

**Geologische Dienst Nederland**Princetonlaan 6  
3584 CB Utrecht  
Postbus 80015  
3508 TA Utrecht[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

T +31 88 866 42 56

**TNO-rapport****TNO 2020 R10758****Totstandkomingsrapport GeoTOP - met  
nieuwe methodiek lagenmodellering**

Datum	8 mei 2020
Auteur(s)	Jan Stafleu Jan Hummelman Renée de Bruijn Kay Koster Jelte Stam Denise Maljers Jeroen Schokker
Aantal pagina's	157
Aantal bijlagen	-
Opdrachtgever	De directeur Geologische Dienst Nederland
Projectnaam	GIP Ondiepe Kartering 2020
Projectnummer	060.43296

Alle rechten voorbehouden.

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

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

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

© 2020 TNO

# Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding .....</b>	<b>4</b>
1.1	Doel van het rapport .....	4
1.2	Leeswijzer .....	4
1.3	Gerelateerde documenten .....	5
1.4	Modellen in de Basisregistratie Ondergrond .....	5
<b>2</b>	<b>Algemene beschrijving van het model .....</b>	<b>7</b>
2.1	Het model GeoTOP .....	7
2.2	Dekkingsgebied en modelgebieden .....	10
2.3	Modelonzekerheden .....	12
2.4	Doel, gebruik en beperkingen.....	15
<b>3</b>	<b>Uitgangspunten en randvoorwaarden, richtlijnen en standaarden.....</b>	<b>18</b>
3.1	Uitgangspunten en randvoorwaarden .....	18
3.2	Richtlijnen en standaarden .....	19
3.3	Software.....	19
<b>4</b>	<b>Brongegevens.....</b>	<b>21</b>
4.1	Inleiding .....	21
4.2	Boorbeschrijvingen DINO .....	21
4.3	Geologische Kaart van de Ondiepe Ondergrond .....	27
4.4	Digitaal Geologisch Model (DGM) .....	30
4.5	H3O – De Kempen .....	35
4.6	Hydrogeologisch Model (REGIS II) .....	36
4.7	Breuken .....	37
4.8	Actueel Hoogtebestand Nederland.....	38
4.9	Maaiveld- en waterbodemoogten .....	40
4.10	Diepste bathymetrie van de Waddenzee .....	41
4.11	Bodemkaart van Nederland (BKN) .....	41
4.12	Geomorfologische Kaart van Nederland (GKN) .....	42
4.13	Landelijk Grondgebruik Nederland .....	42
4.14	Autosnelwegen Nederland .....	44
4.15	Primaire waterkeringen.....	45
4.16	Veencontourkaart en verdwenen veen.....	46
4.17	Veenkartering Mariapeel en Deurnsche Peel.....	47
4.18	Digitaal Basisbestand Paleogeografie van de Rijn-Maas Delta .....	47
4.19	Digitaal Basisbestand Paleogeografie van het Maasdal .....	48
4.20	Topografische kaart .....	48
4.21	Luchtfoto's .....	49
4.22	Lithostratigrafische Nomenclator Ondiepe Ondergrond .....	50
<b>5</b>	<b>Procesbeschrijving algemeen.....</b>	<b>52</b>
5.1	Inleiding .....	52
5.2	Datavoorbereiding automatisch te interpreteren eenheden .....	57
5.3	Interpretatie automatisch te interpreteren eenheden .....	71
5.4	Lagenmodellering .....	81
5.5	Voxelmodellering .....	102
5.6	Publicatie .....	140

<b>6</b>	<b>Literatuuropgave .....</b>	<b>154</b>
<b>7</b>	<b>Ondertekening .....</b>	<b>157</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Doel van het rapport

Dit rapport geeft een gedetailleerde beschrijving van de totstandkoming van het GeoTOP model: het beschrijft wat GeoTOP is, op welke brongegevens het is gebaseerd en hoe het gemaakt wordt. Het rapport gaat daarbij uit van het modelgebied *Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg*, waarin voor het eerst een nieuwe, met het ondergrondmodel DGM geïntegreerde methodiek voor de lagenmodellering is gebruikt (DGM+).

Voor de totstandkoming van de zeven modelgebieden die vóór *Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg* zijn gemaakt wordt verwezen naar TNO-rapport *R11655 Totstandkomingsrapport GeoTOP* (Stafleu et al., 2019). Hierin worden twee van de zeven modelgebieden (*Westelijke Wadden* en *Oostelijke Wadden*) beschreven die het voor de BRO ontwikkelde kwaliteitstoetsingsproces hebben doorlopen. Op hoofdlijnen is de totstandkoming van de vijf overige modelgebieden, die dit kwaliteitstoetsingsproces niet hebben doorlopen, gelijk aan die van *Westelijke Wadden* en *Oostelijke Wadden*.

Zie ook Tabel 1.4.1 voor een overzicht van de modelgebieden en de bijbehorende documentatie.

Tabel 1.4.1: Totstandkomingsrapporten en GeoTOP modelgebieden.

Rapport	Betreft modelgebied	BRO kwaliteitsregime
Dit rapport	Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg	Ja
R11655 Totstandkomingsrapport GeoTOP	Westelijke Wadden	Ja
	Oostelijke Wadden	Ja
Geen rapport, maar de totstandkoming is op hoofdlijnen gelijk aan <i>Westelijke Wadden</i> en <i>Oostelijke Wadden</i>	Zeeland	Nee
	Goeree-Overflakkee	Nee
	Zuid-Holland	Nee
	Noord-Holland	Nee
	Rivierengebied	Nee

## 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. Verder worden in hoofdstuk 2 de modelonzekerheden in GeoTOP behandeld en doel, gebruik en beperkingen van het model.

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*. De nieuwe, met het ondergrondmodel DGM geïntegreerde methodiek voor de lagenmodellering heeft geen gevolgen voor de Gegevenscatalogus. De Gegevenscatalogus heeft dus betrekking op alle modelgebieden van GeoTOP.

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. Het *Totstandkomingsrapport GeoTOP* (Stafleu et al., 2019) kan ook als een voorloper van dit rapport gezien worden, zie ook Tabel 1.4.1 hierboven.

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 (Hummelman et al, 2019a; Gunnink et al., 2013), REGIS II (Hummelman et al., 2019b; 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 1.4.2).

Tabel 1.4.2: 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 schaal 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.

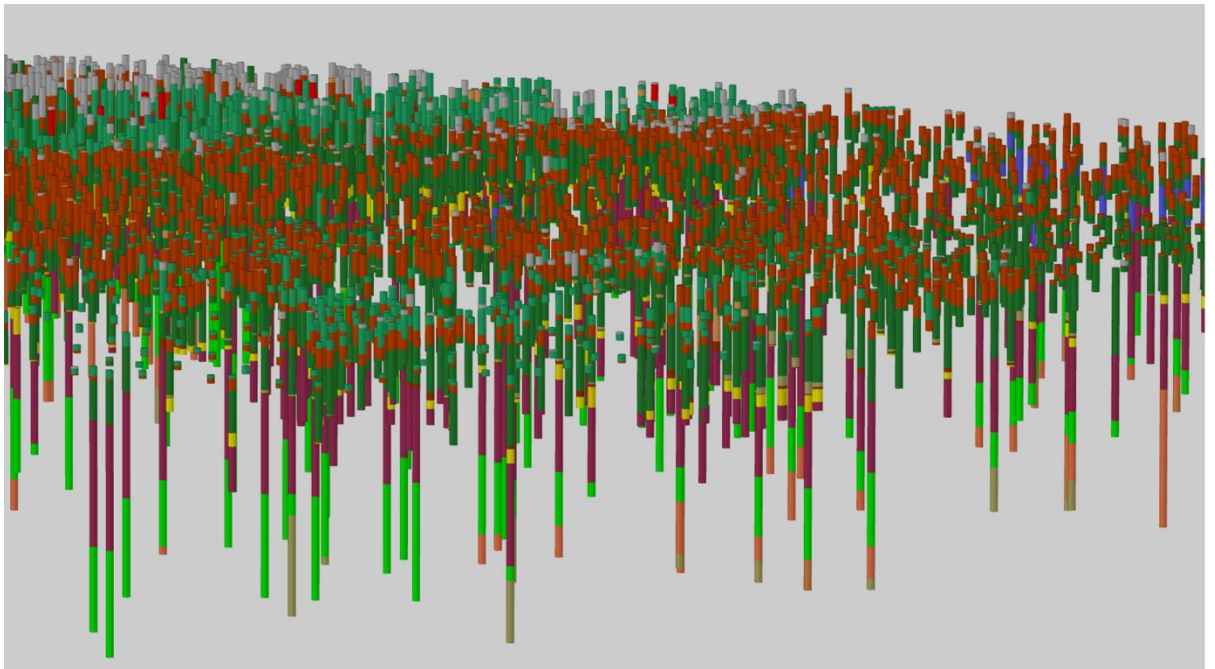
- Lithologische kenmerken worden in GeoTOP weergegeven door middel van **lithoklassen**, waarin lithologie (grondsoort) en zandkorrelgrootteklassen zijn gecombineerd in één classificatie.

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

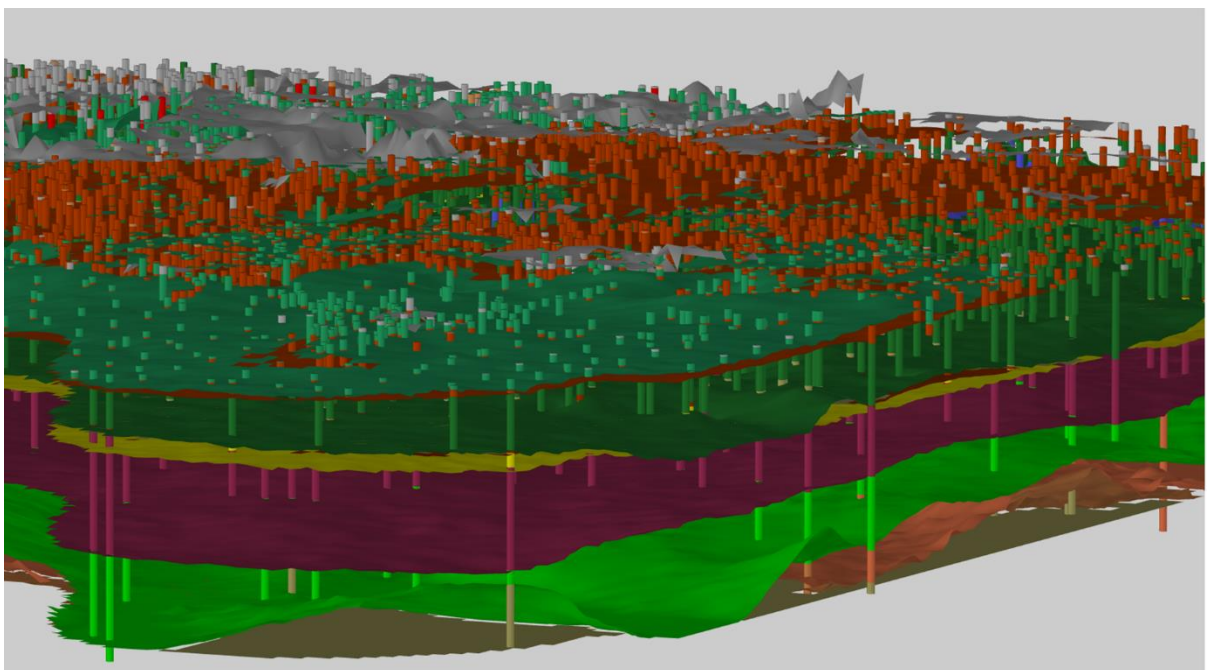
- De interpretatie van de boormonsterbeschrijvingen in **geologische eenheden** en in **lithoklassen**. Elke boormonsterbeschrijving is onderverdeeld in intervallen van gelijke geologische eenheid. Daarbinnen zijn de intervallen verder opgedeeld in intervallen van een gelijke lithoklasse.
- **Breuken**. 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.

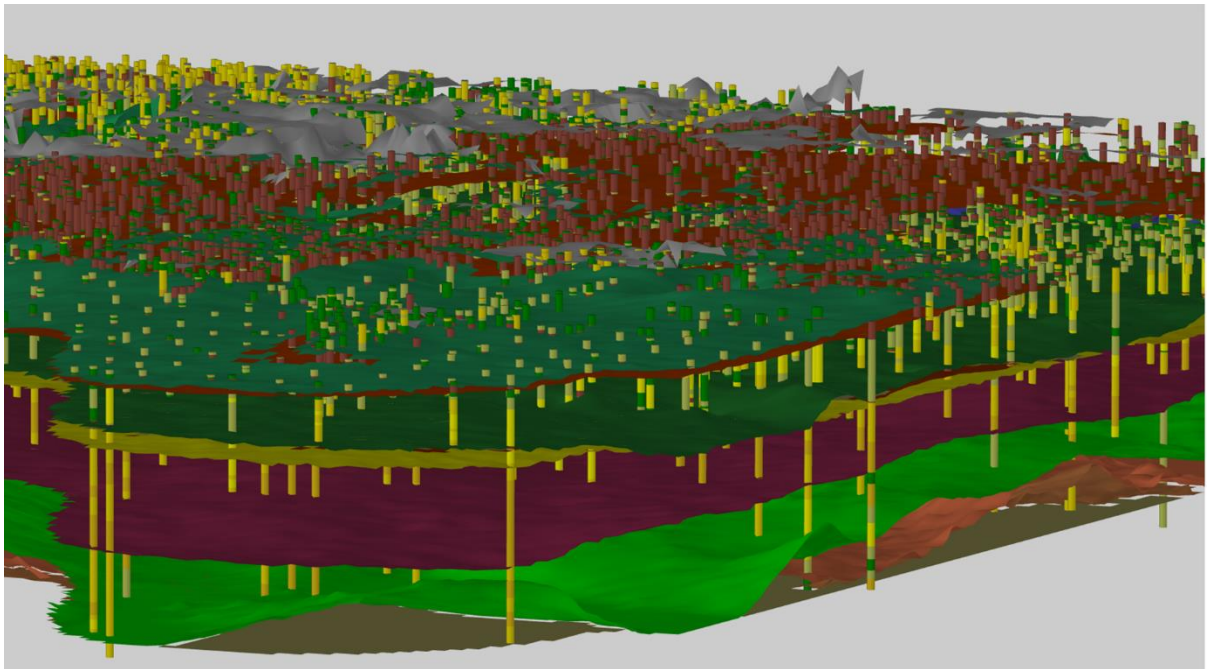




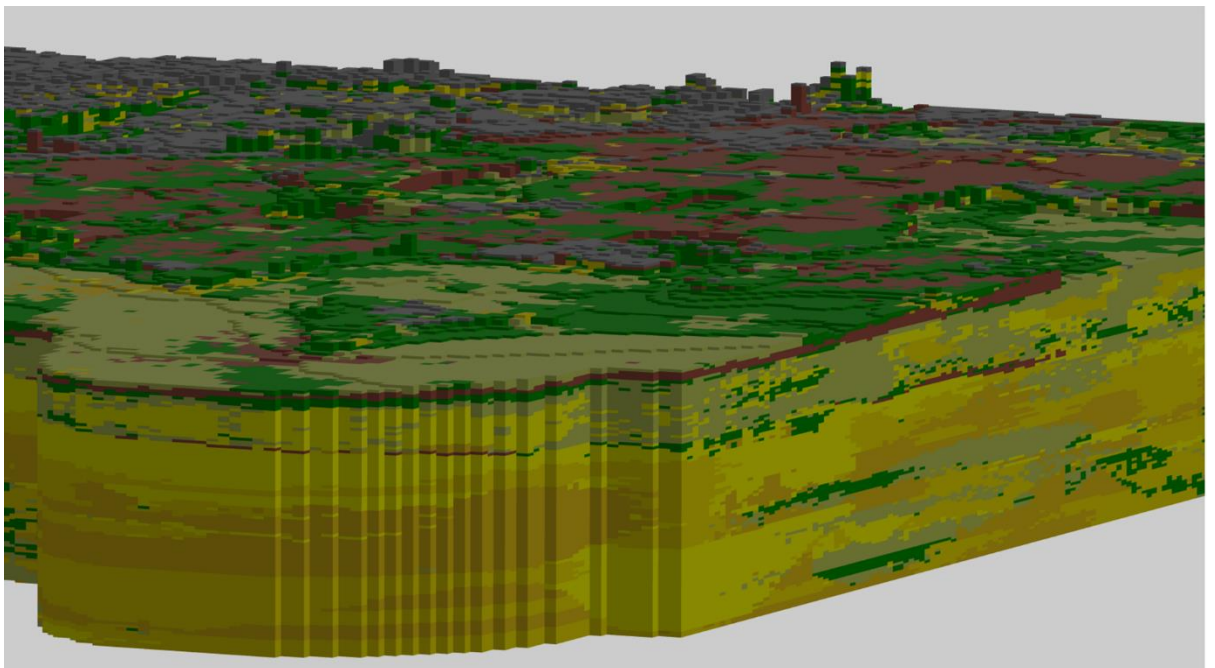
Figuur 2.1.1: 3D weergave van boormonsterbeschrijvingen waarbij de kleuren verschillende geologische eenheden weergeven.



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.

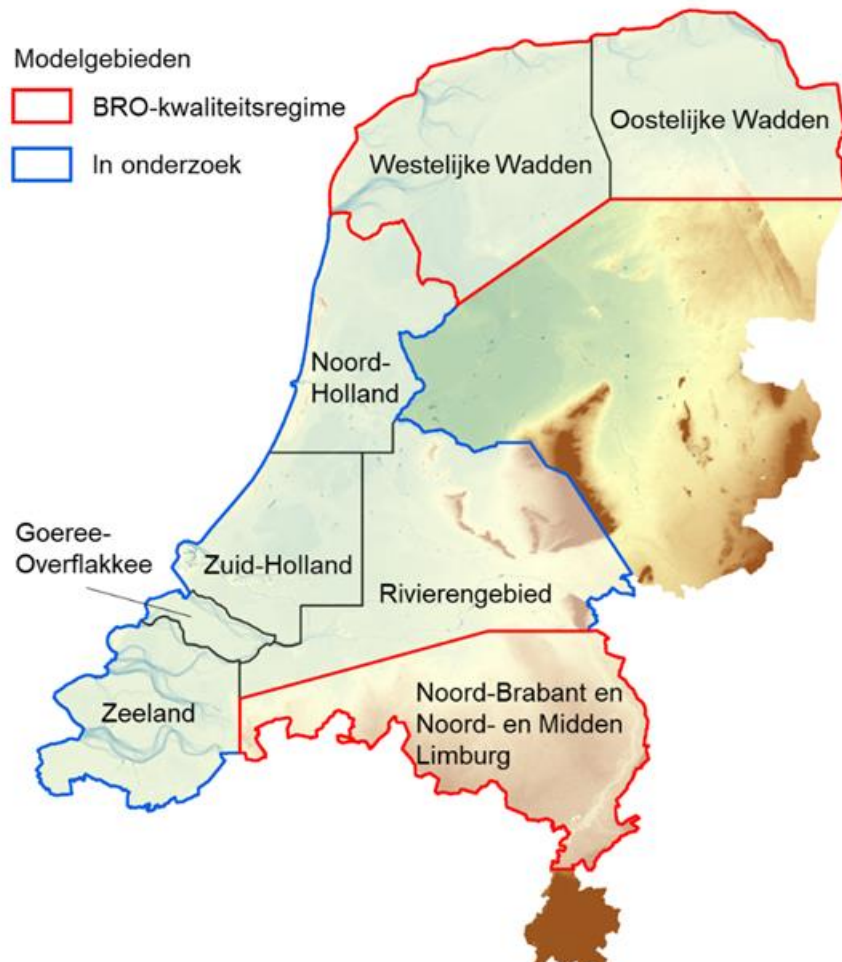


Figuur 2.1.4: 3D weergave van een voxelmodel waarbij de kleuren van de voxels de lithoklasse weergeven. De lithoklasse indeling in de voxels is het resultaat van een ruimtelijke interpolatie van de lithoklassen in de geïnterpreteerde boormonsterbeschrijvingen binnen de verschillende geologische eenheden.

## 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. GeoTOP bestrijkt momenteel circa 70% van het vasteland van Nederland verdeeld over acht modelgebieden (Figuur 2.2.1). Van deze

modelgebieden hebben er drie het voor de BRO ontwikkelde kwaliteitstoetsingsproces doorlopen. Dit zijn in het noorden de modelgebieden *Westelijke Wadden* en *Oostelijke Wadden*, en in het zuiden *Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg*. Deze drie gebieden beslaan samen circa 36% van Nederland. Voor bestuursorganen geldt voor deze modelgebieden verplicht gebruik en een terugmeldingsplicht. De overige vijf modelgebieden hebben het voor de BRO ontwikkelde 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 komende jaren zullen de 'historische' modelgebieden worden verbeterd en alsnog aan het voor de BRO ontwikkelde kwaliteitstoetsingsproces 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 acht modelgebieden van GeoTOP v1.4 (stand april 2020) waarvan er drie, namelijk Westelijke Wadden, Oostelijke Wadden en Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg, het voor de BRO ontwikkelde kwaliteitstoetsing-proces hebben doorlopen. De kleuren geven de hoogteligging van maaiveld en waterbodembodem 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 v1.4 in acht modelgebieden.

Model	Versie	Modelgebied	Versie	Jaar van oplevering	BRO-kwaliteitsregime?
GeoTOP	v1.4	Westelijke Wadden	v1.0	2014	Ja
		Oostelijke Wadden	v1.0	2016	Ja
		Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg	v1.0	2020	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

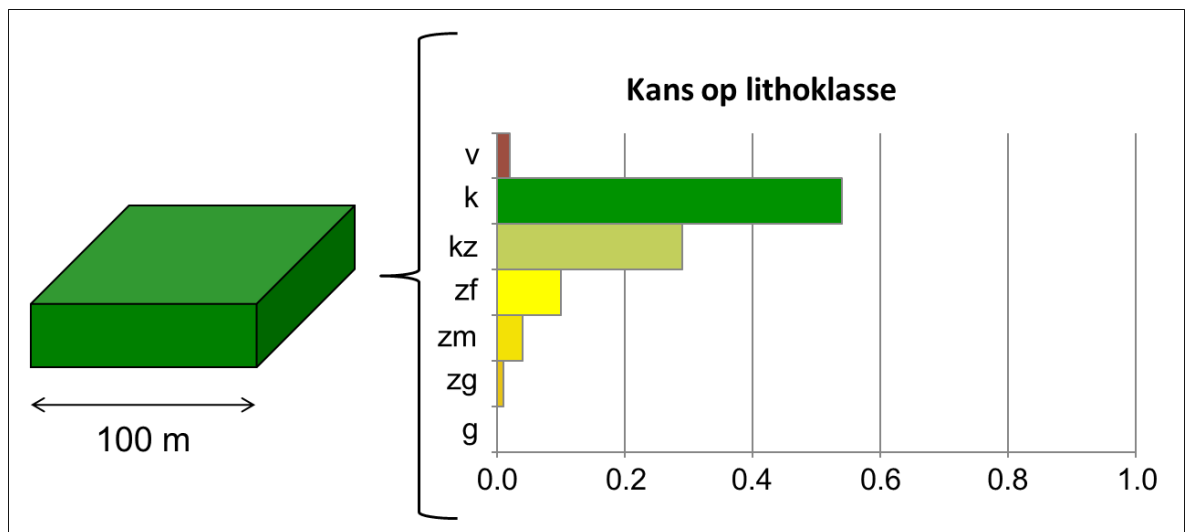
gemodelleerde top en basis van de geologische eenheid. Met de standaarddeviatie is het mogelijk om de kans te bepalen dat de diepteligging van de top of basis een bepaalde afwijking vertoont van de door het model geschatte meest waarschijnlijke waarde. De manier waarop de standaarddeviatie berekend wordt 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 16% zijn (als de overige zes lithoklassen bijvoorbeeld elk een percentage van 14% hebben). 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, midden 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 DINOket 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) of voorgangers daarvan 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.broloket.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.

<b>Software</b>	<b>Versie</b>	<b>O.a. gebruikt voor</b>
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	10.6.1	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	v4.4	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

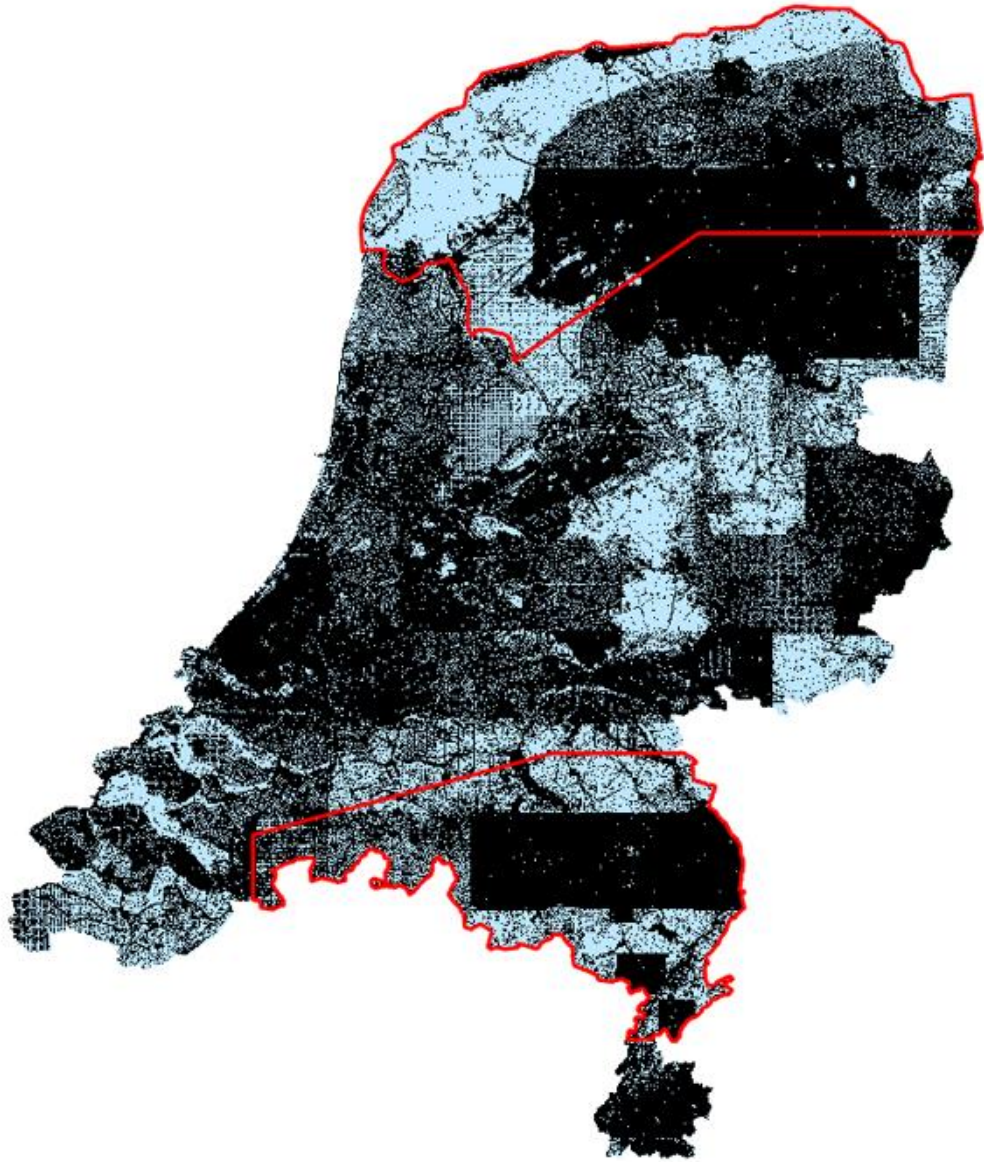
In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de brongegevens die bij het maken van GeoTOP gebruikt worden. Het betreft brongegevens die een landelijke of regionale dekking hebben. Voorbeelden zijn de Bodemkaart van Nederland (BKN) 1:50.000 (landelijke dekking) en het digitale basisbestand paleogeografie 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 zeekeigebied 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 hoofdstuk 5.

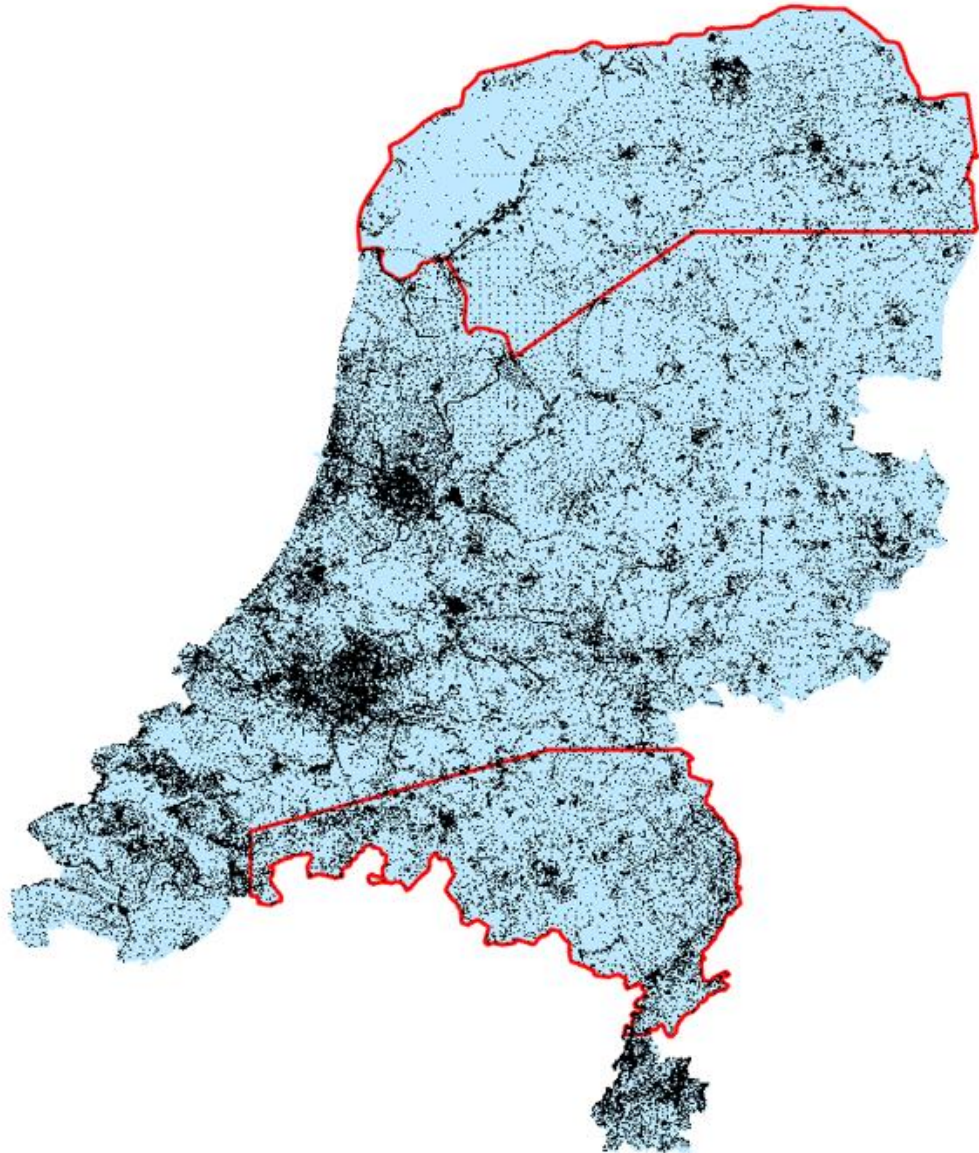
### 4.2 Boorbeschrijvingen DINO

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)).

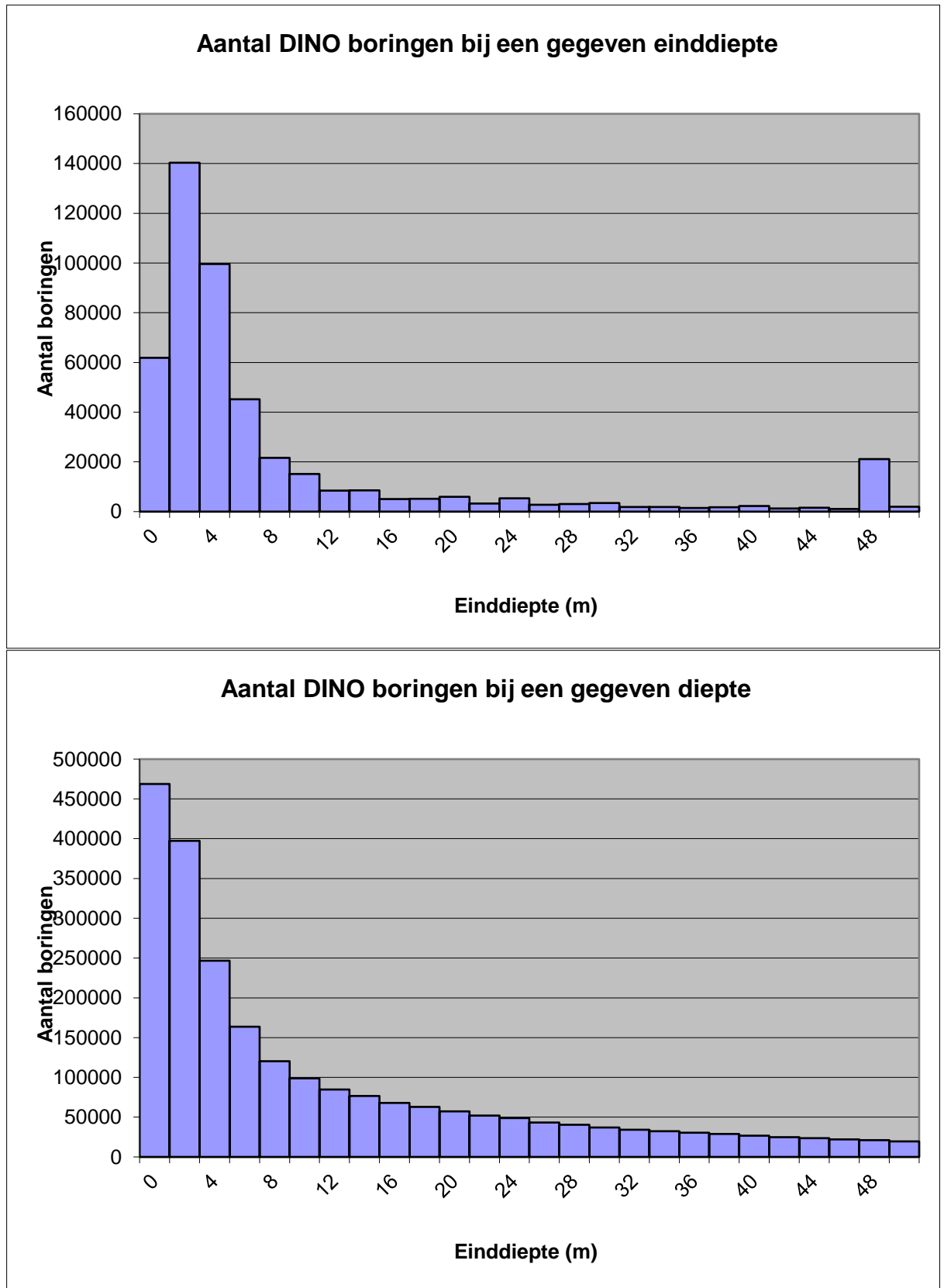
Omdat de boorbeschrijvingen in DINO een gestandaardiseerde coderingsmethode volgen (Bosch, 2000), is het mogelijk om op geautomatiseerde wijze grote hoeveelheden boorbeschrijvingen te analyseren en interpreteren. De dataset omvat zowel handboringen (5 – 10 m diep) als mechanisch uitgevoerde boringen (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.

