

# Totstandkomings- rapport Nederland3D (NL3D)

Voxelmodel van de ondiepe ondergrond van  
Nederland

TNO 2024 R11541 – 18 juni 2024

## Totstandkomings- rapport Nederland3D (NL3D)

Voxelmodel van de ondiepe ondergrond van  
Nederland

Auteurs	Jan Stafleu en Renée de Bruijn
Rubricering rapport	TNO Publiek
Titel	TNO Publiek
Rapporttekst	TNO Publiek
Bijlagen	TNO Publiek
Aantal pagina's	69 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	1
Opdrachtgever	De directeur Geologische Dienst Nederland
Projectnaam	GIP 2024 Ondiepe Kartering
Projectnummer	060.59188

**Alle rechten voorbehouden**

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

© 2024 TNO

# Samenvatting

Dit rapport geeft een gedetailleerde beschrijving van de totstandkoming van het geologisch ondergrondmodel Nederland3D (NL3D, versie v2.0): het beschrijft wat NL3D is, op welke brongegevens het is gebaseerd en hoe het gemaakt wordt. Het rapport bevat tevens een korte geologische beschrijving van het model.

NL3D 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 NL3D is de ondergrond onderverdeeld in een regelmatig driedimensionaal grid (raster) van aaneengesloten voxels (volumecellen) van 250 x 250 m in de horizontale richtingen en 1 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.

NL3D geeft in één model voor het hele land een beeld van de stratigrafische opbouw en lithologische eigenschappen van de ondiepe ondergrond van Nederland. GeoTOP doet dit ook, met een hogere resolutie en nauwkeurigheid, maar GeoTOP is op dit moment nog niet in heel Nederland beschikbaar. NL3D is daarmee vooral geschikt voor toepassingen waarbij een volledig landsdekkend beeld nodig is, of bij toepassingen in gebieden waar GeoTOP nog niet beschikbaar is. In gebieden waar GeoTOP wel beschikbaar is heeft het de voorkeur om GeoTOP te gebruiken in plaats van NL3D.

Het maken van NL3D bestaat uit vier stappen. Eerst wordt een geologisch lagenmodel geconstrueerd. Dit gebeurt door het bestaande lagenmodel DGM v2.2 op te schalen naar de gewenste resolutie van 250 x 250 m.

In de tweede stap wordt een dataset met boorbeschrijvingen samengesteld. De dataset omvat boringen uit de DINO database, de Laaglandgenese boringendatabase van de Universiteit Utrecht en een aantal voor de provincie Utrecht gezette handboringen in het Utrechtse veengebied. Boorbeschrijvingsintervallen krijgen een geologische eenheid toegekend op basis van het lagenmodel. Daarnaast wordt uit de lithologische boorbeschrijving de lithoklasse afgeleid.

De derde stap is het maken van het voxelmodel, waarbij eerst elke voxel op basis van het geologisch lagenmodel in de juiste geologische eenheid wordt geplaatst. Vervolgens wordt per geologische eenheid de lithoklasse van de voxels geschat op basis van de boorbeschrijvingsintervallen van de overeenkomstige geologische eenheid. Bij het schatten van de lithoklasse wordt rekening gehouden met de breuken die in de betreffende geologische eenheid aanwezig zijn.

De vierde en laatste stap is het maken van de te publiceren datasets. NL3D wordt uitgeleverd als een set 2D-rasterkaarten die een attribuut van het voxelmodel (geologische eenheid, meest waarschijnlijke lithoklasse en modelonzekerheid van lithoklasse) op een bepaalde diepte ten opzichte van maaiveld weergeven. Omdat NL3D minder nauwkeurig is dan GeoTOP is er voor gekozen om NL3D tot een maximum diepte van 15 m onder maaiveld ter beschikking te stellen.

# Inhoudsopgave

Samenvatting.....	3
1 Inleiding.....	5
1.1 Doel van het rapport.....	5
1.2 Leeswijzer.....	5
1.3 Andere modellen van de ondiepe ondergrond.....	5
2 Algemene beschrijving van het model.....	7
2.1 Het model NL3D.....	7
2.2 Versie informatie.....	9
2.3 Dekkingsgebied.....	9
2.4 Modelonzekerheden.....	10
2.5 Doel en gebruik.....	12
2.6 Verschillen met DGM en GeoTOP.....	13
3 Uitgangspunten en randvoorwaarden, richtlijnen en standaarden.....	16
3.1 Uitgangspunten en randvoorwaarden.....	16
3.2 Richtlijnen en standaarden.....	17
3.3 Software.....	18
4 Brongegevens.....	19
4.1 Boorbeschrijvingen DINO.....	19
4.2 Boorbeschrijvingen Universiteit Utrecht.....	23
4.3 Tauw veenboringen.....	25
4.4 DGM.....	25
4.5 Breuken.....	27
5 Procesbeschrijving.....	28
5.1 Inleiding.....	28
5.2 Lagenmodel.....	30
5.3 Boorgegevens.....	31
5.4 Voxelmodel.....	38
5.5 Publicatie.....	54
6 Geologische beschrijving.....	57
Referenties.....	64
Ondertekening.....	66
Bijlage	
Bijlage A: Geologische eenheden en lithoklassen	67

# 1 Inleiding

## 1.1 Doel van het rapport

Dit rapport geeft een gedetailleerde beschrijving van de totstandkoming van het geologisch ondergrondmodel Nederland3D (NL3D): het beschrijft wat NL3D is, op welke brongegevens het is gebaseerd en hoe het gemaakt wordt. Het rapport bevat tevens een korte geologische beschrijving van het model.

## 1.2 Leeswijzer

Het rapport start na deze inleiding met een algemene beschrijving van het model (hoofdstuk 2). In dit hoofdstuk staat ook versie informatie, informatie over het dekkingsgebied, modelonzekerheden, doel en gebruik en de relatie van NL3D met twee andere ondergrondmodellen, namelijk DGM en GeoTOP. Hoofdstuk 3 geeft een overzicht van de belangrijkste uitgangspunten en randvoorwaarden die bij de modellering gehanteerd worden. Vervolgens wordt in hoofdstuk 4 een overzicht gegeven van de bij NL3D betrokken brongegevens. Hoofdstuk 5 geeft een gedetailleerde beschrijving van het proces waarmee NL3D wordt gemaakt. Het rapport wordt afgesloten met een korte geologische beschrijving van NL3D aan de hand van drie profielen (hoofdstuk 6).

