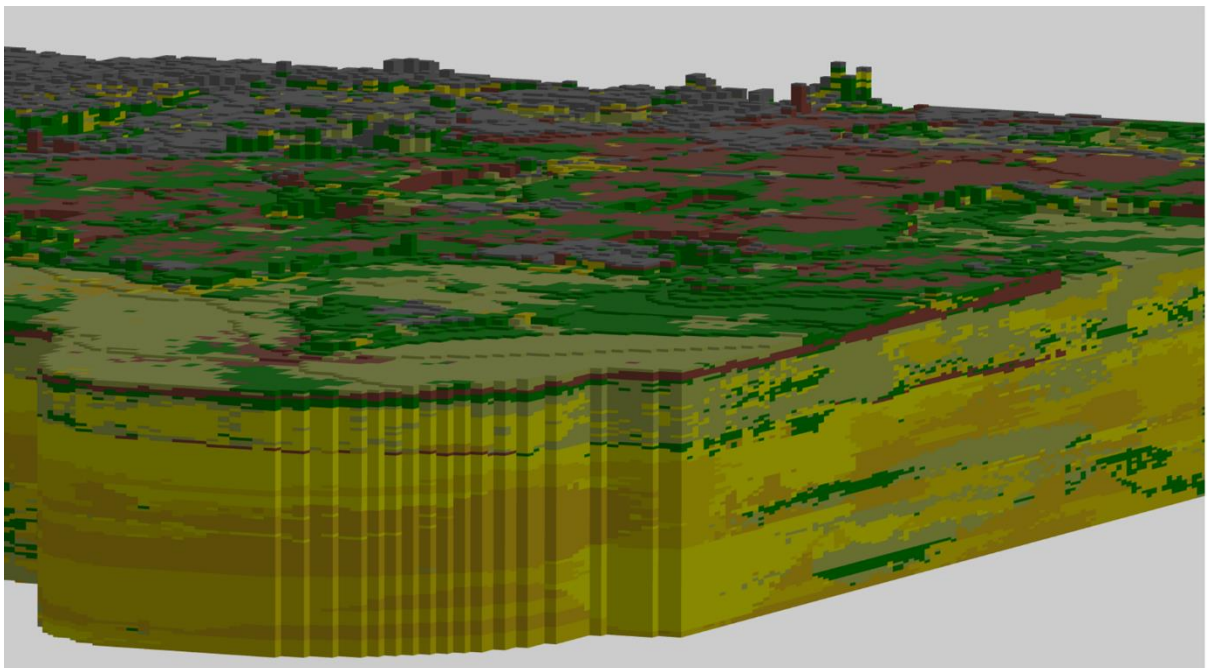
Figuur 2.1.1: 3D weergave van boormonsterbeschrijvingen waarbij de kleuren verschillende geologische eenheden weergeven.



Figuur 2.1.2: 3D weergave van een lagenmodel gebaseerd op de geïnterpreteerde boormonsterbeschrijvingen van Figuur 2.1.1 Van het lagenmodel zijn alleen de basisvlakken weergegeven. Elk basisvlak is het resultaat van een ruimtelijke interpolatie van de in de boormonsterbeschrijvingen aangetroffen basissen van de betreffende geologische eenheid.



Figuur 2.1.3: 3D weergave van het lagenmodel van Figuur 2.1.2 waarbij de kleuren in de boormonsterbeschrijvingen nu de lithoklasse weergeven.



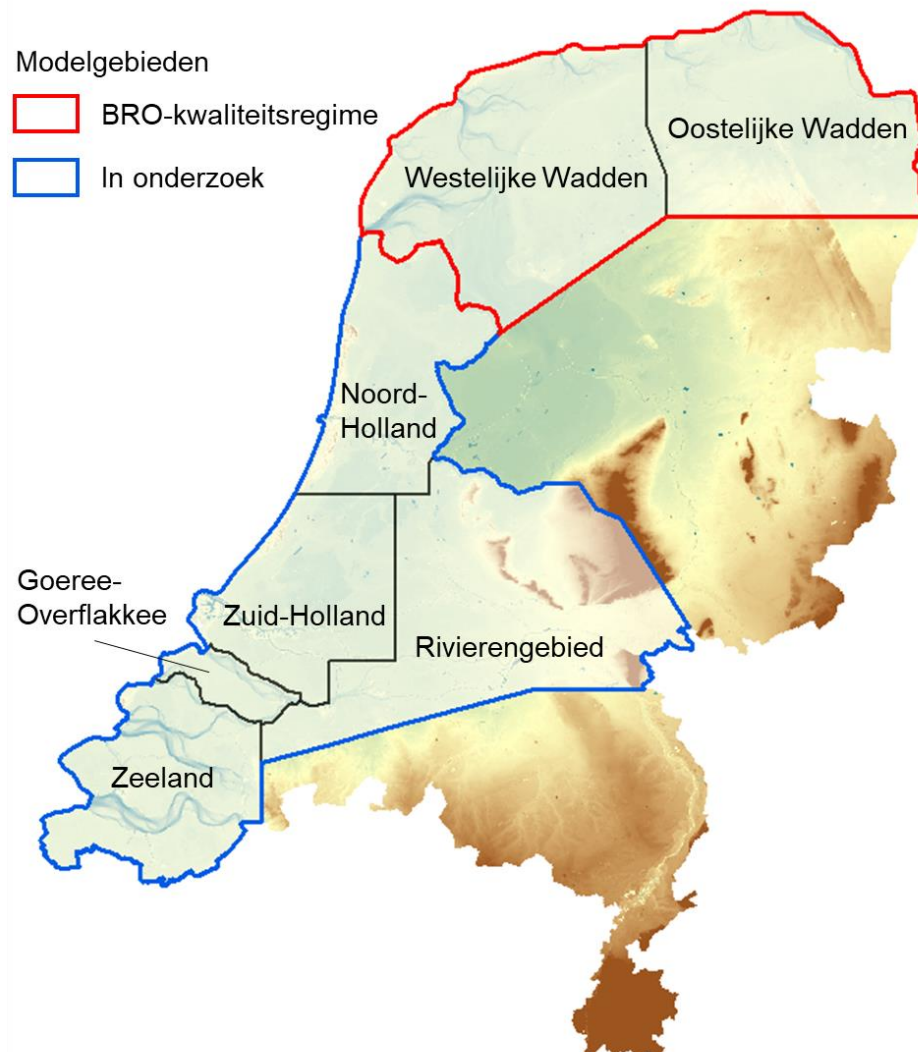
Figuur 2.1.4: 3D weergave van een voxelmodel waarbij de kleuren van de voxels de lithoklasse weergeven. De lithoklasse indeling in de voxels is het resultaat van een ruimtelijke interpolatie van de lithoklassen in de geïnterpreteerde boormonsterbeschrijvingen binnen de verschillende geologische eenheden.

## 2.2 Dekkingsgebied en modelgebieden

Een belangrijk aspect van GeoTOP is dat het is opgedeeld in **modelgebieden**. GeoTOP wordt niet in één keer landelijk samengesteld maar regio-gewijs ontwikkeld. Ultimo 2019 bestreek GeoTOP circa 57% van het vasteland van



Nederland verdeeld over zeven modelgebieden (Figuur 2.2.1). Van deze modelgebieden hebben er twee het voor de BRO ontwikkelde kwaliteitstoetsingsproces doorlopen, dit zijn de modelgebieden *Westelijke Wadden* en *Oostelijke Wadden* die tezamen circa 23% van Nederland beslaan. Voor bestuursorganen geldt voor deze modelgebieden verplicht gebruik en een terugmeldingsplicht. De overige vijf modelgebieden hebben dit kwaliteitstoetsingsproces niet doorlopen, waardoor de kwaliteit van deze 'historische' modelgebieden minder goed bekend is. Het betreft de modelgebieden *Zeeland*, *Goeree-Overflakkee*, *Zuid-Holland*, *Rivierengebied* en *Noord-Holland*. Deze modelgebieden zijn in hun geheel "in onderzoek" geplaatst waardoor het verplicht gebruik en de terugmeldingsplicht vervallen. In de jaren na 2019 zullen de 'historische' modelgebieden worden verbeterd en aan het voor de BRO ontwikkelde kwaliteitstoets-proces worden onderworpen. Daarnaast zullen er nieuwe modelgebieden aan de BRO worden toegevoegd zodat GeoTOP uiteindelijk het hele vasteland van Nederland, inclusief de grote wateren zoals bijvoorbeeld het IJsselmeer, de Waddenzee en de Westerschelde, zal bestrijken.



Figuur 2.2.1: De zeven modelgebieden van GeoTOP v1.3 (stand ultimo 2019) waarvan er twee, namelijk Westelijke Wadden en Oostelijke Wadden, het voor de BRO ontwikkelde kwaliteitstoetsing-proces hebben doorlopen. De kleuren geven de hoogteligging van maaiveld en waterbodem weer.

Op GeoTOP is **versiebeheer** van toepassing. Het versiebeheer geldt zowel voor individuele modelgebieden als voor GeoTOP als geheel. De in de BRO uitgeleverde actuele versie van GeoTOP omvat alle op dat moment actuele modelgebieden.

Tabel 2.2.1 geeft de samenstelling van de huidige versie van het GeoTOP model weer.

Tabel 2.2.1: De samenstelling van GeoTOP v1.3 in zeven modelgebieden.

| Model  | Versie | Modelgebied        | Versie | Jaar van oplevering | BRO-kwaliteitsregime? |
|--------|--------|--------------------|--------|---------------------|-----------------------|
| GeoTOP | v1.3   | Westelijke Wadden  | v1.0   | 2014                | Ja                    |
|        |        | Oostelijke Wadden  | v1.0   | 2016                | Ja                    |
|        |        | Zeeland            | v1.2   | 2008                | Nee                   |
|        |        | Goeree-Overflakkee | v1.1   | 2008                | Nee                   |
|        |        | Zuid-Holland       | v1.1   | 2009                | Nee                   |
|        |        | Noord-Holland      | v1.0   | 2011                | Nee                   |
|        |        | Rivierengebied     | v1.0   | 2011                | Nee                   |

## 2.3 Modelonzekerheden

### 2.3.1 Onzekerheid

De belangrijkste gegevensbron voor GeoTOP zijn boormonsterbeschrijvingen. Elk van deze boormonsterbeschrijvingen geeft vaak gedetailleerde informatie over de opbouw van de ondergrond op één specifieke locatie. Voor het overgrote deel van de gridcellen en voxels geldt echter dat ze niet doorboord zijn. Dit betekent dat we een schatting moeten doen op basis van de in de omgeving van de gridcel of voxel aanwezige boormonsterbeschrijvingen. Hoe goed het model hiertoe in staat is, is onder andere afhankelijk van:

- de geologische complexiteit (de lithoklasse van een homogeen samengestelde eenheid is beter te schatten dan die van een heterogeen samengestelde eenheid);
- de hoeveelheid en de kwaliteit van de boormonsterprofielen in de omgeving van de gridcel of voxel;
- de aan het model opgelegde randvoorwaarden zoals verbreidingsgrenzen van geologische eenheden;
- het gebruikte algoritme met de bijbehorende parameters zoals de gehanteerde ruimtelijke correlatiefunctie.

Alle maatstaven van onzekerheid in GeoTOP zijn gebaseerd op de in het model gebruikte (stochastische) interpolatietechnieken. Het is belangrijk om te beseffen dat deze technieken niet expliciet rekening houden met de onzekerheidsmarges in de gebruikte brongegevens (waaronder de boormonsterbeschrijvingen). In GeoTOP spreken we daarom van *modelonzekerheid* in plaats van *onzekerheid*.

### 2.3.2 Standaarddeviaties in het lagenmodel

Van elke gemodelleerde geologische eenheid in het lagenmodel is van zowel de top als de basis een standaarddeviatieraster berekend. Deze rasters geven voor elke rastercel de modelonzekerheid weer, uitgedrukt in de standaarddeviatie (in m) van de door het model geschatte, meest waarschijnlijke diepteligging van de

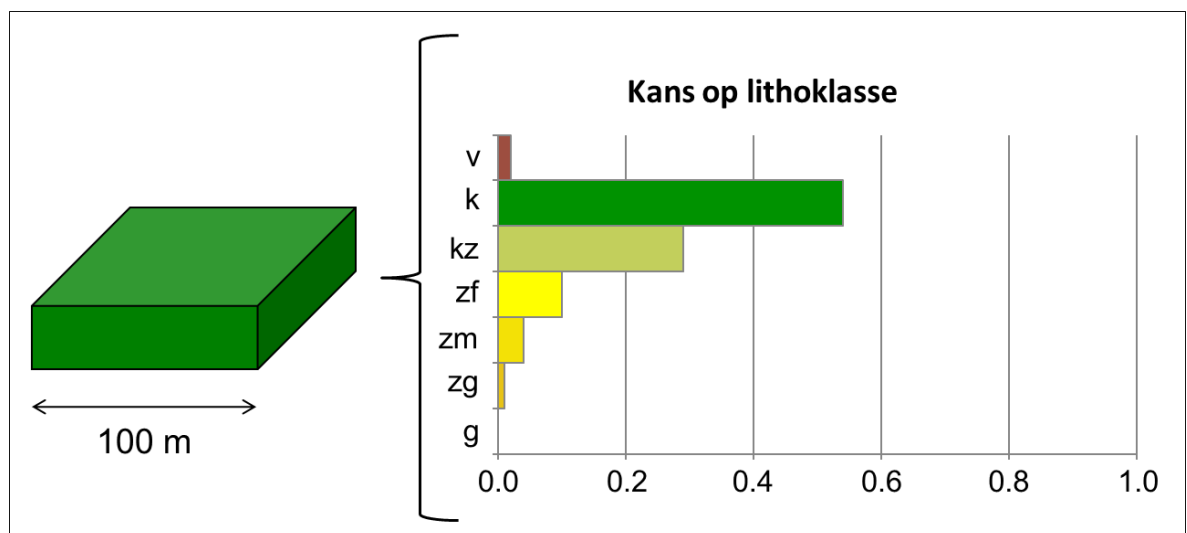
gemodelleerde top en basis van de geologische eenheid. Met de standaarddeviatie is het mogelijk om de kans te bepalen dat de diepteligging van de top of basis een bepaalde afwijking vertoont van de door het model geschatte meest waarschijnlijke waarde. De manier waarop de standaarddeviatie berekend wordt kan per geologische eenheid en per modelgebied verschillen.

### 2.3.3 *Kans op lithoklasse in het voxelmodel*

In het voxelmodel wordt de lithoklasse met behulp van stochastische interpolatietechnieken geschat. Deze technieken komen er in essentie op neer dat het model een groot aantal (bijvoorbeeld 100) keer wordt doorgerekend met telkens een andere, maar statistisch gezien even waarschijnlijke, uitkomst. Voor de lithoklasse van een voxel wordt dan bijvoorbeeld 80 keer klei geschat, 10 keer veen en 10 keer kleilig zand. Uit de verschillende schattingen wordt voor elke lithoklasse de kans op voorkomen berekend door het aantal keren dat de lithoklasse is geschat te delen door het aantal modelberekeningen (bijvoorbeeld 100). In het eerder beschreven voorbeeld is de kans op klei dan 0,8, de kans op veen 0,1 en de kans op kleilig zand eveneens 0,1.

De verschillende uitkomsten van de modelberekeningen geven aan hoe goed het model in staat is om een eenduidige schatting te geven: in het beste geval leidt elke modelberekening tot dezelfde uitkomst, in het slechtste geval komen alle mogelijke uitkomsten even vaak voor.

Voor individuele voxels kan de kansverdeling worden weergegeven in een histogram, waarmee een visualisatie van de modelonzekerheid in de betreffende voxel wordt verkregen (Figuur 2.3.1).



Figuur 2.3.1: Visualisatie van modelonzekerheid van een individuele voxel door het weergegeven van de kans op lithoklasse in een histogram. In dit voorbeeld is de meest waarschijnlijke lithoklasse klei, met een kans van ruim 50%. Er is ook een vrij grote kans op kleilig zand (~30%), de kans dat de voxel zand of veen bevat is echter klein. Let bij deze visualisatie op: bij een totaal van de zeven hier weergegeven lithoklassen kan de grootste kans op voorkomen slechts 15% zijn. Is die klasse klei, veen of kleilig zand en zandige klei, dan kan de kans op zand (d.w.z. de opgetelde kansen op fijn zand, matig grof zand, en grof zand) tot 42% zijn.



#### 2.3.4 Modelonzekerheid van lithoklasse in het voxelmodel

Naast de kans op lithoklasse bevat het voxelmodel een maat van modelonzekerheid die in één getalswaarde wordt uitgedrukt in plaats van een reeks afzonderlijke kansen voor elke mogelijke lithoklasse of geologische eenheid. Deze maat is afgeleid van het concept van *informatie-entropie* (Shannon, 1948), die voor het eerst door Wellmann & Regenauer-Lieb (2012) is toegepast op 3D geologische modellen. In plaats van de term informatie-entropie wordt in GeoTOP de term *modelonzekerheid* gebruikt.

De modelonzekerheid van lithoklasse is de mate waarin het model in staat is om een eenduidige schatting te geven van de voor de voxel representatieve lithoklasse en heeft de volgende eigenschappen:

1. Modelonzekerheid is 0 als elke modelberekening tot dezelfde geschatte lithoklasse leidt, ofwel er is één lithoklasse met kans 1, en alle andere lithoklassen hebben kans 0.
2. Modelonzekerheid is 1 (maximale waarde) als alle mogelijke lithoklassen met dezelfde kans voorkomen. Het model kan dan geen eenduidige schatting geven van de lithoklasse van de voxel.
3. Hoe meer mogelijke lithoklassen met een kans groter dan 0, hoe groter de modelonzekerheid.
4. Hoe groter de verschillen tussen de kansen, hoe kleiner de modelonzekerheid.

#### Voorbeelduitwerking

In Tabel 2.3.1 is de modelonzekerheid (H) uitgewerkt voor een model met drie mogelijke lithoklassen (bijvoorbeeld zand, klei, veen, met kansen  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ ).

Tabel 2.3.1: Modelonzekerheid (H) uitgewerkt voor een model met drie mogelijke lithoklassen.

| $P_1$ | $P_2$ | $P_3$ | H    |
|-------|-------|-------|------|
| 1     | 0     | 0     | 0    |
| 1/3   | 1/3   | 1/3   | 1    |
| 0.5   | 0.5   | 0     | 0.63 |
| 0.49  | 0.49  | 0.02  | 0.71 |

In de eerste situatie is de kans op de eerste lithoklasse 1, en hebben de beide andere lithoklassen een kans 0. Hieruit volgt dat het model zeer goed in staat is om een schatting te geven en de modelonzekerheid is daarom 0.

In de tweede situatie zijn de kansen op de drie lithoklassen aan elkaar gelijk. Het model is niet in staat om een eenduidige schatting te geven en de modelonzekerheid is daarom 1.

In de derde situatie zijn er twee lithoklassen met gelijke kansen. Het model kan geen eenduidige schatting geven van de eerste twee lithoklassen, maar lithoklasse 3 komt zeker niet voor.

In de laatste situatie wordt een kleine kans op lithoklasse 3 ( $p_3 = 0.02$  of 2%) geïntroduceerd waardoor de modelonzekerheid relatief sterk toeneemt.

### 2.3.5 *Modelonzekerheid van geologische eenheid in het voxelmodel*

De modelonzekerheid van geologische eenheid is de mate waarin het model in staat is om een eenduidige schatting te geven van de geologische eenheid waartoe de voxel behoort. Net als de modelonzekerheid op lithoklasse is deze onzekerheid afgeleid van het concept van *informatie-entropie* en heeft vergelijkbare eigenschappen. Bij de berekening van de modelonzekerheid wordt gebruik gemaakt van de standaarddeviaties van de top en de basis van de verschillende geologische eenheden uit het lagenmodel.

## 2.4 Doel, gebruik en beperkingen

### 2.4.1 *Doel en gebruik*

GeoTOP is een subregionaal ondergrondmodel met een gebruiksschaal die past bij toepassingen op provinciaal, gemeentelijk of wijkniveau. Deze gebruiksschaal is vergelijkbaar met de schaal van 1:50.000 die bij Geologische Kaart van Nederland, een voorloper van GeoTOP, gehanteerd werd. Bij ondergrondvraagstukken op een grotere schaal (straatniveau of individuele gebouwen) kan GeoTOP dienen als raamwerk waarbinnen meer detail kan worden aangebracht.

GeoTOP is breed toepasbaar in verschillende toepassingen waarbij de ondiepe ondergrond een rol speelt. Hieronder volgt een niet-uitputtend overzicht van voorbeelden van gebruik.

#### *Voorbeeld 1: Algemeen gebruik als driedimensionale geologische kaart*

GeoTOP kan gezien worden als een driedimensionale geologische kaart en daarmee als een opvolger van de papieren 1:50.000 Geologische Kaart van Nederland. Het algemene gebruik wordt ondersteund door diverse visualisaties op DINOloket waarmee de gebruiker zich een goed 3D-beeld van de opbouw en de eigenschappen van de ondergrond kan vormen. Bij een gedetailleerde kartering van de ondergrond, bijvoorbeeld op een bouwlocatie, kan GeoTOP als raamwerk dienen. De bij een detailkartering benodigde onderdelen van GeoTOP, met name het lagenmodel en het voxelmodel, zijn in de BRO opgenomen.

#### *Voorbeeld 2: Grondwatermodellering*

De ruimtelijke variatie in fysisch meetbare eigenschappen in de ondergrond, zoals de doorlatendheid voor grondwater, is in belangrijke mate afhankelijk van de twee in GeoTOP gemodelleerde eigenschappen geologische eenheid en lithoklasse. Zand heeft uiteraard een andere doorlatendheid dan klei, maar zand in de ene geologische eenheid heeft ook een andere doorlatendheid dan zand in een andere geologische eenheid. Door aan de combinatie van geologische eenheid en lithoklasse doorlatendheden te koppelen kan GeoTOP dienen als input voor een grondwaterstromingsmodel.

Voor regionale grondwaterstromingsmodellen die gebaseerd zijn op het hydrogeologische lagenmodel REGIS II (Vernes & Van Doorn, 2005) fungeert GeoTOP als detaillering van het ondiepe deel van de ondergrond (van maaiveld tot

maximaal 50 m onder NAP). Dit geldt in het bijzonder voor de holocene afzettingen, die in REGIS II gekarteerd zijn als één hydrogeologische eenheid 'Holoceen complex'. In GeoTOP is het holocene pakket gedetailleerd gekarteerd in verschillende laagpakketten, lagen en geulsystemen, elk met hun eigen hydraulische eigenschappen.

Omdat GeoTOP geen hydrogeologische schematisering is, is het model niet direct geschikt voor een lokaal grondwatermodel, bijvoorbeeld rondom een grondwateronttrekking. Het kan wel dienen als raamwerk voor het construeren van een gedetailleerd, lokaal grondwatermodel waarbij aanvullende gegevens van lokale boorbeschrijvingen of sonderingen betrokken worden.

#### *Voorbeeld 3: Geotechniek*

In de planningsfase van grote infrastructurele werken, bijvoorbeeld de aanleg van tunnels en snelwegen, geeft GeoTOP inzicht in de te verwachten draagkracht van de ondergrond. Met name in het westen van het land zijn de diepteligging van het pleistocene zand, de samenstelling van het holocene pakket en de ligging en dikte van zandige geulsystemen belangrijke parameters bij het maken van een kostenschattting en het plannen van aanvullend bodemonderzoek. De te verwachten samenstelling van de ondergrond zal verder een factor kunnen zijn bij de tracékeuze.

Uiteindelijk zal bij elk infrastructureel project aanvullend, lokaal bodemonderzoek nodig zijn. De schaal van GeoTOP is dan ook niet geschikt voor de uitvoeringsfase van een infrastructureel project.

#### *Voorbeeld 4: Bodemdaling*

Bodemdaling als gevolg van inklinking van klei en oxidatie van veen is sterk afhankelijk van de lithologische samenstelling van de ondiepe ondergrond en van de grondwaterspiegel. GeoTOP is daarom zeer geschikt om te gebruiken bij het voorspellen van bodemdaling op lange termijn en wordt daar ook voor gebruikt. Hierbij geldt dezelfde aantekening als bij de andere toepassingen: de op GeoTOP gebaseerde bodemdaling geeft trends weer op regionale schaal en is niet bedoeld voor lokale situaties.

#### *Voorbeeld 5: Delfstoffenwinning*

GeoTOP biedt inzicht in het voorkomen van de oppervlakedelfstoffen zand en grind in de ondergrond. Ook kan uit GeoTOP worden afgeleid hoeveel onbruikbare deklaag (bijvoorbeeld klei) er afgegraven moet worden om de delfstof te bereiken.

#### *Voorbeeld 6: Baggerwerkzaamheden*

Bij baggerwerkzaamheden in rivieren zoals de Utrechtse Vecht is er een risico op het optreden van hydraulische kortsluiting ("lekkage", met als gevolg daarvan binnendijkse kwel). De geometrie en samenstelling van de holocene zandbanen in GeoTOP kunnen gebruikt worden om te bepalen in welke delen van een rivierloop dit risico groot is, en waar aanvullend bodemonderzoek noodzakelijk is.

#### 2.4.2 *Beperkingen*

Zoals in de vorige paragraaf aan de hand van voorbeelden is geïllustreerd, is GeoTOP niet geschikt voor gebruik op lokale schaal, zoals bijvoorbeeld bouwlocaties, individuele huizen of huizenblokken, en waterkeringen. Om een goede schatting van de geometrie en de eigenschappen van de ondergrond op een lokale schaal te kunnen geven zullen vrijwel altijd aanvullende gegevens nodig zijn.

De met GeoTOP meegeleverde boorbeschrijvingen en interpretaties hebben alleen betrekking op openbaar beschikbare gegevens in de DINO databank van TNO.

## 3 Uitgangspunten en randvoorwaarden, richtlijnen en standaarden

### 3.1 Uitgangspunten en randvoorwaarden

De Geologische Dienst Nederland, onderdeel van TNO, voorziet in opdracht van de Rijksoverheid in informatie over de Nederlandse ondergrond. Het gaat hierbij om de verstrekking van de door TNO beheerde ondergrondgegevens en een viertal door TNO systematisch vervaardigde c.q. onderhouden ondergrondmodellen (GeoTOP, DGM, REGIS II en DGMdiep). Het beheer van de informatievoorziening is taakgefinancierd, waarbij de ministeries van EZK en BZK namens de Rijksoverheid toezicht houden, dit in verband met hun verantwoordelijkheid voor respectievelijk de Mijnbouwwet en de Wet Basisregistratie Ondergrond.

Gegeven deze taakstelling beperkt GeoTOP zich tot delen van het Nederlandse territorium. Alhoewel er vanuit diverse toepassingen behoefte is aan vergelijkbare informatie van de aangrenzende Belgische en Duitse gebieden, vallen deze gebieden buiten het te modelleren gebied.

GeoTOP beperkt zich tot het vasteland van Nederland. Hieronder wordt het gebied verstaan dat gelegen is tussen de landsgrens met België en Duitsland en de laagwaterlijn cf. de Topografische Kaart van Nederland 1:25:000 (uitgave 1961), inclusief de (voormalige) Zeeuwse en Zuid-Hollandse eilanden en zeearmen, het IJsselmeer, de Waddenzee en de Waddeneilanden.

GeoTOP geeft inzicht in de geologische opbouw en lithologische samenstelling van de ondergrond tot een diepte van maximaal 50 m beneden NAP.

GeoTOP wordt samengesteld in een digitale werkomgeving. De basisgegevens waarop het model gebaseerd is dienen om die reden in digitale vorm beschikbaar te zijn. Boorgegevens, die de belangrijkste basisgegevens vormen voor GeoTOP, worden grotendeels ontleend aan de databank DINO van TNO. Daarnaast maakt GeoTOP gebruik van enkele grote datasets met boorbeschrijvingen van derden, waaronder handboringen van de Universiteit Utrecht die door studenten en hun begeleiders gezet zijn in het Rijn-, Maas- en IJsselgebied in Midden-Nederland. Van alle in het model gebruikte boringen dienen de laagbeschrijvingen in gecodeerde vorm beschikbaar te zijn.

De databank DINO van TNO bevat een grote set boorgegevens. Deze set is over een periode van meer dan een eeuw verzameld door TNO en haar voorgangers. De verzamelde boringen zijn uitgevoerd door of in opdracht van een groot aantal partijen, zoals overheden, bedrijven, onderzoeksinstituten (waaronder TNO) en particulieren ten behoeve van verschillende doeleinden. De boringen hebben daardoor verschillende einddiepten, variërend van ondiepe handboringen tot diepe exploratieboringen naar olie en gas. De methode van boren, van het bemonsteren van het opgeboorde materiaal en van het beschrijven en eventueel coderen van de boormonsters verschillen onderling eveneens. Ook zijn er al dan niet geofysische metingen in het boorgat uitgevoerd of is het monstermateriaal nader geologisch onderzocht. De kwaliteit en de representativiteit van de boorgegevens hangen hier mee samen. Ook het formaat van de boormonsterbeschrijvingen kan verschillen, in

de vorm van een digitale, cf. de Standaard Boorbeschrijving (SBB) gecodeerde boorbeschrijving of een scan (PDF, JPEG, TIFF, ...) van de papieren beschrijving. De set boorgegevens in DINO is daardoor heterogeen van aard. Ook varieert de ruimtelijke spreiding van de boorgegevens over Nederland.

Een deel van de boringen in DINO is vertrouwelijk. Het betreft boringen die door de eigenaar aan DINO ter beschikking zijn gesteld, maar waarvan de locatie en/of de boorbeschrijving niet openbaar gemaakt mag worden. Deze boringen worden, met toestemming van de eigenaar, wel in de modellering gebruikt, maar niet als modelresultaat gepubliceerd. Boringen die gelegen zijn in het buitenland, voornamelijk in het grensgebied met België en Duitsland, zijn vertrouwelijk. Dit geldt ook voor de boorgegevens van de Universiteit Utrecht die buiten de DINO databank om in GeoTOP gebruikt worden.

Uitgangspunt voor GeoTOP is dat alle beschikbare boormonsterbeschrijvingen worden meegenomen in de modellering. Voor een deel van de boormonsterbeschrijvingen geldt echter dat de kwaliteit zodanig laag is, dat GeoTOP er niet beter maar slechter door zou worden. Om deze boormonsterbeschrijvingen te traceren en uit te sluiten wordt een kwaliteitsfilter toegepast. Afhankelijk van het modelgebied wordt in het algemeen maximaal 10% van de boormonsterbeschrijvingen op basis van het automatische kwaliteitsfilter uitgesloten.

Als onderdeel van GeoTOP (en DGM en REGIS II) wordt er geen inventarisatie uitgevoerd van data en informatie die beschikbaar zijn bij organisaties in de buurlanden. Harmonisatie van interpretaties en van de modellen in de grensstreek vindt alleen plaats in het kader van bilaterale projecten zoals de H3O-projecten. Impliciet betekent dit dat daar waar een dergelijke harmonisatie nog niet heeft plaatsgevonden, de onzekerheid van de modellen naar de grens toe, veelal toeneemt.

### 3.2 Richtlijnen en standaarden

De lithostratigrafische indeling die binnen GeoTOP is aangehouden, is beschreven in de *Lithostratigrafische Nomenclator van de Ondiepe Ondergrond, versie 2013* (TNO, 2013; te raadplegen op <https://www.dinoloket.nl/nomenclator-ondiep>).

Bij het samenstellen van GeoTOP wordt een driedimensionaal cartesisch coördinatenstelsel aangehouden bestaande uit de Rijksdriehoekmeting (RD) in het horizontale vlak (x,y) en de hoogte ten opzichte van het referentieniveau Normaal Amsterdams Peil (NAP) in de verticale richting (z). Basisgegevens die binnen GeoTOP worden gebruikt dienen in dit coördinatenstelsel beschikbaar te zijn; de producten van het model worden uitsluitend en alleen in dit coördinatenstelsel opgeleverd. Zowel de locatie in RD als de hoogte ten opzichte van NAP worden uitgedrukt in meters (m).

De opgeleverde producten van het model komen qua gegevensstructuur overeen met de gegevenscatalogus.

### 3.3 Software

Er wordt gebruik gemaakt van verschillende softwarepakketten (Tabel 3.3.1).

Tabel 3.3.1: Softwarepakketten gebruikt bij het maken van GeoTOP.

| Software       | Versie     | O.a. gebruikt voor  |
|----------------|------------|---|
| Isatis®        | 2018.1     | Geostatistische berekeningen voor het lagenmodel en het voxelmodel.   |
| MS Excel       | Office 365 | In Excel zijn <i>workflow managers</i> ontwikkeld (een voor 2D en een voor 3D) die opdrachtregels voor Isatis® aanmaken.  |
| Python         | 2.7.10     | Programmeertaal voor het ontwikkelen van scripts voor dataextractie, dataconversie, toekennen van stratigrafische interpretaties etc.   |
| ArcGIS Desktop | 10.4.1     | GIS pakket voor visualisatie in 2D en uitvoeren van GIS operaties. Het lagenmodel van GeoTOP wordt opgeslagen als ArcGIS rasters; verbredingspolygonen worden opgeslagen als ArcGIS shapefiles. |
| iMOD           | v2.7.134   | Visualisatie applicatie dat wordt gebruikt bij het controleren van modelresultaten en het uitvoeren van de quality control (QC)   |

Het versienummer is de actuele stand van zaken; per modelgebied kan een andere versie van het pakket gebruikt zijn.

## 4 Brongegevens

### 4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de brongegevens die bij het maken van GeoTOP gebruikt worden. Het betreft brongegevens die een landelijke of regionale dekking hebben. Voorbeelden zijn de Bodemkaart van Nederland (BKN) 1:50.000 (landelijke dekking) en het digitale basisbestand paleogeografie van de Rijn-Maas delta (de “zandbanenkaart”; Berendsen & Stouthamer (2001); regionale dekking). Bij het modelleren van een modelgebied worden daarnaast nog lokale gegevensbronnen gebruikt. Voorbeelden zijn het proefschrift van Griede (1978) over de Holocene ontwikkeling van het Friese zeekleigebied en het proefschrift van Bos (2010) met geologische kaarten van de Utrechtse Vecht. Deze lokale gegevensbronnen worden hier niet verder beschreven.

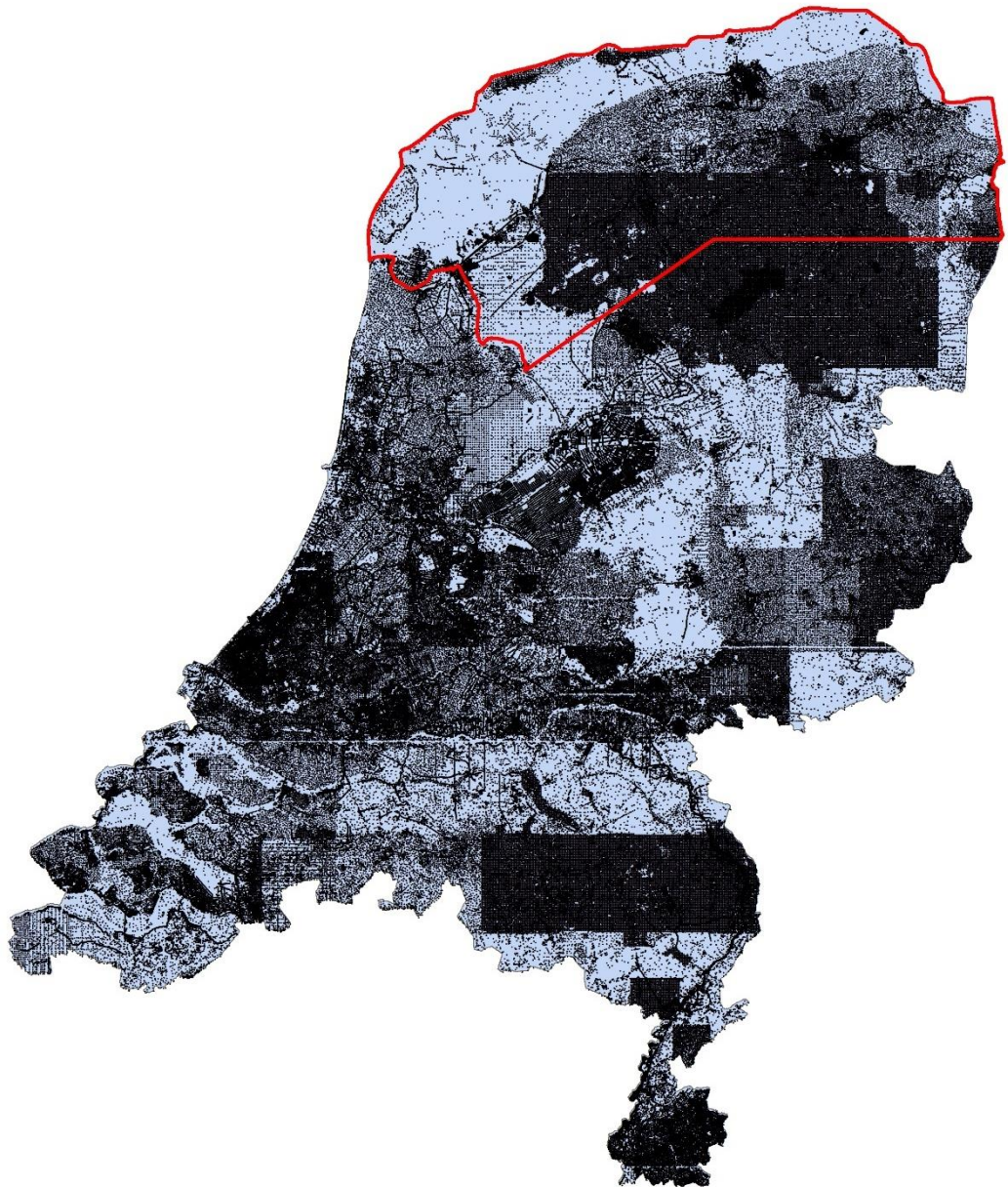
De manier waarop de verschillende brongegevens in GeoTOP worden gebruikt wordt beschreven in paragraaf 5.2.

### 4.2 Boorbeschrijvingen DINO

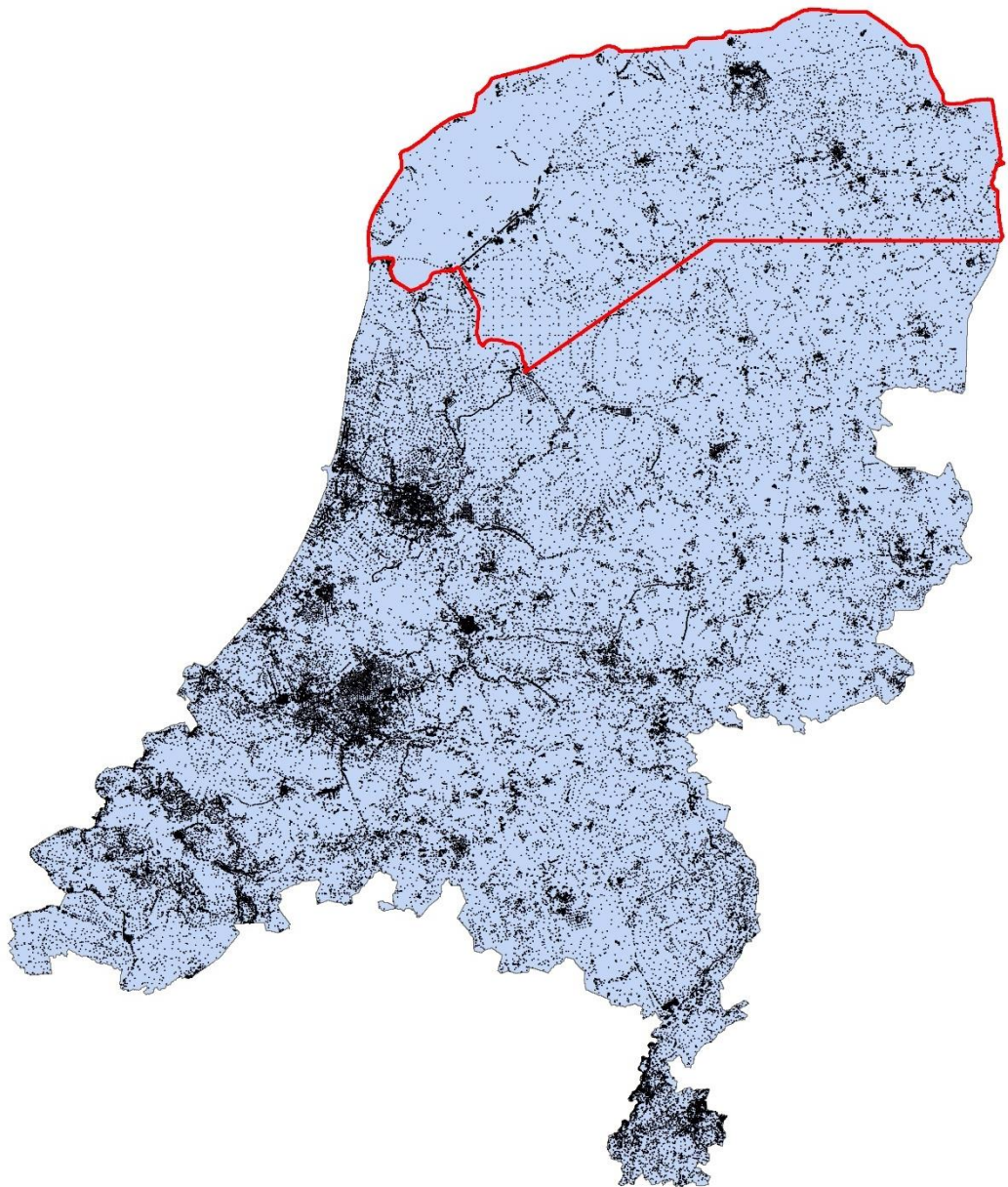
Verreweg de belangrijkste gegevensbron voor GeoTOP zijn de boorbeschrijvingen met bijbehorende lithostratigrafische interpretaties in de DINO databank. DINO is de landelijke centrale opslag voor geowetenschappelijke gegevens over de diepe en ondiepe ondergrond ([www.dinoloket.nl](http://www.dinoloket.nl)).

Omdat de boorbeschrijvingen in DINO een gestandaardiseerde coderingsmethode volgen (Bosch, 2000), is het mogelijk om op geautomatiseerde wijze grote hoeveelheden boorbeschrijvingen te analyseren en interpreteren. De dataset omvat zowel handboringen (5 – 10 m diep) als mechanisch uitgevoerde boringen (meestal 20 m of dieper). In totaal bevat DINO op het vasteland circa 470.000 boorbeschrijvingen, waarvan er circa 277.000 voorzien zijn van een lithostratigrafische interpretatie (NB: dit aantal betreft handmatig geïnterpreteerde boringen en is exclusief de op geautomatiseerde wijze door GeoTOP geïnterpreteerde boringen; stand eind 2018). Door het grote aandeel ondiepe handboringen in DINO neemt het aantal beschikbare boorbeschrijvingen met de diepte snel af (Figuren 4.2.1, 4.2.2 en 4.2.3).

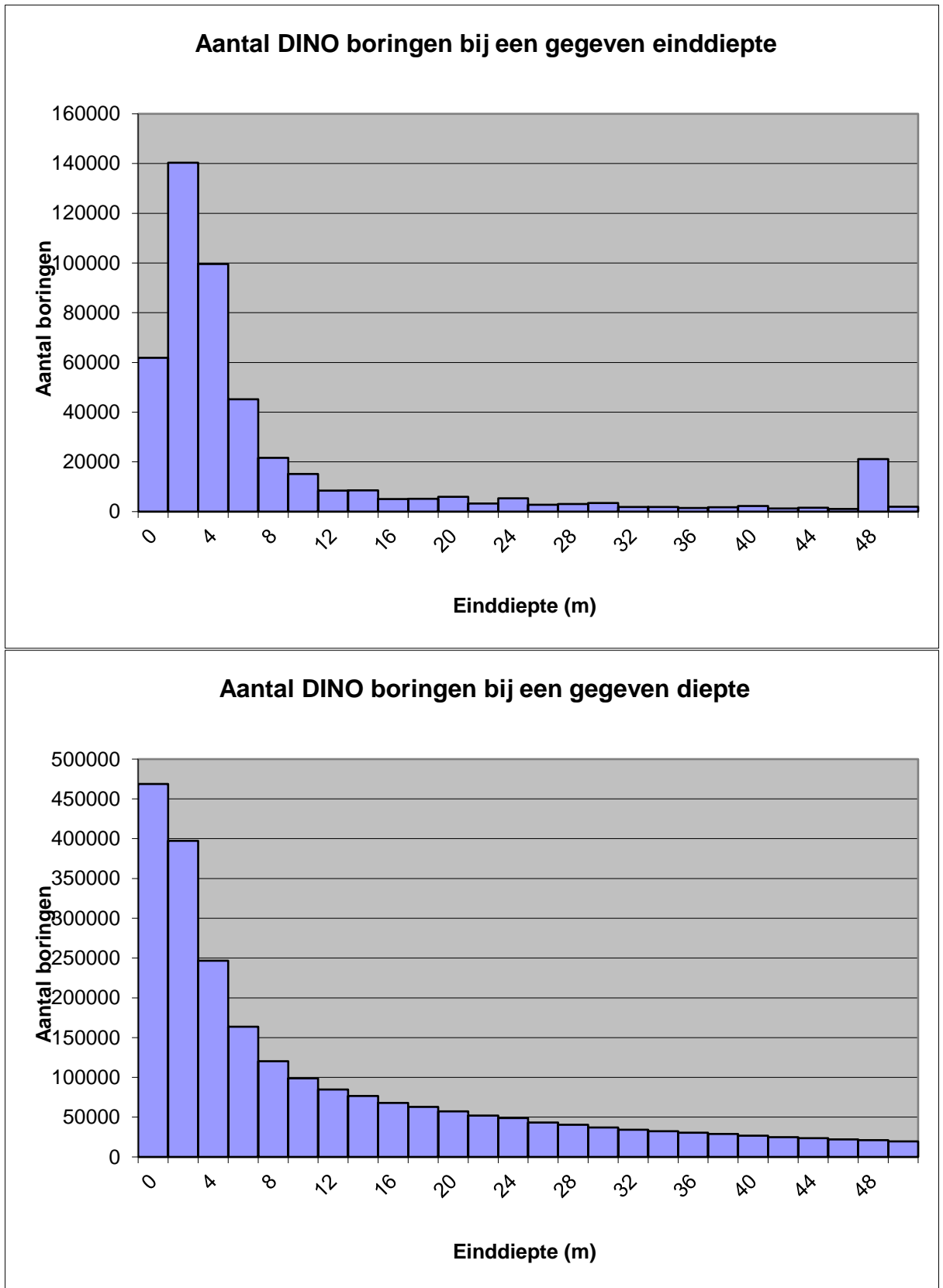




Figuur 4.2.1 Locatie van DINO-boorbeschrijvingen op het vasteland aan maaiveld (N = 469.161; stand eind 2018). De rode lijn geeft de begrenzing van de GeoTOP modelgebieden weer die onder het BRO-kwaliteitsregime tot stand zijn gekomen.



Figuur 4.2.2 Locatie van boringen op een diepte van 10 m onder maaiveld (N = 102.416; stand eind 2018). De rode lijn geeft de begrenzing van de GeoTOP modelgebieden weer die onder het BRO-kwaliteitsregime tot stand zijn gekomen.



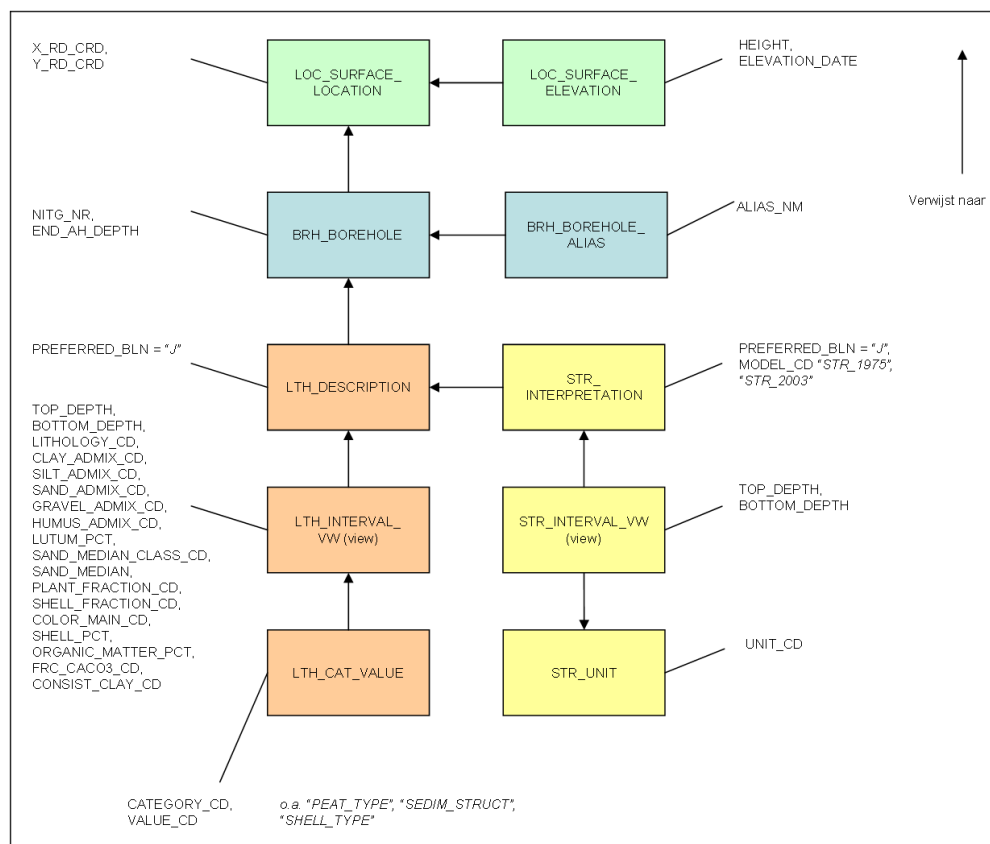
Figuur 4.2.3 Histogram met het aantal boringen bij een gegeven einddiepte onder maaiveld (boven) en het aantal boringen dat minimaal een bepaalde diepte bereikt (onder). N = 469.161; stand eind 2018; interval 2 m.

4.2.1 *Vertrouwelijke boringen*

Een deel van de boringen in DINO is vertrouwelijk. Het betreft boringen die door de eigenaar aan DINO ter beschikking zijn gesteld, maar waarvan de locatie en/of de boorbeschrijving niet openbaar gemaakt mag worden. Deze boringen worden, met toestemming van de eigenaar, wel in de modellering gebruikt, maar niet als modelresultaat gepubliceerd.

4.2.2 *Gebruikte entiteiten en attributen*

De belangrijkste attributen van de boorbeschrijvingen zijn top en basis van de intervalbeschrijvingen, hoofd lithologie, bijmengingen van zand, silt, klei, grind en humus, zandmediaan, schelpgehalte en sedimentstructuren zoals scheve gelaagdheid. Een overzicht van alle de op dit moment gebruikte entiteiten en attributen is gegeven in Figuur 4.2.4 en wordt toegelicht in Tabel 4.2.1.



Figuur 4.2.4: Grafische weergave van de belangrijkste entiteiten en attributen van DINO boorbeschrijvingen en stratigrafische interpretaties.