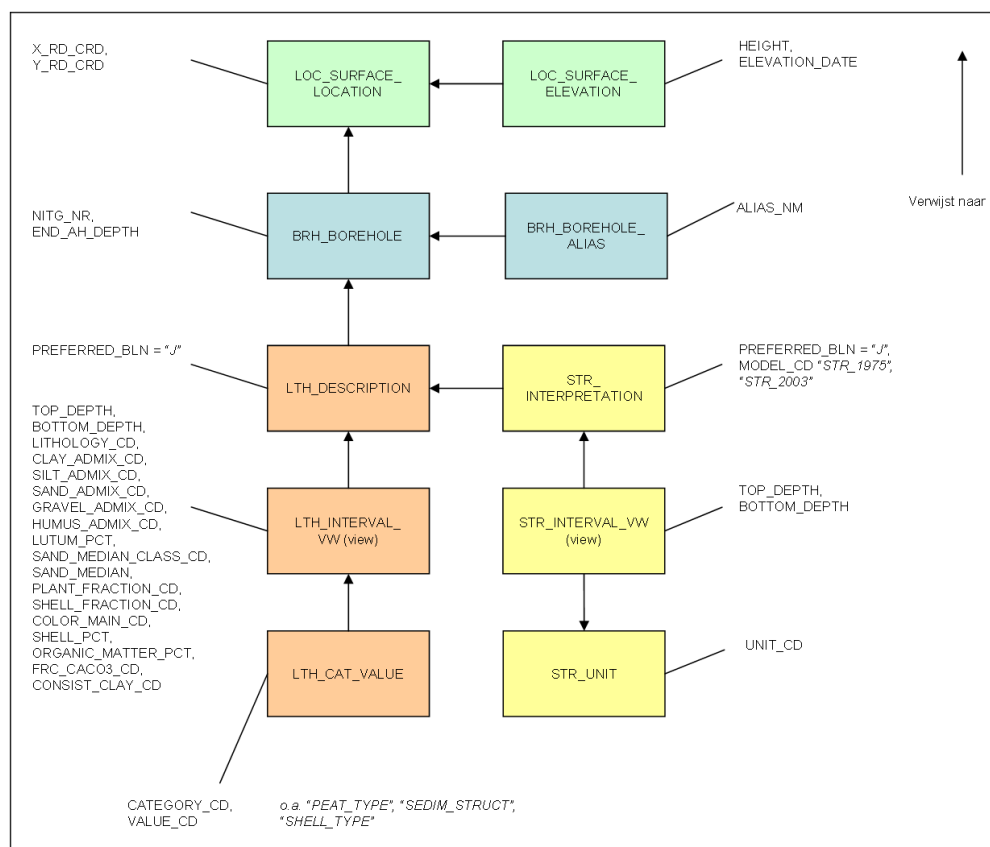


4.2.1 *Vertrouwelijke boringen*

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 <i>Boring</i>	NITG_NR	Boornummer
	END_AH_DEPTH	Einddiepte
BRH_BOREHOLE_ALIAS <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 in het kader van de 1:50.000 kartering door

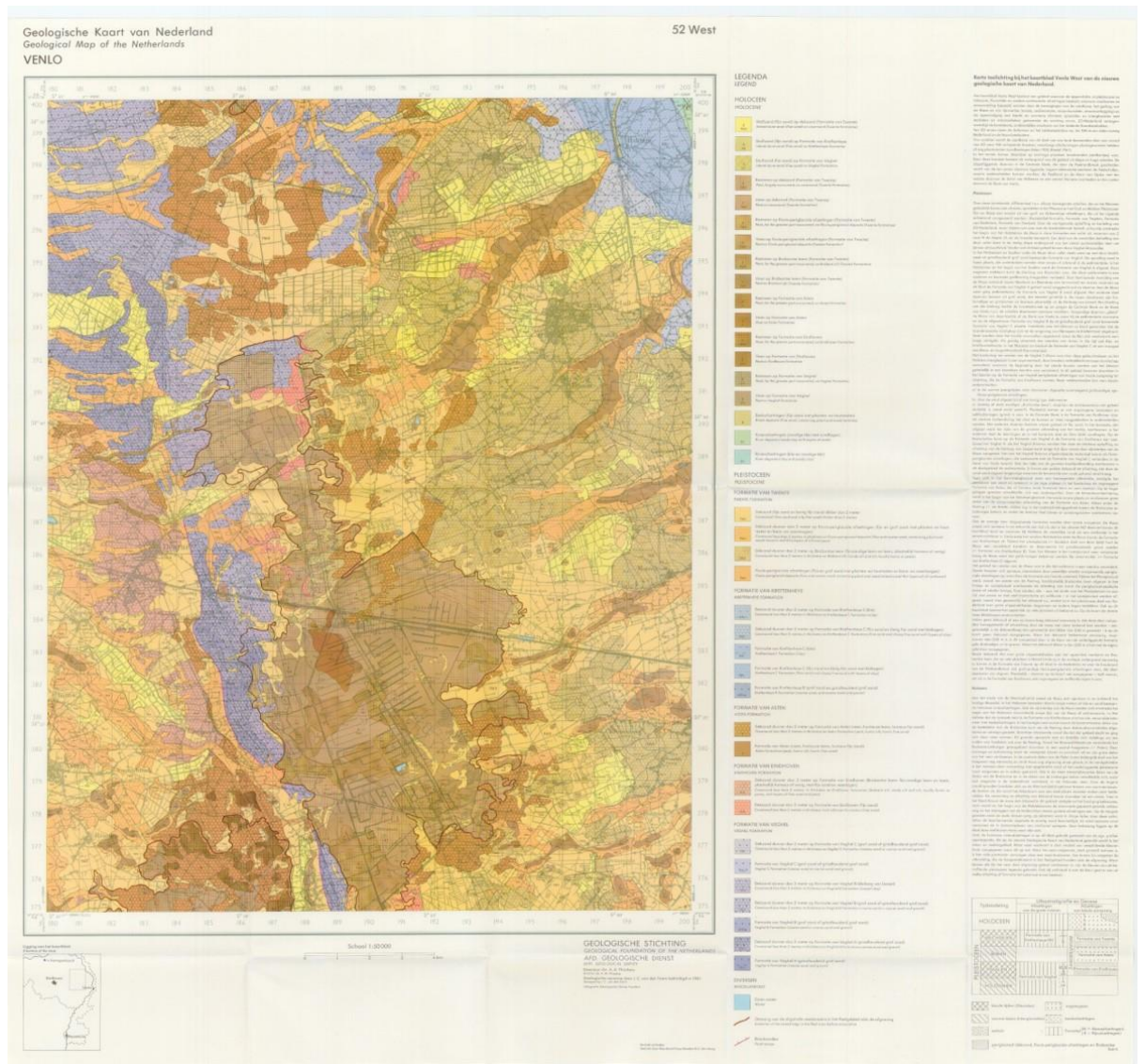
Entiteit	Attribuut	Toelichting
		geschoold personeel gezette ondiepe handboring van de RGD betreft.
LOC_SURFACE_ LOCATION <i>Locatie</i>	X_RD_CRD	x-coördinaat in Rijksdriehoekstelsel
	Y_RD_CRD	y-coördinaat in Rijksdriehoekstelsel
LOC_SURFACE_ ELEVATION <i>Hoogte</i>	HEIGHT	Hoogte, gemeten ten opzichte 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 <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 (view) <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	CATEGORY_CD	De categorieën: <ul style="list-style-type: none"> <li>• PLANT_TYPE</li> <li>• PEAT_TYPE</li> </ul>

Entiteit	Attribuut	Toelichting
<i>Categorie waarden. Bij elk interval kan voor een of meerdere categorieën een aantal waarden worden 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>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• ORGMAT_ADMIX_TYPE</li> <li>• BIOGEN_ADMIX_TYPE</li> <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 <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 <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 <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

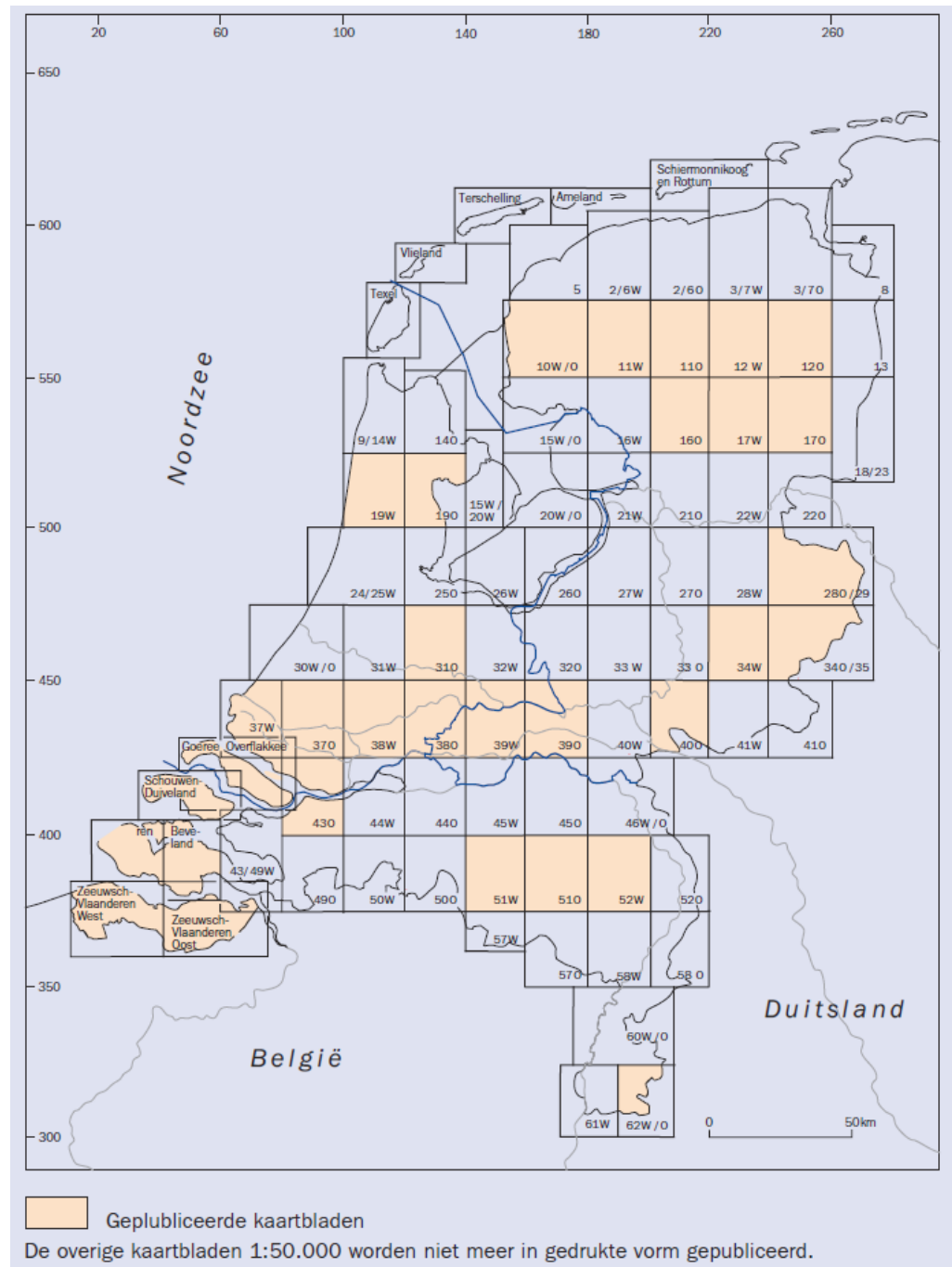
De Geologische Kaart van de Ondiepe Ondergrond van Nederland, schaal 1:50.000, is de gepubliceerde neerslag van de inventarisatie van de ondergrond (tot ongeveer 500 m diepte), uitgevoerd ten behoeve van een verantwoord gebruik van de ondergrond en de ondergrondse natuurlijke bestaansbronnen. De nadruk 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 "Veen op dekzand (V TW3)" is een legenda-eenheid op kaartblad 52 West, Venlo (Figuur 4.3.1).

Bij elk kaartblad horen één of meer bladen met bijkarten en profielen. Op de bijkarten 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 52 West, Venlo.



Figuur 4.3.1: Hoofdkaart van kaartblad 52 West, Venlo (papierene versie; GeoTOP gebruikt een door TNO gescande 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.

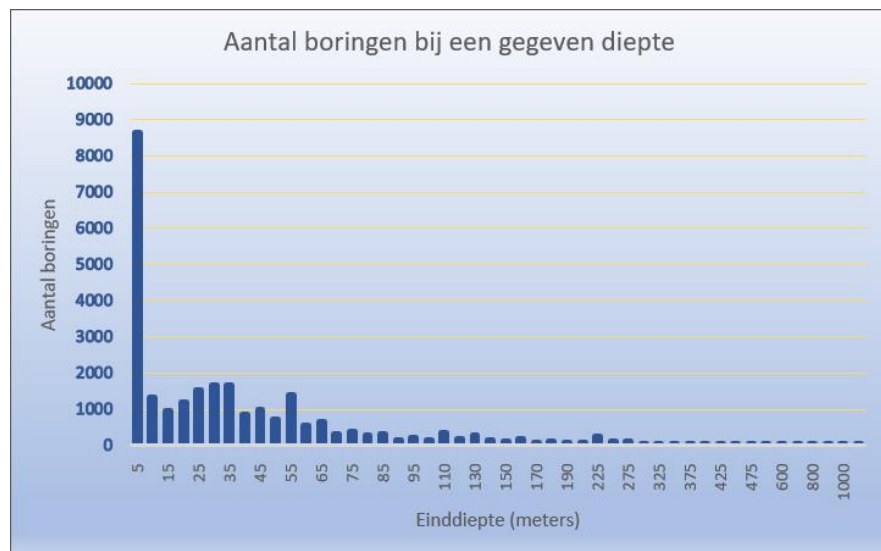
<b>Naam</b>	<b>Jaar van publicatie</b>
Sneek (10W, 10O)	1976
Heerenveen West (11W) en Heerenveen Oost (11O)	1987
Assen West (12W) en Assen Oost (12O)	1990
Steenwijk oost (16O)	1978
Emmen West (17W) en Emmen Oost (17O)	1979
Alkmaar West (19W) en Alkmaar oost (19O)	1987
Almelo Oost (28O) en Denekamp (29)	1993
Utrecht Oost (31O)	1988
Enschede West, Enschede 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 Digitaal Geologisch Model (DGM)

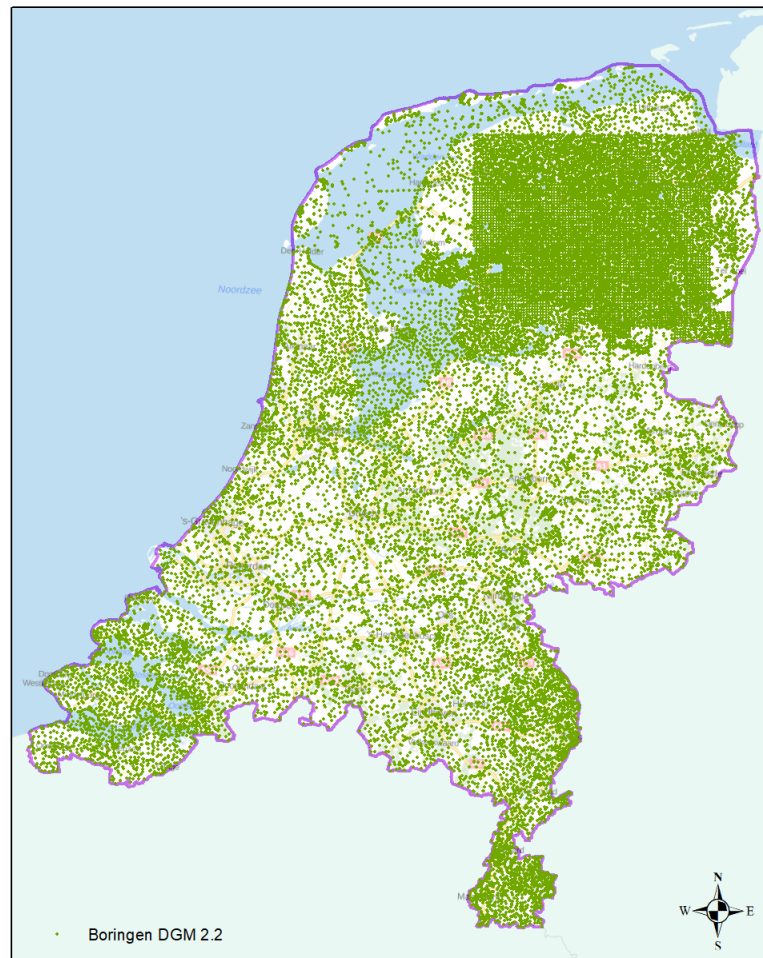
Het BRO ondergrondmodel Digitaal Geologisch Model (DGM) is een landsdekkend lagenmodel waarin de geometrie van de geologische eenheden wordt weergegeven tot een diepte van ongeveer 500 m met in de Roerdalslenk een maximale diepte van circa 1200 m (Hummelman et al., 2019a; Gunnink et al., 2013). De onderscheiden 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 ten opzichte van 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.



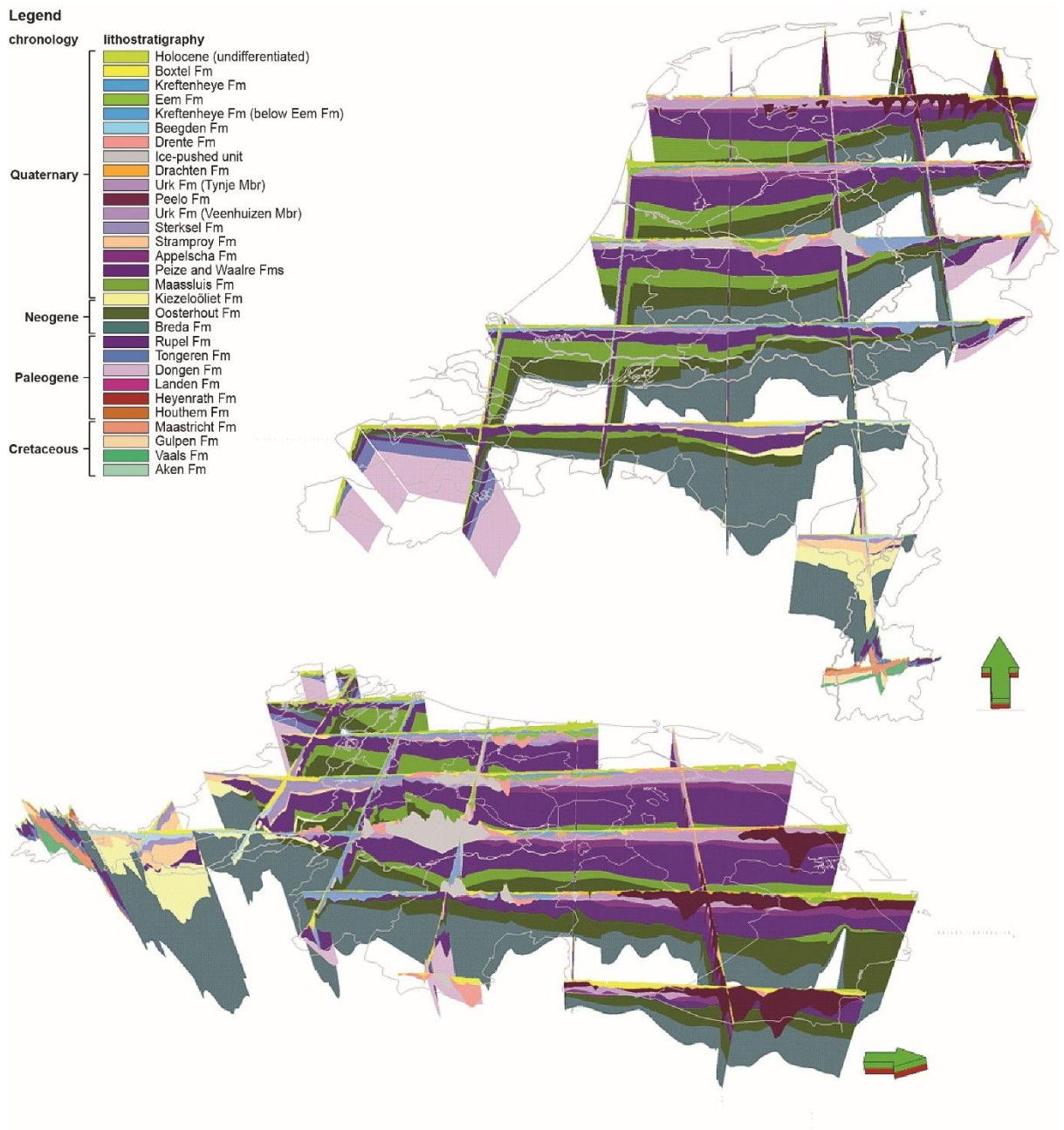
Figuur 4.4.1: Histogram van het aantal boringen bij een gegeven einddiepte onder maaiveld. N = 26.376; interval 5 m.



Figuur 4.4.2: Overzicht boringen set (N= 26.3767). In totaal bevatte DINO eind 2018 469.161 boringen.

Figuur 4.4.3 geeft een beeld van DGM.

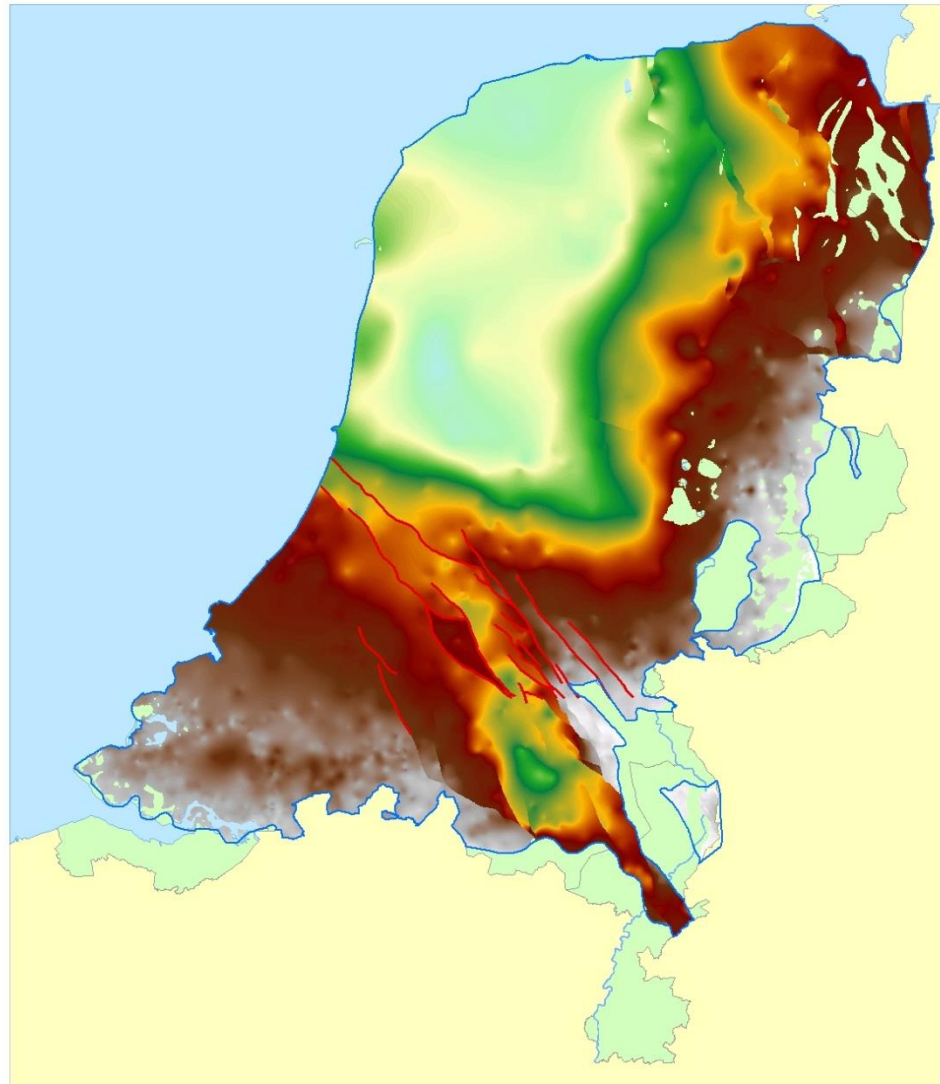




Figuur 4.4.3: Verticale doorsneden door DGM, kijkend naar het noorden (bovenste figuur) en kijkend naar het westen (onderste figuur). De figuren tonen de opvulling van het Noordzeebekken in het midden en westen van Nederland (formaties van Breda, Oosterhout en Maassluis) en de ondiepere rand van het 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 modelgebieden *Westelijke Wadden* en *Oostelijke Wadden* en de vijf oudere modelgebieden wordt een deel van het lagenmodel (de set van rasters van top en basis van de geologische eenheden) van DGM gebruikt als trendvlak in de modellering en als referentievlak in de geautomatiseerde interpretatie van boorbeschrijvingen. 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.



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.

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.

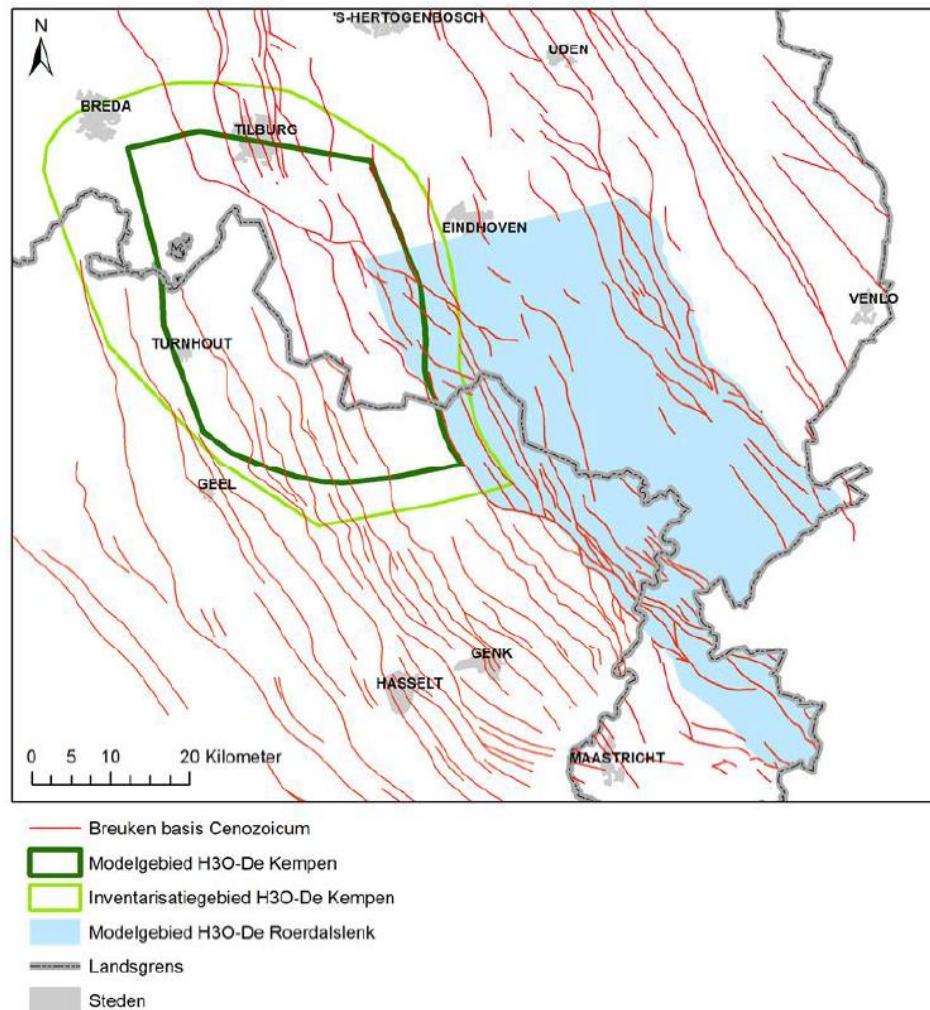
Bij de modellering van modelgebied *Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg* wordt niet langer gebruik gemaakt van DGM als op zichzelf staand product. De werkprocessen datavoorbereiding, interpretatie en lagenmodellering van DGM en

GeoTOP zijn geïntegreerd in het werkproces DGM+ (zie hoofdstuk 5). Voor modelgebied *Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg* geldt wel dat de selectieset met handmatig geïnterpreteerde boorbeschrijvingen grotendeels is overgenomen van die van DGM v2.2 (Hummelman et al., 2019a). De interpretaties van de boorbeschrijvingen in de selectieset zijn in het projectgebied van H3O – De Kempen (zie de volgende paragraaf) waar nodig aangepast. Verder is de selectieset aangevuld met extra geïnterpreteerde boorbeschrijvingen van H3O – De Kempen, inclusief de beschrijvingen van de in België gelegen boringen. Tot slot is een aantal interpretatiefouten in de selectieset van DGM v2.2 hersteld.

#### **4.5 H3O – De Kempen**

H3O – De Kempen is een 3D geologisch en hydrogeologisch lagenmodel van het Kenozoïcum in de Vlaams – Nederlandse grensstreek van De Kempen (Vernes et al., 2018). Bijzonder aan het model is dat het grensoverschrijdend is. Verschillen tussen de bestaande (hydro)geologische interpretaties aan weerszijden van de landsgrens zijn bij het maken van het model opgespoord en opgelost op basis van reeds beschikbare data. Het projectgebied van H3O – De Kempen sluit in het zuidoosten aan op een eerder grensoverschrijdend karterproject, namelijk H3O – Roerdalslenk. De H3O karterprojecten zijn van groot belang voor de drinkwatervoorziening in Nederland en Vlaanderen.

De H3O karterprojecten leveren belangrijke nieuwe informatie op over het verloop van de (geo)hydrologische eenheden in het zuiden van Nederland. Deze nieuwe informatie wordt zoveel mogelijk overgenomen naar de landelijke modellen DGM, REGIS II en GeoTOP. Voor H3O – Roerdalslenk geldt dat de projectresultaten al verwerkt zijn in de actuele versies van DGM (DGM v2.2) en REGIS II (REGIS II v2.2). Voor H3O – De Kempen geldt dat de verbreidingen en interpretaties van boorbeschrijvingen zijn meegenomen in de modellering van een aantal dieper gelegen eenheden in het DGM+ lagenmodel dat gebruikt is voor GeoTOP Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg. Het gaat daarbij om een ten opzichte van het modelgebied als geheel relatief klein gebied ten zuiden van Tilburg (Figuur 4.5.1).



Figuur 4.5.1: Begrenzings van het inventarisatie- en modelgebied van H3O – De Kempen en het aangrenzende modelgebied H3O – Roerdalslenk (Vernes et al., 2017). Verbreidingen en interpretatie van boorbeschrijvingen die zijn samengesteld voor het inventarisatiegebied zijn verwerkt in het lagenmodel van DGM+.

#### 4.6 Hydrogeologisch Model (REGIS II)

Het BRO Hydrogeologisch Model (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 Hummelman et al. (2019b).

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. 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.

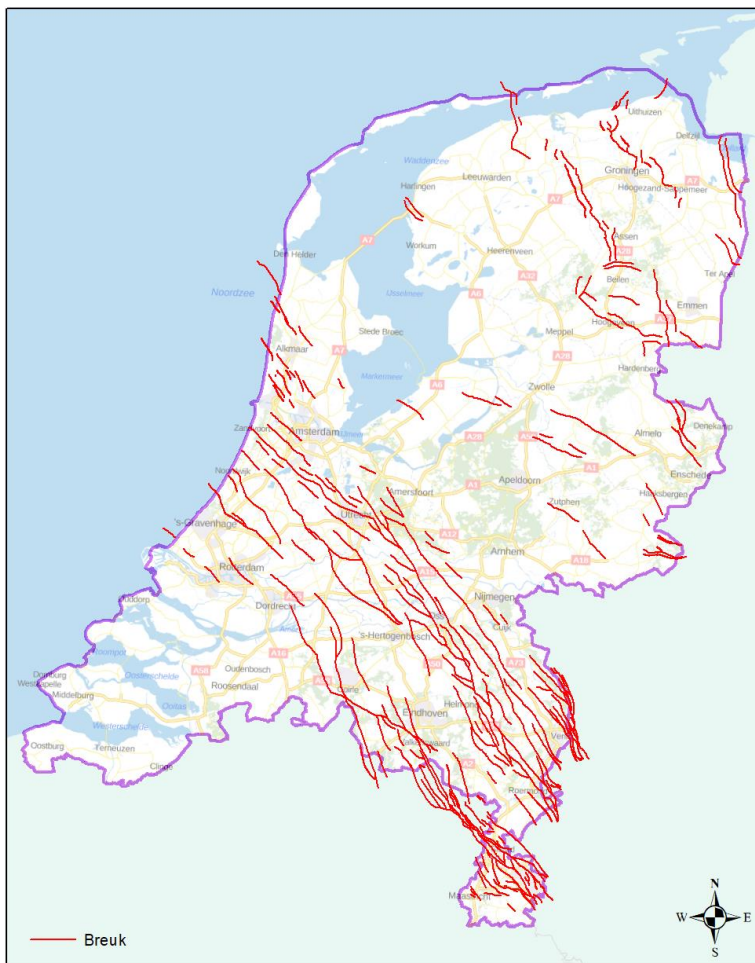
Net als in DGM worden de Holocene afzettingen in REGIS II gerepresenteerd door één, in dit geval hydrogeologische, eenheid.

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 beperkt tot het samenstellen van zogenaamde *Proportion Curves* die gebruikt worden om de verdeling van zand en klei in de lithoklassemodellering van heterogeen samengestelde eenheden te sturen. Meer informatie hierover staat in paragraaf 5.5.7.

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.

#### **4.7 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 4.7.1). 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 4.7.1: 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. Dit impliceert dat verschillende GeoTOP modelgebieden op verschillende versies van de breuken gebaseerd kunnen zijn.

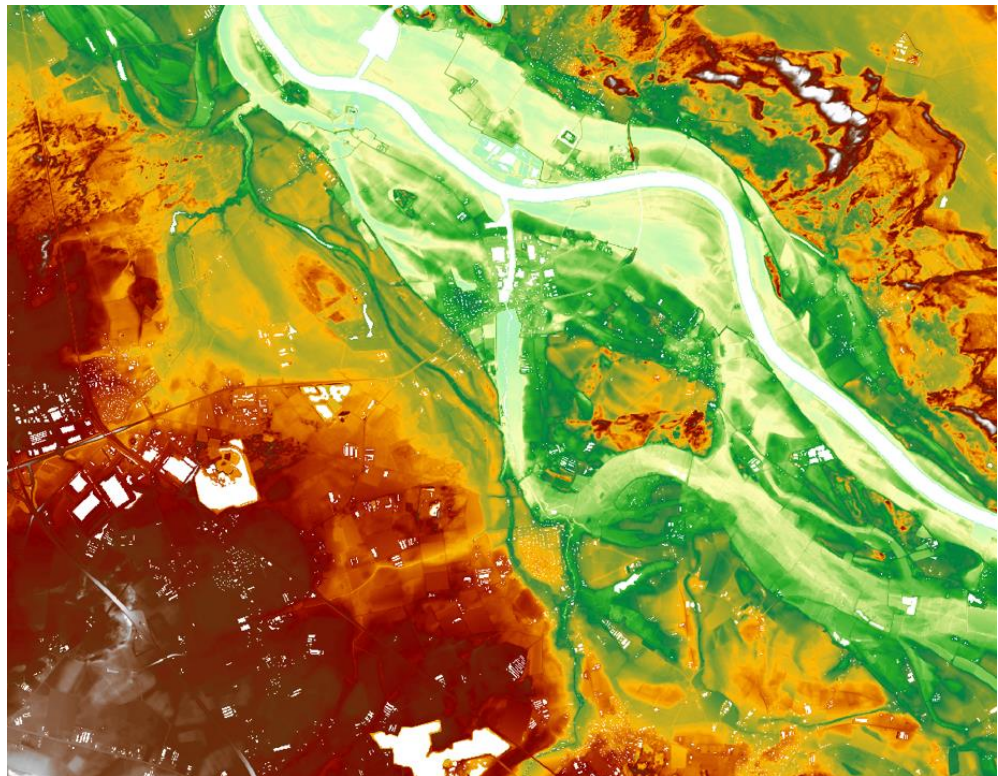
#### 4.8 Actueel Hoogtebestand Nederland

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 Maasdal (Figuur 4.8.1).



Figuur 4.8.1: Zichtbaarheid van het Maasdal en omgeving in het AHN. In het Maasdal kunnen terrasranden en geulstructuren onderscheiden worden (Formatie van Beegden). In het noordoosten zijn sikkelvormige duinen zichtbaar (Formatie van Boxtel, Laagpakket van Delwijnen); aan de zuidkant mondt een beekdal (Formatie van Boxtel, Laagpakket van Singraven) in de Maas uit.

In de modellering wordt geen gebruik gemaakt van de oorspronkelijke lasermeetwaarden, 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.

#### 4.9 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 weggenomen. Tevens dienen de gegevens te worden *opgeschaald* van de oorspronkelijke 5 bij 5 m resolutie naar de gewenste 100 bij 100 m schaal.

Voor de modelgebieden Oostelijke Wadden en Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg 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.



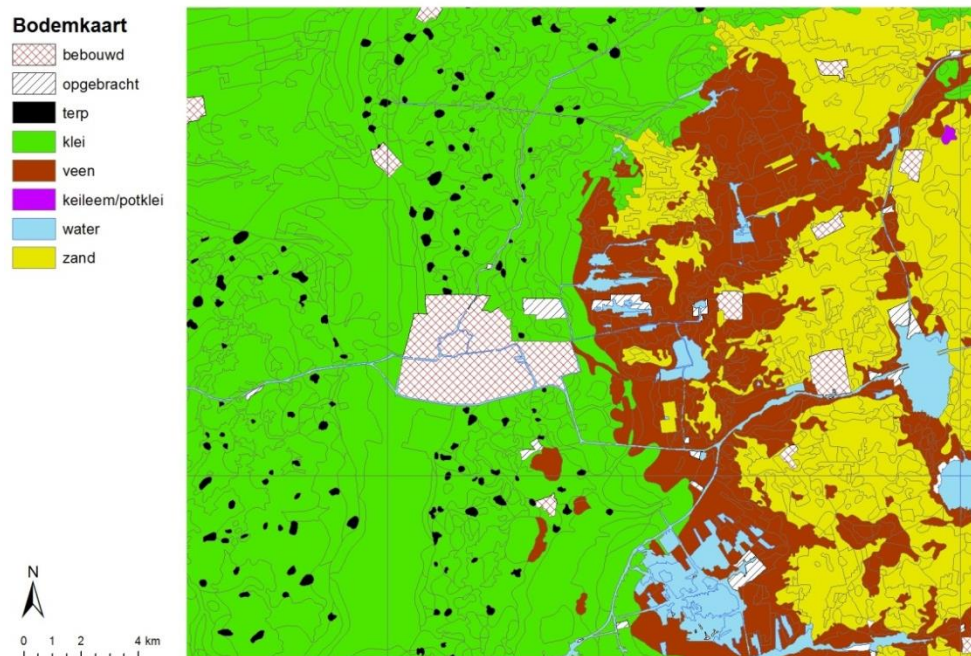
#### 4.10 Diepste bathymetrie van de Waddenzee

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.

#### 4.11 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 4.11.1 geeft een voorbeeld van de bodemkaart, waarbij de tientallen bodemklassen ten behoeve van GeoTOP zijn geaggregeerd tot een klein aantal voor GeoTOP relevante klassen.



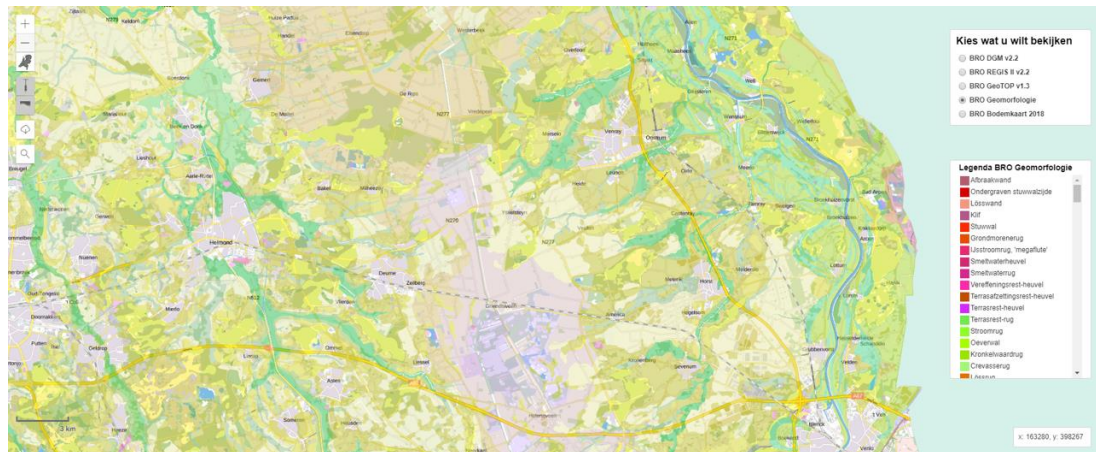
Figuur 4.11.1: Uitsnede van Bodemkaart van de omgeving van Leeuwarden. De bodemklassen zijn geaggregeerd tot een klein aantal voor GeoTOP relevante klassen.

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).

#### 4.12 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 4.12.1 geeft een voorbeeld van de kaart tussen Helmond en de Duitse grens waarin de ligging van de beekdalen (heldergroen) duidelijk naar voren komt.



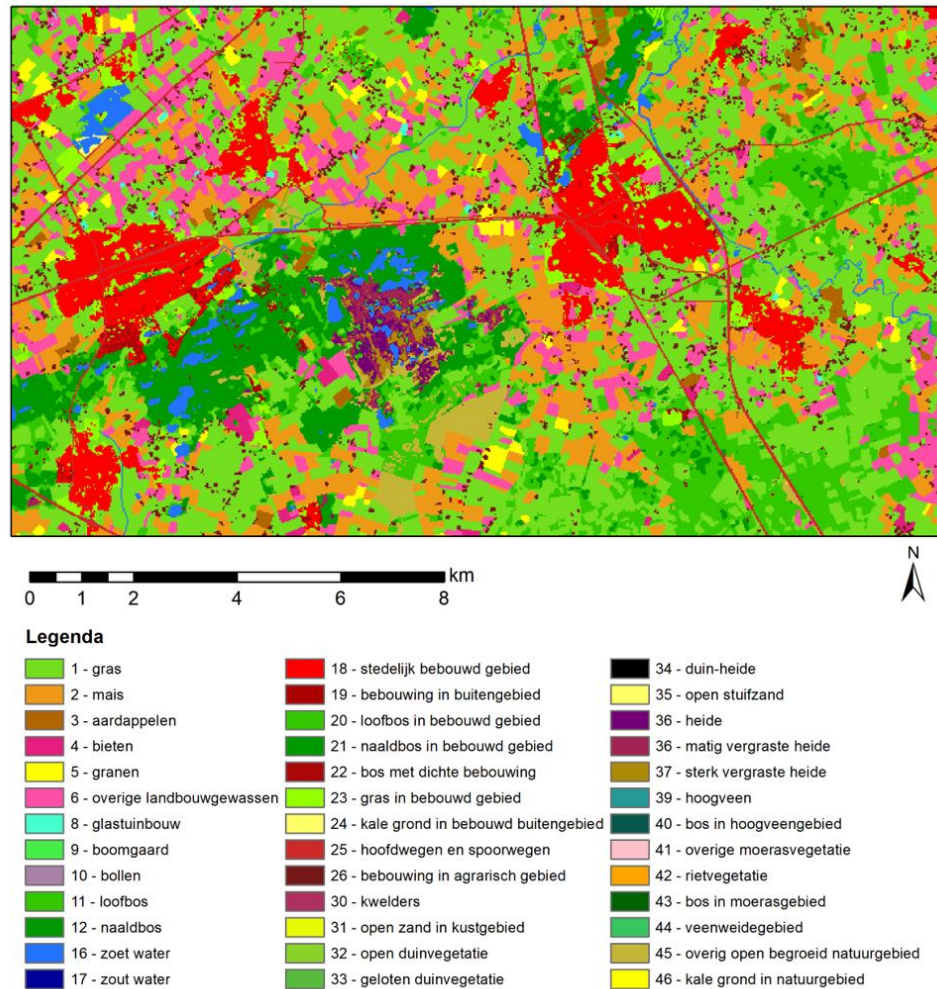
Figuur 4.12.1: Uitsnede van Geomorfologische kaart (zoals weergegeven op [www.BROloket.nl](http://www.BROloket.nl)) tussen Helmond en de Duitse grens waarin de ligging van de beekdalen (heldergroen) duidelijk naar voren komt.