## 1.3 Andere modellen van de ondiepe ondergrond

Modellen van de ondiepe ondergrond geven schattingen (voorspellingen) weer van de opbouw en eigenschappen van de bodem of ondergrond in twee of drie dimensies. Naast NL3D zijn er nog zes modellen van de ondiepe ondergrond van het vasteland van Nederland. Deze modellen beslaan (deels) hetzelfde gebied en dieptebereik als NL3D en worden daarom hieronder kort beschreven (Tabel 1.1).

**Tabel 1.1:** Modellen van de ondiepe ondergrond van Nederland.

Model	Type	Dimensies	BRO?
Geologische kaart van het Koninkrijk der Nederlanden	Overzichtskaart	2D	Nee
Geomorfologische Kaart van Nederland (GKN)	Geomorfologische modellen	2D	Ja
Bodemkaart van Nederland (BKN)	Bodemkundige modellen	2D	Ja
Digitaal Geologisch Model (DGM)	Geologische modellen	3D	Ja
REGIS II	Hydrogeologische modellen	3D	Ja
GeoTOP	Geologische modellen	3D	Ja
NL3D	Geologische modellen	3D	Nee

De Geologische kaart van het Koninkrijk der Nederlanden laat zien uit welke afzettingen de bovenste meters van de ondergrond zijn opgebouwd. De kaart omvat Nederland, het

Nederlands Continentaal Plat en het Caribisch deel van het Koninkrijk. Kaarteenheden vertegenwoordigen (combinaties van) formaties, laagpakketten en lagen. In de kustzone komen holocene pakketten gestapeld voor. Deze stapelingen zijn gedefinieerd als profieltypes, afzonderlijk gekarteerd en te herkennen aan codes met kleine letters.

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 (Gunnink et al., 2013; Hummelman et al., 2019a). 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 boorbeschrijvingen 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 (Vernes & Van Doorn, 2015; Hummelman et al., 2019b). 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 boorbeschrijvingen die bij het maken van het model gebruikt zijn.

GeoTOP is een driedimensionaal model van de laagopbouw en grondsoort (klei, zand, grind en veen) van de ondiepe ondergrond van Nederland tot een diepte van maximaal 50 m onder NAP (Stafleu et al., 2019, 2020, 2022, 2023). In GeoTOP is de ondergrond onderverdeeld in een regelmatig driedimensionaal grid (raster) van aaneengesloten voxels (volumecellen) van 100 bij 100 m in de horizontale richting 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 boorbeschrijvingen die bij het maken van het model gebruikt zijn.

## 2 Algemene beschrijving van het model

### 2.1 Het model NL3D

NL3D 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 NL3D is de ondergrond onderverdeeld in een regelmatig driedimensionaal grid (raster) van aaneengesloten voxels (volumecellen) van 250 x 250 m in de horizontale richtingen en 1 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.

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

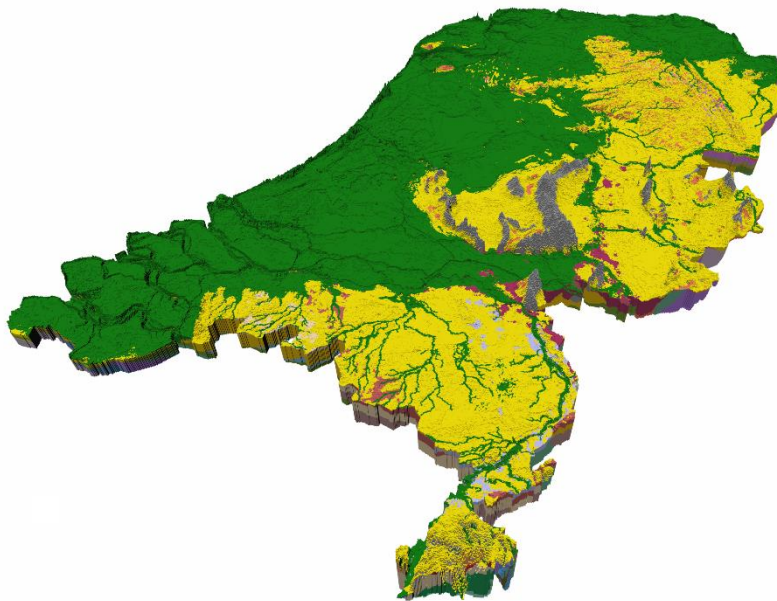
- ) **Lithostratigrafie** is de indeling van de ondergrond in formaties (de fundamentele lithostratigrafische eenheid), die op hun beurt kunnen worden onderverdeeld in laagpakketten en lagen. Opeenvolgende formaties kunnen worden ingedeeld in groepen en opeenvolgende groepen in supergroepen. Formaties, laagpakketten en lagen worden gedefinieerd op basis van onderscheidende lithologische kenmerken (uit welke materialen bestaat de eenheid en hoe onderscheidt de eenheid zich in dat opzicht van onder- en bovenliggende eenheden?). Verder is de ruimtelijke relatie met andere eenheden onderdeel van de definitie: meerdere formaties kunnen vergelijkbare of gelijke kenmerken hebben, maar als ze gescheiden zijn toch individueel benoemd worden. Formaties en onderdelen daarvan moeten karteerbaar zijn, wat wil zeggen (1) dat de basis en top moeten kunnen worden herkend (bijvoorbeeld in een boring of ontsluiting), en (2) dat ze kunnen worden gerepresenteerd op de kaart of in het model naar keuze. Dit laatste hangt voornamelijk samen met schaal. Groepen en supergroepen zijn als samenstellingen van formaties uiteraard per definitie karteerbaar. Een geologische kaart of een geologisch model is de ruimtelijke uitwerking van deze criteria, het schaalt lithostratigrafisch geïnterpreteerde gegevens op naar het voorkomen van de eenheid in respectievelijk twee of drie dimensies. Nederlandse Lithostratigrafische eenheden worden formeel gedefinieerd in de [Stratigrafische Nomenclator van de Ondergrond van Nederland](#) (TNO, 2024). In het geval van formeel gedefinieerde eenheden wordt Formatie, Laagpakket, Laag, Groep of Supergroep met een hoofdletter geschreven.
- ) In NL3D 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 NL3D weergegeven door middel van **lithoklassen**, waarin lithologie (grondsoort) en zandkorrelgrootteklassen zijn gecombineerd in één classificatie.