Tabel 4.2.1: Belangrijkste entiteiten en attributen van DINO boorbeschrijvingen en stratigrafische interpretaties.

| Entiteit  | Attribuut    | Toelichting   |
|---|--------------|---|
| BRH_BOREHOLE<br><i>Boring</i>                                     | NITG_NR      | Boornummer  |
|   | END_AH_DEPTH | Einddiepte  |
| BRH_BOREHOLE_ALIAS<br><i>Alternatieve nummering van de boring</i> | ALIAS_NM     | Alternatieve nummering van de boring, onder andere van belang om vast te stellen of een boring een ondiepe handboring betreft |



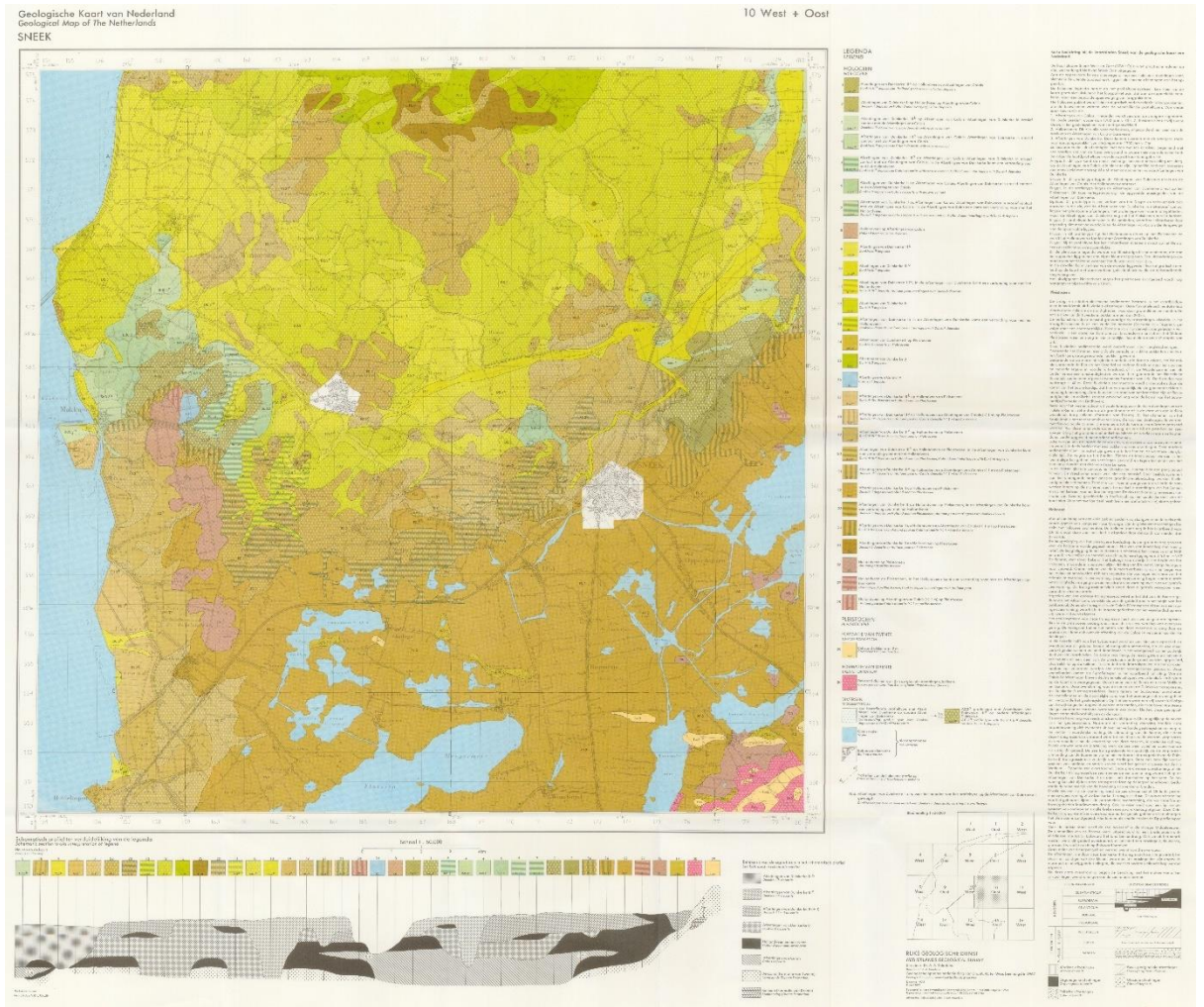
|  |                               |   |
|--|-------------------------------|---|
| LOC_SURFACE_<br>LOCATION<br><i>Locatie</i>   | X_RD_CRD                      | x-coördinaat in Rijksdriehoekstelsel  |
|  | Y_RD_CRD                      | y-coördinaat in Rijksdriehoekstelsel  |
| LOC_SURFACE_<br>ELEVATION<br><i>Hoogte</i>   | HEIGHT                        | Hoogte, gemeten ten opzichte van NAP  |
|  | ELEVATION_DATE                | Bij meetreeksen worden meerdere hoogtes vastgelegd. De hoogte met de oudste datum is dan de hoogte op het moment dat de boring gezet werd. Deze oudste hoogte wordt gebruikt in de modellering. |
| LTH_DESCRIPTION<br><i>Boorbeschrijving</i>   | PREFERRED_BLN                 | Bij een boring kunnen meerdere boorbeschrijvingen vastgelegd zijn, waarvan er een als voorkeursbeschrijving is aangemerkt. In de modellering wordt altijd de voorkeursbeschrijving gebruikt.    |
| LTH_INTERVAL_VW<br>(view)<br><i>Boorbeschrijving intervallen</i>   | TOP_DEPTH                     | Top van het boorbeschrijving interval, gemeten langs de boring (top hoogste interval is in alle boringen 0 m).  |
|  | BOTTOM_DEPTH                  | Basis van het boorbeschrijving interval, gemeten langs de boring.   |
|  | LITHOLOGY_CD                  | Hoofdlithologie   |
|  | SAND_MEDIAN                   | Zandmediaan (numerieke waarde)  |
|  | SAND_MEDIAN_CLASS_CD          | Zandmediaan (klasse)  |
|  | CLAY_ADMIX_CD                 | Bijmenging klei (klasse).   |
|  | SILT_ADMIX_CD                 | Bijmenging silt (klasse).   |
|  | SAND_ADMIX_CD                 | Bijmenging zand (klasse).   |
|  | GRAVEL_ADMIX_CD               | Bijmenging grind (klasse).  |
|  | HUMUS_ADMIX_CD                | Bijmenging humus stof (klasse).   |
|  | SHELL_PCT                     | Schelpenfractie (percentage)  |
|  | SHELL_FRACTION_CD             | Schelpenfractie (klasse)  |
|  | PLANT_FRACTION_CD             | Plantenfractie (klasse)   |
|  | MICA_FRACTION_CD              | Micafractie (klasse)  |
|  | GLAUC_FRACTION_CD             | Glauconietfractie (klasse)  |
|  | ORG_MAT_PCT                   | Organisch materiaal (percentage)  |
|  | CACO3_FRACTION_CD             | Kalkgehalte (klasse)  |
|  | CONSIST_CLAY_CD               | Consistentie (stevigheid) van klei  |
|  | COLOR_MAIN_CD                 | Hoofdkleur  |
|  | LUTUM_PCT                     | Lutumgehalte (percentage)   |
| BORDB_DESCRIPTION  | Tekstuele, oude, beschrijving |   |
| LTH_INTERVAL_REMARK  | REMARK                        | Opmerkingen   |
| LTH_CAT_VALUE<br><i>Categorie waarden. Bij elk interval kan voor een of meerdere categorieën een aantal waarden worden</i> | CATEGORY_CD                   | De categorieën: <ul style="list-style-type: none"> <li>• PLANT_TYPE</li> <li>• PEAT_TYPE</li> <li>• ORGMAT_ADMIX_TYPE</li> <li>• BIOGEN_ADMIX_</li> </ul>                                       |

|   |               |   |
|---|---------------|---|
| <i>vastgelegd. Voorbeeld: bij een interval kunnen bij 'SHELL_TYPE' meerdere schelpensoorten worden beschreven; bij hetzelfde interval kan daarnaast bij 'CLASTIC_ADMIX_TYPE' kleibrokjes zijn beschreven.</i> |               | TYPE <ul style="list-style-type: none"> <li>• SHELL_TYPE</li> <li>• CLASTIC_ADMIX_TYPE</li> <li>• COARSEMAT_ADMIX_TYPE</li> <li>• GEOL_INTPRT</li> <li>• GRAVEL_TYPE</li> <li>• GRAVEL_FRACTION_TYPE</li> </ul>                                     |
|   | VALUE_CD      | De waarde van de categorie  |
| STR_INTERPRETATION<br><i>Stratigrafische interpretatie</i>  | PREFERRED_BLN | Bij een boring kunnen meerdere stratigrafische interpretaties vastgelegd zijn, waarvan er een als voorkeursinterpretatie is aangemerkt. Indien de interpretatie in de modellering gebruikt wordt, dan betreft het altijd de voorkeursinterpretatie. |
|   | MODEL_CD      | Aanduiding of de interpretatie volgens Doppert et al. (1975) is of volgens De Mulder et al. (2003).   |
| STR_INTERVAL_VW<br><i>Stratigrafisch interval</i>   | TOP_DEPTH     | Top van het stratigrafische interval, gemeten langs de boring (top hoogste interval is in alle boringen 0 m).   |
|   | BOTTOM_DEPTH  | Basis van het stratigrafische interval, gemeten langs de boring.  |
| STR_UNIT<br><i>Stratigrafische eenheid</i>  | UNIT_CD       | De aan het interval toegekende stratigrafische eenheid volgens Doppert et al. (1975) of volgens De Mulder et al. (2003).  |

#### 4.3 Geologische Kaart van de Ondiepe Ondergrond

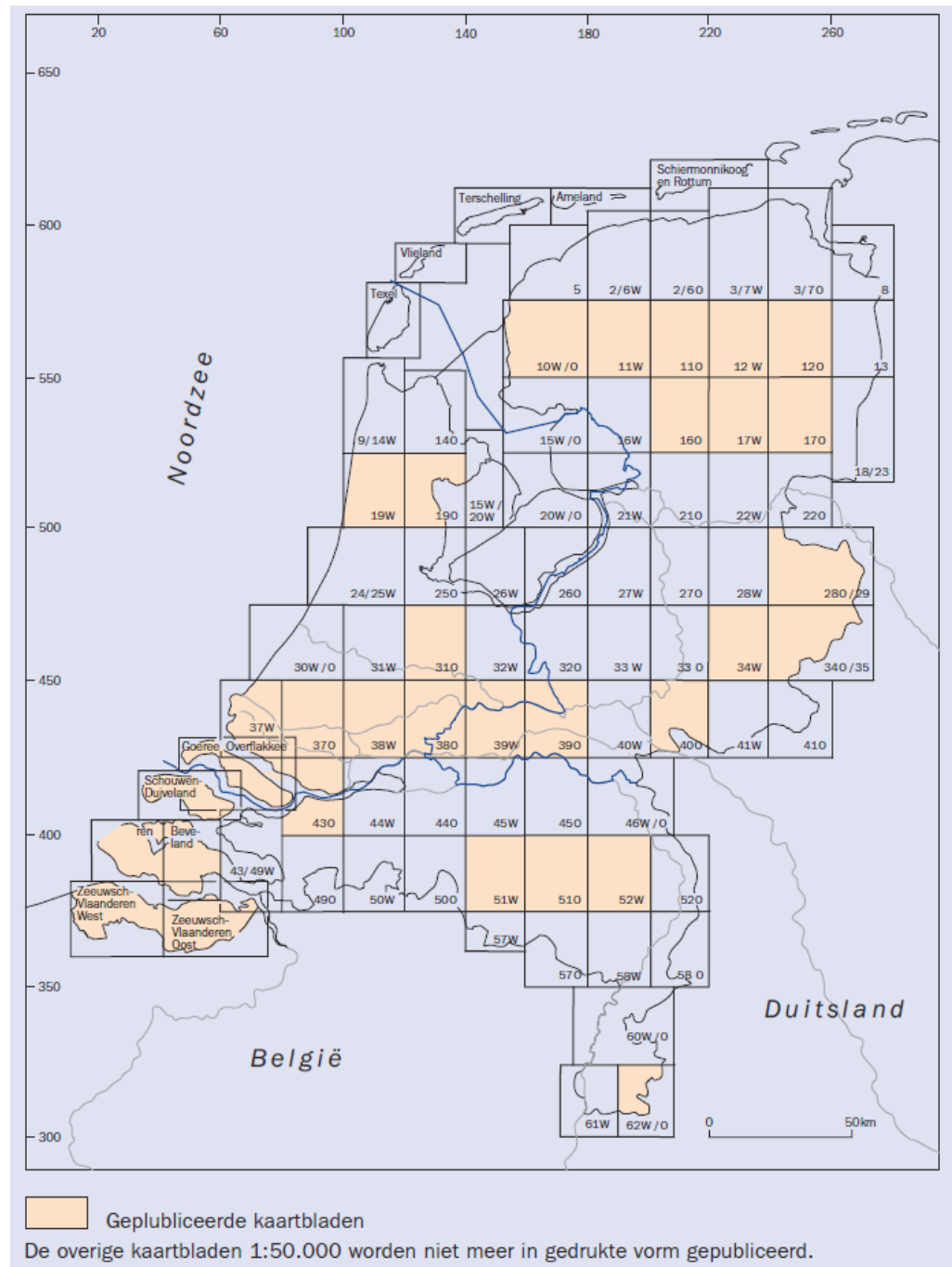
De Geologische Kaart van de Ondiepe Ondergrond van Nederland, schaal 1:50.000, is de gepubliceerde neerslag van de inventarisatie van de ondergrond (tot ongeveer 500 m diepte), uitgevoerd ten behoeve van een verantwoord gebruik van de ondergrond en de ondergrondse natuurlijke bestaansbronnen. De nadruk ligt op de ontstaanswijze van de ondiepe ondergrond en de daarmee samenhangende afzettingen. Het betreft een profieltypekaart waarbij de legenda-eenheden de verticale opeenvolging van de ondiepe afzettingen representeren (bijvoorbeeld "Afzettingen van Duinkerke III<sup>b</sup> op Hollandveen op Afzettingen van Calais (< 1 m)" is een legenda-eenheid op kaartblad 10wo, Sneek (Figuur 4.3.1).

Bij elk kaartblad horen één of meer bladen met bijkaarten en profielen. Op de bijkaarten worden bepaalde stratigrafische eenheden of bepaalde aspecten van de ondergrond nader belicht. Bij de meeste kaartbladen wordt een Toelichting geleverd met foto's, figuren en beschrijvingen. De legenda op de kaartbladen is in het Nederlands en Engels beschreven. Figuur 4.3.1 geeft als voorbeeld de hoofdkaart van kaartblad 10wo, Sneek.



Figuur 4.3.1: Hoofdkaart van kaartblad 10wo, Sneek (papieren versie; GeoTOP gebruikt de digitale versie van deze kaarten).

Figuur 4.3.2 geeft aan welke kaartbladen er in druk zijn verschenen.



Figuur 4.3.2: Gepubliceerde kaartbladen van de Geologische Kaart van de Ondiepe Ondergrond van Nederland, schaal 1:50.000.



Voor de modellering wordt gebruik gemaakt van de gedigitaliseerde versie van deze kaart, bestaande uit polygonen die de grenzen van de geologische eenheden aangeven. Een overzicht van de kaarten is weergegeven in Tabel 4.3.1.

Tabel 4.3.1: Overzicht van de kaartbladen van de Geologische Kaart van de Ondiepe Ondergrond van Nederland, schaal 1:50.000.

| <b>Naam</b>  | <b>Jaar van publicatie</b> |
|--|----------------------------|
| Sneek (10W, 10O)                                     | 1976                       |
| Heerenveen West (11W) en Heerenveen Oost (11O)       | 1987                       |
| Assen West (12W) en Assen Oost (12O)                 | 1990                       |
| Steenwijk oost (16O)                                 | 1978                       |
| Emmen West (17W) en Emmen Oost (17O)                 | 1979                       |
| Alkmaar West (19W) en Alkmaar oost (19O)             | 1987                       |
| Almelo Oost (28O) en Denekamp (29)                   | 1993                       |
| Utrecht Oost (31O)                                   | 1988                       |
| Eschede West, Eschede Oost/Glanerbrug (34W, 34O/35)  | 2000                       |
| Rotterdam Oost (37O)                                 | 1998                       |
| Rotterdam West (37W)                                 | 1979                       |
| Gorinchem Oost (38O)                                 | 1970                       |
| Gorinchem West (38W)                                 | 1994                       |
| Tiel West (39W) en Tiel Oost (39O)                   | 1984                       |
| Arnhem Oost (40O)                                    | 1977                       |
| Willemstad Oost (43O)                                | 1980                       |
| Eindhoven Oost (51O)                                 | 1973                       |
| Eindhoven West (51W)                                 | 1985                       |
| Venlo West (52W)                                     | 1976                       |
| Heerlen (62W oostelijke helft, 62O westelijke helft) | 1980                       |
| Beveland   | 1978                       |
| Goeree-Overflakkee                                   | 1964                       |
| Schouwen-Duiveland                                   | 1970                       |
| Walcheren  | 1972                       |
| Zeeuws-Vlaanderen                                    | 1977                       |
| Terschelling   | 1977                       |

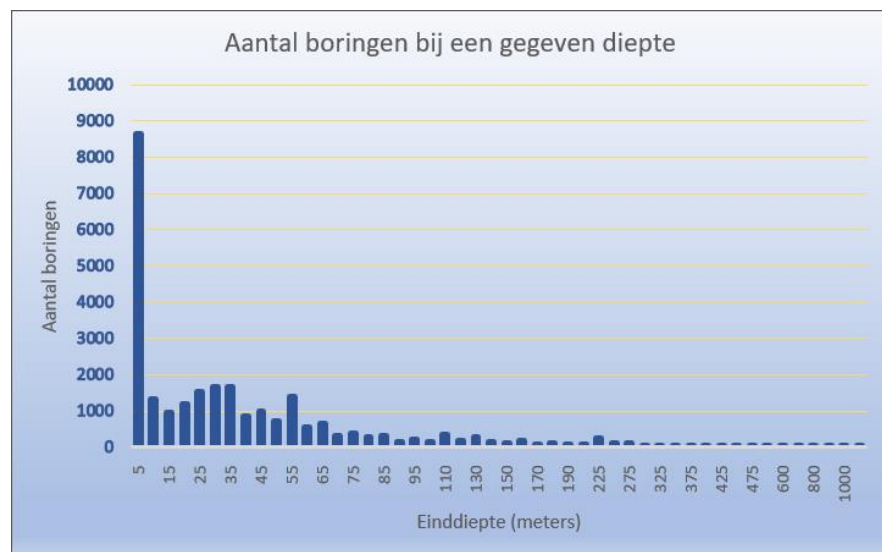
#### 4.4 DGM

Eind jaren '90 van de vorige eeuw werd de klassieke kartering van de 'ondiepe ondergrond' van Nederland, uitmondend in de hierboven beschreven, op papier gedrukte kaarten en profielen, stopgezet en werd het werkproces sterk geautomatiseerd. Vanaf die tijd is het Digitaal Geologisch Model (DGM) ontwikkeld, een grootschalig landsdekkend lagenmodel waarin de geometrie van de geologische eenheden wordt weergegeven tot een diepte van ongeveer 500 m met in de Roerdalslenk een maximale diepte van circa 1200 m (Gunnink et al., 2013). De onderscheiden geologische eenheden zijn formaties volgens de lithostratigrafische indeling van de ondiepe ondergrond van Nederland (Weerts et

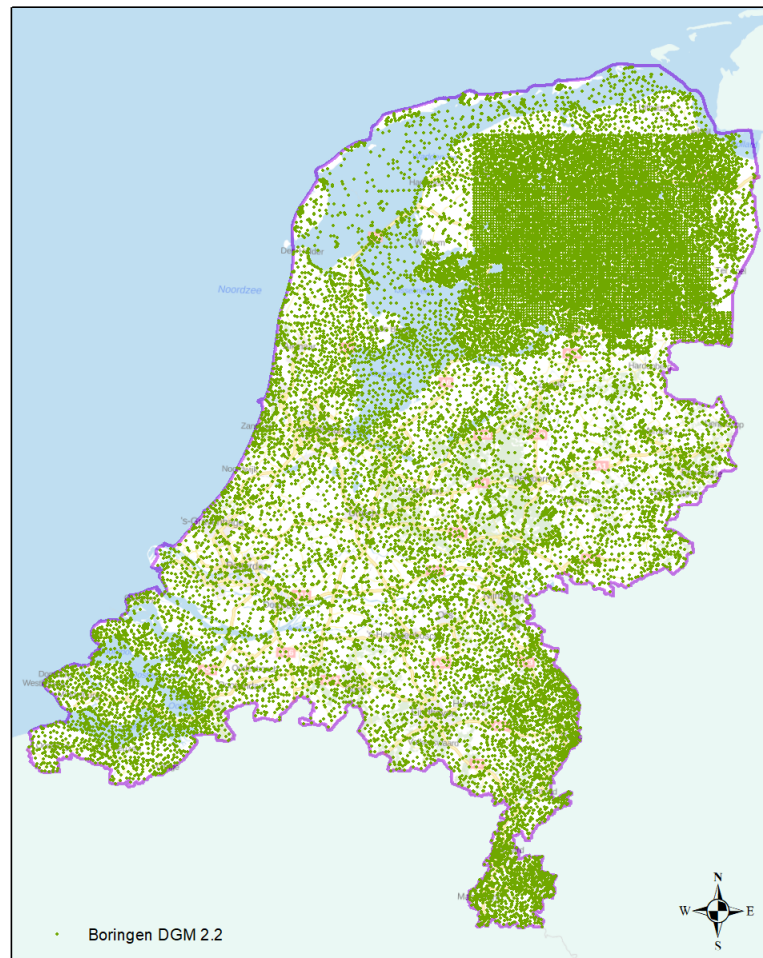
al., 2000; De Mulder et al., 2003); in een enkel geval wordt een laagpakket apart gemodelleerd. In tegenstelling tot het lagenmodel van GeoTOP worden de Holocene afzettingen in DGM gerepresenteerd door één geologische eenheid.

DGM is gebaseerd op een set matig diepe boringen. De set omvat circa 26.500 boringen, met dieptes tussen 10 en 500 m (Figuur 4.4.1). Deze boringen set is op basis van kwaliteit van de boorbeschrijvingen uit de DINO databank geselecteerd, waarbij een evenwichtige geografische spreiding, in relatie tot de geologische complexiteit, is beoogd. Met het oog op de toepassing in REGIS II (zie de volgende paragraaf) zijn ook boringen gebruikt die liggen op hydrologisch relevante locaties, zoals meetnetpunten en pompstations voor de winning van drinkwater.

Al deze 26.500 boringen uit de DINO-boringendatabank zijn voorzien van een stratigrafische interpretatie in geologische eenheden. Uit de interpretaties wordt een lagenmodel geconstrueerd waarin de ondergrond wordt weergegeven als een stapeling van geologische eenheden die begrensd worden door een top- en een basisvlak. Beide vlakken worden weergegeven als een raster met cellen van 100 x 100 m. Elke rastercel heeft de diepteligging van top resp. basis in meters onder NAP als attribuut. Uit de top- en basisrasters wordt een dikteraster afgeleid met de dikte van de geologische eenheid in meters. Tot slot zijn er voor zowel de top als basis betrouwbaarheidsrasters beschikbaar die de modelonzekerheid van het lagenmodel representeren.

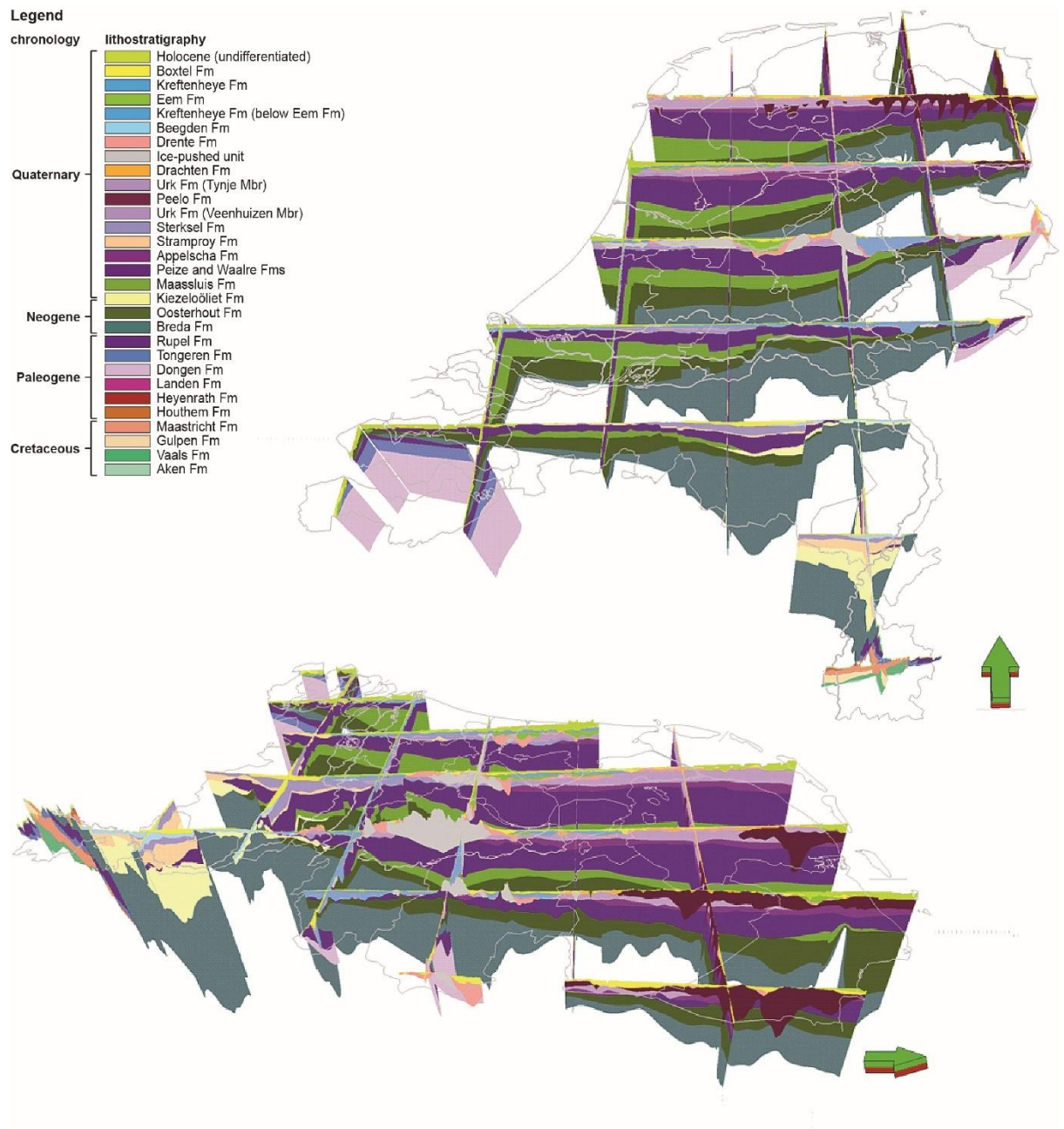


Figuur 4.4.1: Histogram van het aantal boringen bij een gegeven einddiepte onder maaiveld. N = 26.376; interval 5 m.



Figuur 4.4.2: Overzicht boringen set (N= 26.3767). In totaal bevat DINO circa 450.000 boringen

Figuur 4.4.3 geeft een beeld van DGM.

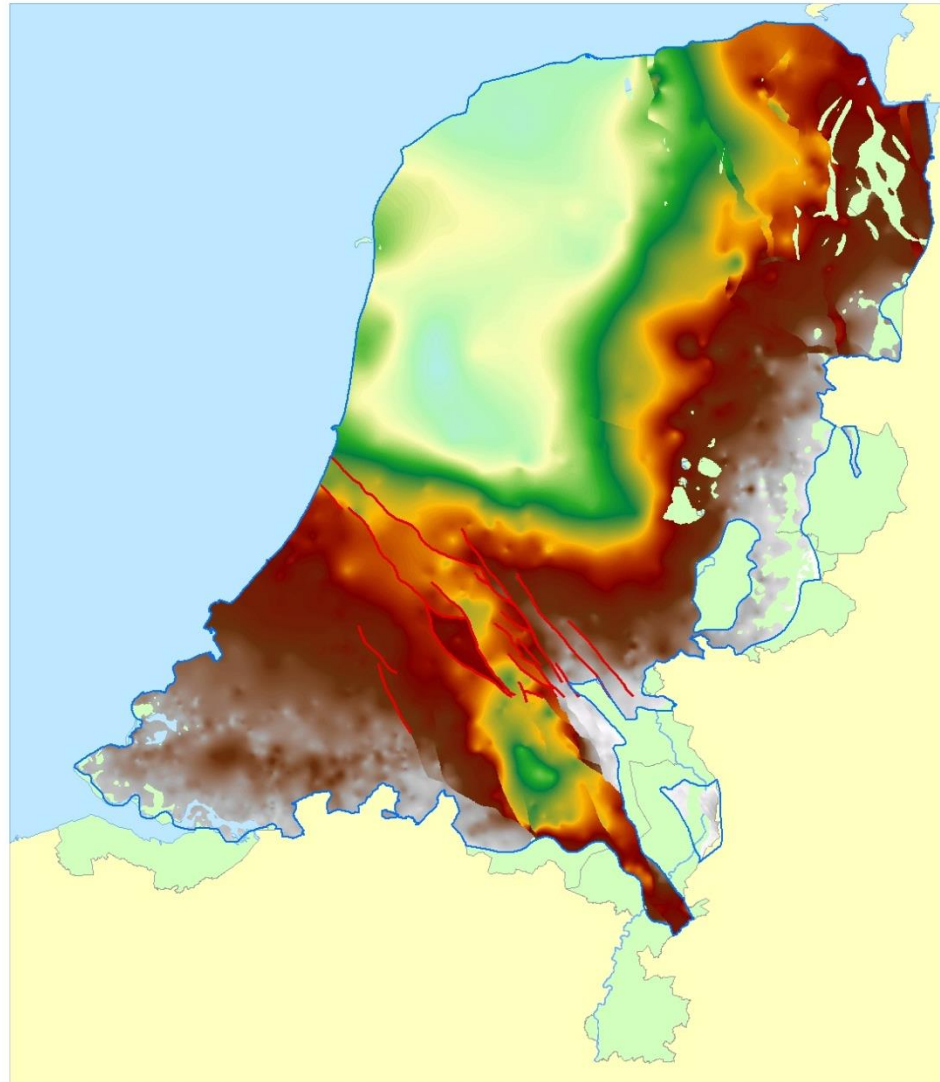


Figuur 4.4.3: Verticale doorsneden door DGM, kijkend naar het noorden (bovenste figuur) en kijkend naar het westen (onderste figuur). De figuren tonen de opvulling van het Noordzeebekken in het midden en westen van Nederland (formaties van Breda, Oosterhout en Maassluis) en de ondiepere rand van het bekken in het oosten waar de genoemde formaties uitwijken. In het zuidelijke deel van het land is de Roerdalslenk zichtbaar met een dik pakket afzettingen van Laat-Neogene tot Vroeg-Kwartaire ouderdom. In het zuidwesten en meest oostelijke deel van Nederland liggen Paleogene eenheden (Rupel Formatie en ouder) dicht onder het oppervlak. De oudste afzettingen (tot en met Krijt) zijn zichtbaar in Zuid-Limburg. Naar Gunnink et al. (2013).

In de modellering van GeoTOP wordt een deel van het lagenmodel (de set van rasters van top en basis van de geologische eenheden) van DGM gebruikt. Daarnaast wordt een deel van de potentiële verbreidingsgrenzen van DGM in

GeoTOP toegepast. Een voorbeeld van een door GeoTOP gebruikt basisvlak uit DGM wordt weergegeven in Figuur 4.4.4.

Van DGM komt periodiek een nieuwe versie uit. Bij het modelleren van een modelgebied van GeoTOP wordt uitgegaan van de meest recent gepubliceerde DGM versie. Dit impliceert dat verschillende GeoTOP modelgebieden op verschillende versies van DGM gebaseerd kunnen zijn.



Figuur 4.4.4: Kaart met de ligging van de basis van DGM eenheid 'PZWA' (gecombineerde Formaties van Peize en Waalre; de donkerpaarse eenheid in Figuur 4.4.3). De kleurenschaal loopt van lichtblauw (laagste waarde -294 m) via groen, geel en bruin naar wit (hoogste waarde +28.5 m). Merk op dat de basis van 'PZWA' in de Roerdalslenk versneden wordt door breuken (rode lijnen). Merk daarnaast op dat de potentiële verbreidingsgrens (blauwe lijn) o.a. in het noorden groter is dan de actuele verbreiding van het basisraster. De eenheid is daar versneden c.q. geërodeerd door de geulen van de Formatie van Peelo.

## 4.5 REGIS II

Het hydrogeologische lagenmodel REGIS II is de opvolger van het Regionaal Geohydrologisch Informatiesysteem REGIS I, een set van digitale bestanden met hydrogeologische informatie, die door TNO in samenwerking met de provincies en het RIZA (thans waterdienst Rijkswaterstaat) in de jaren 1990 is ontwikkeld. Met REGIS II hebben overheden, waterbeheerders, adviesbureaus en onderwijsinstellingen online de beschikking over een hydrogeologisch model van Nederland. REGIS II vormt hiermee de basis voor het samenstellen van regionale grondwatermodellen. Aangevuld met lokale (boor)informatie is REGIS II ook een uitgangspunt voor lokale grondwatermodellen. Een uitgebreide beschrijving van REGIS II is gegeven in Vernes & Van Doorn (2005).

In REGIS II zijn circa 130 zandige, kleiige, complexe (afwisselend zand-klei), venige, bruinkool- en kalksteen-eenheden in kaart gebracht, die op regionale schaal onderscheiden kunnen worden binnen de afzonderlijke geologische formaties van DGM (Figuur 3.14). Deze hydrogeologische onderverdeling is gebaseerd op de lithologische samenstelling en daarmee samenhangende hydraulische eigenschappen van het sediment. Intensieve interactie tijdens de geologische en hydrogeologische interpretaties van de boringen zorgen ervoor dat DGM en REGIS II naadloos op elkaar aansluiten. REGIS II is gebaseerd op dezelfde set van circa 26.500 boringen als DGM.

Van elke hydrogeologische eenheid is de diepteligging van de top en basis en de dikte vastgelegd in rasters met gridcellen van 100 bij 100 m. Naast deze geometrische gegevens bevat het hydrogeologisch model voor elke eenheid ook doorlatendheidsgrids en rasters met daarvan afgeleide hydraulische eigenschappen. Dit zijn geïnterpoleerde doorlatendheden uit de boringen die op hun beurt weer zijn afgeleid uit de relatie tussen lithologie, afzettingmilieu en hydraulische eigenschappen. De gebruikte geostatistische interpolatietechniek maakt het mogelijk om naast kaartbestanden van de horizontale en verticale doorlatendheid ook de onzekerheid rond deze parameters te presenteren in de vorm van de standaardafwijking.

Net als in DGM worden de Holocene afzettingen in REGIS II gerepresenteerd door één, in dit geval hydrogeologische, eenheid.

In de modellering van GeoTOP wordt het lagenmodel (de set van rasters van top en basis van de hydrogeologische eenheden) van REGIS II gebruikt. Op dit moment is het gebruik nog zeer beperkt, zeker vergeleken met het gebruik van DGM. Van REGIS II komt periodiek een nieuwe versie uit. Bij het modelleren van een modelgebied van GeoTOP wordt uitgegaan van de meest recent gepubliceerde REGIS II versie. Dit impliceert dat verschillende GeoTOP modelgebieden op verschillende versies van REGIS II gebaseerd kunnen zijn.

## 4.6 Breuken

Als onderdeel van de modellering van GeoTOP, DGM en REGIS II wordt het tektonische model (breukenmodel) van Nederland gebruikt waarop alle bekende grote breukensystemen in het ondiepe bereik van de Nederlandse ondergrond zijn opgenomen (Figuur 4.6.1). Het model is het resultaat van een herziening van



breukpatronen uit eerdere publicaties en/of eerdere modelversies. Het breukmodel is een geëvalueerd model welke in basis is gebaseerd op door de olie-industrie uitgevoerde seismische profielen. Ook hoge-resolutie seismiek in de Roerdalslenk, het belangrijkste tektonische fenomeen in de Nederlandse ondiepe ondergrond, is in deze breukenkartering gebruikt.



Figuur 4.6.1: Kaart met de ligging van de breuken in de ondiepe ondergrond van Nederland.

Van de breuken dataset komt periodiek een nieuwe versie uit. Bij het modelleren van een modelgebied van GeoTOP wordt uitgegaan van de meest recent uitgekomen breuken dataset. Dit impliceert dat verschillende GeoTOP modelgebieden op verschillende versies van de breuken gebaseerd kunnen zijn.

Voor elke (hydro)geologische eenheid die in DGM, REGIS II en GeoTOP wordt gemodelleerd, is vastgesteld welke breuken de basis van de eenheid verstoren. Bij het modelleren van de (hydro)geologische eenheid wordt rekening gehouden met die breuken.

GeoTOP gebruikt de breuken (een lijnenbestand, zgn. "polylines") bij zowel de lagenmodellering als de lithoklassemodellering. Bij het modelleren van een modelgebied van GeoTOP wordt de versie die bij de door GeoTOP gebruikte DGM-versie hoort één-op-één overgenomen.

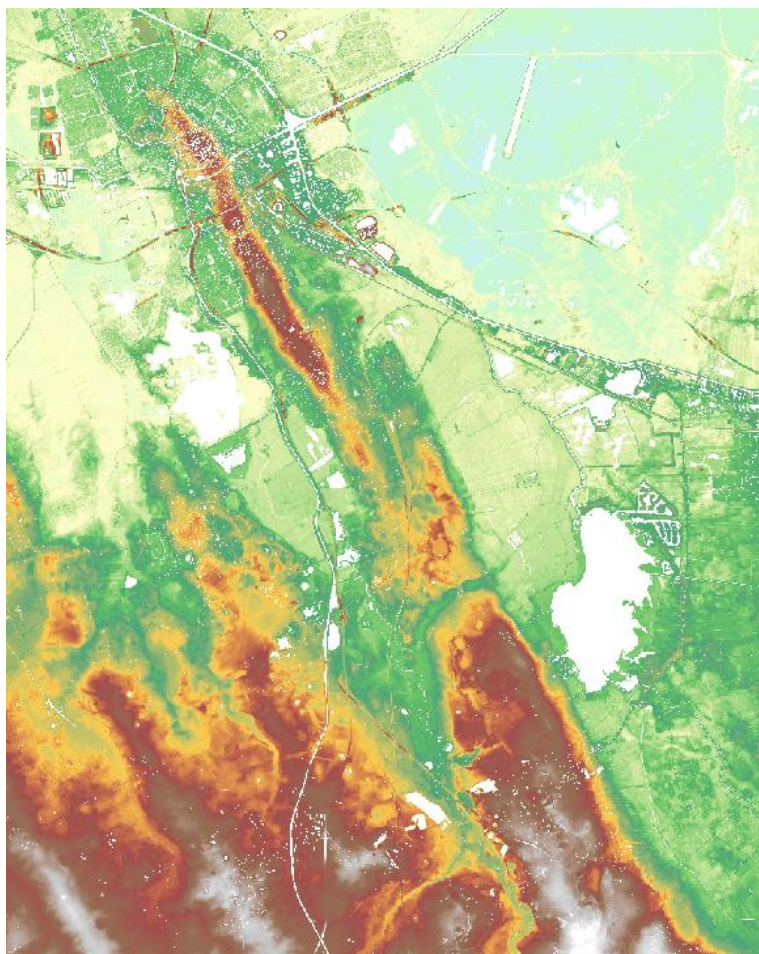
#### 4.7 Actueel Hoogtebestand Nederland

Het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN, [www.ahn.nl](http://www.ahn.nl)) is een bestand van Rijkswaterstaat met voor heel Nederland gedetailleerde en precieze hoogtegegevens. Het AHN wordt gemaakt door met een laser metingen te verrichten vanuit een vliegtuig (laseraltimetrie). AHN wordt uitgeleverd via PDOK ([www.pdok.nl](http://www.pdok.nl)).

Bij het maken van GeoTOP wordt het AHN op twee manieren gebruikt: (1) om geologische fenomenen aan het aardoppervlak te karteren en (2) als een van de bronnen om het maaiveld- en waterbodemoogtebestand samen te stellen. Toepassing (1) wordt in deze paragraaf verder beschreven, toepassing (2) in de volgende paragraaf.

Het reliëf van het aardoppervlak bevat veel aanwijzingen over de geologie van de (ondiepe) ondergrond. Zo zijn in Nederland de stuwwallen van de voorlaatste ijstijd als geprononceerde heuvels in het landschap aanwezig (Utrechtse Heuvelrug, Veluwe, Sallandse Heuvelrug). Hoe gedetailleerder de hoogte-informatie is, hoe meer geologen eruit kunnen afleiden. Een mooi voorbeeld is het karteren van oude rivierlopen van de Rijn en de Maas in het westen en midden van Nederland. Deze tot 6000 jaar oude rivierlopen zijn als hoger gelegen stroomruggen zichtbaar in het AHN. Het hoogteverschil wordt veroorzaakt doordat het klei en veen naast de rivierlopen meer inklinkt dan het zand in de rivierlopen. Een ander voorbeeld is het reliëf van het Hondsrugcomplex in Drenthe en Groningen (Figuur 4.7.1). De Hondsrug en de westelijk daaraan gelegen wat lagere ruggen zijn te danken aan ijsbewegingen in zuidzuidoostelijke richting.





*Figuur 4.7.1: Zichtbaarheid van het Hondsrugcomplex in het AHN.*

In de modellering wordt geen gebruik gemaakt van de oorspronkelijke lasermeeetwaarden, maar van een door Rijkswaterstaat samengesteld raster met een resolutie van 5 x 5 m (AHN2 5 meter maaiveld raster; ontdaan van niet-maaiveld objecten zoals bomen, gebouwen, bruggen en andere objecten). Met deze hoge resolutie is het goed mogelijk om geologische fenomenen die aan of vlak onder maaiveld liggen te herkennen en te karteren.

#### **4.8 Maaiveld- en waterbodemoogten**

De bovenkant van de ondergrondmodellen DGM, REGIS II en GeoTOP wordt gevormd door een combinatie van maaiveld (op het land) en waterbodem (waaronder het IJsselmeer, de Waddenzee, de Zeeuwse wateren en de bodems van de grote rivieren). Het maaiveld wordt grotendeels afgeleid uit het AHN. Het AHN geeft echter geen informatie over de waterbodems. Deze worden daarom afgeleid uit bathymetrische metingen (de zogenaamde "lodingen") van Rijkswaterstaat en diverse provincies en waterschappen.

Het AHN geeft een zeer gedetailleerd beeld van de hoogte van het Nederlandse maaiveld. Het detailniveau is zo hoog dat individuele gebouwen te onderscheiden zijn van hun omgeving. Verder kan vegetatie een verhogend effect hebben op de hoogtemeting. Voor geologische toepassingen is het noodzakelijk om de gegevens

nog extra te *filteren*, zodat de invloed van bebouwing en vegetatie wordt weggelaten. Tevens dienen de gegevens te worden *opgeschaald* van de oorspronkelijke 5 bij 5 m resolutie naar de gewenste 100 bij 100 m schaal.

Voor modelgebied Oostelijke Wadden is gebruik gemaakt van AHN2. Voor deze versie zijn rasterbestanden met een resolutie van 5 bij 5 m beschikbaar waarbij de bebouwing en vegetatie door Rijkswaterstaat is weg-gefilterd en vervangen door 'no-data'. Ten tijde van de ontwikkeling van modelgebied Westelijke Wadden was AHN2 nog niet beschikbaar en is AHN1 gebruikt. AHN1 beschikte echter niet over een voor stedelijke bebouwing gefilterd bestand. Voor Westelijke Wadden is de filtering daarom uitgevoerd met speciaal voor dit doel door TNO – Geologische Dienst Nederland ontwikkelde software, aangevuld met geautomatiseerde procedures (scripts) om diverse conversies uit te voeren. De opschaling naar 100 x 100 m is voor beide modelgebieden met het softwarepakket Isatis® uitgevoerd.

Het resulterende maaiveldbestand is gecombineerd met de bathymetrische gegevens tot één landsdekkend maaiveld- en waterbodemoogtebestand met een rastergrootte van 100 m. Daarnaast zijn hulpbestanden vervaardigd waarin de verdeling van land en water en de gegevensherkomst (AHN, Provincie, Waterschappen) wordt aangegeven. In totaal zijn er daarmee drie bestanden beschikbaar:

- Maaiveld- en waterbodemoogte (mv), waarbij elke cel de hoogteligging in meters ten opzichte van NAP weergeeft.
- Land-watergrens (mvlwg), waarbij elke cel met een code aangeeft of het een maaiveldhoogte (celwaarde 1) of waterbodemoogte betreft (celwaarde 2).
- Bron (mvbron), waarbij elke cel met een code aangeeft wat de herkomst van de maaiveld- of waterbodemoogte is.

#### **4.9 Diepste bathymetrie van de Waddenzee**

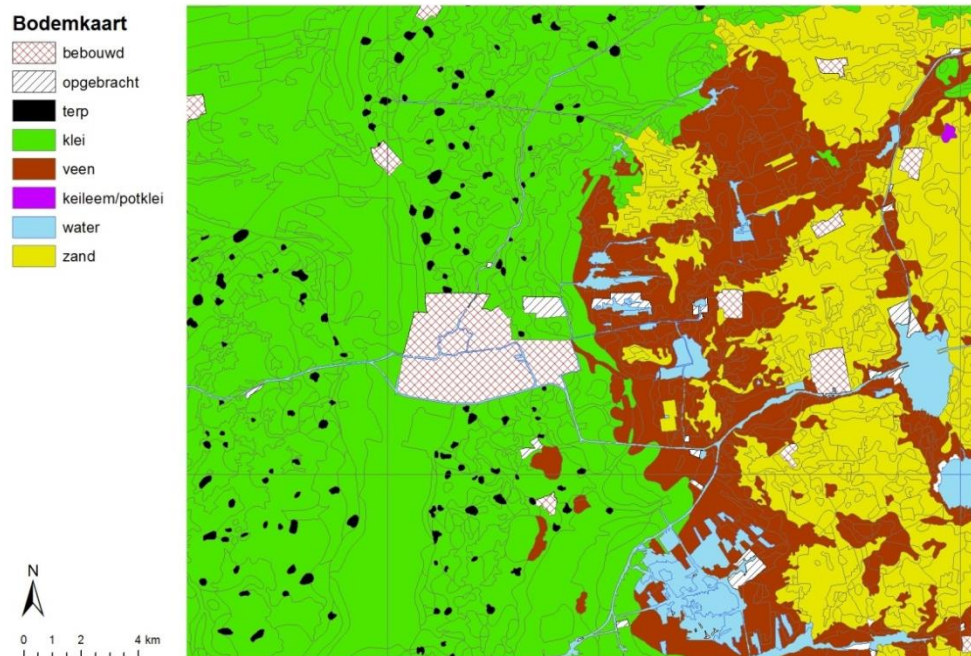
De Waddenzee is een in sedimentologisch opzicht dynamisch gebied. Door het migreren van geulen en zandplaten is de bathymetrie voortdurend aan veranderingen onderhevig. Deltares heeft voor een meerjarige tijdsperiode de bathymetrische opnamen gecombineerd en voor elke locatie in de Waddenzee (met een resolutie van 20 m) vastgesteld wat in die periode de diepste waarde was. De zanden in de Waddenzee horen in GeoTOP tot de Formatie van Naaldwijk (ongedifferentieerd). In GeoTOP is de diepste bathymetriekaart gebruikt om de minimale diepte van de basis van de Formatie van Naaldwijk vast te stellen.

#### **4.10 Bodemkaart van Nederland (BKN)**

De Bodemkaart van Nederland (BKN), een tweedimensionaal vectormodel van de in Nederland voorkomende bodems, geeft ruimtelijke informatie over de bodemopbouw tot globaal 1 m diepte. De Bodemkaart is een van de ondergrondmodellen in de BRO.

De bodemkundige informatie op de bodemkaart heeft betrekking op de aard en samenstelling van de bovengrond (grondsoort) met een verdere onderverdeling naar bodemvorming, veensoort, afwijkende lagen in het profiel, aanwezigheid van

kalk en verstoringen door vergraving en egalisatie. De kaart geeft geen bodemkundige informatie over de stedelijke gebieden. Figuur 4.10.1 geeft een voorbeeld van de bodemkaart, waarbij de tientallen bodemklassen ten behoeve van GeoTOP zijn geaggregeerd tot een klein aantal voor GeoTOP relevante klassen.

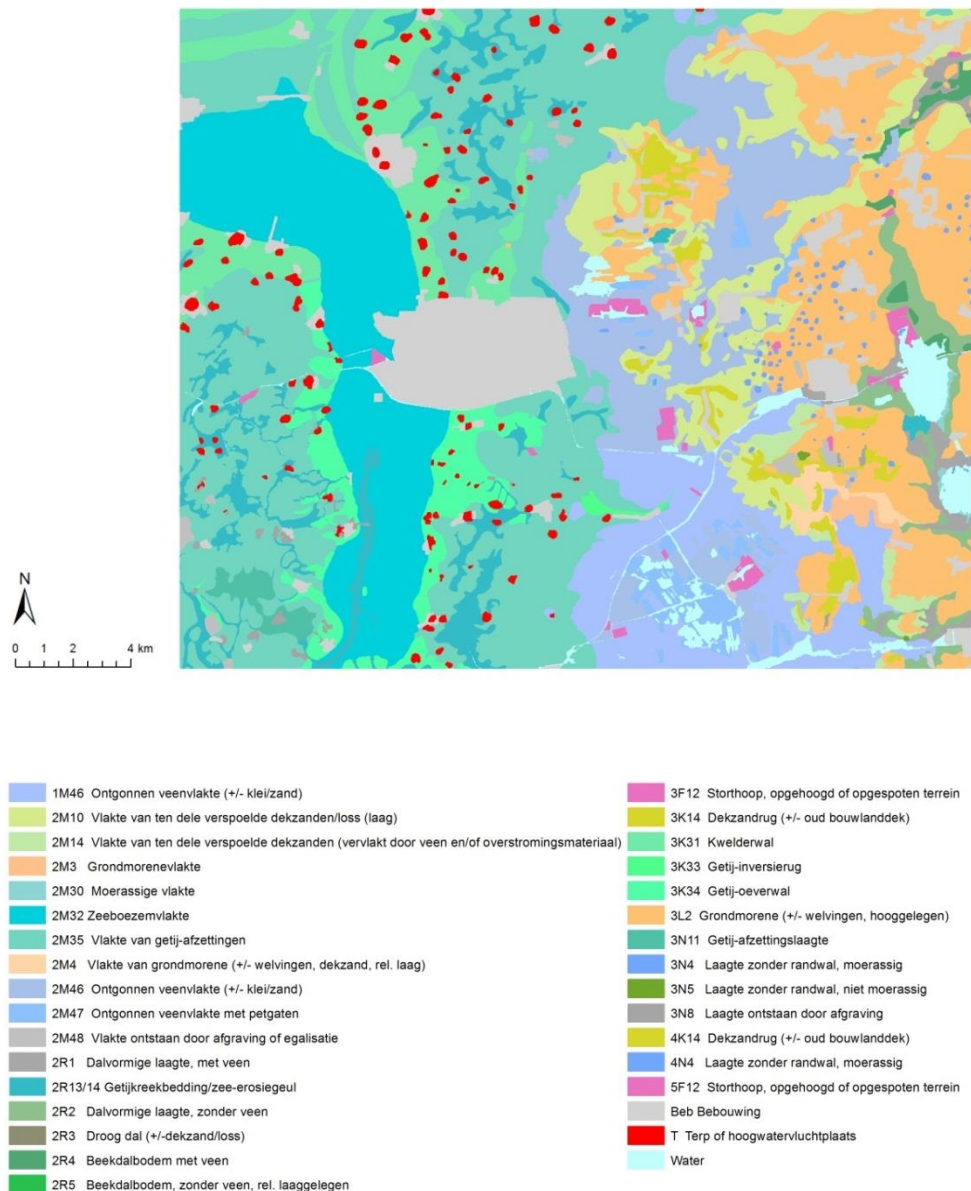


Figuur 4.10.1: Uitsnede van Bodemkaart van de omgeving van Leeuwarden. De bodemklassen zijn geaggregeerd tot een klein aantal voor GeoTOP relevante klassen.

In GeoTOP wordt de digitale versie van de bodemkaart, bestaande uit polygoenen die de grenzen van de bodemeenheden aangeven, gebruikt bij het maken van potentiële verbreidingsgrenzen van de te modelleren geologische eenheden. Door de aard van de bodemkaart gaat dit altijd om eenheden aan of direct onder het aardoppervlak. Denk aan stuifzanden van het Laagpakket van Kootwijk en beekdalafzettingen van het Laagpakket van Singraven (beide laagpakketten zijn onderdeel van de Formatie van Bostel).

#### 4.11 Geomorfologische Kaart van Nederland (GKN)

De Geomorfologische Kaart van Nederland (GKN) is een tweedimensionaal vectormodel met informatie over reliëf, ontstaanswijze en ouderdom van landschapsvormen in Nederland. Daarnaast geeft de kaart aanvullende informatie over afwijkende geologische afzettingen in de bovengrond, eventuele bijzonderheden in het reliëf en beschrijft of de landvorm onder invloed staat van actieve geomorfologische processen zoals stuivende kust- en landduinen en sedimentatie en erosie in en langs de grote rivieren en op slikken en schorren. De Geomorfologische Kaart is een van de ondergrondmodellen in de BRO. Figuur 4.11.1 geeft een voorbeeld van de kaart.



Figuur 4.11.1: Uitsnede van Geomorfologische kaart van de omgeving van Leeuwarden.