In GeoTOP wordt de digitale versie van de geomorfologische kaart, bestaande uit polygonen 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.

#### 4.13 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 4.13.1). 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 4.13.1: Uitsnede van LGN5 van de omgeving van Oosterwijk en Boxtel.

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.

#### 4.14 Autosnelwegen Nederland

Voor de aanleg van autosnelwegen in Nederland is het noodzakelijk dat hiervoor een fundering (cunet) wordt aangelegd. Veelal wordt jaren voor de aanleg van de autosnelweg een voorbelasting aangebracht door middel van het opbrengen van een dik zandpakket. Bij het later aanleggen van de autosnelweg is de ondergrond dermate gezet dat er weinig tot geen verzakking meer optreedt. Uiteindelijk zal er onder de autosnelweg een zandcunet aanwezig zijn waarop de autosnelweg is aangelegd. Dit zandcunet wordt gerekend tot de antropogene ophoging (AAOP).

Voor de ligging van de autosnelwegen (A-wegen) wordt gebruik gemaakt van de TOP10NL kaart, een onderdeel van de Basis Registratie Topografie (BRT) samengesteld en beheerd door het kadaster. TOP10NL is een digitaal topografisch bestand dat ten grondslag ligt aan de topografische kaartseries 1:10.000 en 1:25.000 en dat veelvuldig in diverse GIS- en CAD-systemen wordt gebruikt voor ondergrond, analyse-, en beheers- en planningsactiviteiten.

Voor het overzicht van de autosnelwegen worden alle objecten uit de kaart geselecteerd waarbij het attribuut TYPEWEG\_1 de waarde "autosnelweg" heeft (Figuur 4.14.1). De autosnelwegen worden toegevoegd aan de verbreiding van het antropogeen die met behulp van het LGN is vastgesteld (zie paragraaf 4.13).



Figuur 4.14.1: Overzichtskartaar Autosnelwegen in Nederland.

#### 4.15 Primaire waterkeringen

De primaire waterkeringen in Nederland zijn van dermate afmetingen en opbouw, dat deze als onderdeel binnen de antropogene ophogingen (AAOP) worden meegenomen. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de kaart “Dijken van Nederland”, uitgave 2014 (<http://dutchdikes.net/>). Uit deze kaart wordt een selectie gemaakt van “Primaire waterkerende dijken” en “Primaire dammen en stormvloedkeringen” heeft (Figuur 4.15.1). De autosnelwegen worden toegevoegd aan de verbreidingen van het antropogeen die met behulp van het LGN en de Autosnelwegen zijn vastgesteld (zie paragraaf 4.13 en 4.14).



Figuur 4.15.1: Overzichtskartaat primaire waterkeringen, dammen en stormvloedkeringen in Nederland.

#### 4.16 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

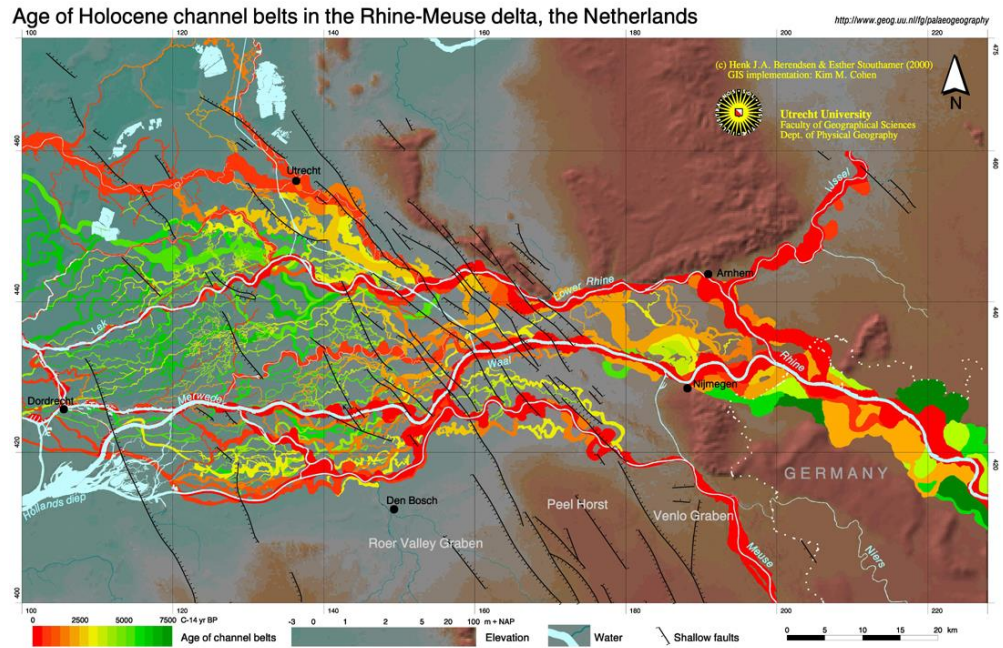
het veenvoorkomen: bij het interpreteren van oudere boorbeschrijvingen wordt gebruik gemaakt van de kaart vóór de actualisering (waar was veen aanwezig ten tijde van het zetten van de boring) terwijl bij het maken van het lagenmodel gebruik wordt gemaakt van de geactualiseerde kaart (waar is momenteel veen aanwezig).

#### **4.17 Veenkartering Mariapeel en Deurnsche Peel**

Vooruitlopend op GeoTOP Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg hebben TNO en Alterra / Wageningen UR een 3D model van de ondiepe ondergrond gemaakt van het Natura 2000 gebied *Mariapeel en Deurnsche Peel* (Vernes et al., 2013). Het gebied wordt gekenmerkt door aan het oppervlak voorkomend hoogveen (Formatie van Nieuwkoop, Laagpakket van Griendtsveen). De verbreiding van dit hoogveen is door Vernes et al. (2013) herzien en in GeoTOP overgenomen.

#### **4.18 Digitaal Basisbestand Paleogeografie van de Rijn-Maas Delta**

De ligging van de Holocene geulsystemen van de Rijn-Maas delta is door de Universiteit Utrecht zeer gedetailleerd in kaart gebracht (Figuur 4.18.1; Berendsen & Stouthamer, 2001; Cohen & Stouthamer, 2012). In het kader van de samenwerking "Delta Evolution" tussen de Universiteit Utrecht en TNO wordt deze kaart periodiek bijgewerkt aan de hand van nieuwe boorgegevens en nieuwe wetenschappelijke inzichten. De kaart wordt voor GeoTOP vervolgens aangevuld met verbreidingen (polygonen) van de Holocene geulsystemen in Zuid-Holland, het gebied ten westen van Figuur 4.18.1 tot aan de Noordzeekust, die zijn gekarteerd in het kader van de geologische oppervlaktekartering. Tot slot is de verbreiding van de Maasafzettingen aangesloten op de kaarten van het Digitaal Basisbestand Paleogeografie van het Maasdal (Woolderink en Cohen, 2018, Woolderink et al., 2019, zie volgende paragraaf).



Figuur 4.18.1: Holocene geulsystemen in de Rijn-Maas delta (Berendsen & Stouthamer, 2001) met een digitaal hoogtemodel als achtergrond. De getoonde geulsystemen zijn ontstaan van 7000 BP tot heden. Jonge geulsystemen zijn rood gekleurd, oude groen. Kleurverschillen representeren steeds een tijdstap van 500 jaar. Merk op dat de kaart niet tot aan de kust doorloopt; het meest westelijke deel van de Holocene geulsystemen in GeoTOP wordt gebaseerd op de eerder beschreven Geologische Oppervlaktekaart en recent onderzoek.

#### 4.19 Digitaal Basisbestand Paleogeografie van het Maasdal

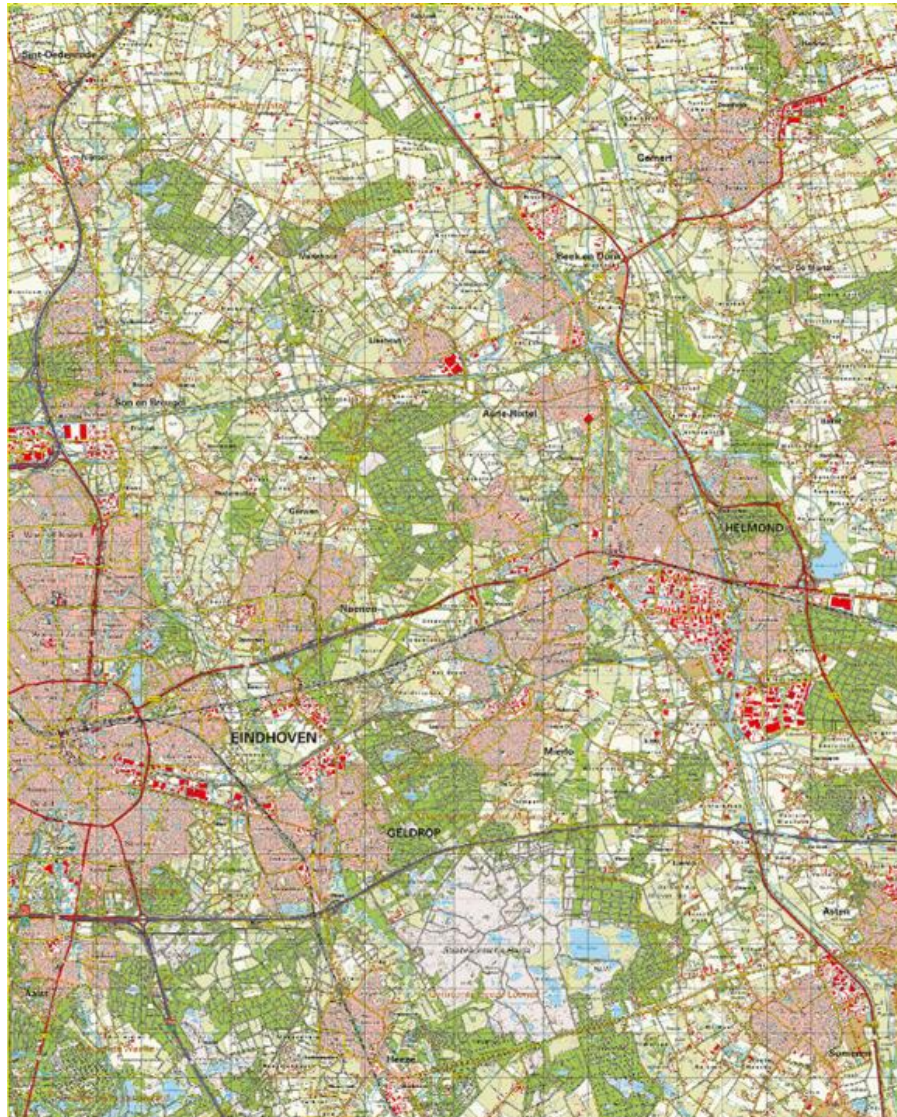
Het Maasdal wordt gekenmerkt door laat-glaciale en Holocene rivierterrassen. Woolderink en Cohen (2018) en Woolderink et al. (2019) hebben de paleogeografie van het Maasdal in een serie kaarten vastgelegd. In GeoTOP zijn deze kaarten gebruikt bij het vaststellen van de verbreidingen van de Maasafzettingen in het Maasdal. Het gaat om de afzettingen van de Formatie van Beegden, met daarbinnen Laagpakket van Oost-Maarland (inclusief een verbreiding van de grofzandige en grindrijke geulafzettingen) en de Laag van Wijchen. Ook de terrasranden in het Maasdal zijn op de deze kaarten gebaseerd.

#### 4.20 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 4.20.1). 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)).

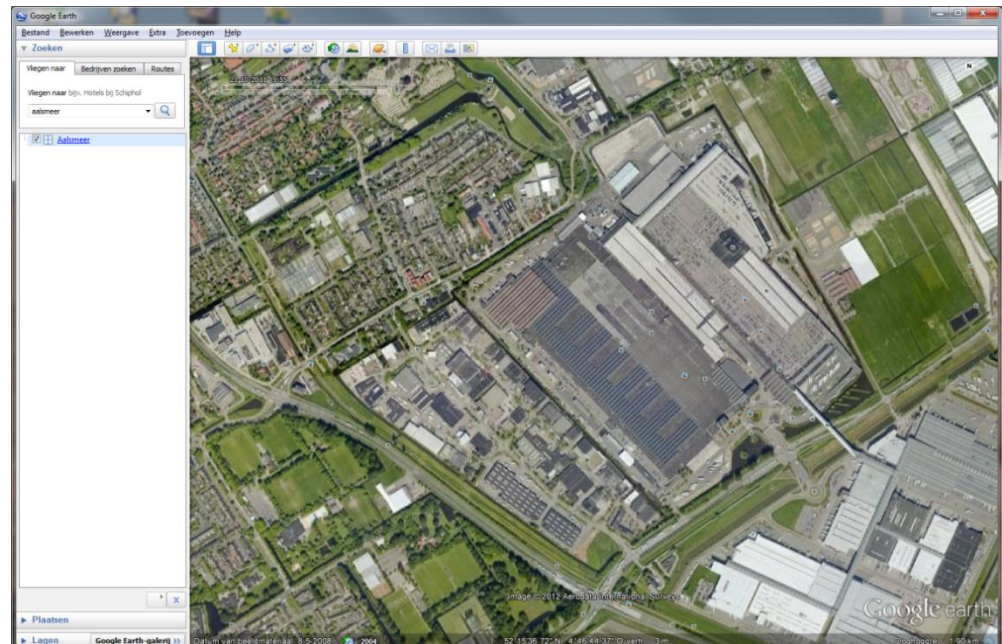




Figuur 4.20.1: Kaartblad 51 Oost van TOP50raster (versie maart 2020) van het Kadaster met de stad Eindhoven. Gebiedsomsang is 20 bij 25 kilometer.

#### 4.21 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 4.21.1).



Figuur 4.21.1: 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.

## 4.22 Lithostratigrafische Nomenclator Ondiepe Ondergrond

De Lithostratigrafische Nomenclator van de Ondiepe Ondergrond ([www.dinoloket.nl/nomenclator-ondiep](http://www.dinoloket.nl/nomenclator-ondiep); Figuur 4.21.1) 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	Holocene		Formatie van Naaldwijk		Formatie van Echteld		Kreekrak Formatie		Formatie van Nieuwkoop
		"Laat"	Eem Formatie		Formatie van Kreftenheye		Formatie van Koewacht	Formatie van Drente	Woudenberg
	Pleistoceen	"Midden"		Formatie van Appelscha	Formatie van Urk	Formatie van Beegden		Formatie van Peelo	Formatie van Drachten
				Formatie van Peize	Formatie van Sterksel				
		"Vroeg"		Formatie van Maassluis	Formatie van Waalre		Formatie van Stramproy		
	Neogeen	Plioceen	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 4.22.1: 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. Met GeoTOP Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg is een nieuwe methodiek geïntroduceerd waarmee de lagenmodellering van het landelijke lagenmodel DGM geïntegreerd is met de lagenmodellering van GeoTOP. Deze methodiek, DGM+ genaamd, en het bijbehorende proces worden hieronder op hoofdlijnen geschetst. In de navolgende paragrafen 5.2 – 5.6 worden de verschillende onderdelen van het proces verder uitgewerkt.

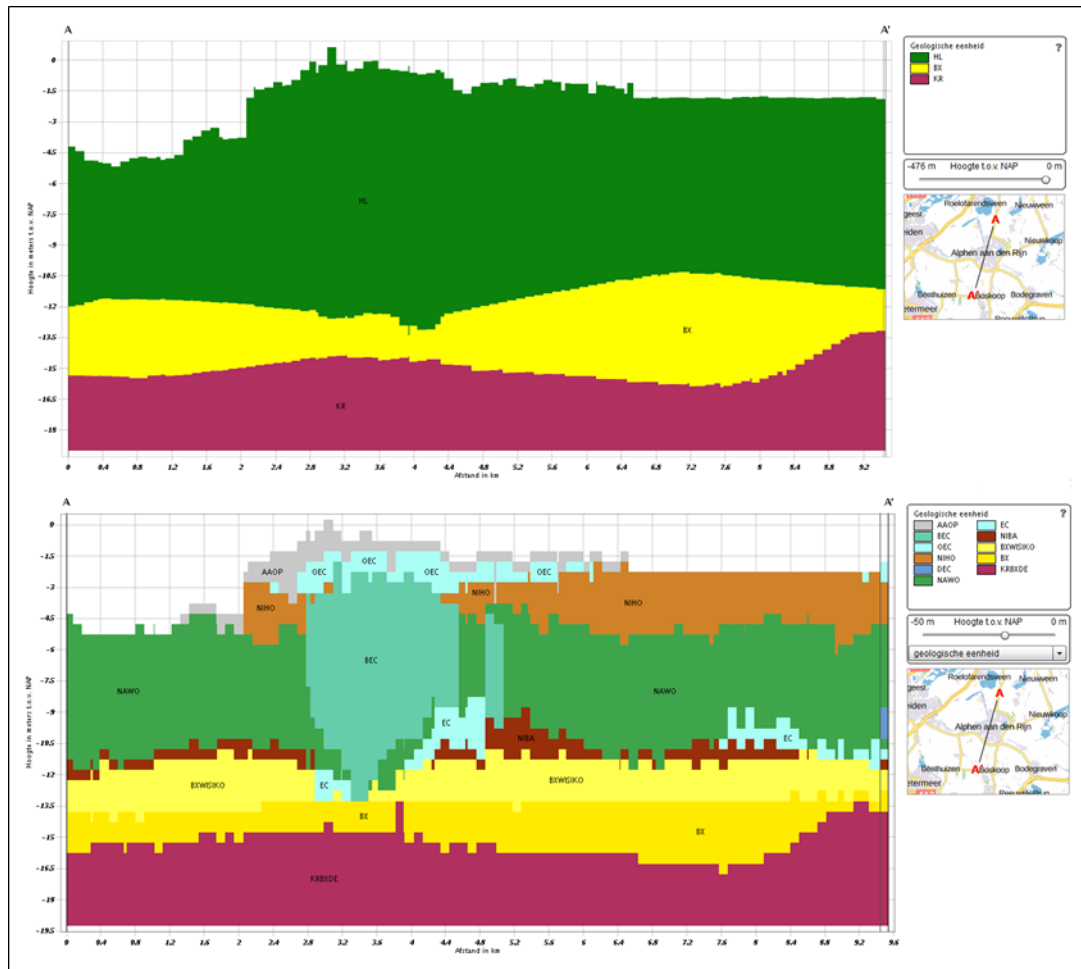
#### 5.1.1 *Oude methodiek: twee lagenmodellen (DGM en GeoTOP)*

DGM is een landelijk lagenmodel tot ongeveer 500 m onder NAP (met lokaal uitschieters tot 1200 m), dat gebaseerd is op een selectieset van circa 26.500 met de hand geïnterpreteerde boorbeschrijvingen uit de DINO databank (*Totstandkomingsrapport DGM*, Hummelman et al., 2019). Het ondiepe deel van DGM is minder gedetailleerd dan GeoTOP. In DGM wordt het Holocene pakket bijvoorbeeld als één eenheid gemodelleerd terwijl dit in GeoTOP is onderverdeeld in meerdere laagpakketten en lagen.

Het lagenmodel van GeoTOP gaat tot een diepte van maximaal 50 m onder NAP en neemt in principe alle beschikbare boorbeschrijvingen uit DINO en andere databronnen (met name de handboringen van de Universiteit Utrecht in het Rijn-Maasgebied) mee. De tienduizenden boorbeschrijvingen van een modelgebied worden vervolgens op geautomatiseerde wijze geïnterpreteerd, waarbij in de dieper gelegen eenheden overigens wel gebruik gemaakt wordt van het lagenmodel van DGM. Met de grote dataset van automatisch geïnterpreteerde boorbeschrijvingen kan in GeoTOP een lagenmodel met een hoge mate van detaillering gemaakt worden.

Voor DGM en GeoTOP bestaan daarmee afzonderlijke maakprocessen voor wat in essentie hetzelfde doel voor ogen heeft: het maken van een geologisch lagenmodel. Het bestaan van twee maakprocessen heeft als nadeel dat er deels dubbel werk gedaan wordt en dat de resultaten van de twee modellen in het ondiepe bereik verschillend kunnen zijn. Deze twee nadelen vormden voor TNO de directe aanleiding om de nieuwe methodiek DGM+ te introduceren.

Figuur 5.1.1 illustreert de verschillen tussen DGM en GeoTOP in een verticale dwarsdoorsnede bij Alphen aan den Rijn.



Figuur 5.1.1: Verticale dwarsdoorsnede door het ondiepe deel van DGM (boven) en GeoTOP (onder) bij Alphen aan den Rijn. Het ondiepe deel van DGM is minder gedetailleerd dan GeoTOP. In DGM wordt het Holocene pakket bijvoorbeeld als één eenheid gemodelleerd terwijl dit in GeoTOP is onderverdeeld in meerdere laagpakketten en lagen. Daarnaast is het verloop van de basis van de Holocene eenheden en ook dat van de basis van de Formatie van Bostel (BX) in DGM anders dan in GeoTOP.

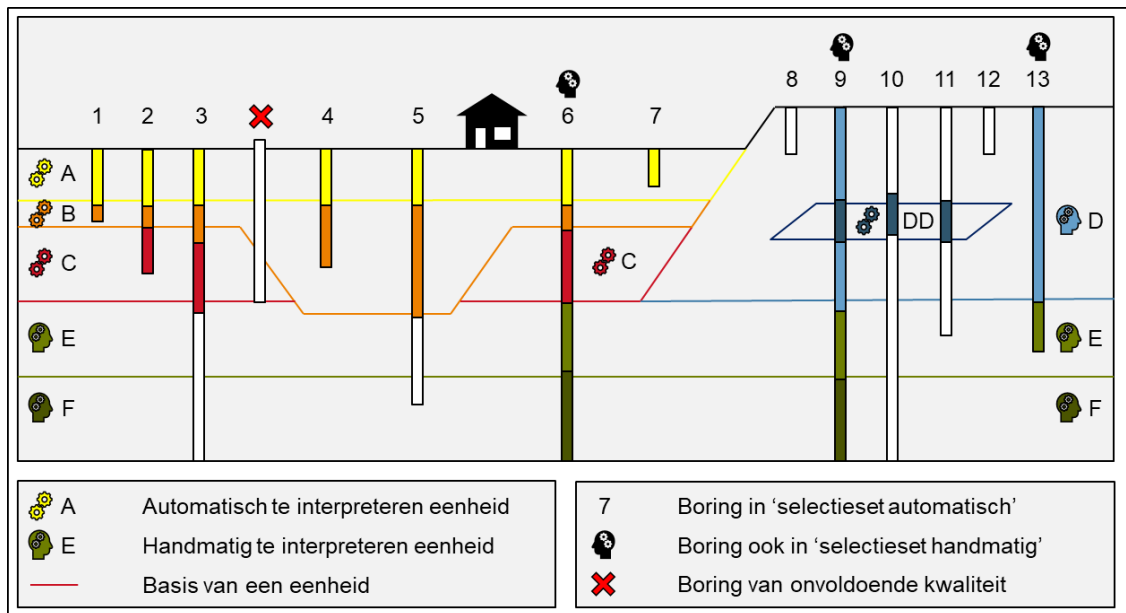
### 5.1.2 Nieuwe methodiek: één lagenmodel (DGM+)

De nieuwe methodiek DGM+ integreert de lagenmodellering van DGM en GeoTOP door uit te gaan van een grote dataset van automatisch geïnterpreteerde boorbeschrijvingen voor de ondiepe lagen en een veel kleinere dataset van enkele tienduizenden, handmatig geïnterpreteerde boorbeschrijvingen voor de dieper gelegen lagen. De lagenmodellering wordt in één keer uitgevoerd en resulteert in een lagenmodel met het dieptebereik van DGM (circa 500 m) met in de ondiepe lagen (tot maximaal 50 m onder NAP) het detail van GeoTOP.

De geïntegreerde lagenmodellering wordt landelijk uitgevoerd. Dat wil zeggen dat voor het modelleren van de dieper gelegen eenheden gebruik wordt gemaakt van de landelijke selectieset van (momenteel) 26.500 handmatig geïnterpreteerde boorbeschrijvingen en voor de ondiep gelegen eenheden van circa 470.000 boorbeschrijvingen uit DINO aangevuld met circa 125.000 beschreven handboringen van de Universiteit Utrecht in het Rijn-Maas gebied. Deze in totaal circa 595.000 boorbeschrijvingen worden vervolgens op geautomatiseerde wijze geïnterpreteerd. Daarnaast worden van elke te modelleren geologische eenheid

landelijke verbreidingen vastgesteld en wordt gebruik gemaakt van een landelijk breukenmodel.

De samenhang tussen ondiep gelegen, automatisch te interpreteren eenheden en de grote set van circa 595.000 boorbeschrijvingen ('selectieset automatisch') enerzijds en de dieper gelegen, handmatig te interpreteren eenheden en de veel kleinere set van circa 26.500 boorbeschrijvingen ('selectieset handmatig') wordt hieronder geïllustreerd in een fictieve dwarsdoorsnede (Figuur 5.1.2.).



Figuur 5.1.2: Samenhang tussen ondiep gelegen, automatisch te interpreteren eenheden en de grote set van circa 595.000 boorbeschrijvingen ('selectieset automatisch') enerzijds en de dieper gelegen, handmatig te interpreteren eenheden en de veel kleinere set van circa 26.500 boorbeschrijvingen ('selectieset handmatig') geïllustreerd in een fictieve dwarsdoorsnede. Zie tekst voor toelichting.

De dwarsdoorsnede toont geologische eenheden A t/m F en geïnterpreteerde boorbeschrijvingen 1 t/m 13. De met het rode kruis gemarkeerde boring is van een te lage kwaliteit en wordt uitgesloten. De eenheden A, B, C en DD zijn automatisch te interpreteren eenheden; de eenheden D, E en F worden handmatig geïnterpreteerd. Eenheid DD wordt in zijn geheel omsloten door eenheid D. Alle boringen (behalve die van een te lage kwaliteit) behoren tot de 'selectieset automatisch'. Boring 6, 9 en 13 behoren daarnaast ook tot de 'selectieset handmatig'.

Voor de 'selectieset automatisch' geldt dat er naar de eenheden A, B, C en DD wordt gezocht. Dit levert de automatisch toegekende interpretaties in boring 1 t/m 7 en 9 t/m 11 op. Voor de 'selectieset handmatig' geldt dat de handmatig toegekende interpretaties van de eenheden D, E en F worden overgenomen. Merk op dat delen van boorbeschrijvingen zonder interpretatie (wit in Figuur 5.1.2) kunnen blijven doordat ze deels (3, 5, 10 en 11) of geheel (8 en 12) door handmatig te interpreteren eenheden heen boren en niet tot de 'selectieset handmatig' behoren.

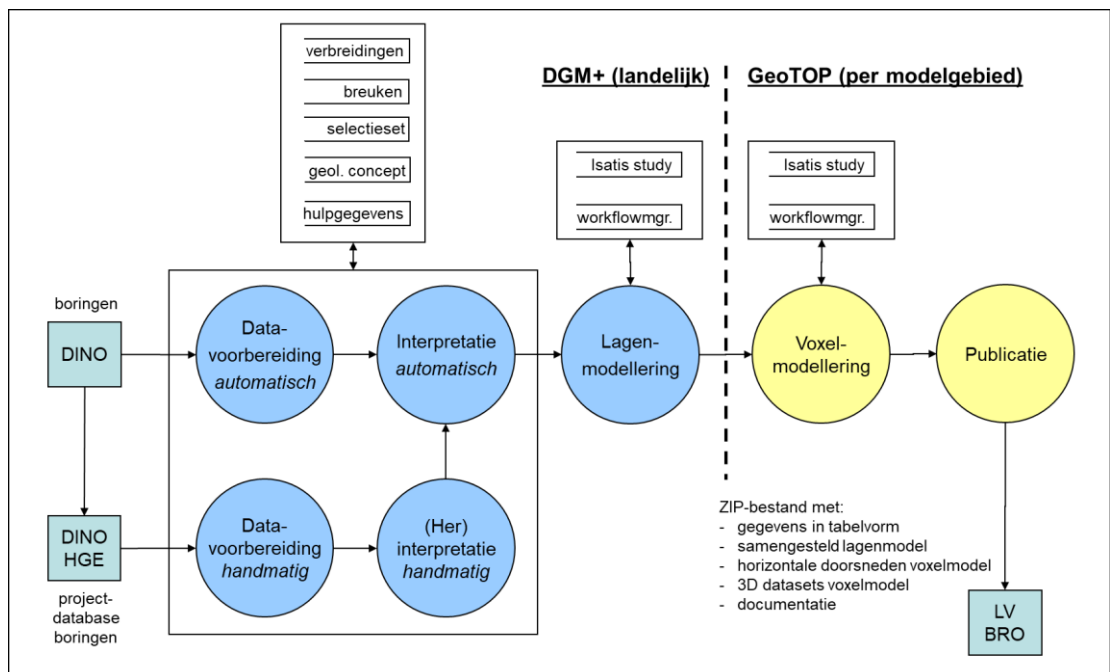
De lagenmodellering van DGM+ wordt gevolgd door de voxelmodellering van GeoTOP. De voxelmodellering gaat uit van het landelijke lagenmodel, maar beperkt

zich tot het onderhanden modelgebied. Bovendien wordt het lagenmodel afgekapt op een diepte van maximaal 50 m onder NAP.

In de toekomst zal DGM+ resulteren in een landelijk lagenmodel dat als een nieuwe versie van DGM gepubliceerd wordt. De totstandkoming van dit nieuwe landelijke lagenmodel zal dan bij het model DGM beschreven worden. Het totstandkomingsrapport van GeoTOP zal zich in de toekomst beperken tot de voxelmodellering van het ondiepe deel van DGM (tot maximaal 50 m onder NAP).

### 5.1.3 De werkprocessen van DGM+

Figuur 5.1.3 toont de werkprocessen van DGM+ (landelijk uitgevoerd) en GeoTOP (per modelgebied uitgevoerd). De werkprocessen worden hieronder kort besproken.



Figuur 5.1.3: Processchema voor het ontwikkelen van een modelgebied van GeoTOP volgens de nieuwe methodiek DGM+. De 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.

In het werkproces **Data-voorbereiding handmatig te interpreteren eenheden** worden alle algemene uitgangspunten, de definities, de basisdata en de hulpdata voorbereid en gecontroleerd die nodig zijn voor de modellering van de dieper gelegen lagen waarbij uitgegaan wordt van 'selectieset handmatig' van boorbeschrijvingen uit de DINO databank die handmatig geïnterpreteerd worden.

Deze handmatige interpretatie vindt vervolgens plaats in het werkproces **(Her)interpretatie handmatig te interpreteren eenheden**. Tevens worden binnen dit werkproces de potentiële verbreidingen samengesteld, noodzakelijke aanpassingen in ligging van breuken en toekenning van breuken aan geologische eenheden doorgevoerd en wordt de in de modellering gebruikte hulpdata, op basis

van de ge(her)interpreteerde selectieset boringen, gecontroleerd en indien nodig aangepast.

Het werkproces **Datavoorbereiding automatisch te interpreteren eenheden** houdt zich bezig met de datavoorbereiding ten behoeve van de geautomatiseerde interpretatie van boorbeschrijvingen:

- Extractie van alle boringen uit de DINO databank en andere databronnen in het te modelleren gebied.
- Kwaliteitsfiltering boringen (maken van een 'selectieset automatisch'; deze selectieset is beduidend groter dan de 'selectieset handmatig').
- 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.

De basisgegevens worden in het werkproces **Interpretatie automatisch te interpreteren eenheden** 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 geautomatiseerde interpretatie beperkt zich tot die eenheden die zich daar goed toe lenen, in het algemeen zijn dit de ondiep voorkomende eenheden. Binnen **Interpretatie automatisch te interpreteren eenheden** worden verder de handmatige interpretaties van **(Her)interpretatie handmatig te interpreteren eenheden** met de automatische interpretaties samengevoegd tot één dataset ten behoeve van de lagenmodellering en voxelmodellering.

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 berekend. Behalve de vlakken zelf wordt ook de onzekerheid in de vlakken berekend.

Het werkproces **Lagenmodellering** van DGM+ kijkt op twee punten in belangrijke mate af van de lagenmodellering van de eerder gemodelleerde GeoTOP-modelgebieden. Deze twee punten zijn:

- 1 In de eerder gemodelleerde GeoTOP modelgebieden wordt de diepteligging van de basis van elke gemodelleerde eenheid berekend met een stochastische interpolatietechniek die resulteert in 100 verschillende, maar statistisch gezien even waarschijnlijke realisaties van de basis. Uit de 100 realisaties wordt een gemiddelde basis berekend. Vervolgens wordt uit de gemiddelde basis van alle eenheden het lagenmodel samengesteld. In DGM+ wordt een interpolatietechniek gebruikt die direct resulteert in een



(gemiddelde) uitkomst van de diepteligging van de basis (paragraaf 5.4.6). Er zijn dus niet langer 100 realisaties beschikbaar.

2 In de eerder gemodelleerde GeoTOP modelgebieden wordt de onzekerheid in de diepteligging van de basis berekend uit de standaarddeviatie van de 100 realisaties. In DGM+ zijn echter geen realisaties meer beschikbaar en is een andere methode gevolgd om de onzekerheid te berekenen (paragraaf 5.4.10).

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.

Voor een gedetailleerde beschrijving van de werkprocessen **Datavoorbereiding handmatig te interpreteren eenheden** en **(Her)interpretatie handmatig te interpreteren eenheden** wordt verwezen naar het Totstandkomingsrapport van DGM (Hummelman et al., 2019), paragraaf 5.2 resp. 5.3.

De werkprocessen worden in dit rapport niet in detail beschreven, omdat bij het tot stand komen van modelgebied Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg gebruik gemaakt is van de *uitkomsten* van deze werkprocessen zoals ze bij het maken van DGM v2.2 zijn uitgevoerd. De werkprocessen zijn voor Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg niet opnieuw doorlopen, behoudens het overnemen van verbreidingen en interpretaties van boorbeschrijvingen in het relatief kleine gebied van H3O – De Kempen en het doorvoeren van een aantal correcties in interpretaties van boorbeschrijvingen (zie paragraaf 4.5).

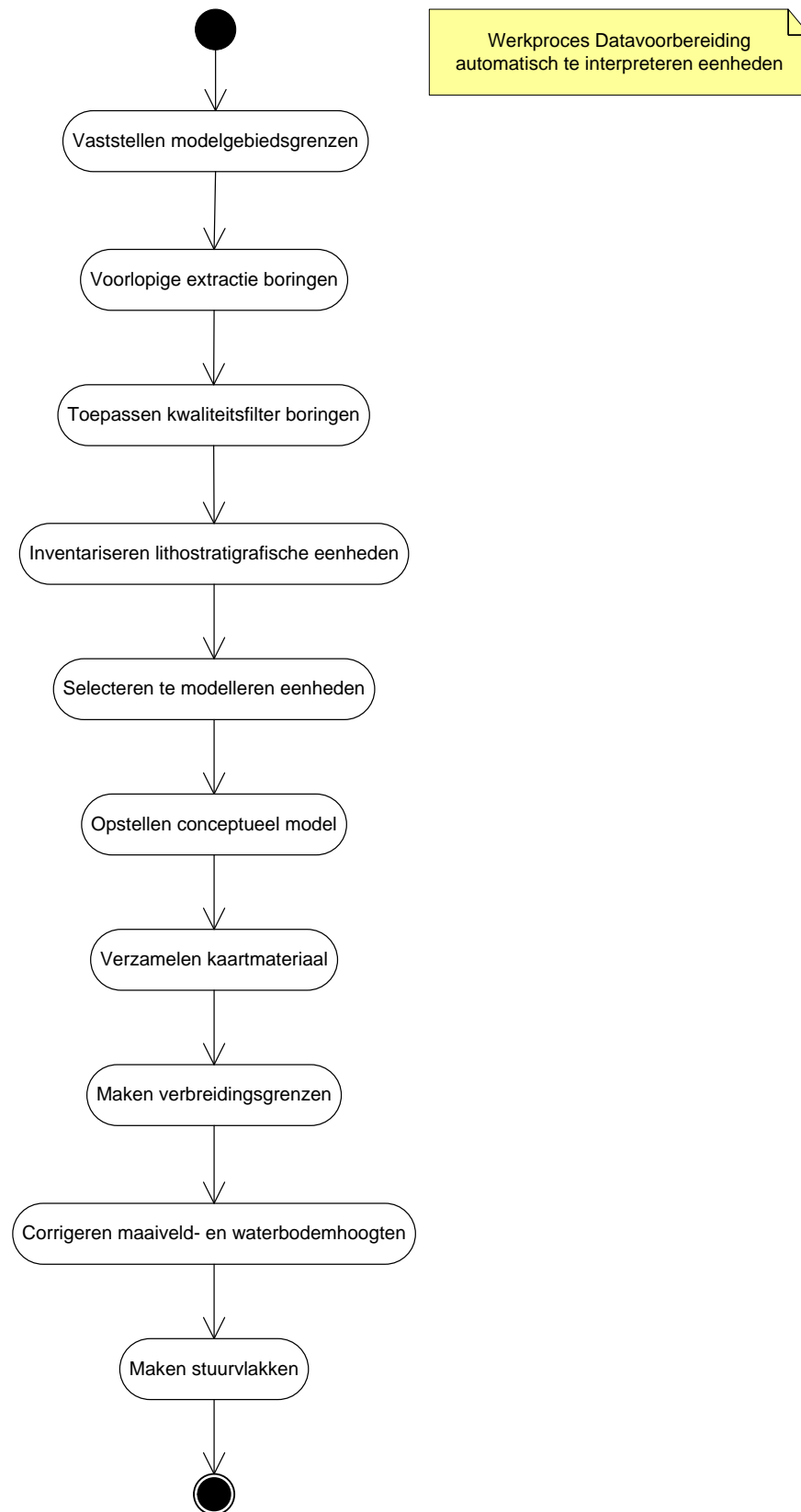
## 5.2 Datavoorbereiding automatisch te interpreteren eenheden

Het werkproces **Datavoorbereiding automatisch te interpreteren eenheden** 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 lithostratigrafische 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 automatisch te interpreteren eenheden**.

### 5.2.1 Vaststellen modelgebiedsbegrenzungen

Er worden twee modelgebiedsbegrenzungen vastgesteld: een voor de interpretatie en lagenmodellering en een voor de voxelmodellering.

Voor de interpretatie en **lagenmodellering** geldt een landelijk 'modelgebied' dat het vasteland van Nederland omvat. Dit modelgebied is gelijk aan dat van DGM en REGIS II en heeft zowel een horizontale begrenzing (land- / kustgrens) als een verticale begrenzing (boven- en onderkant).

Het modelgebied wordt 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 begrenzingen van het modelgebied wordt behalve in een raster ook in een shapefile vastgelegd.

De 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 begrenzing aan de onderkant wordt bepaald door de hoogteligging van de basis van de diepste te modelleren geologische eenheden binnen het daarvoor gedefinieerde karteergebied.

Het modelgebied voor de **voxelmodellering** heeft eveneens 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. Ook voor Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg geldt een vaste ondergrens van 50 m onder NAP. In enkele gebieden in het oosten van het gebied (o.a. de Meinweg) liggen de diepst gemodelleerde geologische eenheden echter minder diep dan 50 m onder NAP. Hier ligt de ondergrens dan ook minder diep. Omdat grote delen van Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg hoger liggen dan 20 m boven NAP, is overigens overwogen om in dit gebied een minder diep gelegen ondergrens te hanteren. Overwegingen over de ondergrens van Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg zijn terug te vinden in het *Kwaliteitstoetsingsdocument Geologisch model GeoTOP v1.4 - modelgebied Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg v1.0* (Kiden, 2020).

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. De horizontale grenzen van de

modelgebieden worden niet willekeurig gekozen, maar volgen een (geologisch) onderbouwde rationale.

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.

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

### 5.2.2 *Voorlopige extractie van boringen*

Boringen die in het landelijke 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 landelijke modelgebied begrenst (GIS-bewerking).

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 boringen*

Uitgangspunt voor GeoTOP is dat alle boorbeschrijvingen worden meegenomen in de modellering van de ondiep gelegen eenheden. 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. In Oostelijke Wadden en Westelijke Wadden is 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.