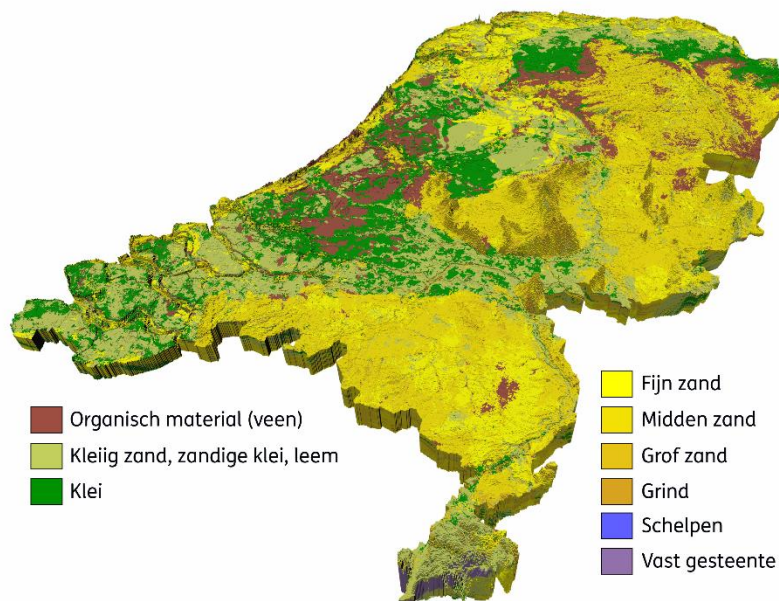
NL3D bestaat uit de volgende onderdelen die ontstaan uit een gestandaardiseerd werkproces:

- › De interpretatie van de boorbeschrijvingen in **geologische eenheden** en in **lithoklassen**. Elke boorbeschrijving 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 250 x 250 m. Elke **rastercel** heeft de hoogteligging van top respectievelijk basis in m ten opzichte van NAP als attribuut.
- › Een **voxelmodel** waarbij de ondergrond in voxels van 250 x 250 x 1 m ingedeeld is. Elke **voxel** heeft een aantal attributen, namelijk de geologische eenheid, de meest waarschijnlijke lithoklasse en een aantal attributen die inzicht geven in de modelonzekerheid: de *kans op voorkomen* van de afzonderlijke lithoklassen en de samenvattende *modelonzekerheid van lithoklasse*.

Figuur 2.1 en Figuur 2.2 geven een impressie van NL3D.



**Figuur 2.1:** 3D aanzicht van NL3D met de geologische eenheid als attribuut. Zie Bijlage A voor de legenda; verticale overdrijving 150x.



**Figuur 2.2:** 3D aanzicht van NL3D met de meest waarschijnlijke lithoklasse als attribuut. Verticale overdrijving 150x.

## 2.2 Versie informatie

Dit rapport beschrijft versie NL3D v2.0 (2024) dat de voorgaande versie v1.1 (2013) vervangt. Het model is volledig opnieuw opgebouwd met als belangrijkste veranderingen:

- › Het lagenmodel is gebaseerd op de meest recente versie van DGM, namelijk DGM v2.2 (Hummelman, 2019a).
- › Sinds 2013 zijn meer boorgegevens beschikbaar gekomen: van 500.000 naar 640.000. Deze aantallen betreffen het totaal van de gebruikte boringen uit de DINO database, de Laaglandgenese boringendatabase van de Universiteit Utrecht en een aantal voor de provincie Utrecht gezette handboringen in het Utrechtse veengebied.
- › De voxelmodellering maakt gebruik van de nieuwste in GeoTOP ontwikkelde technieken (conform Stafleu et al., 2022).
- › De voxelmodellering houdt nu rekening met breuken.
- › Voor een aantal geologische eenheden wordt rekening gehouden met de structurele helling van de eenheid (conform Stafleu et al., 2020).
- › De maat van onzekerheid ‘kans op meest waarschijnlijke lithoklasse’ is conform GeoTOP vervangen door ‘modelonzekerheid van lithoklasse’ (ook bekend als ‘informatie-entropie’).

## 2.3 Dekkingsgebied

Het dekkingsgebied van NL3D volgt de begrenzing van het DGM model. De begrenzing van het DGM model is gedefinieerd als een gebied die in het oosten en zuiden begrensd wordt door de landsgrens met Duitsland en België. De Belgische enclaves bij Baarle maken om praktische redenen onderdeel uit van het modelgebied. De gemiddelde laagwaterlijn langs de kustlijn vormt de westelijke en noordelijke grens van het modelgebied. Ook de

Waddeneilanden en de Waddenzee behoren tot het landelijke modelgebied. Hier worden de noordelijke gemiddelde laagwaterlijnen van de Waddeneilanden als grens genomen. Tussen deze gemiddelde laagwaterlijnen is op basis van beschikbare waterbodemoogten een logische onderlinge verbinding als grens aangenomen. Voor het landelijke modelgebied is een maaiveld- en waterbodemoogtekaart samengesteld als grid met een resolutie van 100 x 100 meter. De buitenste randen van de 100 x 100 meter rastercellen langs de modelgrenslijn dienen als landelijk modelgebiedsbegrenzing. Voor NL3D is de begrenzing opgeschaald naar 250 x 250 m.

## 2.4 Modelonzekerheden

### 2.4.1 Onzekerheid

De belangrijkste gegevensbron voor NL3D zijn boorbeschrijvingen. Elk van deze boorbeschrijvingen geeft vaak gedetailleerde informatie over de opbouw van de ondergrond op één specifieke locatie. Voor het overgrote deel van de rastercellen geldt echter dat ze niet doorboord zijn. Dit betekent dat voor de niet doorboorde rastercellen een schatting gedaan moeten worden op basis van de in de omgeving van de rastercel aanwezige boorbeschrijvingen. Hoe goed het model hiertoe in staat is, is onder andere afhankelijk van:

- › de geologische complexiteit (de basis van een eenheid die weinig variatie vertoont is beter te schatten dan de basis van een eenheid die sterk varieert);
- › de hoeveelheid en de kwaliteit van de boorbeschrijvingen die het diepteniveau van de eenheid hebben bereikt in de omgeving van de rastercel;
- › de aan het model opgelegde randvoorwaarden zoals verbreidingsgrenzen van modeleenheden;
- › het gebruikte algoritme voor interpolatie met de bijbehorende parameters zoals de gehanteerde ruimtelijke correlatiefunctie.