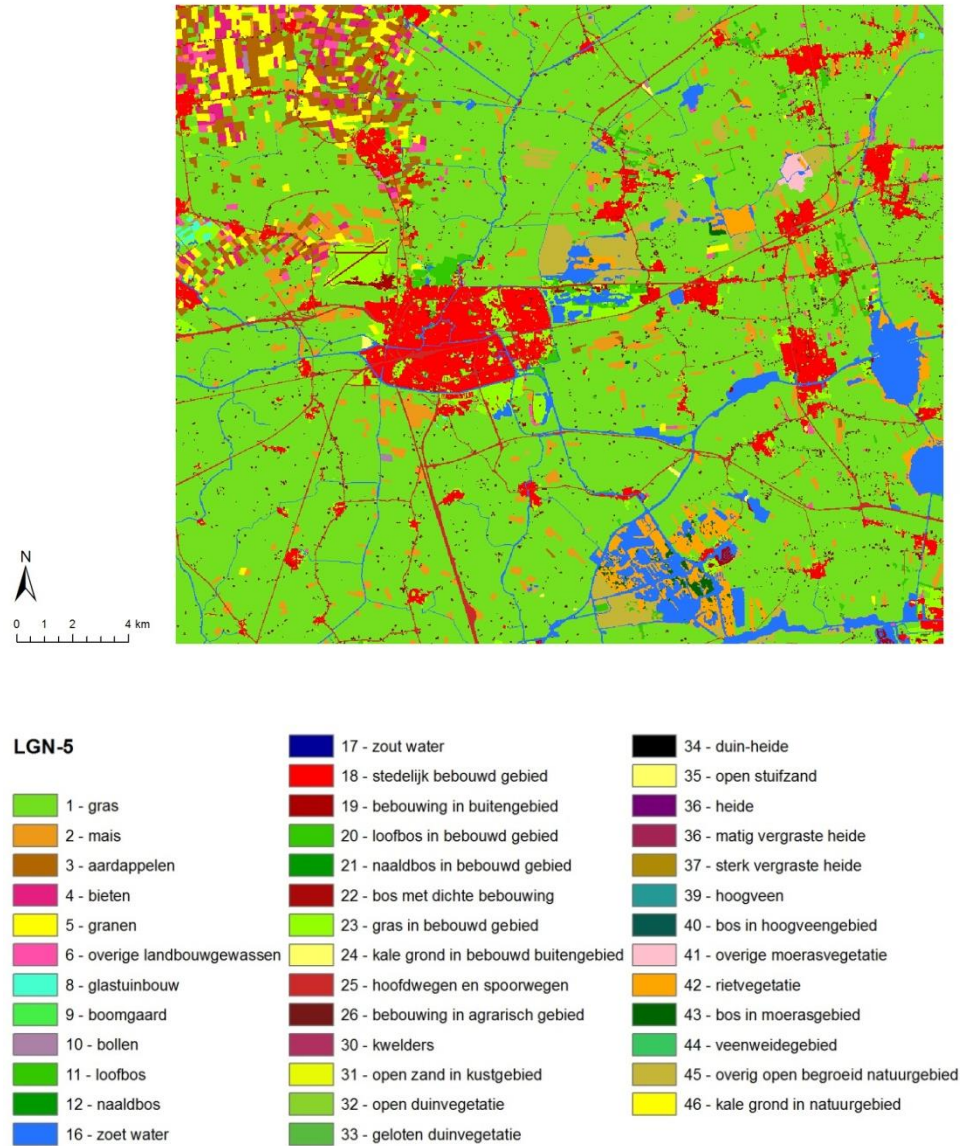
In GeoTOP wordt de digitale versie van de geomorfologische kaart, bestaande uit polygoenen die de grenzen van de geomorfologische eenheden aangeven, op een vergelijkbare manier gebruikt als de bodemkaart (zie vorige paragraaf). Net als bij de bodemkaart gaat het om eenheden die aan of direct onder het aardoppervlak voorkomen.

#### 4.12 Landelijk Grondgebruik Nederland

Het Landelijk Grondgebruik Nederland (LGN, <http://www.lgn.nl>) is een landsdekkend rasterbestand met een resolutie van 25 m waarin 39 vormen van landgebruik zijn onderscheiden (Figuur 4.12.1). In het bestand worden de belangrijkste landbouwgewassen, een aantal natuurklassen en stedelijke klassen onderscheiden. Versie 5 (LGN5) is vervaardigd met behulp van satellietbeelden van



2004 en 2005 en andere relevante ruimtelijke informatie. Sinds 1986 wordt het bestand met een frequentie van eens per 3-5 jaar gemaakt. LGN is een product van het Centrum voor Geo-informatie dat onderdeel uitmaakt van het Wageningen-Universiteit en Research centrum.



Figuur 4.12.1: Uitsnede van LGN5 van de omgeving van Leeuwarden.

In de modellering wordt LGN5 gebruikt om de verbreiding van antropogene ophogingen mede te bepalen. Daarbij worden de 39 landgebruik klassen geherclassificeerd naar 2 klassen: stedelijk gebied en landelijk gebied. Stedelijk gebied zijn de klassen 18 t/m 26:

- 18 stedelijk bebouwd gebied
- 19 bebouwing in buitengebied
- 20 loofbos in bebouwd gebied
- 21 naaldbos in bebouwd gebied
- 22 bos met dichte bebouwing
- 23 gras in bebouwd gebied
- 24 kale grond in bebouwd buitengebied
- 25 hoofdwegen en spoorwegen
- 26 bebouwing in agrarisch gebied

De overige LGN klassen zijn landelijk gebied en worden in GeoTOP niet gebruikt.

#### 4.13 Veencontourkaart en verdwenen veen

De veencontourkaart is een van de Bodemkaart van Nederland, schaal 1 : 50 000 (versie 2006) afgeleid bestand dat het voorkomen van veengronden en moerige gronden weergeeft. In de periode 2001 tot 2004 is bij ca. 100 000 ha veengronden die in de nabijheid van zandgronden voorkomen, de actualiteit nagegaan. Hieruit bleek dat ca. 47% van het oorspronkelijk gekarteerde oppervlakte nu geen veengrond meer is, doordat er veen geoxideerd is waardoor de veenlagen nu veel dunner of geheel verdwenen zijn. Recenter zijn ook de veenvoorkomens van Noord-Nederland geactualiseerd in een 'verdwenen veen' kaart van het Wageningen-Universiteit en Research centrum.

In GeoTOP wordt het bestand gebruikt bij het vaststellen van de verbreiding van aan het oppervlak voorkomende venen, met name de het Hollandveen Laagpakket en het Laagpakket van Griendtsveen, beide onderdeel van de Formatie van Nieuwkoop. Hierbij wordt speciaal gelet op de hierboven beschreven actualiteit van het veenvoorkomen: bij het interpreteren van oudere boorbeschrijvingen wordt gebruik gemaakt van de kaart vóór de actualisering (waar was veen aanwezig ten tijde van het zetten van de boring) terwijl bij het maken van het lagenmodel gebruik wordt gemaakt van de geactualiseerde kaart (waar is momenteel veen aanwezig).

#### 4.14 Topografische kaart

Als algemene topografische ondergrond en referentie wordt gebruik gemaakt van de Topografische kaart 1:50.000 van het Kadaster ([www.kadaster.nl](http://www.kadaster.nl)). Dit product heet TOP50raster en wordt via PDOK ([www.pdok.nl](http://www.pdok.nl)) geleverd als gegeoreferende rasterkaarten (GeoTIFF) in de vorm van kaartbladen van (meestal) 20 bij 25 kilometer (Figuur 4.14.1). De kaarten worden bij het maken van GeoTOP gebruikt en daarnaast ook uitgeleverd aan gebruikers van de SubsurfaceViewer<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> De SubsurfaceViewer is een programma voor het 3D visualiseren van de modellen DGM, REGIS II en GeoTOP en de bijbehorende geïnterpreteerde boorbeschrijvingen. Het programma is voor TNO ontwikkeld door de Duitse firma INSIGHT Geologische Software Systeme GmbH ([www.subsurfaceviewer.com](http://www.subsurfaceviewer.com)).

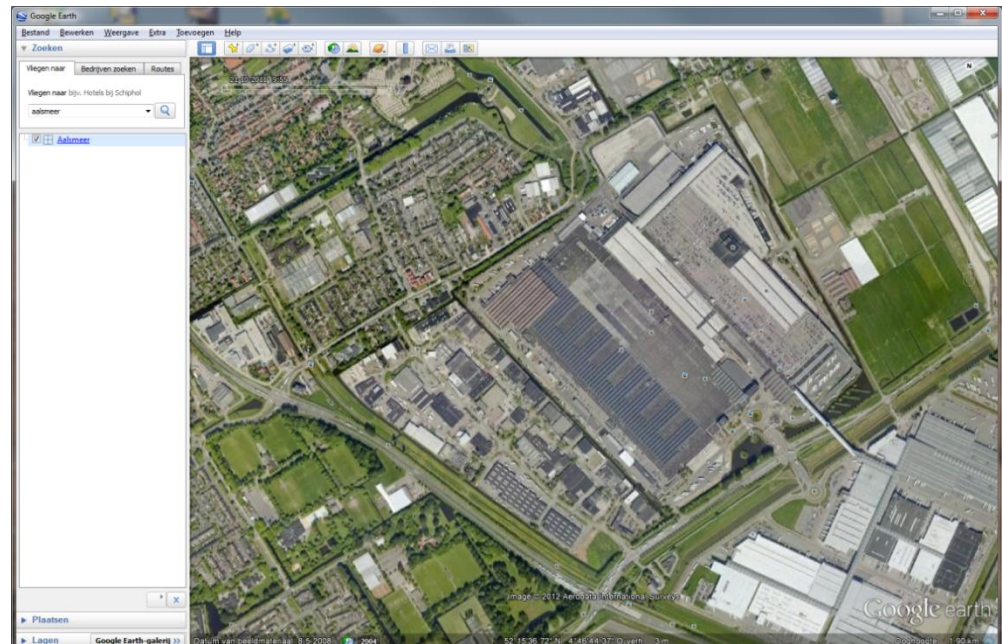




Figuur 4.14.1: Kaartblad 07w van TOP50raster (versie november 2018) van het Kadaster met de stad Groningen. Gebiedsomsang is 20 bij 25 kilometer.

#### 4.15 Luchtfoto's

Bij het analyseren van geologische verschijnselen aan of nabij het aardoppervlak wordt gebruik gemaakt van luchtfoto's van Google Earth (<http://www.google.com/intl/nl/earth/index.html>) en Bing Maps (<http://www.bing.com/maps>). Een van de toepassingen is het verifiëren of een afwijkende maaiveldhoogte wordt veroorzaakt door bebouwing (Figuur 4.15.1).



Figuur 4.15.1: Gebruik van Google Earth: een afwijkende maaiveldhoogte van 12 m boven NAP bij Aalsmeer blijkt na verificatie veroorzaakt te worden door het dak van de bloemenveiling.

#### 4.16 Lithostratigrafische Nomenclator Ondiepe Ondergrond

De Lithostratigrafische Nomenclator van de Ondiepe Ondergrond ([www.dinoloket.nl/nomenclator-ondiep](http://www.dinoloket.nl/nomenclator-ondiep); Figuur 4.16.1) omvat de definities van de lithostratigrafische eenheden die voorkomen in de bovenste honderden meters van de ondergrond van het vasteland van Nederland. Van iedere eenheid worden een uitgebreide beschrijving, een verbreidingskaart en de stratotypes getoond. De tekst beschrijft onder meer de lithologische kenmerken, de boven- en ondergrens van de betreffende lithostratigrafische eenheid en de relatie tot niet meer in gebruik zijnde stratigrafische terminologie.



| Chrono-stratigrafie |             | Lithostratigrafische eenheden op formatieniveau |                        |                         |                          |                      |                        |                     |                        |  |
|---------------------|-------------|---|------------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------|------------------------|---------------------|------------------------|--|
|                     |             | Marien  | Fluviaal               |                         |                          |                      | Glaciaal               | Overig              |                        |  |
|                     |             |   | Oostelijke rivieren    | Rijn                    | Maas                     | Belgische rivieren   |                        |                     |                        |  |
| Kwartair            | Holoceen    |   | Formatie van Naaldwijk |                         | Formatie van Echteld     |                      | Kreekrak Formatie      |                     | Formatie van Nieuwkoop |  |
|                     |             | "Laat"  | Eem Formatie           |                         | Formatie van Kreftenheye |                      | Formatie van Koewacht  | Formatie van Drente | Woudenberg             |  |
|                     | Pleistocene | "Midden"  |                        | Formatie van Appelscha  | Formatie van Urk         | Formatie van Beegden |                        | Formatie van Peelo  | Formatie van Drachten  |  |
|                     |             |   |                        | Formatie van Peize      | Formatie van Waalre      |                      | Formatie van Stramproy |                     |                        |  |
|                     |             | "Vroeg"   |                        | Formatie van Maassluis  |                          |                      |                        |                     |                        |  |
|                     |             |   |                        |                         |                          |                      |                        |                     |                        |  |
|                     | Neogeen     | Pliocene  |                        | Formatie van Oosterhout | Kiezeloobiet Formatie    |                      |                        |                     |                        |  |
|                     |             | Mioceen   |                        | Formatie van Breda      | Formatie van Inden       |                      |                        |                     | Formatie van Velle     |  |
|                     | Paleogeen   | Oligoceen                                       |                        | Fm. v. Veldhoven        |                          |                      |                        |                     |                        |  |
|                     |             |   |                        | Rupel Formatie          |                          |                      |                        |                     |                        |  |
| Eocene              |             |   | Formatie van Dongen    |                         |                          |                      |                        |                     |                        |  |
| Paleoceen           |             |   | Formatie van Landen    |                         |                          |                      |                        |                     |                        |  |

Figuur 4.16.1: Lithostratigrafische eenheden op formatieniveau.

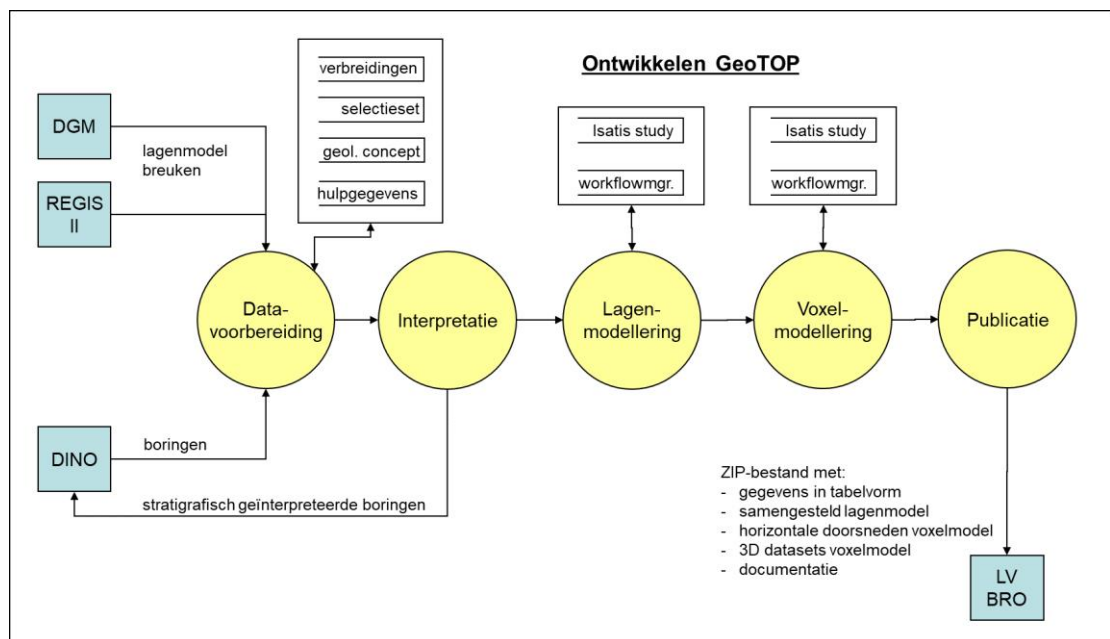
De uitgangspunten van de lithostratigrafische indeling staan beschreven in het rapport 'De lithostratigrafische indeling van Nederland - Formaties uit het Tertiair en Kwartair' (Weerts et al., 2000). Het boek 'De ondergrond van Nederland' (De Mulder et al., 2003) vormt een goede inleiding op de geologie van Nederland en geeft een beknopte beschrijving van de onderscheiden lithostratigrafische eenheden.

De lithostratigrafische eenheden vormen de basis van de ondergrondmodellen GeoTOP, DGM en REGIS II. De in de modellen gebruikte geologische eenheden komen voor een belangrijk deel overeen met lithostratigrafische eenheden. Zoals in hoofdstuk 2 echter al is beschreven, komt een eenheid in de modellen niet altijd één-op-één overeen met een lithostratigrafische eenheid volgens de Nomenclator. Het kan namelijk nodig zijn om twee lithostratigrafische eenheden samen te nemen tot één modeleenheid. Zo worden de Formatie van Peize en de Formatie van Waalre gecombineerd in één modeleenheid. De tegenovergestelde situatie, waar een lithostratigrafische eenheid wordt gesplitst in een of meerdere modeleenheden komt ook voor. Bijvoorbeeld de Formatie van Kreftenheye wordt in twee verschillende eenheden, elk met een andere stratigrafische positie ten opzichte van de Eem Formatie, gemodelleerd.

## 5 Procesbeschrijving algemeen

### 5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt het proces van het maken van GeoTOP beschreven. Het proces bestaat uit vijf werkprocessen zoals weergegeven in Figuur 5.1.1. Het proces wordt *per modelgebied* uitgevoerd. In deze inleiding worden de werkprocessen kort beschreven. In de navolgende paragrafen 5.2 – 5.6 wordt elk van de vijf werkprocessen verder onderverdeeld in processtappen.



Figuur 5.1.1: Processchema voor het ontwikkelen van een modelgebied van GeoTOP. De gele cirkels stellen werkprocessen voor waarin de werkzaamheden plaatsvinden. Inkomende pijlen stellen gegevens voor die het betreffende werkproces gebruikt; uitgaande pijlen zijn gegevensproducten van het werkproces. De blauwe blokjes zijn externe gegevensbronnen of gegevensontvangers buiten GeoTOP. De witte rechthoeken zijn dataverzamelingen die door GeoTOP gemaakt, opgeslagen en onderhouden worden.

Het werkproces **Datavoorbereiding** houdt zich bezig met de datavoorbereiding:

- Extractie van alle boringen uit de DINO databank in het te modelleren gebied.
- Kwaliteitsfiltering boringen (maken van een 'selectieset'; deze selectieset is beduidend groter dan die van DGM en REGIS II).
- Maken van een conceptueel model van de te modelleren geologische eenheden (bestaande uit een of meerdere schematische dwarsdoorsneden met korte toelichting). Het conceptueel model laat zien welke eenheden in het modelgebied worden onderscheiden en wat de stratigrafische opeenvolging en de onderlinge relaties zijn (bijvoorbeeld een eenheid ligt altijd op of juist onder een andere eenheid; waar de ene eenheid voorkomt, komt de andere eenheid niet voor, etc.).
- Maken van potentiële verbreidingsgrenzen (polygonen).

- Maken van diverse hulpbestanden, o.a. uitsneden en interpretaties van het Actueel Hoogtebestand Nederland en een kartering van het Top-Pleistoceen.

In GeoTOP worden verbreidingsgrenzen gemaakt voor eenheden op laagpakketniveau die (nog) niet voorkomen in DGM en REGIS II. Voor de overige laagpakketten en formatieverbreidingen wordt gebruik gemaakt van het DGM en REGIS II lagenmodel.

De basisgegevens worden in het werkproces **Interpretatie** gebruikt om aan elk lithologisch interval van de boringen een geologische eenheid toe te kennen. Dit levert een set van geïnterpreteerde boorbeschrijvingen op die als onderdeel van het BRO-GeoTOP model wordt uitgeleverd.

De eigenlijke modellering van GeoTOP bestaat uit de werkprocessen **Lagenmodellering** en **Voxelmodellering**. Beide werkprocessen maken gebruik van het softwarepakket Isatis® van Geovariances en een bijbehorende *workflow manager* waarmee Isatis® batchgewijs kan worden aangestuurd. In **Lagenmodellering** worden de vlakken van het lagenmodel (vergelijkbaar met dat van DGM en REGIS II) berekend, waarbij gerekend wordt met alle beschikbare boringen die het kwaliteitsfilter zijn gepasseerd. Behalve de vlakken zelf wordt ook de onzekerheid in de vlakken berekend. In **Voxelmodellering** wordt de ruimte tussen de lagen van het lagenmodel opgevuld met een lithoklasse inclusief een aantal maten van onzekerheid. In beide werkprocessen wordt een kwaliteitscontrole door geologische experts uitgevoerd. Zowel het lagenmodel als het voxelmodel wordt opgenomen in het BRO-GeoTOP model.

In het werkproces **Publicatie** worden de door de hierboven beschreven werkprocessen aangemaakte producten geschikt gemaakt om te publiceren. In dit rapport beperken we ons daarbij tot de bestanden in het ZIP-bestand voor de Basisregistratie Ondergrond.

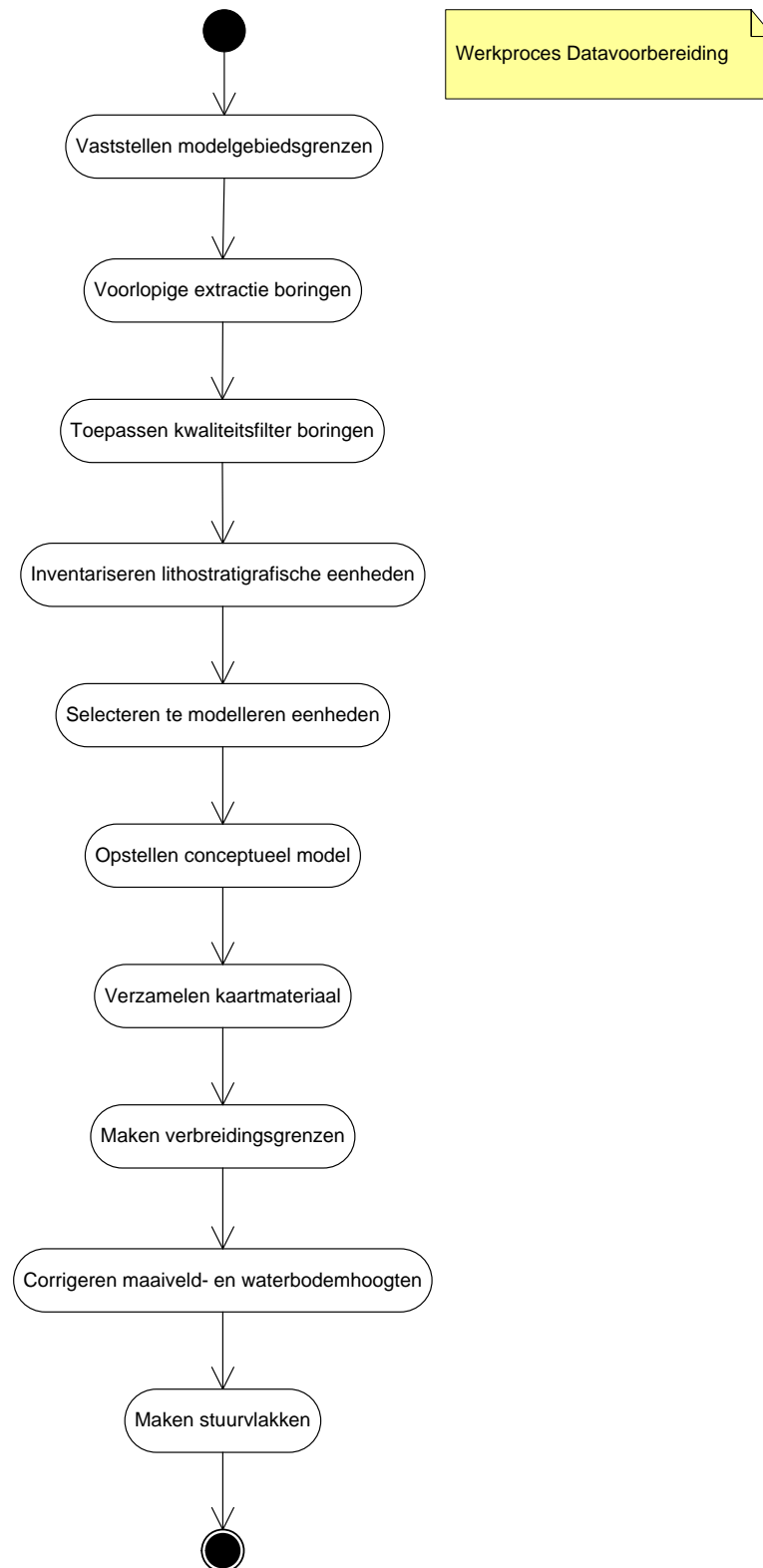
## 5.2 Datavoorbereiding

Het werkproces **Datavoorbereiding** houdt zich bezig met de datavoorbereiding en bestaat uit de volgende processtappen (Figuur 5.2.1):

- Vaststellen modelgebiedsgrenzen.
- Voorlopige extractie van boringen uit de DINO databank en andere gegevensbronnen.
- Toepassen kwaliteitsfilter boringen.
- Inventariseren stratigrafische eenheden.
- Selecteren van de te modelleren eenheden.
- Opstellen conceptueel model.
- Verzamelen kaartmateriaal.
- Maken verbreidingsgrenzen.
- Corrigeren maaiveld- en waterbodemoogten.
- Maken stuurvlakken.

Deze processtappen worden iteratief uitgevoerd. Bij het maken van verbreidingsgrenzen van de te modelleren eenheden kan bijvoorbeeld geconcludeerd worden dat het conceptueel model moet worden aangepast. Ook

kan tijdens uitvoering van het werkproces de modelgebiedsgrens nog aangepast worden, waarna het noodzakelijk is om de voorlopige extractie en kwaliteitsfiltering opnieuw uit te voeren.



Figuur 5.2.1: Processtappen in het werkproces **Datavoorbereiding**.

### 5.2.1 *Vaststellen modelgebiedsbegrenzing*

Het modelgebied heeft een horizontale begrenzing, een verticale begrenzing aan de onderzijde en een verticale begrenzing aan de bovenzijde van het modelgebied.

De **verticale begrenzing aan de bovenkant** wordt bepaald door het maaiveld- en waterbodemhoogtebestand (zie hoofdstuk 4). Dit bestand is een raster met cellen van 100 x 100 m. Elke rastercel geeft de hoogteligging van het maaiveld resp. de waterbodem in meters ten opzichte van NAP.

De **verticale begrenzing aan de onderkant** wordt bepaald door een raster met cellen van 100 x 100 m. Elke rastercel geeft de hoogteligging van de ondergrens weer in meters ten opzichte van NAP. In Oostelijke Wadden en Westelijke Wadden geldt een vaste ondergrens van 50 m onder NAP.

De **horizontale begrenzing** wordt eveneens bepaald door een raster met cellen van 100 x 100 m. Elke rastercel geeft met een indicator aan of de cel wel of niet in het modelgebied ligt. De horizontale begrenzingen van het modelgebied wordt behalve in een raster ook in een shapefile vastgelegd.

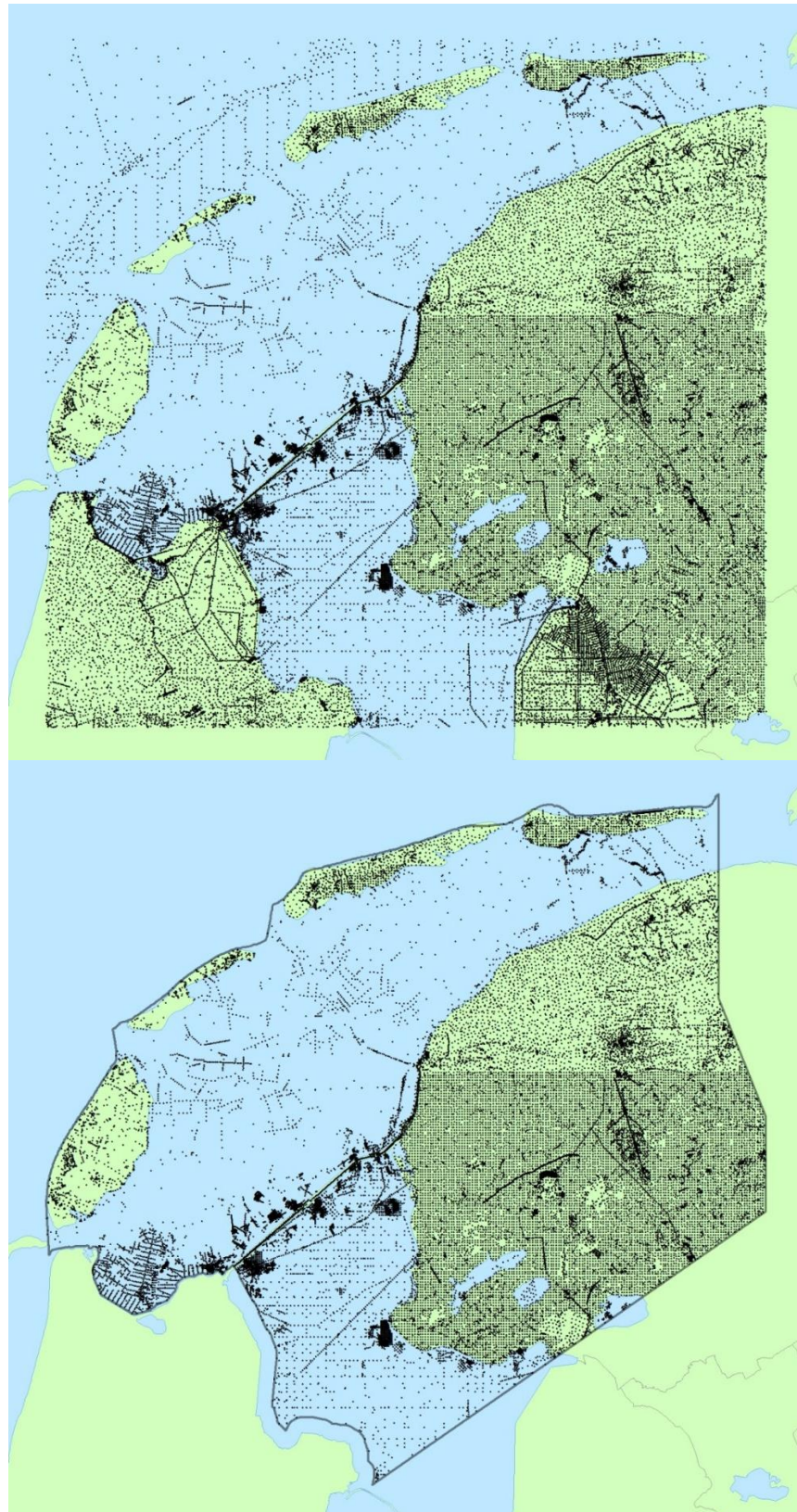
Naast bovengenoemde grenzen wordt ook de definitie van het **blokvormige grid** bepaald dat het modelgebied omvat, namelijk de oorsprong en het aantal voxels in de x-, y- en z-richting. De dimensies van een voxel zijn voor GeoTOP altijd 100 x 100 x 0,5 m. De horizontale grenzen van de modelgebieden worden niet willekeurig gekozen, maar volgen een (geologisch) onderbouwde rationale.

Het vaststellen van de modelgebiedsbegrenzing is een handmatig proces. Voor de vastlegging wordt ArcGIS gebruikt als hulpmiddel.

### 5.2.2 *Voorlopige extractie van boringen*

Boringen die in het modelgebied liggen worden geëxtraheerd uit de DINO databank en eventuele andere gegevensbronnen. Het betreft hier een *voorlopige* extractie; de *definitieve* extractie vindt later plaats in het werkproces Interpretatie.

Om de **boorbeschrijvingen** te kunnen extraheren wordt eerst bepaald welke boringen zich binnen de grenzen van het rechthoekige grid bevinden dat het modelgebied omvat (query op de databank met een selectie op (x,y)-coördinaten). Van deze boringen wordt vervolgens vastgesteld welke zich binnen de shapefile bevinden die het modelgebied begrenst (GIS-bewerking; Figuur 5.2.2).



Figuur 5.2.2: Boorlocaties in een rechthoekig grid (boven) en binnen een shapfile van het modelgebied Westelijke Wadden (onder).

Voor elk van de boringen wordt nu de boorbeschrijving geëxtraheerd. Dit levert een bestand op met per boring, per interval een lithologische beschrijving in een aantal kenmerken (attributen). De geëxtraheerde attributen zijn eerder beschreven in paragraaf 4.2.2.

De extractie van lithologische kenmerken wordt aangevuld met een extractie van lithostratigrafische interpretaties. Het betreft hier lithostratigrafische interpretaties die handmatig door een geoloog aan de boorbeschrijving zijn toegevoegd. In DINO is sprake van twee verschillende lithostratigrafische interpretaties: een volgens de definities van Doppert et al. (1975), en een volgens de definities van De Mulder et al. (2003). Beide interpretaties worden geëxtraheerd en toegevoegd aan de lithologische kenmerken.

De voorlopige extractie van boorbeschrijvingen is een geautomatiseerd proces.

### 5.2.3 *Toepassen kwaliteitsfilter boorbeschrijvingen*

Uitgangspunt voor GeoTOP is dat alle boorbeschrijvingen worden meegenomen in de modellering. Voor een deel van de boorbeschrijvingen geldt echter dat de kwaliteit zodanig laag is, dat GeoTOP er niet beter maar slechter door zou worden. Om deze boorbeschrijvingen te traceren en uit te sluiten worden kwaliteitsfilters toegepast.

Bij de extractie van **boringen** is impliciet al een eerste kwaliteitsfilter toegepast. Boringen zonder boorbeschrijving (alleen kopgegevens) en boringen zonder maaiveld, einddiepte of locatiegegevens worden niet geselecteerd en daarmee direct uitgesloten.

Vervolgens worden alle boorbeschrijvingen onderworpen aan een geautomatiseerd uitgevoerde kwaliteitscheck. Op dit moment wordt de kwaliteit bepaald door te kijken naar de dikte van de intervallen in de eerste 30 m van de boorbeschrijving. (Een interval bevindt zich in de eerste 30 m als de top zich niet meer dan 30 m onder het maaiveld van de boring bevindt.) Van deze intervallen wordt de maximale dikte en de gemiddelde dikte bepaald. Boringen met een maximaal dikte-interval van meer dan 7 m en/of een gemiddeld dikte-interval van meer dan 3.5 m komen niet door het kwaliteitsfilter. De parameters 7 m en 3.5 m zijn ervaringscijfers.

Als de boring echter in het kustgebied ligt, dan geldt als criterium een maximale dikte van meer dan 9 m. De gemiddelde dikte speelt in het kustgebied geen rol. Het kustgebied is gedefinieerd in een shapefile die de begrenzing van duin- en strandzanden langs de Noordzeekust (inclusief de Noordzeestranden van de Waddeneilanden) aangeeft.

Het is mogelijk dat in de toekomst de criteria aangepast of uitgebreid gaan worden, bijvoorbeeld door meer te differentiëren naar geologische regio. Boringen die worden uitgesloten worden vastgelegd in een lijst met uit te sluiten boornummers, met een (korte) omschrijving van de reden waarom ze uitgesloten zijn. Deze lijst wordt in latere modelleerstappen nog aangevuld. Afhankelijk van het modelgebied wordt circa 5% van de boringen op basis van het automatische kwaliteitsfilter uitgesloten.

Het toepassen van de kwaliteitsfilters op boringen is een grotendeels geautomatiseerd proces.



#### 5.2.4 *Inventariseren lithostratigrafische eenheden*

In deze processtap wordt onderzocht welke lithostratigrafische eenheden er in het modelgebied voorkomen. Een belangrijk gegeven daarbij is de extractie van boringen die al voorzien zijn van een lithostratigrafische interpretatie. Daarnaast wordt bekeken welke geologische eenheden er volgens DGM binnen de horizontale en verticale grenzen van het modelgebied voorkomen.

Het resultaat van dit onderzoek is een document waarin de in het gebied voorkomende lithostratigrafische eenheden zijn opgesomd, volgens de lithostratigrafische indeling van De Mulder et al. (2003).

Het inventariseren van lithostratigrafische eenheden is een handmatig proces waarbij geologische kennis van het modelgebied nodig is. Hulpmiddelen zijn Excel (voor het sorteren, filteren en analyseren van geïnterpreteerde boorbeschrijvingen), de lagenmodellen van DGM en REGIS II en de Lithostratigrafische Nomenclator van de Ondiepe Ondergrond.

#### 5.2.5 *Selecteren te modelleren eenheden*

Op basis van de inventarisatie wordt besloten hoe de in het gebied voorkomende lithostratigrafische eenheden in het model gerepresenteerd worden. Beslissingen die in deze processtap worden genomen zijn onder andere:

- Opsplitsen van stratigrafische eenheden die in meerdere niveau's voorkomen met een andere eenheid ertussen. Een voorbeeld is de Formatie van Echteld die in Zuid-Holland zowel boven als onder het Hollandveen Laagpakket van de Formatie van Nieuwkoop voorkomt. De Formatie van Echteld is daarom gemodelleerd in twee eenheden.
- Samenvoegen van stratigrafische eenheden die moeilijk van elkaar te onderscheiden zijn. Met 'moeilijk' wordt hier bedoeld dat het in het werkproces **Interpretatie** niet mogelijk is om de eenheden op geautomatiseerde wijze van elkaar te onderscheiden. Een voorbeeld is het samenvoegen van de Formaties van Peize en Waalre tot één modeleenheid. Deze formaties zijn in centraal Nederland op complexe wijze met elkaar vertand.
- Het toevoegen van extra modeleenheden die geen lithostratigrafische eenheid zijn. Het belangrijkste voorbeeld zijn de Holocene geulsystemen die als aparte modeleenheden onderscheiden worden.

Het selecteren van te modelleren eenheden is een handmatig proces waarbij geologische kennis van het modelgebied nodig is. Hulpmiddelen zijn Excel, de lagenmodellen van DGM en REGIS II en de Lithostratigrafische Nomenclator van de Ondiepe Ondergrond.

#### 5.2.6 *Opstellen conceptueel model*

De te modelleren eenheden en hun onderlinge stratigrafische relaties worden vastgelegd in een of meerdere conceptuele profielen (verticale dwarsdoorsneden) door het modelgebied inclusief een korte toelichting.

Het opstellen van een conceptueel model is een handmatig proces waarbij geologische kennis van het modelgebied nodig is. Het profiel wordt getekend in een tekenpakket.

### 5.2.7 Verzamelen kaartmateriaal

Voor het maken van de verbreidingsgrenzen wordt gebruik gemaakt van digitaal basismateriaal zoals de Geomorfologische kaart 1:50.000, de Geologische kaart 1:50.000, de Bodemkaart 1:50.000, LGN5, het maaiveld- en waterbodemoogtebestand en het AHN. Voor het kaartmateriaal van DGM en REGIS II wordt in deze processtap vastgesteld welke versie voor het modelgebied het meest geschikt is. In de regel is dat de meest recente versie.

Bovengenoemde landelijke of regionale brongegevens zijn in hoofdstuk 4 uitvoeriger beschreven. Afhankelijk van het modelgebied wordt er nog aanvullend, lokaal kaartmateriaal verzameld. Behalve kaartmateriaal wordt ook literatuur over de geologie van het modelgebied verzameld.

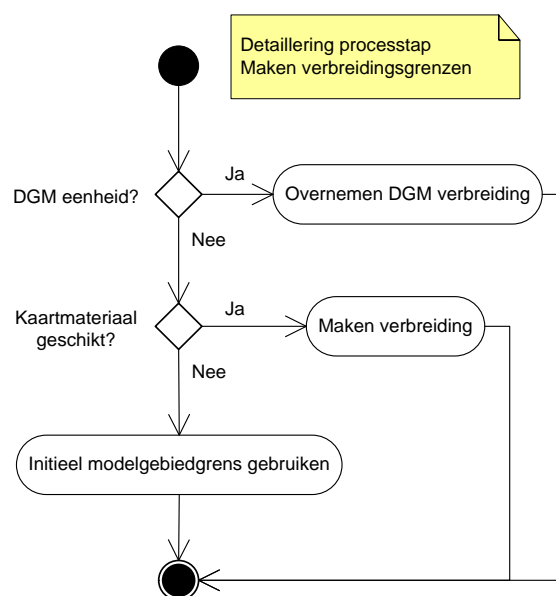
Van al het digitale kaartmateriaal worden uitsneden gemaakt voor de horizontale begrenzing van het modelgebied. In een aantal gevallen worden de kaarten vereenvoudigd. Zo worden in de bodemkaart bodemklassen geaggregeerd tot voor GeoTOP relevante bodemklassen (zie hoofdstuk 4 voor een illustratie).

Het verzamelen van het kaartmateriaal is een handmatig proces. Voor het maken van uitsneden van het digitale kaartmateriaal en het eventueel vereenvoudigen ervan wordt ArcGIS gebruikt.

### 5.2.8 Maken verbreidingsgrenzen

Voor elke te modelleren geologische eenheid wordt een verbreidingsgrens (shapefile) gemaakt. Deze verbreidingsgrens bakent het gebied af waarbinnen in werkproces Interpretatie (zie paragraaf 5.3) de boorbeschrijvingen onderzocht worden op het voorkomen van de eenheid. Tevens vormen ze bij de modellering de maximale of potentiële verbreiding van de eenheid: buiten de verbreiding komt de eenheid *niet* voor, binnen de verbreiding *kan* de eenheid voorkomen.

Bij het maken van verbreidingsgrenzen wordt onderscheid gemaakt tussen “DGM-eenheden” en “niet-DGM eenheden” (Figuur 5.2.3).

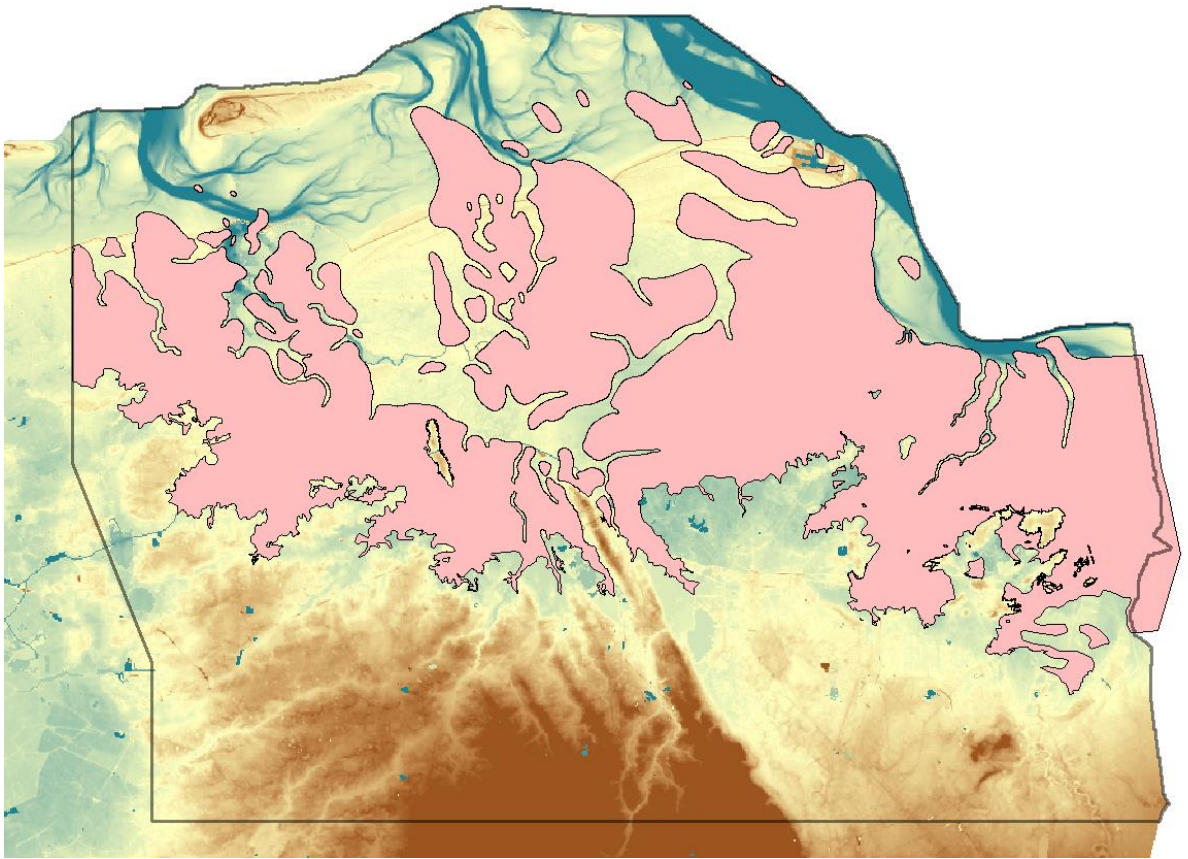


Figuur 5.2.3 Detaillering van processtap Maken verbreidingsgrenzen.

**DGM eenheden** zijn te modelleren eenheden waarvan DGM al een verbreidingsgrens bevat. Deze verbreidingsgrens wordt in GeoTOP ongewijzigd overgenomen. Voorbeelden zijn de verbreidingsgrenzen van de Formaties van Kreftenheye en Sterksel.

**Niet-DGM eenheden** zijn eenheden die in de gebruikte DGM versie niet onderscheiden worden. Dit zijn vooral Holocene eenheden, zoals de verschillende laagpakketten van de Formaties van Naaldwijk en Nieuwkoop, maar ook Pleistocene eenheden zoals het Laagpakket van Gieten van de Formatie van Drente (dit laagpakket omvat de glaciële keileem afzettingen). Van alle niet-DGM eenheden waarvan de verbreiding kan worden vastgesteld uit het verzamelde kaartmateriaal wordt in deze processtap een verbreidingsgrens gemaakt. Dit gebeurt door een gebiedsdeskundig geoloog aan de hand van het kaartmateriaal, de literatuur en de boorbeschrijvingen met een lithostratigrafische interpretatie. De gehanteerde schaal bij het maken van verbreidingsgrenzen is circa 1:50.000; grotere schalen (bijvoorbeeld 1:10.000) zijn gezien de resolutie van het model (100 x 100 m) niet nodig.

Er zijn ook eenheden waarvoor op basis van het kaartmateriaal **geen verbreiding**, of alleen een verbreiding van onvoldoende kwaliteit, kan worden gemaakt. Voor deze eenheden wordt in eerste instantie de potentiële verbreiding gelijk gesteld aan de modelgebiedsgrens. In werkproces **Interpretatie** wordt de eenheid in de boorbeschrijvingen dan ook in eerste instantie gezocht in het hele modelgebied. Dit resulteert in een 'puntenwolk' van locaties waar de eenheid wel en niet is aangetroffen. Op basis van deze puntenwolk wordt dan alsnog de potentiële verbreiding vastgesteld. Een voorbeeld is de Basisveen Laag van de Formatie van Nieuwkoop (Figuur 5.2.4). Zie verder werkproces Interpretatie.



Figuur 5.2.4: Verbreiding van de Basisveen Laag (roze gebied) in modelgebied Oostelijke Wadden (grijze lijn). Achtergrondkaart is het maaiveld- en waterbodemoogtebestand van GeoTOP v1.3.

De verbreiding van **antropogene afzettingen** wordt afgeleid uit het bestand Landelijk Grondgebruik Nederland (LGN5, zie hoofdstuk 4). Dit bestand is een rasterkaart met een resolutie van 25 x 25 m. De kaart bevat 39 landgebruik-klassen die in deze processtap met behulp van GIS operaties worden geherclassificeerd naar 2 klassen: stedelijk gebied en landelijk gebied. De eerste klasse geeft de verbreiding van het antropogeen weer. Van de 39 klassen worden de klassen 18 t/m 26 als stedelijke gebieden aangemerkt:

- 18 stedelijk bebouwd gebied
- 19 bebouwing in buitengebied
- 20 loofbos in bebouwd gebied
- 21 naaldbos in bebouwd gebied
- 22 bos met dichte bebouwing
- 23 gras in bebouwd gebied
- 24 kale grond in bebouwd buitengebied
- 25 hoofdwegen en spoorwegen
- 26 bebouwing in agrarisch gebied

Alle overige klassen zijn landelijk gebied en worden in GeoTOP niet gebruikt.

Na de herclassificatie wordt het raster van 25 x 25 m opgeschaald naar de GeoTOP resolutie van 100 x 100 m waarbij de klasse die het meest voorkomt wordt gekozen. In tegenstelling tot de andere verbreidingsgrenzen is die van het antropogeen een raster.

Het maken van verbreidingsgrenzen is een handmatig proces. Hulpmiddel daarbij is ArcGIS.

De in ArcGIS uitgevoerde GIS-operaties, zoals het selecteren en combineren van informatie uit de verschillende kaarten, worden vastgelegd in Python-scripts. Deze vastlegging zorgt ervoor dat het samenstellen van de verbreidingsgrenzen reproduceerbaar is vanuit de bronbestanden.

Tot slot worden de voor het modelgebied gemaakte verbreidingsgrenzen toegevoegd aan een set landelijke verbreidingsgrenzen van alle in GeoTOP gemodelleerde modeleenheden (niet-DGM). Dit waarborgt de aansluiting van verbreidingen tussen de modelgebieden.

#### 5.2.9 *Corrigeren maaiveld- en waterbodemoogten*

Zoals in paragraaf 4.8 is beschreven zijn bij het maken van het maaiveld- en waterbodemoogtebestand daken van gebouwen door een geautomatiseerd proces gefilterd uit het bronbestand AHN. Bij deze filtering kunnen lokaal fouten worden gemaakt. Het betreft vooral daken van grote gebouwen zoals ziekenhuizen en grote bedrijfspanden zoals IKEA en de bloemenveiling van Aalsmeer. Van deze gebouwen wordt de locatie bepaald en een schatting gemaakt van de hoogte van het maaiveld onder het gebouw. Na het afronden van de controle wordt het maaiveld- en waterbodemoogtebestand gecorrigeerd met een eenvoudig softwareprogramma. De correcties worden ook doorgevoerd in het landelijke bestand (buiten scope van dit document).

De controle wordt handmatig uitgevoerd door afwijkende maaiveldhoogten op te zoeken in de Topografische Kaart 1:50.000 (Top50Raster) en de luchtfoto's van Google Earth of een andere bron zoals Bing Maps. Als blijkt dat de afwijkende hoogte veroorzaakt wordt door een gebouw of viaduct dan is een correctie noodzakelijk. Afwijkingen die te maken hebben met antropogene ophogingen (bijvoorbeeld vuilstorten en taluds) worden echter niet gecorrigeerd. Deze ophogingen maken deel uit van de te modeleren eenheid Antropogeen.

Met betrekking tot waterbodemoogte kan een lokale of regionale autoriteit nieuwe waterbodemoogten verschaffen. Het betreft bijvoorbeeld waterbodemoogten van plassen en havens. Deze waterbodemoogten worden op vergelijkbare manier in het maaiveld- en waterbodemoogtebestand verwerkt.

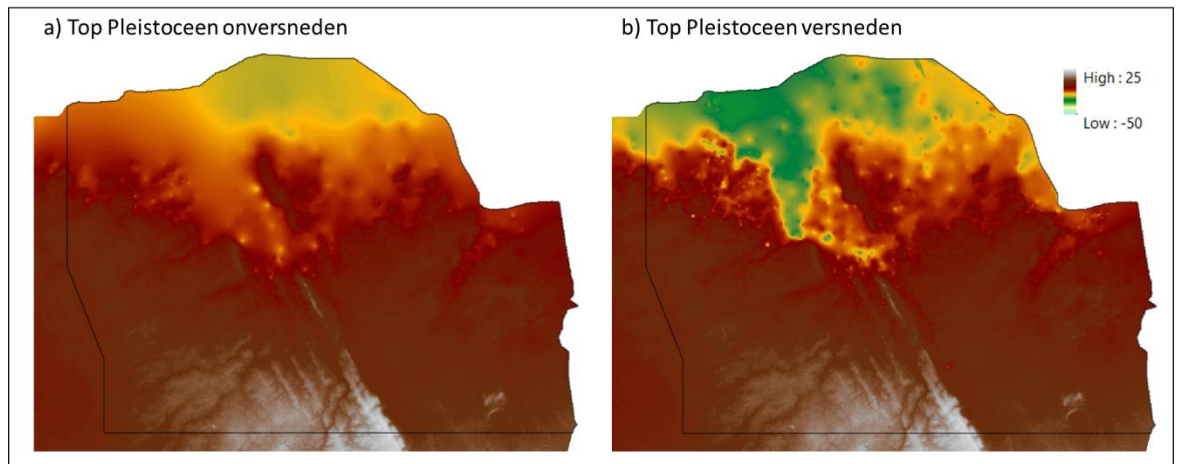
#### 5.2.10 *Maken stuurvlakken*

Stuurvlakken zijn rasters die de diepteligging van een geologisch grensvlak in de ondergrond weergeven. Deze rasters worden stuurvlakken genoemd omdat ze sturing geven aan de geautomatiseerde interpretatie van boorbeschrijvingen in modeleenheden (paragraaf 5.3).

Voorbeelden van stuurvlakken zijn de hoogteligging van de top van het Pleistoceen en de hoogteligging van de basis van het Hollandveen Laagpakket ten opzichte van NAP.