Voor Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg zijn eveneens afwijkende parameters vastgesteld: binnen dit modelgebied komen boringen met een maximaal dikte-interval van 12 m of meer en/of een gemiddeld dikte-interval van meer dan 3.5 m in de bovenste 50 m niet door het kwaliteitsfilter.

Ook voor toekomstige modelgebieden kunnen de criteria aangepast of uitgebreid worden.

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. 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 van de Rijn en Maas die als aparte modeleenheden onderscheiden worden.
- De keuze of de boorbeschrijvingen van de eenheid handmatig dan wel automatisch geïnterpreteerd worden.

Het selecteren van de 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.

Tabel 5.2.1: Geologische eenheden in GeoTOP Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg. Met "automatisch" wordt aangegeven of de eenheid een ondiep gelegen, automatisch te interpreteren eenheid is of een dieper gelegen, handmatig te interpreteren eenheid. Zie ook de uitleg in paragraaf 5.1.2.

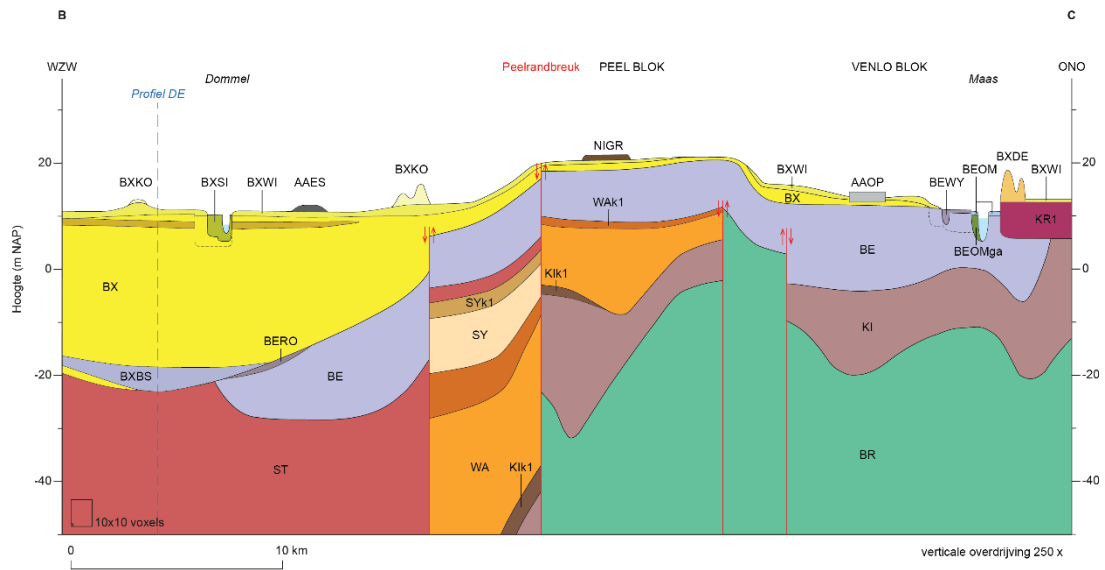
Code	Omschrijving	Afzettingsmilieu	Automatisch?
AAOP	Opgebrachte grond	Door de mens gemaakt	Ja
AAES	Esdek	Door de mens gemaakt	Ja
NAWA	Formatie van Naaldwijk, Laagpakket van Walcheren <i>onder NAZA of buiten NAZA-verbreiding</i>	Getijdeplaat	Ja
ANAWA	Formatie van Naaldwijk, Laagpakket van Walcheren <i>geulgeneratie A</i>	Getijdegeul	Ja
NAWO	Formatie van Naaldwijk, Laagpakket van Wormer	Getijdeplaat	Ja
EC	Formatie van Echteld <i>onder NIHO of buiten NIHO verbreiding</i>	Fluviatiel, Rijn	Ja
AEC	Formatie van Echteld <i>geulgeneratie A</i>	Fluviatiel, Rijn	Ja
NIGR	Formatie van Nieuwkoop, Laagpakket van Griendtsveen	Moeras	Ja
NIHO	Formatie van Nieuwkoop, Hollandveen Laagpakket	Moeras	Ja
NIBA	Formatie van Nieuwkoop, Basisveen Laag	Moeras	Ja
BX	Formatie van Boxtel	Fluviatiel, lokale rivieren	Nee
BXDEKO	Formatie van Boxtel, Laagpakketten van Delwijnen en Kootwijk	Eolisch	Ja

Code	Omschrijving	Afzettingsmilieu	Auto- matisch?
BXWIKO	Formatie van Boxtel, Laagpakketten van Wierden en Kootwijk	Eolisch	Ja
BXSI	Formatie van Boxtel, Laagpakket van Singraven	Fluviatiel	Ja
BXSC	Formatie van Boxtel, Laagpakket van Schimmert	Eolisch	Ja
BXLM	Formatie van Boxtel, Laagpakket van Liempde	Eolisch	Ja
BXBS	Formatie van Boxtel, Laagpakket van Best	Fluviatiel	Ja
BE	Formatie van Beegden	Fluviatiel, Maas	Nee
BEOM	Formatie van Beegden, Laagpakket van Oost-Maarland	Fluviatiel, Maas	Ja
ABEOM	Formatie van Beegden, Laagpakket van Oost-Maarland <i>geulgeneratie A</i>	Fluviatiel, Maas	Ja
BEWY	Formatie van Beegden, Laag van Wijchen	Fluviatiel, Maas	Ja
BERO	Formatie van Beegden, Laag van Rosmalen	Fluviatiel, Maas	Ja
KR	Formatie van Kreftenheye <i>boven EE of buiten EE-verbreiding</i>	Fluviatiel, Rijn	Nee
KRWY	Formatie van Kreftenheye, Laag van Wijchen	Fluviatiel, Rijn	Ja
KW	Formatie van Koewacht	Fluviatiel, Belgische rivieren	Nee
UR	Formatie van Urk <i>onder PE of buiten PE-verbreiding</i>	Fluviatiel, Rijn	Nee
ST	Formatie van Sterksel	Fluviatiel, Rijn	Nee
SY	Formatie van Stramproy	Fluviatiel, Belgische rivieren	Nee
PZWA	Formaties van Peize en Waalre <i>in modelgebied alleen Waalre</i>	Fluviatiel, Rijn	Nee
KI	Kiezeloöliet Formatie	Fluviatiel, Rijn	Nee
IE	Formatie van Inden	Fluviatiel, Rijn	Nee
MS	Formatie van Maassluis	Marien	Nee
OO	Formatie van Oosterhout	Marien	Nee
BR	Formatie van Breda	Marien	Nee

### 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. Een voorbeeld van een conceptueel model is gegeven in Figuur 5.2.2. 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.





Figuur 5.2.2: Een van de vier conceptuele profielen die opgesteld zijn voor GeoTOP Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg. Merk op dat de automatisch te interpreteren eenheden, zoals AAES, BEWY, BEOM, BXDE en BXSI vooral ondiep voorkomen. Uitzonderingen zijn BXBS en BERO die op grotere diepten voorkomen.

### 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 waterbodembhoogtebestand en het AHN.

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.

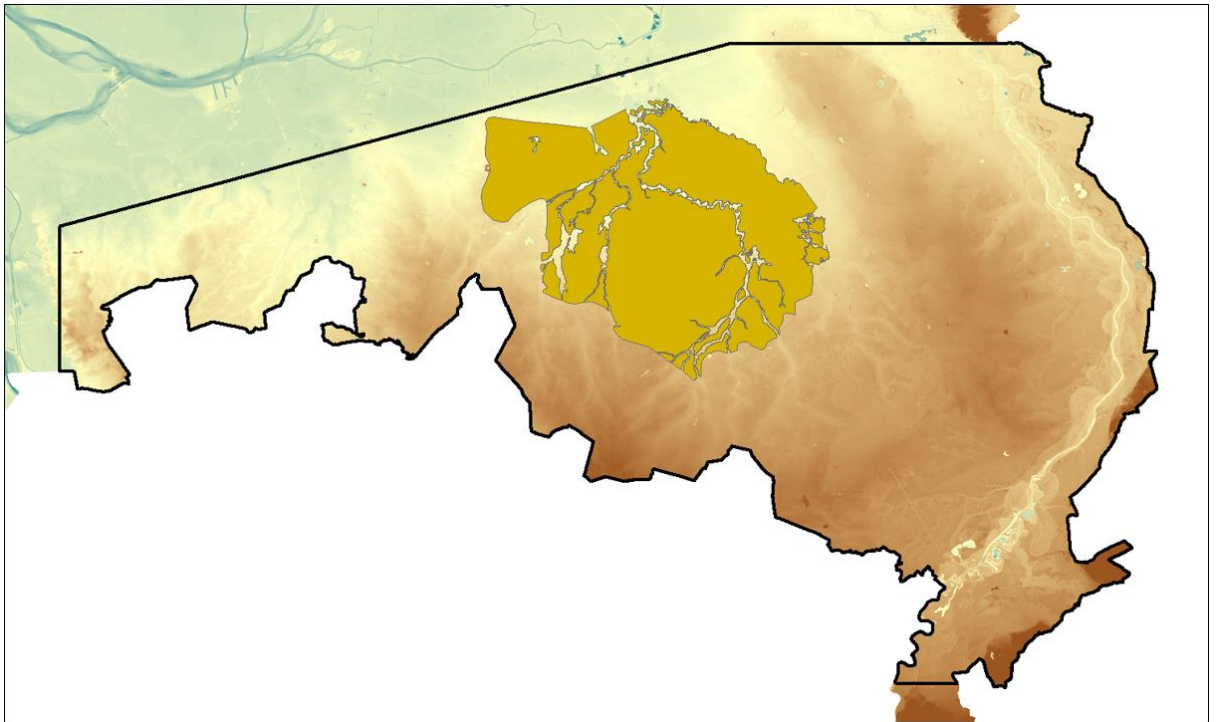
### 5.2.8 Maken verbreidingsgrenzen

Voor elke automatisch te interpreteren geologische eenheid wordt een verbreidingsgrens (shapefile) gemaakt. Deze verbreidingsgrens betekent het gebied af waarbinnen in werkproces **Interpretatie automatisch** (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. Voor een aantal eenheden geldt dat de verbreiding bij de

modellering als *actueel* wordt beschouwd: de eenheid komt in het lagenmodel dan altijd voor waar de verspreidingskaart dit aangeeft. Dit geldt o.a. voor de Holocene geelsystemen van Rijn, Maas en IJssel.

Van alle eenheden waarvan de verspreiding kan worden vastgesteld uit het verzamelde kaartmateriaal wordt in deze processtap een verspreidingsgrens gemaakt. Dit gebeurt door een gebiedskundige geoloog aan de hand van het kaartmateriaal, de literatuur en de boorbeschrijvingen met een handmatige lithostratigrafische interpretatie. De gehanteerde schaal bij het maken van verspreidingsgrenzen 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 verspreiding, of alleen een verspreiding van onvoldoende kwaliteit, kan worden gemaakt. Voor deze eenheden wordt in eerste instantie de potentiële verspreiding gelijk gesteld aan de modelgebiedsgrens. In werkproces **Interpretatie automatisch** 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 verspreiding vastgesteld. Een voorbeeld is het Laagpakket van Liempde van de Formatie van Bortel (Figuur 5.2.3). Zie verder werkproces **Interpretatie automatisch**.



Figuur 5.2.4: Verbreiding van het Laagpakket van Liempde van de Formatie van Boxtel (BXML; mosterdgeel) in modelgebied Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg (zwarte lijn). De verbreiding is beperkt tot de Roerdalslenk en wordt doorsneden door de Holocene beekdalen van het Laagpakket van Singraven (BXSI). Achtergrondkaart is het maaiveld- en waterbodemhoogtebestand van GeoTOP v1.4.

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 raster wordt vervolgens nog uitgebreid met de in hoofdstuk 4 beschreven autosnelwegen en primaire waterkeringen (zie paragraaf 5.4.7 voor een uitgebreide beschrijving).

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

#### 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 die van 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 modelleren 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*

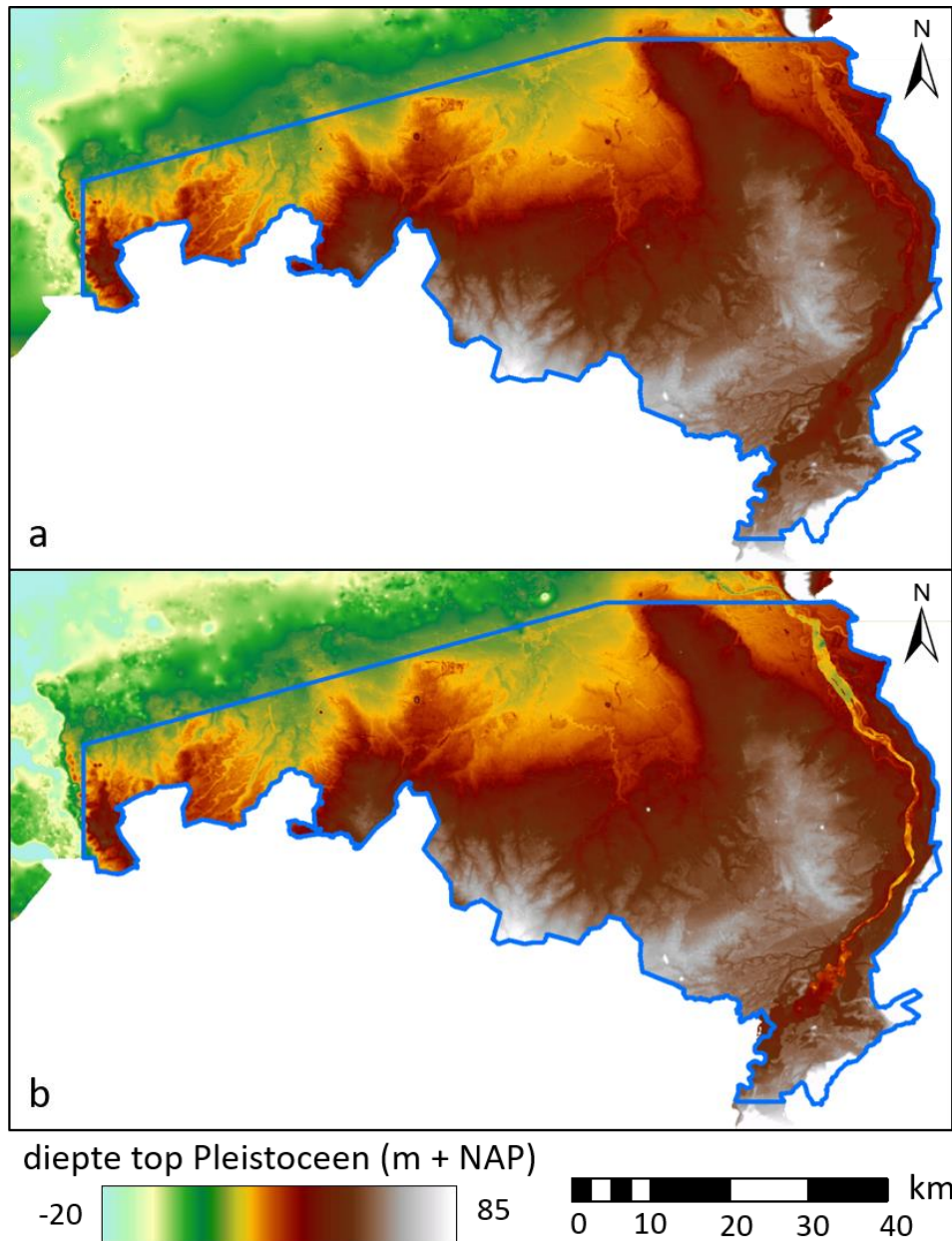
Stuurvlakken zijn rasters die de diepteligging van een geologisch grensvlak in de ondergrond weergeven. Deze rasters worden stuurvlakken genoemd omdat ze sturing geven aan de geautomatiseerde interpretatie van boorbeschrijvingen in modeleenheden (paragraaf 5.3).

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 5.2.4 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 5.2.4 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, en het Laagpakket van Liempde in de Formatie van Boxtel. 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 5.2.4: Deel van de stuurvlakken Top Pleistoceen onversneden (a) en versneden (b) in modelgebied Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg (blauwe lijn). In dit gebied zijn beide stuurvlakken grotendeels gelijk doordat de Pleistocene afzettingen veelal aan maaiveld liggen. In het oosten is in (b) echter de insnijding van de Holocene Maasafzettingen zichtbaar.

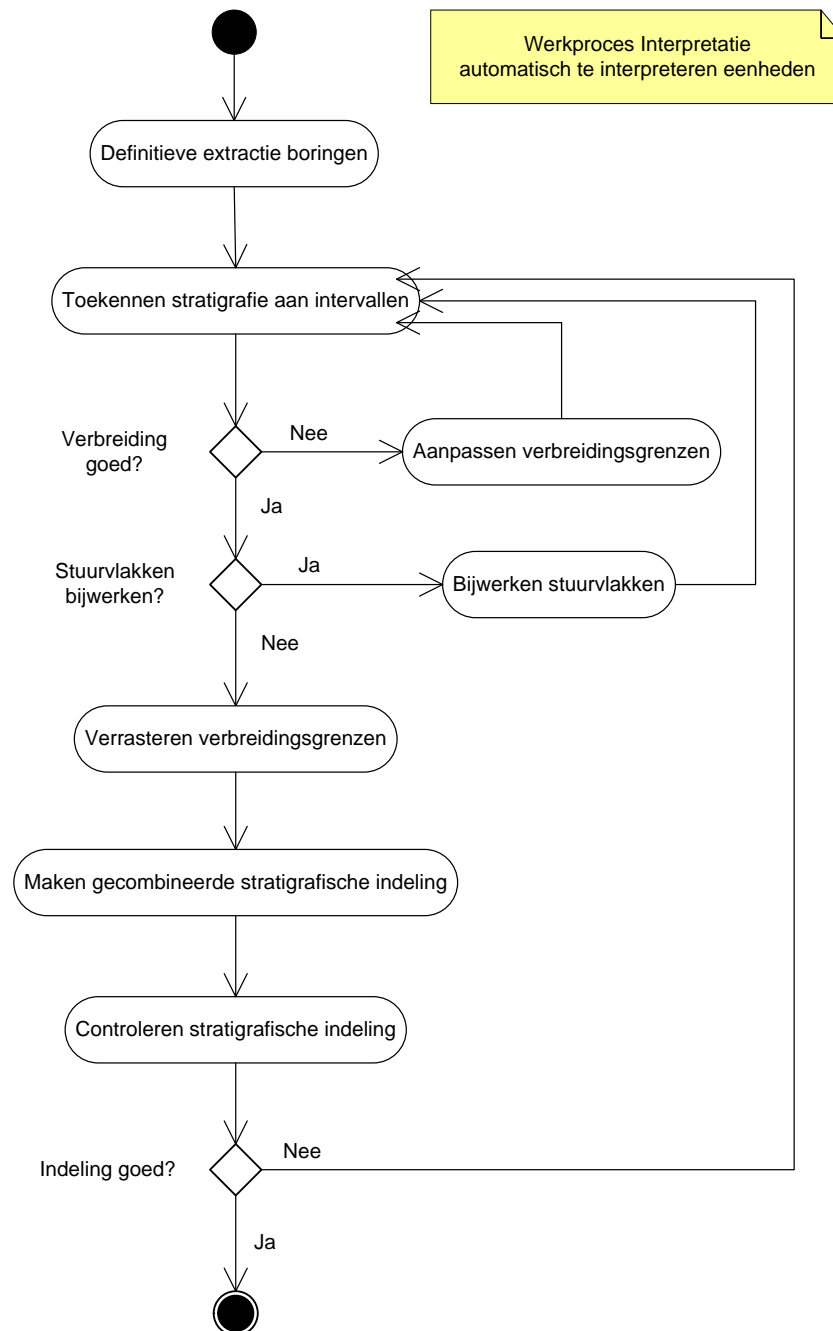
Het maken van stuurvlakken is een interpolatieproces dat met behulp van het pakket Isatis® wordt uitgevoerd. De in Isatis® uit te voeren operaties liggen vast in een zogenaamde *journal-file*, een batch-bestand waarmee operaties in Isatis® geautomatiseerd uitgevoerd kunnen worden. Meer informatie over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

### 5.3 Interpretatie automatisch te interpreteren eenheden

De basisgegevens worden in werkproces **Interpretatie automatisch te interpreteren eenheden** gebruikt om aan elk beschreven lithologisch interval van alle boringen die deel uitmaken van de 'selectieset automatisch' een stratigrafische eenheid toe te kennen. Deze automatisch tot stand gekomen interpretatie wordt gecombineerd met de handmatige interpretaties uit de 'selectieset handmatig'. Dit levert een set van stratigrafisch geïnterpreteerde boringen op die als product aan de BRO wordt geleverd en input is voor de navolgende modelleren-werkprocessen.

**Interpretatie automatisch te interpreteren eenheden** bestaat uit de volgende processtappen (Figuur 5.3.1):

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



Figuur 5.3.1: Processtappen in het werkproces **Interpretatie automatisch te interpreteren eenheden**.

### 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 automatisch te interpreteren eenheden** 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 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 de boringen zoals dat bij **Datavoorbereiding automatisch te interpreteren eenheden** al is uitgevoerd.

### 5.3.2 *Toekennen 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 geautomatiseerde toekenning van stratigrafie die zich daartoe leent. Dit zijn vooral Holocene eenheden, zoals de verschillende laagpakketten van de Formaties van Naaldwijk en Nieuwkoop, maar ook Pleistocene eenheden zoals de laagpakketten Rosmalen en Oost-Maarland van de Formatie van Beegden en de verschillende laagpakketten van de Formatie van Boxtel. Zie Tabel 5.2.1 voor een overzicht van de eenheden in GeoTOP Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg waarvoor een geautomatiseerde toekenning is uitgevoerd.

Voor elke eenheid wordt een aantal batchprogramma's<sup>2</sup> 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 verspreidingsgrens 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 volgen twee voorbeelden.

#### *Voorbeeld 1: Laagpakket van Griendtsveen*

Voor het Laagpakket van Griendtsveen van de Formatie van Nieuwkoop (NIGR; "hoogveen") zijn relatief eenvoudige criteria opgesteld om in een boorbeschrijving die binnen de verspreiding van de eenheid ligt een of meerdere intervallen te interpreteren als behorende tot het laagpakket:

- De boorintervallen worden doorlopen door van de top (maaiveld) naar de basis (einddiepte) van een boring te werken;
- Als er antropogene afzettingen in de boring zijn aangetroffen, dan moet de top van het interval onder de basis van de antropogene afzettingen liggen;
- Als het Laagpakket van Gieten (keileem) van de Formatie van Drente is aangetroffen in de 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;

---

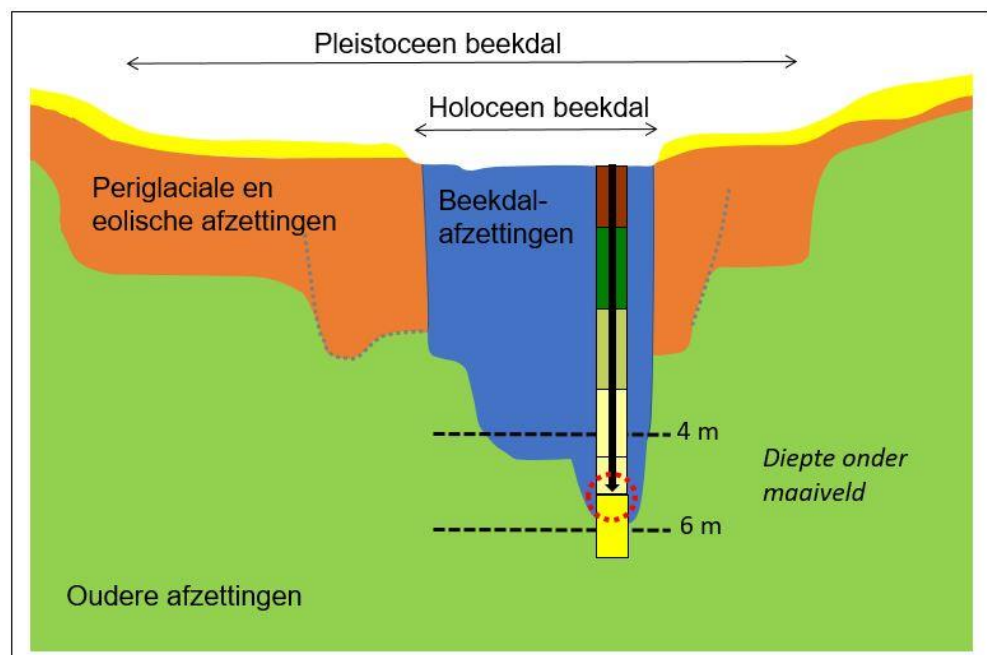
<sup>2</sup> Een batchprogramma is een programma dat na opstarten zonder menselijke tussenkomst een aantal taken uitvoert en daarna automatisch wordt afgesloten.

- De top van het bovenste interval wat voldoet aan de criteria moet binnen 1 m van het maaiveld liggen, tenzij de boring binnen de verbreiding van de antropogene afzettingen valt, dan moet de top binnen 1,5 m van het maaiveld liggen;
- De lithologie van het interval is "V" (veen) of "GY" (gyttja);
- Er mogen lagen met een afwijkende lithologie in de sequentie voorkomen ("stoorlagen"), maar het totaal daarvan mag niet dikker worden dan 0.2 m.

Uit dit voorbeeld blijkt dat er afhankelijkheden zijn, zo is de interpretatie van het Laagpakket van Griendtsveen afhankelijk van de interpretatie van de antropogene afzettingen en het Laagpakket van Gieten. Dit betekent dat de volgorde waarin de automatische procedures uitgevoerd worden van belang is.

#### Voorbeeld 2: Laagpakket van Singraven

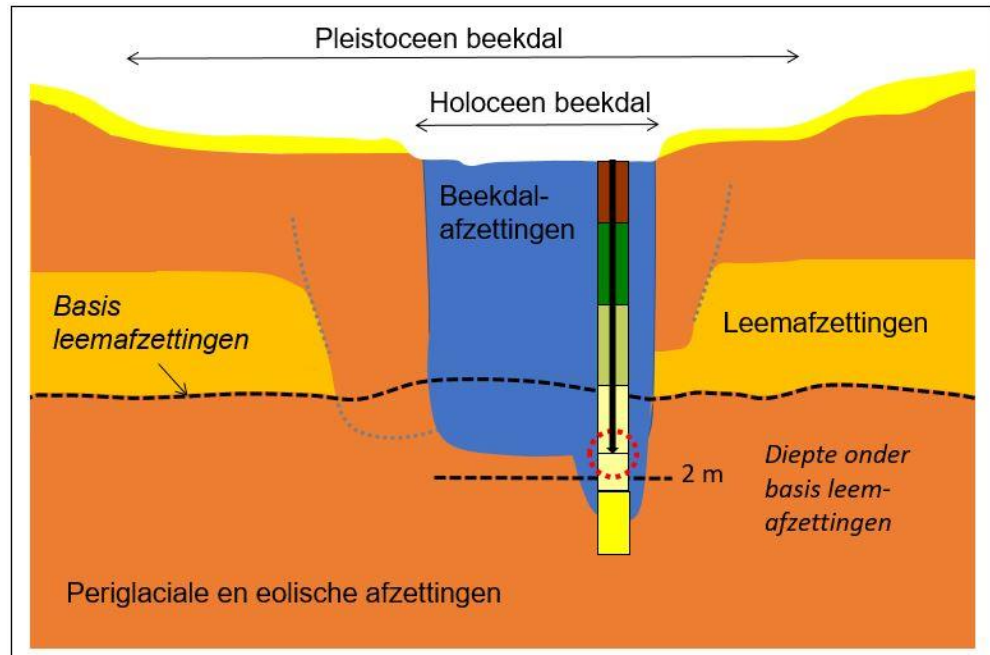
De geautomatiseerde interpretatie van het Laagpakket van Singraven in de Formatie van Boxtel (BXS; "beekdalafzettingen") is een voorbeeld van een eenheid waarbij naast criteria ook andere geologische informatie gebruikt wordt. Beekdalen in Zuid-Nederland bestaan uit een breed, ondiep Pleistoceen dal waarin in het Holoceen een smal, diep ingesneden beekdal is ontstaan (Figuur 5.3.2).



Figuur 5.3.2: Beekdalafzettingen in Zuid-Nederland. Zie tekst voor toelichting.

Voor de eenheid BXS zijn we op zoek naar de afzettingen in het Holoceen beekdal. De verbreiding van de Holoceen beekdalen is afgeleid uit de Geomorfologische Kaart van Nederland, het digitale hoogtemodel AHN en handmatig geïnterpreteerde boorbeschrijvingen in en rondom de beekdalen. Uit de handmatig geïnterpreteerde boorbeschrijvingen en de geologische kennis van de beekdalen weten we dat de basis van het Holoceen beekdal tussen de 4 en 6 m onder maaiveld ligt. De boorbeschrijvingen die binnen de verbreiding liggen worden nu onderzocht op een overgang van fijnkorrelig sediment (veen, klei, kleiig zand, fijn zand) naar grover sediment (midden zand, grof zand) tussen de 4 en 6 m onder maaiveld. In Figuur 5.3.2 wordt op deze manier een overgang van fijn zand naar midden zand gevonden op iets meer dan 5 m onder maaiveld.

Voor de beekdalen in de Roerdalslenk kunnen we gebruik maken van aanvullende geologische kennis. Daar waar de beekdalen in het verbreidingsgebied van de leemafzettingen (BxLM, Laagpakket van Liempde) voorkomen, ligt de basis van de beekdalen altijd dieper dan de leemafzettingen. De beken hebben de leemlagen dus geërodeerd (Figuur 5.3.3; zie ook Figuur 5.2.4 in paragraaf 5.2.8 waarin te zien is dat beekdalen de verbreiding van het Laagpakket van Liempde doorsnijden).



Figuur 5.3.3: Beekdalafzettingen in Zuid-Nederland binnen de verbreiding van de leemafzettingen in de Roerdalslenk. Zie tekst voor toelichting.

Voor de basis van de leemafzettingen is een stuurvlak gemaakt op basis van een beperkte set handmatig geïnterpreteerde boorbeschrijvingen (paragraaf 5.2.10). Door de overgang van fijnkorrelig sediment (veen, klei, kleilig zand, fijn zand) naar grover sediment (midden zand, grof zand) nu tussen het stuurvlak en 2 m daaronder te zoeken komen we tot een resultaat dat overeenkomt met de geologische inzichten in dit gebied.

Figuur 5.3.3 laat overigens een aspect zien waarin automatisch toegepaste, 'harde' criteria kunnen verschillen van handmatig toegepaste, 'zachte' criteria. De automatisch gevonden overgang is er in Figuur 5.3.3 namelijk een van fijn zand naar een ander interval van eveneens fijn zand. Dit is de terugvaloptie voor het geval er in het traject tussen de basis van de leemafzettingen en 2 m daaronder geen overgang van fijn naar grof materiaal gevonden wordt. Bij een handmatig uitgevoerde interpretatie van dezelfde boring zou de basis waarschijnlijk een interval lager gekozen zijn, waar wel sprake is van een overgang van fijn naar grof sediment. De interpreterend geoloog zou het criterium van 2 m dan hebben versoepeld.

Automatische procedures zoals die van *voorbeeld 1* en *2* leveren een set boringen op waarin een top en een basis van de betreffende 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 (paragraaf 5.2.8) een iteratief proces.

Het ontwikkelen van de software voor het geautomatiseerde toekennen van 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 automatisch te interpreteren eenheden** in eerste instantie de potentiële verbreiding gelijk gesteld aan de modelgebiedsgrens. In processtap *Toekennen 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 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*

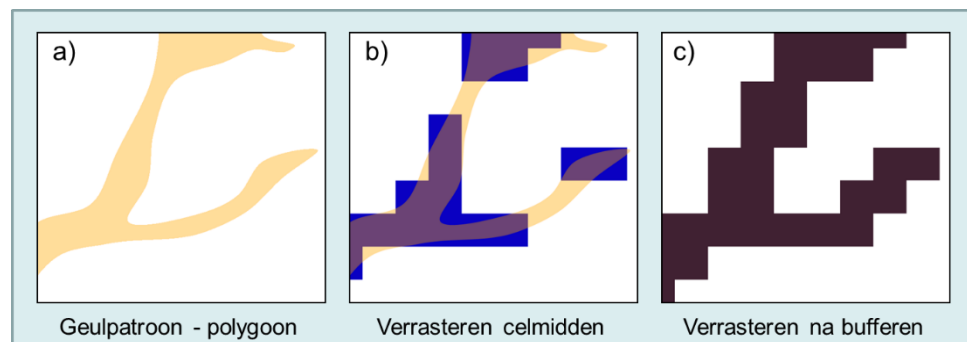
Voor een aantal stuurvlakken, zoals die van het Hollandveen Laagpakket, geldt dat ze na het doorlopen van processtap *Toekennen stratigrafie aan intervallen* worden bijgewerkt aan de hand van de geautomatiseerd geïnterpreteerde boorbeschrijvingen. De bijgewerkte stuurvlakken worden daarna nogmaals gebruikt voor een automatische interpretatie. Daarmee worden ook de processtappen *Toekennen 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 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 verbreiding, 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 5.3.4 a en b). Met name de connectiviteit van de geulpatronen in

de beekdalen, bijvoorbeeld van belang voor grondwatermodellering, kan erdoor verloren gaan.



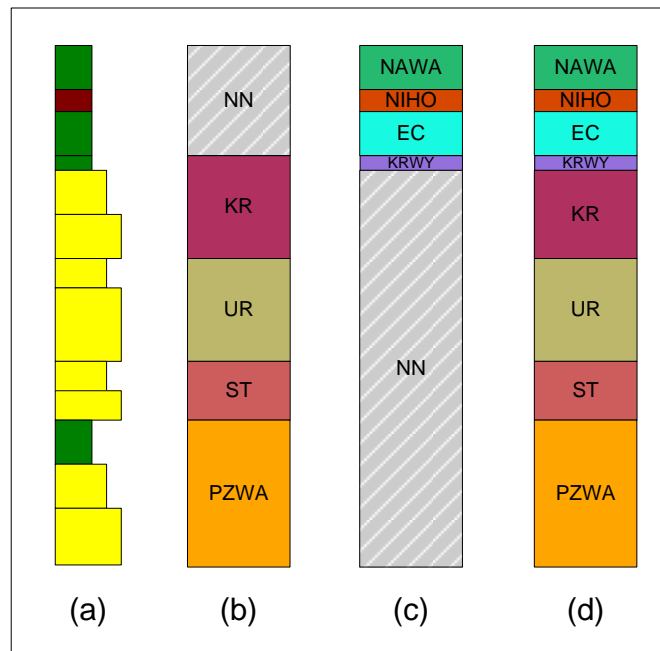
Figuur 5.3.4: Geulpatroon (a) met standaard GIS functionaliteit omgezet naar een raster met celgrootte 100 x 100 m (b). De connectiviteit in het geulpatroon gaat op twee locaties verloren. Door de polygoon eerst met een buffer te vergroten en daarna te verrasteren blijft de connectiviteit gewaarborgd (c).

Om dit verlies aan connectiviteit tegen te gaan worden de polygonen daarom eerst groter gemaakt door er een buffer van 35 m omheen te berekenen. Vervolgens wordt de gebufferde polygoon op de standaardmethode van ArcGIS verrasterd (Figuur 5.3.4 c).

Omdat de ondiep gelegen eenheden vaak een gedetailleerde verbreidingskaart hebben, worden vrijwel alle eenheden waarvoor de boringen automatisch geïnterpreteerd worden op deze manier verrasterd. Voor de verbreiding van de eenheid AAOP (Antropogeen opgebrachte grond) geldt dat het al een raster is.

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

In paragraaf 5.3.2 is beschreven hoe voor de automatisch te interpreteren 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 met elkaar gecombineerd. Bovendien wordt voor de boringen die onderdeel zijn van de 'selectieset handmatig' de handmatig toegekende stratigrafische indeling overgenomen. Bij het laatste geldt de regel dat een automatische interpretatie voorrang heeft op een handmatig toegekende interpretatie. Dit is in Figuur 5.3.5 geïllustreerd aan de hand van een geïdealiseerde boorbeschrijving.



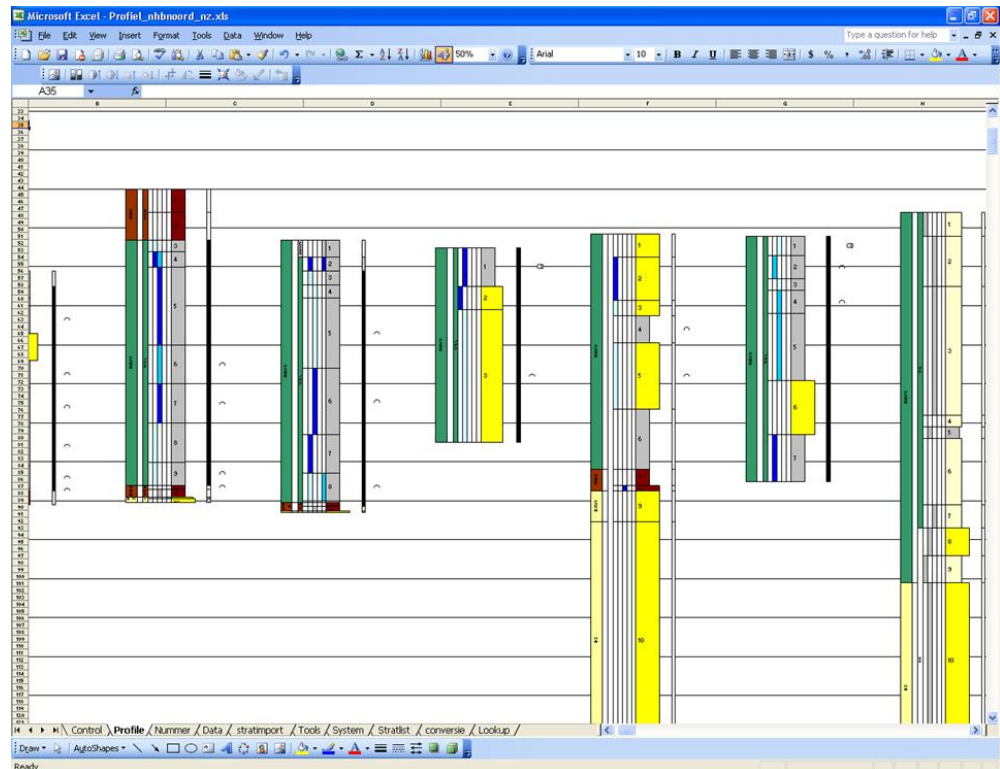
Figuur 5.3.5: Combineren van een handmatige en een automatische stratigrafische interpretatie van een geïdealiseerde boorbeschrijving die deel uitmaakt van de 'selectieset handmatig'. (a) Boorbeschrijving met klei in groen, veen in bruin en zand in geel; (b) Interpretatie van de handmatig te interpreteren eenheden KR, UR, ST en PZWA; (c) Interpretatie van de automatisch te interpreteren eenheden NAWA, NIHO, EC en KRWY; (d) Combinatie van de twee interpretaties. Merk op dat de automatisch geïnterpreteerde eenheid KRWY de handmatig geïnterpreteerde eenheid KR deels overschrijft. De aanduiding NN wil zeggen 'niet geïnterpreteerd'.

Omdat de automatisch geïnterpreteerde 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 kunnen ontstaan. Deze ongewenste volgordes worden gecorrigeerd in een serie correctiefilters. Tot slot kan het voorkomen dat er tussen de laagstgelegen automatisch geïnterpreteerde eenheid en de hoogstgelegen handmatig geïnterpreteerde eenheid nog een stukje zonder interpretatie overblijft. Dit stukje wordt vervangen door de hoogstgelegen handmatig geïnterpreteerde eenheid.

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.

### 5.3.7 Controleren stratigrafische indeling

De stratigrafische indeling van de boorbeschrijvingen worden door een gebiedskundig 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 hoogst 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.

### 5.3.8 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 in de juiste volgorde worden uitgevoerd. Om dat te ondersteunen is een *workflow manager* ontwikkeld in Microsoft Excel (Figuur 5.3.7).