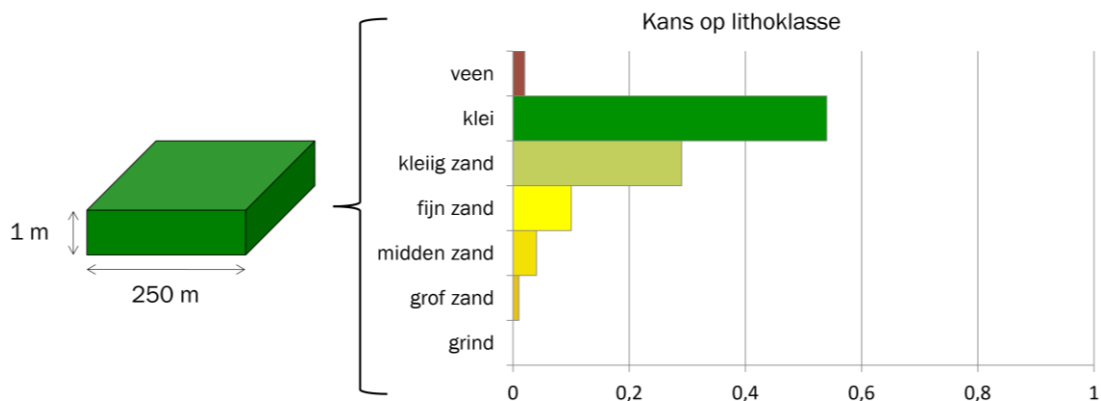
Alle maatstaven van onzekerheid in NL3D zijn gebaseerd op de in het model gebruikte (stochastische) interpolatietechnieken. Het is belangrijk om te beseffen dat deze technieken niet expliciet rekening houden met de onzekerheidsmarges in de gebruikte brongegevens (waaronder de boorbeschrijvingen). In NL3D spreken we daarom van *modelonzekerheid* in plaats van *onzekerheid*.

### 2.4.2 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).



**Figuur 2.3:** Visualisatie van modelonzekerheid van een individuele voxel door het weergegeven van de kans op lithoklasse in een histogram. In dit voorbeeld is klei de lithoklasse met de grootste kans op voorkomen (ruim 50%). Er is ook een vrij grote kans op kleilig zand (~30%), maar de kans dat de voxel zand of veen bevat is 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. Verder geldt dat de lithoklasse met de hoogste kans op voorkomen niet altijd overeenkomt met de meest waarschijnlijke lithoklasse (zie paragraaf 5.4.3.10).

### 2.4.3 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 NL3D 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 2.1 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 2.1:** Modelonzekerheid (H) uitgewerkt voor een model met drie mogelijke lithoklassen.

P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	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.

## 2.4.4 Boordichtheid

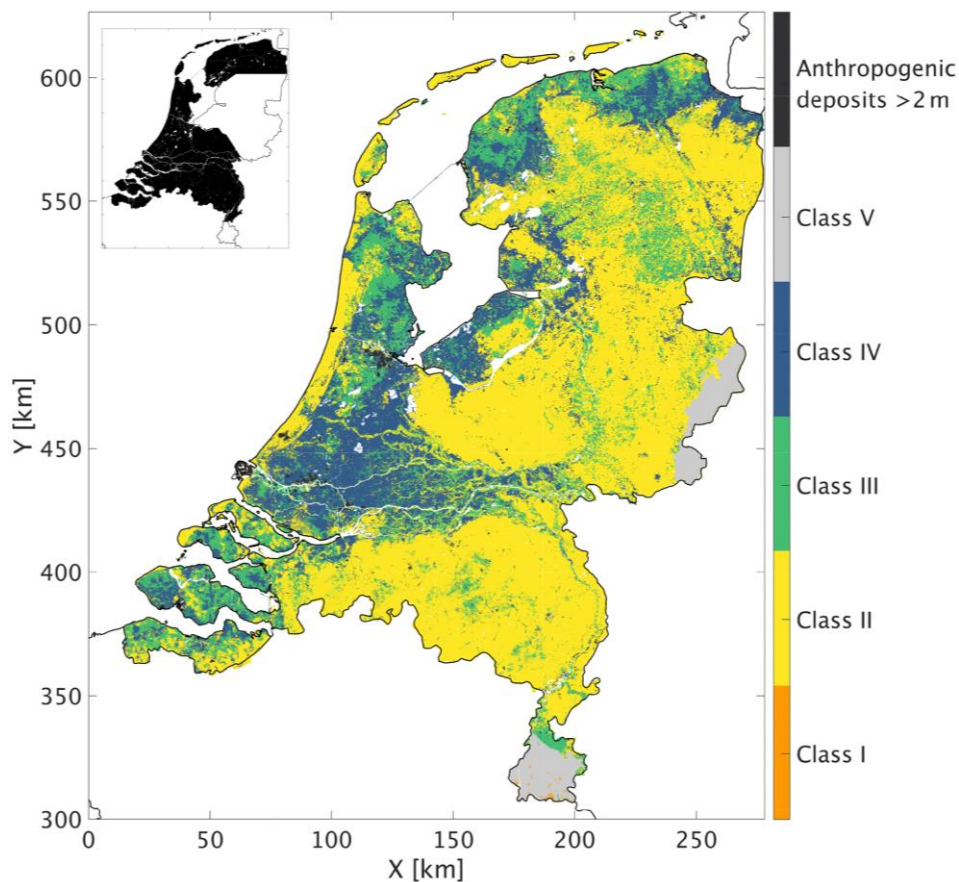
Een aanvullende maatstaf voor modelonzekerheid is de boordichtheid. In het algemeen geldt dat een hoge boordichtheid leidt tot een lage modelonzekerheid. Er zijn echter uitzonderingen, in geologisch complexe gebieden met veel heterogeniteit kan een hoge boordichtheid gepaard gaan met een hoge modelonzekerheid. Omgekeerd kan een lage boordichtheid bij een ondergrond met een eenvoudige opbouw tot een lage modelonzekerheid leiden. Met NL3D worden boordichtheidskaarten meegeleverd van de in het model gebruikte boorinformatie op verschillende dieptes onder maaiveld.