Stuurvlakken worden initieel vervaardigd op basis van bij aanvang van het modelleringsproces beschikbare gegevens. Een belangrijk gegeven is de extractie van DINO-boringen die voorzien zijn van een lithostratigrafische interpretatie. Het betreft hier lithostratigrafische interpretaties die handmatig door een geoloog aan de boorbeschrijving zijn toegevoegd, niet de door het werkproces **Interpretatie** toegekende interpretatie. Uit de geïnterpreteerde DINO-boringen wordt de hoogteligging van belangrijke stratigrafische overgangen op de locatie van de boringen afgeleid. Deze puntgegevens worden ruimtelijk geïnterpoleerd tot een stuurvlak dat de hoogteligging ten opzichte van NAP op elke locatie voorspelt. Voorbeelden van stuurvlakken:

- **Top Pleistoceen onversneden** (Figuur 5.2.5 a). Dit stuurvlak geeft de ligging weer van de bovenkant van de Pleistocene eenheden zoals het was voor aanvang van het Holocene tijdperk. Het vlak is niet versneden door Holocene geulsystemen. Het stuurvlak is initieel gebaseerd op lithostratigrafisch geïnterpreteerde boorbeschrijvingen waarbij steeds de hoogteligging van de overgang van een Holocene naar een Pleistocene eenheid is geselecteerd. Een belangrijk voorbeeld is de basis van de Basisveen Laag zoals beschreven in een eerdere paragraaf. Een andere databron die gebruikt wordt is de contourkaart van het Pleistoceen van Vos et al. 2011 (hun afbeelding 17 op pagina 30) en het maaiveld- en waterbodemoogtebestand (in "Pleistoceen Nederland" valt de bovenkant van het Pleistoceen samen met het maaiveld). De verzamelde gegevens worden in een geautomatiseerd proces geïnterpoleerd tot een raster.
- **Top Pleistoceen versneden** (Figuur 5.2.5 b). Dit stuurvlak geeft de ligging weer van de top van het Pleistoceen, versneden door Holocene geulsystemen. Naast de basis van de Basisveen Laag worden nu ook de in lithostratigrafisch geïnterpreteerde boorbeschrijvingen vastgelegde overgangen van Holocene geulzanden naar onderliggend Pleistocene eenheden meegenomen in de interpolatie.
- **Basis specifieke eenheden**. Dit betreft stuurvlakken die gemaakt worden door hoogteligging van de basis van de betreffende eenheid in de lithostratigrafische interpretaties van de boorbeschrijvingen te interpoleren. Voorbeelden zijn het Hollandveen Laagpakket van de Formatie van Nieuwkoop en verschillende laagpakketten van de Formatie van Naaldwijk, namelijk Schoorl, Zandvoort, Walcheren en Wormer. Voor deze stuurvlakken geldt dat ze in het werkproces **Interpretatie** worden bijgewerkt aan de hand van de geautomatiseerd geïnterpreteerde boorbeschrijvingen. De bijgewerkte stuurvlakken worden daarna in een iteratief proces nogmaals gebruikt voor een automatische interpretatie van de boorbeschrijvingen.



Figuur 5.2.5: Deel van de stuurvlakken Top Pleistoecen onversneden (a) en versneden (b) in modelgebied Oostelijke Wadden.

Het maken van stuurvlakken is een interpolatieproces dat met behulp van het pakket Isatis® wordt uitgevoerd. De in Isatis® uit te voeren operaties liggen vast in een zogenaamde *journal-file*, een batch-bestand waarmee operaties in Isatis® geautomatiseerd uitgevoerd kunnen worden. Meer informatie over Isatis® volgt in hoofdstuk 5.4.

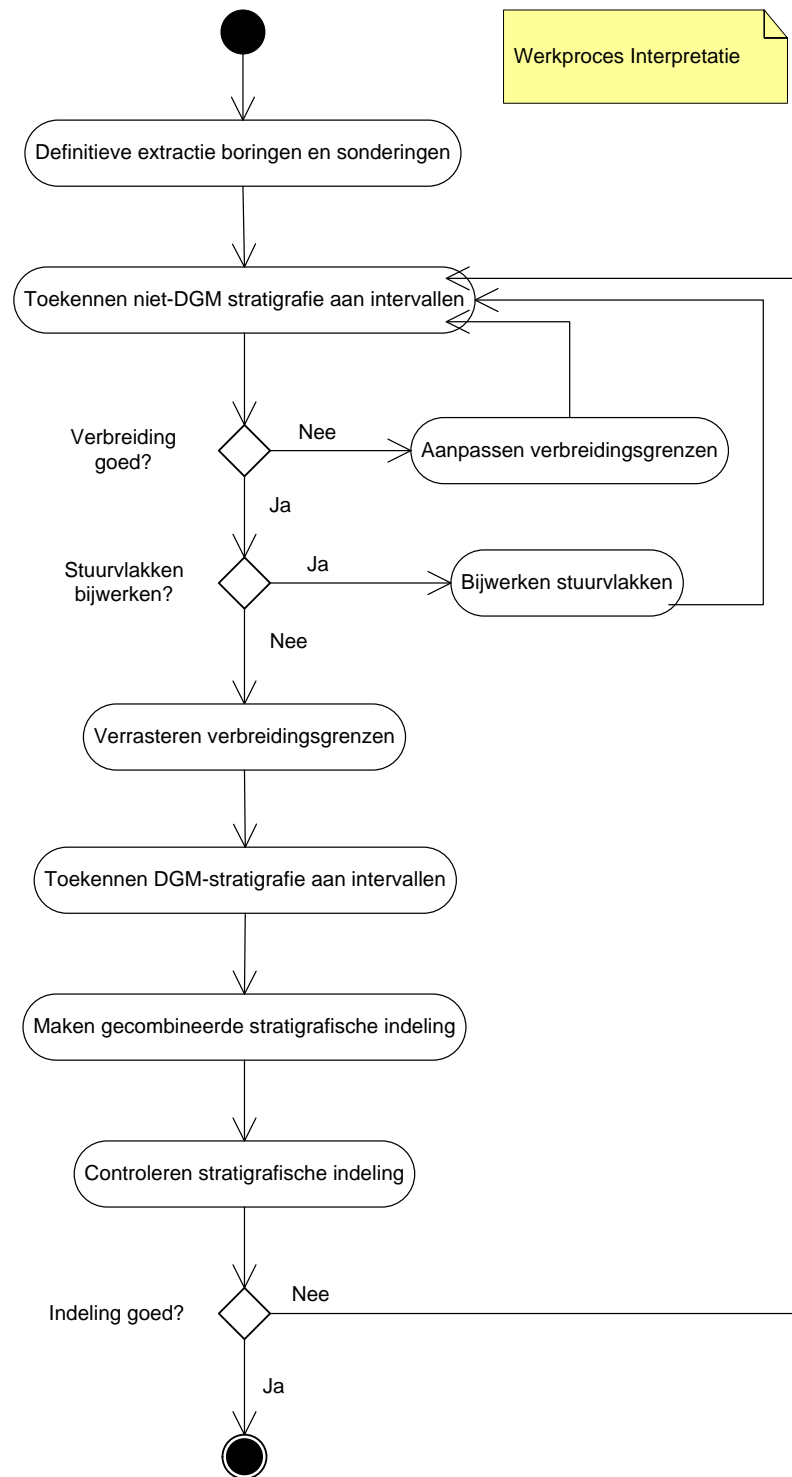
### 5.3 Interpretatie

De basisgegevens worden in werkproces **Interpretatie** gebruikt om aan elk beschreven lithologisch interval van alle boringen een stratigrafische eenheid toe te kennen. Dit levert een set van stratigrafisch geïnterpreteerde boringen op die als product aan de BRO wordt geleverd en input is voor de navolgende modelleringswerkprocessen.

**Interpretatie** bestaat uit de volgende processtappen (Figuur 5.3.1):

- Definitieve extractie van boringen.
- Toekennen niet-DGM stratigrafie aan intervallen.
- Aanpassen verbreidingsgrenzen.
- Bijwerken stuurvlakken.
- Verrasteren verbreidingsgrenzen.
- Toekennen DGM-stratigrafie aan intervallen.
- Maken van een gecombineerde stratigrafische indeling.
- Controleren stratigrafische indeling.





Figuur 5.3.1: Processtappen in het werkproces **Interpretatie**.

### 5.3.1 *Definitieve extractie van boringen*

Boringen die in het modelgebied liggen worden geëxtraheerd uit de DINO databank en eventuele andere gegevensbronnen. Het betreft hier een herhaling van de voorlopige extractie die in het werkproces **Datavoorbereiding** is uitgevoerd. Bij het maken van een nieuw modelgebied vindt de definitieve extractie (veel) later in de tijd plaats waardoor het mogelijk is dat in de tussentijd nieuwe boringen en

sonderingen in het modelgebied beschikbaar zijn gekomen. De datum en tijd waarop de definitieve extractie is uitgevoerd wordt vastgelegd.

De definitieve extractie omvat tevens een herhaling van het toepassen van het kwaliteitsfilter op zowel boringen als sonderingen en het lithologisch interpreteren van sonderingen zoals dat bij **Datavoorbereiding** al is uitgevoerd.

### 5.3.2 *Toekennen niet-DGM stratigrafie aan intervallen*

In deze processtap wordt software in de programmeertaal Python ontwikkeld en uitgevoerd om de boorbeschrijvingen te voorzien van een stratigrafische indeling. De stratigrafische indeling is gebaseerd op de in het voorgaande werkproces vastgestelde te modelleren eenheden in samenhang met het conceptueel model.

Het gaat in deze processtap alleen om de toekenning van **niet-DGM eenheden**, dat zijn de eenheden die in de gebruikte DGM versie niet onderscheiden worden. Dit zijn vooral Holocene eenheden, zoals de verschillende laagpakketten van de Formaties van Naaldwijk en Nieuwkoop, maar ook Pleistocene eenheden zoals het Laagpakket van Gieten van de Formatie van Drente.

Voor elke eenheid wordt een aantal batchprogramma's ontwikkeld die in beginsel een analyse uitvoeren waarbij dezelfde procedure wordt gevolgd:

- (1) Per eenheid wordt eerst bepaald welke boringen zich binnen de grenzen van de verbreidingsgrens van de eenheid bevinden.
- (2) Van deze boringen wordt vervolgens de geëxtraheerde lithologische boorbeschrijving onderzocht op criteria die karakteristiek zijn voor de eenheid. Op basis van deze criteria wordt de eenheid al dan niet in de boorbeschrijving aangetroffen. Dit onderzoek levert een bestand op met per boring waarin de eenheid is aangetroffen de top en de basis (in m ten opzichte van NAP) van de eenheid.

Voor sommige eenheden is de uitwerking van deze procedure eenvoudig, voor andere eenheden is een reeks van complexe programma's nodig om tot het eindresultaat te komen. Hieronder volgt een voorbeeld van de, in dit geval eenvoudige, criteria die zijn opgesteld om de geologische eenheid Nij Beets van de Formatie van Nieuwkoop te interpreteren:

- De boorintervallen worden doorlopen door van de top (maaiveld) naar de basis van een boring te werken;
- Als het Laagpakket van Gieten (keileem) is aangetroffen in een boring, dan moet de basis van het interval boven de top van het Laagpakket van Gieten liggen;
- De basis van het interval moet boven de -10 m NAP liggen; □ De top van het bovenste interval wat voldoet aan de criteria moet binnen 0.75 m van het maaiveld liggen;
- De hoofdlithologie van het interval is "V" (veen), "GY" (gyttja) of "K" (klei);
- Er mogen lagen met een afwijkende lithologie in de sequentie voorkomen, maar het totaal ervan mag niet dikker worden dan 0.2 m.

Uit bovenstaand voorbeeld wordt duidelijk dat er afhankelijkheden zijn, zo is de interpretatie van de eenheid Nij Beets afhankelijk van de interpretatie van het Laagpakket van Gieten. Dit betekent dat de volgorde waarin de automatische procedures gedraaid worden van belang is.

De automatische procedures leveren een set boringen op waarin een top en een basis van een eenheid zijn geïnterpreteerd. Deze boringen worden vervolgens samen met de potentiële verbreiding op een kaart gezet om eventuele noodzakelijke aanpassingen van de verbreiding en/of de criteria inzichtelijk te maken. Dit maakt het automatisch interpreteren van boringen en het maken van de potentiële verbreidingen een iteratief proces.

Het ontwikkelen van de software voor het toekennen van niet-DGM stratigrafie aan intervallen vindt plaats met behulp van de programmeertaal Python. Na bouw en test van de software is het uitvoeren van de processtap volledig geautomatiseerd.

### 5.3.3 *Aanpassen verbreidingsgrenzen*

Het resultaat van de indeling van een eenheid kan ertoe leiden dat de bijbehorende verbreidingsgrens moet worden aangepast. Het kan namelijk voorkomen dat een eenheid in een deel van het gebied wel is gezocht, maar nooit is aangetroffen. Daarnaast zijn er eenheden waarvoor op basis van het kaartmateriaal geen verbreiding, of alleen een verbreiding van onvoldoende kwaliteit, kon worden gemaakt. Voor deze eenheden was in het werkproces **Datavoorbereiding** in eerste instantie de potentiële verbreiding gelijk gesteld aan de modelgebiedsgrens. In processtap *Toekennen niet-DGM stratigrafie aan intervallen* wordt de eenheid in de boorbeschrijvingen dan in eerste instantie gezocht in het hele modelgebied. Dit resulteert in een tweetal 'puntenwolken' van locaties waar de eenheid wel of juist niet is aangetroffen. Op basis van deze puntenwolken wordt dan alsnog de verbreiding vastgesteld.

In beide situaties wordt de verbreidingsgrens aangepast en wordt de stratigrafie opnieuw toegekend. De processtappen *Toekennen niet-DGM stratigrafie aan intervallen* en *Aanpassen verbreidingsgrenzen* worden dus iteratief uitgevoerd, zoals in het schema in Figuur 5.3.1 is aangegeven.

Het aanpassen van verbreidingsgrenzen is een handmatig proces waarbij ArcGIS het voornaamste hulpmiddel is.

### 5.3.4 *Bijwerken stuurvlakken*

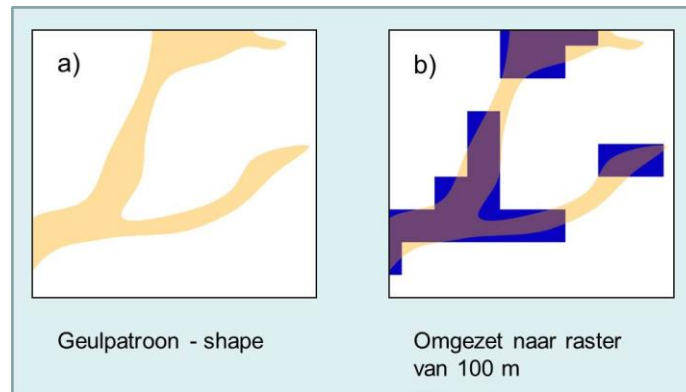
Voor een aantal stuurvlakken, zoals die van het Hollandveen Laagpakket, geldt dat ze na het doorlopen van processtap *Toekennen niet-DGM stratigrafie aan intervallen* worden bijgewerkt aan de hand van de geautomatiseerd geïnterpreteerde boorbeschrijvingen. De bijgewerkte stuurvlakken worden daarna nogmaals gebruikt voor een automatische interpretatie. Daarmee worden ook de processtappen *Toekennen niet-DGM stratigrafie aan intervallen* en *Bijwerken stuurvlakken* iteratief uitgevoerd, zoals in het schema in Figuur 5.3.1 is aangegeven.

Het bijwerken van stuurvlakken is een interpolatieproces dat met behulp van het softwarepakket Isatis® wordt uitgevoerd.

### 5.3.5 *Verrasteren verbreidingsgrenzen*

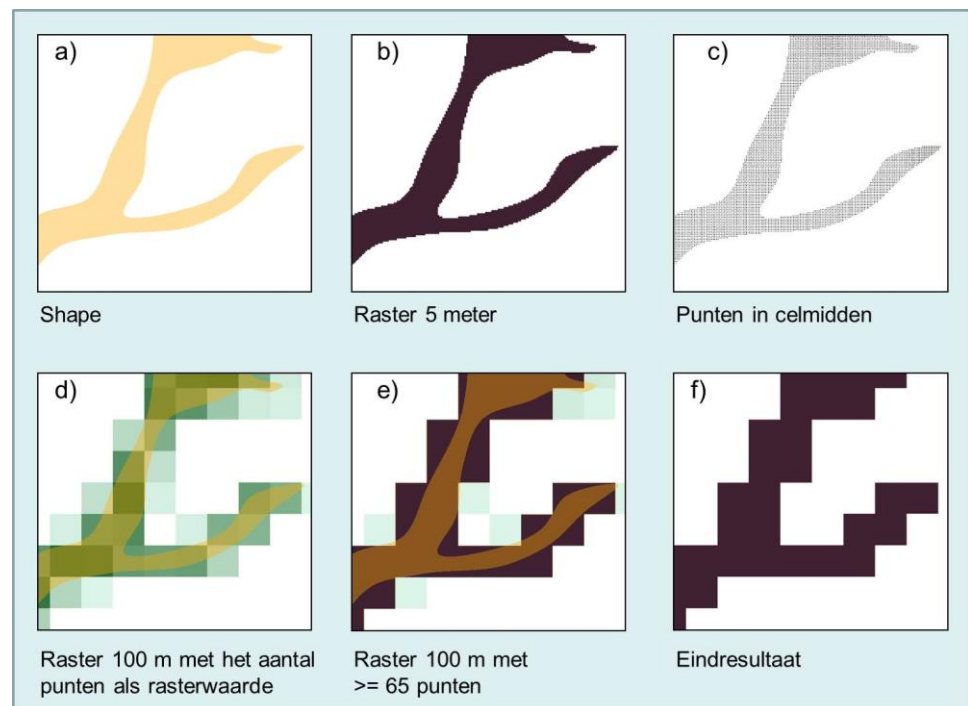
De verbreidingsgrenzen van de niet-DGM eenheden zijn polygonen (shapefiles) en dienen ten behoeve van de lagenmodellering (hoofdstuk 5.4) omgezet te worden in rasters. De standaardmethode van ArcGIS om polygonen te verrasteren kijkt of het middelpunt van een rastercel binnen de grenzen van het polygoon ligt. Is dit het

geval, dan hoort de rastercel tot de verbredening, anders niet. Voor eenheden met gedetailleerde grenzen, zoals de beekdalafzettingen van het Laagpakket van Singraven van de Formatie van Boxtel, leidt deze methode tot een verlies aan informatie (Figuur 5.3.2). Met name de connectiviteit van de geulpatronen in de beekdalen, bijvoorbeeld van belang voor grondwatermodellering, kan erdoor verloren gaan.



Figuur 5.3.2: Geulpatroon (a) met standaard GIS functionaliteit omgezet naar raster met celgrootte 100 x 100 m (b). De connectiviteit in het geulpatroon gaat op twee locaties verloren.

TNO heeft daarom een eigen verrasteringstechniek ontwikkeld die bestaat uit een aantal geautomatiseerde GIS operaties (Figuur 5.3.3).



Figuur 5.3.3: Geulpatroon (b) wordt eerst omgezet naar raster met celgrootte 5 x 5 m (b). Dit raster wordt vervolgens omgezet naar een puntenshapefile met een punt in het midden van elke cel (c). Op basis van dit puntenshapefile wordt een raster gemaakt met een celgrootte van 100 x 100 m waarbij elke cel het aantal punten als celwaarde heeft (d). Tot slot worden alle rastercellen geselecteerd die 65 of meer punten bevatten (e) en (f). Het aantal van 65 punten, 16.25% van het maximale aantal van 400, is een ervaringsgetal.

Voor Oostelijke Wadden en Westelijke Wadden geldt dat alle Holocene eenheden, en daarnaast de eenheden die behoren tot de Formatie van Boxtel, op de in Figuur 5.3.3 weergegeven methode zijn verrasterd. Voor de verbreiding van de eenheid 'AAOP' (Antropogeen opgebrachte grond) geldt dat het al een raster is.

#### 5.3.6 Toekennen DGM-stratigrafie aan intervallen

In deze processtap wordt software ontwikkeld en uitgevoerd om de boorbeschrijvingen te voorzien van een stratigrafische indeling. De stratigrafische indeling is gebaseerd op de in het voorgaande werkproces vastgestelde te modelleren eenheden in samenhang met het conceptueel model.

Het gaat in deze processtap alleen om de toekenning van **DGM eenheden**, dat zijn de eenheden die overgenomen worden van de gebruikte DGM versie. Dit zijn vooral Pleistocene eenheden, zoals de Formaties van Urk, Sterksel en Peize-Waalre. Bij het construeren van DGM is een deel van de boorbeschrijvingen (een selectieset van circa 26.500 boringen) al van stratigrafie voorzien. In GeoTOP gebruiken we echter veel meer boringen, en ook die willen we van een stratigrafische interpretatie voorzien. Om de boorbeschrijvingen te voorzien van een stratigrafische indeling worden ze gesneden met het lagenmodel van DGM. De procedure is als volgt:

1. Voor elke DGM eenheid die in het lagenmodel voorkomt wordt voor elke boring vastgesteld of de eenheid op de boorlocatie voorkomt. Is dit het geval, dan wordt de diepteligging van de top van de eenheid op de boorlocatie bepaald. Het resultaat is een lijst met per eenheid per boring de diepteligging van de top van de eenheid volgens DGM.
2. Het resultaat van (1) wordt gesorteerd zodat een lijst wordt verkregen met per boring per eenheid de diepteligging van de top van de eenheid.
3. Het resultaat van (2) wordt gefilterd waarbij alle boringen die alleen de eenheid 'HL' (de eenheid 'Holoceen' van DGM) bevatten worden verwijderd.
4. Voor elke te modelleren eenheid wordt in elke boorbeschrijving gezocht naar het interval waarvan de top het dichtstbij de diepteligging van de top van de eenheid volgens DGM ligt.
5. De boorbeschrijvingen worden nu onderverdeeld in DGM-eenheden aan de hand van de gevonden toppen van de in de boorbeschrijving aanwezige eenheden.

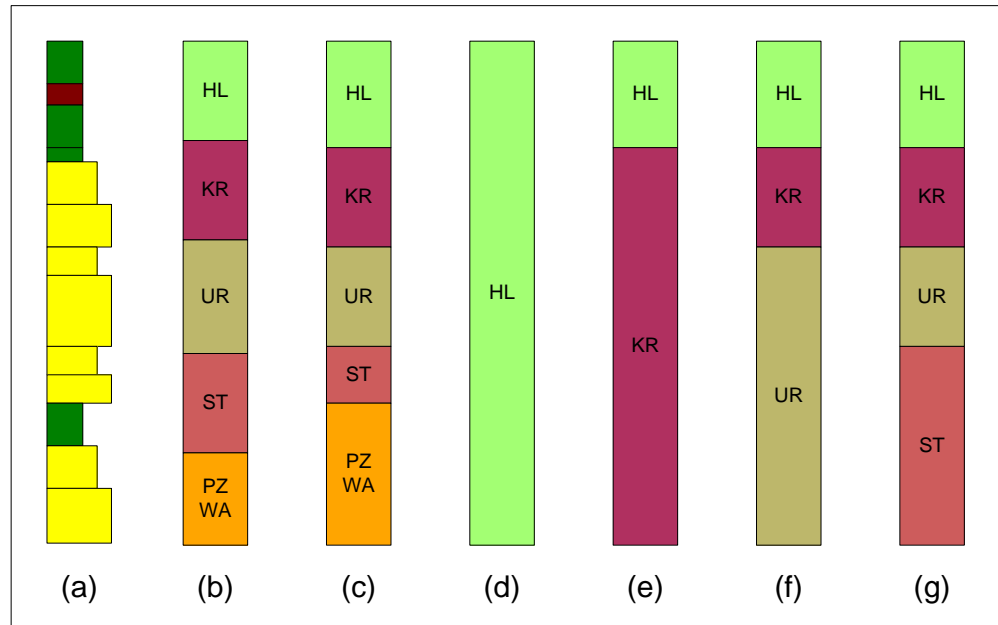
Ad (4) – Voor een aantal eenheden is het mogelijk om betere, geologisch onderbouwde, criteria te gebruiken dan het eenvoudigweg zoeken naar het dichtstbijzijnde interval. Een *voorbeeld* is de gecombineerde Formatie van Peize-Waalre waarbij de top van de eenheid gezocht wordt aan de hand van de volgende criteria:

- Top moet in een bufferzone liggen van +/- 3 m rond de diepteligging van de top volgens DGM.
- In de bufferzone wordt gezocht naar een dikke kleilaag van minimaal 1,1 m dikte (met een eventuele stoorlaag van maximaal 0,5 m). Een dergelijke dikke kleilaag komt vaak aan de top van de Peize-Waalre voor. Als de kleilaag wordt gevonden, wordt de top van de kleilaag de top van de Peize-Waalre.
- Als geen kleilaag wordt gevonden wordt in de bufferzone gezocht naar een overgang van grof zand (bovenliggend) naar fijn zand (onderliggend). Deze overgang is kenmerkend voor de grens van Peize-Waalre met de

bovenliggende formaties Kreftenheye, Urk of Sterksel waarvan de basis vaak grof ontwikkeld is. Als de overgang wordt gevonden, wordt de basis van het grove zand de top van de Peize-Waalre.

- Als ook geen grof naar fijn overgang wordt gevonden wordt de top vastgesteld op het dichtstbijzijnde interval.

Ad (5) - Door alleen uit te gaan van de toppen, en niet van de basissen, wordt gewaarborgd dat alle intervallen van de boorbeschrijving een DGM eenheid krijgen toegekend. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 5.3.4.



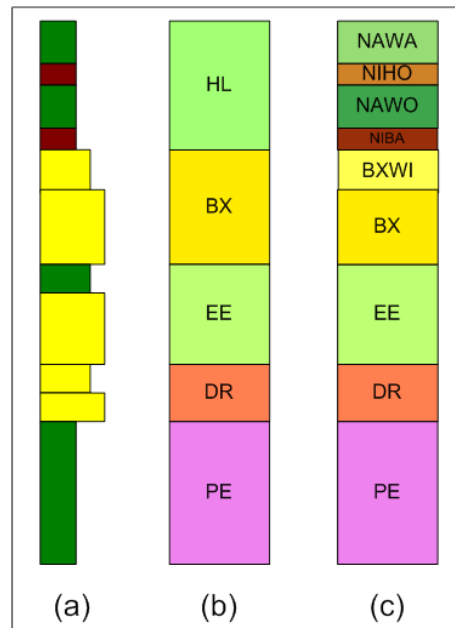
Figuur 5.3.4: Indeling van een geïdealiseerde boorbeschrijving in DGM eenheden. (a) Boorbeschrijving met klei in groen, veen in bruin en zand in geel; (b) Lagenmodel van DGM op de boorlocatie. Merk op dat de laaggrenzen in het lagenmodel niet exact samenvallen met de intervalgrenzen in de boorbeschrijving; (c) Indeling van de boorbeschrijving in DGM eenheden. Voor de meeste eenheden is de top vastgesteld op de top van het dichtstbij gelegen interval in de boorbeschrijving. Voor 'PZWA' is naar een kleilaag in een buffer rondom de top van het lagenmodel gezocht. De top van de kleilaag is de top van de eenheid 'PZWA'; (d) t/m (g) zijn tussenstappen in de indeling waarbij steeds de hele boorbeschrijving vanaf de top naar de basis van de eenheid wordt gelabeld. Deze werkwijze voorkomt lege intervallen in het eindresultaat.

Het ontwikkelen van de software voor het toekennen van DGM-stratigrafie aan intervallen vindt plaats met behulp van de programmeertaal Python. Na bouw en test van de software is het uitvoeren van de processtap volledig geautomatiseerd. Het grootste deel van de software is voor elk modelgebied van GeoTOP gelijk; alleen de eenheden waarvoor geologische criteria worden toegepast worden bij elk modelgebied nieuw ontwikkeld of herzien.

### 5.3.7 *Maken van een gecombineerde stratigrafische indeling*

In paragraaf 5.3.2 is beschreven hoe de voor de niet-DGM eenheden is bepaald wat de top en basis is in elk van de boorbeschrijvingen waar de eenheid in voorkomt. Dit is voor elke eenheid afzonderlijk gedaan. In de processtap *Maken van een gecombineerde stratigrafische indeling* worden de afzonderlijke resultaten gecombineerd met elkaar en met de indeling van de DGM eenheden. Daarbij

worden de DGM-eenheden overschreven door de niet-DGM eenheden. Dit is in Figuur 5.3.5 geïllustreerd aan de hand van een geïdealiseerde boorbeschrijving.



Figuur 5.3.5: Indeling van een geïdealiseerde boorbeschrijving. (a) Boorbeschrijving met klei in groen, veen in bruin en zand in geel; (b) Indeling van de boorbeschrijving in DGM eenheden; (c) Indeling van de boorbeschrijving na toevoegen van de niet-DGM eenheden 'NAWA', 'NIHO', 'NAWO', 'NIBA' en 'BXWI'. Merk op dat de niet-DGM eenheid 'BXWI' de DGM-eenheid 'BX' deels overschrijft.

Omdat de niet-DGM eenheden grotendeels onafhankelijk van elkaar zijn bepaald, kan het voorkomen dat aan een interval meer dan één eenheid is toegekend. In dat geval is de volgorde van toekenning van belang: een eenheid die later in het proces wordt toegekend, overschrijft eventuele eerdere toekenningen. Een ander gevolg is dat er ongewenste stratigrafische volgordes gevonden worden. Deze ongewenste volgordes worden gecorrigeerd in een serie correctiefilters. Tot slot kan het voorkomen dat er tussen de laagste niet-DGM eenheid en de hoogste Pleistocene DGM-eenheid nog een stukje 'HL' overblijft. Dit stukje 'HL' wordt vervangen door de hoogstgelegen Pleistocene DGM-eenheid.

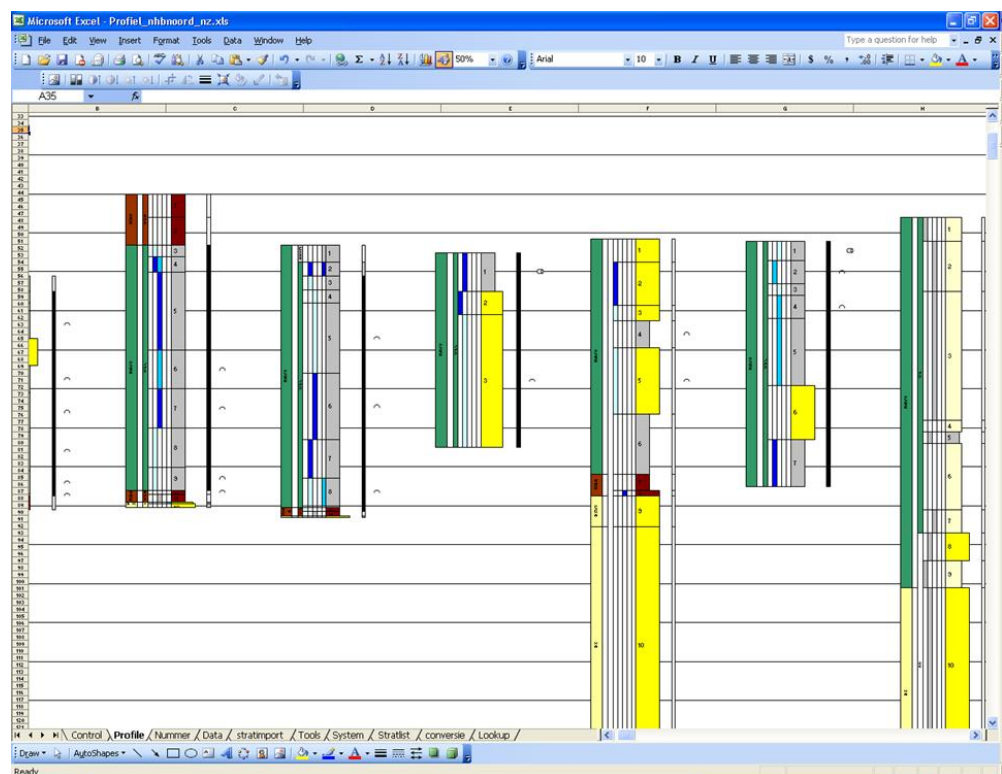
De op geautomatiseerde wijze verkregen stratigrafische indeling van boringen die tot de DGM selectieset behoren, komen voor wat betreft de DGM eenheden in de meeste gevallen overeen met de oorspronkelijke, handmatig toegekende stratigrafische indeling. Door het verschil in de interpretatiemethodiek (in de geautomatiseerde procedure van GeoTOP wordt alleen de lithologische boorbeschrijving zelf geanalyseerd, terwijl bij de handmatige interpretatie van DGM ook geofysische boorgatmetingen en/of nabijgelegen boringen in de analyse worden betrokken) en door verschillen tussen de boring en het lagenmodel ter plaatse van de boring, kunnen echter verschillende stratigrafische indelingen ontstaan. Beide indelingen worden opgenomen in DINO en in de BRO. In DINO geldt dat de door de geoloog handmatig toegekende indeling als preferent wordt geoordeeld.



Het ontwikkelen van de software voor het maken van de gecombineerde stratigrafische indeling vindt plaats met behulp van de programmeertaal Python. Na bouw en test van de software is het uitvoeren van de processtap volledig geautomatiseerd. Het grootste deel van de software is voor elk modelgebied van GeoTOP gelijk; alleen de volgorde van toekenning en het corrigeren van ongewenste volgordes worden bij elk modelgebied nieuw ontwikkeld of herzien.

### 5.3.8 Controleren stratigrafische indeling

De stratigrafische indeling van de boorbeschrijvingen worden door een gebiedsdeskundig geoloog gecontroleerd. Hij doet dit aan de hand van een aantal sleutelprofielen door het modelgebied. In de profielen zijn de boorbeschrijving, de stratigrafische interpretatie, en, indien aanwezig, de handmatig toegekende lithostratigrafische interpretatie, grafisch weergegeven (Figuur 5.3.6).



Figuur 5.3.6: Boorbeschrijvingen met stratigrafische interpretaties langs een profiel.

Een nuttig hulpmiddel bij de controle is een programma dat verdachte stratigrafische opeenvolgingen opspoot. Verdachte stratigrafische opeenvolgingen zijn opeenvolgingen die niet mogelijk zijn (bijvoorbeeld een Holocene eenheid onder een Pleistocene eenheid) of hoogste zelden voorkomen. De controlerend geoloog bepaalt vooraf welke opeenvolgingen hij of zij als 'verdacht' aanmerkt. Het programma genereert vervolgens een lijst met boorbeschrijvingen die de verdachte opeenvolgingen bevatten.

De controlerend geoloog legt eventuele bevindingen vast in een bevindingenlijst, met per bevinding de volgende items:

- Volgnummer van de bevinding.
- Datum.

- Status ('Open', 'Opgelost', 'Niet oplossen'; initieel: 'Open').
- Nummer van profiel waarin bevinding is geconstateerd.
- Boornummer waarin bevinding is geconstateerd.
- Stratigrafische eenheid waarop bevinding betrekking heeft.
- Omschrijving van de bevinding.
- Eventuele bijlagen.

De bevindingen worden geanalyseerd door de modellers en met de controlerend geoloog besproken. Bij de analyse worden de volgende zaken vastgelegd:

- Prioriteit ('Laag', 'Midden', 'Hoog').
- Analyse: oorzaak en gewenste oplossing.
- Oplossing status ('Direct oplossen', 'Volgende release', 'Niet oplossen').

Prioriteit en oplossing status worden in gezamenlijk overleg met de controlerend geoloog vastgesteld. De bevindingen waarvoor besloten is ze op te lossen worden door de modellers in de software van de stratigrafie indeling verwerkt. Bij de eerstvolgende iteratie van de indeling wordt opnieuw gecontroleerd en krijgen opgeloste bevindingen de status 'Opgelost'. Indien er, na een aantal iteraties, geen openstaande bevindingen meer zijn die opgelost moeten worden is het eindpunt van het werkproces **Lagenmodellering** bereikt.

Bevindingen die eindigen met de status 'Volgende release' worden opgenomen in een algemene bevindingenlijst van GeoTOP. In deze algemene bevindingenlijst zijn dus bevindingen van meerdere modelgebieden opgenomen.

Een veel voorkomende bevinding is het vinden van een boring van slechte kwaliteit. De boring voldoet weliswaar aan het automatisch toegepaste kwaliteitsfilter, maar de beschrijving biedt onvoldoende aanknopingspunten om een stratigrafie toe te kennen. De boring wordt in voorkomende gevallen opgenomen in de **uitsluitlijst** en doet verder niet meer mee in de modellering; dit is dezelfde lijst als die is aangemaakt bij het automatisch toegepaste kwaliteitsfilter.

### 5.3.9 *Workflow management*

In de geautomatiseerde processtappen die in de voorgaande paragrafen zijn beschreven wordt gebruik gemaakt van een groot aantal in Python geschreven batchprogramma's. Het is van groot belang dat deze batchprogramma's<sup>2</sup> in de juiste volgorde worden uitgevoerd. Om dat te ondersteunen is een *workflow manager* ontwikkeld in Microsoft Excel (Figuur 5.3.7). In Excel wordt elk uit te voeren programma opgenomen. Per programma is er een regel met in verschillende kolommen de programma naam en eventuele parameterwaarden. De eerste kolom van elke regel bevat een indicator waarmee de regel 'aangezet' of 'uitgezet' kan worden. Met behulp van een VBA-script (macro) wordt een MS-DOS bat-file aangemaakt waarmee alle 'aangezette' programma's uitgevoerd worden. De algemene functionaliteit (o.a. kopiëren en plakken) van Excel maakt het mogelijk om snel programma's te kopiëren of de volgorde aan te passen.

---

<sup>2</sup> Een batchprogramma is een programma dat na opstarten zonder menselijke tussenkomst een aantal taken uitvoert en daarna automatisch wordt afgesloten.

| Execut | Action | Parameters | Program name   | Script name | Parameters?  | Parameter list                 |
|--------|--------|------------|--|-------------|--|--------------------------------|
| 5      | 0      | Header     |  |             |  |                                |
| 42     | 0      | RunScript  | N  | python      | 13_OW_Maak_up_to_date_boornummerlijst_1_record_tegelijk_lezen.py | N                              |
| 43     | 0      | RunScript  | N  | python      | 14_OW_boornummers_gefilterd_csv2shape.py                         | N                              |
| 44     | 0      | RunScript  | N  | python      | 15a_OW_Histogram_boringen_minimale_einddiepte.py                 | N                              |
| 45     | 0      | RunScript  | N  | python      | 15b_OW_Histogram_boringen_einddiepte.py                          | N                              |
| 46     | 0      | Remark     | script 15c hoeft alleen bij een nieuwe DGM skiplijst, output moet uit de DGM skiplijst (script moet dus geen output geven).  |             |  |                                |
| 47     | 0      | RunScript  | N  | python      | 15c_OW_DGM_interfingering_identificeren.py                       | N                              |
| 48     | 0      | CopyFile   |  |             | basisdata_gefilterd.c  | basisdata_gefilterd_backup.csv |
| 49     | 0      | Remark     | Extracite Mipwa drgi   |             |  |                                |
| 50     | 0      | Remark     | Let op dat deze de uitsluitlijst meeneemt uit p:\005\5\50000\gmki\geotop\werk\oostwad\basisgegevens\boornummers_uitsluiten\  |             |  |                                |
| 51     | 0      | ChangeDir  |  |             | drgi_basisdata   |                                |
| 52     | 0      | RunScript  | N  | python      | 00e_DINO_Extracite_Boornummers.py                                | N                              |
| 53     | 0      | RunScript  | N  | python      | 00b_DINO_Boornummers_csv_naar_shape.py                           | N                              |
| 54     | 0      | RunScript  | N  | python      | 00c_DINO_Boornummers_koppelen_aan_alias_nm.py                    | N                              |
| 55     | 0      | RunScript  | N  | python      | 01_DINO_Clip.py  | N                              |
| 56     | 0      | RunScript  | N  | python      | 02_DINO_Extracite_boornummers_shape2csv.py                       | N                              |
| 57     | 0      | RunScript  | N  | python      | 03_DINO_Extra_DinoExtracite_Algemeen.py                          | N                              |
| 58     | 0      | RunScript  | N  | python      | 04_DINO_Extra_DinoExtracite_1975.py                              | N                              |
| 59     | 0      | RunScript  | N  | python      | 05_DINO_Extra_DinoExtracite_2003.py                              | N                              |
| 60     | 0      | RunScript  | N  | python      | 06_DINO_Strat1975_naar_Extra.py                                  | N                              |
| 61     | 0      | RunScript  | N  | python      | 07_DINO_Strat2003_naar_Extra.py                                  | N                              |
| 62     | 0      | RunScript  | N  | python      | 11_LithologieOnbekendAanpassen_1_record_tegelijk_lezen.py        | N                              |
| 63     | 0      | RunScript  | N  | python      | 12_Maak_up_to_date_boornummerlijst_1_record_tegelijk_lezen.py    | N                              |
| 64     | 0      | Remark     | ???????? : Let op dat de uiteindelijke boornummerlijst niet geclept is met het oostwad verbreidingsgebied. Dat gebeurt pas alle data wordt gecombineerd in script 101. |             |  |                                |
| 65     | 0      | RunScript  | N  | python      | 13_boornummers_gefilterd_csv2shape.py                            | N                              |
| 66     | 0      | RunScript  | N  | python      | 80_Check_boringen_zonder_einddiepte.py                           | N                              |
| 67     | 0      | RunScript  | N  | python      | 90_Copy_basisdata_naar_stratindeling.py                          | N                              |
| 68     | 0      | RunScript  | N  | python      | 91a_Stratindeling_naar_Stratdata.py                              | N                              |
| 69     | 0      | RunScript  | N  | python      | 91b_Stratindeling_naar_Stratdata_1975.py                         | N                              |
| 70     | 0      | RunScript  | N  | python      | 92_Stratdata_naar_Stratopvolging_verdacht.py                     | N                              |

Figuur 5.3.7: Workflow manager voor werkproces **Interpretatie**.

Behalve als hulpmiddel om de programmatuur uit te voeren, dient de *workflow manager* ook als documentatiemiddel. Het werkproces **Interpretatie** is dankzij de *workflow manager* en de batchprogramma's in hoge mate geautomatiseerd en reproduceerbaar.

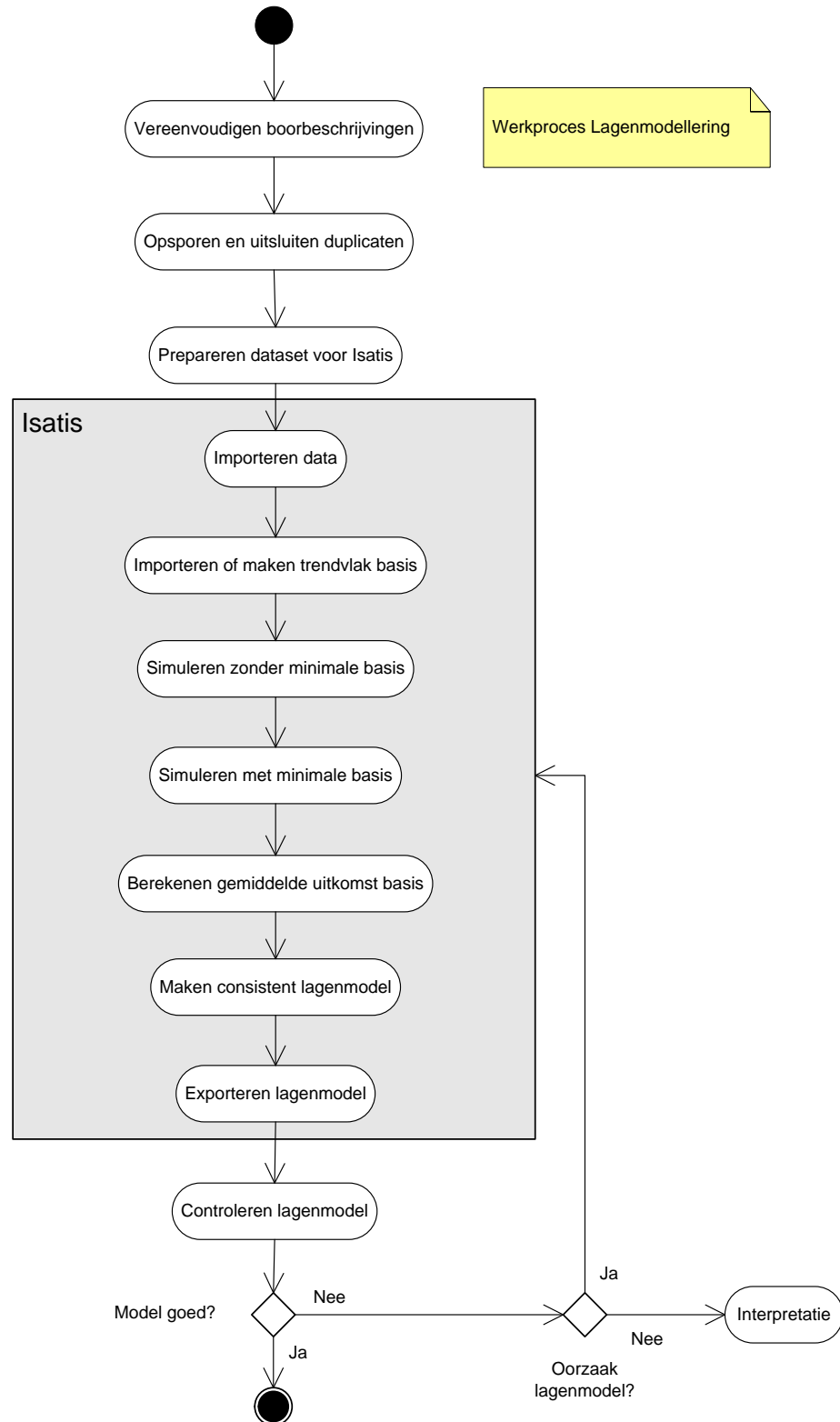
## 5.4 Lagenmodellering

De eigenlijke modellering van GeoTOP bestaat uit de werkprocessen **Lagenmodellering** en **Voxelmodellering**. Beide werkprocessen maken gebruik van Isatis® en een bijbehorende *workflow manager*. **Lagenmodellering** berekent een lagenmodel (vergelijkbaar met dat van DGM en REGIS II), waarbij gerekend wordt met alle beschikbare boringen die het kwaliteitsfilter zijn gepasseerd. Behalve de vlakken zelf wordt ook de onzekerheid in de vlakken berekend. In het werkproces wordt een kwaliteitscontrole door geologische experts uitgevoerd. Het lagenmodel wordt opgenomen in de BRO.

**Lagenmodellering** bestaat uit de volgende processtappen (Figuur 5.4.1):

- Vereenvoudigen boorbeschrijvingen.
- Opsporen en uitsluiten duplicaten.
- Prepareren dataset voor Isatis®.
- Isatis®, met per te modelleren eenheid:
  - Importeren data.
  - Importeren of maken trendvlak basis.
  - Simuleren met boringen zonder minimale basis.
  - Simuleren met minimale basis.
  - Berekenen gemiddelde uitkomst en standaarddeviatie.
  - Maken consistent lagenmodel.
- Exporteren lagenmodel.
- Controleren lagenmodel.
- Berekenen kans op stratigrafie.

In onderstaande paragrafen wordt beschreven hoe het werkproces verloopt. Daarna wordt de processtap *Berekenen kans op stratigrafie* beschreven. Dit is een processtap die voorsorteert op processtap *Berekenen modelonzekerheden* in werkproces **Voxelmodellering**.



Figuur 5.4.1: Processtappen in het werkproces **Lagenmodellering**.

Het belangrijkste deel van het werkproces, weergegeven met een grijs blok in Figuur 5.4.1, wordt met behulp van het softwarepakket Isatis® van de Franse firma Geovariances uitgevoerd. Isatis® is een geostatistisch analyse en modelleringspakket dat zowel interactief (met menselijk tussenkomst) als batchgewijs (zonder menselijke tussenkomst) aangestuurd kan worden. De batchgewijze aansturing wordt gefaciliteerd door een *workflow manager*, die in paragraaf 5.4.15 wordt beschreven.

#### 5.4.1 Vereenvoudigen boorbeschrijvingen

De gedetailleerde boorbeschrijvingen die in het voorgaande werkproces zijn voorzien van stratigrafie worden sterk vereenvoudigd tot een bestand met uitsluitend de voor de lagenmodellering relevante boorgegevens (de lithologische beschrijving is in de lagenmodellering niet meer nodig). Dit bestand bevat per boring, per stratigrafische eenheid de volgende gegevens:

- Boornummer.
- Locatie (x,y).
- Maaiveldhoogte (in meters ten opzichte van NAP).
- Top interval (in m ten opzichte van NAP).
- Basis interval (in m ten opzichte van NAP).
- Stratigrafische eenheid code.

Het vereenvoudigen van de boorgegevens is geautomatiseerd.

#### 5.4.2 Opsporen en uitsluiten duplicaten

In DINO komen boorbeschrijvingen voor van boringen met gelijke (x,y)-coördinaten. Deze boorbeschrijvingen leveren duplicaten op in de input data voor Isatis®, die tegenstrijdig kunnen zijn. Bijvoorbeeld de basis van de eenheid 'NAWA' ligt in boring A op 5 m onder NAP, en in boring B op 6 m onder NAP. De in GeoTOP gebruikte interpolatiemethoden kunnen niet met dergelijke duplicaten overweg.

In deze processtap wordt daarom onderzocht welke boringen op dezelfde locatie liggen. Vervolgens wordt één boring geselecteerd om mee te doen in de interpolatie en worden de overige boringen uitgesloten. Arbitrair wordt de boring met het laagste boornummer gekozen. Het uitsluiten gebeurt door de boringen op te nemen in een **uitsluitlijst** en **uit de vereenvoudigde boorbeschrijving te halen**. De uitsluitlijst die in deze processtap wordt aangemaakt is aanvullend op de uitsluitlijst die bij het toepassen van het kwaliteitsfilter en bij het controleren van de stratigrafie indeling is aangemaakt.

Deze processtap is geautomatiseerd.

#### 5.4.3 Prepareren dataset voor Isatis®

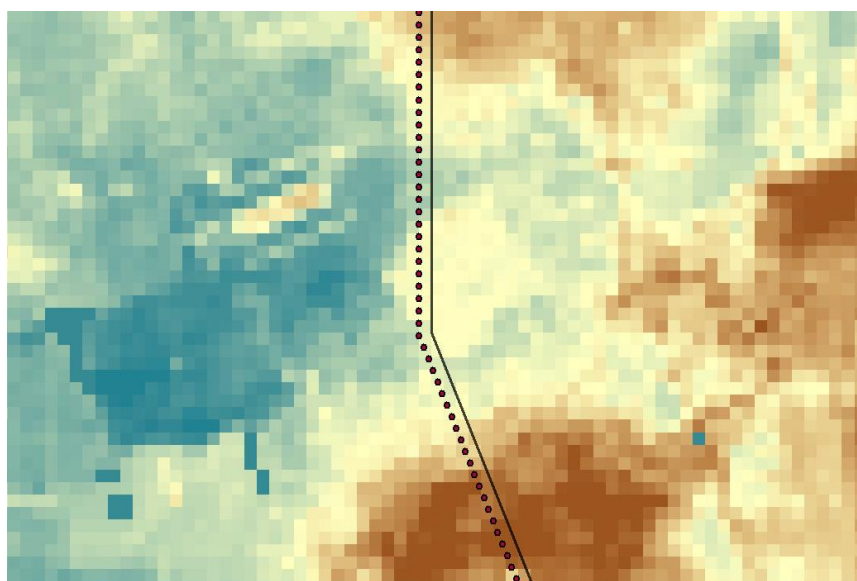
In deze processtap worden de boorbeschrijvingen geconverteerd naar een formaat dat geschikt is als input voor Isatis®. Dit formaat bevat per te modelleren stratigrafische eenheid een bestand met daarin per boring de volgende gegevens:

- Boornummer.
- Locatie (x,y).
- Maaiveldhoogte (in m ten opzichte van NAP).
- Top interval (in m ten opzichte van NAP).
- Basis interval (in m ten opzichte van NAP).
- Minimale basis van het interval (in m ten opzichte van NAP).

Voor boringen die de betreffende eenheid volledig doorboren (d.w.z. onder de betreffende eenheid is in de boring nog een andere eenheid aangetroffen) is de minimale basis gelijk aan de basis. Voor boringen die de eenheid niet volledig doorboren (zogenaamde “dieper dan boringen”) is alleen de minimale basis bekend. De minimale basis wordt dan gevuld met de Einddiepte van de boring en de basis wordt gevuld met “N/A” (“not applicable”).

In de boorkolom in Figuur 5.3.5 (paragraaf 5.3) geldt bijvoorbeeld dat eenheid ‘PE’ alleen een minimale basis heeft; de overige eenheden worden volledig doorboord en hebben een basis.

Indien een eenheid grenst aan een of meerdere andere modelgebieden waarin de eenheid ook voorkomt wordt per eenheid een aanvullende dataset met “bufferpunten” gemaakt om een goede aansluiting tussen de modelgebieden te verkrijgen. Deze aanvullende dataset bestaat uit locaties (x,y) in een bufferzone rondom het modelgebied waar de eenheid in een of meerdere andere modelgebieden voorkomt (Figuur 5.4.2). De waarde van de al gemodelleerde eenheid in de omliggende gebieden wordt toegekend aan de bufferpunten in Isatis® en zal in de interpolatie als harde data<sup>3</sup> worden meegenomen.



Figuur 5.4.2: Bufferpunten op een vaste afstand van de grens van Oostelijke Wadden (doorgetrokken lijn) in het aangrenzende Westelijke Wadden.

Deze processtap is geautomatiseerd, met uitzondering van het maken van de bufferpunten. De bufferpunten worden handmatig aangemaakt met behulp van GIS operaties in ArcGIS.