1	Execu...	Action	Parameters	Program name	Script name	Parameters?	Parameter list	Logfile?	Logfile shortcut	Logfile name
2	0	2								
3	0	Remark								
4	0	Remark								
5	0	Header	Include Program?	Program name	Script name	Parameters?	Parameter list	Logfile?	Logfile shortcut	Logfile name
199	0	ChangeDir	bxwi							
200	0	RunScript	N	python	1_clip.py	N		Y	stratscript	Log_clippen.bat
201	0	RunScript	N	python	2_boormrs_shape2cav.py	N		Y	stratscript	Log_clippen.bat
202	0	RunScript	N	python	3_basidata_maken.py	N		Y	stratscript	Log_clippen.bat
203	0	ChangeDir	bxks							
204	0	RunScript	N	python	1_clip.py	N		Y	stratscript	Log_clippen.bat
205	0	RunScript	N	python	2_boormrs_shape2cav.py	N		Y	stratscript	Log_clippen.bat
206	0	RunScript	N	python	3_basidata_maken.py	N		Y	stratscript	Log_clippen.bat
207	0	RunScript	N	python	3a_buffer_en_dipacties.py	N		Y	stratscript	Log_clippen.bat
208	0	RunScript	N	python	3b_grids_clippen.py	N		Y	stratscript	Log_clippen.bat
209	0	RunScript	N	python	3c_grids_omzetten_naar_gunten.py	N		Y	stratscript	Log_clippen.bat
210	0	RunScript	N	python	3d_mak_buurke_basid_bvix_v1.py	N		Y	stratscript	Log_clippen.bat
211	0	ChangeDir	bxbs							
212	0	RunScript	N	python	01_clip.py	N		Y	stratscript	Log_clippen.bat
213	0	RunScript	N	python	02_boormrs_shape2cav.py	N		Y	stratscript	Log_clippen.bat
214	0	RunScript	N	python	03_basidata_maken.py	N		Y	stratscript	Log_clippen.bat
215	0	ChangeDir	niba							
216	0	RunScript	N	python	1a_clip_niho_zonder_droogmakerijen.py	N		Y	stratscript	Log_clippen.bat
217	0	RunScript	N	python	1b_clip_niho_op_pleistoceen.py	N		Y	stratscript	Log_clippen.bat
218	0	RunScript	N	python	1c_clip_niho_op_nawo.py	N		Y	stratscript	Log_clippen.bat
219	0	RunScript	N	python	2a_boormrs_shape2cav_niho_zonder_droogmakerijen.py	N		Y	stratscript	Log_clippen.bat
220	0	RunScript	N	python	2b_boormrs_shape2cav_niho_op_pleistoceen.py	N		Y	stratscript	Log_clippen.bat
221	0	RunScript	N	python	2c_boormrs_shape2cav_niho_op_nawo.py	N		Y	stratscript	Log_clippen.bat
222	0	RunScript	N	python	3a_basidata_maken.py	N		Y	stratscript	Log_clippen.bat
223	0	RunScript	N	python	3b_basidata_maken_dep_ondep.py	N		Y	stratscript	Log_clippen.bat
224	0	ChangeDir	nawo							
225	0	RunScript	N	python	1a_clip.py	N		Y	stratscript	Log_clippen.bat
226	0	RunScript	N	python	1b_clip_nawo.py	N		Y	stratscript	Log_clippen.bat
227	0	RunScript	N	python	2a_boormrs_shape2cav.py	N		Y	stratscript	Log_clippen.bat
228	0	RunScript	N	python	2b_boormrs_shape2cav_nawo.py	N		Y	stratscript	Log_clippen.bat
229	0	RunScript	N	python	3a_basidata_maken.py	N		Y	stratscript	Log_clippen.bat
230	0	RunScript	N	python	3b_basidata_reversed.py	N		Y	stratscript	Log_clippen.bat
231	0	RunScript	N	python	3c_basidata_maken_nawo.py	N		Y	stratscript	Log_clippen.bat
232	0	ChangeDir	na							
233	0	RunScript	N	python	01_clip.py	N		Y	stratscript	Log_clippen.bat
234	0	RunScript	N	python	02_extracte_boomnummers_shape2cav.py	N		Y	stratscript	Log_clippen.bat
235	0	RunScript	N	python	03_clip_basidata_1_geroort_totaal_banen.py	N		Y	stratscript	Log_clippen.bat

Figuur 5.3.7: Workflow manager voor werkproces **Interpretatie automatisch te interpreteren eenheden**.

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.

Behalve als hulpmiddel om de programmatuur uit te voeren, dient de *workflow manager* ook als documentatiemiddel. Het werkproces **Interpretatie automatisch te interpreteren eenheden** 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), waarbij voor de automatisch geïnterpreteerde geologische eenheden gerekend wordt met alle beschikbare boringen die het kwaliteitsfilter zijn gepasseerd. Voor de handmatig geïnterpreteerde eenheden wordt gerekend met de boringen die deel uitmaken van de 'selectieset handmatig'. 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.
  - Modelleren basis.
  - Maken consistent lagenmodel.
  - Berekenen standaarddeviatie.
  - Exporteren lagenmodel.
- Controleren lagenmodel.
- Berekenen kans op stratigrafie.

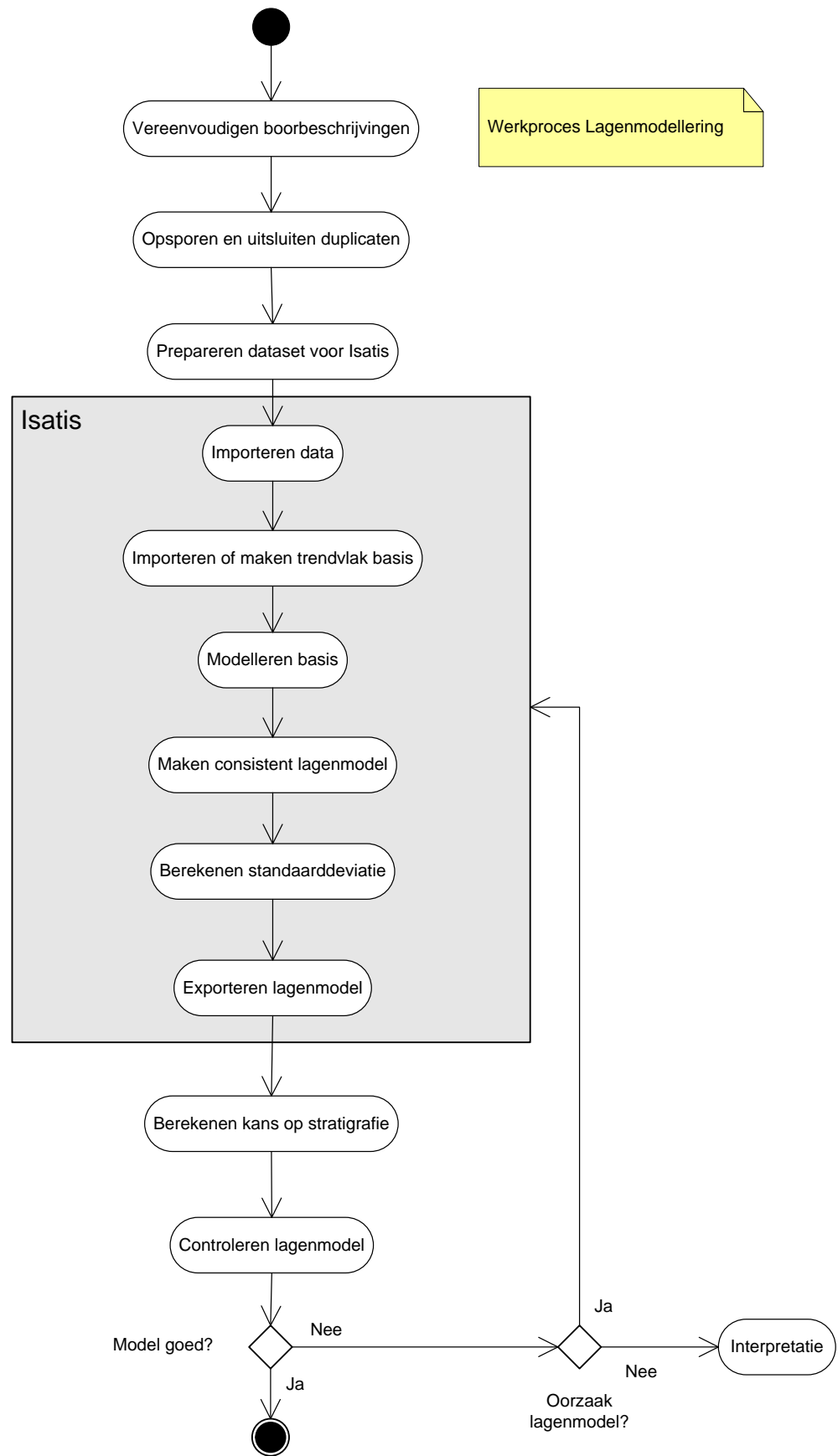
In onderstaande paragrafen wordt beschreven hoe het werkproces verloopt. Daarna wordt de processtap *Berekenen kans op stratigrafie* beschreven. Dit is een processtap die voorsorteert op processtap *Berekenen modelonzekerheden* in werkproces **Voxelmodellering**.

Het werkproces **Lagenmodellering** van DGM+, en daarmee van GeoTOP Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg, wijkt op twee punten in belangrijke mate af van de lagenmodellering van de eerder gemodelleerde GeoTOP-modelgebieden. Deze twee punten zijn:

- 1 In de eerder gemodelleerde GeoTOP modelgebieden wordt de diepteligging van de basis van elke gemodelleerde eenheid berekend met een stochastische interpolatietechniek die resulteert in 100 verschillende, maar statistisch gezien even waarschijnlijke realisaties van de basis. Uit de 100 realisaties wordt een gemiddelde basis berekend. Vervolgens wordt uit de gemiddelde basis van alle eenheden het lagenmodel samengesteld. In DGM+ wordt een interpolatietechniek gebruikt die direct resulteert in een gemiddelde uitkomst

van de diepteligging van de basis (paragraaf 5.4.6). Er zijn dus niet langer 100 realisaties beschikbaar.

- 2 In de eerder gemodelleerde GeoTOP modelgebieden wordt de onzekerheid in de diepteligging van de basis berekend uit de standaarddeviatie van de 100 realisaties. In DGM+ zijn echter geen realisaties meer beschikbaar en is een andere methode gevolgd om de onzekerheid te berekenen (paragraaf 5.4.10).



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 5.4.14 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 'BX' ligt in boring A op 5 m boven NAP, en in boring B op 6 m boven 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. In de selectieprocedure wordt voorrang gegeven aan boringen die tot de 'selectieset handmatig' horen. Zijn er dan nog duplicaten, dan wordt de boring met de meeste boorbeschrijvingsintervallen 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 geïnterpreteerde boorbeschrijvingen geconverteerd naar een formaat dat geschikt is als input voor Isatis®. Dit formaat omvat per te modelleren stratigrafische eenheid een bestand met daarin per boring de volgende gegevens:

- Boornummer.
- 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).
- Locatie (x,y).
- Type
- Herkomst

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 5.3.3 (paragraaf 5.3) geldt bijvoorbeeld dat eenheid PZWA alleen een minimale basis heeft; de overige eenheden worden volledig doorboord en hebben een basis.

Of een eenheid volledig doorboord (1), deels doorboord (2) of volledig afwezig (3) is wordt tevens aangegeven in het veld Type. Hiermee kan snel en eenvoudig de input data gecontroleerd worden.

In het veld Herkomst wordt bijgehouden waar de betreffende interpretatie van afkomstig is, van de geautomatiseerde stratigrafische interpretatie (10) of van de handmatige stratigrafische interpretatie (20).

Aan de geïnterpreteerde boorgegevens in het bestand worden de aan de geologische eenheid toegekende steunpunten toegevoegd. Steunpunten zijn fictieve boringen die gebruikt worden om het interpolatieproces in bij te sturen indien de boorgegevens zelf daarvoor ontoereikend zijn. Het maken van steunpunten is onderdeel van **Interpretatie handmatig te interpreteren eenheden** en beschreven in paragraaf 5.3 van het *Totstandkomingsrapport DGM* (Hummelman et al, 2019a). Door de steunpunten aan het inputbestand voor Isatis® toe te voegen zal Isatis® ze als boring beschouwen.

Naast de bestanden voor Isatis® worden per geologische eenheid nog twee afzonderlijke bestanden met boorpunten gemaakt, een met de boorlocaties waar de eenheid aanwezig is (type (1) en (2)) en een waar de eenheid afwezig is (type (3)). Deze bestanden worden gebruikt om de gegevens in ArcGIS te visualiseren en controleren. Gecontroleerd wordt of alle aanwezigheidspunten en toegekende steunpunten binnen de verbreiding van de eenheid voorkomen. Afwijkingen worden opgelost voordat de modellering in Isatis® start. Aanwezigheid en/of toegekende steunpunten mogen niet buiten een verbreiding liggen, terwijl afwezigheid wel binnen een verbreiding voor kan komen.

Deze processtap is grotendeels geautomatiseerd.

#### 5.4.4 Importeren data

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

- De geïnterpreteerde boorgegevens;
- De ‘wigpunten’ (zie paragraaf 5.4.6);
- De actuele- en/of potentiële verbreidingsgrens van de modeleenheid (raster).

Afhankelijk van de diepteligging van de geologische eenheid, de geologische complexiteit en het karteringsgebied zijn de volgende aanvullende databestanden van toepassing:

- Breuken shapefile waarin de breuksegmenten zijn opgenomen die tot in de basis van de modeleenheid doorwerken (lijnen).
- Breuksteunpunten (punten).
- Stuurvlakken (raster).
- Karteergebied (polygoon).

Het maken van breuksteunpunten en het karteergebied (voor enkele, diep gelegen eenheden) is onderdeel van **Interpretatie handmatig te interpreteren eenheden** en beschreven in paragraaf 5.3 van het *Totstandkomingsrapport DGM* (Hummelman et al, 2019a).

Verder wordt de volgende algemene informatie geïmporteerd:

- Het maaiveld- en waterbodemhoogtebestand van het modelgebied (raster).
- De begrenzing van het modelgebied (raster).

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

#### 5.4.5 *Importeren of maken trendvlak top en basis*

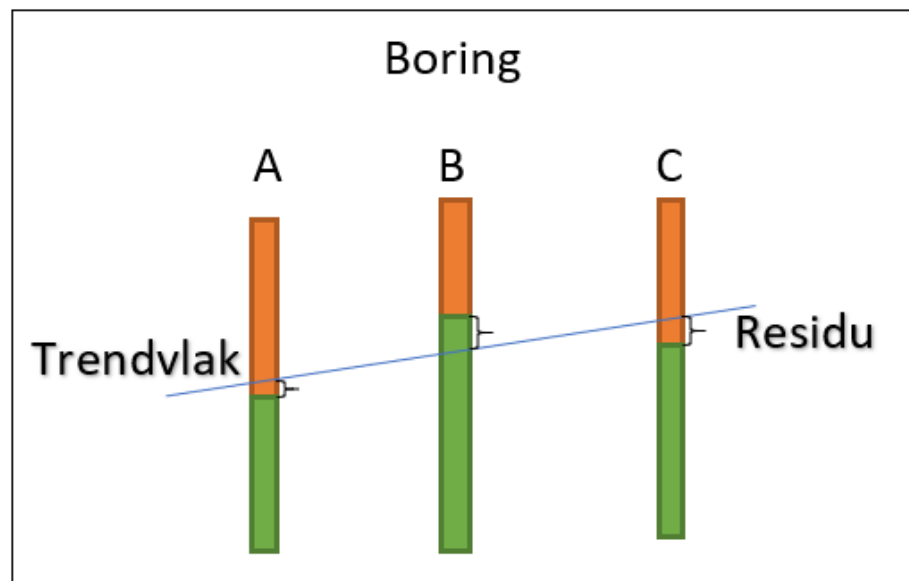
Om de regionale trend van de top en de basis vast te stellen worden trendvlakken berekend. Dit gebeurt met de *Linear Kriging* methode waarbij de top en de werkelijke bereikte basissen van de betreffende eenheid in de boringen worden geïnterpoleerd tot vlakken met een grove rastercelgrootte, bijvoorbeeld 500 x 500 of 1000 x 1000 m.

Voor eenheden met complexe structuren zoals de tunneldalen van de Formatie van Peelo geldt dat er als onderdeel van **Interpretatie handmatig te interpreteren eenheden** al een trendvlak van de basis geconstrueerd is. Zie hiervoor paragraaf 5.3 van het *Totstandkomingsrapport DGM* (Hummelman et al, 2019a).

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

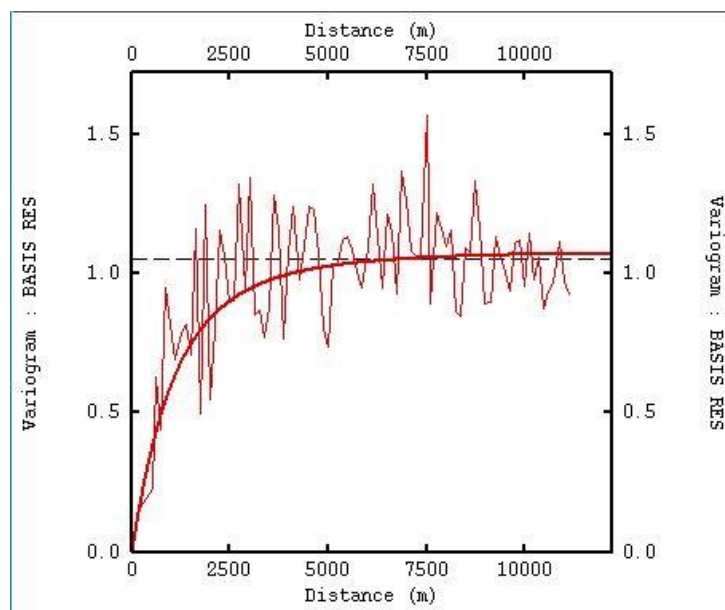
#### 5.4.6 *Modelleren basis*

Voor elke geologische eenheid worden de boringen die de basis van de eenheid bereikt hebben en de steunpunten vergeleken met het trendvlak. Het verschil tussen de boring (puntwaarneming) en het trendvlak heet een residu (Figuur 5.4.2). De grootte van een residu is een maat voor hoe goed het trendvlak overeenkomt met de data. Door het bepalen en modelleren van het residu worden eventuele grootschalige trends uit de data gehaald, waardoor de resterende ruimtelijke correlatie beter bepaald kan worden.



Figuur 5.4.2: Afleiding van residuen uit een trendvlak.

Van de residuen wordt de ruimtelijke correlatie bepaald en met behulp van een semi-variogram beschreven (Chilès & Delfiner, 2012; Figuur 5.4.3). Het bepalen van dit semi-variogram is een noodzakelijke, handmatige stap uitgevoerd door de modelleur in een verder geautomatiseerde procedure. De resultaten van de semi-variogramanalyse worden vastgelegd in de *workflow manager*.



Figuur 5.4.3: Voorbeeld van een semi-variogram van de Formatie van Urk, Laagpakket van Tynje. De dunne, rode lijn die sterk fluctueert, is het experimentele semi-variogram dat uit een statistische analyse van de data volgt. De dikke, rode lijn is het semi-variogram model 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.

*Block Kriging* 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 semi-variogram model dat de ruimtelijke correlatie beschrijft. Het

semi-variogram model zorgt ervoor dat dichterbij gelegen datapunten een groter gewicht krijgen in de interpolatie.

Het berekenen van de basis met behulp van *Block Kriging* wordt in meerdere stappen uitgevoerd. In eerste instantie wordt alleen met de datapunten gerekend waarin de basis ook werkelijk is aangetroffen. Hiermee is een eerste schatting van de basis gemaakt. Bij iedere stap wordt opnieuw het residu t.o.v. een nieuw berekend trendvlak bepaald. Na interpolatie van het residu wordt deze weer van het trendvlak afgetrokken om zo de nieuwe basis te verkrijgen.

In de tweede stap worden de wig- en de breuksteunpunten aan de selectie van aanwezig boringen toegevoegd. Deze wig- en breuksteunpunten hebben alleen een locatie (x,y) maar nog geen hoogte (z). Op basis van het in paragraaf 5.4.5 berekende trendvlak van de top wordt een waarde aan de wigpunten toegekend door op de (x,y)-coördinaat van het wigpunt de hoogteligging van het trendvlak af te lezen. Als blijkt dat de afgelezen waarde *kleiner* is dan de berekende basis in de eerste stap, dan wordt het betreffende wigpunt verwijderd. De basis heeft in dit geval de top namelijk al voor de rand van de potentiële verbreding gesneden en de eenheid zal hier daarom niet meer voorkomen. Indien de toegekende waarde *groter* is dan de in de eerste stap berekende basis, dan wordt dit wigpunt aan de dataset toegevoegd. De basis ligt op de rand van de verbreding en krijgt hier dezelfde waarde als de top (uitwigen) (Figuur 5.4.4). De breuksteunpunten krijgen op een vergelijkbare manier als bij de wigpunten een waarde uit het eerst berekende basisraster toegekend.

Met behulp van de nieuw samengestelde dataset met boorpunten, wigpunten en breuksteunpunten wordt een nieuw trendvlak en de hier van afgeleide residuen berekend. Vervolgens vindt nogmaals de interpolatie middels *Block Kriging* plaats en wordt het geïnterpoleerde residu weer van het trendvlak afgetrokken zodat er een verbeterde interpolatie van de basis ontstaat.

Boringen waar de eenheid niet in aangetroffen is worden in de volgende, derde stap meegenomen. Het niet aanwezig zijn van een eenheid geeft namelijk informatie op welke diepte de eenheid mogelijk zou hebben kunnen voorkomen. Dit is op een diepte tussen de stratigrafisch bovenliggende en onderliggende modeleenheid. Deze data wordt in deze derde stap aan de set toegevoegd.

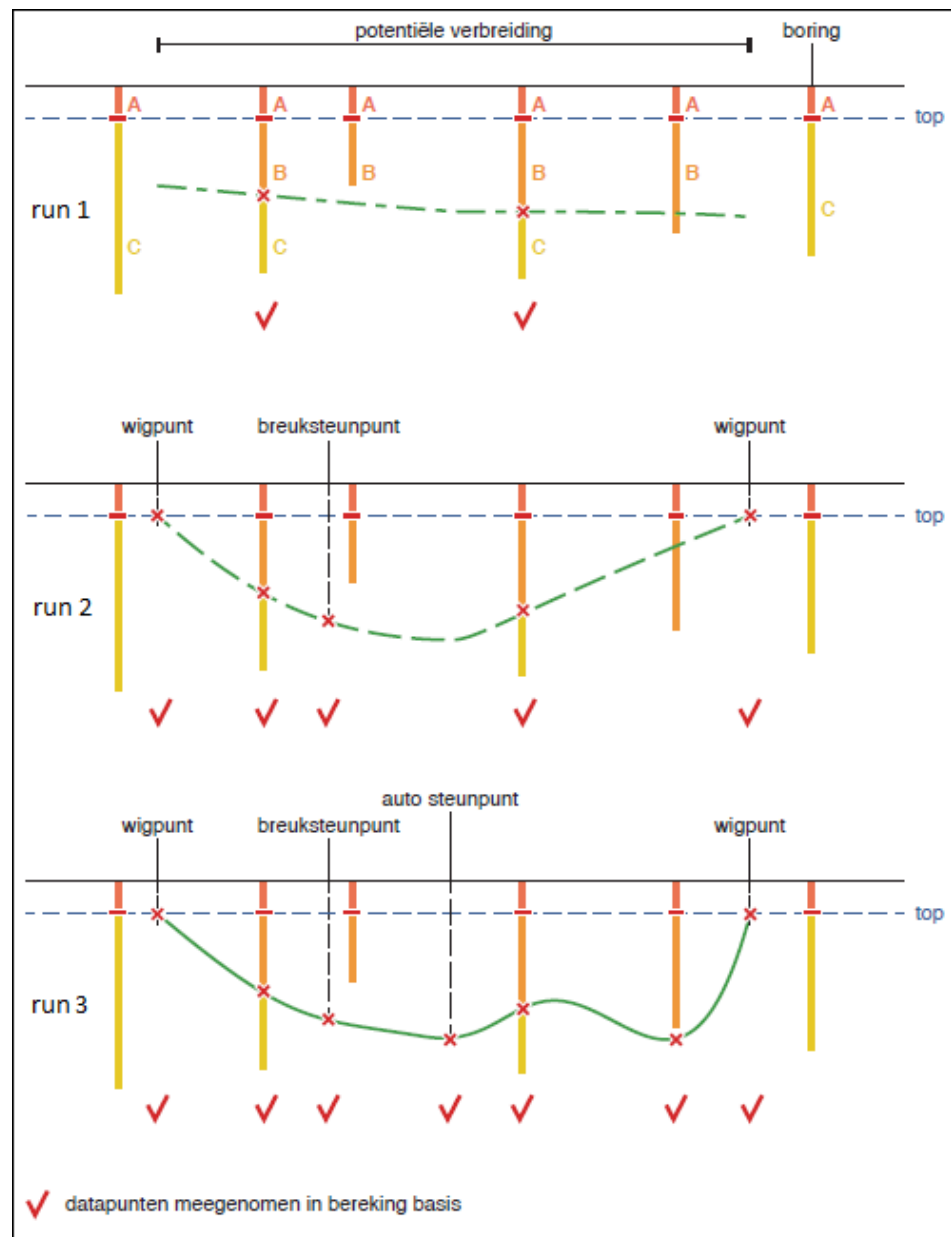
Omdat de basis langs de verbeidingsgrenzen naar de top toe uitwigt, bestaat de mogelijkheid dat de einddiepte van boringen, die niet de werkelijke basis hebben bereikt maar waarin de eenheid wel is aangetroffen, dieper ligt dan het geïnterpoleerde raster. Ondanks het feit dat deze boringen de basis van de eenheid niet bereikt hebben geven ze wel bruikbare informatie, namelijk de minimale diepteligging van de basis. In de vierde stap worden deze boringen met een minimale basis plus een halve meter (de basis van de eenheid wordt op een halve meter onder minimale basis gelegd) aan de set toegevoegd en wordt de interpolatieprocedure met de nieuwe set opnieuw herhaald. Op deze wijze wordt gewaarborgd dat de basis van de eenheid niet hoger komt te liggen dan de boringen met een minimale basis aangeven.

Om artefacten door datadichtheidsverschillen in de interpolatie te voorkomen, is een regelmatige verdeling van boorgegevens van belang. Helaas is er niet altijd sprake van een regelmatige ruimtelijke verdeling van meetgegevens. Daarom wordt



voor de laatste run onderzocht waar zich onregelmatigheden voordoen. Hierbij wordt nagegaan of de onderlinge afstand tussen boorlocaties niet groter is dan een van te voren opgegeven minimale onderlinge afstand. In gebieden waar deze afstand wordt overschreden wordt middels een geautomatiseerde functie zogenaamde autosteunpunten toegevoegd die een waarde toegekend krijgen uit de voorlaatste run. De minimale onderlinge afstanden kunnen per modelleenheid verschillen en wordt in de *workflow manager* vastgelegd. Op deze wijze worden artefacten ontstaan door datadichtheidsverschillen ondervangen.

Afgezien van de semi-variogram analyse is de gehele processtap geautomatiseerd; de batchinstructies voor Isatis® inclusief de semi-variogram modellen en de neighborhoods liggen vast in de *workflow manager*.

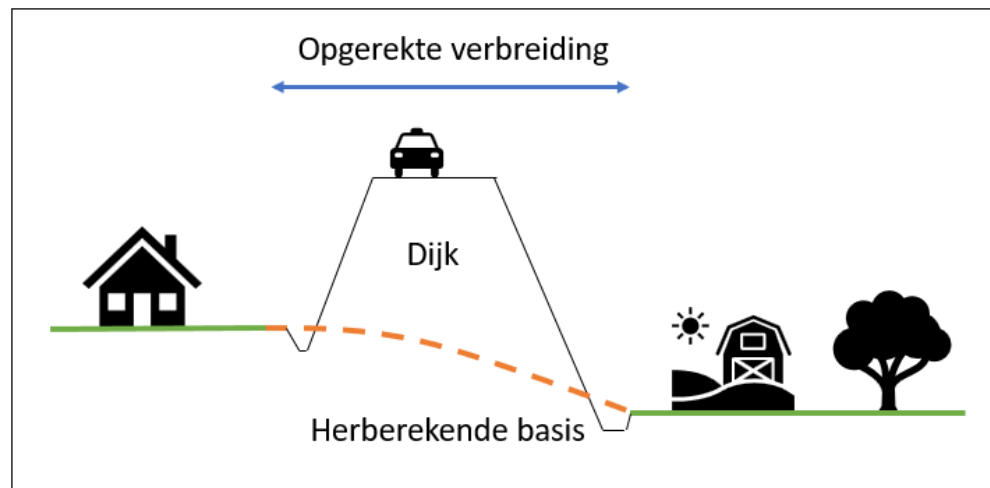


Figuur 5.4.4: De invloed van het meenemen van wigpunten, breuksteunpunten, auto-steunpunten en minimale basis voor de berekening van de basis van de 'oranje' modelleenheid in drie achtereenvolgende modelruns.

#### 5.4.7 *Uitzondering: Antropogeen*

Er geldt een uitzondering voor de eenheid Antropogeen. Naast een grote hoeveelheid geïnterpreteerde boorbeschrijvingen worden ook primaire dijken, primaire waterkeringen, storten en autosnelwegen in de modellering meegenomen. Om een zo goed mogelijke basis van het antropogeen te modelleren, worden de volgende stappen gevolgd:

1. Boringen binnen de antropogene verbreiding (paragraaf 5.2.8) waarin geen antropogeen afzetting (AAOP) is geïnterpreteerd, worden vergeleken met het maaiveld. Is de top van de boring lager dan het maaiveldraaster ter plaatse, dan wordt de top van de boring als basis voor het AAOP meegenomen. Het verschil tussen top boring en maaiveld is de dikte van het antropogeen. Hiermee worden oudere boringen van voor een lokale ophoging, toch in het bepalen van de basis van het AAOP meegenomen.
2. Er wordt een kopie van het maaiveldraaster gemaakt. De verbreidingsrasters van de primaire dijken, - waterkeringen en storten worden met 1 rastercel 'opgerekt'. Daar waar deze 'opgerekte' verbreiding aanwezig is worden de waarden uit het gekopieerde maaiveldraaster verwijderd. Door de lege rastercellen op basis van omliggende rastercellen opnieuw te berekenen, wordt als het ware een nieuw vlak *onder* de primaire dijken, - waterkeringen en storten gecreëerd (Figuur 5.4.5). Als standaard deviatie wordt hier de standaard deviatie van het maaiveldraaster overgenomen.
3. Er wordt aangenomen dat onder iedere autosnelweg een zandcunet (fundering) van 2 m aanwezig is. Het raster met de autosnelwegen wordt op dezelfde wijze 'opgerekt' als beschreven in stap 2. Er wordt een nieuw raster gemaakt door te plaatse van de 'opgerekte' verbreiding een waarde te berekenen van maaiveldhoogte minus 2 m. De standaarddeviatie wordt overgenomen van het maaiveldraaster. Hiermee wordt onder iedere autosnelweg als het ware een bakje van 2 m onder maaiveld gecreëerd.
4. Op dezelfde wijze als in paragraaf 5.4.6 beschreven wordt vanuit de geïnterpreteerde boorbeschrijvingen de basis en de standaard deviatie voor het AAOP berekend;
5. De in paragraaf 5.2.8. samengestelde antropogeen verbreiding wordt samengevoegd met de primaire dijken en -waterkeringen en met de autosnelwegen tot een nieuw antropogeen verbreidingsraaster;
6. Binnen de nieuwe antropogeen verbreiding wordt nu de laagste waarde uit de verschillende onder de stap 2, 3 en 4 berekende rasters geselecteerd. Het resultaat is een raster met de meest waarschijnlijke diepteligging van de basis van de antropogene eenheid. Gelijktijdig wordt de hierbij behorende standaard deviatie uit de verschillende rasters overgenomen.



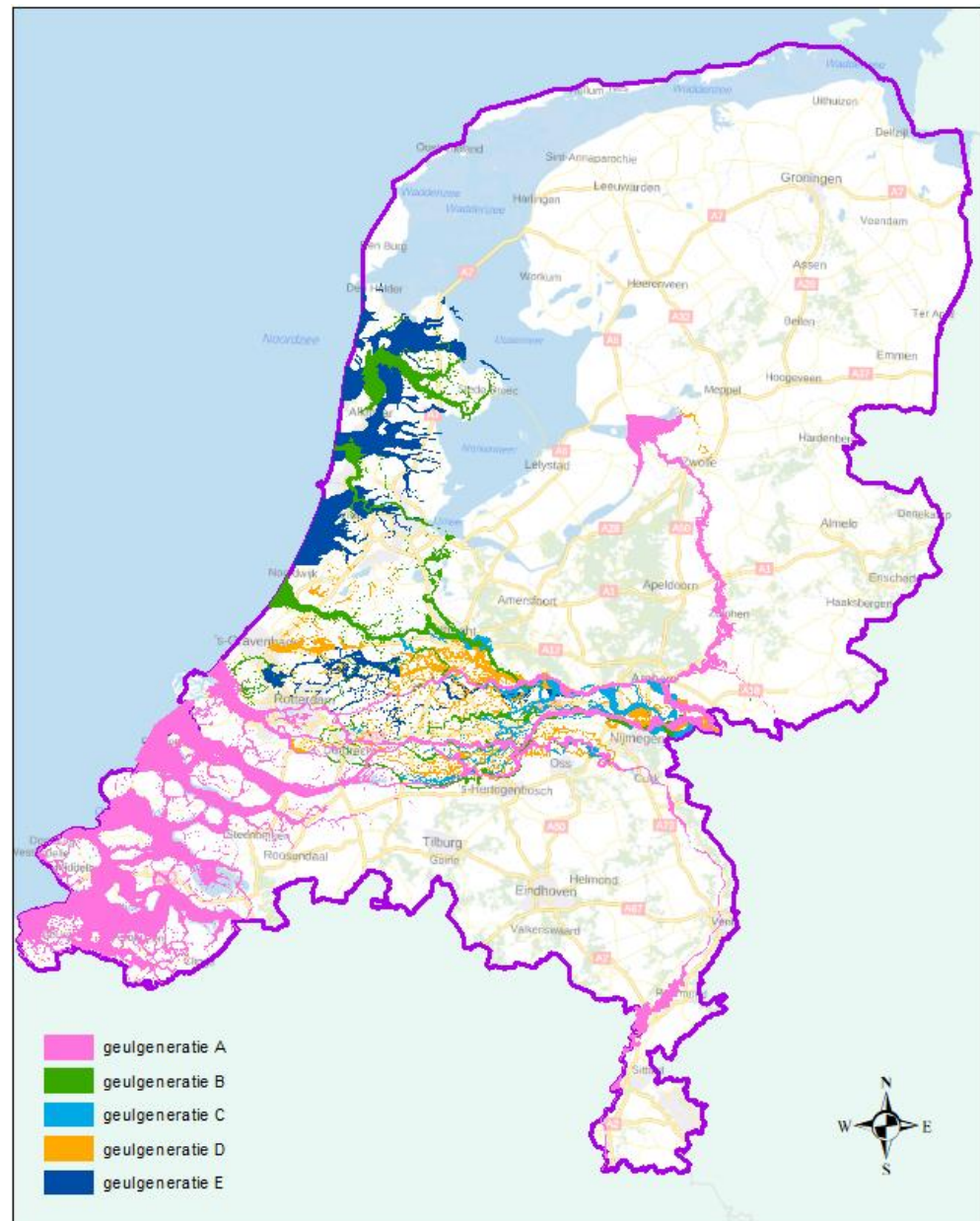
Figuur 5.4.5 Berekening van de basis AAOP onder dijken, waterkeringen en storten door maaiveldhoogte ter plaatse van de 'opgerekte' verbreiding te verwijderen en middels omliggende rasterdata de ontstane leemten op te vullen.

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

#### 5.4.8 Uitzondering: Holocene geulsystemen

In de hierboven beschreven processtappen is van elke geologische eenheid een basis raster berekend. De top- en dikte rasters van elke eenheid worden, zoals in hiernavolgende paragraaf beschreven, tijdens het consistent maken afgeleid uit de bovenliggende geologische eenheden. Een uitzondering hierop vormt het modelleren van de Holocene geulsystemen van onder andere Rijn, Maas en IJssel, waar naast de hoogteligging van de basis ook die van de top berekend wordt.

De Holocene geulsystemen zijn onderverdeeld in een vijftal verschillende geulgeneraties A t/m E waarbij generatie A de jongste, minst diep gelegen geulen omvat en generatie E de oudste, diepst gelegen geulen (Figuur 5.4.6). De generatie-indeling geeft naast informatie over de relatieve diepteligging ook informatie over afsnijdingsrelaties: jongere geulsystemen kunnen oudere doorsnijden.



Figuur 5.4.6: Verbreiding van de verschillende geulgeneraties van de Holocene geulsystemen.

Een geul behoort niet alleen tot een geulgeneratie, maar ook tot een geologische eenheid. In Figuur 5.4.6 is bijvoorbeeld te zien dat geulgeneratie A bestaat uit Maasafzettingen (Formatie van Beegden, Laagpakket van Oost-Maarland), afzettingen van de Rijn en IJssel (Formatie van Echteld) en getijdengeulafzettingen bij Rotterdam en in Zeeland (Formatie van Naaldwijk, Laagpakket van Walcheren). De tien mogelijke combinaties van geulgeneratie en geologische eenheid zijn aangegeven in Tabel 5.4.1.

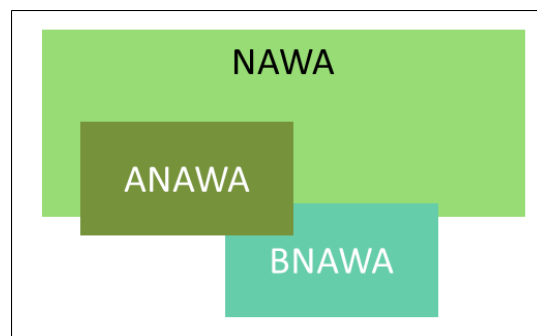
Tabel 5.4.1: De tien mogelijke combinaties van geulgeneratie en geologische eenheid.

Geologische eenheid		Geulgeneratie				
Code	Naam	A	B	C	D	E
BEOM	Fm. van Beegden, Lp. van Oost-Maarland	X				
NAWA	Fm. van Naaldwijk, Lp. van Walcheren	X	X			
EC	Fm. van Echteld	X	X	X	X	X
NAWO	Fm. van Naaldwijk, Lp. van Wormer				X	X

De top en basis wordt voor elke geulgeneratie afzonderlijk berekend. Dit wordt gedaan om te waarborgen dat top en basis van een geulgeneratie bij de laterale overgang van de ene geologische eenheid naar de andere goed op elkaar aansluiten. Na afloop van het modelleerproces zoals dat in paragraaf 5.4.6 voor de basis is beschreven worden, voorafgaand aan het consistent maken van de reguliere eenheden, de resulterende top en basisrasters 'pre-consistent' gemaakt:

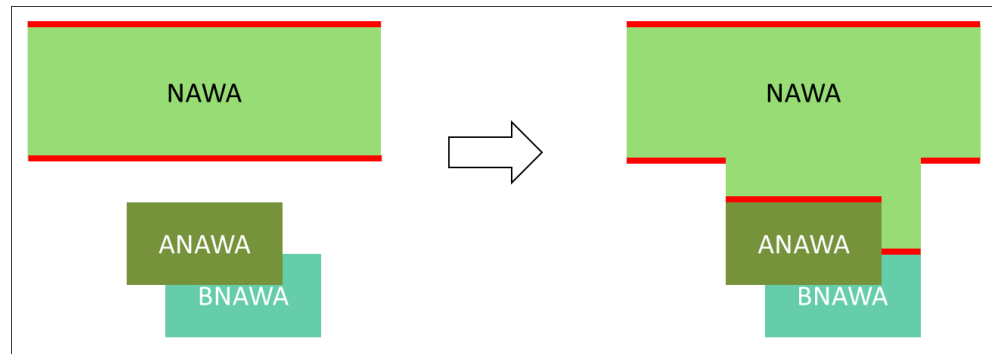
- Elke geulgeneratie wordt eerst consistent gemaakt met het maaiveld en de antropogene afzettingen (als de top hoger ligt dan het maaiveld of de basis van de antropogene afzettingen dan wordt de top verlaagd);
- Vervolgens worden de onafhankelijk van elkaar berekende top en basis onderling consistent gemaakt (als de top onder de basis ligt wordt de geul verwijderd);
- Tot slot wordt elke geulgeneratie met de oudere geulgeneraties consistent gemaakt, waarbij een jongere geulgeneratie de oudere geulgeneraties erodeert.