## 2.5 Doel en gebruik

NL3D geeft in één model voor het hele land een beeld van de stratigrafische opbouw en lithologische eigenschappen van de ondiepe ondergrond van Nederland. GeoTOP doet dit ook, met een hogere resolutie en nauwkeurigheid, maar GeoTOP is op dit moment (2024<sup>7</sup>) nog niet in heel Nederland beschikbaar. NL3D is daarmee vooral geschikt voor toepassingen waarbij een volledig landsdekkend beeld nodig is, of bij toepassingen in gebieden waar GeoTOP nog niet beschikbaar is. In gebieden waar GeoTOP wel beschikbaar is heeft het de voorkeur om GeoTOP te gebruiken in plaats van NL3D.

Figuur 2.4 geeft een voorbeeld van een landsdekkende kaart die op GeoTOP gebaseerd is in die delen van het land waar GeoTOP beschikbaar is (het zwarte gebied in het kleine kaartje) en op NL3D in de overige delen van het land (Van Ginkel et al., 2022).

<sup>7</sup> Het actuele dekkingsgebied van GeoTOP wordt op de kaart weergegeven op BROloket: <https://www.broloket.nl/ondergrondmodellen/kaart>



**Figuur 2.4:** Voorbeeld van een landsdekkende kaart die deels op GeoTOP (v1.5) en deels op NL3D (v1.1) is gebaseerd. De kaart geeft de gevoeligheid van de ondiepe ondergrond voor amplitudeversterking van geïnduceerde aardbevingen weer. Het kleine kaartje geeft in zwart aan waar de kaart gebaseerd is op GeoTOP, in de overige delen van het land is gebruik gemaakt van NL3D. Kaart overgenomen uit Van Ginkel et al. (2022). Classificatie: I – vast gesteente; II – hard sediment; III – zacht op hard sediment; IV – zeer zacht op hard sediment; V – zacht sediment op vast gesteente.

NL3D is een subregionaal ondergrondmodel met een gebruiksschaal die past bij toepassingen op provinciaal, gemeentelijk of wijkniveau. NL3D is niet geschikt voor ondergrondvraagstukken op een grotere schaal (straatniveau of individuele gebouwen, huizenblokken of constructies als 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.

## 2.6 Verschillen met DGM en GeoTOP

Het lagenmodel van NL3D is overgenomen van DGM v2.2, waarbij de rastercellen van 100 bij 100 m zijn opgeschaald naar 250 bij 250 m. Bij de opschaling gaat informatie verloren. Bij toepassingen waarin de geologische laagopbouw van belang is heeft het daarom de voorkeur om DGM in plaats van NL3D te gebruiken.

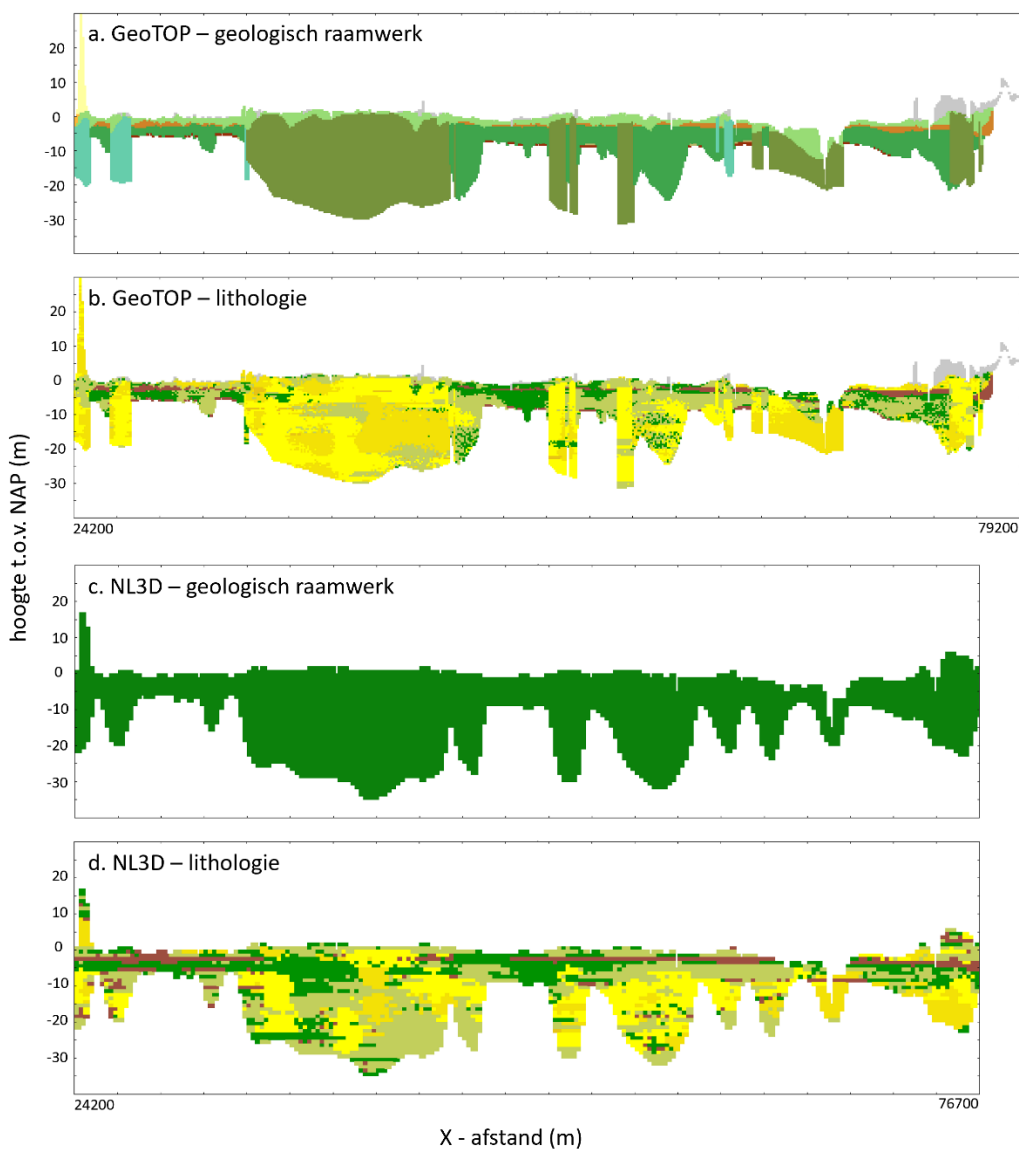
Er zijn vier belangrijke verschillen tussen NL3D en GeoTOP. Ten eerste zijn de afmetingen van de voxels bij NL3D groter dan bij GeoTOP, er is dus minder detail zichtbaar in NL3D. Ten tweede is de mate van geologische sturing in NL3D veel kleiner dan in GeoTOP. Een voorbeeld zijn de holocene afzettingen, die in NL3D zijn samengenomen in één geologische eenheid, terwijl ze in GeoTOP in meerdere formaties, laagpakketten en lagen zijn