<sup>3</sup> “Harde data” is data uit directe waarnemingen (bijvoorbeeld boorgegevens). Harde data wordt in het interpolatieproces zo exact mogelijk wordt overgenomen naar het resulterende grid. “Zachte data”, bijvoorbeeld stuurvlakken, is data waarmee de interpolatie in een bepaalde richting gestuurd wordt, zonder dat de waarde zo exact mogelijk wordt overgenomen naar het resulterende grid. De bufferpunten zijn weliswaar geen directe waarnemingen, maar worden wel zo exact mogelijk overgenomen naar het resulterende grid.



#### 5.4.4 Importeren data

Voor elke eenheid wordt de volgende data in Isatis® geïmporteerd:

- De boorgegevens die in de vorige processtap zijn gemaakt.
- Voor eenheden die gebaseerd worden op DGM of REGIS II:
  - DGM of REGIS II basisvlak (raster).
  - Breuken waarin de breuken zijn opgenomen die de basis van de eenheid snijden (shapefile) uit DGM.
  - Potentiële verbreidingsgrens van de eenheid (raster) uit DGM.
- Voor eenheden die niet gebaseerd worden op DGM of REGIS II:
  - Verrasterde verbreidingsgrens (raster).
- Indien de eenheid grenst aan een of meerdere andere modelgebieden waarin de eenheid ook voorkomt worden de basisrasters van die eenheid in de andere modelgebieden geïmporteerd en de in de voorgaande processtap gemaakte bufferpunten. De punten en vlakken worden gebruikt om een goede aansluiting tussen de modelgebieden te verkrijgen.

Verder wordt de volgende algemene informatie geïmporteerd:

- Maaiveld- en waterbodemhoogtebestand van het modelgebied (raster).
- Horizontale begrenzing van het modelgebied (raster).

In Isatis® worden de boorgegevens voor elke eenheid opgesplitst in twee subsets: één set met daarin de boringen die de basis van de eenheid bereiken hebben, en één subset met boringen die de basis van de eenheid niet bereiken hebben. Zie ook de uitleg in de vorige paragraaf.

Voor eenheden die grenzen aan een of meerdere andere modelgebieden waarin de eenheid ook voorkomt worden de bufferpunten gesneden met de basisvlakken uit die andere modelgebieden om van de locatie (x,y) de diepteligging van het vlak (z) te bepalen. Het resultaat (x,y,z) wordt toegevoegd aan de boorgegevens met boringen die de basis van de eenheid bereiken hebben.

Deze processtap is geautomatiseerd; de batchinstructies voor Isatis® liggen vast in de *workflow manager*.

#### 5.4.5 Importeren of maken trendvlak basis

Om de regionale trend van de basis van de niet-DGM eenheden vast te stellen wordt een trendvlak berekend. Dit gebeurt met de *Linear Kriging* methode waarbij de boorgegevens met boringen die de basis van de eenheid bereiken hebben worden geïnterpoleerd tot een vlak met een grove rastercelgrootte, bijvoorbeeld 500 x 500 of 1000 x 1000 m.

Voor eenheden die gebaseerd worden op DGM of REGIS II geldt dat er al een trendvlak is: dit is namelijk het DGM of REGIS II basisvlak.

Deze processtap is geautomatiseerd; de batchinstructies voor Isatis® liggen vast in de *workflow manager*.

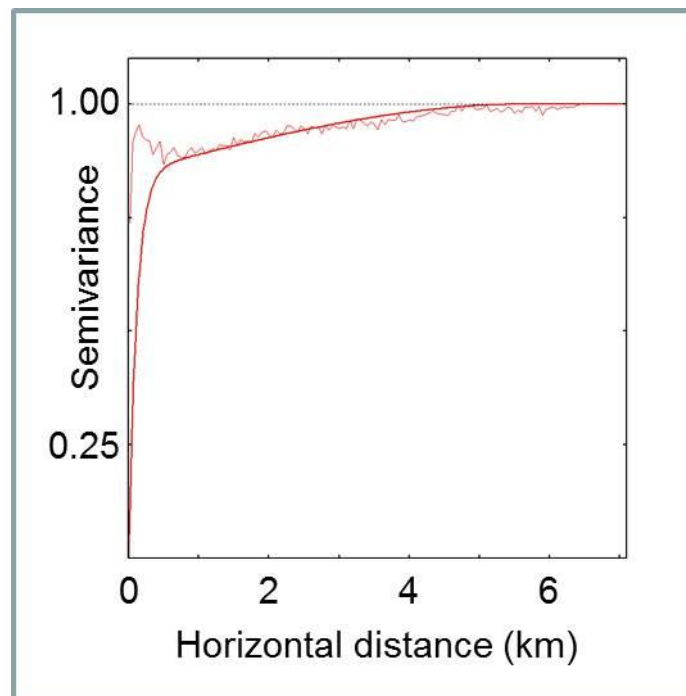
#### 5.4.6 Simuleren zonder minimale basis

Voor elke eenheid worden de boringen die de basis van de eenheid bereiken hebben vergeleken met het trendvlak. Het verschil tussen de boring (puntwaarneming) en het trendvlak heet een residu. De grootte van een residu is een maat voor hoe goed

het vlak overeenkomt met de data. Bovendien worden op deze manier eventuele grootschalige trends uit de dataset gehaald, waardoor de resterende ruimtelijke correlatie beter bepaald kan worden.

De berekende residuen worden vervolgens met een *normal score transformation* Gaussisch getransformeerd. Dit betekent dat de residuen een normale verdeling krijgen met een gemiddelde van 0, en een standaarddeviatie van 1. Deze transformatie is noodzakelijk omdat de gekozen interpolatie techniek uitgaat van normaal verdeelde variabelen.

Van de normaal verdeelde residuen wordt vervolgens de ruimtelijke correlatie bepaald en met behulp van een semi-variogram beschreven (Chilès & Delfiner, 2012; Figuur 5.4.3). Deze variogram-analyse is een noodzakelijke, handmatige stap in een voor het overige geautomatiseerde procedure. De resultaten van de variogram-analyse wordt vastgelegd in de *workflow manager*.



Figuur 5.4.3: Voorbeeld van een variogram van de basis van een geologische eenheid. De dunne, kronkelige lijn is het experimentele variogram dat uit een statistische analyse van de data volgt. De dikke, gladde lijn is het variogrammodel waarmee de modelleur de ruimtelijke correlatie beschrijft. In beide gevallen gaat het om de ruimtelijke correlatie in de residuen van de basis van de eenheid.

Voor elke rastercel binnen de potentiële verbreiding van de eenheid wordt nu een voorspelling van de residuele waarde berekend. Hiervoor wordt een *Conditional Sequential Gaussian Simulation (SGS)* (Goovaerts, 1997; Chilès & Delfiner, 2012) uitgevoerd met een *Standard Moving Neighborhood*. De simulatie wordt 10 keer uitgevoerd, resulterend in 10 realisaties of voorspellingen van de residuele waarde.

SGS schat de waarde van het residu voor een gegeven rastercel op basis van de datapunten in een cirkelvormig zoekgebied (*neighborhood*) rondom de rastercel en het variogram model dat de ruimtelijke correlatie beschrijft. Het variogram model

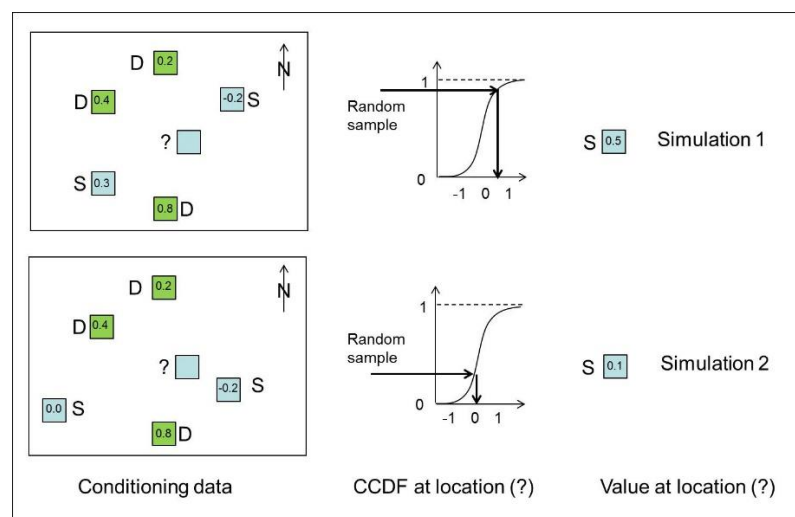
zorgt ervoor dat de dichtstbij gelegen datapunten het grootste gewicht krijgen in de interpolatie.

Een bijzonderheid van SGS is dat behalve de datapunten ook eerder geschatte waarden in het zoekgebied worden meegewogen in de interpolatie. Door nu de rastercellen middels een *random* pad te bezoeken, zal in elke simulatie een andere set aan eerder geschatte waarden in het zoekgebied liggen.

Uit de datapunten, de eerdere geschatte rastercellen en de gewichten die volgen uit het variogram model wordt de *conditionele cumulatieve data functie* (CCDF) voor de rastercel bepaald met behulp van *simple kriging*. Uit de CCDF wordt vervolgens *random* een waarde getrokken en dit wordt de voorspelde residuele waarde van de rastercel.

De SGS procedure kan als volgt worden samengevat (Figuur 5.4.4; Goovaerts, 1997; Chilès & Delfiner, 2012):

- 1) Bepaal een *random* pad waarmee elke rastercel binnen de potentiële verbreiding eenmaal wordt bezocht.
- 2) Bepaal op elke rastercel binnen de potentiële verbreiding de statistische parameters van de CCDF (gemiddelde en standaard deviatie) voor die rastercel. Doe dit met behulp van *simple kriging* op basis van de conditionerende data binnen het zoekgebied en het variogram model. De conditionerende data bestaat uit de Gaussisch getransformeerde residuen van de boorgegevens en de voorspelde residuele waarden op de eerder bezochte rastercellen binnen het zoekgebied.
- 3) Trek een willekeurige waarde uit de CCDF, en voeg het toe aan de set met waarden van eerder bezochte rastercellen.
- 4) Ga naar de volgende rastercel langs het *random* pad, en herhaal stap 2) en 3)
- 5) Herhaal stap 1) t/m 4) voor elk van de 10 simulaties, en kies telkens een ander *random* pad.



Figuur 5.4.4: Schematische weergave van twee verschillende simulaties van residuele waarde voor dezelfde rastercel "?". In simulatie (1) en simulatie (2) zijn de datapunten ("D") in het zoekgebied gelijk, maar doordat gebruik gemaakt wordt van een random pad zijn de eerder voorspelde residuele waarden ("S") verschillend. Daardoor wordt een verschillend CCDF geconstrueerd waaruit een random trekking wordt gedaan die de residuele waarde voor de rastercel "?" oplevert.

Het voordeel van deze methode is dat de resulterende vlakken een minder glad beeld laten zien, dan vlakken gemaakt met een niet-sequentiële methode als kriging en dat er meerdere even-waarschijnlijke realisaties gemaakt worden.

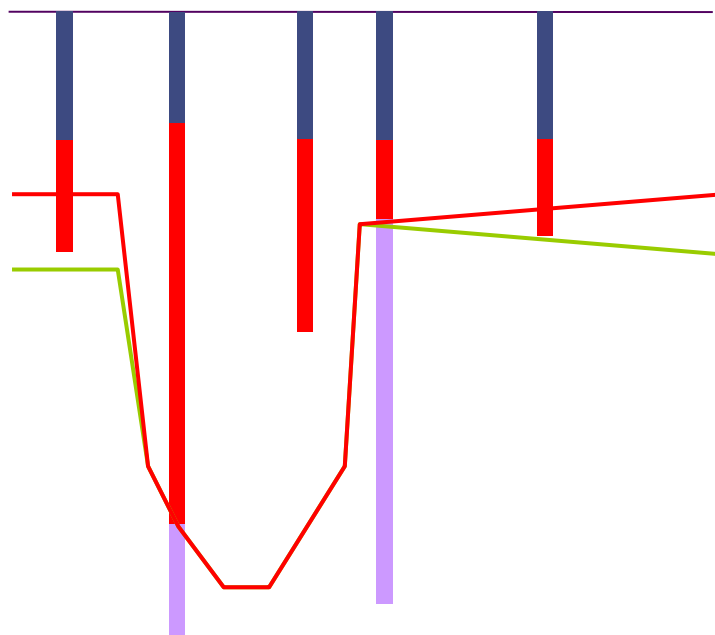
Op deze manier kunnen we de reële variatie in het vlak beter benaderen dan met een niet-sequentiële interpolatie.

Tot slot worden de Gaussische transformatie van de geïnterpoleerde residuen terug getransformeerd en wordt het resultaat opgeteld bij het trendvlak van de eenheid. Omdat er 10 realisaties zijn gemaakt, resulteert dit in 10 nieuwe vlakken. Deze vlakken zijn de nieuwe trendvlakken voor de simulatie in de nu volgende processtap *Simuleren met minimale basis*.

Afgezien van de variogram-analyse is deze processtap is geautomatiseerd; de batchinstructies voor Isatis® inclusief het variogram model liggen vast in de *workflow manager*.

#### 5.4.7 *Simuleren met minimale basis*

Elk van de 10 nieuwe trendvlakken wordt nogmaals met de beschikbare boorgegevens vergeleken. In de boorgegevens worden nu echter ook de boringen die de basis van de eenheid *niet* bereikt hebben betrokken. Deze boringen zijn van belang omdat zij laten zien hoe diep de basis van de eenheid minimaal moet liggen. Met name in diep gelegen delen van de eenheid, waar de boorgegevens schaars zijn, komt deze “dieper dan” informatie van pas (Figuur 5.4.5).



Figuur 5.4.5: De invloed van het meenemen van minimale basis informatie in de 'rode' eenheid. De rode lijn stelt de basis van de eenheid voor na de simulatie zonder minimale basis. In deze simulatie waren alleen de boringen betrokken waar onder de rode eenheid nog een andere eenheid aanwezig is (tweede en vierde boring van links). De groene lijn stelt de nieuwe basis van de eenheid voor nadat ook de minimale basis informatie is meegenomen (eerste en vijfde boring van links). De derde boring van links heeft geen invloed omdat het vlak uit de eerste simulatie al dieper lag dan de boring aangaf.

Als het vlak (resultaat van het proces Simuleren zonder minimale basis) al dieper ligt dan de minimale basis van de boorgegevens wordt het datapunt niet meegenomen. Als blijkt dat het vlak *ondieper* ligt dan de minimale basis, dan wordt er een nieuwe basis gemaakt, die de minimale basis ten opzichte van NAP neemt minus 1 m (voor enkele eenheden wordt een afwijkende waarde van bijvoorbeeld 0,5 m toegepast).

Vervolgens worden de residuen bepaald van de nieuwe basis ten opzichte van de 10 trendvlakken. Dit geeft 10 sets van de residuen. Daarna wordt dezelfde SGS simulatie nogmaals 10 keer uitgevoerd voor elke set van residuen. Dit resulteert in 10 x 10 is 100 realisaties van de residuen. Opgeteld bij het stuurvlak levert dit 100 realisaties van het basisvlak van de eenheid.

Deze processtap is geautomatiseerd; de batchinstructies voor Isatis® inclusief het variogrammodel liggen vast in de *workflow manager*.

#### 5.4.8 *Berekenen gemiddelde uitkomst basis*

Voor elke te modelleren stratigrafische eenheid beschikken we nu over 100 realisaties van de basis van de eenheid. Van de 100 realisaties wordt het *gemiddelde* berekend en de *standaarddeviatie*. Alle verdere berekeningen en bewerkingen gaan uit van dit gemiddelde en deze standaarddeviatie; de 100 realisaties worden opgeslagen maar (momenteel) niet verder gebruikt.

Deze processtap is geautomatiseerd; de batchinstructies voor Isatis® liggen vast in de *workflow manager*.

#### 5.4.9 *Uitzondering: Antropogeen*

Er geldt een uitzondering voor de eenheid Antropogeen. Voor deze eenheid geldt dat er binnen de verspreidingsgrens van het Antropogeen een dikte wordt gesimuleerd in plaats van de basis. De gemodelleerde dikte wordt vervolgens afgetrokken van het maaiveld om tot de basis van het Antropogeen te komen. Verder geldt dat het Antropogeen binnen de verspreidingsgrens een minimale dikte krijgt van 0,5 m (resulterend in 1 voxel in het voxelmodel).

Afgezien van de variogramanalyse is deze processtap geautomatiseerd; de batchinstructies voor Isatis® inclusief het variogram model liggen vast in de *workflow manager*.

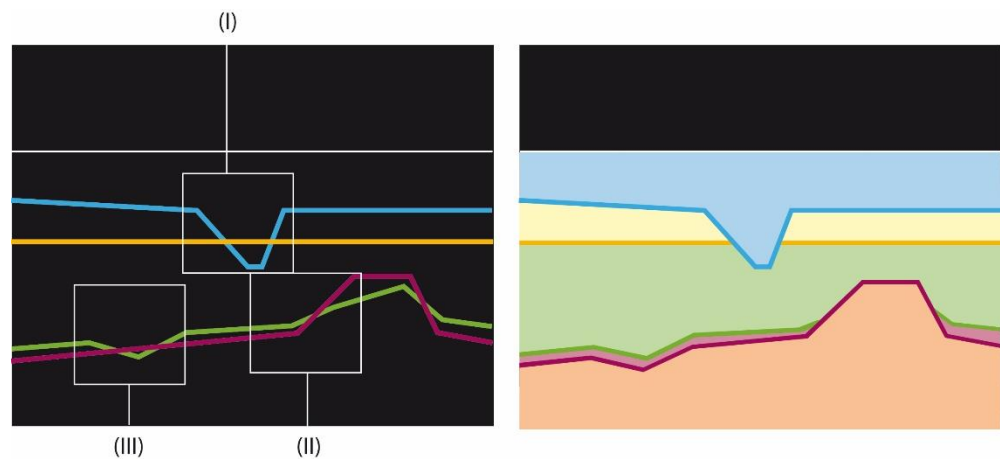
#### 5.4.10 *Maken consistent lagenmodel*

In deze processtap worden de gemiddelde basisvlakken (inclusief die van het Antropogeen) gecombineerd tot een geïntegreerd, consistent lagenmodel, waarbij de stratigrafische positie en de onderlinge geologische afsnijdingsrelaties van de eenheden gehonoreerd worden. Deze relaties zijn bekend uit het in een eerder werkproces opgestelde conceptuele geologische model.

Het consistent maken van de vlakken bestaat uit het systematisch vergelijken van elk basisvlak met de basisvlakken van de stratigrafisch hoger gelegen eenheden. Uit deze vergelijking zal veelvuldig blijken dat de basis van een hoger gelegen eenheid de basis van een onderliggende eenheid doorsnijdt. In het algemeen zijn er drie doorsnijdingsrelaties mogelijk, elk met een verschillend effect op het lagenmodel (Figuur 5.4.6):

- I. De bovenliggende eenheid heeft de onderliggende eenheid geërodeerd. In dit geval wordt de onderliggende eenheid geclipt door de bovenliggende. Dit is de meest voorkomende relatie.
- II. De bovenliggende eenheid is afgezet tegen het reliëf van de onderliggende eenheid. In dit geval wordt de bovenliggende eenheid geclipt door de onderliggende. Voorbeelden van onderliggende eenheden die een reliëf vormen zijn de donken / rivierduinen en de stuwwallen.
- III. De doorsnijding is een artefact van de interpolatie waarbij twee concordante eenheden betrokken zijn. Een voorbeeld is de basis van de dunne Basisveen Laag in modelgebied Zeeland die abusievelijk veelvuldig wordt weggesneden door de basis van de bovenliggende eenheden, terwijl bekend is dat de Basisveen Laag binnen de verbreidingsgrenzen vrijwel overal voorkomt. In dit geval wordt de basis van de onderliggende eenheid verlaagd tot een vaste waarde (bijvoorbeeld 50 cm voor de Basisveen Laag) onder de basis van de bovenliggende eenheid.

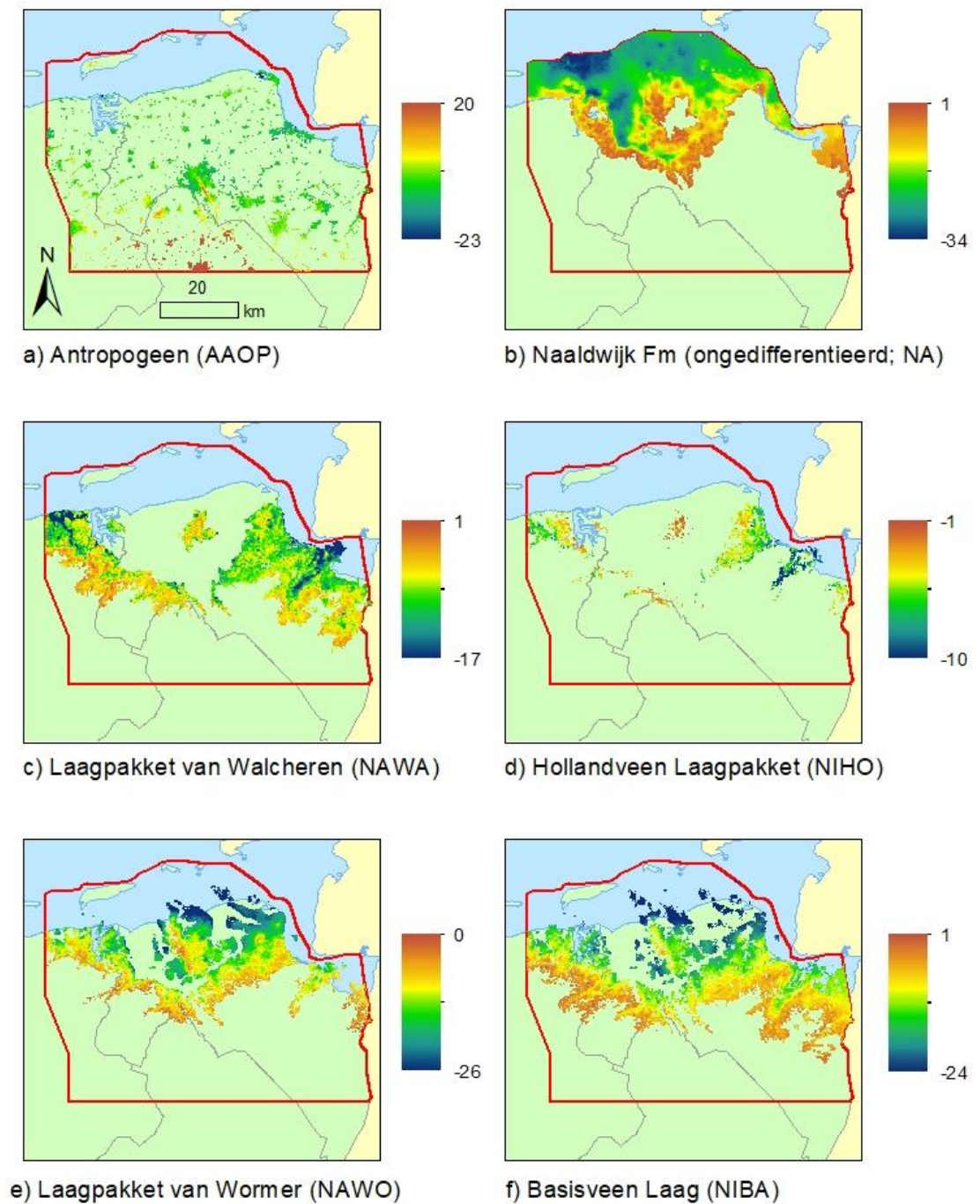
De hoogst gelegen eenheid waarmee alle andere eenheden volgens relatie (I) worden geclipt is het maaiveld- en waterbodemoogte vlak.



Figuur 5.4.6: Het consistent maken van de berekende basis vlakken. Links de basisvlakken als uitkomst van de simulaties; rechts het consistente lagenmodel. Bij I snijdt de bovenliggende eenheid de onderliggende eenheid af. Dit is de meest voorkomende doorsnijdingsrelatie. Bij II wigt de bovenliggende eenheid uit tegen de onderliggende eenheid. Voorbeelden zijn de donken / rivierduinen en de stuwwallen. Bij III wordt het onderliggende vlak aangepast aan de ligging van de bovenliggende eenheid, zoals bijvoorbeeld gebeurt bij de Basisveen Laag.

Een voorbeeld van een set consistent gemaakte basisvlakken wordt weergegeven in Figuur 5.4.7.





Figuur 5.4.7: Rasterkaarten van de diepteligging (in m ten opzichte van NAP) van de basis van een aantal Holocene eenheden die in modelgebied Oostelijke Wadden worden onderscheiden.

Na het consistent maken van de basis vlakken wordt voor elke eenheid een topvlak afgeleid van de bovenliggende basis-vlakken. Ook de standaarddeviatie van de top wordt berekend uit de standaarddeviaties van de bovenliggende basissen.

Tot slot wordt voor elke eenheid de dikte berekend uit het verschil tussen top en basis.

Deze processtap is geautomatiseerd; de batchinstructies voor Isatis® (inclusief het variogram model) liggen vast in de *workflow manager*.

#### 5.4.11 Exporteren lagenmodel

Vervolgens worden de vlakken geëxporteerd, waarbij het eindresultaat van de modellering per geologische eenheid (<eenheid code>), een vijftal ArcAscii-grids is (Tabel 5.4.1).

Tabel 5.4.1: De vijf ArcAscii-grids van een geologische eenheid <eenheid code>.

| Bestand                    | Toelichting  |
|----------------------------|--|
| <eenheid code>_bcc.asc     | Basis van de eenheid, gemiddelde van 100 realisaties   |
| <eenheid code>_tcc.asc     | Top van de eenheid, afgeleid uit de basisvlakken en de onderlinge stratigrafische relaties van de modeleenheden.   |
| <eenheid code>_dcc.asc     | Dikte van de eenheid, verschil tussen top en basis   |
| <eenheid code>_std_bcc.asc | Standaarddeviatie in de 100 realisaties van de basis van de eenheid  |
| <eenheid code>_std_tcc.asc | Standaarddeviatie in de top van de eenheid, afgeleid uit de standaarddeviaties van de basisvlakken en de onderlinge stratigrafische relaties van de modeleenheden. |

Deze processtap is geautomatiseerd; de batchinstructies voor Isatis® inclusief het variogrammodel liggen vast in de *workflow manager*.

#### 5.4.12 Controleren lagenmodel

Het lagenmodel wordt door een gebiedskundig geoloog gecontroleerd. Hij doet dit in samenhang met de stratigrafische indeling van de boorbeschrijvingen. Het resultaat van de stratigrafische indeling heeft immers een groot effect op het lagenmodel.

De controlerend geoloog beoordeelt het model aan de hand van sleutelprofielen waarin de verticale opeenvolging van het lagenmodel is afgebeeld, kaarten van top, basis en dikte van de verschillende eenheden, 3D beelden in de 3D visualisatieomgeving van Isatis® en in de door Deltares ontwikkelde software iMOD. Aandachtspunten zijn onder meer de diepteligging van de eenheden, de diktes, de onderlinge afsnijdingsrelaties, en de werkelijke verbredingen in vergelijking met de potentiële verbreding. Ook wordt gekeken naar verschillen tussen boorgegevens en de basisvlakken: zijn er uitbijters die artefacten in de vlakken veroorzaken?

Net als bij de controle van de stratigrafische indeling legt de controlerend geoloog eventuele bevindingen vast in een bevindingenlijst, met per bevinding de volgende items:

- Volgnummer van de bevinding.

- Datum.
- Status ('Open', 'Opgelost', 'Niet oplossen'; initieel: 'Open').
- Nummer van profiel waarin bevinding is geconstateerd.
- Boornummer waarin bevinding is geconstateerd.
- Stratigrafische eenheid waarop bevinding betrekking heeft.
- Omschrijving van de bevinding.
- Eventuele bijlagen.

De bevindingen worden geanalyseerd door de modellers en met de controlerend geoloog besproken. Bij de analyse worden de volgende zaken vastgelegd:

- Prioriteit ('Laag', 'Midden', 'Hoog').
- Analyse: oorzaak en gewenste oplossing.
- Oplossing status ('Direct oplossen', 'Volgende release', 'Niet oplossen').

Prioriteit en oplossing status worden in gezamenlijk overleg met de controlerend geoloog vastgesteld. De bevindingen waarvoor besloten is ze op te lossen worden door de modellers in het model verwerkt. Bij de eerstvolgende iteratie van de modellering wordt opnieuw gecontroleerd en krijgen opgeloste bevindingen de status 'Opgelost'. Indien er, na een aantal iteraties, geen openstaande bevindingen meer zijn die opgelost moeten worden is het eindpunt van het werkproces **Lagenmodellering** bereikt.

Bevindingen die eindigen met de status 'Volgende release' worden opgenomen in een algemene bevindingenlijst van GeoTOP. In deze algemene bevindingenlijst zijn dus bevindingen van meerdere modelgebieden opgenomen.

Afhankelijk van de bevindingen wordt een (deel van) het werkproces **Lagenmodellering** opnieuw uitgevoerd. In de praktijk worden echter ook nog bevindingen gedaan die te maken hebben met het werkproces **Interpretatie**. Dit komt omdat deze eerdere controle zich beperkte tot een aantal controleprofielen, en het lagenmodel voor het eerst het ruimtelijke effect van de stratigrafische indeling zichtbaar maakt.

Afhankelijk van de aard van deze bevindingen kan daarom worden besloten ook (een deel van) het werkproces Lagenmodellering opnieuw uit te voeren.

Net als bij de controle van werkproces Interpretatie worden ook hier nog veel bevindingen veroorzaakt door boringen van lage kwaliteit, de zogenaamde 'uitbijters'. Deze boringen zijn zichtbaar doordat ze een afwijkende piek of put in de basis van een eenheid veroorzaken.

De boring wordt in voorkomende gevallen opgenomen in de **uitsluitlijst** die in processtap *Opsporen en uitsluiten duplicaten* voor het eerst is aangemaakt.

#### 5.4.13 *Berekenen kans op stratigrafie*

De standaarddeviaties die berekend zijn in Isatis® worden gebruikt om voor de locatie (x,y,z) van elke voxel de kans te berekenen dat de voxel deel uit maakt van een bepaalde lithostratigrafische eenheid. Deze processtap sorteert dus alvast voor op het voxelmodel dat in het volgend werkproces **Voxelmodellering** gemaakt zal worden. De processtap kan echter direct na **Lagenmodellering** al worden uitgevoerd.

Om de kansen te berekenen is een stochastische (“Monte Carlo”) methode gebruikt, die geïmplementeerd is in een batchprogramma (Python).

De methode werkt als volgt:

Noem de verticale ligging (diepte) van de bovenkant van een geologische laag  $Z_1$ , noem de ligging van de onderkant  $Z_2$  (diepte wordt naar beneden toe positief gerekend). Beide zijn onzeker en worden gekarakteriseerd door een kansverdeling. We nemen aan dat  $Z_1$  en  $Z_2$  bivariaat normaal verdeeld zijn met gemiddelden  $\mu_1$  en  $\mu_2$ , varianties  $\sigma_1^2$  en  $\sigma_2^2$ , en correlatie  $\rho_{12}$ . In onderstaande formules horen bij de werkelijke waarden  $Z_1$  en  $Z_2$  uit de kansverdeling getrokken waarden  $z_1$  en  $z_2$  (geschreven met kleine letters).

We willen nu de kans berekenen dat een punt op diepte  $z$  zich in de geologische laag bevindt. Oftewel, we willen berekenen  $P(z > Z_1 \text{ en } z < Z_2)$ . Een analytische oplossing is niet voorhanden, daarom berekenen (benaderen) we hem numeriek als volgt:

1) Zet een **Teller** op nul. Met deze teller wordt bijgehouden hoe vaak in de simulatie  $z > Z_1$  en  $z < Z_2$ .

2) Herhaal 500 keer:

Genereer een trekking  $z_1$  uit:

$$N(\mu_1, \sigma_1^2)$$

(dit is de normale verdeling met gemiddelde  $\mu_1$  en variantie  $\sigma_1^2$ ).

Genereer een trekking  $z_2$  uit:

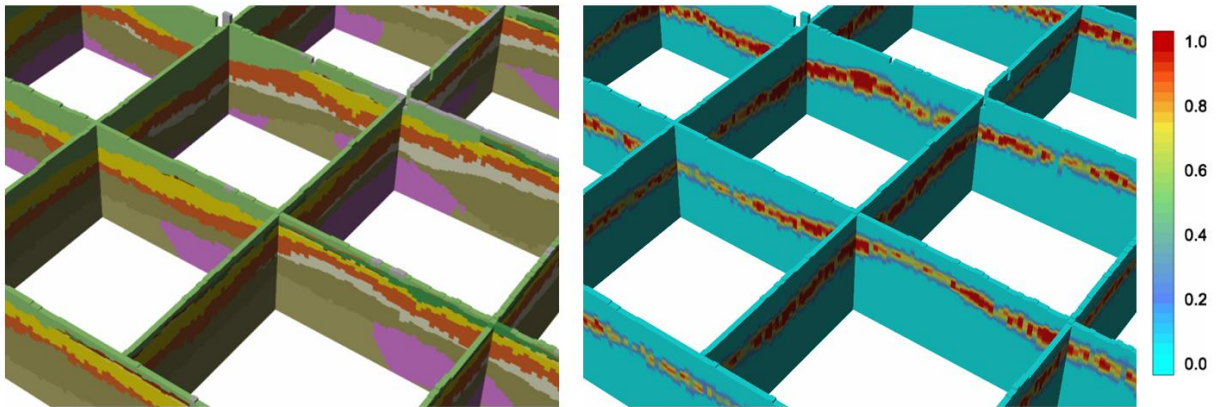
$$N\left(\mu_2 + \rho_{12} \cdot \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \cdot (z_1 - \mu_1), (1 - \rho_{12}^2) \cdot \sigma_2^2\right)$$

(dit is de conditionele kansverdeling van  $Z_2$  gegeven  $Z_1 = z_1$ )

Hoog **Teller** op met 1 als  $z > z_1$  en  $z < z_2$

3) Bereken (schat) de gevraagde kans als Teller / 500.

Deze methode kan worden toegepast op alle gemodelleerde geologische eenheden (Figuur 5.4.8). Een vereiste van de methode is de correlatiecoëfficiënt ( $\rho_{12}$ ) tussen top en basis van elke eenheid. Deze correlatiecoëfficiënten geven aan in hoeverre het verloop van de diepteligging van de top samenhangt met die van de basis en zijn in Isatis® berekend.



Figuur 5.4.8: Links: Fencediagram door het voxelmodel met de geologische eenheid als attribuut. De rode eenheid is het Laagpakket van Gieten van de Formatie van Drente. Rechts: kans dat de voxels tot het Laagpakket van Gieten behoren. De rode voxels liggen ruimschoots in het Laagpakket en hebben daarom een kans van 1 om tot het Laagpakket te horen. Dichter naar de top en basis toe geven de andere kleuren aan dat de kans afneemt.

Het resultaat van de berekening is per stratigrafische eenheid een 3D gridfile in Isatis®-ASCII formaat.

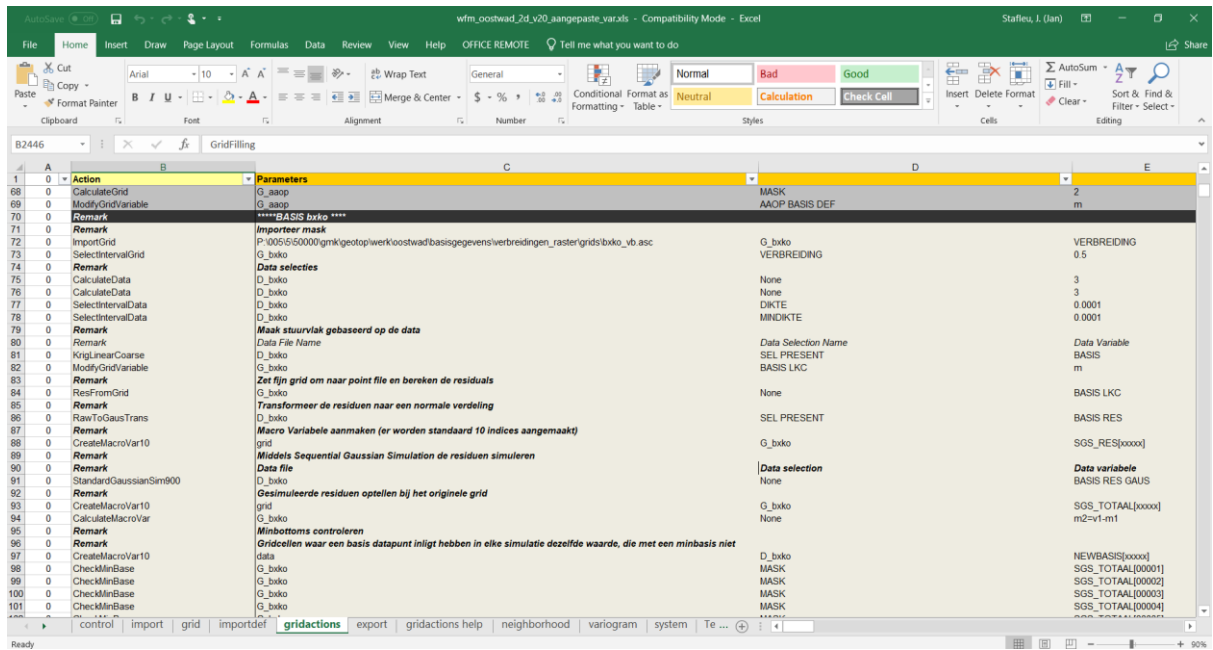
Deze processtap is geautomatiseerd; de batchinstructies voor Isatis® liggen vast in de *workflow manager*.

#### 5.4.14 Workflow management

Het belangrijkste deel van het werkproces wordt met behulp van het softwarepakket Isatis® van de Franse firma Geovariances uitgevoerd. Isatis® is een geostatistisch analyse en modelleringspakket dat zowel handmatig als batchgewijs aangestuurd kan worden. In de batchgewijze werkwijze worden alle uit te voeren acties vastgelegd en zijn daarmee reproduceerbaar. Tevens biedt de batchgewijze werkwijze de mogelijkheid om de vaak langdurige berekeningen 's nachts of in het weekend uit te voeren.

De batchgewijze aansturing van Isatis® gebeurt met zogenaamde *journal-files*, waarin instructies voor Isatis® zijn opgenomen. Deze instructies worden vervolgens door Isatis® sequentieel verwerkt. Het handmatig samenstellen van *journal-files* is niet eenvoudig. Daarom is in Microsoft Excel een zogenaamde *workflow manager* ontwikkeld waarmee *journal-files* aangemaakt kunnen worden.

Centraal in de *workflow manager* is het tabblad “gridactions” waar Isatis® functies / acties worden opgenomen (Figuur 5.4.9).



Figuur 5.4.9: Workflow manager voor de lagenmodellering in Isatis®.

Per uit te voeren functie is er 1 regel met de naam van de actie en de invoerparameters. Tevens is er een kolom waarmee de regel aan- of uitgezet kan worden. Met behulp van een VBA script (macro) wordt een *journal-file* gecreëerd waarmee alle aangezette functies in Isatis® kunnen worden uitgevoerd. De algemene functionaliteit van Excel maakt het mogelijk om snel functies te kopiëren of de volgorde aan te passen.

## 5.5 Voxelmmodellering

In de **Voxelmmodellering** wordt allereerst het lagenmodel vertaald naar een voxelmodel. Elke voxel is dan gevuld met de juiste geologische eenheid. Vervolgens wordt voor elke voxel binnen elke geologische eenheid een lithoklasse inclusief een maat van modelonzekerheid berekend. In het werkproces wordt een kwaliteitscontrole door geologische experts uitgevoerd. Het voxelmodel wordt opgenomen in de BRO.

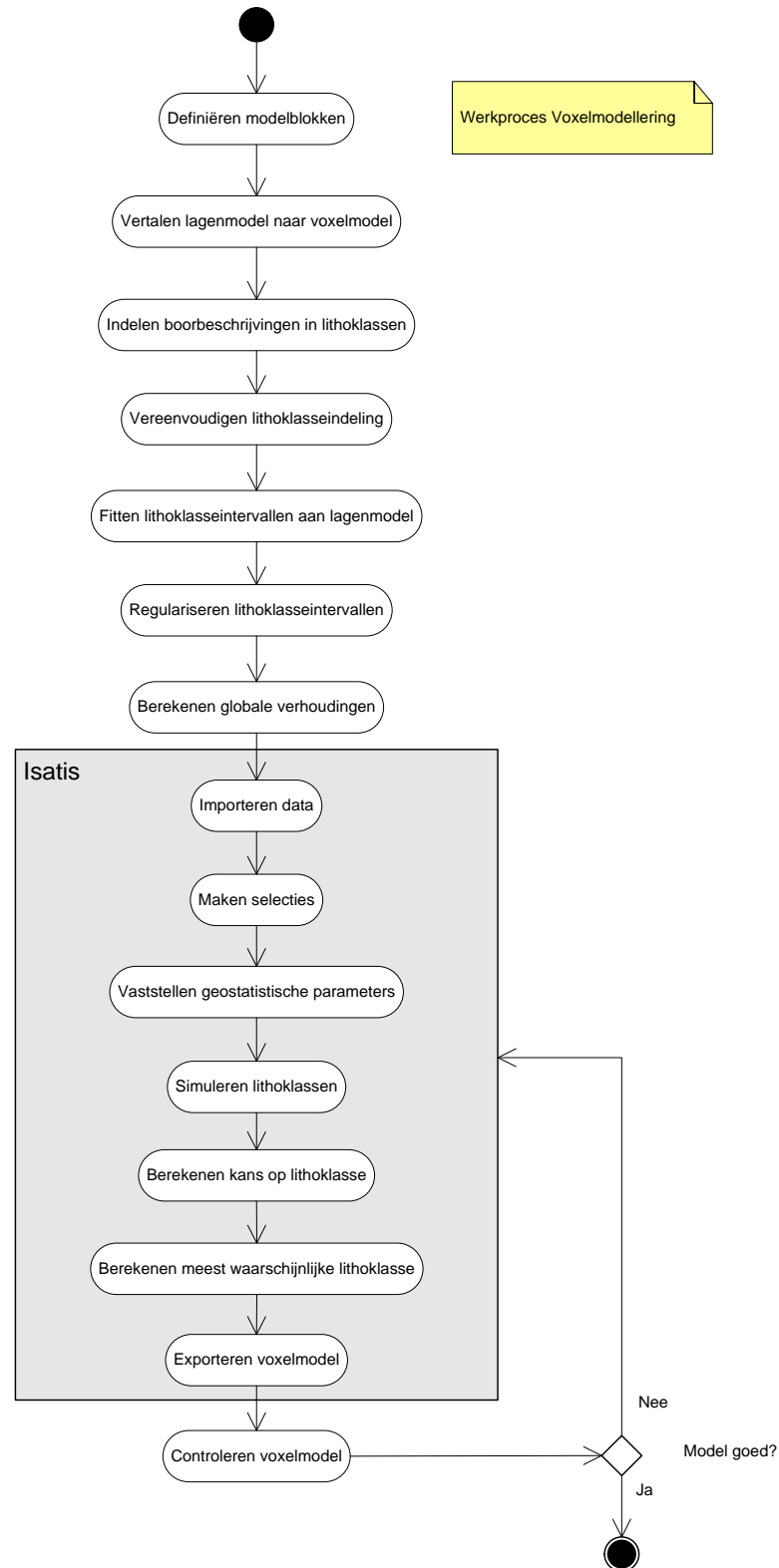
**Voxelmmodellering** bestaat uit de volgende processtappen (Figuur 5.5.1):

- Definiëren modelblokken.
- Vertalen lagenmodel naar voxelmodel.
- Indelen boorbeschrijvingen in lithoklassen.
- Vereenvoudigen lithoklasseintervallen.
- Fitten lithoklasseintervallen aan lagenmodel.
- Regulariseren lithoklasseintervallen.
- Berekenen globale verhoudingen.
- Isatis®:
  - Importeren data.
  - Maken selecties.
  - Vaststellen geostatistische parameters.
  - Simuleren lithoklassen.
  - Berekenen kans op lithoklasse.
  - Berekenen meest waarschijnlijke lithoklasse.



- Exporteren voxelmodel met alle attributen.
- Controleren voxelmodel.

In onderstaande paragrafen wordt beschreven hoe het werkproces verloopt.



Figuur 5.5.1: Processtappen in het werkproces **Voxelmodellering**.

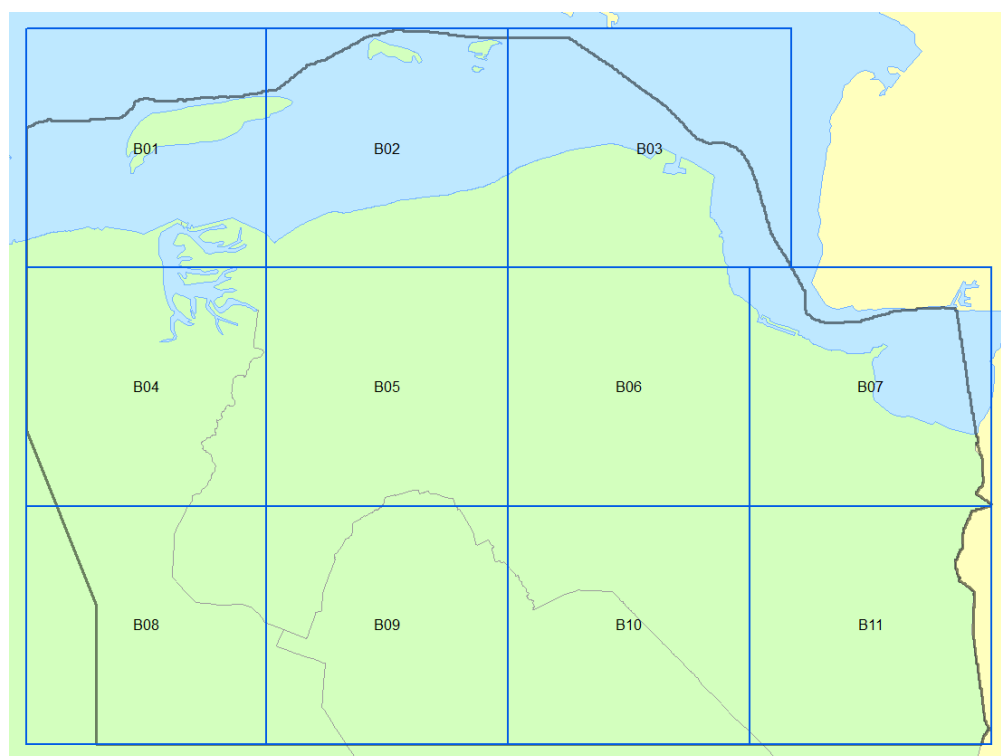
Het belangrijkste deel van het werkproces, weergegeven met een grijs blok in Figuur 5.5.1, wordt met behulp van het softwarepakket Isatis® van de Franse firma Geovariances uitgevoerd.

NB: in werkproces Lagenmodellering is sprake van een processtap *Opsporen en uitsluiten duplicaten*. Deze processtap hoeft hier niet toegepast te worden omdat Voxelmodellering uitgaat van exact dezelfde set aan boringen en sonderingen waar de duplicaten al uit verwijderd zijn.

#### 5.5.1 Definiëren modelblokken

De modelgebieden van GeoTOP bevatten grote aantallen voxels. Modelgebied Rivierengebied omvat bijvoorbeeld  $1.300 \times 1.000 \times 320 = 416$  miljoen voxels in het blokvormige grid. Van deze voxels bevinden zich zo'n 65 miljoen voxels binnen de modelgebied grenzen. Alleen voor deze voxels moeten in dit werkproces lithoklassen voorspeld worden. De overige voxels bevinden zich in de lucht, in andere modelgebieden, in de Noordzee of buiten de landsgrenzen.

In de praktijk is gebleken dat de modelleringsoftware Isatis® niet in één keer met dergelijke grote modelgebieden kan rekenen. Om deze reden worden de modelgebieden opgedeeld in blokken, genummerd B01 t/m Bxx, met xx het aantal benodigde blokken. Voor Oostelijke Wadden zijn 11 blokken nodig (Figuur 5.5.2).



Figuur 5.5.2: Onderverdeling van modelgebied Oostelijke Wadden (grijze lijn) in 11 blokken.

De aan elkaar grenzende blokken overlappen elkaar in de horizontale richtingen met 20 voxels (dat wil zeggen een overlapzone van 2 km aan weerszijden van een blokgrens). De overlapzones zorgen ervoor dat er tussen de blokken geen artificiële lithologische overgangen ontstaan. In Isatis® wordt in de blokken met overlapzones gerekend. Na afloop van de berekeningen worden de overlapzones weggesneden.

Voor modelgebieden Westelijke Wadden en Oostelijke Wadden geldt dat het aantal voxels in de verticaal voor alle blokken gelijk is: 190 in Westelijke Wadden en in 150 in Oostelijke Wadden.

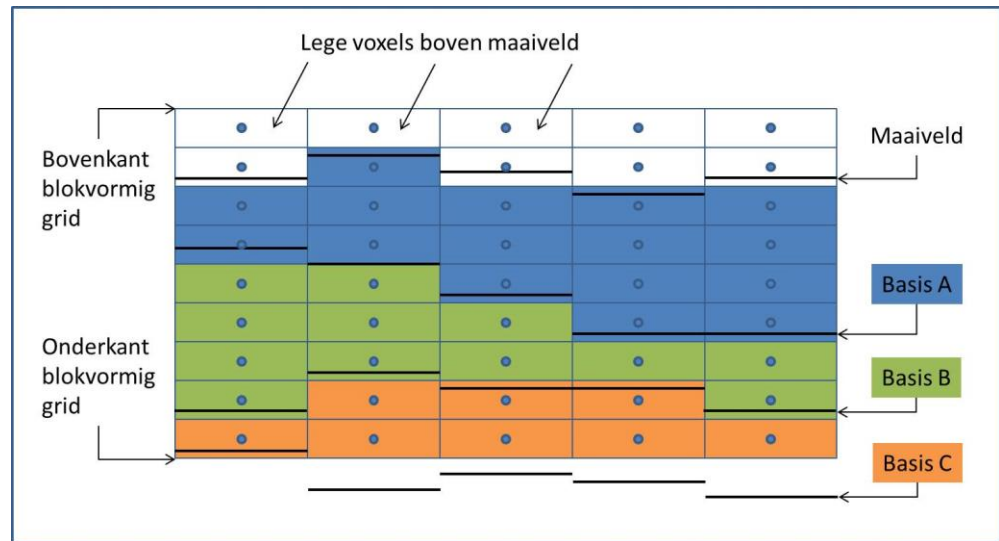
Het vaststellen van de blokgrenzen is een handmatige processtap, met ArcGIS en Excel als hulpmiddel. De definities van de blokken (nummer, (x,y,z)-locatie van de oorsprong, aantal voxels in (x,y,z)-richting) worden opgenomen in de *workflow manager*.

#### 5.5.2 *Vertalen lagenmodel naar voxelmodel*

Het in het vorige werkproces gemaakte lagenmodel is consistent, dat wil zeggen dat de top van een eenheid ofwel samenvalt met de basis van een of meerdere hoger gelegen eenheden, ofwel aan maaiveld ligt. Omgekeerd valt de basis van een eenheid ofwel samen met een of meerdere toppen van dieper gelegen eenheden, ofwel aan de onderkant van het model ligt.

Een logisch gevolg is dat elk willekeurig punt in de ruimte (binnen de begrenzingen van het modelgebied) zich altijd tussen de top en basis van één enkele modeleenheid bevindt. Deze gevolgtrekking gebruiken we om van de middelpunten van voxels te bepalen tot welke stratigrafische eenheid ze behoren.

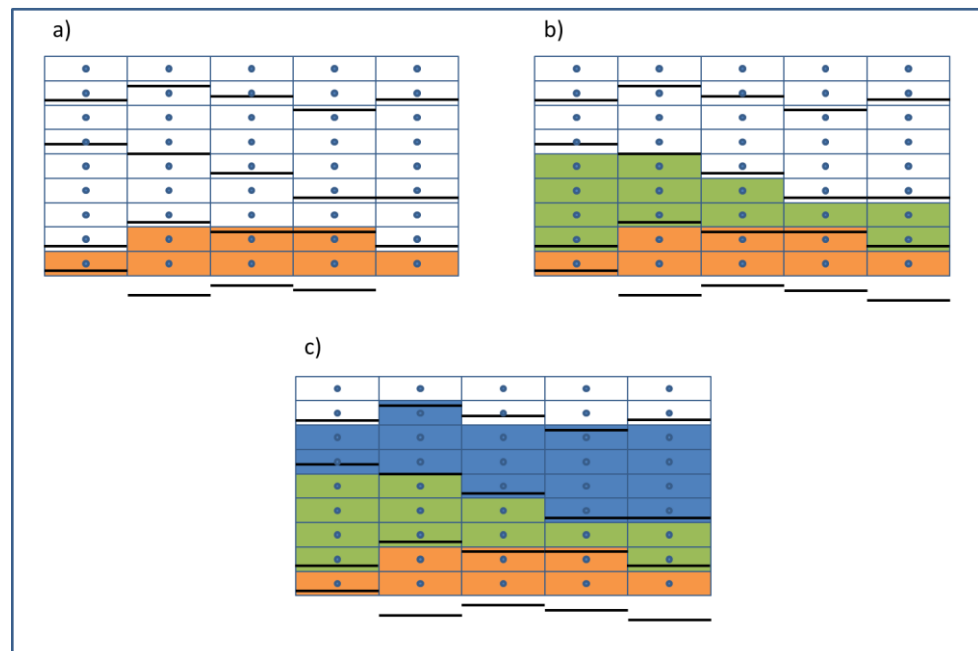
In Figuur 5.5.3 is de werkwijze schematisch weergegeven. De figuur toont een dwarsdoorsnede door een blokvormig grid van 5 x 9 voxels. Het lagenmodel bestaat uit drie stratigrafische eenheden: A, B en C waarvan de basis als zwarte lijnstukken wordt getoond. De basis van C ligt deels dieper dan de onderkant van het blokvormig grid. Aan de bovenkant wordt het lagenmodel afgesloten door het maaiveld- en waterbodemhoogte raster.