Vervolgens worden de geulgeneraties aan de hand van de verbreidingen per geologische eenheid opgesplitst zodat er tien sets van top en basisrasters ontstaan (een voor elke mogelijke combinatie van geulgeneratie en geologische eenheid). In de regel zullen de geulgeneraties overlappen met de reguliere eenheid (Figuur 5.4.7).



Figuur 5.4.7: Schematische dwarsdoorsnede door geulsystemen ANAWA en BNAWA die overlappen met de corresponderende reguliere eenheid NAWA. De jongere geulgeneratie ANAWA erodeert bovendien de oudere, dieper gelegen geulgeneratie BNAWA.

Het kan echter voorkomen dat een geulgeneratie geheel onder de corresponderende geologische eenheid ligt. In dit geval wordt de basis van de reguliere eenheid verlaagd naar de top van de geulgeneratie (Figuur 5.4.8).



Figuur 5.4.8: Links: schematische dwarsdoorsnede door geulsystemen ANAWA en BNAWA die geheel onder de corresponderende reguliere eenheid NAWA liggen. Rechts: de basis van de reguliere eenheid wordt verlaagd tot de top van de geulsystemen. De rode lijnen stellen de top en basis van de reguliere eenheid NAWA voor.

De pre-consistente gemaakte top- en basisrasters van de geulsystemen vormen, samen met de basissen van alle overige reguliere eenheden, het uitgangspunt voor het maken van een consistent lagenmodel.

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

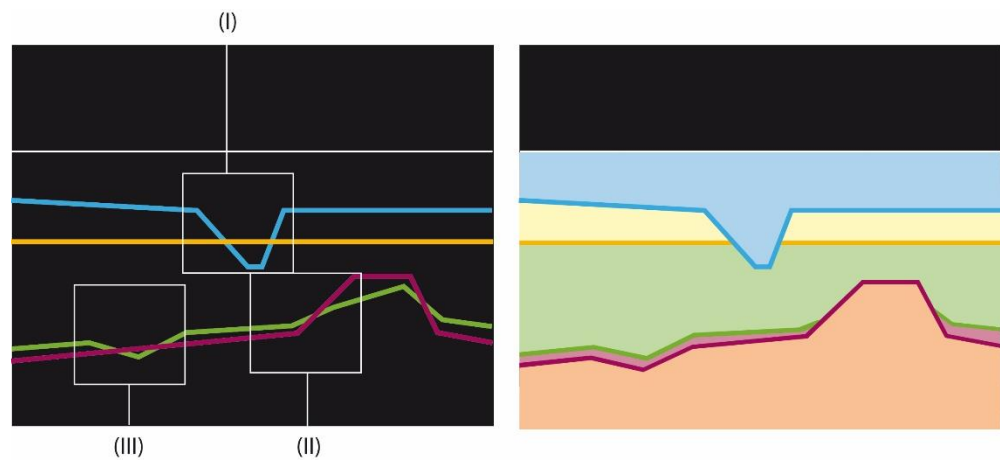
#### 5.4.9 *Maken consistent lagenmodel*

In deze processtap worden de 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. Bij het consistent maken worden de 'pre-consistent' gemaakte geulsystemen gehonoreerd, dat wil zeggen dat de top en basis van de geulsystemen bij het consistent maken niet meer veranderen.

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 5.4.9):

- I. De bovenliggende eenheid heeft de onderliggende eenheid geërodeerd. In dit geval wordt de onderliggende eenheid geclept 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 geclept 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. Bijvoorbeeld als een basis van de dunne eenheid abusievelijk veelvuldig wordt weggesneden door de basis van bovenliggende eenheden, terwijl bekend is dat de eenheid binnen de verspreidingsgrenzen vrijwel overal voorkomt. In dit geval wordt de basis van de onderliggende eenheid verlaagd tot een vaste waarde onder de basis van de bovenliggende eenheid.

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



Figuur 5.4.9: 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.

Na het consistent maken van de basisvlakken wordt voor elke eenheid een top-vlak afgeleid van de bovenliggende basisvlakken. Ook de standaarddeviatie van de top wordt overgenomen 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 volledig geautomatiseerd; de batchinstructies voor Isatis® liggen vast in de *workflow manager*.

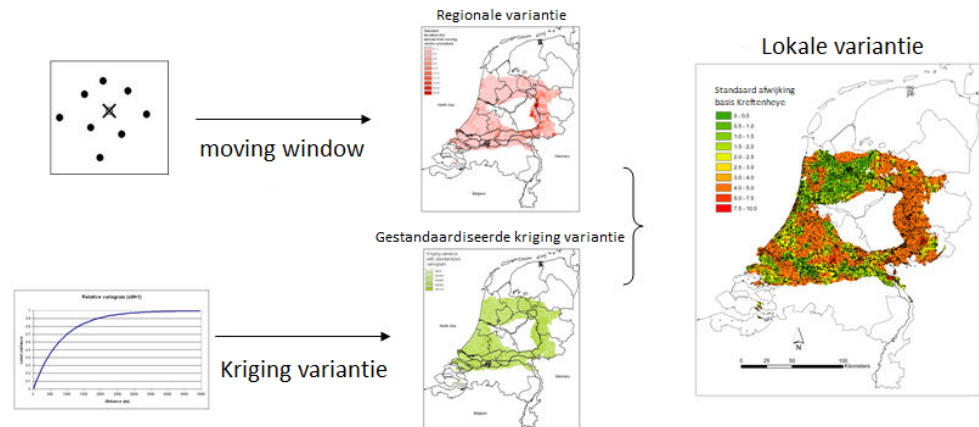
#### 5.4.10 Berekenen standaarddeviatie

Er wordt een onzekerheid berekend bij de niet-consistent gemaakt basis van iedere geologische eenheid. Vervolgens wordt de onzekerheid van de bij het consistent maken afgeleide top gelijk gesteld aan de onzekerheid van de bovenliggende berekende geologische basis. Uitzondering hierop vormen de Holocene geusystemen waarbij een onzekerheid voor zowel de basis als de top is berekend. De onzekerheid van de dikte wordt daarna afgeleid uit de onzekerheid van de top, de onzekerheid van de basis en de correlatiecoëfficiënt daartussen welke berekend wordt uit de geometrie van de top en de basis.

#### Algemene methodiek

De geometrie van geologische eenheden wordt gemodelleerd door de diepteligging van de basis van iedere eenheid afzonderlijk te berekenen. Omdat bij het modelleren van de eenheden niet alleen gebruik gemaakt wordt van informatie uit boringen, maar ook van aanvullende geologische kennis in de vorm van stuurvlakken, steunpunten, wigpunten en breuklijnen, levert de kriging-variantie geen goed bruikbare maat op voor onzekerheid. Voor onzekerheidsbepaling van het lagenmodel wordt daarom gebruik gemaakt van een door TNO ontwikkelde methode zoals beschreven in Gunnink et al. (2010), verder uitgewerkt in Dabekaussen en Hummelman (2018) (Figuur 5.4.10).

Met de op cross-validatie gebaseerde methode wordt eerst een *regionale standaardafwijking* berekend: de onzekerheid van het model 'ver weg' van de boorlocaties. Gebaseerd op het semi-variogram wordt vervolgens een factor voor *datanabijheid* bepaald. Hiervoor worden alle doorboorde boorlocaties van de betreffende eenheid gebruikt. Dit resulteert in een raster met waarden tussen 0 (dicht bij data) en 1 (ver van data). De *lokale standaardafwijking* is vervolgens het product van de *regionale standaardafwijking* en de factor voor *datanabijheid*.

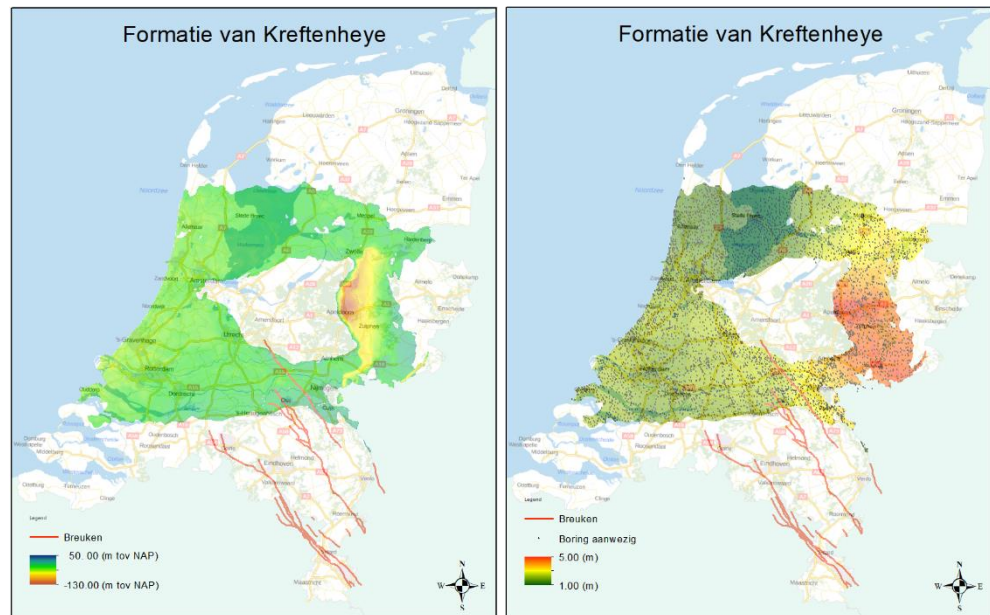


Figuur 5.4.10: Stroomschema voor de berekening van de lokale standaardafwijking uit de met behulp van een moving window berekende regionale standaardafwijking en de met behulp van de kriging variantie berekende factor voor datanabijheid, weergegeven voor de Formatie van Kreftenheye.

### Regionale standaardafwijking

De regionale onzekerheid wordt berekend op basis van cross-validatie. Hierbij wordt de waarde berekend van het basisvlak op een boorlocatie, zoals die zou zijn berekend op basis van de omliggende boringen indien de betreffende boring er niet zou zijn geweest. Het verschil tussen de werkelijke waarde en de met cross-validatie voorspelde waarde van het basisvlak is van belang voor de berekening van de regionale onzekerheid. Per rastercel wordt vanuit de 15 dichtstbijzijnde boorlocaties een gemiddelde standaardafwijking van de verschillen tussen werkelijke en geschatte waarden berekend (Figuur 5.4.11).





Figuur 5.4.11: Links: voorbeeld van de berekende basis van de Formatie van Kreftenheye. Rechts: de berekende regionale standaardafwijking voor deze basis.

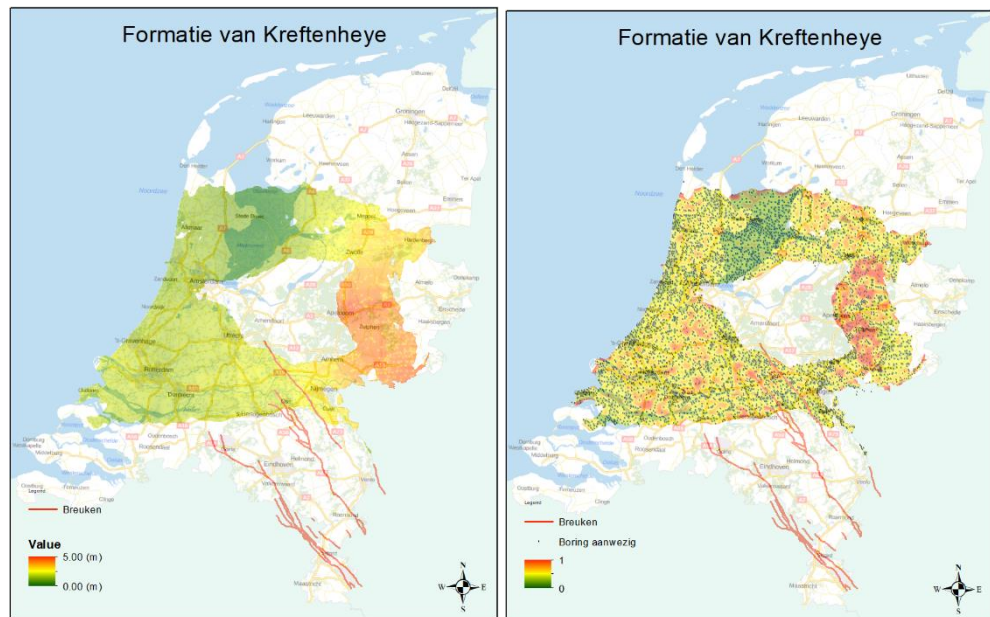
### Datanabijheid

De ruimtelijke correlatie is vastgelegd in het semi-variogram. De kriging standaardafwijking die wordt berekend bij de interpolatie van het residu kan nu worden gebruikt als maat voor de datanabijheid, aangezien de grootte van deze kriging standaardafwijking afhankelijk is van de configuratie van de data rond de te schatten locatie. Een genormaliseerde kriging standaardafwijking met waarden tussen 0 (dicht bij data) en 1 (ver van data), kan nu worden berekend.

### Lokale standaardafwijking

De lokale standaardafwijking kan nu eenvoudig berekend worden door de regionale standaardafwijking te vermenigvuldigen met de factor die de datanabijheid beschrijft.

In het resultaat (Figuur 5.4.12 rechts) zijn duidelijk de locaties van de gebruikte boringen voor de berekening van de basis van de geologische eenheid herkenbaar. Op deze locaties zijn de onzekerheden dan vele malen kleiner dan op plaatsen waar geen boringen beschikbaar zijn. Buiten de correlatie-afstand, die beschreven is met behulp van het semi-variogram, wordt de onzekerheid volledig bepaald door de eerdere bepaalde regionale variantie.



Figuur 5.4.12: Links: voorbeeld van de berekende genormaliseerde kriging standaardafwijking (datanabijheid factor) voor de Formatie van Kreftenheye. Rechts: het resultaat van het product van de regionale standaardafwijking met deze datanabijheid factor (de lokale standaardafwijking).

Deze processtap is volledig geautomatiseerd; alle instructies voor Isatis® inclusief de genormaliseerde semi-variogrammen zijn vastgelegd 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
<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 van de basis van de eenheid
<eenheid code>_std_tcc.asc	Standaarddeviatie van 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 gebiedskundige geoloog gecontroleerd. Hij doet dit in samenhang met de stratigrafische indeling van de boorbeschrijvingen en de

verbreidingsgrenzen. Het resultaat van de stratigrafische indeling en de verbreidingen hebben immers een groot effect op het lagenmodel.

De controlerend geoloog beoordeeld 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 verbreidingen in vergelijking met de potentiële verbreiding. 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 automatisch te interpreteren eenheden**. 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:

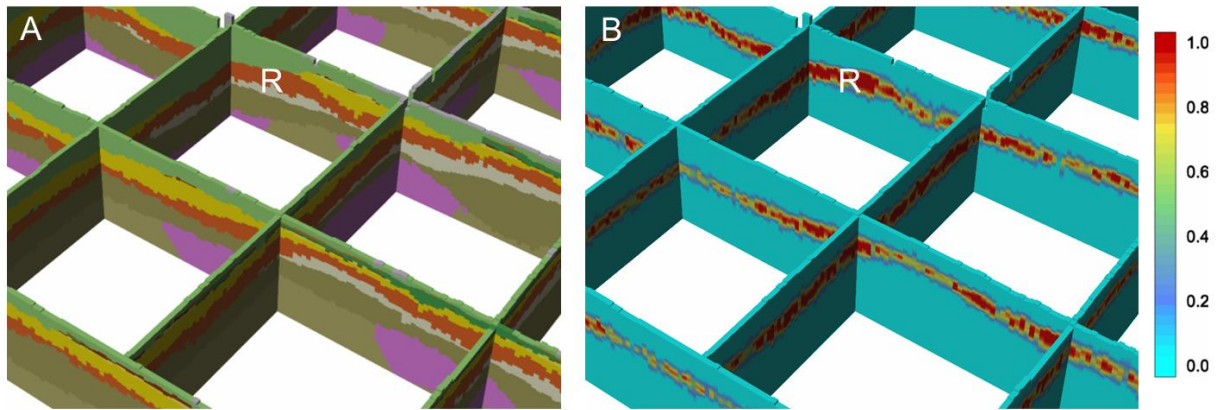
$$N\left(\mu_2 + \rho_{12} \cdot \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \cdot (z_1 - \mu_1), (1 - \rho_{12}^2) \cdot \sigma_2^2\right)$$

(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: (a): Fencediagram door het voxelmodel met de geologische eenheid als attribuut, waaronder de rode eenheid 'R'. (b): Kans dat de voxels tot de rode eenheid 'R' behoren. Voxels die ruimschoots binnen de eenheid liggen hebben een kans van 1 om tot de eenheid te horen. Dichter naar de top en basis toe neemt de kans echter af. Ver boven en onder de eenheid is de kans 0.

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.

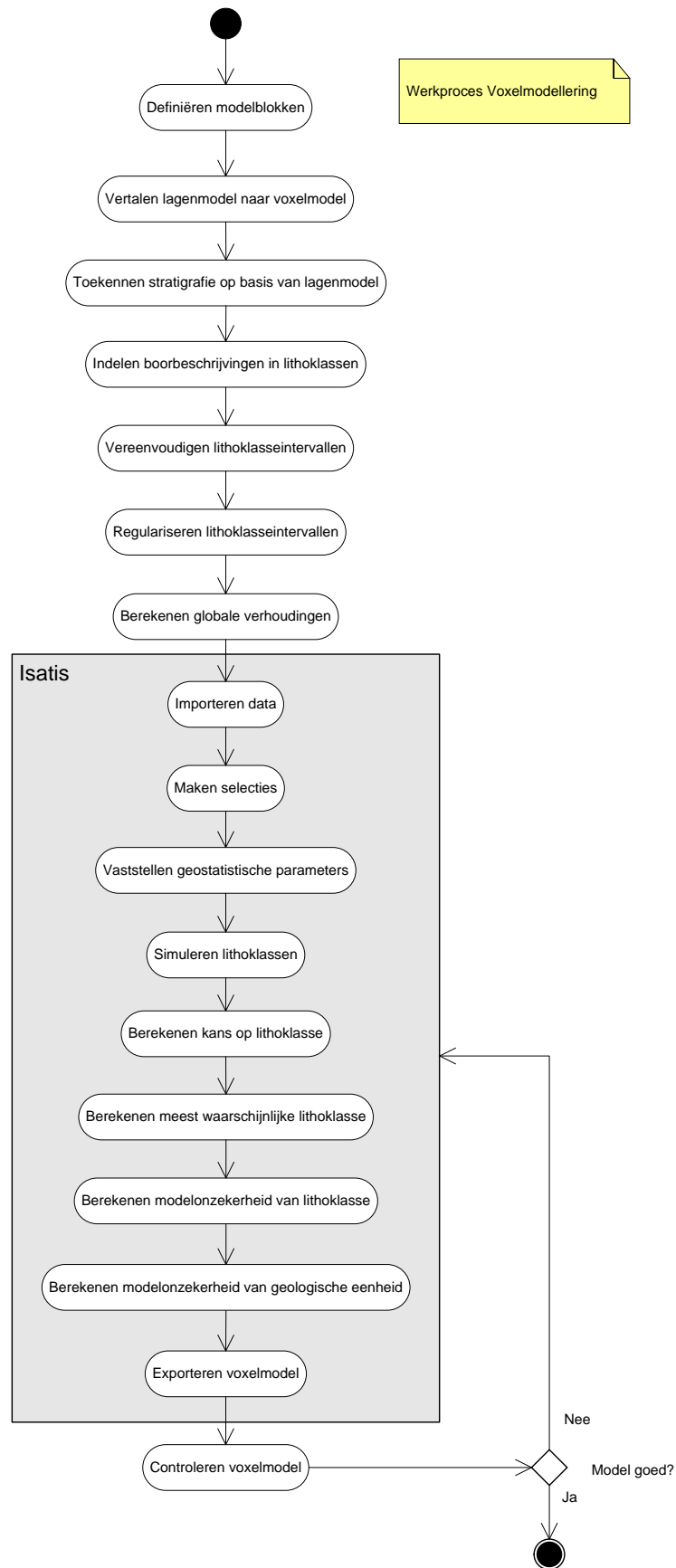
De batchgewijze aansturing van Isatis® gebeurt met zogenaamde *journal-files*, waarin instructies voor Isatis® zijn opgenomen. Deze instructies worden vervolgens door Isatis® sequentieel verwerkt. Het handmatig samenstellen van *journal-files* is niet eenvoudig. Daarom is in Microsoft Excel een zogenaamde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



- Simuleren lithoklassen.
- Berekenen kans op lithoklasse.
- Berekenen meest waarschijnlijke lithoklasse.
- Berekenen modelonzekerheid van lithoklasse.
- Berekenen modelonzekerheid van geologische eenheid.
- Exporteren voxelmodel met alle attributen.
- Controleren voxelmodel.

In onderstaande paragrafen wordt beschreven hoe het werkproces verloopt.

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



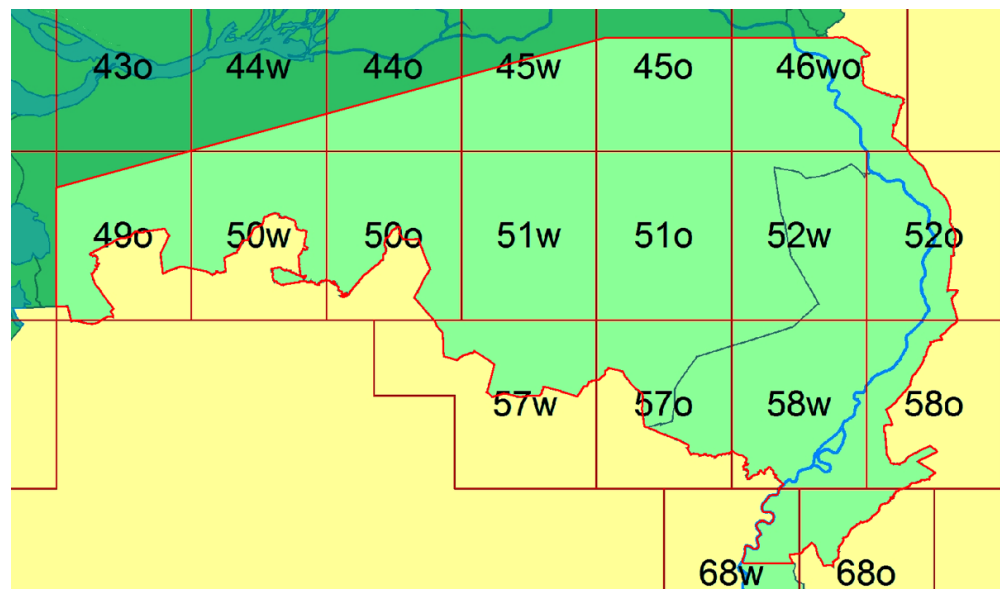
Het belangrijkste deel van het werkproces, weergegeven met een grijs blok in Figuur 5.5.1, wordt met behulp van het softwarepakket Isatis® van de Franse firma Geovariances uitgevoerd.

NB: in werkproces Lagenmodellering is sprake van een processtap *Opsporen en uitsluiten duplicaten*. Deze processtap hoeft hier niet toegepast te worden omdat Voxellmodellering uitgaat van exact dezelfde set aan boringen 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. Voor Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg komen de blokken overeen met kaartbladen van de Topografische Kaart van Nederland 1:25:000 (uitgave 1961), en daarvan de indeling in 'west' en 'oost' blokken. In de regel zijn deze blokken 20 x 25 km (x, y) (Figuur 5.5.2). Voor de overige modelgebieden is per modelgebied een passende blokindeling gemaakt; in de toekomst zal de indeling volgens de kaartbladen worden gehandhaafd.



Figuur 5.5.2: Onderverdeling van modelgebied Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg (lichtgroene gebied) in 19 blokken die overeenkomen met kaartbladen van de Topografische Kaart van Nederland 1:25:000 (uitgave 1961).

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 bloksgrens). 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.

Het aantal voxels in de verticaal varieert van blok tot blok afhankelijk van de maximale maaiveldhoogte in het blok dan wel in het modelgebied als geheel.

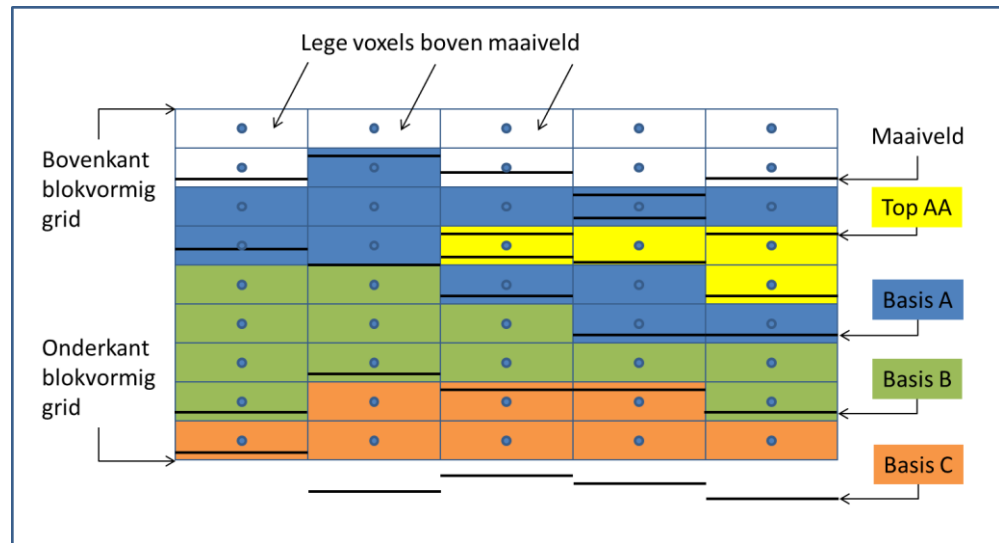
Het vaststellen van de blokgrenzen is een handmatige processtap, met ArcGIS en Excel als hulpmiddel. De definities van de blokken (nummer, (x,y,z)-locatie van de oorsprong, aantal voxels in (x,y,z)-richting) worden opgenomen in de *workflow manager*.

#### 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 geldt dat de basis van een eenheid ofwel samenvalt met een of meerdere toppen van dieper gelegen eenheden, ofwel aan de onderkant van het model ligt. Uitzonderingen op deze regel zijn eenheden die binnen een andere eenheid voorkomen, zoals het Laagpakket van Liempde dat geheel binnen de Formatie van Boxtel ligt.

Een logisch gevolg van een consistent lagenmodel is dat elk willekeurig punt in de ruimte (binnen de begrenzings van het modelgebied) zich altijd tussen de top en basis van één enkele modeleenheid bevindt. Voor bovengenoemde uitzonderingen geldt echter dat een punt zich tussen de top en basis van twee modeleenheden kan bevinden. In het voorbeeld ligt een punt tussen top en basis van het Laagpakket van Liempde namelijk ook tussen de top en basis van de Formatie van Boxtel zelf.

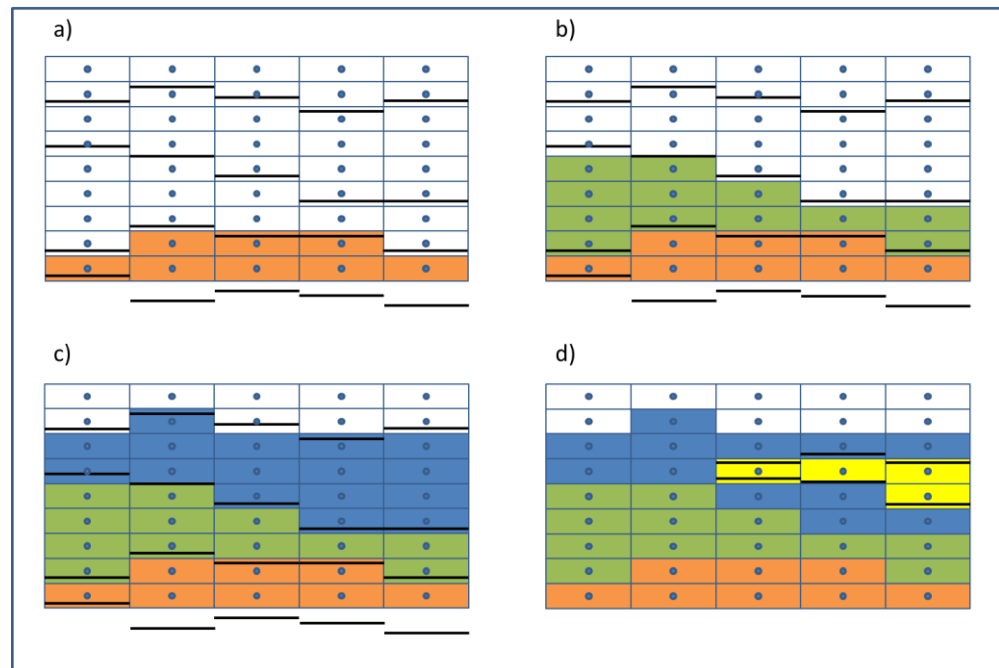
Deze overwegingen gebruiken we om van de middelpunten van voxels te bepalen tot welke stratigrafische eenheid ze behoren. In Figuur 5.5.3 is de werkwijze schematisch weergegeven. De figuur toont een dwarsdoorsnede door een blokvormig grid van 5 x 9 voxels. Het lagenmodel bestaat uit vier stratigrafische eenheden: A, AA, B en C waarvan de basis als zwarte lijnstukken wordt getoond. Eenheid AA ligt in zijn geheel binnen eenheid A. Van deze eenheid is ook de top met zwarte lijnstukken weergegeven. 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 waterbodemoogte raster.



Figuur 5.5.3: Vertaling van geologische 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, c en d):

- a) 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.
- b) Doe hetzelfde voor de stratigrafisch hoger gelegen eenheid B.
- c) Doe nogmaals hetzelfde voor de stratigrafisch hoger gelegen eenheid A.
- d) Doe nogmaals hetzelfde voor de geheel binnen eenheid A gelegen eenheid AA. Hierdoor wordt een deel van de voxels die in stap (c) eenheid A toegekend hebben gekregen overschreven.



Figuur 5.5.4: Stappen in de vertaling van geologische 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; (d) idem voor eenheid AA waarbij voxels die eerder eenheid A toegekend hadden gekregen worden overschreven. De voxels boven maaiveld blijven leeg.

Uit Figuur 5.5.4 blijkt dat de volgorde waarin de lagen naar voxels vertaald worden bepalend is voor het eindresultaat.

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 geologische eenheid de voxel behoort. In een vertaaltabel ligt vast welk getal bij welke eenheid hoort.

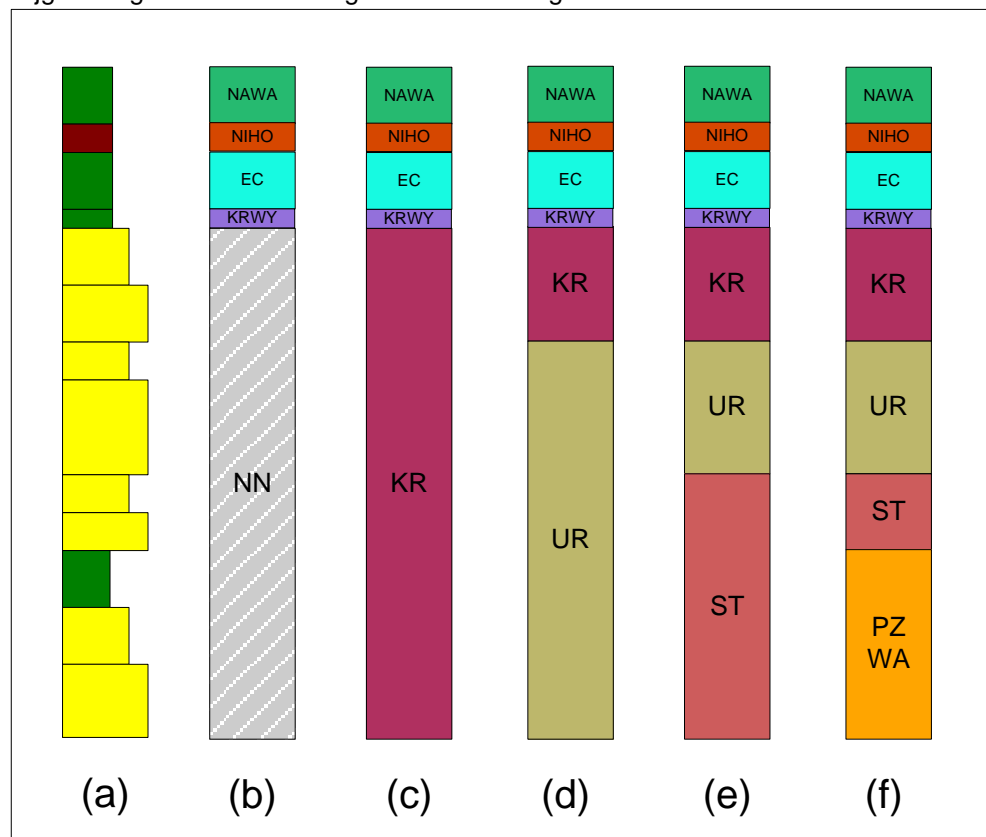
Deze processtap is volledig geautomatiseerd met behulp van Python scripts.

### 5.5.3 Toekennen stratigrafie op basis van lagenmodel

In werkproces **Interpretatie automatisch te interpreteren eenheden** zijn boorbeschrijvingen voorzien van een stratigrafische indeling voor de geologische eenheden waarvoor een automatische interpretatie mogelijk was. Daaraan zijn de handmatige interpretaties van de 'selectieset handmatig' aan toe gevoegd. Dit betekent dat boorbeschrijvingsintervallen die in het bereik van de handmatig te interpreteren eenheden vallen, maar waarvan de boring geen onderdeel is van de 'selectieset handmatig', in dat bereik geen interpretatie hebben (Figuur 5.1.2 in paragraaf 5.1.2). In de lithoklassemodellering in het voxelmodel willen we de lithologische beschrijving van deze boorbeschrijvingsintervallen echter wel meenemen. Om dat te kunnen doen worden ze in deze processtap alsnog voorzien van een interpretatie door de boringen te snijden met het lagenmodel. De procedure is als volgt:

1. Voor elke handmatig geïnterpreteerde 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 het lagenmodel.
2. Het resultaat van (1) wordt gesorteerd zodat een lijst wordt verkregen met per boring per handmatig geïnterpreteerde eenheid de diepteligging van de top van de eenheid.
3. 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 het lagenmodel ligt.
4. De boorbeschrijvingen worden nu onderverdeeld in geologische eenheden aan de hand van de gevonden toppen van de in de boorbeschrijving aanwezige eenheden. Bovendien geldt de regel dat de top van de hoogstgelegen eenheid aansluit bij het maaiveld, hetzij de basis van de diepst gelegen automatisch geïnterpreteerde eenheid.
5. De nieuw verkregen interpretaties worden gecombineerd met de interpretaties die in de **Lagenmodellering** gebruikt zijn.

Ad (4) - Door alleen uit te gaan van de toppen, en niet van de basissen, wordt gewaarborgd dat alle intervallen van de boorbeschrijving een geologische eenheid krijgen toegekend. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 5.3.4.



Figuur 5.3.4: Indeling van een geïdealiseerde boorbeschrijving die niet tot de 'selectieset handmatig' behoort. De boorbeschrijving heeft daarom nog geen stratigrafische indeling voor de handmatig te interpreteren eenheden KR, UR, ST en PZWA. Door de boorbeschrijving te snijden met het lagenmodel wordt hij alsnog voorzien van een interpretatie. (a) Boorbeschrijving met klei in groen, veen in bruin en zand in geel; (b) Uitgangssituatie met alleen een interpretatie voor de automatisch geïnterpreteerde eenheden NAWA, NIHO, EC en KRWY. De aanduiding NN wil zeggen 'niet geïnterpreteerd'; (c) t/m (e) Tussentijdse stappen in de indeling waarbij steeds de hele

boorbeschrijving vanaf de top naar de basis van de eenheid van een geologische eenheid wordt voorzien. Deze werkwijze voorkomt lege intervallen in het eindresultaat; (f) Eindresultaat met een volledig geïnterpreteerde boorbeschrijving.

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.

#### 5.5.4 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>3</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).
- Indien er sprake is van bijmenging K3<sup>2</sup> of KX, kleibrokjes en/of een lutumpercentage  $\geq 5\%$ , dan is de lithoklasse echter *kleilig 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:

---

<sup>3</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.

- 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  $\geq 2$  mm. Deze laatste classificatie is onjuist (sediment met een zandmediaan  $\geq 2$  mm is grind, geen zand), maar komt in DINO boorbeschrijvingen wel voor.

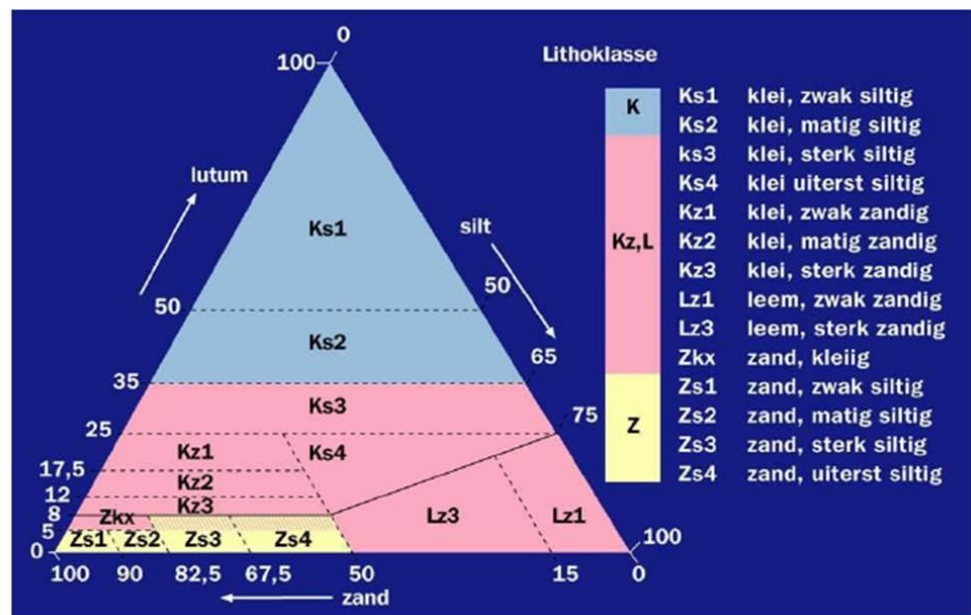
#### Lithoklasse 9, schelpen

- 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 modelgebied Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg waarvoor het grindpercentage hoog genoeg is om als aparte klasse te modelleren zijn: Kiezeloöliet Formatie, de gecombineerde formaties van Peize en Waalre, Formatie van Sterksel, Formatie van Urk, Formatie van Kreftenheye, Formatie van Beegden, de gestuwde afzettingen en de afzettingen van Holocene geulgeneratie A (waaronder de Holocene Maasafzettingen). In de Formatie van Oosterhout zijn schelpen als aparte lithoklasse gemodelleerd.

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

Exclusief het gedeelte waarin gekozen wordt of grind en schelpen als aparte lithoklassen gemodelleerd worden is deze processtap is volledig geautomatiseerd met Python scripts.