onderverdeeld. Het derde verschil is dat de stratigrafische interpretatie van de boorbeschrijvingen in GeoTOP veel geavanceerder is. In NL3D worden de boorbeschrijvingen van stratigrafie voorzien door ze te snijden met het lagenmodel. Boorintervallen kunnen daardoor in een laag komen te vallen waar ze niet in horen. Vooral op locaties waar het (paleo-)reliëf sterk en het lithologisch contrast tussen lagen groot is, kunnen daarmee opvallende afwijkingen in de gemodelleerde lithoklassen ontstaan. In GeoTOP, waar stratigrafie wordt toegekend door de lithologische kenmerken van de boorbeschrijvingen te analyseren, treden deze problemen veel minder op. Het vierde verschil betreft de antropogene afzettingen. Deze zijn in GeoTOP als aparte eenheid gekarteerd, maar hebben een eigen lithoklasse-invulling ‘antropogeen materiaal’ waarin geen verder onderscheid in de aard van het materiaal (bijvoorbeeld zand, klei, huisvuil) gemaakt wordt. Dit is gedaan omdat de samenstelling van de antropogene afzettingen zeer divers is en abrupte overgangen kent die met de in GeoTOP gebruikte data en technieken moeilijk zijn te modelleren. In NL3D maken de antropogene afzettingen deel uit van de eenheid ‘Holocene afzettingen’, die als geheel van lithoklassen is voorzien. De lithoklasseinvulling van de antropogene afzettingen is daarmee net als de natuurlijke afzettingen volledig gebaseerd op de boorbeschrijvingen waarbij geen rekening wordt gehouden met voornoemde heterogeniteit en abrupte overgangen.

De verschillen tussen NL3D en GeoTOP worden geïllustreerd in Figuur 2.5 dat een dwarsdoorsnede laat zien door de Provincie Zeeland. De doorsnede begint links op het westelijke puntje van Walcheren en loopt ruwweg naar het oosten tot aan de Brabantse Wal. Het profiel is circa 55 kilometer lang en loopt van ruim 30 meter boven NAP (de duinen links in beeld) tot ruim 30 meter onder NAP.

Het geologisch raamwerk van GeoTOP laat de Holocene laagpakketten zien met getijdegeulen en getijdeplaatafzettingen in groen, markante veenlagen in bruin, de duinen in geel en antropogene ophogingen in grijs. In het overeenkomstige raamwerk van NL3D zijn al deze laagpakketten samengevat in één Holoceen pakket (donkergroen).

In het lithologische model van GeoTOP zien we het zand geconcentreerd in de getijdegeulen, en kleiige afzettingen op de getijdeplaten. Ook is het veen duidelijk geconcentreerd in de twee markante veenlagen (Basisveen Laag en Hollandveen Laagpakket).



**Figuur 2.5:** Dwarsdoorsneden door de Holocene afzettingen van Walcheren tot aan de Brabantse Wal in GeoTOP en NL3D.

In het lithologische model van NL3D zien we duidelijke overeenkomsten met GeoTOP in de bovenste 10 meter (gerekend vanaf maaiveld). Hier zien we ook de verdeling van zand in de getijdegeulen en kleiige afzettingen op de getijdeplaten, en is het veen duidelijk geconcentreerd in het Hollandveen Laagpakket. Deze overeenkomst komt zonder geologische sturing tot stand en is het resultaat van het grote aantal boringen in de ondiepe ondergrond. Dieper in het profiel neemt de boordichtheid echter snel af en wordt de geologische sturing belangrijker. In GeoTOP zien we ook dieper in het model een vooral zandige opvulling van de getijdegeulen. In NL3D komen in de getijdegeulen echter ook venen en kleien voor als een artefact van de rekenmethode.

Samenvattend kunnen we concluderen dat NL3D in de bovenste 10 m ook met beperkte geologische sturing een betrouwbaar beeld geeft van wat we in de ondergrond kunnen verwachten. Op grotere diepten blijft een sterke geologische sturing echter onontbeerlijk om tot een goed resultaat te komen.



# 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 vijftal door TNO systematisch vervaardigde c.q. onderhouden ondergrondmodellen (NL3D, 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 NL3D 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.

NL3D 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.

NL3D geeft inzicht in de geologische opbouw en lithologische samenstelling van de ondergrond tot een diepte van maximaal 50 m beneden NAP.

NL3D 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 NL3D, worden grotendeels ontleend aan de databank DINO van TNO. Daarnaast maakt NL3D 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 geologische onderzocht. De kwaliteit en de representativiteit van de boorgegevens hangen hier mee samen. Ook het formaat van de boorbeschrijvingen kan verschillen, in de vorm van een digitale, cf. de Standaard Boorbeschrijving (SBB; Bosch, 2000) 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 NL3D is dat alle beschikbare boorbeschrijvingen worden meegenomen in de modellering. Voor een deel van de boorbeschrijvingen geldt echter dat de kwaliteit zodanig laag is, dat NL3D er niet beter maar slechter door zou worden. Om deze boorbeschrijvingen te traceren en uit te sluiten wordt een kwaliteitsfilter toegepast, gebaseerd op de dikte van de intervallen in de eerste 30 m van de boorbeschrijvingen.

Als onderdeel van NL3D (en GeoTOP, 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 NL3D is aangehouden, is beschreven in de de [Stratigrafische Nomenclator van de Ondergrond van Nederland](#) (TNO, 2024).

Bij het samenstellen van NL3D 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 NL3D 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).

## 3.3 Software

Er wordt gebruik gemaakt van verschillende softwarepakketten (Tabel 3.1).