Figuur 5.5.3: Vertaling van stratigrafische eenheden in het lagenmodel naar het voxelmodel. De figuur geeft een verticale dwarsdoornede door het voxelmodel weer. Elk rechthoekje is een voxel met in het middelpunt een blauwe cirkeltje. De zwarte lijnstukjes geven de top en basis weer volgens het lagenmodel.

De volgende procedure wordt gevolgd (Figuur 5.5.4 a, b en c):

- (1) Bepaal voor elke voxel of het middelpunt (aangegeven met blauwe cirkeltjes) zich tussen de top en de basis van de diepste eenheid bevindt (eenheid C) en ken aan die voxels de diepste eenheid toe. Met 'tussen' wordt hier bedoeld: *op of boven* de basis en *onder* de top.
- (2) Herhaal stap (1) voor de overige eenheden, in stratigrafische volgorde van onder naar boven (eerst eenheid B, dan eenheid A).



Figuur 5.5.4: Stappen in de vertaling van stratigrafische eenheden in het lagenmodel naar het voxelmodel: (a) voxels met een middelpunt op of boven de basis en onder de top van eenheid C krijgen eenheid C toegekend; (b) idem voor eenheid B; (c) idem voor eenheid A. De voxels boven maaiveld blijven leeg.

De vertaling van lagen naar voxels gebeurt voor elk van de blokken in het modelgebied afzonderlijk en levert per blok een voxel dataset op in een ASCII-formaat dat in Isatis® geïmporteerd kan worden. De voxels in de datasets hebben één attribuutwaarde, namelijk een getal dat aangeeft tot welke stratigrafische eenheid de voxel behoort. In een vertaaltabel ligt vast welk getal bij welke eenheid hoort. Voor de eenheid BX in Oostelijke Wadden geldt bijvoorbeeld dat alle voxels die tot de eenheid behoren de waarde 14 krijgen.

Deze processtap is volledig geautomatiseerd met behulp van Python scripts.

### 5.5.3 Indelen boorbeschrijvingen in lithoklassen

De lithologische boorbeschrijvingen worden vertaald naar *lithoklassen*. Hierbij wordt het classificatieschema van REGIS II (Vernes & Van Doorn, 2005) gehanteerd. Lithoklassen hebben een nummer en een afkorting. Het nummer wordt gebruikt om de voxels te voorzien van een lithoklasse: voxels hebben net als rasters namelijk altijd numerieke waarden als attribuut (Tabel 5.5.1).

Tabel 5.5.1: De in GeoTOP gebruikte lithoklassen met nummer, afkorting en, indien van toepassing, korrelgrootte-mediaan.

| Lithoklasse                       | Nummer | Afkorting | Korrelgrootte (mediaan) |
|-----------------------------------|--------|-----------|-------------------------|
| Organisch materiaal (veen)        | 1      | o         | -                       |
| Klei                              | 2      | k         | -                       |
| Kleiig zand, zandige klei en leem | 3      | kz        | -                       |
| Fijn zand                         | 5      | zf        | ≥ 63 µm en < 150 µm     |
| Midden zand                       | 6      | zm        | ≥ 150 µm en < 300 µm    |
| Grof zand                         | 7      | zg        | ≥ 300 µm en < 2 mm      |
| Grind                             | 8      | g         | ≥ 2 mm                  |
| Schelpen                          | 9      | she       | -                       |
| Zand met onbekende korrelgrootte  | 10     | z         | Onbekend                |

De indeling volgens REGIS II is erop gericht om lithologiën met vergelijkbare hydraulische eigenschappen te groeperen in categorieën die lithoklassen worden genoemd. Daarmee is de indeling bij uitstek geschikt voor hydrologische toepassingen. Voor veel andere toepassingen is de indeling echter ook geschikt.

Bij het vertalen van de boorbeschrijvingsintervallen in lithoklasseintervallen wordt gebruik gemaakt van de volgende attributen uit DINO: hoofdlithologie, bijmengingen klei, zand en silt, lutumpercentage en de aanwezigheid van kleibrokjes.

De indelingsregels zijn als volgt (coderingen volgens SBB 5.1; Bosch, 2000):

#### *Lithoklasse 1, organisch materiaal*

- Hoofdlithologie is V (veen), GY (gyttja), DY (dy), DET (detritus) of HO (hout). In het overgrote deel van de boorbeschrijvingen gaat het hier om veen.

#### *Lithoklasse 2, klei*

- Hoofdlithologie is K (klei), met *eventuele* bijmenging silt in de categorieën:
  - S1 (zwak siltig).
  - S2 (matig siltig).

#### *Lithoklasse 3, kleilig zand, zandige klei en leem*

- Hoofdlithologie is K (klei), met *verplichte* bijmenging in een van de volgende categorieën:
  - S3 (sterk siltig).
  - S4 (uiterst siltig).
  - SX (siltig).
  - Z1 (zwak zandig).
  - Z2 (matig zandig).
  - Z3 (sterk zandig).
  - ZX (zandig).
- Hoofdlithologie is L (leem).
- Hoofdlithologie is fijn zand (zie Lithoklasse 5 voor de definitie), met als extra *verplichte* criteria een van de volgende:
  - Bijmenging K3<sup>4</sup> (sterk kleilig) of KX (kleilig).
  - Kleibrokjes aanwezig.
  - Lutumpercentage  $\geq 5\%$ .

#### *Lithoklasse 4*

- Deze lithoklasse is komen te vervallen. Oorspronkelijk was dit een aparte klasse voor leem. In boorbeschrijvingen wordt de hoofdlithologie leem echter vaak verkeerd beschreven als zandige klei of als kleilig zand. Een aparte lithoklasse leem zou daarom tot onbetrouwbare uitkomsten leiden. Daarnaast komt leem in de Nederlandse ondergrond relatief weinig voor. Voor hydrologische toepassingen is het onderbrengen van leem bij kleilig zand en zandige klei geen bezwaar.

#### *Lithoklasse 5, fijn zand*

- Hoofdlithologie is Z (zand) of GCZ (glauconietzand), met zandmediaan  $\geq 63 \mu\text{m}$  en  $< 150 \mu\text{m}$ , of een van de volgende zandmediaan klassen:
  - ZFC (zand fijne categorie).
  - ZUF (zand uiterst fijn).
  - ZUFO (zand uiterst fijn).
  - ZZF (zand zeer fijn).
  - ZZFO (zand zeer fijn).

---

<sup>4</sup> Volgens de SBB komt bijmenging K3 alleen bij hoofdlithologie veen voor. In de DINO databank komt K3 echter ook bij hoofdlithologie zand voor, met als betekenis sterk kleilig zand.



- Indien er sprake is van bijmenging K3<sup>2</sup> of KX, kleibrokjes en/of een lutumpercentage  $\geq 5\%$ , dan is de lithoklasse echter *kleiig zand*, *zandige klei* en *leem*. Zie ook bij die lithoklasse.

#### *Lithoklasse 6, midden zand*

- Hoofdlithologie is Z (zand) of GCZ (glauconietzand), met zandmediaan  $\geq 150 \mu\text{m}$  en  $< 300 \mu\text{m}$ , of een van de volgende zandmediaanklassen:
  - ZMC (zand midden categorie).
  - ZMF (zand matig fijn).
  - ZMFO (zand matig fijn).
  - ZMG (zand matig grof).
  - ZMGO (zand matig grof).

#### *Lithoklasse 7, grof zand*

- Hoofdlithologie is Z (zand) of GCZ (glauconietzand), met zandmediaan  $\geq 300 \mu\text{m}$  en  $< 2 \text{ mm}$ , of een van de volgende zandmediaan klassen:
  - ZGC (zand grove categorie).
  - ZZG (zand zeer grof).
  - ZZGO (zand zeer grof).
  - ZUG (zand uiterst grof).
  - ZUGO (zand uiterst grof).

#### *Lithoklasse 8, grind*

- Hoofdlithologie is G (grind) of STN (stenen).
- Hoofdlithologie is Z (zand) met een zandmediaan  $\geq 2 \text{ mm}$ . Deze laatste classificatie is onjuist (sediment met een zandmediaan  $\geq 2 \text{ mm}$  is grind, geen zand), maar komt in DINO boorbeschrijvingen wel voor.

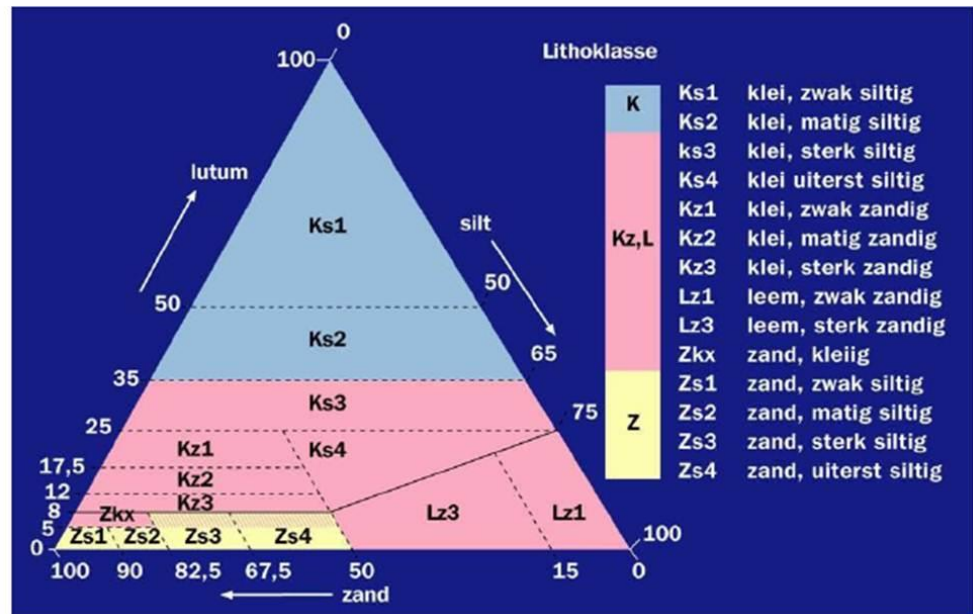
#### *Lithoklasse 9, schelpen*

- Hoofdlithologie is SHE (schelpen).

#### *Lithoklasse 10, zand met onbekende korrelgrootte*

- Hoofdlithologie is Z (zand) of GCZ (glauconietzand), zandmediaan is onbepaald en de zandmediaanklasse is onbepaald of wijkt af van een van de bij lithoklasse 5, 6 en 7 genoemde zandmediaanklassen.
- Lithoklasse 10 wordt wel toegekend aan de boorintervallen, maar komt in het uiteindelijke voxelmodel niet meer voor omdat alle voxels met lithologie zand in het voxelmodel een voorspelling van de korrelgrootte krijgen (lithoklasse 5, 6 of 7).

De criteria voor het onderscheid in klei, zand en kleiig zand, zandige klei en leem zijn schematisch weergegeven in Figuur 5.5.5.



Figuur 5.5.5: Belangrijkste criteria voor de indeling in lithoklassen klei (blauw), zand (geel) en kleiig zand, zandige klei en leem (roze). Uit: Vernes & Van Doorn (2005).

Boorintervallen die niet aan een van de criteria voldoen, bijvoorbeeld met een hoofdlithologie GM (geen monster) of NBE (niet beschreven), maar bijvoorbeeld ook zeldzame hoofdlithologieën als LEI (leisteen), MER (mergel), VUS (vuursteen), krijgen geen lithoklasse toegekend.

In een aantal geologische eenheden komen de lithoklassen grind en schelpen slechts sporadisch voor. In deze eenheden zijn deze lithoklassen daarom samengevoegd met grof zand. Eenheden in Westelijke Wadden en Oostelijke Wadden waarvoor het grindpercentage hoog genoeg is om als aparte klasse te modelleren zijn: Formatie van Kreftenheye, Formatie van Drente, Formatie van Urk en Formatie van Appelscha. In Westelijke Wadden en Oostelijke Wadden komen geen eenheden voor waarin schelpen als aparte lithoklasse zijn gemodelleerd.

De indeling in lithoklassen is, vergeleken met de indeling in stratigrafie (paragraaf 5.3), relatief eenvoudig en eenduidig.

Deze processtap is volledig geautomatiseerd met Python scripts.

#### 5.5.4 Vereenvoudigen lithoklasseintervallen

De gedetailleerde boorbeschrijvingen die in werkproces *Interpretatie* zijn voorzien van stratigrafie en in de processtap *Indelen lithoklasse* in lithoklassen zijn ingedeeld worden sterk vereenvoudigd tot een bestand met uitsluitend de voor de lithoklasse modellering relevante boorgegevens.

Dit bestand bevat per boring, per stratigrafische eenheid en per lithoklasseinterval, de volgende gegevens:

- Boornummer of sondeernummer.
- Locatie (x,y).
- Maaiveldhoogte.

- Top interval (in m ten opzichte van NAP).
- Basis interval.
- Stratigrafische eenheid code.
- Lithoklasse code.

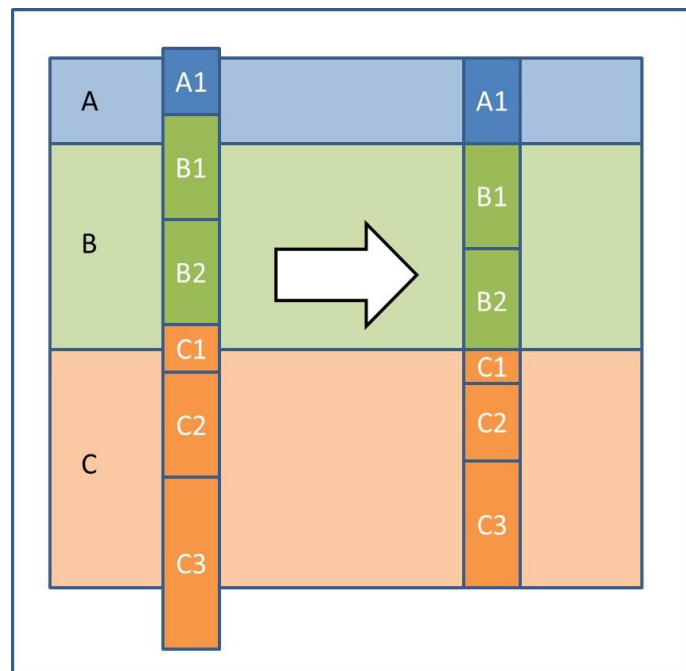
Aaneengesloten boorbeschrijvingsintervallen met dezelfde stratigrafie en dezelfde lithoklasse worden hierbij gecombineerd tot één interval. De gecombineerde intervaldiktes kunnen groter zijn dan de in de kwaliteitsfiltering (paragraaf 5.2.3) gebruikte maximale intervaldikte.

Het vereenvoudigen van de lithoklasseintervallen is geautomatiseerd.

#### 5.5.5 *Fitten lithoklasseintervallen aan lagenmodel*

De top en basis van de stratigrafische eenheden in de boringen kan afwijken van de top en basis van de stratigrafische eenheden zoals het lagenmodel ze op de boorlocatie voorspelt. Het lagenmodel geeft immers een gemiddelde voorspelling, geldig voor een rastercel van 100 bij 100 m en is gebaseerd op een aantal boringen en gesimuleerde waarden in een zoekstraal rondom het middelpunt van de rastercel.

In de lithoklassemodellering willen we werken met de toppen en basissen van de stratigrafische eenheden zoals het lagenmodel ze voorspelt omdat we lithoklassen willen toekennen aan het lagenmodel. Dat betekent dat de (vereenvoudigde) boorbeschrijvingen zodanig worden aangepast dat de stratigrafische grenzen overeenkomen met die in het lagenmodel. Vervolgens worden de lithoklasse intervallen binnen elke stratigrafische eenheid naar rato “opgerekt” of “ingekrompen” (Figuur 5.5.6). Deze aanpassing wordt ook wel “rubber sheeting” genoemd, naar analogie van het aan elkaar passen van kaartgegevens in een GIS.

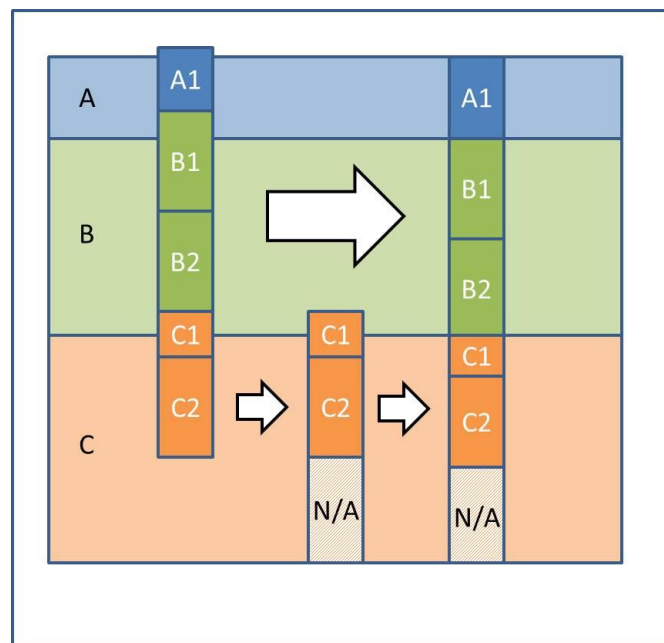


Figuur 5.5.6: Schematische weergave van “rubber sheeting”. Een boring met stratigrafische eenheden A, B en C past niet precies aan de vlakken A, B en C. De situatie vóór rubbersheeting is links weergegeven. Rechts is het resultaat ná rubbersheeting

weergegeven: de boring past aan de vlakken en de lithoklassen in de intervallen A1, B1, B2 en C1, C2 en C3 zijn naar rato over de stratigrafische eenheden verdeeld.

Het “oprekken” is begrensd om te grote afwijkingen van de originele boorbeschrijving te voorkomen; aan “inkrimpen” is geen begrenzing gesteld. De maximale waarde voor oprekken is een verlenging van 1 standaarddeviatie volgens het standaarddeviatie raster van de basis van de betreffende stratigrafische eenheid. Als er meer opgerekt moet worden, wordt onder het maximaal uitgerekte deel een boorinterval met lithoklasse onbekend (“N/A”, *not applicable*) toegevoegd voordat de rubber sheeting plaatsvindt. Dit is nodig om de juiste verhouding van het “oprekken” of “inkrimpen” te kunnen bepalen.

Voor “dieper dan” boringen geldt eveneens dat er een boorinterval met lithoklasse onbekend (“N/A”, *not applicable*) onderaan de boorbeschrijving wordt toegevoegd voordat de rubber sheeting plaatsvindt (Figuur 5.5.7). Intervallen met “N/A” spelen in de modellering verder geen rol.



Figuur 5.5.7: Voor “dieper dan” boringen geldt dat een interval met lithoklasse onbekend (“N/A”) onder in de boring wordt toegevoegd voordat de rubber sheeting wordt uitgevoerd. In de figuur geldt dit voor de basis van eenheid C.

Het fitten van lithoklasseintervallen aan het lagenmodel is een geautomatiseerde processtap.

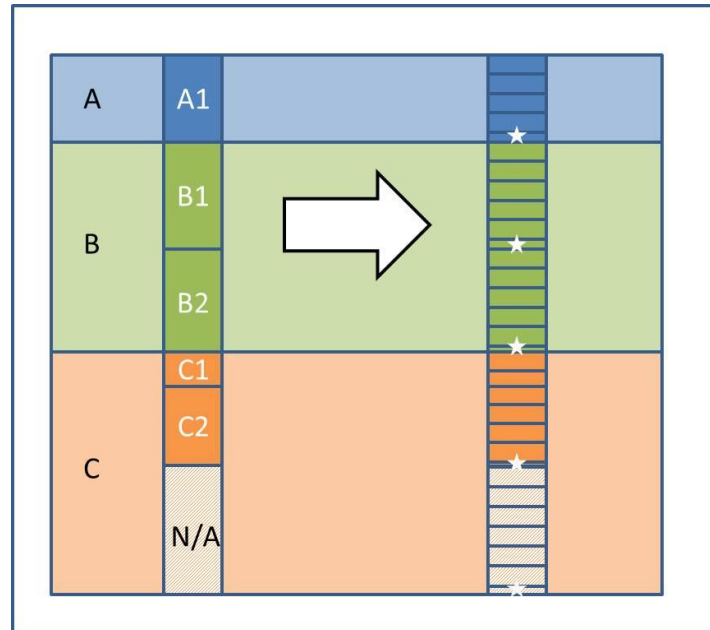
#### 5.5.6 Regulariseren lithoklasseintervallen

De in lithoklassen ingedeelde boringen en sonderingen worden geregulariseerd in intervallen van maximaal 50 cm dikte (Figuur 5.5.8). De regularisatie gaat uit van de intervalgrenzen van de vereenvoudigde boorbeschrijving of sondering, na toepassen van de rubber sheeting zoals in de vorige processtap beschreven is.

Intervallen die dikker zijn dan 50 cm worden opgedeeld in geregulariseerde intervallen van 50 cm. Een eventueel restant wordt onderaan het oorspronkelijke boorinterval toegevoegd. Boorintervallen die dunner zijn dan 50 cm behouden hun

oorspronkelijke intervalgrenzen. Er gaan bij de regularisatie dus geen gegevens verloren.

De regularisatie voorkomt dat kleine intervallen in de lithoklasse interpolatie een te grote wegingsfactor toegekend krijgen. Zonder regularisatie zou een interval van 200 cm zand namelijk dezelfde wegingsfactor hebben als een interval van 50 cm klei. Door te regulariseren ontstaan er 4 intervallen zand van 50 cm.



Figuur 5.5.8: Regulariseren van een boorbeschrijving in intervallen van maximaal 50 cm dikte. De intervallen met een asterisk zijn restintervallen dunner dan 50 cm.

De geregulariseerde lithoklasseintervallen worden verder voorzien van lithoklasse-indicatoren. Voor elke lithoklasse is er een indicator met de waarde 0 (lithoklasse niet aanwezig) of 1 (lithoklasse wel aanwezig). In totaal heeft elk interval 9 lithoklasse-indicatoren, waarvan er steeds 8 de waarde 0 hebben en één de waarde 1 heeft. De lithoklasse-indicatoren zijn in een volgende processtap nodig om variogrammen te kunnen berekenen.

Tot slot worden de geregulariseerde boorbeschrijvingen geconverteerd naar een dataformaat dat in Isatis® kan worden ingelezen (een zogenaamde "lines file"). Voor elk blok wordt één bestand gemaakt met de boorbeschrijvingen van alle in het betreffende blok gelegen boringen. Omdat de blokken overlapzones hebben, kan een boring in meerdere blokken voorkomen. De bestanden bevatten per boring de volgende attributen:

- Boornummer.
- Locatie (x,y).
- Maaiveldhoogte boring.
- Per geregulariseerd interval van de boring:
  - Top interval (in meters t.o.v. NAP).
  - Basis interval.
  - Stratigrafie (numerieke waarde aanduiding van de stratigrafische eenheid).

- Lithoklasse (numerieke waarde aanduiding van de lithoklasse eenheid).
- Voor 9 mogelijke lithoklassen van het interval:
  - Lithoklasse indicator (0 = afwezig, 1 = aanwezig).

Het regulariseren van de boorbeschrijvingen is een geautomatiseerde processtap.

#### 5.5.7 Berekenen globale verhoudingen

Een van de parameters die nodig is voor de voorspelling van de lithoklassen in het voxelmodel is de *globale verhouding* van de lithoklassen in de boorgegevens. Per blok wordt per stratigrafische eenheid geteld hoeveel geregulariseerde intervallen er per lithoklasse voorkomen. Om tot een fractie (waarde vanaf 0 t/m 1) te komen worden de tellingen gedeeld door het totaal aantal geregulariseerde intervallen. Een voorbeeld voor de eenheid 'NA' (Formatie van Naaldwijk) in modelblok B05 van Oostelijke Wadden is gegeven in Tabel 5.5.2.

Tabel 5.5.2: Voorbeeld van globale verhoudingen voor de eenheid 'NA' (Formatie van Naaldwijk) in modelblok B05 van Oostelijke Wadden.

| Lithoklasse ("categorie")          | Nummer | Fractie       |
|------------------------------------|--------|---------------|
| Organisch materiaal (veen)         | 1      | 0,0036        |
| Klei                               | 2      | 0,3285        |
| Kleilig zand, zandige klei en leem | 3      | 0,4125        |
| Fijn zand                          | 5      | 0,1954        |
| Midden zand                        | 6      | 0,0540        |
| Grof zand                          | 7      | 0,0060        |
| Grind                              | 8      | 0,0000        |
| Schelpen                           | 9      | 0,0000        |
| <b>Totaal</b>                      |        | <b>1,0000</b> |

Voor bovenstaande telling worden de intervallen met zand met een onbekende korrelgrootte-mediaan genegeerd. Ook intervallen zonder lithoklasse doen **niet** mee in deze telling.

Naast aantallen per lithoklasse worden ook aantallen *zand* en *niet-zand* geteld. De categorie *zand* omvat de lithoklassen *fijn zand*, *midden zand*, *grof zand*, *zand met een onbekende korrelgrootte-mediaan*, *grind*, *schelpen*. De categorie *niet-zand* omvat de lithoklassen *organisch materiaal*, *klei* en *kleilig zand en zandige klei en leem*. Elk van de twee categorieën wordt weer naar rato onderverdeeld in de samenstellende lithoklassen.

Voor het bepalen van de verhouding tussen de categorieën *zand* en *niet-zand* geldt dat de intervallen met zand met een onbekende korrelgrootte-mediaan nu **wel** meetellen voor categorie *zand*. Een voorbeeld voor dezelfde eenheid 'NA' (Formatie van Naaldwijk) in modelblok B05 van Oostelijke Wadden is gegeven in Tabel 5.5.3.

Tabel 5.5.3: Voorbeeld van de verdeling tussen de categorieën *zand* en *niet-zand* de eenheid 'NA' in modelblok B05 van Oostelijke Wadden (vergelijk met Tabel 5.5.2).

| Categorie     | Nummer | Fractie       |
|---------------|--------|---------------|
| Zand          | 1      | 0,2554        |
| Niet-zand     | 2      | 0,7446        |
| <b>Totaal</b> |        | <b>1,0000</b> |

Voor het voorbeeld geeft Tabel 5.5.4 de verdeling binnen de categorie *niet-zand*.

Tabel 5.5.4: Voorbeeld van de verdeling binnen de categorie *niet-zand* in de eenheid 'NA' in modelblok B05 van Oostelijke Wadden (vergelijk met Tabellen 5.5.2 en 5.5.3).

| Categorie                         | Nummer | Fractie       |
|-----------------------------------|--------|---------------|
| Organisch materiaal (veen)        | 1      | 0,0048        |
| Klei                              | 2      | 0,4412        |
| Kleiig zand, zandige klei en leem | 3      | 0,5540        |
| <b>Totaal</b>                     |        | <b>1,0000</b> |

Voor het voorbeeld geeft Tabel 5.5.5 de verdeling binnen de categorie *zand*.

Tabel 5.5.5: Voorbeeld van de verdeling binnen de categorie *zand* in de eenheid 'NA' in modelblok B05 van Oostelijke Wadden (vergelijk met Tabellen 5.5.2, 5.5.3 en 5.5.4).

| Categorie     | Nummer | Fractie       |
|---------------|--------|---------------|
| Fijn zand     | 1      | 0,7650        |
| Midden zand   | 2      | 0,2115        |
| Grof zand     | 3      | 0,0235        |
| Grind         | 4      | 0,0000        |
| <b>Totaal</b> |        | <b>1,0000</b> |

Bij de onderverdeling van de categorie *zand* wordt de fractie zand met onbekende korrelgrootte-mediaan weer genegeerd. In uitzonderingssituaties kan het echter voorkomen dat *alle* boorintervallen in de categorie *zand* een onbekende korrelgroottemediaan hebben. In dat geval wordt het zand in drie gelijke fracties over de drie zandklassen verdeeld.

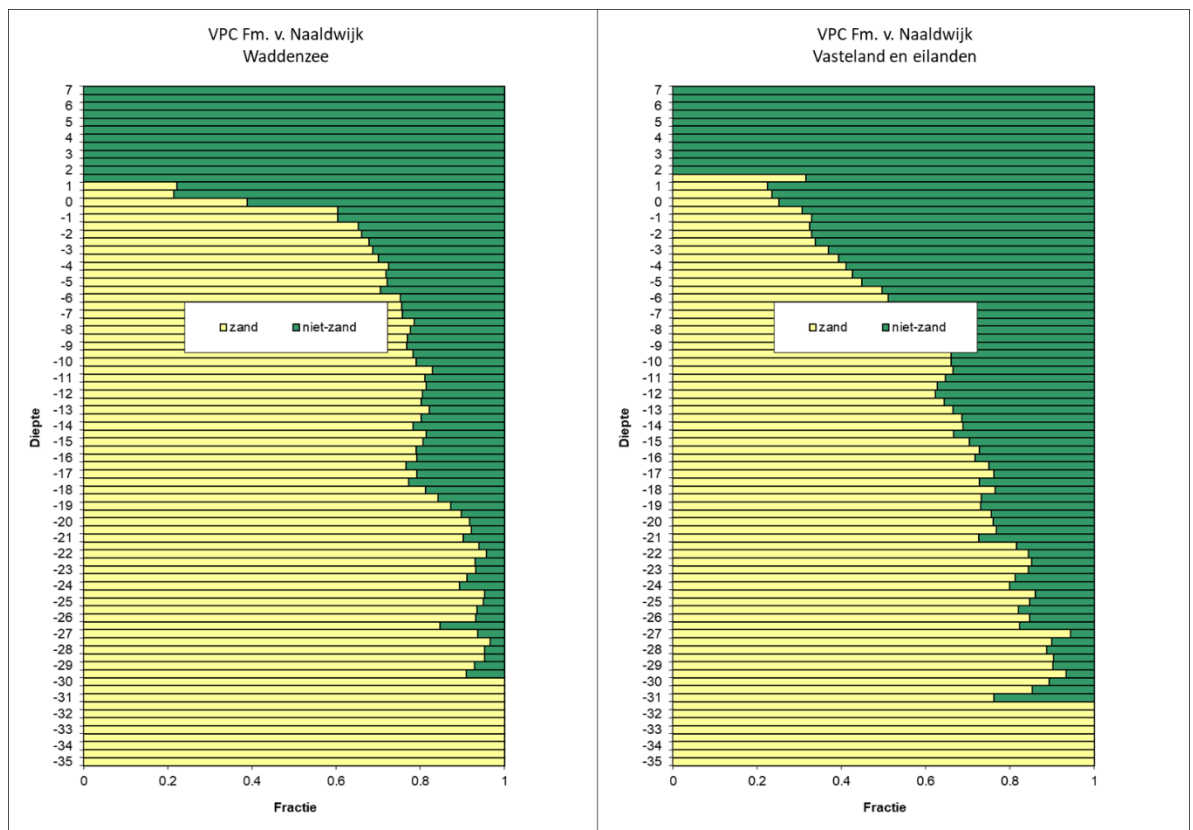
Deze processtap is geautomatiseerd; de resultaten van de tellingen worden in de vorm van een lijst in de *workflow manager* vastgelegd.

### Vertical Proportion Curve (VPC)

De in de vorige processtap berekende globale verhoudingen gaan ervanuit dat de verdeling van lithoklassen binnen een modeleenheid constant is. Als er bovenin de eenheid 30% klei voorkomt, komt er onderin de eenheid ook 30% klei voor. In situaties dat deze aanname niet geldig is, en er kennis is over de werkelijke verdeling, wordt er voor de desbetreffende modeleenheid een zogenaamde *Vertical Proportion Curve* (VPC) geconstrueerd. Een VPC geeft de verhoudingen van de lithoklassen als functie van de diepte (z) weer (Figuur 5.5.9). Op basis van de VPC kunnen voor elke voxel in het voxelmodel de lokale verhoudingen bepaald worden.



Het zijn dan deze lokale verhoudingen in plaats van de globale die in de simulatie gebruikt worden.



Figuur 5.5.9: Voorbeeld van een Vertical Proportion Curves voor de eenheid 'NA' (Formatie van Naaldwijk, zonder onderscheid tussen de laagpakketten Wormer en Walcheren) in modelgebied Oostelijke Wadden. De eenheid is in twee delen gemodelleerd: het deel dat in de Waddenzee ligt en relatief zandiger is (VPV links) en het deel dat op het vasteland en op de eilanden ligt en relatief kleiiger is (VPC rechts). De VPC's zijn in beide gevallen toegepast bij het onderscheid in de categorieën 'zand' (geel) en 'niet-zand' (groen). In plaats van een globale verhouding van deze twee categorieën die geldig is voor de hele eenheid, is een lokale verhouding vastgesteld afhankelijk van de diepte (in meters ten opzichte van NAP).

Het vaststellen van de VPC van een modelleenheid is een handmatige stap. Resultaat is een lijst met lithoklasse fracties per diepte interval van 50 cm. De lijst wordt vastgelegd in de *workflow manager* en gebruikt bij de batchgewijze aansturing van Isatis®.

### 5.5.8 Importeren data

Voor elk blok wordt de volgende data in Isatis® geïmporteerd:

- De geregulariseerde boorgegevens die in de vorige processtap zijn gemaakt.
- De voxels die in processtap *Vertalen lagenmodel naar voxelmodel* zijn gemaakt.
- Voor referentie en controledoeleinden wordt ook het lagenmodel geïmporteerd met voor elke te modelleren eenheid de top en de basis.

De boorgegevens worden in Isatis® geïmporteerd in zogenaamde *lines files* waarvan de middelpunten van de geregulariseerde intervallen (halverwege top en basis) fungeren als datapunten voor de interpolatie. Per blok ontstaat er één *lines file*.

De voxels worden in Isatis® geïmporteerd in *3D gridfiles* met één attributwaarde, namelijk een getal dat aangeeft tot welke stratigrafische eenheid de voxel behoort. Voor de eenheid EC in de vorige processtap geldt bijvoorbeeld dat alle voxels de waarde 6 hebben. Per blok ontstaat er één *3D gridfile*.

Optioneel worden nog de voxels met kans op stratigrafie geïmporteerd. Het betreft voxels die in de processtap *Berekenen kans op stratigrafie* in het werkproces **Lagenmodellering** zijn berekend. Zoals eerder beschreven is processtap *Berekenen kans op stratigrafie* ontwikkeld en getest voor modelgebied Zeeland, maar wordt de processtap momenteel niet uitgevoerd.

De processtap *Importeren data* is geautomatiseerd; de batchinstructies voor Isatis® liggen vast in de *workflow manager*.

#### 5.5.9 *Maken selecties*

In Isatis® wordt in elke *lines file* per stratigrafische eenheid een selectievariabele aangemaakt waaraan in het vervolg gerefereerd kan worden. De selectievariabele geeft voor alle datapunten aan of het datapunt wel of niet tot de betreffende stratigrafische eenheid hoort.

Tevens wordt in elke 3D gridfile per stratigrafische eenheid een selectievariabele aangemaakt waaraan in het vervolg gerefereerd kan worden. De selectievariabele geeft voor alle voxels aan of de voxel wel of niet tot de betreffende stratigrafische eenheid hoort.

Deze processtap is geautomatiseerd; de batchinstructies voor Isatis® liggen vast in de *workflow manager*.

#### 5.5.10 *Vaststellen geostatistische parameters*

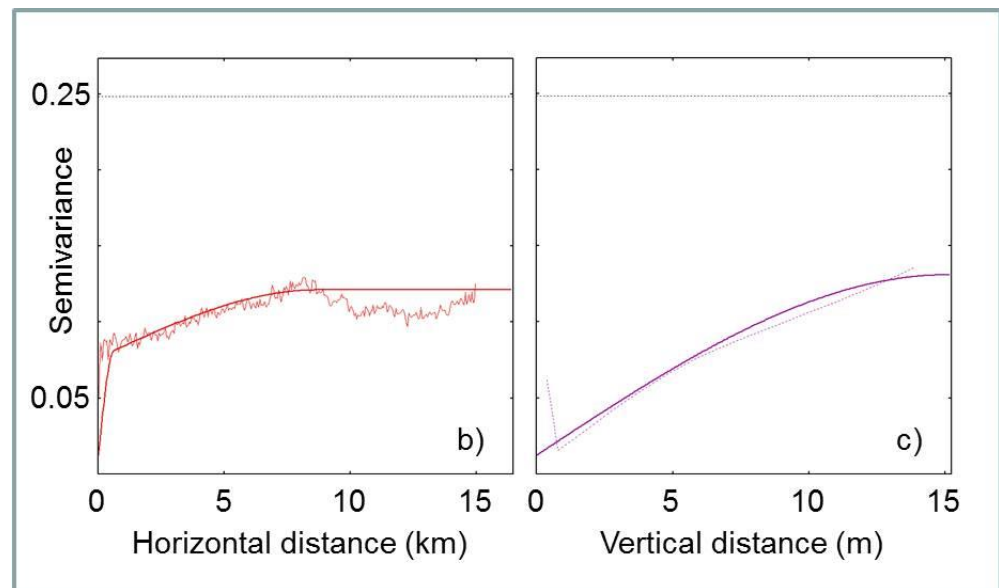
In deze processtap wordt de ruimtelijke correlatie van lithoklassen binnen elke modeleenheid bepaald en met behulp van een semi-variogram beschreven. Het maken van variogrammen is een noodzakelijke, handmatige stap die in Isatis® wordt uitgevoerd. De resulterende geostatistische parameters worden vastgelegd in de *workflow manager* en worden gebruikt in het simuleren van de lithoklassen.

Voor elke te modelleren eenheid zijn variogrammen gemaakt op basis van de boorgegevens. Daarbij is steeds gebruik gemaakt van de boorgegevens van het gehele modelleergebied. Er zijn dus geen variogrammen per blok gemaakt.

*Sequential indicator simulation (SIS)*, de simulatietechniek waarmee gerekend wordt, gebruikt indicatoren om aan te geven of een datapunt een bepaalde lithoklasse heeft of niet. Voor elke lithoklasse is er een indicator die de waarde 0 (lithoklasse afwezig) of 1 (lithoklasse aanwezig) kan hebben. In de variogrammen wordt daarom gekeken naar de ruimtelijke verdeling van de indicatoren van een bepaalde lithoklasse.

Verder vereist SIS dat er bij de simulatie van de lithoklassen binnen een geologische eenheid één variogram wordt gebruikt. Dit moet het meest representatieve variogram zijn voor de lithoklasseverdeling binnen de betreffende eenheid. In de praktijk blijkt dat meestal het variogram van de meest voorkomende lithoklasse te zijn.

Een voorbeeld van variogrammen voor een lithoklasse in een geologische eenheid is gegeven in Figuur 5.5.10.



Figuur 5.5.10: Voorbeeld van een variogram van de indicatorwaarde van een lithoklasse binnen een geologische eenheid. Links het variogram voor de horizontale richting (x en y); rechts het variogram voor de verticale richting (z). De dunne, kronkelige lijn is het experimentele variogram dat volgt uit de statistische analyse van de boorgegevens. De dikke, gladde lijn is het variogram model waarmee de modelleur de ruimtelijke correlatie beschrijft. In beide gevallen gaat het om de correlatie van de indicator van een van de lithoklassen binnen de geologische eenheid.

#### 5.5.11 Simuleren lithoklassen

De lithoklassen van de geregulariseerde intervallen van de boringen en sonderingen worden nu gebruikt om een 3D interpolatie uit te voeren. Deze interpolatie geeft een voorspelling van de lithoklasse voor elke voxel. De 3D interpolatie wordt uitgevoerd met de stochastische simulatietechniek *Sequential Indicator Simulation* (SIS; Goovaerts, 1997; Chilès & Delfiner, 2012). Deze simulatietechniek resulteert in meerdere, statistisch gezien even waarschijnlijke, lithoklasseverdelingen.

SIS wordt voor elke modeleenheid afzonderlijk uitgevoerd, zodat de geostatistische karakteristieken van de afzonderlijke modeleenheden gehonoreerd worden. Verder wordt de simulatie in elk blok (bijvoorbeeld elk van de 18 blokken van Rivierengebied) apart uitgevoerd.

In SIS worden de middelpunten van elk geregulariseerd boorinterval eerst gemigreerd naar de dichtstbij gelegen voxel. Het middelpunt van deze gemigreerde intervallen worden beschouwd als harde datapunten ("D" in Figuur 5.5.11) en zullen door de simulatie niet meer gewijzigd worden.

De overige voxels worden tijdens een simulatie “bezocht” waarbij een *random* pad wordt gevolgd. Rondom elke te simuleren voxel (“?” in Figuur 5.5.11) wordt een zoekgebied vastgesteld. Het zoekgebied, de *neighbourhood* genaamd, wordt door de modelleur gedefinieerd als een afstand in de x-, y-en z-richting en ligt per te modelleren eenheid vast in de *workflow manager*. In het zoekgebied zoekt het algoritme naar de voxels met harde datapunten en naar de voxels die al eerder langs het *random* pad bezocht zijn en een gesimuleerde waarde gekregen hebben (“S” in Figuur 5.5.11). Het representatieve variogram model wordt gebruikt om voor alle datapunten een gewicht te bepalen, waarbij dichtbij gelegen punten een groter gewicht krijgen dan veraf gelegen punten.

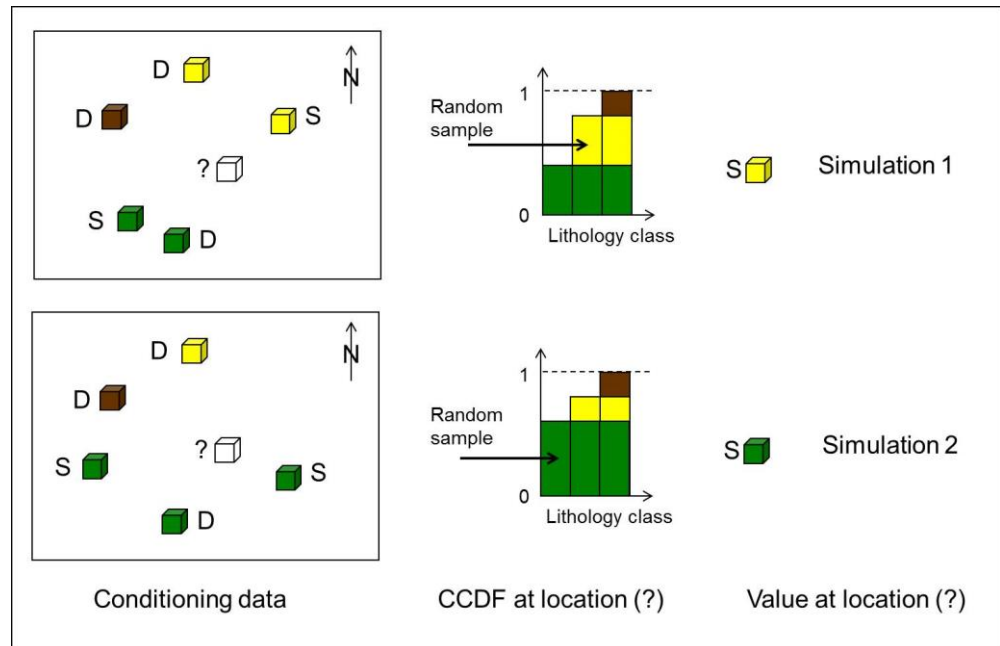
De gevonden datapunten worden vervolgens gecodeerd in een set indicatoren (vandaar de naam *Indicator Simulation*). Voor elke lithoklasse wordt voor elk datapunt met een indicator aangegeven of de lithoklasse wel (indicator = 1) of niet (indicator = 0) aanwezig is.

De volgende stap bestaat uit een kriging (block kriging) op basis van de verkregen informatie. In de kriging wordt het ene variogram gebruikt dat vastgesteld is voor de te simuleren eenheid (er is geen sprake van een variogram per lithoklasse).

De kriging resulteert in een waarde tussen 0 en 1 voor elke lithoklasse. Dit resultaat wordt geplot in een *conditionele cumulatieve data functie* (CCDF, Figuur 5.5.11). Vervolgens wordt een random getal uit een standaard normale verdeling getrokken met een waarde tussen 0 en 1. Deze waarde wordt vergeleken met de CCDF en levert een lithoklasse op. Dit wordt de gesimuleerde lithoklasse voor de voxel. Bij elke voxel wordt een nieuw CCDF gemaakt waarbij in de loop van het proces de hoeveelheid data toeneemt doordat het aantal al gevulde voxels in de zoekstraal toeneemt.

Bovenstaande SIS procedure kan als volgt worden samengevat (Figuur 5.5.11; Goovaerts, 1997; Chilès & Delfiner, 2012):

1. Bepaal een *random* pad waarmee elke voxel van de modeleenheid eenmaal wordt bezocht.
2. Bepaal voor elke voxel van de modeleenheid de statistische parameters van de CCDF voor die voxel. Doe dit met behulp van kriging op basis van de geconditioneerde data binnen het zoekgebied en het variogrammodel. De conditionerende data bestaat uit de indicatoren van de lithoklassen van de boorgegevens en van de voorspelde lithoklassen op de al eerder bezochte voxels binnen het zoekgebied.
3. Trek een willekeurige waarde uit de CCDF, en voeg de getrokken lithoklasse toe aan de set met eerder bezochte voxels.
4. Ga naar de volgende voxel langs het *random* pad, en herhaal stap 2) en 3).
5. Herhaal stap 1) t/m 4) voor elk van de 10 simulaties en kies telkens een ander *random* pad.

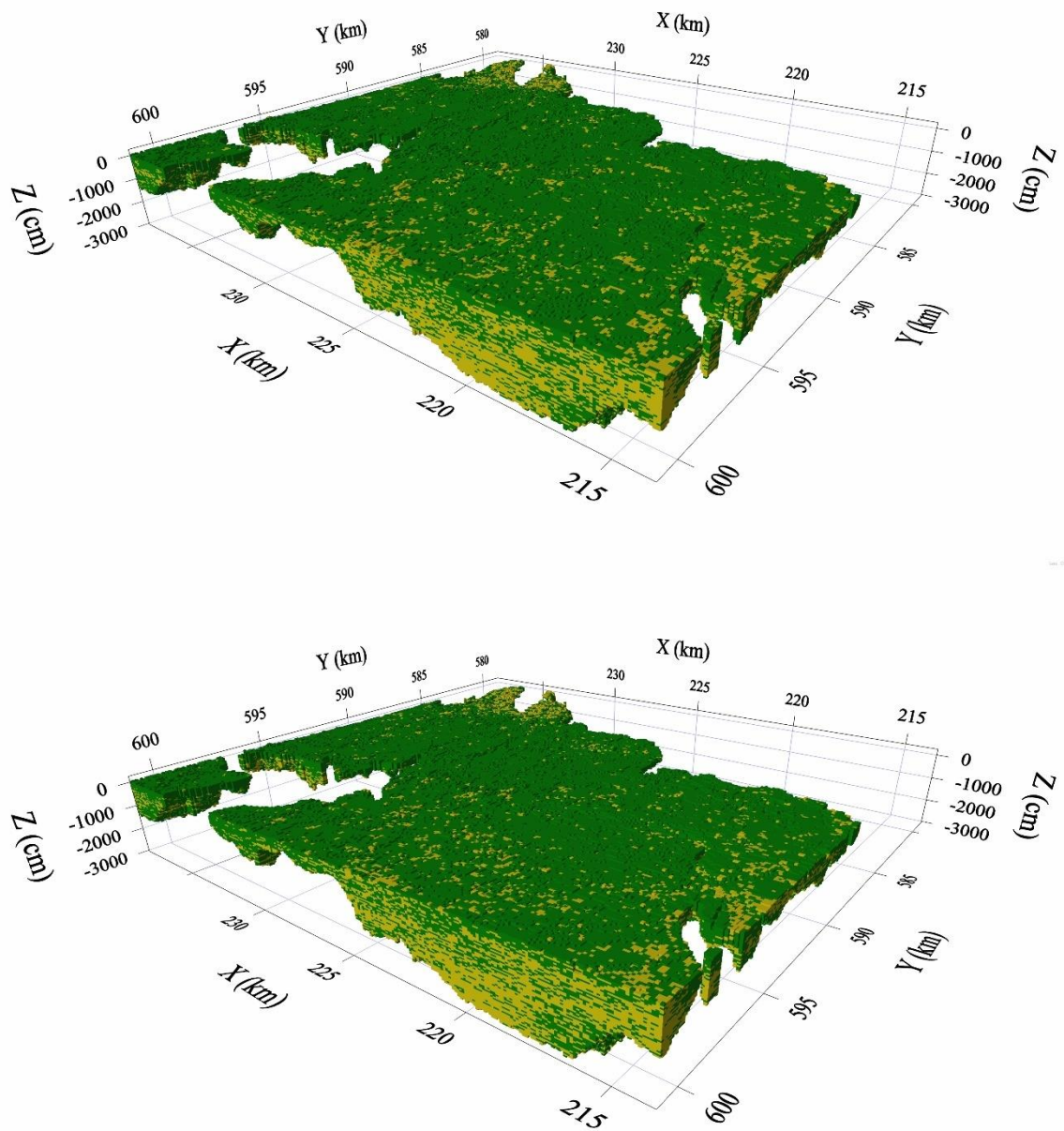


Figuur 5.5.11: Schematische weergave van twee verschillende simulaties van lithoklasse voor dezelfde voxel "?". In simulatie (1) en simulatie (2) zijn de datapunten ("D") in het zoekgebied gelijk, maar doordat gebruik gemaakt wordt van een random pad zijn de eerder voorspelde lithoklassen ("S") verschillend. Daardoor wordt ook een verschillend CCDF geconstrueerd waaruit een random trekking wordt gedaan die de lithoklasse voor de voxel "?" oplevert.

Vooraf in de diepere delen van het model kan het voorkomen dat er in het zoekgebied niet voldoende datapunten (hard of reeds gesimuleerd) gevonden worden. Het algoritme valt dan terug op de *globale verhouding* zoals die in een eerdere processtep bepaald is. Er wordt dan een *random* waarde getrokken uit de globale verdeling. In de gevallen dat er een VPC is vastgesteld, wordt een *random* waarde getrokken uit de *lokale verdeling* zoals die volgens de VPC geldig is in de voxel.

Met betrekking tot de korrelgroottes geldt dat een belangrijk deel van de zandige intervallen een onbekende korrelgrootte heeft. Dit probleem, dat geldt voor een groot deel van de boorbeschrijvingen, is opgelost door de 3D interpolatie in twee stappen op te delen.

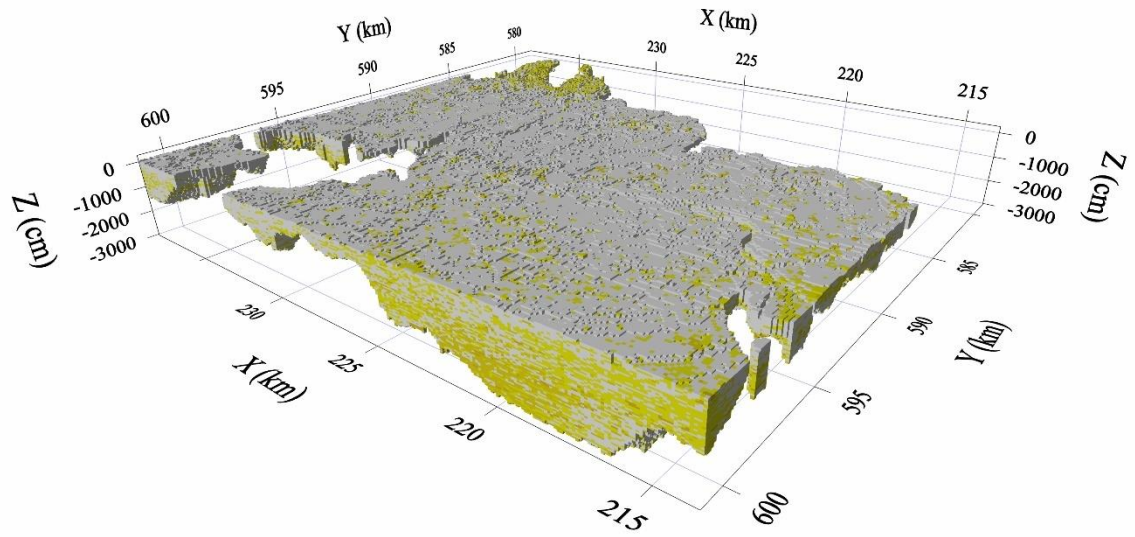
Eerst worden alle intervallen gebruikt om 10 simulaties uit te voeren waarin onderscheid gemaakt wordt tussen zand en niet-zand (Figuur 5.5.12).