#### 5.5.5 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.

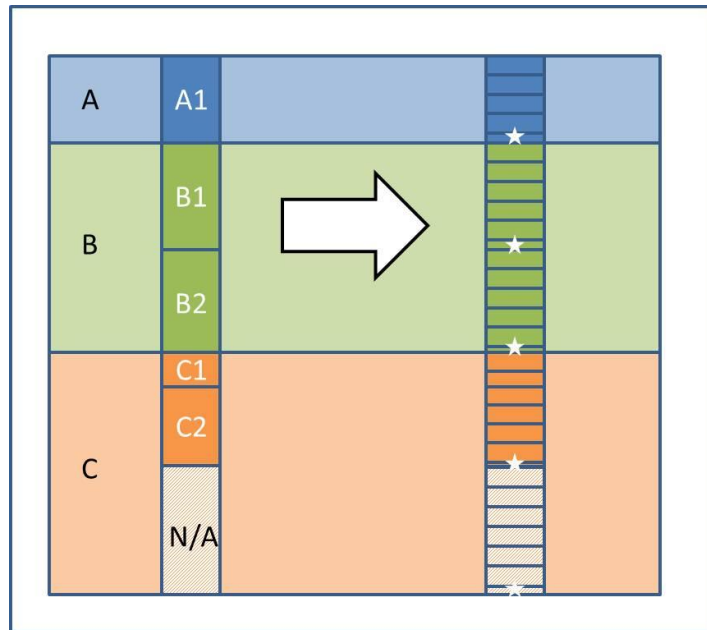
Het vereenvoudigen van de lithoklasseintervallen is geautomatiseerd.

#### 5.5.6 Regulariseren lithoklasseintervallen

De in lithoklassen ingedeelde boorbeschrijvingen worden geregulariseerd in intervallen van maximaal 50 cm dikte (Figuur 5.5.8). De regularisatie gaat uit van de intervalgrenzen van de vereenvoudigde boorbeschrijving.

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 wordt een interval van 200 cm zand opgedeeld in 4 intervallen 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 'BX' (Formatie van Bostel) in modelblok '46wo' van Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg is gegeven in Tabel 5.5.2.

Tabel 5.5.2: Voorbeeld van globale verhoudingen voor eenheid 'BX' (Formatie van Bostel) in modelblok '46wo' van Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg.

Lithoklasse ("categorie")	Nummer	Fractie
Organisch materiaal (veen)	1	0,0089
Klei	2	0,0082
Kleilig zand, zandige klei en leem	3	0,0846
Fijn zand	5	0,1632
Midden zand	6	0,5130
Grof zand	7	0,2221
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, 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 'BX' (Formatie van Bostel) in modelblok '46wo' van Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg is gegeven in Tabel 5.5.3.

Tabel 5.5.3: Voorbeeld van de verdeling tussen de categorieën *zand* en *niet-zand* de eenheid 'BX' (Formatie van Bostel) in modelblok '46wo' van Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg (vergelijk met Tabel 5.5.2).

Categorie	Nummer	Fractie
Zand	1	0,8982
Niet-zand	2	0,1018

<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 'BX' (Formatie van Boxtel) in modelblok '46wo' van Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg (vergelijk met Tabellen 5.5.2 en 5.5.3).

Categorie	Nummer	Fractie
Organisch materiaal (veen)	1	0,0878
Klei	2	0,0808
Kleiig zand, zandige klei en leem	3	0,8314
<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 'BX' (Formatie van Boxtel) in modelblok '46wo' van Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg (vergelijk met Tabellen 5.5.2, 5.5.3 en 5.5.4).

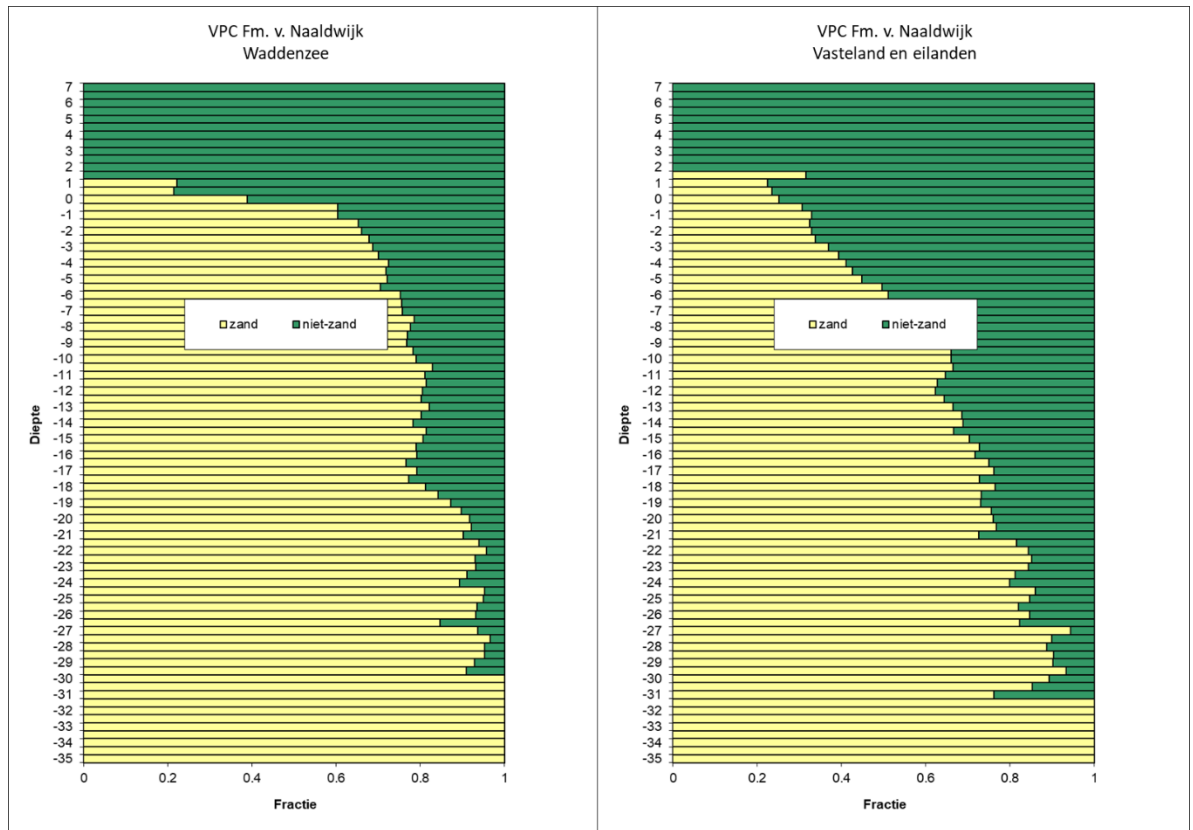
Categorie	Nummer	Fractie
Fijn zand	1	0,1817
Midden zand	2	0,5711
Grof zand	3	0,2472
Grind	4	0,0000
<b>Totaal</b>		<b>1,0000</b>

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 geval 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 model eenheid 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®.

Voor eenheden die in het lagenmodel van DGM+ geen verdere onderverdeling in laagpakketten hebben gekregen maar waarin volgens REGIS II wel min of meer continue kleiige lagen voorkomen, kan een VPC worden geconstrueerd op basis van de REGIS II kleilagen binnen de betreffende eenheid. De methode is voor het eerst toegepast voor de Formatie van Peelo binnen GeoTOP modelgebied Oostelijke Wadden. In Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg is de methode gebruikt in de formaties van Oosterhout en Sterksel en in de Kiezeloöliet Formatie. In hetzelfde modelgebied zijn voor de Formatie van Stramproy en de gecombineerde eenheid Peize-Waalre overeenkomstig de werkwijze van REGIS II elk twee kleilagen gemodelleerd. Deze kleilagen worden niet meegeleverd met het lagenmodel, maar zijn wel gebruikt voor het maken van een VPC. In het geval van deze kleilagen zorgt de VPC voor meer continue kleilagen dan op grond van een modellering zonder kleilagen verkregen zou worden.

Voor elk van deze eenheden wordt eerst van de geregulariseerde boorbeschrijvingen vastgesteld of de boorintervallen in een van de kleilagen of juist in het overige, zandige deel van de formatie vallen. De uitkomst is een set tellingen (histogrammen) waaruit de verdeling tussen de categorieën *zand* en *niet-zand* van de kleilagen en van het zandige deel van de formatie kunnen worden afgeleid. Deze verdelingen worden vervolgens via de *workflow manager* in Isatis® aan elke voxel van de betreffende eenheid als lokale verhouding toegekend.

#### 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 controledoelinden 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 attribuutwaarde, namelijk een getal dat aangeeft tot welke geologische eenheid de voxel behoort. Per blok ontstaat er één *3D gridfile*.

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.

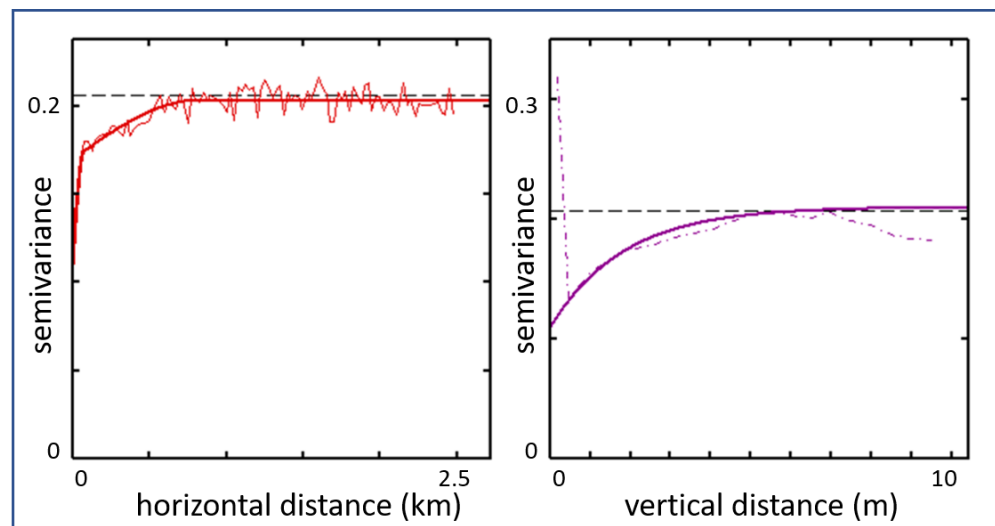
Voor elke te modelleren eenheid zijn variogrammen gemaakt op basis van de boorgegevens. Daarbij is steeds gebruik gemaakt van de boorgegevens van het

gehele modelleergebied of van een representatief deel daarvan. 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 een geologische eenheid.

#### 5.5.11 Simuleren lithoklassen

De lithoklassen van de geregulariseerde intervallen van de boringen 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 19 blokken van Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg) 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.

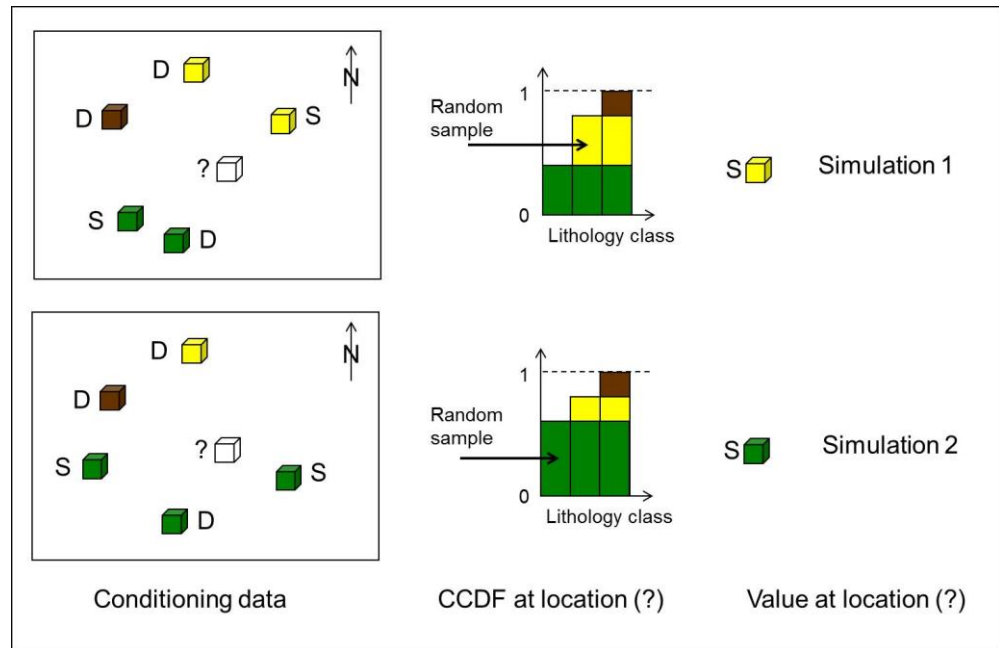
De volgende stap bestaat uit een kriging (block kriging) op basis van de verkregen informatie. In de kriging wordt het ene variogram gebruikt dat vastgesteld is voor de te simuleren eenheid (er is geen sprake van een variogram per lithoklasse).

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 modelleenheid eenmaal wordt bezocht.
2. Bepaal voor elke voxel van de modelleenheid 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.



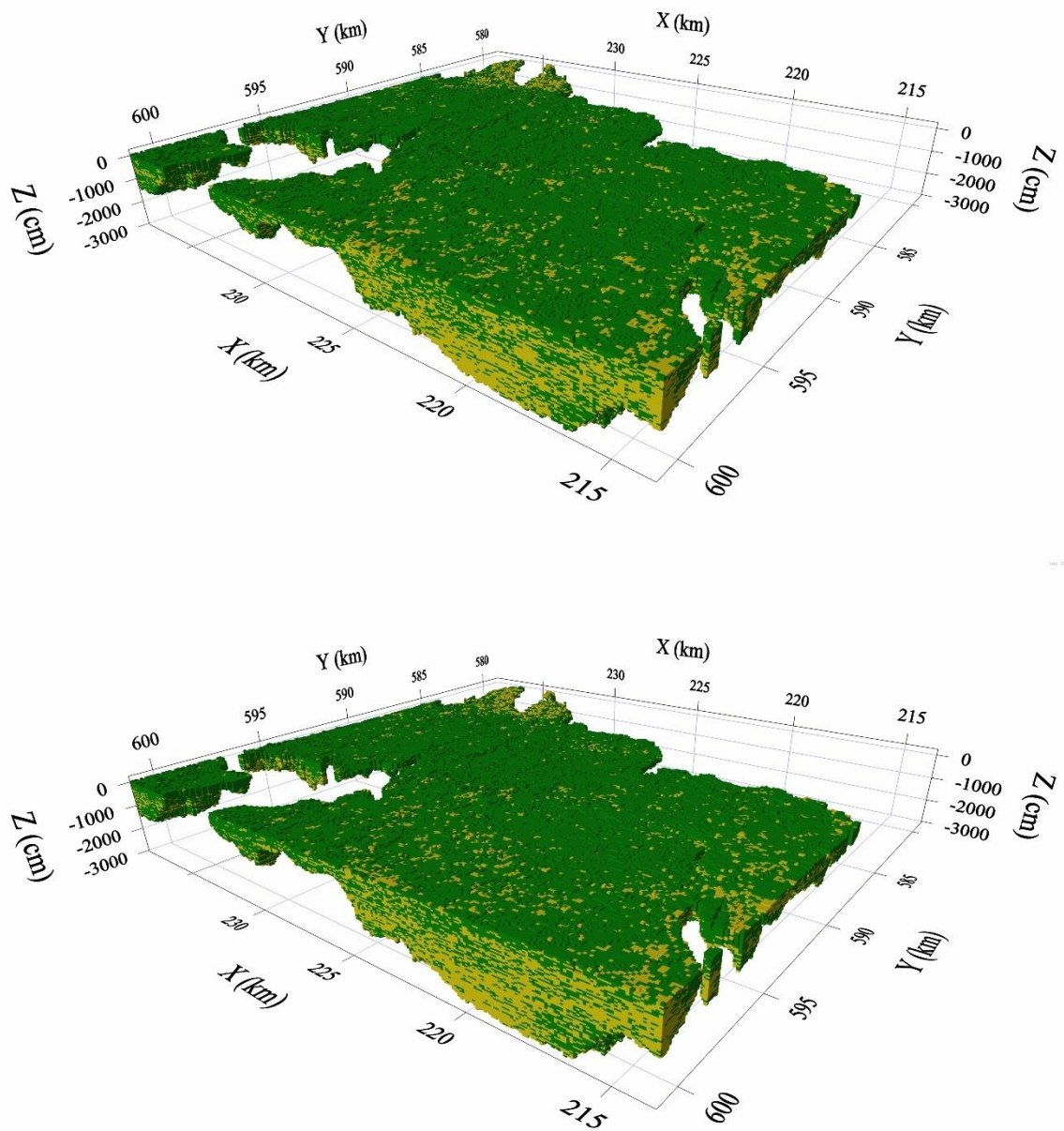


Figuur 5.5.11: Schematische weergave van twee verschillende simulaties van lithoklasse voor dezelfde voxel "?". In simulatie (1) en simulatie (2) zijn de datapunten ("D") in het zoekgebied gelijk, maar doordat gebruik gemaakt wordt van een random pad zijn de eerder voorspelde lithoklassen ("S") verschillend.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

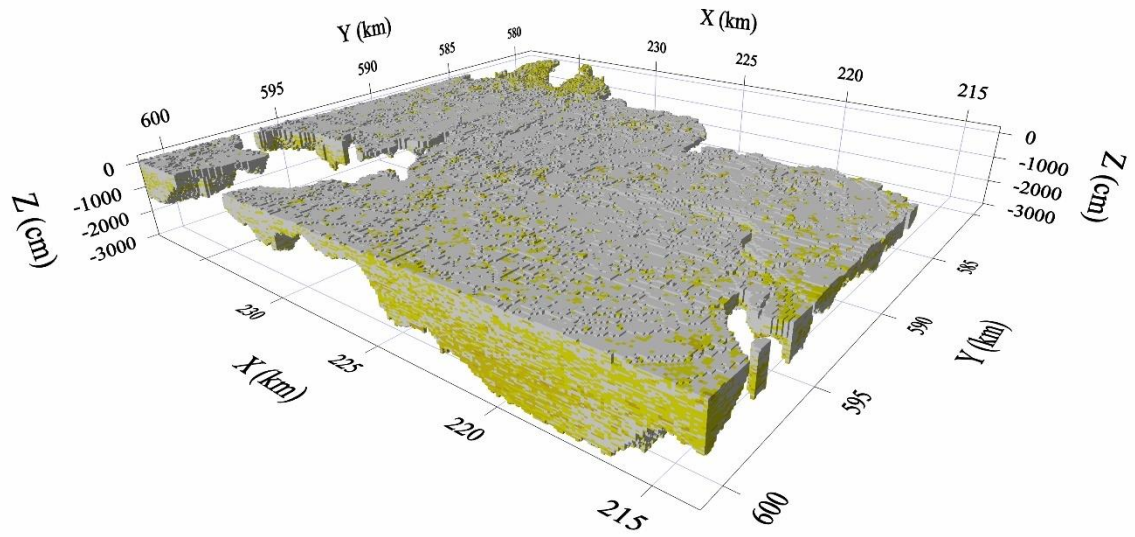
Met betrekking tot de korrelgroottes geldt dat een belangrijk deel van de zandige intervallen een onbekende korrelgrootte heeft. Dit probleem, dat geldt voor een groot deel van de boorbeschrijvingen, is opgelost door de 3D interpolatie in twee stappen op te delen.

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



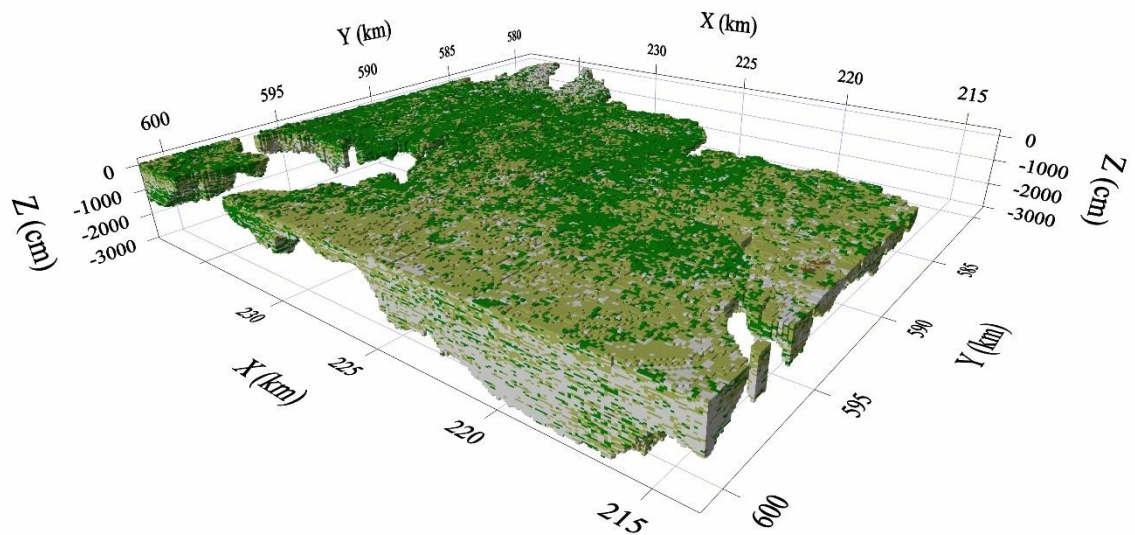
Figuur 5.5.12: Twee verschillende realisaties (een realisatie is de uitkomst van een simulatie) van een geologische eenheid in een modelblok. Gele voxels zijn gevuld met zand; groene met niet-zand.

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).



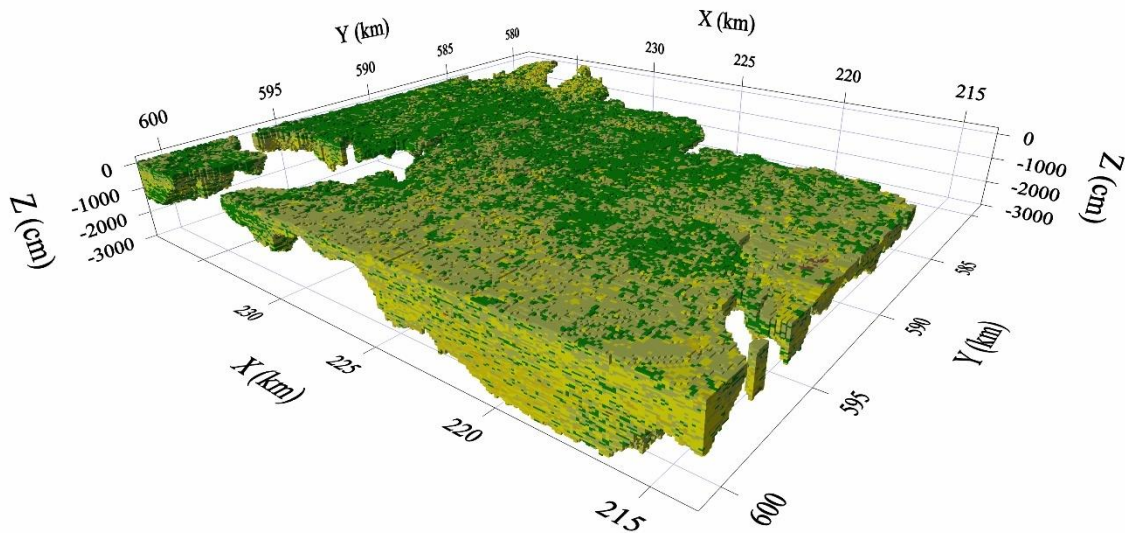
Figuur 5.5.13: In elk van de 10 realisaties met zand versus niet-zand worden de voxels met zand geselecteerd. Voor deze geselecteerde voxels worden nogmaals 10 simulaties uitgevoerd waarin alleen de boorintervallen met bekende korrelgrootte gebruikt worden. In totaal zijn er dan  $10 \times 10 = 100$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

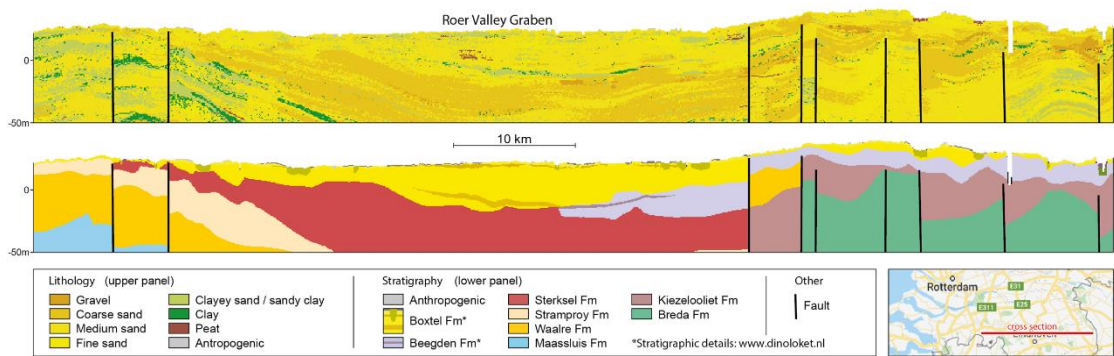


Figuur 5.5.15: Na het samenvoegen van de 100 realisaties van zand en de 100 realisaties van niet-zand ontstaan 100 realisaties van de lithoklasse.

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

#### 5.5.12 Uitzondering: hellende eenheden

Bij de simulaties wordt een variogram gebruikt met een grote horizontale afstand (honderden tot duizenden meters) en een kleine verticale afstand (enkele meters). De simulatie resulteert daardoor vaak in naast elkaar gelegen voxels van gelijke lithoklasse terwijl de verticale afwisseling in lithoklassen veel groter is. Met andere woorden: de simulatie reproduceert de horizontale gelaagdheid die kenmerkend is voor de meeste afzettingen in het GeoTOP-bereik. In enkele gevallen komen in Nederland echter hellende eenheden voor. Een voorbeeld zijn de Vroeg-Pleistocene en oudere afzettingen in Zeeland (Formatie van Maassluis en dieper gelegen eenheden), die een noordwaartse helling hebben door de tektonische daling van het Noordzeebekken. In Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg hellen de Pleistocene formaties als gevolg van tijdens de sedimentatie optredende bewegingen langs de Peelrandbreuk en andere breuken langs de Roerdalslenk (Figuur 5.5.16, Tabel 5.5.6).

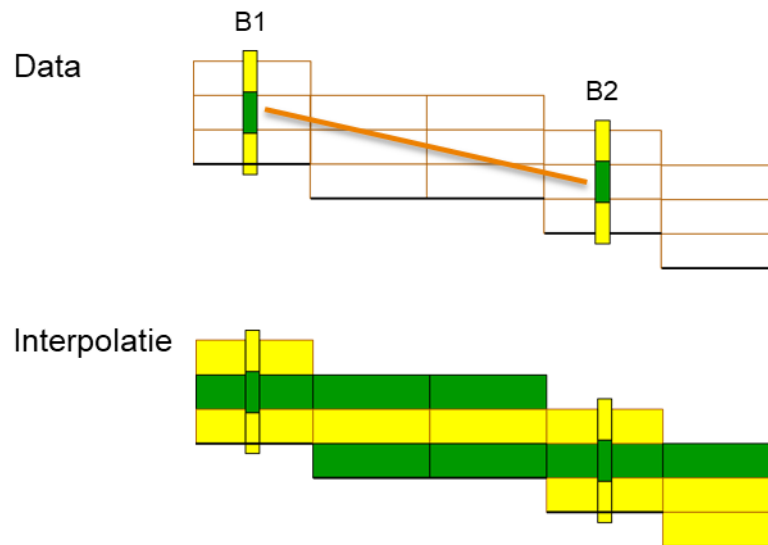


Figuur 5.5.16: Hellende lagen in modelgebied Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg. Boven: lithoklassen, onder: geologische eenheden.

Tabel 5.5.5: Eenheden in modelgebied Noord- en Midden-Limburg waarvoor de in deze paragraaf beschreven *Unfolding/Folding* procedure is gevolgd om de tektonische hellingshoek te verdisconteren in het voxelmodel. Referentievlak 'Midden' ligt halverwege de top en de basis van de eenheid; 'Kwart' wil zeggen dat het referentievlak op een kwart van de afstand tussen top en basis ligt (dichter bij de top dan bij de basis).

Code	Omschrijving	Referentievlak
BX	Formatie van Bostel	Midden
BXSI	Formatie van Bostel, Laagpakket van Singraven	Midden
BXLM	Formatie van Bostel, Laagpakket van Liempde	Midden
BXBS	Formatie van Bostel, Laagpakket van Best	Midden
BE	Formatie van Beegden	Midden
ST	Formatie van Sterksel	Midden
SY	Formatie van Stramproy	Midden
PZWA	Formaties van Peize en Waalre	Midden
KI	Kiezeloöliet Formatie	Midden
IE	Formatie van Inden	Midden
MS	Formatie van Maassluis	Midden
OO	Formatie van Oosterhout	Midden
BR	Formatie van Breda	Kwart

De hellingshoek is over het algemeen gering, in de orde van meters daling per kilometer afstand, desondanks zou een simulatie met een horizontaal variogram in deze formaties tot een onrealistische horizontale gelaagdheid leiden (Figuur 5.5.17).

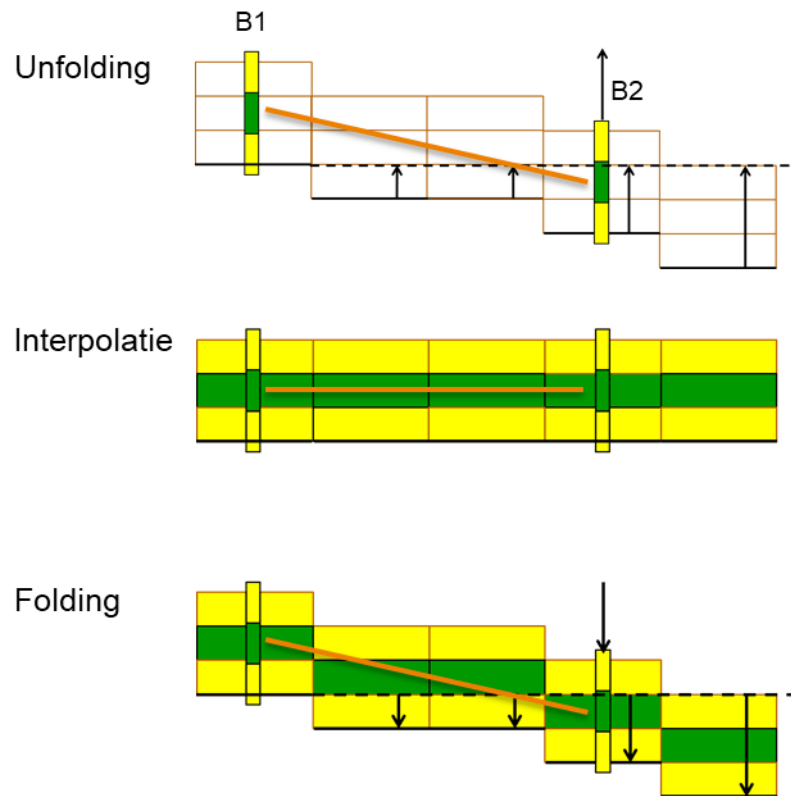


Figuur 5.5.17: Horizontale interpolatie van een hellende kleilaag die in boring B1 en B2 is aangetroffen leidt tot een onrealistisch beeld van twee horizontale kleilagen in het model.

Een oplossing voor de hellende eenheden is gevonden in de *Unfolding/Folding* procedure die in Isatis® beschikbaar is. *Unfolding* maakt de structurele deformatie van een geologische eenheid ongedaan en herstelt de oorspronkelijke horizontale positie. In de herstelde geologische eenheid wordt de simulatie uitgevoerd en ontstaat de nu wel realistische horizontale gelaagdheid. Vervolgens wordt met *Folding* de structurele deformatie weer toegepast en krijgt de geologische eenheid de huidige positie. De horizontale gelaagdheid van de voxels is nu scheef gesteld.

Bij de *Unfolding* wordt een referentievlak (een raster) dat de deformatie representeert vlak getrokken. In het geval van de noordwaarts hellende eenheden van Zeeland is de basis van de eenheid als referentievlak gekozen. De aanname daarbij is dat de lagen oorspronkelijk zijn afgezet op een horizontale ondergrond (bijvoorbeeld de zeebodem). In Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg zijn (in de meeste gevallen) referentievlakken geconstrueerd die het gemiddelde van de top en de basis van de formaties volgen.

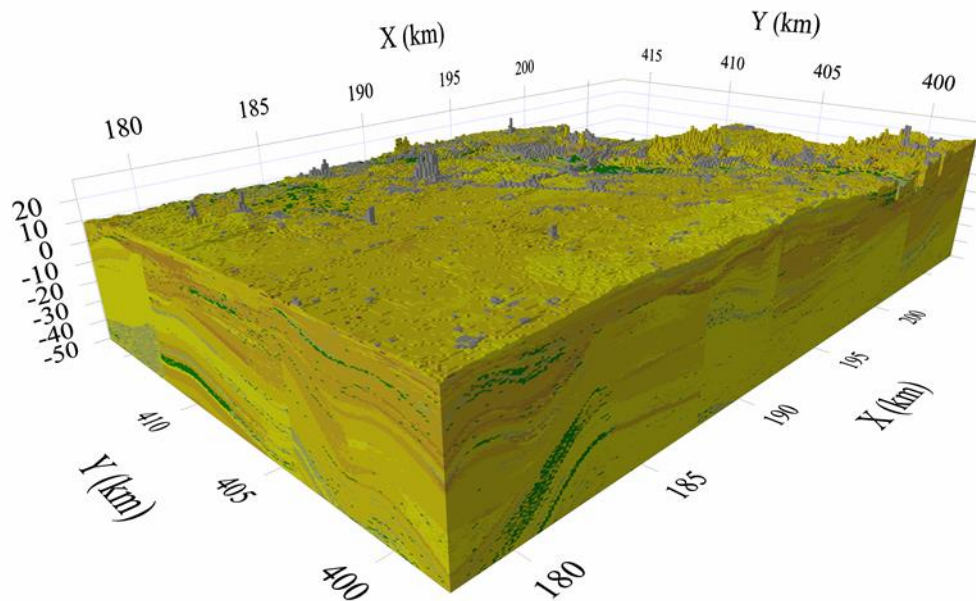
De *Unfolding/Folding* procedure is in Figuur 5.5.18 geïllustreerd met een hypothetische stratigrafische eenheid. De figuur toont het zijaanzicht van 5 x 3 voxels met daaronder de basis van de eenheid (dikke lijn). Voor elke rastercel van het basisvlak wordt bekeken hoeveel verticale verplaatsing er nodig is om een horizontaal vlak te maken. Alle voxels die in de rastercel liggen worden met dezelfde afstand verticaal verplaatst (pijlen). Hetzelfde geldt voor de boorgegevens die in de rastercel liggen.



Figuur 5.5.18: Interpolatie van een hellende kleilaag die in boring B1 en B2 is aangetroffen met de *Unfolding/Folding* procedure. Zie tekst voor uitleg.

Na *Unfolding* wordt de 3D simulatie uitgevoerd wat in Figuur 5.5.17 leidt tot een kleilaag (groen) tussen twee zandlagen (geel). Vervolgens wordt *Folding* toegepast waarbij de voxels over dezelfde verticale afstand maar in tegenovergestelde richting worden verplaatst.

Een voorbeeld van het resultaat van *Unfolding/Folding* in hellende lagen in Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg is te zien in Figuur 5.5.19.



Figuur 5.5.19: Blok 46wo van modelgebied Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg met hellende lagen die gemodelleerd zijn met behulp van de Unfolding/Folding methode.

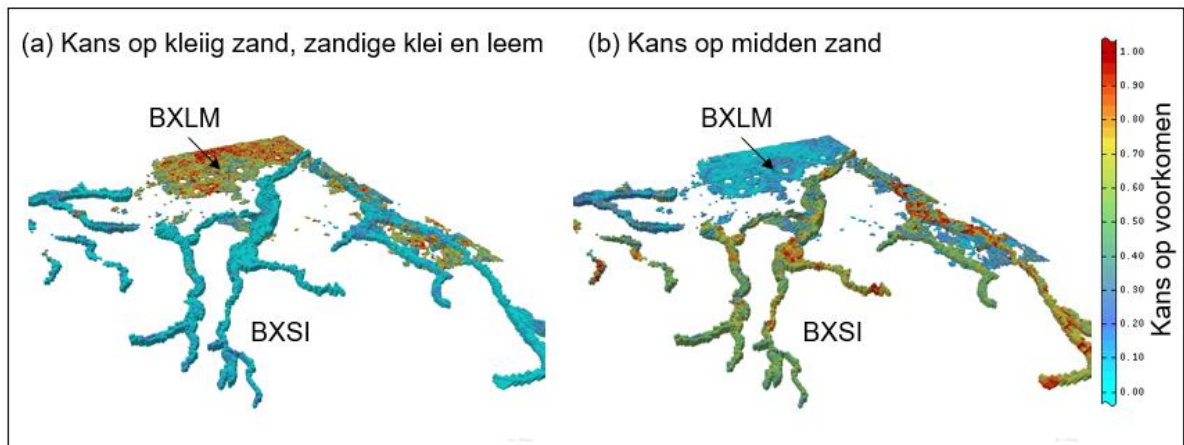
#### 5.5.13 Berekenen kans op lithoklasse

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).





Figuur 5.5.20: Kans op voorkomen van twee lithoklassen in twee geologische eenheden in blok 50o (20 x 25 km) van modelgebied Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg. Voxels in het Laagpakket van Liempde (BXLM) hebben (a) een hoge kans op kleiig zand, zandige klei en leem en (b) een lage kans op midden zand. Voor voxels in het Laagpakket van Singraven (BXSI) geldt het omgekeerde.

#### 5.5.14 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®. Bij het modelleren van Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg was dit echter wel het geval. Het Soares-algoritme gaat uit van de kansen op de verschillende lithoklassen binnen een geologische eenheid van een gemodelleerd blok. Deze kansverdeling 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 processtap *Berekenen globale verhoudingen* bepaald zijn, bijvoorbeeld voor eenheid BX (Formatie van Bortel) in modelblok 46wo van Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg (Tabel 5.5.6).

Tabel 5.5.6: Voorbeeld van globale verhoudingen van lithoklassen binnen eenheid BX (Formatie van Boxtel) in modelblok 46wo van Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg.

Lithoklasse ("categorie")	Nummer	Fractie
Organisch materiaal (veen)	1	0,0089
Klei	2	0,0082
Kleilig zand, zandige klei en leem	3	0,0846
Fijn zand	5	0,1632
Midden zand	6	0,5130
Grof zand	7	0,2221
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 1	Kans op lithoklasse 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.