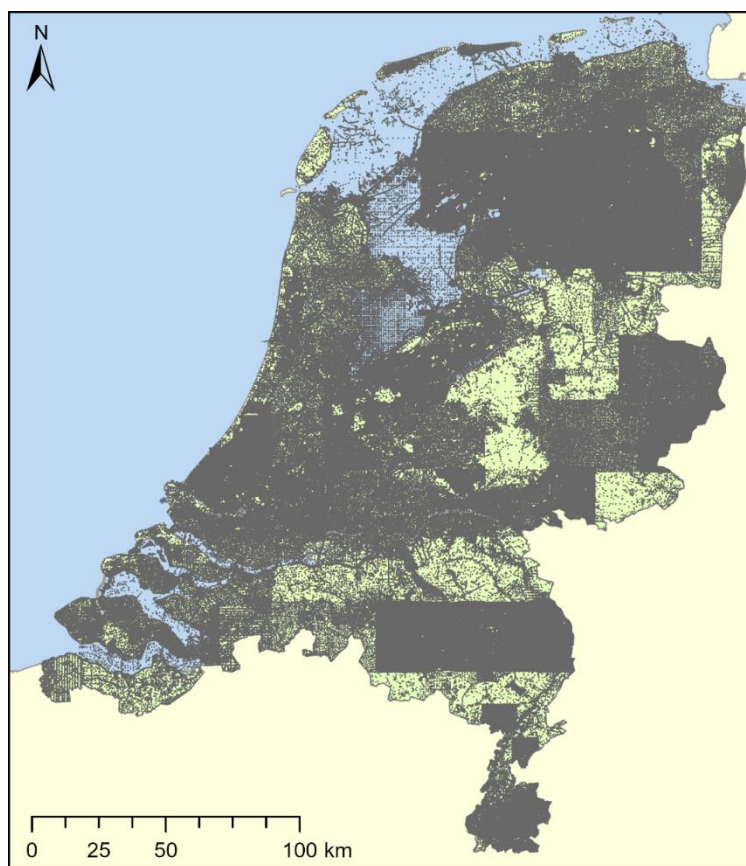
**Tabel 3.1:** Softwarepakketten gebruikt bij het maken van NL3D.

Software	Versie	O.a. gebruikt voor
Isatis®	2018.4	Geostatistische berekeningen voor het lagenmodel en het voxelmodel.
MS Excel	Office 365	In Excel zijn <i>workflow managers</i> ontwikkeld die opdrachtregels voor Isatis® aanmaken.
Python	2.7.18	Programmeertaal voor het ontwikkelen van scripts voor dataextractie, dataconversie, toekennen van stratigrafische interpretaties etc.
ArcGIS Pro	3.1.1	GIS pakket voor visualisatie in 2D en 3D en uitvoeren van GIS operaties.
iMOD	V5.0 X64	Visualisatie applicatie dat wordt gebruikt bij het controleren van modelresultaten en het uitvoeren van de quality control (QC)