Figuur 5.5.12: Twee verschillende realisaties (een realisatie is de uitkomst van een simulatie) van een geologische eenheid in Oostelijke Wadden. Gele voxels zijn gevuld met zand; groene met niet-zand.

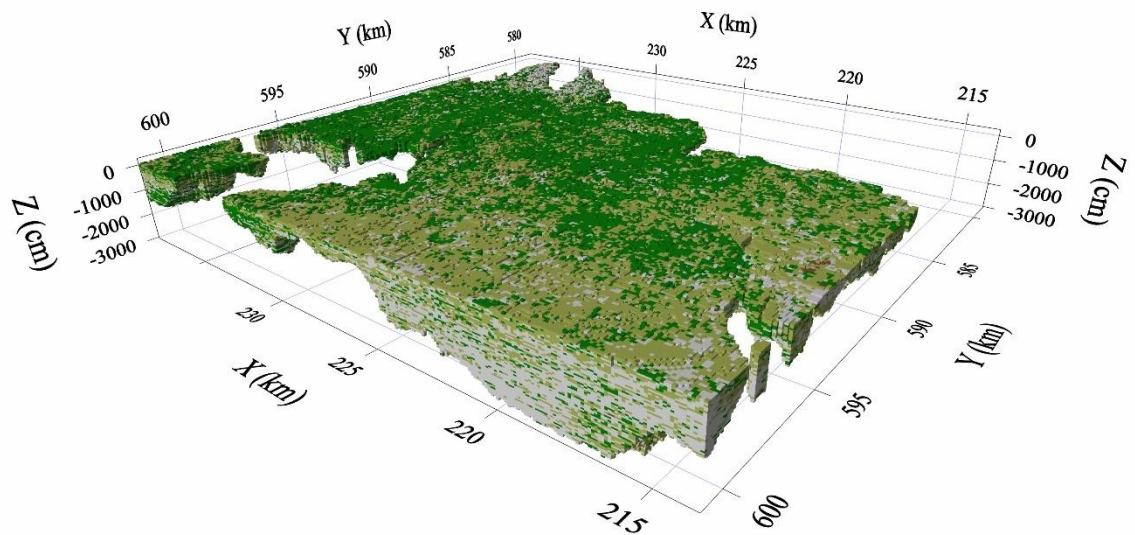
Vervolgens worden in elk van de 10 realisaties de voxels met zand geselecteerd. Voor deze geselecteerde voxels worden nogmaals 10 simulaties berekend waarin alleen de boorintervallen met bekende korrelgrootte gebruikt worden. In totaal zijn er dan  $10 \times 10 = 100$  realisaties van korrelgrootteverdelingen (Figuur 5.5.13).





Figuur 5.5.13: In elk van de 10 realisaties met zand versus niet-zand worden de voxels met zand geselecteerd. Voor deze geselecteerde voxels worden nogmaals 10 simulaties uitgevoerd waarin alleen de boorintervallen met bekende korrelgrootte gebruikt worden. In totaal zijn er dan  $10 \times 10 = 100$  realisaties van korrelgrootte verdelingen.

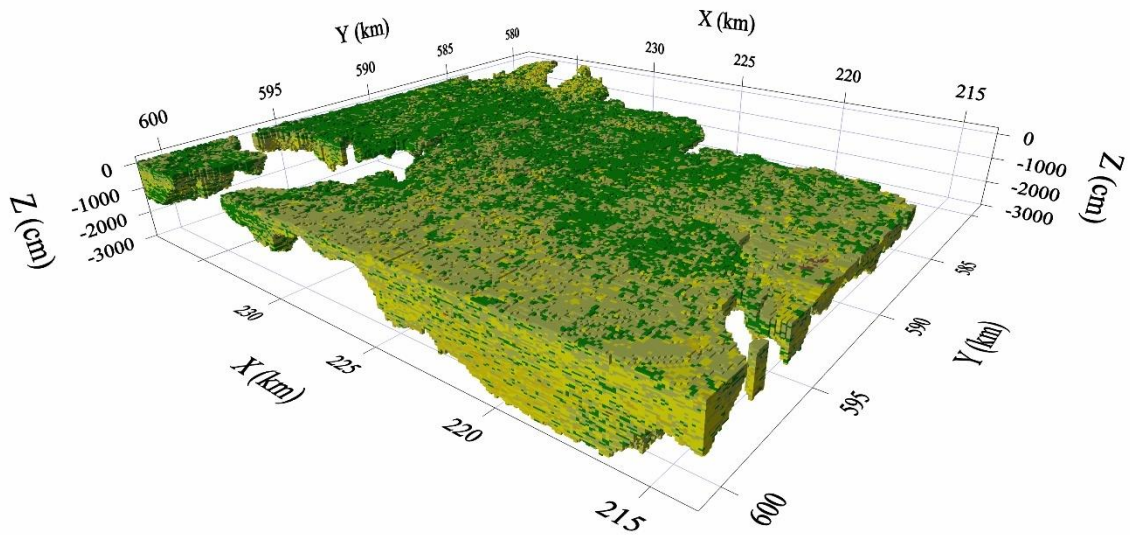
Dezelfde procedure wordt toegepast op de niet-zand voxels (Figuur 5.5.14).



Figuur 5.5.14: In elk van de 10 realisaties met zand versus niet-zand worden de voxels met niet-zand geselecteerd. Voor deze geselecteerde voxels worden nogmaals 10 simulaties uitgevoerd. In totaal zijn er dan  $10 \times 10 = 100$  realisaties.



De resulterende 100 realisaties van niet-zand worden tot slot gecombineerd met de 100 realisaties van zand tot 1 lithoklassemodel (Figuur 5.5.15). Het resultaat is per blok en per modeleenheid 100 realisaties met een voorspelling van de lithoklasse waarbij elke realisatie statistisch gezien even waarschijnlijk is.



Figuur 5.5.15: Na het samenvoegen van de 100 realisaties van zand en de 100 realisaties van niet-zand ontstaan 100 realisaties van de lithoklasse.

Het simuleren van lithoklassen is geautomatiseerd; de batchinstructies voor Isatis® inclusief het variogram-model liggen vast in de *workflow manager*.

#### 5.5.12 Berekenen kans op lithoklasse

Uit de 100 simulaties die voor elke modeleenheid zijn berekend kan voor elke voxel per lithoklasse een kans worden uitgerekend. Dit wordt gedaan door per eenheid, per voxel en per lithoklasse te tellen hoe vaak de lithoklasse is gesimuleerd en dat aantal te delen door het aantal simulaties (100).

De procedure (vastgelegd in de *workflow manager*) is als volgt. Voer per modeleenheid, per lithoklasse voor elke voxel het volgende uit:

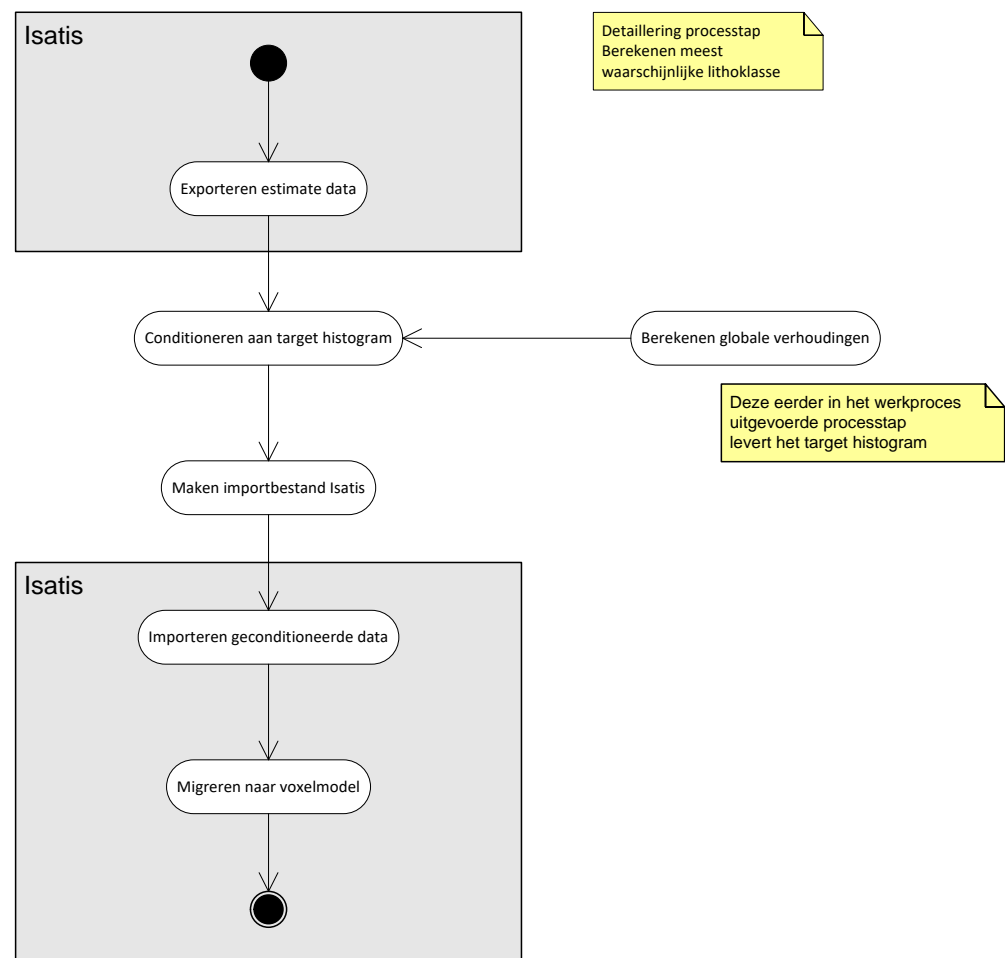
- Stel de kans op de lithoklasse initieel op 0.
- Tel hoe vaak de voxel de lithoklasse toegekend heeft gekregen.
- Deel het aantal toekenningen door het aantal simulaties (100).

#### 5.5.13 Berekenen meest waarschijnlijke lithoklasse

Naast het berekenen van de kansen worden de simulaties ook gebruikt om voor elke voxel een *meest waarschijnlijke* uitkomst te berekenen. Voor lithoklassen is deze stap ingewikkelder dan voor het lagenmodel. De meest waarschijnlijke uitkomst van de diepteligging van een eenheid in het lagenmodel valt eenvoudig te berekenen als het gemiddelde van de dieptes uit alle 100 simulaties. Voor lithoklassen kunnen we echter geen gemiddelde berekenen: het gemiddelde van lithoklasse 1 en 2 is immers niet 1,5.

Een voor de hand liggende oplossing voor de meest waarschijnlijke lithoklasse is de lithoklasse met de hoogste kans. Deze oplossing leidt er echter toe dat de lithoklassen die veel voorkomen overschat worden.

Soares (1992) heeft een algoritme ontwikkeld om uit de kansen voor elke voxel een meest waarschijnlijke uitkomst te berekenen. Dit zogenaamde Soares-algoritme was bij het maken van Westelijke Wadden en Oostelijke Wadden nog niet opgenomen in Isatis®. Om het Soares-algoritme toe te passen worden de kansen daarom uit Isatis® geëxporteerd waarna een Python script het algoritme uitvoert. Het resultaat wordt weer in Isatis® geïmporteerd en opgenomen in het voxelmodel (Figuur 5.5.16).



Figuur 5.5.16: Detaillering van de processtep Berekenen meest waarschijnlijke lithoklasse.

De invoer bestaat uit een uit Isatis® geëxporteerd bestand met voor elke voxel van de modeleenheid de (x,y,z)-coördinaten en de kansen op de verschillende lithoklassen. Dit wordt door Soares (1992) de *estimate* genoemd. Daarnaast heeft het algoritme de globale verhoudingen van de lithoklassen nodig. Het gaat hier om de globale verhoudingen die in de eerder beschreven processtep *Berekenen globale verhoudingen* bepaald zijn, bijvoorbeeld voor eenheid 'NA' in blok B05 van Oostelijke Wadden (Tabel 5.5.6).

Tabel 5.5.6: Voorbeeld van globale verhoudingen van lithoklassen binnen de eenheid 'NA' in blok B05 van Oostelijke Wadden.

| Lithoklasse ("categorie")          | Nummer | Fractie       |
|------------------------------------|--------|---------------|
| Organisch materiaal (veen)         | 1      | 0,0036        |
| Klei                               | 2      | 0,3285        |
| Kleilig zand, zandige klei en leem | 3      | 0,4125        |
| Fijn zand                          | 5      | 0,1954        |
| Midden zand                        | 6      | 0,0540        |
| Grof zand                          | 7      | 0,0060        |
| Grind                              | 8      | 0,0000        |
| Schelpen                           | 9      | 0,0000        |
| <b>Totaal</b>                      |        | <b>1,0000</b> |

Deze globale verhoudingen worden door Soares (1992) het *target histogram* genoemd. Het algoritme zal nu de *estimate* conditioneren aan het *target histogram*. Dit wil zeggen dat aan alle voxels in de *estimate* een lithoklasse wordt toegekend, en dat het aantal voxels met een bepaalde lithoklasse overeenkomt met het aantal volgens het *target histogram*.

Het conditioneren werkt als volgt:

- Bepaal initieel per lithoklasse:
  - *Werkelijk aantal* voxels gevuld met de lithoklasse (initieel 0).
  - *Doel aantal* voxels gevuld met de lithoklasse (aantal voxels \* waarde volgens het *target histogram*).
  - *Fractie* van de lithoklasse (*werkelijk aantal* / *doel aantal*).
- Zolang er nog voxels in de *estimate* zonder lithoklasse zijn:
  - Bepaal de lithoklasse die op dit moment de kleinste *fractie* heeft. Deze lithoklasse zal nu aan een voxel worden toegewezen. (NB: voor de allereerste voxel zijn alle fracties 0 en kiezen we arbitrair de kleinste lithoklasse).
  - Selecteer uit de voxels in de *estimate* waaraan nog geen lithoklasse is toegewezen de voxel met de hoogste kans op voorkomen van de lithoklasse.
  - Wijs aan deze voxel de lithoklasse toe.
  - Verhoog het *werkelijk aantal* toegewezen voxels van de lithoklasse met 1;
  - Herbereken de *fractie* van de lithoklasse (*werkelijk aantal* / *doel aantal*).

Hieronder volgt een theoretische voorbeelduitwerking voor een *estimate* van vijf voxels met twee mogelijke lithoklassen. De *estimate data* zijn weergegeven in Tabel 5.5.7.

Tabel 5.5.7: Voorbeeld *estimate data* van vijf voxels met twee mogelijke lithoklassen.

| Voxel-nummer | Kans op lithoklasse | Kans op lithoklasse |
|--------------|---------------------|---------------------|
|              | 1                   | 2                   |
| 1            | 0,75                | 0,25                |
| 2            | 0,60                | 0,40                |

|   |      |      |
|---|------|------|
| 3 | 0,80 | 0,20 |
| 4 | 0,65 | 0,35 |
| 5 | 0,90 | 0,10 |

Het *target histogram*, gebaseerd op boorinformatie is weergegeven in Tabel 5.5.8.

Tabel 5.5.8: Voorbeeld *target histogram* van vijf voxels met twee lithoklassen.

|               |      |
|---------------|------|
| Lithoklasse 1 | 0,74 |
| Lithoklasse 2 | 0,26 |

*Initieel:*

Voor lithoklasse 1 geldt dat er  $5 * 0,74 = 3,7$  voxels gevuld moeten worden.

Voor lithoklasse 2 geldt dat er  $5 * 0,26 = 1,3$  voxels gevuld moeten worden.

Voor beide lithoklassen is het werkelijk aantal gevulde voxels nog 0.

*Stap 1:*

We starten met lithoklasse 1. De voxel met de hoogste kans op lithoklasse 1 is voxel nummer 5 met een kans van 0,9. Deze voxel krijgt lithoklasse 1.

Lithoklasse 1 heeft nu 1 van de 3,7 voxels gevuld.

*Stap 2:*

Fractie van lithoklasse 1 is  $1 / 3,7 = 0,27$ .

Fractie van lithoklasse 2 is  $0 / 1,3 = 0$ .

Lithoklasse 2 heeft nu de kleinste fractie. De voxel met de hoogste kans op lithoklasse 2 is voxel nummer 2 met een kans van 0,4. Deze voxel krijgt lithoklasse 2. Lithoklasse 2 heeft nu 1 van de 1,3 voxels gevuld.

*Stap 3:*

Fractie van lithoklasse 1 is  $1 / 3,7 = 0,27$ .

Fractie van lithoklasse 2 is  $1 / 1,3 = 0,77$ .

Lithoklasse 1 heeft nu de kleinste fractie. De voxel met de hoogste kans op lithoklasse 1 is voxel nummer 3 met een kans van 0,8. Deze voxel krijgt lithoklasse 1. Lithoklasse 1 heeft nu 2 van de 3,7 voxels gevuld.

*Stap 4:*

Fractie van lithoklasse 1 is  $2 / 3,7 = 0,54$ .

Fractie van lithoklasse 2 is  $1 / 1,3 = 0,77$ .

Lithoklasse 1 heeft nu de kleinste fractie. De voxel met de hoogste kans op lithoklasse 1 is voxel nummer 1 met een kans van 0,75. Deze voxel krijgt lithoklasse 1. Lithoklasse 1 heeft nu 3 van de 3,7 voxels gevuld.

*Stap 5:*

Fractie van lithoklasse 1 is  $2 / 3,7 = 0,81$ .

Fractie van lithoklasse 2 is  $2 / 1,3 = 0,77$ .

Lithoklasse 2 heeft nu de kleinste fractie. De voxel met de hoogste kans op lithoklasse 2 is voxel nummer 4 met een kans van 0,35. Deze voxel krijgt lithoklasse 2. Lithoklasse 2 heeft nu 2 van de 1,3 voxels gevuld.

Het resultaat van de berekening is weergegeven in Tabel 5.5.9.

Tabel 5.5.9: Resultaat van de berekening van de 'meest waarschijnlijke lithoklasse' voor vijf voxels met twee mogelijke lithoklassen. De tabel toont in welke stap welke voxel welke lithoklasse toegekend krijgt. Dit is de meest waarschijnlijke lithoklasse.

| Voxel-nummer | Kans op lithoklasse 1 | Kans op lithoklasse 2 | Stap 1 | Stap 2 | Stap 3 | Stap 4 | Stap 5 |
|--------------|-----------------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1            | 0,75                  | 0,25                  |        |        |        | 1      |        |
| 2            | 0,60                  | 0,40                  |        | 2      |        |        |        |
| 3            | 0,80                  | 0,20                  |        |        | 1      |        |        |
| 4            | 0,65                  | 0,35                  |        |        |        |        | 2      |
| 5            | 0,90                  | 0,10                  | 1      |        |        |        |        |

De volgens Tabel 5.5.9 toegekende lithoklasse wordt de *meest waarschijnlijke lithoklasse* genoemd. Merk op dat als we eenvoudigweg steeds de lithoklasse met de hoogste kans hadden gekozen, alle voxels de lithoklasse 1 toegekend hadden gekregen. Merk verder op dat voxel nummer 4 lithoklasse 2 krijgt toegekend terwijl de kans op lithoklasse 2 slechts 0,35 is.

Het algoritme levert per blok, per modelleenheid een bestand op met per voxel de meest waarschijnlijke lithoklasse. Een tweede Python script voorziet dit bestand van een Isatis®-header waarna het in Isatis® geïmporteerd wordt als een puntendataset met per (x,y,z)-coördinaat de meest waarschijnlijke lithoklasse. Met behulp van een Isatis®-functie wordt de puntdata gemigreerd naar het voxelmodel.

Deze processtap is geautomatiseerd. De berekening gebeurt met Python scripts; de export, import en migratie gebeurt met Isatis® batchinstructies die vastliggen in de *workflow manager*.

#### 5.5.14 *Uitzondering: Antropogeen*

Er geldt een uitzondering voor de eenheid Antropogeen. Voor deze eenheid geldt dat er geen lithoklassen worden gesimuleerd. Alle voxels van de eenheid krijgen als meest waarschijnlijke lithoklasse de waarde 0 = Antropogeen toegekend. De kansen van de lithoklassen binnen de eenheid krijgen allemaal de waarde 0.

Deze processtap is geautomatiseerd; de batchinstructies voor Isatis® liggen vast in de *workflow manager*.

#### 5.5.15 *Berekenen modelonzekerheid van lithoklasse*

Naast de kans op lithoklasse bevat het voxelmodel een maat van modelonzekerheid die in één getalswaarde wordt uitgedrukt in plaats van een reeks afzonderlijke kansen voor elke mogelijke lithoklasse of geologische eenheid. Deze maat is afgeleid van het concept van *informatie-entropie* (Shannon, 1948), die voor het eerst door Wellmann & Regenauer-Lieb (2012) is toegepast op 3D geologische modellen. In plaats van de term informatie-entropie wordt in GeoTOP de term *modelonzekerheid* gebruikt. Zie de Inleiding (paragraaf 2.3.4) voor een voorbeelduitwerking.

De modelonzekerheid  $H$  van een individuele voxel kan eenvoudig worden berekend uit de som van de producten van elke kans op lithoklasse en de logaritme van de kans op lithoklasse:

$$H = - \sum_i^N p_i \log p_i$$

Hierin staat  $H$  voor de modelonzekerheid,  $N$  voor het aantal mogelijke uitkomsten (dat wil zeggen het aantal mogelijke lithoklassen) en  $p_i$  voor de kans op een bepaalde lithoklasse (bijvoorbeeld kans op veen).

Voor het bijzondere geval dat er een  $p_i = 1$  bestaat, is de modelonzekerheid 0. Voor de lithoklasse met  $p_i = 1$  geldt dan namelijk  $\log 1 = 0$ , en voor de overige lithoklassen geldt  $\lim_{x \rightarrow 0} (x \log x) = 0$ . De totale som is dan eveneens 0.

In het geval dat alle lithoklassen dezelfde kans hebben ( $p_1 = p_2 = p_3 = \dots = p_N$ ) is de modelonzekerheid maximaal. De maximale waarde is gelijk aan 1 als het grondtal van de logaritme overeenkomt met het aantal mogelijke uitkomsten  $N$ .

In applicaties waarin alleen met grondtal 10 of  $e$  ( $^{10}\log$  of  $\ln$ ) gerekend kan worden kan de formule herschreven worden als:

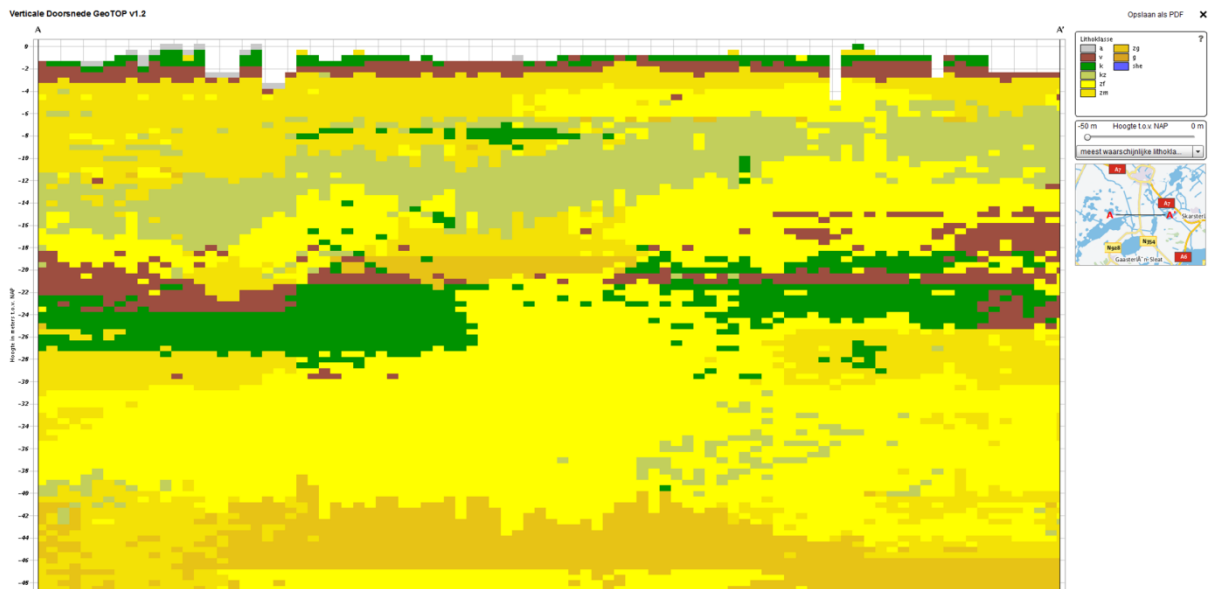
$$H = - \sum_i^N p_i \frac{\ln p_i}{\ln N}$$

Deze processtap is geautomatiseerd; de batchinstructies voor Isatis® liggen vast in de *workflow manager*.

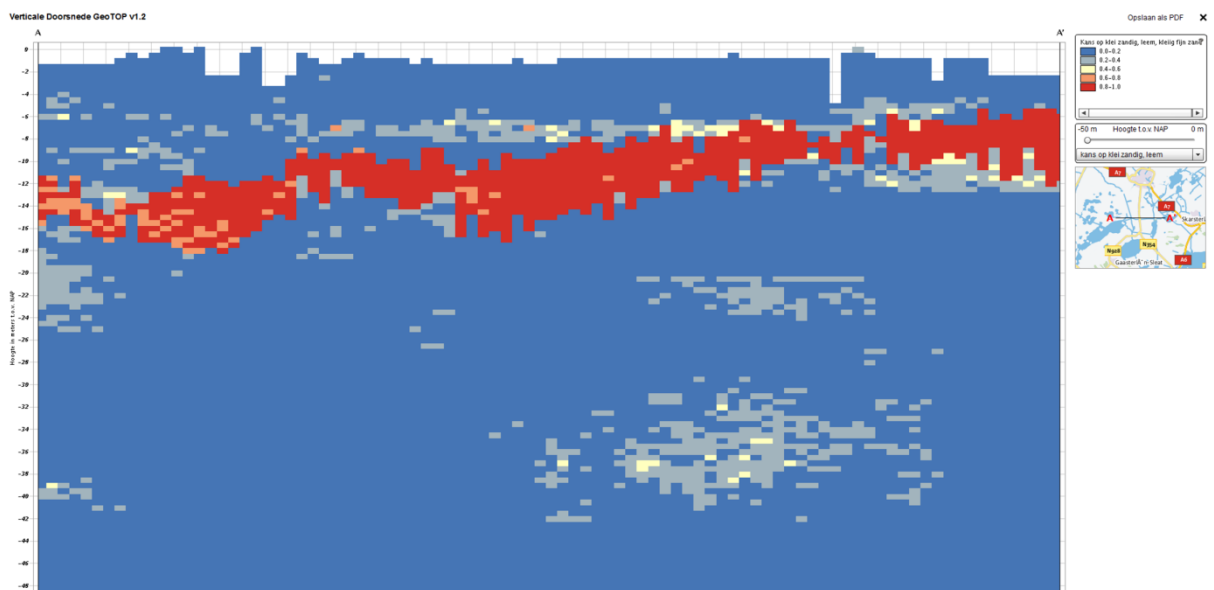
### Voorbeelden modelonzekerheid van lithoklasse

Figuur 5.5.17 toont een doorsnede door het lithoklassemodel van GeoTOP met de *meest waarschijnlijke lithoklasse* als attribuut. Dit is het attribuut waar de modelonzekerheid betrekking op heeft. Figuur 5.5.18 en 5.5.19 geven de kans op lithoklasse weer voor resp. *kleinig zand en zandige klei* en *matig grof zand*. De afzonderlijke kansen-plaatjes geven een goed inzicht in de waarschijnlijkheid dat een bepaalde lithoklasse optreedt maar tonen niet de modelonzekerheid van lithoklasse als geheel.

Figuur 5.5.20 geeft de *modelonzekerheid* van lithoklasse weer. Deze is volgens bovenstaande formule berekend op basis van zes of zeven *kans op lithoklassen*: zes voor de eenheden waarin grind meegenomen is in grof zand, en zeven voor de eenheden waarin grind als aparte lithoklasse is gemodelleerd.

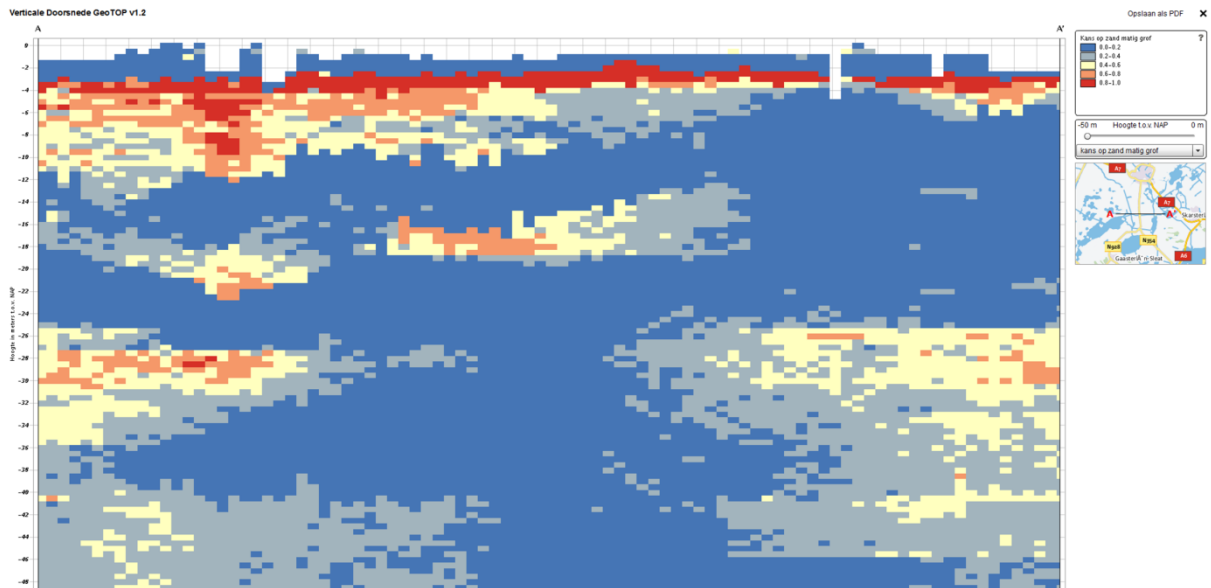


Figuur 5.5.17: Doorsnede door GeoTOP met de meest waarschijnlijke lithoklasse.

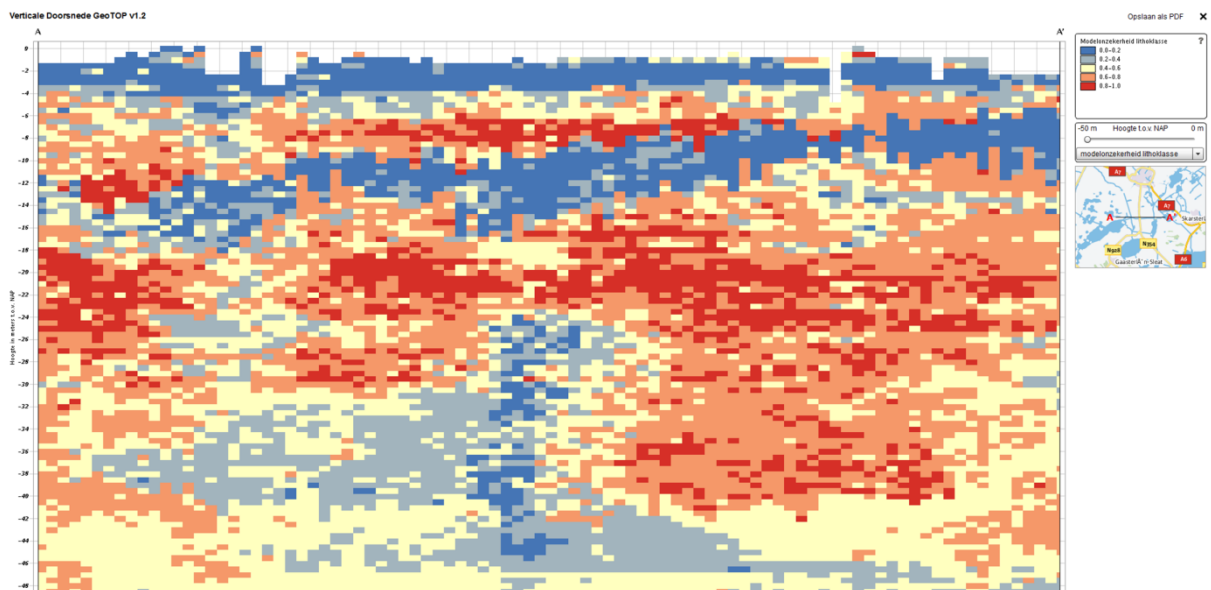


Figuur 5.5.18: Kans op kleig zand en zandige klei. Vooral in één geologische eenheid (Formatie van Drente, Laagpakket van Gieter) zijn hoge kansen waarneembaar.





Figuur 5.5.19: Kans op matig grof zand, met hoge kansen in de eenheid Formatie van Boxtel, Laagpakket van Wierden en daarnaast relatief hoge kansen verspreid in de diepere Pleistocene ondergrond.



Figuur 5.5.20: Modelonzekerheid van lithoklassen, met o.a. een lage onzekerheid in de eenheden waar een bepaalde lithoklasse overheerst (vergelijk met Figuur 4 en 5).

### Beperkingen

Er geldt een aantal beperkingen bij de modelonzekerheid van lithoklasse:

- De modelonzekerheid is gebaseerd op de in GeoTOP gebruikte stochastische interpolatietechnieken. Deze technieken houden niet expliciet rekening met onzekerheidsmarges in de gebruikte brongegevens (voornamelijk boormonsterbeschrijvingen).
- In de modelonzekerheid van lithoklasse is de onzekerheid van het lagenmodel niet meegenomen. De kansen op lithoklasse zijn te beschouwen als de kans *gegeven het lagenmodel*.

#### 5.5.16 *Berekenen modelonzekerheid van geologische eenheid*

De modelonzekerheid van geologische eenheid is de mate waarin het model in staat is om een eenduidige schatting te geven van de geologische eenheid waartoe de voxel behoort. Net als de modelonzekerheid op lithoklasse is deze onzekerheid afgeleid van het concept van *informatie-entropie* en heeft vergelijkbare eigenschappen.

Bij de berekening van de modelonzekerheid wordt gebruik gemaakt van de *kans op stratigrafie* zoals die in werkproces **Lagenmodellering** berekend is (paragraaf 5.4.13). *Kans op stratigrafie* levert voor elke voxel in het model en voor elke in het modelgebied voorkomende eenheid de kans dat de voxel tot die eenheid behoort. Als in een modelgebied 21 eenheden zijn gemodelleerd, dan zijn er 21 kansen voor elke voxel (vergelijkbaar met de 6 of 7 kansen voor de verschillende lithoklassen). In de actuele versie GeoTOP v1.3 is overigens gerekend met het totaal aantal eenheden die in de zeven modelgebieden van deze GeoTOP-versie voorkomen.

In tegenstelling tot de som van de kansen op lithoklasse hoeft de som van de kansen op geologische eenheid niet noodzakelijkerwijs 1 te zijn. Daarom worden de kansen eerst genormaliseerd door voor elke voxel de afzonderlijke kansen te delen door de som van de kansen.

De berekening van de modelonzekerheid van geologische eenheid kan nu op vergelijkbare wijze berekend worden als die van lithoklasse, namelijk uit de som van de producten van de kans op geologische eenheid en de logaritme van de kans op geologische eenheid:

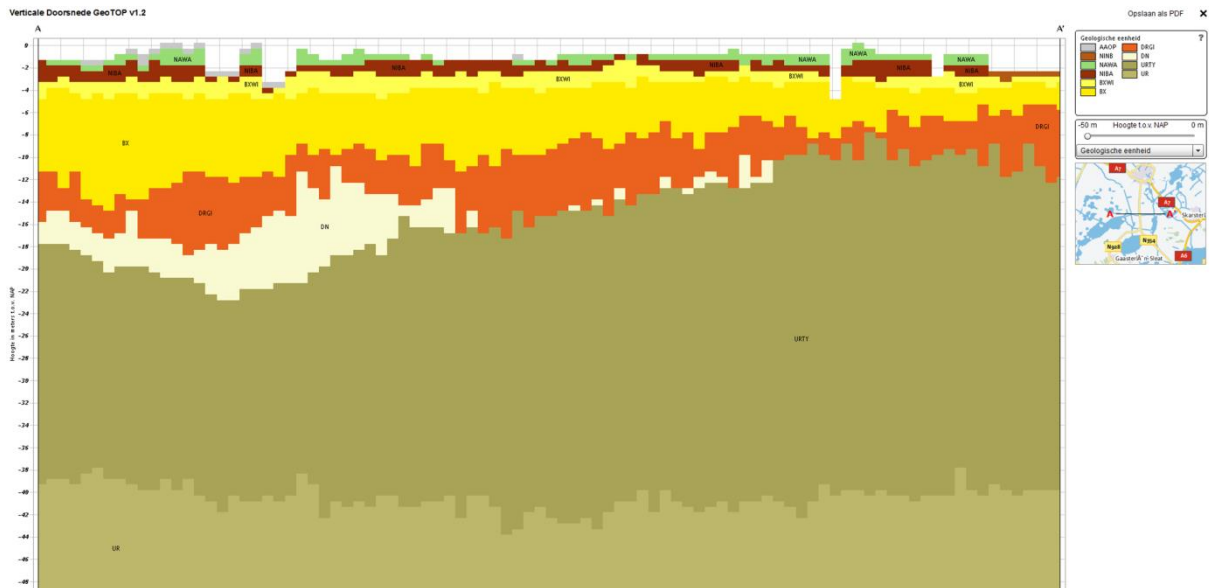
$$H = - \sum_i^N p_i \log p_i$$

Hierin staat  $H$  voor de modelonzekerheid,  $N$  voor het aantal mogelijke uitkomsten (dat wil zeggen het aantal mogelijke geologische eenheden) en  $p_i$  voor de kans op een bepaalde geologische eenheid (bijvoorbeeld de kans dat de voxel tot de Formatie van Naaldwijk behoort).

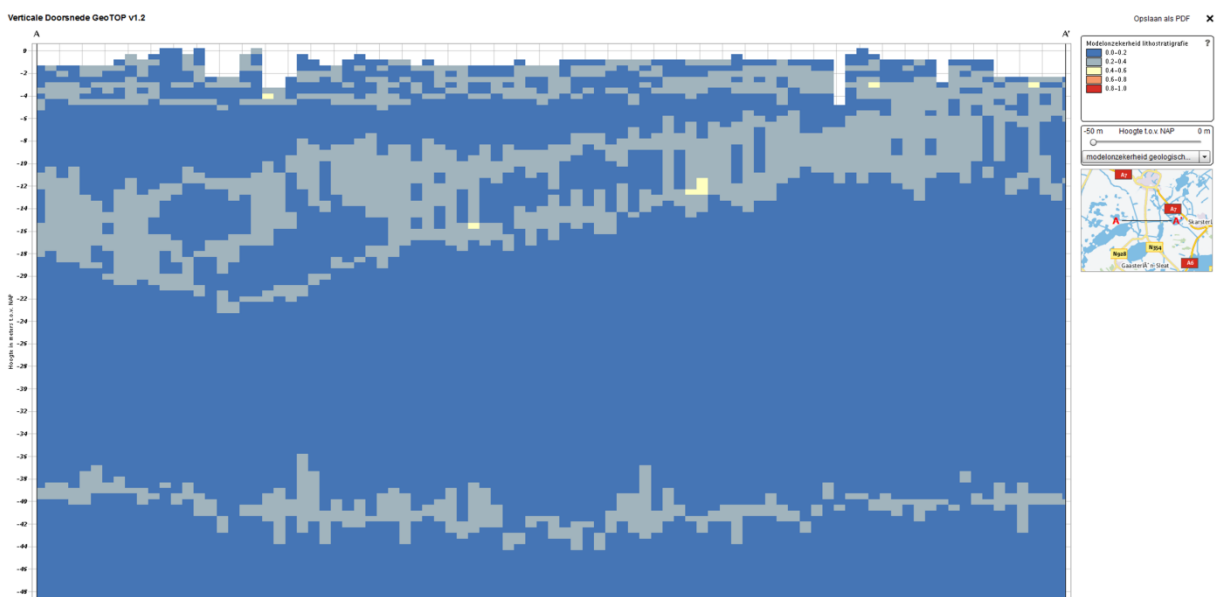
Deze processtap is geautomatiseerd; de batchinstructies voor Isatis® liggen vast in de *workflow manager*.

#### **Voorbeelden modelonzekerheid van geologische eenheid**

Figuur 5.5.21 toont het voxelmodel met de *geologische eenheid* als attribuut. Dit is het attribuut waar de modelonzekerheid betrekking op heeft. Figuur 5.5.22 geeft de *modelonzekerheid van geologische eenheid* weer. Deze is volgens de eerder gegeven formule berekend op basis van 21 afzonderlijk kansen. In het figuur zijn duidelijk zones van hoge modelonzekerheid te zien rondom de grenzen tussen de geologische eenheden.



Figuur 5.5.21: Doorsnede door GeoTOP met de geologische eenheid.



Figuur 5.5.22: Modelonzekerheid van geologische eenheid.

### Beperkingen

Er geldt een aantal beperkingen bij de modelonzekerheid van geologische eenheid:

- De modelonzekerheid is gebaseerd op de in GeoTOP gebruikte stochastische interpolatietechnieken. Deze technieken houden niet expliciet rekening met onzekerheidsmarges in de gebruikte brongegevens (voornamelijk boormonsterbeschrijvingen).
- Buiten de verbreiding van een geologische eenheid is de kans op die eenheid altijd 0. Zie bijvoorbeeld de rechterkant van Figuur 5.5.21 waar buiten de verbreiding van de Formatie van Naaldwijk de kans op deze eenheid altijd 0 is. Dit betekent dat de kansen geen onzekerheidsinformatie over de laterale verbreiding van de geologische eenheid bevatten.

#### 5.5.17 Exporteren voxelmodel

In Isatis® beschikken we nu over een volledig voxelmodel met per blok de volgende attributen:

- De locatie (x,y,z) van het middelpunt van de voxel;
- De geologische eenheid waartoe de voxel behoort (afgeleid uit het lagenmodel);
- De meest waarschijnlijke lithoklasse die representatief is voor de voxel als geheel;
- De kansen op de verschillende lithoklassen waarmee de voxel gevuld kan 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.

Om het voxelmodel voor andere toepassingen dan Isatis® beschikbaar te maken wordt het geëxporteerd. Per blok wordt een csv-bestand gemaakt voorzien van een beschrijvende *header*. In de *header* is opgenomen wat de definitie is van het blokvormig grid: coördinaten van de oorsprong, het aantal voxels in de (x,y,z)-richting en de dimensies van de voxels (100 x 100 x 0,5 m). Daarnaast bevat de *header* informatie over de attributen. Na de *header* volgt voor elke voxel 1 regel met de waarden van de attributen. Het bestand bevat geen (x,y,z)-coördinaten van elke voxel, deze kunnen namelijk op basis van de header bepaald worden. Voxels zonder data (voxels in de lucht, of anderszins buiten het modelgebied) worden met een nodata-waarde voor elk attribuut in het bestand opgenomen.

Een exacte formaatbeschrijving, waarbij de Isatis®-header is vervangen door een meer generieke header, is opgenomen in Bijlage 7.4.1.

#### 5.5.18 Controleren voxelmodel

Het voxelmodel wordt door een gebiedsdeskundig geoloog gecontroleerd (*quality control*). Hij doet dit in samenhang met het lagenmodel en de stratigrafische en lithoklasse indeling van de boorbeschrijvingen.

Net als bij eerdere controles (stratigrafische indeling, lagenmodel) legt de controlerend geoloog eventuele bevindingen vast in een bevindingenlijst, met per bevinding de volgende items:

- Volgnummer van de bevinding.
- Datum.
- Status ('Open', 'Opgelost', 'Niet oplossen'; initieel: 'Open').
- Nummer van profiel waarin bevinding is geconstateerd.
- Boornummer waarin bevinding is geconstateerd.
- Stratigrafische eenheid waarop bevinding betrekking heeft.
- Omschrijving van de bevinding.
- Eventuele bijlagen.

De bevindingen worden geanalyseerd door de modellers en met de controlerend geoloog besproken. Bij de analyse worden de volgende zaken vastgelegd:

- Prioriteit ('Laag', 'Midden', 'Hoog').
- Analyse: oorzaak en gewenste oplossing.

- Oplossing status ('Direct oplossen', 'Volgende release', 'Niet oplossen').

Prioriteit en oplossing status worden in gezamenlijk overleg met de controlerend geoloog vastgesteld. De bevindingen waarvoor besloten is ze op te lossen worden door de modellers in het model verwerkt. Bij de eerstvolgende iteratie van de modellering wordt opnieuw gecontroleerd en krijgen opgeloste bevindingen de status 'Opgelost'. Indien er, na een aantal iteraties, geen openstaande bevindingen meer zijn die opgelost moeten worden is het eindpunt van het werkproces **Lagenmodellering** bereikt.

Bevindingen die eindigen met de status 'Volgende release' worden opgenomen in een algemene bevindingenlijst van GeoTOP. In deze algemene bevindingenlijst zijn dus bevindingen van meerdere modelgebieden opgenomen. Afhankelijk van de bevindingen wordt een (deel van) het werkproces **Voxelmodellering** opnieuw uitgevoerd.

Net als bij eerdere controle van **Interpretatie** worden kunnen ook hier nog bevindingen veroorzaakt worden door boringen van lage kwaliteit, de zogenaamde 'uitbijters'. Deze boringen zijn zichtbaar doordat ze een afwijkende verticale openvolging van lithoklassen veroorzaken.

De boring wordt in voorkomende gevallen opgenomen in de **uitsluitlijst** die in processtap *Opsporen en uitsluiten duplicaten* voor het eerst is aangemaakt.

#### 5.5.19 Workflow management

Het belangrijkste deel van het werkproces wordt met behulp van het softwarepakket Isatis® van de Franse firma Geovariances uitgevoerd. Isatis® is een geostatistisch analyse en modelleringspakket dat zowel handmatig als batchgewijs aangestuurd kan worden. De batchgewijze werkwijze heeft als voordeel dat alle uit te voeren acties worden vastgelegd en daarmee reproduceerbaar zijn. Tevens biedt de batchgewijze werkwijze de mogelijkheid om de vaak langdurige berekeningen 's nachts of in het weekend uit te voeren.

De batchgewijze aansturing van Isatis® gebeurt met zogenaamde *journal-files*, waarin instructies voor Isatis® zijn opgenomen. Deze instructies worden vervolgens door Isatis® sequentieel verwerkt. Het handmatig samenstellen van *journal-files* is niet eenvoudig. Daarom is in Microsoft Excel een zogenaamde *workflow manager* ontwikkeld waarmee op eenvoudige wijze *journal-files* aangemaakt kunnen worden.

Centraal in de *workflow manager* is het tabblad "gridactions" waar Isatis® functies / acties worden opgenomen (Figuur 5.2.23).

| Execut | Action                        | Paramete  | Variable type           | Number of indices       | Check Strat              | Selection name grid      | Macro variable grid   | Mean (Y=Constant; N=Variable) |
|--------|-------------------------------|---|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| 335    | DeleteGrid/VarCheckStrat      | NASC_SIS_NIET_ZAND_KLASSE_DEF[xxxx]   | NASC                    |                         |                          |                          |                       |                               |
| 336    | Remark                        | Acties alleen voor NAZA   |                         |                         |                          |                          |                       |                               |
| 337    | Remark                        | SISIM van zand  |                         |                         |                          |                          |                       |                               |
| 338    | Remark                        | New variable  | Variable type           | Number of indices       | Check Strat              |                          |                       |                               |
| 339    | CreateMacro/VarCheckStrat     | NAZA_SIS_ZAND[xxxx]   | Macro Variable 8 bits   | 10                      |                          | NAZA                     |                       |                               |
| 340    | Remark                        | SISIM Selection name data   | Data variable           | Category label          |                          |                          |                       |                               |
| 341    | SISIM_Standardbth             | NAZA  | zand                    | NAZA_cat_zand           | NAZA                     | NAZA_SIS_ZAND            |                       | Y                             |
| 342    | Remark                        | Selecteer voor elk van de SISIM realisaties het zand (celwaarde 1)                      |                         |                         |                          |                          |                       |                               |
| 343    | Remark                        | New variable  | Variable type           | Number of indices       | Check Strat              |                          |                       |                               |
| 344    | CreateMacro/VarCheckStrat     | set_NAZA_SIS_ZAND[xxxx]   | Macro Variable 1 bit    | 10                      |                          | NAZA                     |                       |                               |
| 345    | Remark                        | Grid variabele  | Lower bound (inclusive) | Upper bound (inclusive) | Selection name           | Check Strat              |                       |                               |
| 346    | SelectInterval/GridCheckStrat | NAZA_SIS_ZAND[00001]  | 1                       | 1                       | set_NAZA_SIS_ZAND[00001] | NAZA                     |                       |                               |
| 347    | SelectInterval/GridCheckStrat | NAZA_SIS_ZAND[00002]  | 1                       | 1                       | set_NAZA_SIS_ZAND[00002] | NAZA                     |                       |                               |
| 348    | SelectInterval/GridCheckStrat | NAZA_SIS_ZAND[00003]  | 1                       | 1                       | set_NAZA_SIS_ZAND[00003] | NAZA                     |                       |                               |
| 349    | SelectInterval/GridCheckStrat | NAZA_SIS_ZAND[00004]  | 1                       | 1                       | set_NAZA_SIS_ZAND[00004] | NAZA                     |                       |                               |
| 350    | SelectInterval/GridCheckStrat | NAZA_SIS_ZAND[00005]  | 1                       | 1                       | set_NAZA_SIS_ZAND[00005] | NAZA                     |                       |                               |
| 351    | SelectInterval/GridCheckStrat | NAZA_SIS_ZAND[00006]  | 1                       | 1                       | set_NAZA_SIS_ZAND[00006] | NAZA                     |                       |                               |
| 352    | SelectInterval/GridCheckStrat | NAZA_SIS_ZAND[00007]  | 1                       | 1                       | set_NAZA_SIS_ZAND[00007] | NAZA                     |                       |                               |
| 353    | SelectInterval/GridCheckStrat | NAZA_SIS_ZAND[00008]  | 1                       | 1                       | set_NAZA_SIS_ZAND[00008] | NAZA                     |                       |                               |
| 354    | SelectInterval/GridCheckStrat | NAZA_SIS_ZAND[00009]  | 1                       | 1                       | set_NAZA_SIS_ZAND[00009] | NAZA                     |                       |                               |
| 355    | SelectInterval/GridCheckStrat | NAZA_SIS_ZAND[00010]  | 1                       | 1                       | set_NAZA_SIS_ZAND[00010] | NAZA                     |                       |                               |
| 356    | Remark                        | Voer voor elke SISIM realisatie een nieuwe serie SISIM's uit binnen de selectie zand    |                         |                         |                          |                          |                       |                               |
| 357    | Remark                        | De cellen met zand krijgen daarmee een zand_klasse (fijn, matig grof en grof) toegekend |                         |                         |                          |                          |                       |                               |
| 358    | Remark                        | New variable  | Variable type           | Number of indices       | Check Strat              |                          |                       |                               |
| 359    | CreateMacro/VarCheckStrat     | NAZA_SIS_ZAND_KLASSE1[xxxx]   | Macro Variable 8 bits   | 10                      |                          | NAZA                     |                       |                               |
| 360    | CreateMacro/VarCheckStrat     | NAZA_SIS_ZAND_KLASSE2[xxxx]   | Macro Variable 8 bits   | 10                      |                          | NAZA                     |                       |                               |
| 361    | CreateMacro/VarCheckStrat     | NAZA_SIS_ZAND_KLASSE3[xxxx]   | Macro Variable 8 bits   | 10                      |                          | NAZA                     |                       |                               |
| 362    | CreateMacro/VarCheckStrat     | NAZA_SIS_ZAND_KLASSE4[xxxx]   | Macro Variable 8 bits   | 10                      |                          | NAZA                     |                       |                               |
| 363    | CreateMacro/VarCheckStrat     | NAZA_SIS_ZAND_KLASSE5[xxxx]   | Macro Variable 8 bits   | 10                      |                          | NAZA                     |                       |                               |
| 364    | CreateMacro/VarCheckStrat     | NAZA_SIS_ZAND_KLASSE6[xxxx]   | Macro Variable 8 bits   | 10                      |                          | NAZA                     |                       |                               |
| 365    | CreateMacro/VarCheckStrat     | NAZA_SIS_ZAND_KLASSE7[xxxx]   | Macro Variable 8 bits   | 10                      |                          | NAZA                     |                       |                               |
| 366    | CreateMacro/VarCheckStrat     | NAZA_SIS_ZAND_KLASSE8[xxxx]   | Macro Variable 8 bits   | 10                      |                          | NAZA                     |                       |                               |
| 367    | CreateMacro/VarCheckStrat     | NAZA_SIS_ZAND_KLASSE9[xxxx]   | Macro Variable 8 bits   | 10                      |                          | NAZA                     |                       |                               |
| 368    | CreateMacro/VarCheckStrat     | NAZA_SIS_ZAND_KLASSE10[xxxx]  | Macro Variable 8 bits   | 10                      |                          | NAZA                     |                       |                               |
| 369    | Remark                        | SISIM Selection name data   | Data variable           | Category label          |                          |                          |                       |                               |
| 370    | SISIM_Standardbth             | NAZA  | zand_klasse             | NAZA_cat_zand_klasse    | NAZA                     | set_NAZA_SIS_ZAND[00001] | NAZA_SIS_ZAND_KLASSE1 | Y                             |
| 371    | SISIM_Standardbth             | NAZA  | zand_klasse             | NAZA_cat_zand_klasse    | NAZA                     | set_NAZA_SIS_ZAND[00002] | NAZA_SIS_ZAND_KLASSE2 | Y                             |

Figuur 5.2.23: Workflow manager voor de modellering van lithoklassen in Isatis®.