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

#### 5.5.15 *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*.

#### 5.5.16 *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:

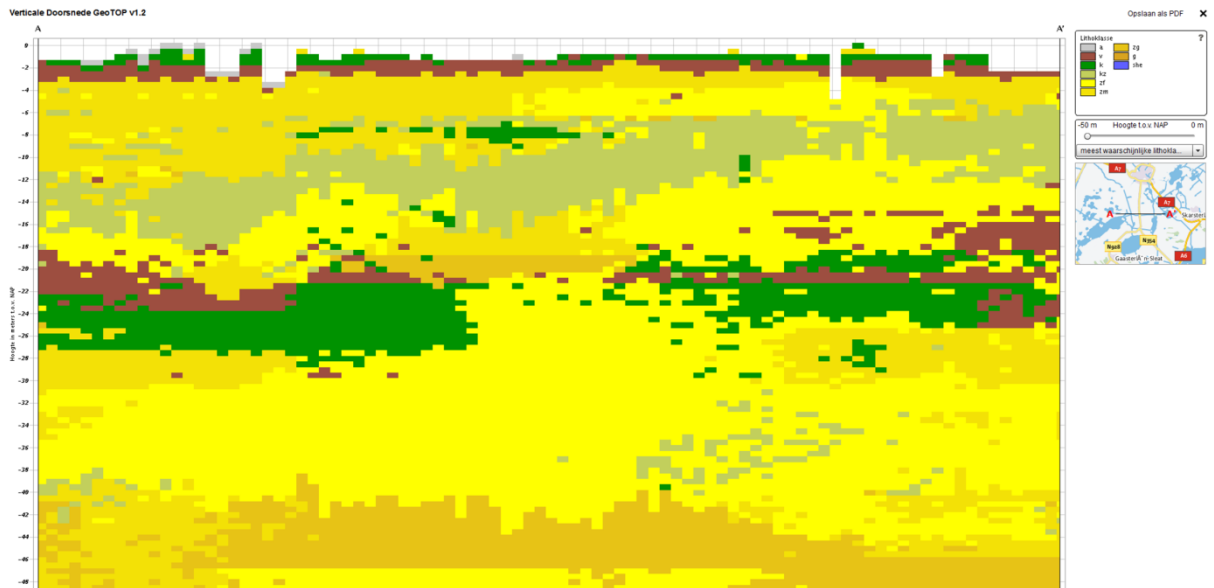
$$H = - \sum_i^N p_i \frac{\ln p_i}{\ln N}$$

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

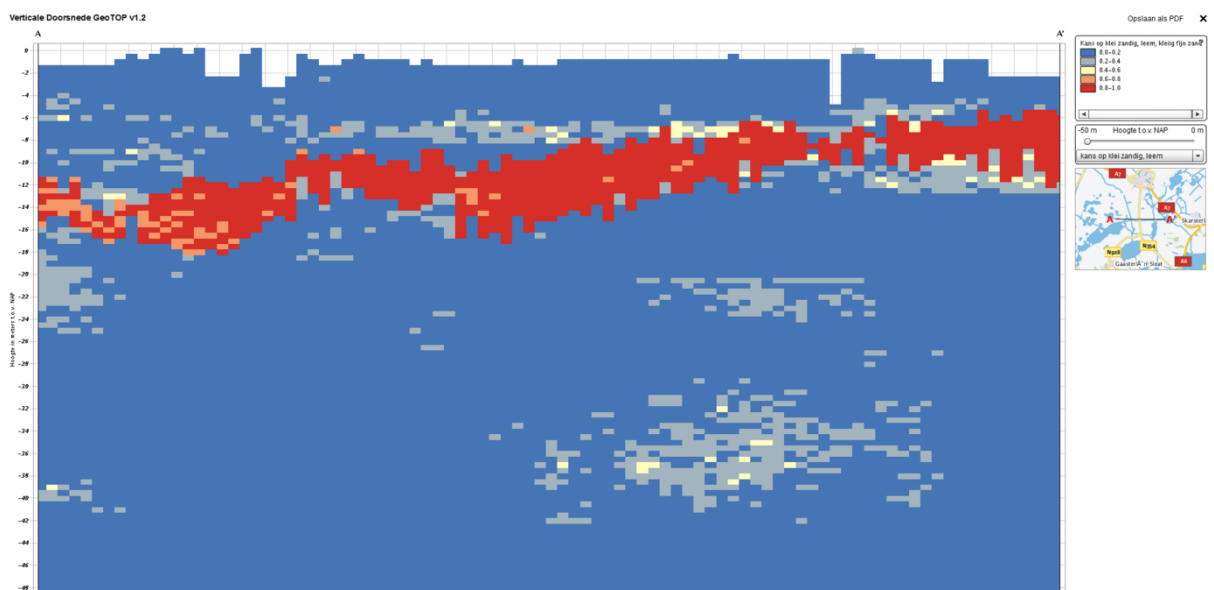
### Voorbeelden modelonzekerheid van lithoklasse

Figuur 5.5.20 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 5.5.21 en 5.5.22 geven de kans op lithoklasse weer voor resp. *kleilig zand*, *zandige klei en leem* en *midden 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.

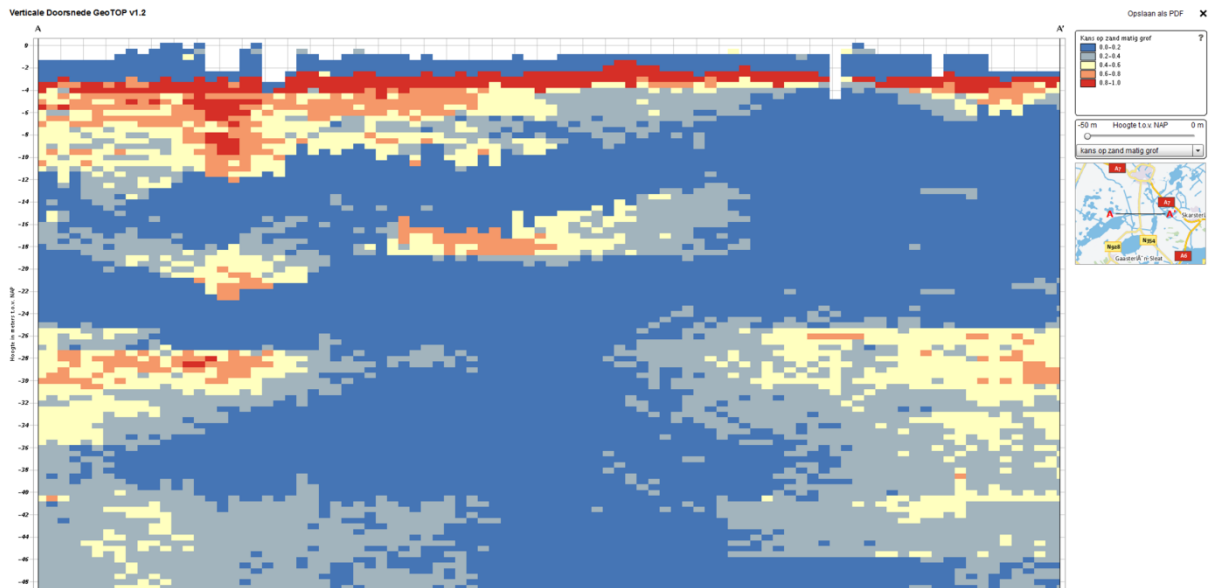
Figuur 5.5.23 geeft de *modelonzekerheid* van lithoklasse weer. Deze is volgens bovenstaande formule berekend op basis van zes of zeven *kans op lithoklassen*: zes voor de eenheden waarin grind meegenomen is in grof zand, en zeven voor de eenheden waarin grind als aparte lithoklasse is gemodelleerd.



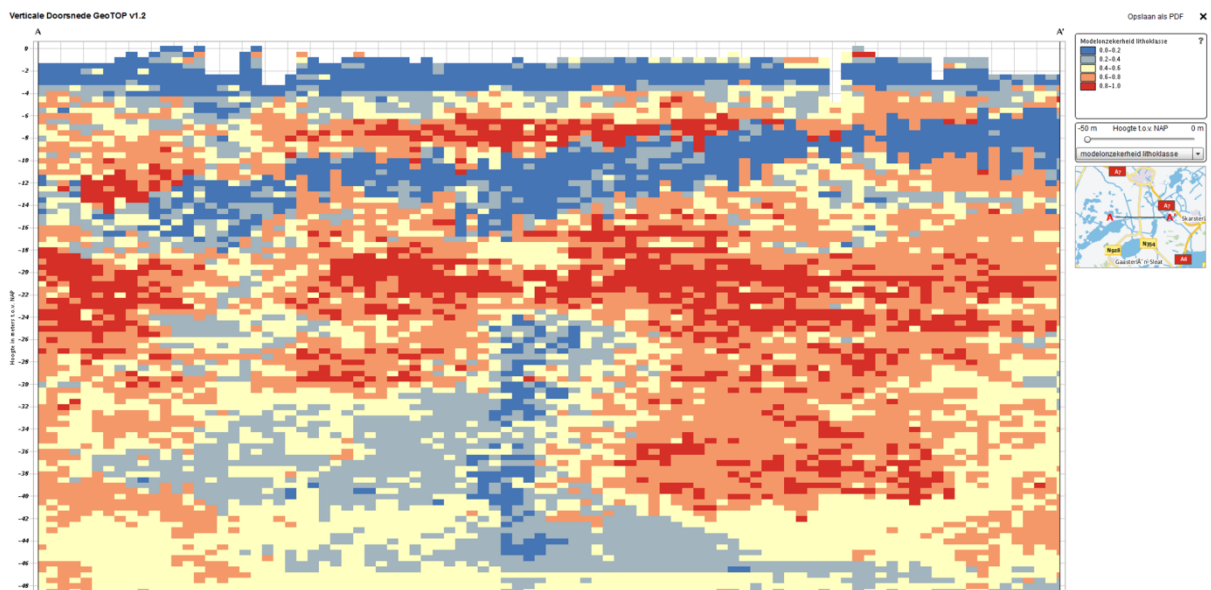
Figuur 5.5.20: Doorsnede door GeoTOP met de meest waarschijnlijke lithoklasse.



Figuur 5.5.21: Kans op kleig zand, zandige klei en leem. Vooral in één geologische eenheid (Formatie van Drente, Laagpakket van Gieter) zijn hoge kansen waarneembaar.



Figuur 5.5.22: Kans op midden 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 5.5.23: Modelonzekerheid van lithoklassen, met o.a. een lage onzekerheid in de eenheden waar een bepaalde lithoklasse overheerst.

### 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*.

### 5.5.17 *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:

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

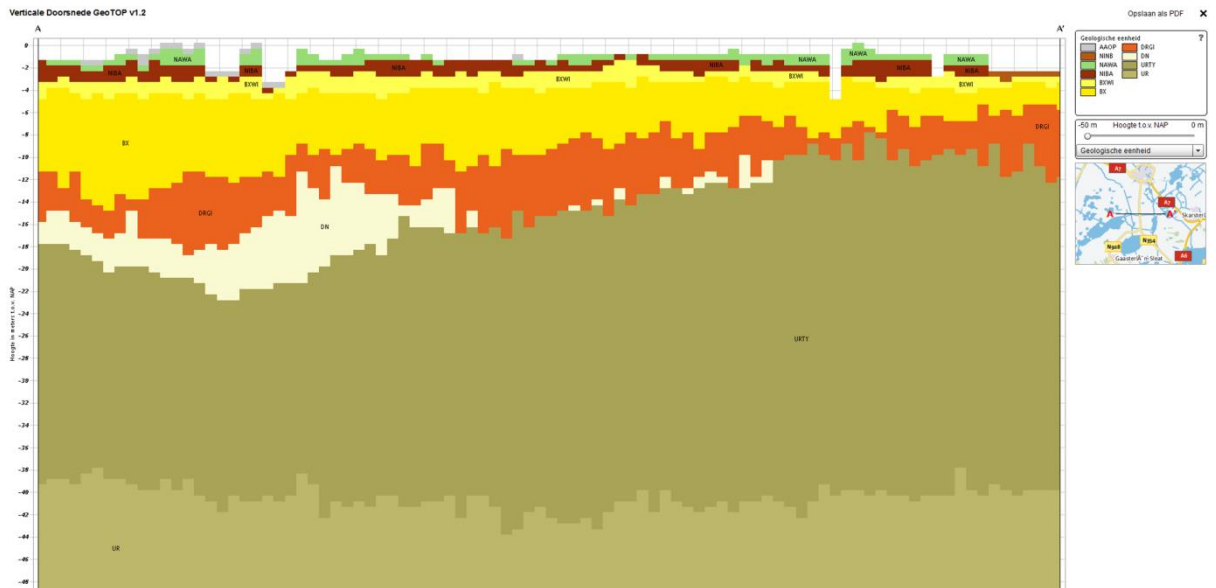
Hierin staat  $H$  voor de modelonzekerheid,  $N$  voor het aantal mogelijke uitkomsten (dat wil zeggen het aantal mogelijke geologische eenheden) en  $p_i$  voor de kans op een bepaalde geologische eenheid (bijvoorbeeld de kans dat de voxel tot de Formatie van Naaldwijk behoort).

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

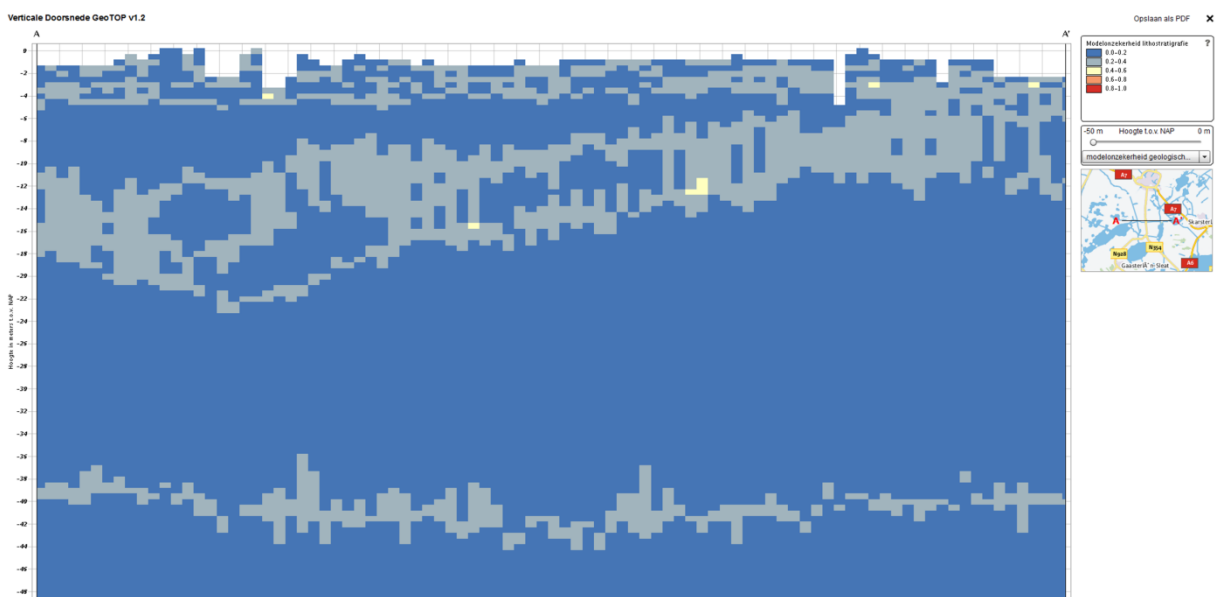
### **Voorbeelden modelonzekerheid van geologische eenheid**

Figuur 5.5.24 toont het voxelmodel met de *geologische eenheid* als attribuut. Dit is het attribuut waar de modelonzekerheid betrekking op heeft. Figuur 5.5.25 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 5.5.24: Doorsnede door GeoTOP met de geologische eenheid.



Figuur 5.5.25: 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. Dit betekent dat de kansen geen onzekerheidsinformatie over de laterale verbreiding van de geologische eenheid bevatten.

#### 5.5.18 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.

#### 5.5.19 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 automatisch te interpreteren eenheden** 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 opeenvolging 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.

#### 5.5.20 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 5.2.26).

Line	Action	Parameters	...	...	...	...
4898	Remark	Acties alleen voor BXBS				
4900	Calculate2DGrid	Directory name grid	File name G_BXBS	Selection name data None	No. of variables 3	Transformation v1 = v2 - v3
4901	Remark	Directory name grid	File name G_BXBS	Variable Name TOP-BASIS	Unit m	Type Decimal
4902	ModifyGridVariableOneTime	Directory name grid	File name G_BXBS	Selection name data None	No. of variables 4	Transformation v1 = f6165/v4 < 0.01
4903	Calculate2DGrid	Directory name grid	File name G_BXBS	Variable Name basis_verlaagd	Unit m	Type Decimal
4904	Remark	Directory name grid	File name G_BXBS	Selection name data None	No. of variables 3	Transformation v1 = v2 + v3/2
4905	ModifyGridVariableOneTime	Directory name grid	File name G_BXBS	Variable Name MIDDEN	Unit m	Type Decimal
4906	Remark	In header file van boomnummer Line Name Variable maken				
4907	Remark	Hoeven geen variabelen opgegeven te worden				
4908	Calculate2DGrid	CheckStrat / StratUnit BXBS	Eerste keer? Y	Lines directory data	Lines File _lines	Lines Header File _points
4909	Remark	Breuken aan rechtgetrokken grid hangen				
4910	Remark	Breukenbestand O:\005\5\5000\gm\producten\breuken\	DirName BXBS			
4911	Remark	SISIM van zand				
4912	Remark	New variable BXBS_SIS_ZAND[xxxxx]	Variable type Macro Variable 8 bits	Number of indices 10	CheckStrat BXBS	
4913	Remark	SISIM BXBS	Selection name data zand	Data variable BXBS_cat_zand	Category label BXBS_SIS_ZAND	Selection name grid BXBS_SIS_ZAND
4914	Remark	Selecteer voor elk van de SISIM realisaties het zand (eqlwaarde 1)				
4915	Remark	New variable sel_BXBS_SIS_ZAND[xxxxx]	Variable type Macro Variable 1 bit	Number of indices 10	CheckStrat BXBS	
4916	Remark	Grid variabele BXBS_SIS_ZAND[00001]	Lower bound (inclus) 1	Upper bound (inclusive) 1	Selection name sel_BXBS_SIS_ZAND[00001]	CheckStrat BXBS
4917	SelectIntervalGridCheckStrat_Unfold	BXBS_SIS_ZAND[00002]	1	1	sel_BXBS_SIS_ZAND[00002]	BXBS
4918	SelectIntervalGridCheckStrat_Unfold	BXBS_SIS_ZAND[00003]	1	1	sel_BXBS_SIS_ZAND[00003]	BXBS
4919	SelectIntervalGridCheckStrat_Unfold	BXBS_SIS_ZAND[00004]	1	1	sel_BXBS_SIS_ZAND[00004]	BXBS

Figuur 5.2.26: 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 lithoklassenmodellering 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 een versie van een model aan de versies van de

		bijbehorende modelgebieden
--	--	-------------------------------

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
- BL – Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg

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:

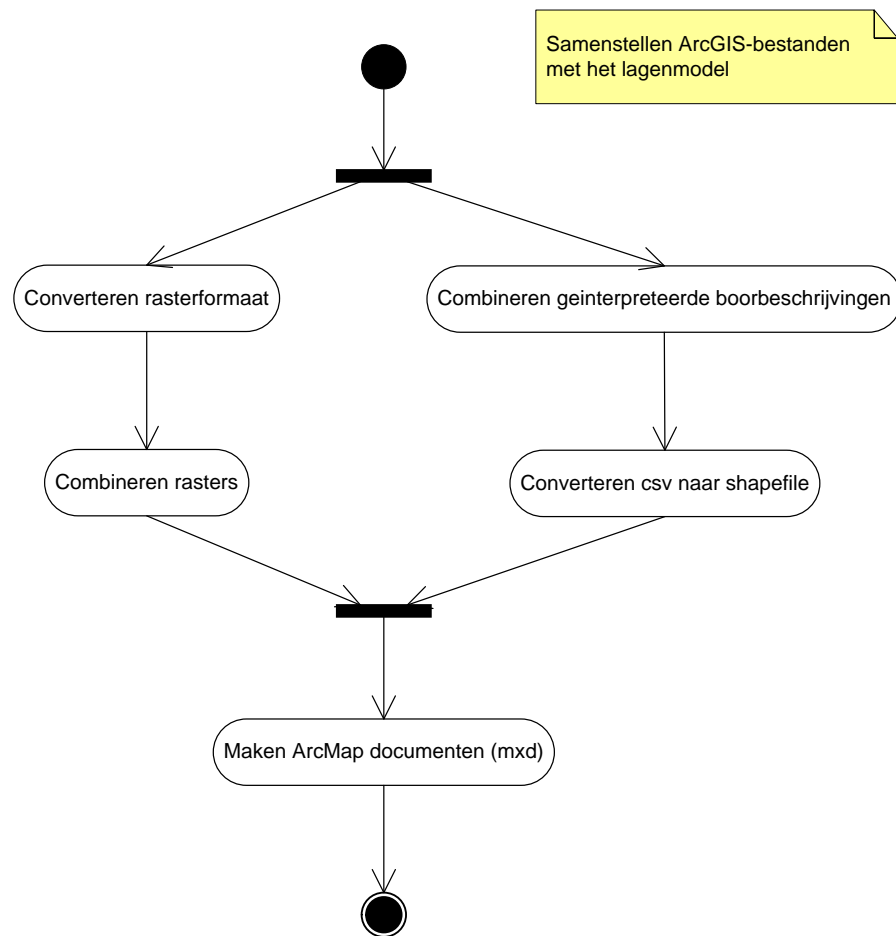
- Top van de eenheid, in m ten opzichte van NAP.
- Basis van de eenheid, in m ten opzichte van NAP.
- Dikte van de eenheid, in m.
- Standaarddeviatie van de top, in m.
- Standaarddeviatie van de basis, in m.

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 waterbodembodemhoogtebestanden 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





FID	Shape *	Id	BOORNUMMER	X	Y	TOP	DIKTE	BASIS	DOORBOORD
0	Point	0	B44H0001	138581	402221	9.22	3.02	6.2	ja
1	Point	0	B44H0002	138630	402290	8.97	2.77	6.2	ja
2	Point	0	B44H0004	139110	401220	9.1	1	8.1	ja
3	Point	0	B44H0040	132420	401550	10.23	1.5	8.73	ja
4	Point	0	B44H0082	137880	402770	8.1	1	7.1	ja
5	Point	0	B44H0083	137810	402840	9	2.5	6.5	ja
6	Point	0	B44H0110	135070	403880	8.6	0.5	8.1	ja
7	Point	0	B44H0133	134080	402410	10.41	1	9.41	ja
8	Point	0	B44H0180	136953	403434	9	1.5	7.5	ja
9	Point	0	B44H0183	135250	402420	9.8	1.2	8.6	ja
10	Point	0	B44H0242	133565	403160	10.9	2.8	8.1	ja
11	Point	0	B44H0249	132710	404320	9.4	0.5	8.9	ja
12	Point	0	B44H0252	139360	401550	8	1.3	6.7	ja
13	Point	0	B44H0260	137810	402325	8.5	2.5	6	ja
14	Point	0	B44H0261	138250	401600	8.8	1.4	7.4	ja
15	Point	0	B44H0262	137840	401880	9.6	1.2	8.4	ja
16	Point	0	B44H0267	135030	403825	9.5	1.5	8	ja
17	Point	0	B44H0272	137320	400130	9.8	2.2	7.6	ja
18	Point	0	B44H0277	137210	400750	9.4	1.6	7.8	ja
19	Point	0	B44H0289	139080	404375	6.42	0.2	6.22	ja
20	Point	0	B44H0313	133591	400962	10.19	1.5	8.69	ja
21	Point	0	B44H0420	139030	404290	7.54	0.9	6.64	ja
22	Point	0	B44H0421	138540	403360	7.84	1.5	6.34	ja
23	Point	0	B44H0499	133500	404120	8.82	0.4	8.42	ja
24	Point	0	B44H0533	137455	405276	6.81	0.65	6.16	ja
25	Point	0	B44H0553	131950	400100	10.1	0.5	9.6	nee
26	Point	0	B44H0555	132850	400170	11.3	2	9.3	nee
27	Point	0	B44H0557	132390	400220	10.6	1.2	9.4	ja

Figuur 5.6.3: Attribuentabel van de boringen in Figuur 5.6.2.

### Maken ArcMap documenten (mxd)

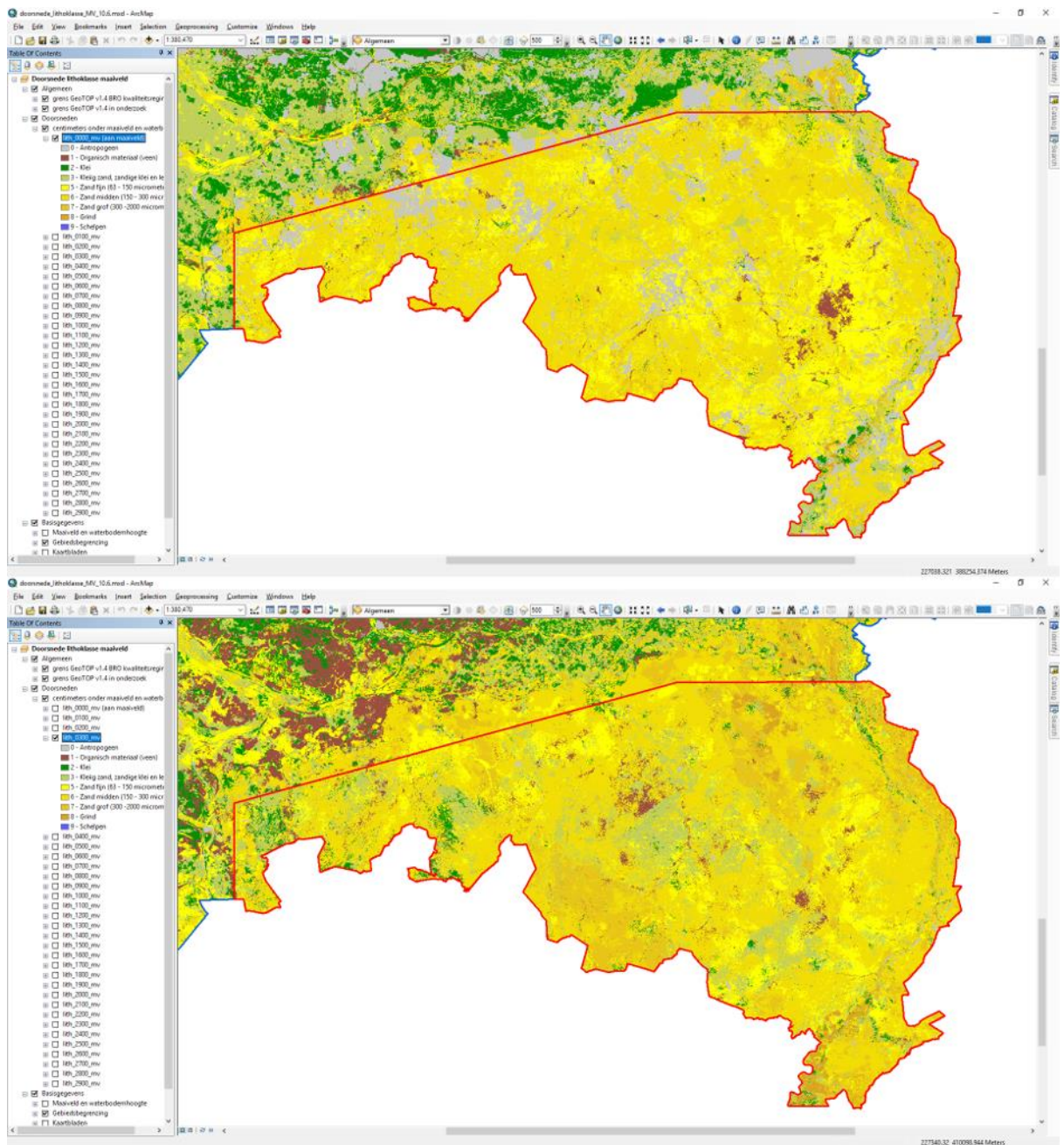
In deze processtap worden de volgende uit te leveren producten aangemaakt:

- 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).

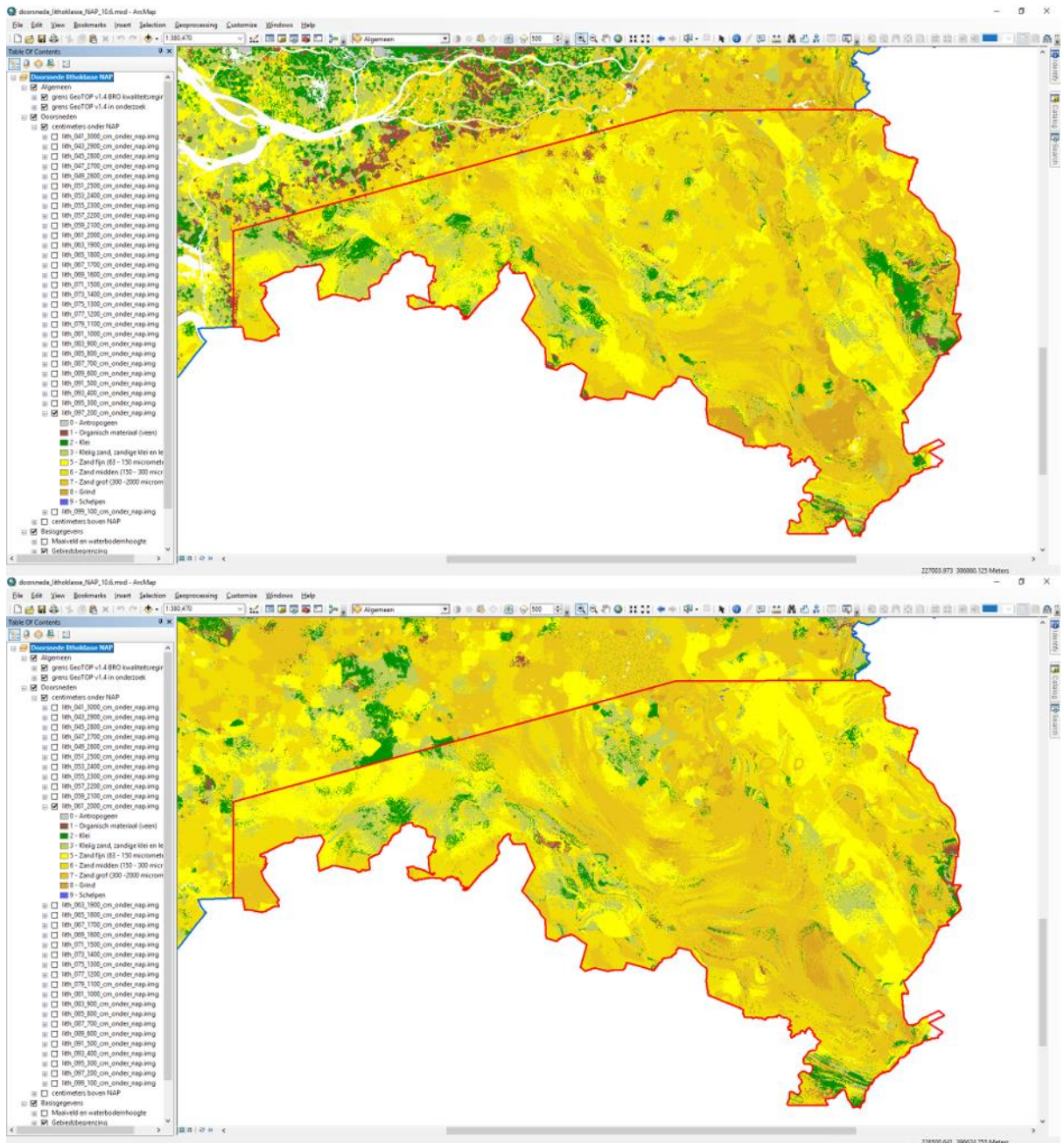
- Maaiveld- en waterbodemoogtekaart (raster).
- Overzicht van de topografische kaartbladen waarop de nummering van de boormonsterprofielen gebaseerd is (shapefile, polygoon).

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.

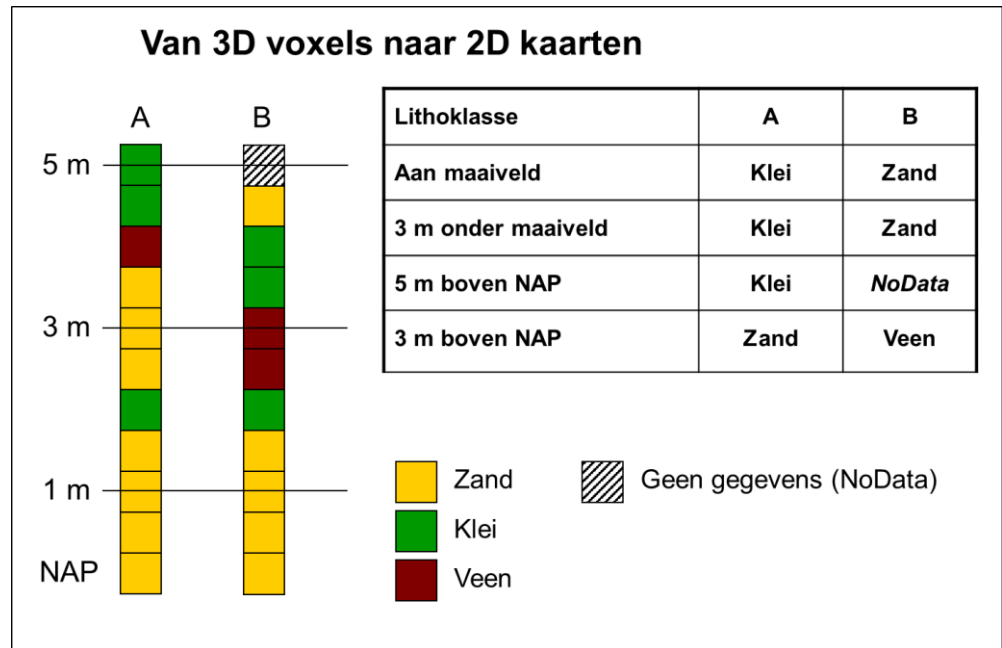


Figuur 5.6.4: Horizontale doorsneden met de lithoklassen op 0 m en 3 m onder maaiveld.



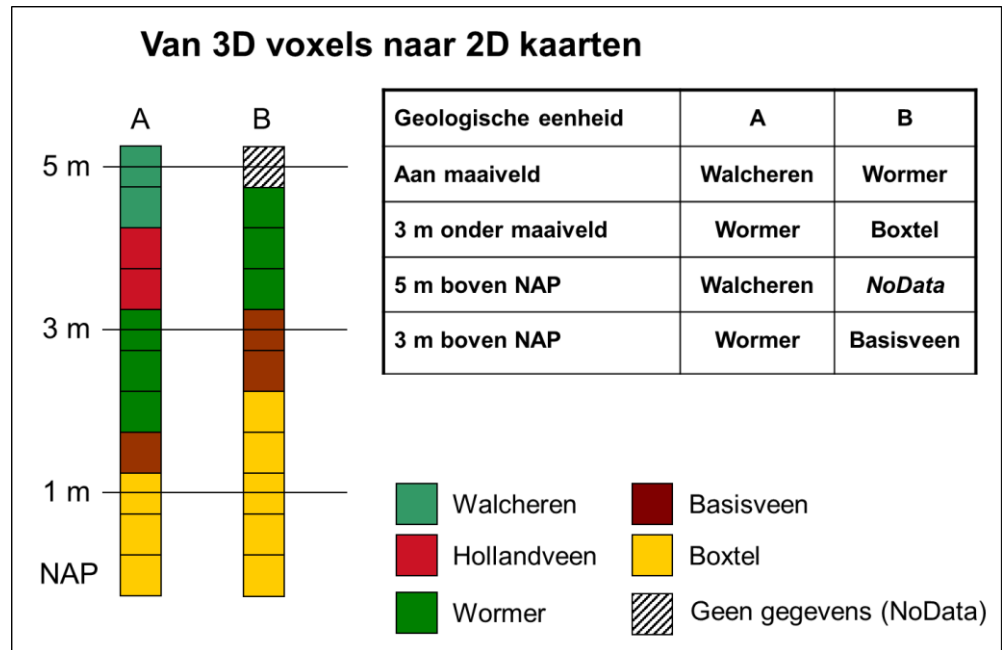
Figuur 5.6.5: Horizontale doorsneden met de lithoklassen op 2 m en 20 m onder NAP.

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.



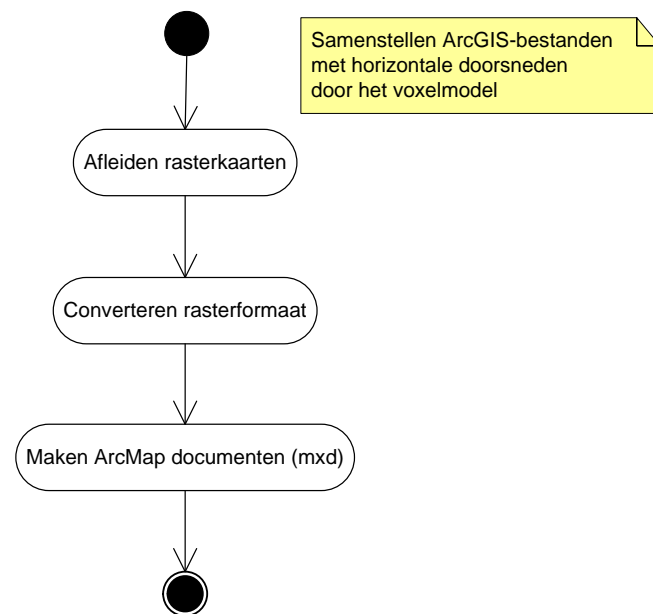
Figuur 5.6.6: Twee verticale voxel stacks met lithoklassen op locaties A en B. De tabel geeft de afgeleide waarden weer voor 4 verschillende doorsnedekaarten. De voxel in locatie B met "geen gegevens" is een niet gevulde voxel boven maaiveld.

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 Literatuuropgave

Berendsen, H.J.A. & E. Stouthamer, E., 2001. Palaeogeographic development of the Rhine-Meuse delta, The Netherlands, Van Gorcum, Assen, 268 p.

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.

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

Dabekaussen, W. & Hummelman, H.J., 2018. Zekerheid over onzekerheid - kwantificering en validatie van geometrische onzekerheid in DGM en REGIS II. TNO rapport 2018 R11338, 44 pp.

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>

Gunnink, J.L., Maljers, D. & Hummelman, J., 2010. Quantifying uncertainty of geological 3D layer models, constructed with a-priori geological expertise. Extended abstract, IAMG 2010, Budapest, Hungary, 29-8 – 2-9-2010, 13 pp.

Hummelman, J., Maljers, D., Menkovic, A., Reindersma, R., Stafleu, J. & Vernes, R., 2019a. Totstandkomingsrapport Digitaal Geologisch Model (DGM). TNO Rapport 2019 R11653, 70 pp. Beschikbaar op BROloket: <https://www.broloket.nl/toelichting/dgm>

Hummelman, J., Maljers, D., Menkovic, A., Reindersma, R., Stafleu, J. & Vernes, R., 2019b. Totstandkomingsrapport Hydrogeologisch Model (REGIS II). TNO Rapport 2019 R11654, 95 pp. Beschikbaar op BROloket: <https://www.broloket.nl/toelichting/regist-ii>

Kiden, P., 2020. Kwaliteitstoetsingsdocument Geologisch model GeoTOP v1.4 - modelgebied Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg v1.0. TNO Rapport, 2020 R10527, 12 pp. Beschikbaar op BROloket: <https://www.broloket.nl/toelichting/geotop>

Maljers, D., Stafleu, J., Van der Meulen, M.J. & 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 structures. 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>

Stafleu, J., Maljers, D., Busschers, F., Gunnink, J., Schokker, J. & Hummelman, J., 2019. Totstandkomingsrapport GeoTOP. TNO Rapport 2019 R11655, 132 pp. Beschikbaar op BROloket: <https://www.broloket.nl/toelichting/geotop>

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. & 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>

Vernes, R.W., Walvoort, D.J.J., Bakker, M.A.J., Brus, D.J., Gunnink, J.L., Maljers, D., Menkovic, A., Stafleu, J., De Vries, F. & Van Wirdum, G., 2013. Proefproject Mariapeel en Deurnsche Peel – Gedetailleerde 3D-modellering van de bodem en ondiepe ondergrond (in Dutch). TNO Rapport 2013 R10053, i.o.v. Provincie

Limburg, Waterschap Peel en Maasvallei, Waterschap Aa en Maas, Alterra enTNO, 112 p.

Vernes, R.W., Deckers, J., Bakker, M.A.J., Bogemans, F., De Ceukelaire, M., Doornenbal, J.C., den Dulk, M., Duser, M., Van Haren, T.F.M., Heyvaert, V.M.A., Kiden, P., Kruisselbrink, A.F., Lanckacker, T., Menkovic, A., Meyvis, B., Munsterman, D.K., Reindersma, R., ten Veen, J.H., van de Ven, T.J.M., Walstra, J. en Witmans, N., 2018. Geologisch en hydrogeologisch 3D model van het Cenozoïcum van de Belgisch-Nederlandse grensstreek van Midden-Brabant / De Kempen (H3O – De Kempen). TNO Rapport 2017 R11261 – VITO 2017/RMA/R/1348, 109 pp.

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.

Woolderink, H.A.G. (Vrije Universiteit Amsterdam) & Cohen, K.M. (Universiteit Utrecht), 2018. Digital Basemap for the Lower Meuse Valley Palaeogeography. Beschikbaar op DANS: <https://doi.org/10.17026/dans-xkk-f29b>

Woolderink, H., Kasse, C., Cohen, K., Hoek, W., & Van Balen, R., 2019. Spatial and temporal variations in river terrace formation, preservation, and morphology in the Lower Meuse Valley, The Netherlands. *Quaternary Research*, 91(2), 548-569. doi:10.1017/qua.2018.49

## 7 Ondertekening

Utrecht, mei 2020

TNO

Naam en paraaf tweede lezer




Drs. D. Maljers

Ondertekening

Autorisatie vrijgave



Dr. J. Stafleu  
Auteur



Dr. M.J. van der Meulen  
Research manager