Per uit te voeren functie is er 1 regel met de naam van de actie en de invoerparameters. Tevens is er een kolom waarmee de regel aan of uit gezet kan worden. Met een druk op een knop wordt een *journal-file* gecreëerd waarmee alle aangezette functies in Isatis® kunnen worden uitgevoerd. De algemene functionaliteit van Excel maakt het mogelijk om snel functies te kopiëren of de volgorde aan te passen.

Een bijzonderheid van de *workflow manager* van de lithoklassmodellering is dat de acties eenmalig hoeven worden ingevoerd, maar dat vervolgens voor alle gedefinieerde blokken *journal-instructies* worden aangemaakt.

## 5.6 Publicatie

In het werkproces **Publicatie** worden de door de hierboven beschreven werkprocessen aangemaakte producten geschikt gemaakt om aan de buitenwereld beschikbaar te stellen. In dit hoofdstuk beperken we ons daarbij tot de bestanden in het ZIP-bestand voor de Basisregistratie Ondergrond.

De werkprocessen in de voorgaande hoofdstukken richtten zich steeds op één modelgebied. Bij de processtappen van het werkproces **Publicatie** worden echter meerdere modelgebieden betrokken.

**Publicatie** bestaat uit de volgende processtappen:

- Uitsluiten vertrouwelijke boringen.
- Samenstellen Excel-bestanden met de gegevens in tabelvorm.
- Samenstellen ArcGIS-bestanden met het lagenmodel.
- Samenstellen ArcGIS-bestanden met horizontale doorsneden door het voxelmodel.
- Samenstellen CSV-bestanden met het voxelmodel.
- Samenstellen ZIP-bestand

In onderstaande paragrafen wordt beschreven hoe het werkproces verloopt.

#### 5.6.1 *Uitsluiten vertrouwelijke boringen*

De eerste stap binnen dit werkproces is het uitselecteren van de vertrouwelijke boringen. In paragraaf 4.2.1 werd al benoemd dat een deel van de boringen in DINO vertrouwelijk is. Het betreft boringen die door de eigenaar aan DINO ter beschikking zijn gesteld, maar waarvan de locatie en/of de boorbeschrijving niet openbaar gemaakt mag worden. Deze boringen worden, met toestemming van de eigenaar, wel in de modellering gebruikt, maar niet als modelresultaat gepubliceerd.

In een aantal gevallen heeft de eigenaar een einddatum gesteld aan de vertrouwelijkheid. Om te bepalen of een boring wel of niet gepubliceerd mag worden wordt de einddatum vergeleken met een peildatum. Boorlocaties en boorbeschrijvingen waarvan de vertrouwelijkheidsdatum na deze peildatum ligt, worden niet in de publicatie opgenomen.

Deze processtap is geautomatiseerd met behulp van Python-scripts.

#### 5.6.2 *Samenstellen Excel-bestanden met de gegevens in tabelvorm*

In de Gegevenscatalogus van het BRO GeoTOP model is een aantal entiteiten en attributen gedefinieerd waarvan de gegevens in tabelvorm worden uitgeleverd. Het betreft gegevens over de versiehistorie van het model en de modelgebieden, boringen, boorbeschrijvingen en interpretaties, en referentielijsten. Voor een formele definitie van de gegevens wordt verwezen naar de Gegevenscatalogus van het BRO GeoTOP model.

#### **Model, modelgebied en modelversie**

Tabel 5.6.1 geeft een overzicht van de Excel-sheets met de definitie van het model, de modelgebieden en de modelversie.

Tabel 5.6.1: Excel-sheets met de definitie van het model, de modelgebieden en de modelversie.

| <b>Naam in Gegevenscatalogus</b> | <b>Excel-sheet (.xlsx)</b> | <b>Toelichting</b>  |
|----------------------------------|----------------------------|---|
| Model                            | GTP_MODEL                  | Naam, versienummer, datum ingang en datum einde van de actuele en historische versies van het BRO GeoTOP model. De actuele versie heeft geen datum einde. |
| Modelgebied                      | GTP_MODEL_AREA             | Naam, versienummer, datum ingang en datum einde van de actuele en historische versies van de BRO GeoTOP modelgebieden. De actuele versie van een          |



|                    |                       |   |
|--------------------|-----------------------|---|
|                    |                       | modelgebied heeft geen datum einde.                         |
| Modelsamenstelling | GTP_MODEL_COMPOSITION | Koppeling van modelgebieden en versies aan model en versies |

Deze tabellen worden met de hand samengesteld.

### Boringen, boorbeschrijvingen en interpretaties

Voor elk modelgebied wordt een aparte Excel-sheet met de boringen, boorbeschrijvingen en interpretaties aangemaakt (Tabel 5.6.2). In de bestandsnaam wordt het modelgebied met een afkorting aangeduid:

- WW – Westelijke Wadden
- OW – Oostelijke Wadden

De gegevens in de Excel-sheets hebben alleen betrekking op de actuele versie van het modelgebied.

Tabel 5.6.2: Excel-sheets met de definitie van boringen, boorbeschrijvingen en interpretaties.

| Naam in Gegevenscatalogus                    | Excel-sheet (.xlsx) | Toelichting  |
|--|---------------------|--|
| Geïnterpreteerde boormonster-beschrijving    | GTP_BOREHOLE        | Boringen van modelgebied, met boornummer, (x,y)-coördinaten in RD, hoogte in mm t.o.v. NAP en einddiepte in mm gemeten langs de boring |
| Boorbeschrijvings-interval                   | GTP_LTH_INTERVAL    | Boornummer, top en basis van het interval in mm gemeten langs de boring, boorbeschrijving in gecodeerde vorm volgens SBB / NEN:5104    |
| Geïnterpreteerd geologische eenheid interval | GTP_STR_INTERVAL    | Boornummer, top en basis van het interval in mm gemeten langs de boring, code van de geïnterpreteerde geologische eenheid              |
| Geïnterpreteerd lithoklasse interval         | GTP_LITHO_INTERVAL  | Boornummer, top en basis van het interval in mm gemeten langs de boring, code van de geïnterpreteerde lithoklasse                      |

Deze tabellen worden geautomatiseerd (Python-scripts) samengesteld.

## Referentielijsten

De twee referentielijsten worden weergegeven in Tabel 5.6.3.

Tabel 5.6.3: Excel-sheets met de definitie van de twee referentielijsten van GeoTOP.

| Naam in Gegevenscatalogus           | Excel-sheet (.xlsx) | Toelichting   |
|-------------------------------------|---------------------|---|
| Referentielijst Geologische eenheid | REF_GTP_STR_UNIT    | Code, omschrijving, volgnummer, nummer in het voxelmodel en RGB-kleurcodering van de in GeoTOP voorkomende geologische eenheden |
| Referentielijst Lithoklasse         | REF_GTP_LITHO_CLASS | Code, omschrijving, volgnummer, nummer in het voxelmodel en RGB-kleurcodering van de in GeoTOP voorkomende lithoklassen         |

Deze tabellen worden met de hand samengesteld.

### 5.6.3 Samenstellen ArcGIS-bestanden met het lagenmodel

In paragraaf 5.4 is beschreven hoe het lagenmodel van een GeoTOP modelgebied tot stand komt. Het eindproduct is een set van 5 rasters (in ArcAscii formaat) voor elke in het modelgebied gemodelleerde geologische eenheid. De 5 rasters zijn:

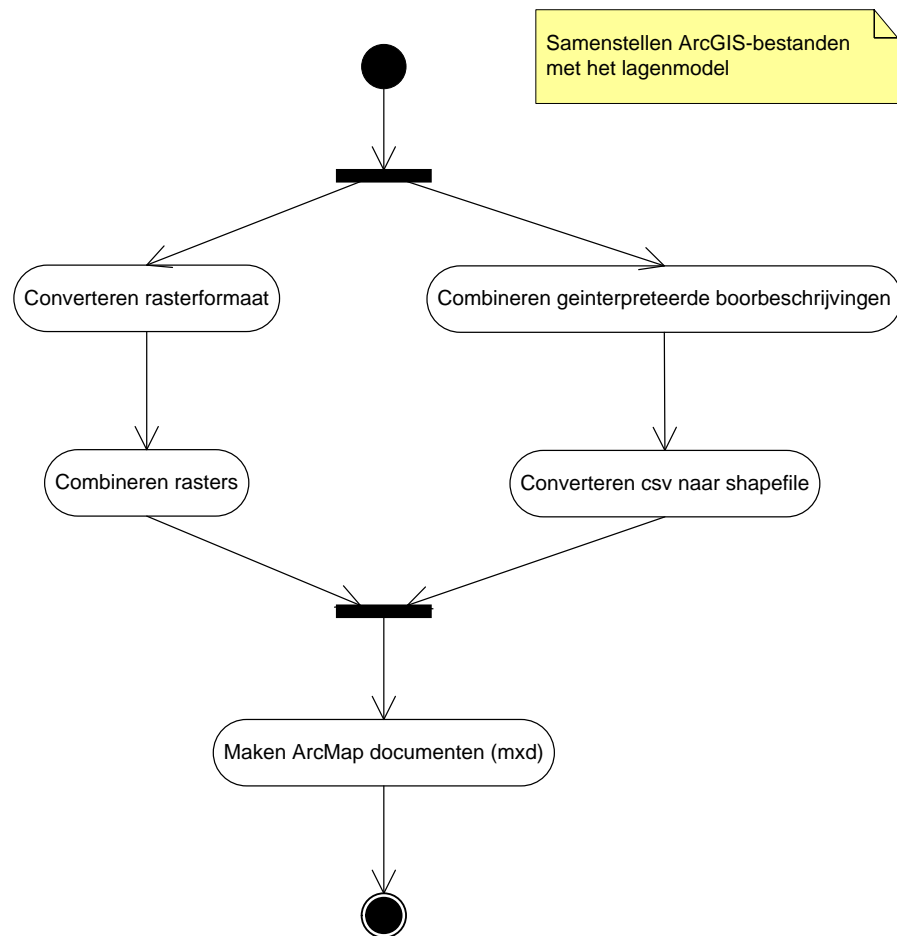
- Top van de eenheid , in m ten opzichte van NAP.
- Basis van de eenheid , in m ten opzichte van NAP.
- Dikte van de eenheid, in m.
- Standaarddeviatie van de top, in m.
- Standaarddeviatie van de basis, in m.

Bij het maken van de lagenmodellen is voor elk modelgebied afzonderlijk bekeken welke geologische eenheden van belang waren om in het model op te nemen. Bij het maken van het samengestelde lagenmodel wordt eerst per eenheid bekeken in welke modelgebieden hij voorkomt. De rasterkaarten van de afzonderlijke modelgebieden worden vervolgens aan elkaar gepast.

In een aantal gevallen ontstaan er “lasnaden” tussen de modellen: plaatsen waar de lagenmodellen van de verschillende modelgebieden niet exact op elkaar aansluiten. Dit komt door ‘voortschrijdend inzicht’: bij het maken van een nieuw modelgebied kan bijvoorbeeld blijken dat een verbreidingsgrens in een eerder gemodelleerd, aangrenzend modelgebied onjuist is.

Behalve de geologische eenheden worden ook de rasters van maaiveld- en waterbodemhoogte van de modelgebieden aan elkaar gepast.

Figuur 5.6.1 geeft de processtappen van het deelwerkproces *Samenstellen ArcGIS-bestanden met het lagenmodel* weer. De processtappen worden hieronder toegelicht.



Figuur 5.6.1: Processtappen in Samenstellen ArcGIS-bestanden met het lagenmodel.

### Converteren rasterformaat

In deze stap worden alle rasters van de betrokken modelgebieden geconverteerd naar het ERDAS Imagine formaat. Dit is een rasterformaat dat door veel GIS softwarepakketten, inclusief ArcGIS, gelezen kan worden. Er is gekozen voor ERDAS Imagine in plaats van het eigen rasterformaat van ESRI omdat de laatste hinderlijke beperkingen kent in de lengte van de bestandsnamen. De conversie is geautomatiseerd met een combinatie van Python en ArcGIS.

### Combineren rasters

De rasters (top, basis, dikte, standaarddeviatie top, standaarddeviatie basis) van eenheden die in meer dan een modelgebied voorkomen worden aan elkaar gepast. Ook de maaiveld- en waterbodemoogtebestanden van de verschillende modelgebieden worden aan elkaar gepast. Het combineren is geautomatiseerd met een combinatie van Python en ArcGIS.

### Combineren geïnterpreteerde boorbeschrijvingen

Uit de stratigrafische indeling van de boorbeschrijvingen van de verschillende modelgebieden wordt een bestand samengesteld dat per boring, per eenheid

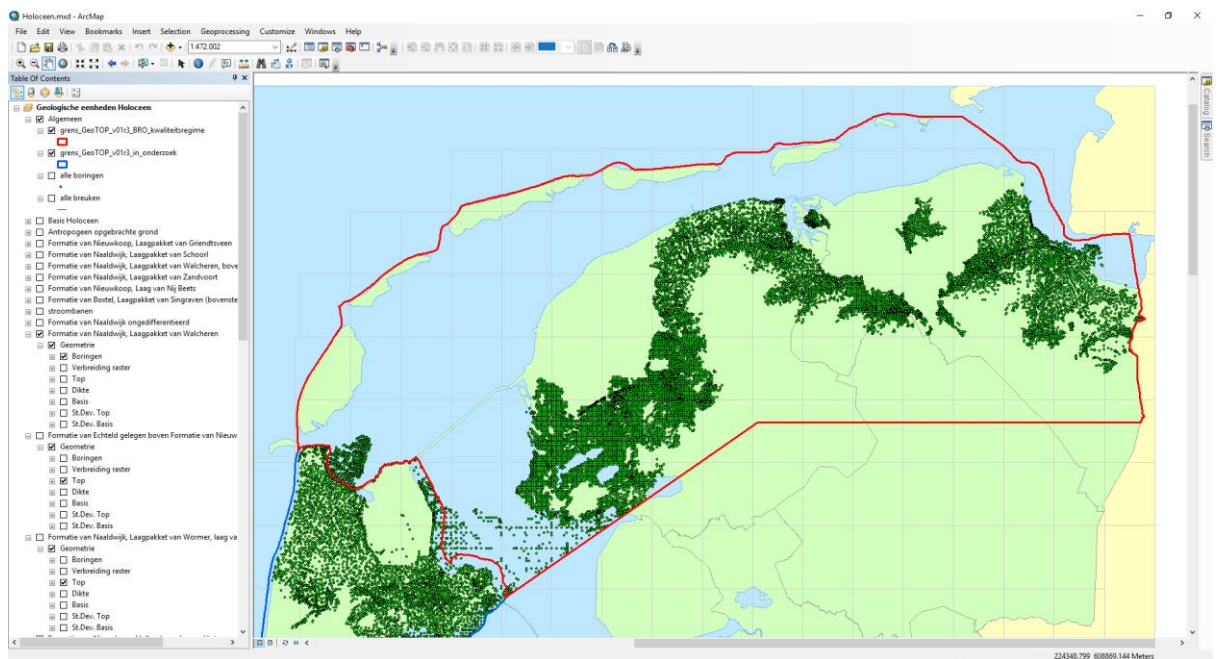
aangeeft wat de top en basis van de eenheid in de boring is. Op basis van dit bestand wordt per eenheid een apart bestand samengesteld met de boringen waarin de eenheid is aangetroffen. Voor elke boring worden de volgende attributen opgenomen:

- Boornummer.
- Locatie (x,y).
- Maaiveldhoogte.
- Einddiepte boring.
- Top van de eenheid.
- Basis van de eenheid.
- Dikte van de eenheid.
- Broncode (NH = Noord-Holland, RIV = Rivierengebied etc.).
- Indicatie of de eenheid volledig doorboord is of niet.

Het combineren is geautomatiseerd met behulp van Python.

### Converteren csv naar shapefile

De in de voorgaande processtap gemaakte bestanden zijn csv-bestanden (comma separated values). Deze bestanden worden vervolgens geconverteerd naar ESRI shapefiles (Figuur 5.6.2, 5.6.3).



Figuur 5.6.2: ArcMap document (mxd) met samengestelde locaties van boringen waarin het Laagpakket van Walcheren is aangetroffen.

| FID | Shape | Id | Boornummer | Xcoord | Ycoord | BRON | TOP_nap | BASIS_nap | DIKTE | ENDD_nap | DOORBOORD | MV_NAP | STRATIGR |
|-----|-------|----|------------|--------|--------|------|---------|-----------|-------|----------|-----------|--------|----------|
| 0   | Point | 0  | B02D0031   | 196360 | 601598 | OW   | 1.16    | -12.84    | 14    | -15.84   | ja        | 1.16   | NAWA     |
| 1   | Point | 0  | B02D0039   | 193250 | 600880 | WW   | 1       | -3.9      | 5     | -8.25    | ja        | 1      | NAWA     |
| 2   | Point | 0  | B02D0040   | 199670 | 602350 | OW   | 0.5     | -10.4     | 11    | -9.25    | ja        | 1      | NAWA     |
| 3   | Point | 0  | B02D0041   | 197790 | 600580 | OW   | 0.6     | -18       | 19    | -29.4    | ja        | 0.6    | NAWA     |
| 4   | Point | 0  | B02D0043   | 198100 | 601940 | OW   | 1       | -4.2      | 5     | -5.6     | ja        | 1      | NAWA     |
| 5   | Point | 0  | B02D0095   | 195446 | 600960 | OW   | 0.37    | -3.99     | 4     | -16.02   | ja        | 0.98   | NAWA     |
| 6   | Point | 0  | B02D0114   | 191830 | 600170 | WW   | 0.83    | -2.67     | 4     | -6.37    | ja        | 0.83   | NAWA     |
| 7   | Point | 0  | B02D0115   | 192190 | 600160 | WW   | 1.1     | -2.38     | 3     | -8.72    | ja        | 1.1    | NAWA     |
| 8   | Point | 0  | B02D0116   | 192450 | 600350 | WW   | 1.01    | -2.77     | 4     | -10.9    | ja        | 1.01   | NAWA     |
| 9   | Point | 0  | B02D0117   | 193330 | 600540 | WW   | 0.8     | -2.55     | 3     | -6.9     | ja        | 0.8    | NAWA     |
| 10  | Point | 0  | B02D0118   | 193840 | 600500 | WW   | 0.8     | -1.75     | 3     | -4.09    | ja        | 0.8    | NAWA     |
| 11  | Point | 0  | B02D0120   | 195670 | 600950 | OW   | 0.9     | -3.34     | 4     | -9.27    | ja        | 0.9    | NAWA     |
| 12  | Point | 0  | B02D0121   | 195560 | 600540 | OW   | 0.64    | -2.52     | 3     | -8.21    | ja        | 0.64   | NAWA     |
| 13  | Point | 0  | B02D0122   | 195920 | 600170 | OW   | 0.7     | -2.72     | 3     | -4.95    | ja        | 0.7    | NAWA     |
| 14  | Point | 0  | B02D0123   | 196380 | 600410 | OW   | 0.6     | -8.17     | 9     | -8.5     | ja        | 0.6    | NAWA     |
| 15  | Point | 0  | B02D0124   | 197510 | 600180 | OW   | 0.45    | -8.67     | 9     | -8.67    | nee       | 0.45   | NAWA     |
| 16  | Point | 0  | B02D0125   | 197360 | 600810 | OW   | -0.27   | -2.91     | 3     | -4.7     | ja        | 0.23   | NAWA     |
| 17  | Point | 0  | B02D0126   | 197960 | 600790 | OW   | -0.16   | -4.01     | 4     | -4.88    | ja        | -0.16  | NAWA     |
| 18  | Point | 0  | B02D0127   | 197900 | 600910 | OW   | -1.18   | -8.68     | 8     | -11.88   | ja        | 0.32   | NAWA     |
| 19  | Point | 0  | B02D0128   | 198450 | 600640 | OW   | 0.22    | -10.88    | 11    | -10.88   | nee       | 0.22   | NAWA     |
| 20  | Point | 0  | B02D0129   | 198970 | 600730 | OW   | 0.47    | -3.04     | 4     | -3.53    | ja        | 0.47   | NAWA     |
| 21  | Point | 0  | B02D0130   | 199410 | 600520 | OW   | 0.75    | -8.35     | 9     | -8.35    | nee       | 0.75   | NAWA     |
| 22  | Point | 0  | B02D0131   | 199980 | 600520 | OW   | 0.43    | -2.75     | 3     | -8.57    | ja        | 0.43   | NAWA     |
| 23  | Point | 0  | B02D0132   | 195230 | 601250 | OW   | 1       | -2.95     | 4     | -6.95    | ja        | 1      | NAWA     |
| 24  | Point | 0  | B02D0133   | 196940 | 601380 | OW   | 0.41    | -6.64     | 7     | -6.64    | nee       | 0.41   | NAWA     |
| 25  | Point | 0  | B02D0134   | 197460 | 601330 | OW   | 0.02    | -3.07     | 3     | -8.98    | ja        | 0.02   | NAWA     |
| 26  | Point | 0  | B02D0135   | 197940 | 601420 | OW   | 0.5     | -2.92     | 3     | -9.5     | ja        | 0.5    | NAWA     |
| 27  | Point | 0  | B02D0136   | 197250 | 601530 | OW   | 0.35    | -5.55     | 6     | -5.55    | nee       | 0.35   | NAWA     |
| 28  | Point | 0  | B02D0137   | 198280 | 601030 | OW   | 0.19    | -2.94     | 3     | -4.81    | ja        | 0.19   | NAWA     |
| 29  | Point | 0  | B02D0138   | 198540 | 601490 | OW   | 0.78    | -2.39     | 3     | -10.62   | ja        | 0.78   | NAWA     |
| 30  | Point | 0  | B02D0139   | 199660 | 601460 | OW   | 0.69    | -2.53     | 3     | -7.71    | ja        | 0.69   | NAWA     |
| 31  | Point | 0  | B02D0165   | 193010 | 600240 | WW   | 1.63    | -0.97     | 3     | -6.47    | ja        | 1.63   | NAWA     |
| 32  | Point | 0  | B02D0166   | 190990 | 600133 | WW   | 1.76    | -2.6      | 4     | -12.28   | ja        | 1.76   | NAWA     |
| 33  | Point | 0  | B02D0167   | 192015 | 600513 | WW   | 1.76    | -2.79     | 5     | -7.84    | ja        | 1.76   | NAWA     |
| 34  | Point | 0  | B02D0168   | 192449 | 600648 | WW   | 1.79    | -4.43     | 6     | -5.49    | ja        | 1.79   | NAWA     |
| 35  | Point | 0  | B02D0169   | 193753 | 600924 | WW   | 1.68    | -2.47     | 4     | -6.97    | ja        | 1.68   | NAWA     |
| 36  | Point | 0  | B02D0170   | 194481 | 601057 | WW   | 1.02    | -2.94     | 4     | -7.44    | ja        | 1.02   | NAWA     |
| 37  | Point | 0  | B02D0171   | 195207 | 601392 | OW   | 1.45    | -2.95     | 4     | -5.46    | ja        | 1.45   | NAWA     |
| 38  | Point | 0  | B02D0172   | 197654 | 601892 | OW   | 1.45    | -2.5      | 4     | -6.2     | ja        | 1.45   | NAWA     |
| 39  | Point | 0  | B02D0173   | 197889 | 601945 | OW   | 1.44    | -2.97     | 4     | -15.91   | ja        | 1.44   | NAWA     |

Figuur 5.6.3: Attribuentabel van de boringen in Figuur 5.6.2.

### Maken ArcMap documenten (mxd)

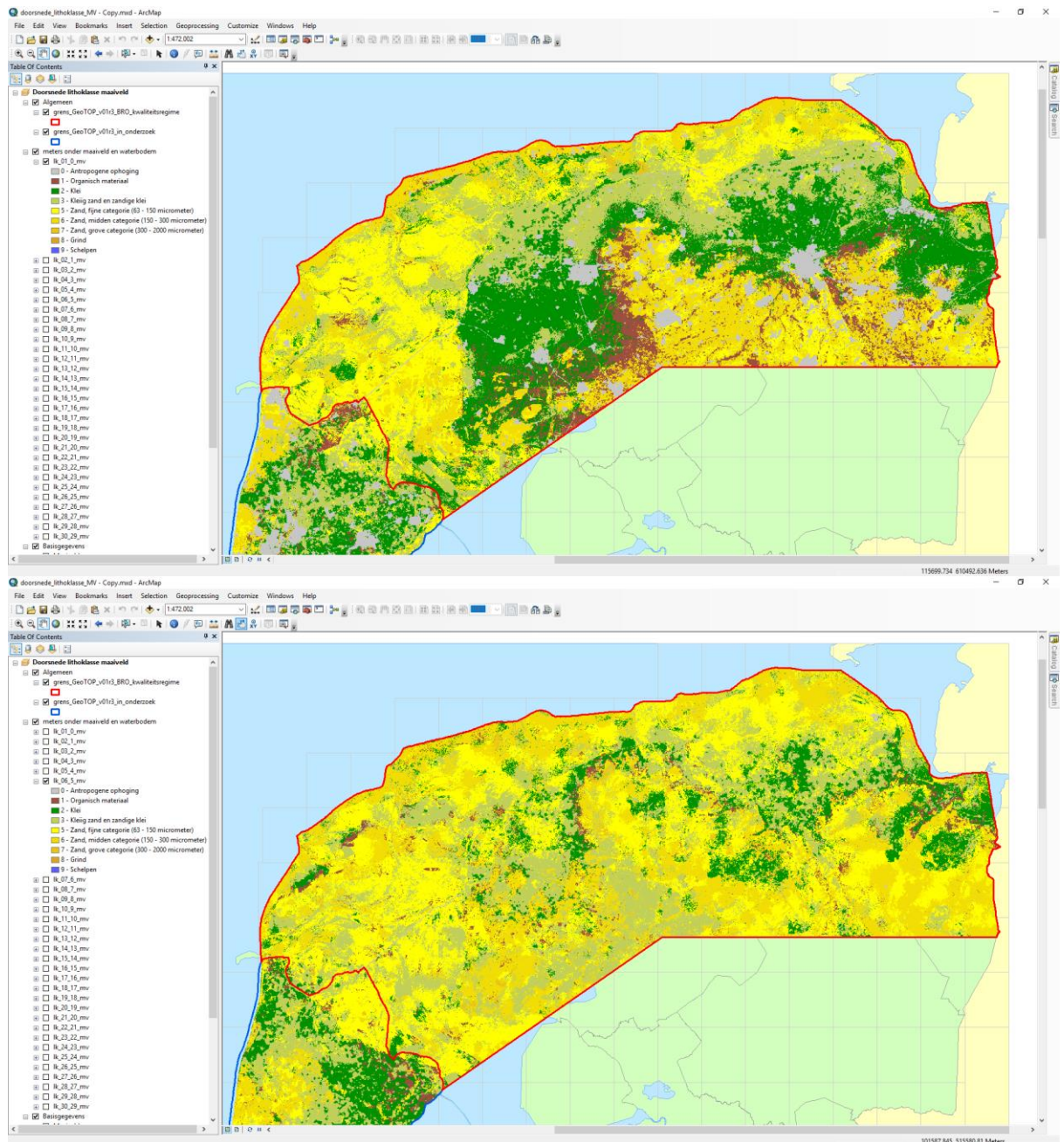
In deze processtap worden de volgende uit te leveren producten aangemaakt:

- ArcMap document "Holoceen" met de holocene eenheden, voorzien van legenda's.
- ArcMap document "Pleistoceen" met de pleistocene en oudere eenheden, voorzien van legenda's.
- Per geologische eenheid:
  - Rasterkaarten met de verbreiding en hoogteligging van de top en basis van de eenheid (in m ten opzichte van NAP).
  - Rasterkaart met de verbreiding en dikte van de eenheid (in m).
  - Rasterkaarten met de standaarddeviatie van de hoogteligging van de top en basis van de eenheid (in m).
  - Shapefile (punten) met de geïnterpreteerde boormonsterprofielen waarin de eenheid is aangetroffen, met daarbij informatie over de top, basis en dikte van de eenheid in het boormonsterprofiel.
- Algemene, ondersteunende informatie:
  - Eenvoudige topografische kaart van Nederland (shapefile, polygoon).
  - Grenzen van de GeoTOP modelgebieden (shapefile, polygoon).
  - Maaiveld- en waterbodemoogtekaart (raster).
  - Overzicht van de topografische kaartbladen waarop de nummering van de boormonsterprofielen gebaseerd is (shapefile, polygoon).

Het maken van de ArcMap documenten is een handmatige processtap.

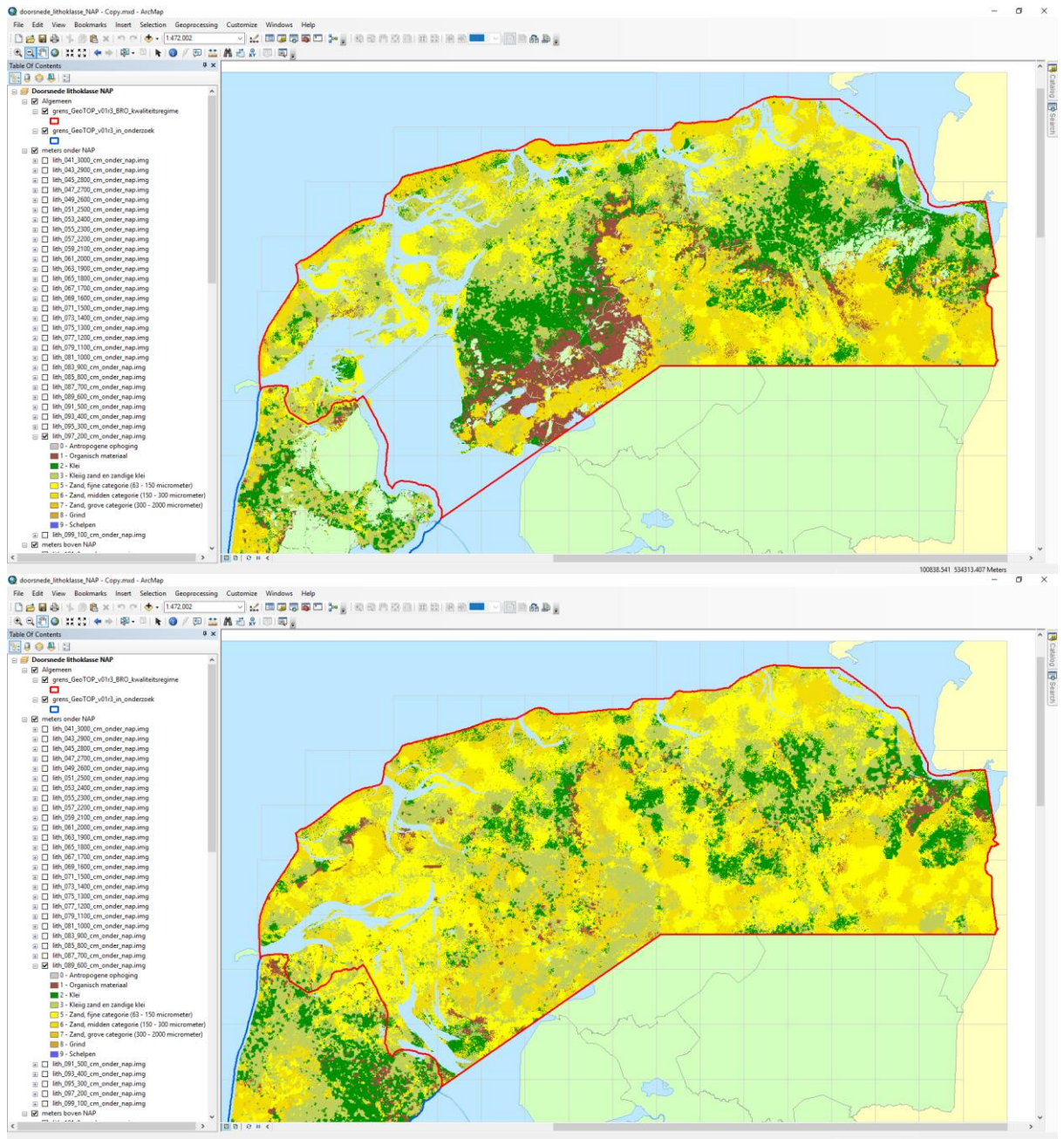
#### 5.6.4 Samenstellen ArcGIS-bestanden met horizontale doorsneden door het voxelmodel

Horizontale doorsneden zijn rasterkaarten die een eigenschap van het voxelmodel (bijvoorbeeld lithoklasse) op een bepaalde diepte ten opzichte van maaiveld of hoogte ten opzichte van NAP weergeven. Figuur 5.6.4 geeft als voorbeeld twee horizontale doorsneden van lithoklasse ten opzichte van maaiveld weer; Figuur 5.6.5 ten opzichte van NAP.



Figuur 5.6.4: Horizontale doorsneden met de lithoklassen op 0 m en 5 m onder maaiveld.

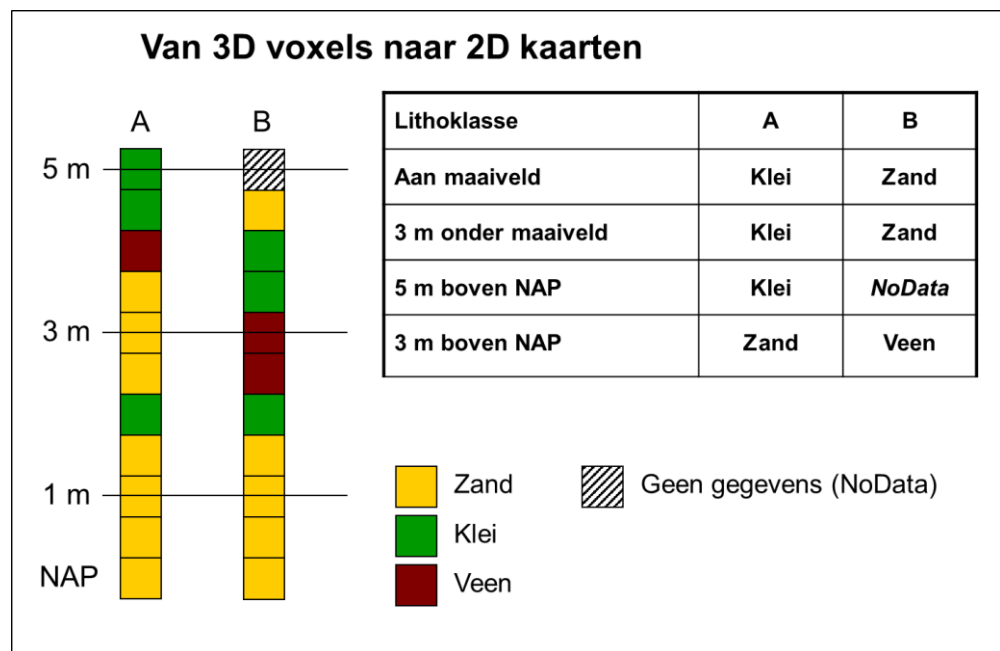




Figuur 5.6.5: Horizontale doorsneden met de lithoklassen op 2 m en 6 m onder NAP.

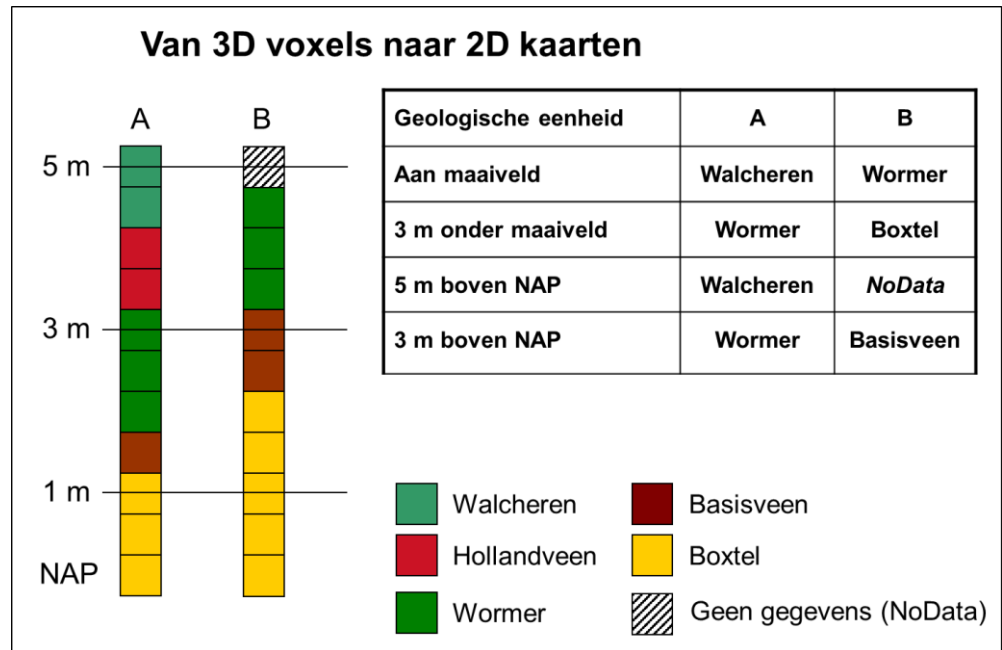


In hoofdstuk 5.5 is beschreven hoe het voxelmodel van een GeoTOP modelgebied tot stand komt. Het eindproduct is een csv-bestand per blok van het modelgebied. Uit de bestanden kan voor elke combinatie van een x- en een y-coördinaat een *verticale voxel stack* geconstrueerd worden. Deze verticale voxel stack geeft voor een (x,y)-locatie de verticale opeenvolging van de eigenschappen van de voxels weer. Uit de voxel stack kan de waarde van een eigenschap (bijvoorbeeld lithoklasse) op een bepaalde diepte ten opzichte van maaiveld of NAP worden afgelezen. Deze waarde geldt dan voor de rastercel op de (x,y)-locatie in de rasterkaart. In Figuur 5.6.6 wordt deze werkwijze geïllustreerd voor de lithoklasse en in twee verschillende voxel stacks op locaties A en B.



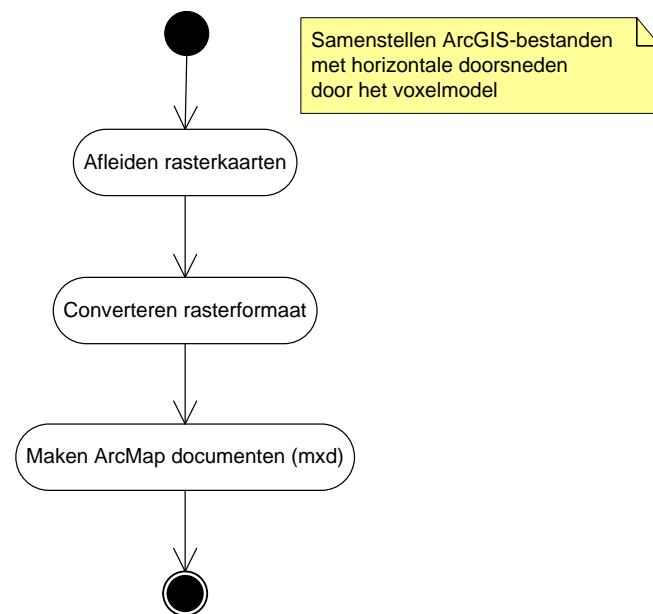
Figuur 5.6.6: Twee verticale voxel stacks met lithoklassen op locaties A en B. De tabel geeft de afgeleide waarden weer voor 4 verschillende doorsnedekaarten. De voxel in locatie B met "geen gegevens" is een niet gevulde voxel boven maaiveld.

In Figuur 5.6.7 wordt de werkwijze voor de eigenschap geologische eenheid weergegeven.



Figuur 5.6.7: Twee verticale voxel stacks met modeleenheden op locaties A en B. De tabel geeft de afgeleide waarden weer voor 4 verschillende doorsnedekaarten. De voxel in locatie B met "geen gegevens" is een niet gevulde voxel boven maaiveld.

Figuur 5.6.8 geeft de processtappen van *Samenstellen ArcGIS-bestanden met horizontale doorsneden door het voxelmodel* weer. De processtappen worden hieronder toegelicht.



Figuur 5.6.8: Processtappen in het deelwerkproces *Maken horizontale doorsneden*.

### Afleiden rasterkaarten

Voor elke horizontale doorsnede van een eigenschap op een bepaalde diepte ten opzichte van maaiveld of hoogte ten opzichte van NAP wordt een rasterkaart

gemaakt. Er is dus een rasterkaart voor lithoklasse op 0 m onder maaiveld, voor 1 m onder maaiveld, voor 5 m onder NAP etc. Voor elke rasterkaart wordt voor elke (x,y)-locatie in alle blokken van alle betrokken modelgebieden een verticale voxel stack geconstrueerd. In de voxel stack wordt de waarde van de eigenschap op de van toepassing zijnde diepte of hoogte afgelezen. Deze waarde wordt de waarde van de rastercel op de (x,y)-locatie in de rasterkaart. Als de verticale voxel stack geen gegevens oplevert, zoals bijvoorbeeld bij 5 m boven NAP in Figuur 5.6.6 en 5.6.7 het geval is, dan heeft de rastercel op de (x,y)-locatie ook geen gegevens ("no data"). Het afleiden van de rasterkaarten is een in Python geïmplementeerde geautomatiseerde processtap en levert rasterkaarten in ArcAscii formaat op.

### **Converteren rasterformaat**

In deze stap worden alle afgeleide rasters geconverteerd naar het ERDAS Imagine formaat. Dit is een rasterformaat dat door veel GIS softwarepakketten, inclusief ArcGIS, gelezen kan worden. Er is gekozen voor ERDAS Imagine in plaats van het eigen rasterformaat van ESRI omdat de laatste hinderlijke beperkingen kent in de lengte van de bestandsnamen. De conversie is geautomatiseerd met een combinatie van Python en ArcGIS.

### **Maken ArcMap documenten (mxd)**

In deze processtap worden de volgende uit te leveren producten aangemaakt:

- ArcMap document waarin het kaartmateriaal verzameld is en is voorzien van legenda's.
- Per diepte of hoogte, in stappen van 50 cm:
  - Rasterkaart met lithoklasse of geologische eenheid (NB: in het ArcMap document worden alleen de rasters in stappen van 1 m getoond, maar in het uitleverbestand zijn alle rasters om de 50 cm aanwezig).
- Algemene, ondersteunende informatie:
  - Eenvoudige topografische kaart van Nederland (shapefile, polygoon).
  - Grenzen van de GeoTOP modelgebieden (shapefile, polygoon).
  - Maaiveld- en waterbodemoogtekaart (raster).
  - Overzicht van de topografische kaartbladen waarop de nummering van de boormonsterprofielen gebaseerd is (shapefile, polygoon).

De horizontale doorsneden door GeoTOP hebben bestandsnamen die als volgt zijn opgebouwd:

- Horizontale doorsneden ten opzichte van maaiveld: de naam bestaat uit een prefix "strat" (geologische eenheden) of "lith" (lithoklassen) gevolgd door een diepte-aanduiding in cm onder maaiveld (4 cijfers). Bijvoorbeeld strat\_0000\_mv.img wil zeggen een doorsnede door de modeleenheden van 0 tot 0,5 m onder maaiveld. Het daaropvolgende raster strat\_0050\_mv.img geeft een doorsnede van 0,5 tot 1 m onder maaiveld.
- Horizontale doorsneden ten opzichte van NAP: de naam bestaat uit een prefix "strat" (geologische eenheden) of "lith" (lithoklassen) gevolgd door een volgnummer van drie cijfers en de hoogte-aanduiding in cm ten opzichte van NAP (vier cijfers). Volgnummer 001 is de laagst gelegen doorsnede op 50 m onder NAP met een bereik van 50 tot 49,5 m onder NAP. De naam

wordt dan lith\_001\_5000\_cm\_onder\_nap.img. Een voorbeeld van een doorsnede boven NAP is lith\_103\_0100\_cm\_boven\_nap.img, met een bereik van 1 tot 1,5 m boven NAP.

Het maken van de ArcMap documenten is een handmatige processtap.

#### 5.6.5 *Samenstellen CSV-bestanden met het voxelmodel*

Bij de export van de voxeldata uit Isatis® (paragraaf 5.5.17) ontstaan CSV-bestanden per blok van het modelgebied met een dataregel (record) per voxel met de volgende attributen:

- De locatie (x,y,z) van het middelpunt van de voxel;
- De geologische eenheid waartoe de voxel behoort (afgeleid uit het lagenmodel);
- De meest waarschijnlijke lithoklasse die representatief is voor de voxel als geheel;
- De kansen op de verschillende lithoklassen waarmee de voxel gevuld kan 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.

Per blok van een modelgebied is er een bestand in CSV-formaat dat bijvoorbeeld in Excel of in Notepad++ geopend kan worden. De bestanden zijn echter vooral bedoeld als input voor programmatuur en lenen zich door de sortering goed voor bijvoorbeeld geautomatiseerde verticale voxel-stack analyses.

Elk bestand heeft 1 kopregel en een groot aantal dataregels. Elke dataregel bevat de attributen van één voxel. De attribuutwaarden zijn van elkaar gescheiden door een komma. De sortering is zodanig ingesteld dat de z-waarde het snelst verandert, dan de y-waarde en tot slot de x-waarde. Zowel x als y en z zijn oplopend gesorteerd (x van west naar oost; y van zuid naar noord en z van laag (diep) naar hoog (ondiep)).

Er wordt linksonder in het blok begonnen met de voxel die voor alle coördinaten de laagste waarde binnen in het blok heeft. Vervolgens volgen voor de (x,y)-coördinaat van deze voxel alle z-waarden van beneden naar boven. Na de laatste z-waarde (de voxel die aan maaiveld ligt) wordt de y-coördinaat met 100 m verhoogt en volgen de z-waarden van de nieuwe (x,y)-coördinaat.

#### 5.6.6 *Samenstellen ZIP-bestand*

Alle in de voorgaande paragrafen beschreven Excel, ArcGIS en CSV-gegevens wordt opgenomen in één ZIP-bestand. Aan dit zipbestand wordt tevens nog een aantal documenten toegevoegd waaronder dit Totstandkomingsrapport.

In de naamgeving van het ZIP-bestand is het doel, de modelnaam en de versieaanduiding (LV\_BRO\_GeoTOP\_v02r0.zip) verwerkt. Hierdoor is altijd te herkennen met welk model en welke versie gewerkt wordt.

De laatste stap is het aanbieden van het ZIP-bestand aan de *Landelijke Voorziening*. Deze is er voor verantwoordelijk dat het BRO GeoTOP model in registratie wordt genomen waarna het model via DINOloket en PDOK voor de gebruiker beschikbaar komt.

## 6 Literaturopgave

Bos, I.J., 2010. Distal delta-plain successions. Architecture and lithofacies of lake fills and organics in the Holocene Rhine-Meuse delta, The Netherlands. Ph.D. thesis Utrecht University, 208 p.

Bosch, J.H.A., 2000. Standaard Boor Beschrijvingsmethode, Versie 5.1. NITG-TNO Rapport 00-141-A, 106 p. Beschikbaar op: <https://www.grondwatertools.nl/boringen>

Chilès, J.-P. & Delfiner, P., 2012. Geostatistics – Modeling Spatial Uncertainty. Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 699 p.

De Mulder, E.F.J., Geluk, M.C., Ritsema, I., Westerhoff, W.E. & Wong, T.E., 2003. De Ondergrond van Nederland. Geologie van Nederland, deel 7. Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO, Utrecht. 379 p.

Doppert, J.W.Chr., Ruegg, G.H.J., Van Staalduinen, C.J., Zagwijn, W.H. &

Goovaerts, P., 1997. Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Oxford University Press, New York, 483 p.

Griede, J.W., 1978. Het ontstaan van Frieslands Noordhoek. Een fysisch-geografisch onderzoek naar de holocene ontwikkeling van een zeeleigebied. Proefschrift VU Amsterdam, 186 p.

Gunnink, J.L., Maljers, D., Van Gessel, S.F., Menkovic, A. & Hummelman, H.J., 2013. Digital Geological Model (DGM): a 3D raster model of the subsurface of the Netherlands. Netherlands Journal of Geosciences 92, p.33-46. Beschikbaar op DINOloket: <https://www.dinoloket.nl/meer-weten-over-dgm>

Maljers, D., Stafleu, J., Van der Meulen, M.J. and Dambrink, R.M., 2015. Advances in constructing regional geological voxel models, illustrated by their application in aggregate resource assessments. Netherlands Journal of Geosciences 94, 257-270.

Shannon, E.C., 1948. A mathematical theory of communication. Bell System Technical Journal 27, p. 379-423.

Soares, A., 1992. Geostatistical estimation of multi-phase structure. Mathematical Geology 24 (2), p.149-160.

Stafleu, J., Maljers, D., Busschers, F.S., Gunnink, J.L., Schokker, J., Dambrink, R.M., Hummelman, H.J., Schijf, M.L., 2012. GeoTOP modellering (in Dutch). TNO Report 2012 R10991, 216 p. Beschikbaar op DINOloket: <https://www.dinoloket.nl/meer-weten>

Stafleu, J., Maljers, D., Gunnink, J.L., Menkovic, A. & Busschers, F.S., 2011. 3D modeling of the shallow subsurface of Zeeland, the Netherlands. Netherlands Journal of Geosciences 90, p.293-310. Beschikbaar op DINOloket: <https://www.dinoloket.nl/meer-weten>

TNO, 2013. Lithostratigrafische Nomenclator van de Ondiepe Ondergrond, versie 2013. Beschikbaar op DINOloket: <https://www.dinoloket.nl/nomenclator-ondiep>.

Van der Meulen, M.J., Van Gessel, S.F. & Veldkamp, J.G., 2005. Aggregate resources in the Netherlands. *Netherlands Journal of Geosciences*, 84(3), p.397-387.

Vernes, R.W. and Van Doorn, Th. H. M., 2005. Van Gidslaag naar Hydrogeologische Eenheid – Toelichting op de totstandkoming van de dataset REGIS II. Netherlands Institute of Applied Geosciences TNO, Report 05-038-B, 105 p. Beschikbaar op DINOloket: <https://www.dinoloket.nl/meer-weten-over-regis-ii>

Vos, P.C., Bazelmans, J., Weerts, H.J.T. & Van der Meulen (red.), 2011. Atlas van Nederland in het Holoceen. Amsterdam, 94 p.

Wellmann, J.F. & Regenauer-Lieb, K., 2012. Uncertainties have a meaning: Information entropy as a quality measure for 3-D geological models. *Tectonophysics* 526–529, p. 207–216.

Weerts, H.J.T., Cleveringa, P., Ebbing, J.H.J., De Lang, F.D. & Westerhoff, W.E. (2000) De lithostratigrafische indeling van Nederland – Formaties uit het Tertiair en Kwartair. TNO-rapport NITG-00-95-A, 38 p.




## 7 Ondertekening

Utrecht, december 2019

TNO

Naam en paraaf tweede lezer



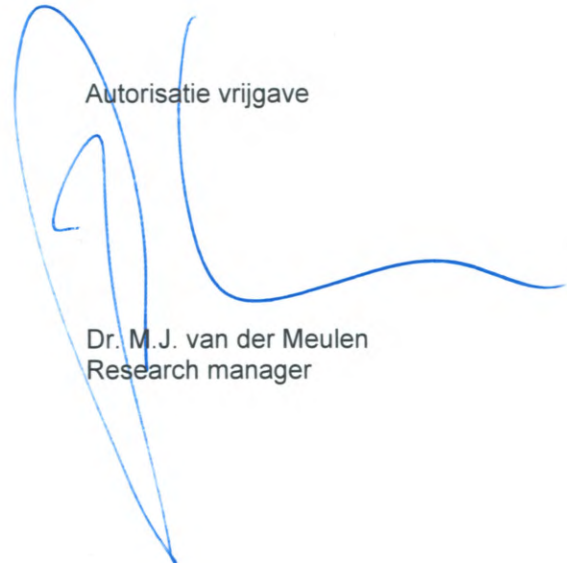
Drs. D. Maljers

Ondertekening



Dr. J. Stafleu  
Auteur

Autorisatie vrijgave



Dr. M.J. van der Meulen  
Research manager