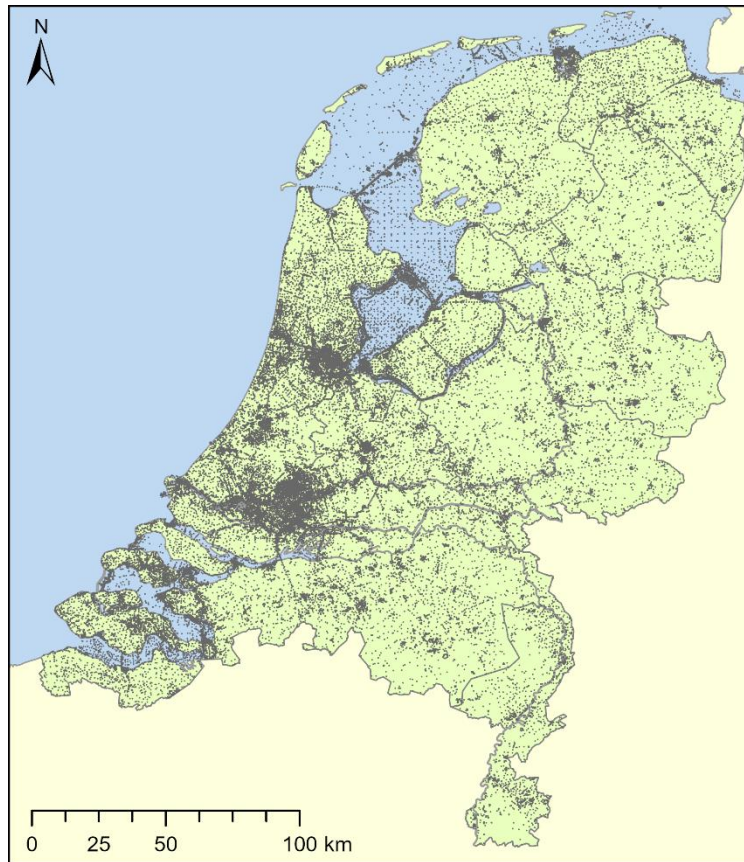
# 4 Brongegegevens

## 4.1 Boorbeschrijvingen DINO

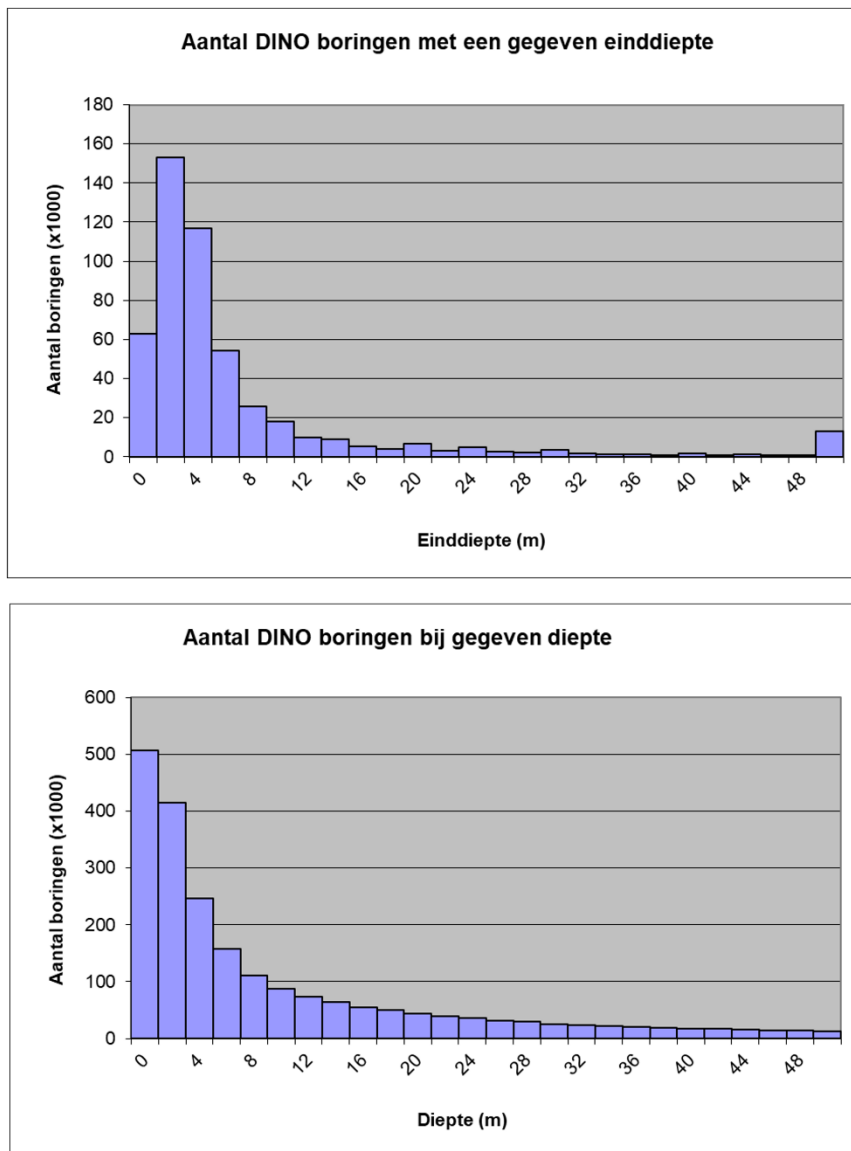
De lithoklasse in het voxelmodel wordt geschat op basis van de lithologische boorbeschrijvingen in de DINO database. DINO is de landelijke centrale opslag voor geowetenschappelijke gegevens over de diepe en ondiepe ondergrond ([www.dinoloket.nl](http://www.dinoloket.nl)). Omdat de boorbeschrijvingen 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 NL3D zijn in totaal circa 507.000 boorbeschrijvingen uit DINO gebruikt. Door het grote aandeel ondiepe handboringen in DINO neemt het aantal beschikbare boorbeschrijvingen met de diepte echter snel af (Figuur 4.1, Figuur 4.2 en Figuur 4.3).



**Figuur 4.1:** Locatie van boringen aan maaiveld (N = 506.675). Boringen met een voor NL3D te lage kwaliteit zijn in deze kaart weggelaten.



**Figuur 4.2:** Locatie van boringen op een diepte van 10 m onder maaiveld (N = 65.063). Boringen met een voor NL3D te lage kwaliteit zijn weggelaten.



**Figuur 4.3:** Histogram met aantal boringen bij een gegeven einddiepte onder maaiveld (boven) en het aantal boringen dat minimaal een bepaalde diepte bereikt (onder). N = 506.675; interval 2 m. Boringen die vanwege een te lage kwaliteit niet in NL3D zijn gebruikt zijn weggelaten.

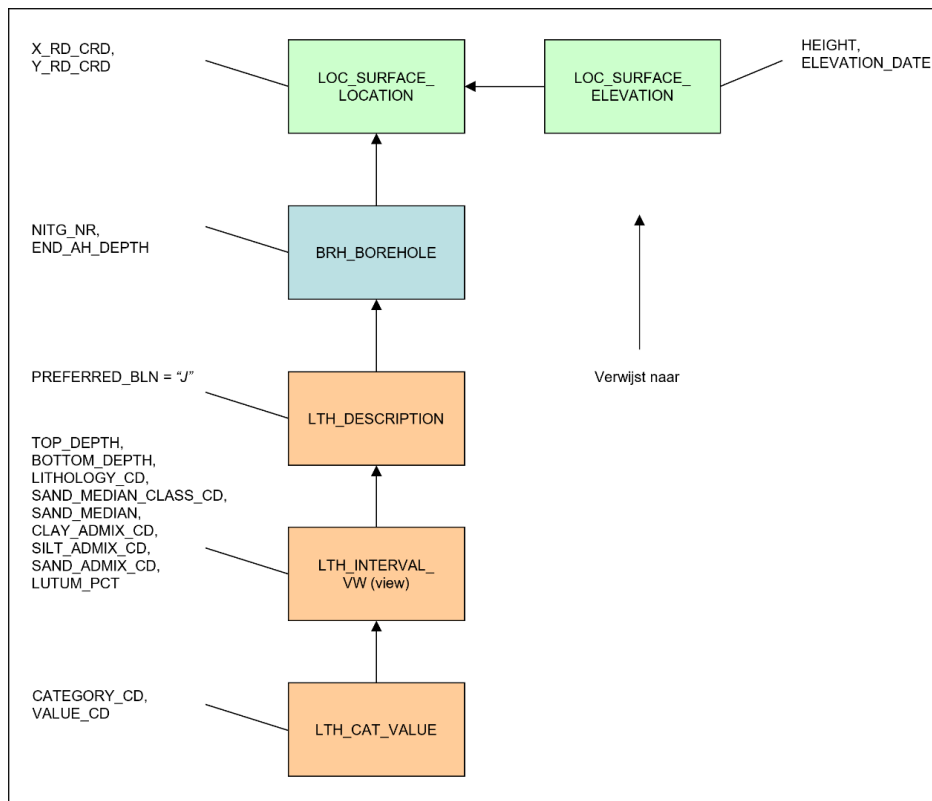
### 4.1.1 Vertrouwelijke boringen

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.

### 4.1.2 Gebruikte entiteiten en attributen

De belangrijkste attributen van de boorbeschrijvingen zijn top en basis van de intervalbeschrijvingen, hoofdlithologie, bijmengingen van zand, silt, klei, grind en humus, zandmediaan, schelpgehalte en sedimentstructuren zoals scheve gelaagdheid. In NL3D

wordt de attribootinformatie alleen gebruikt voor het afleiden van de lithoklasse. Het gaat daarbij om de entiteiten en attributen in Figuur 4.4 en Tabel 4.1.



**Figuur 4.4:** In NL3D gebruikte entiteiten en attributen van de DINO database.

**Tabel 4.1:** In NL3D gebruikte entiteiten en attributen van de DINO database.

Entiteit	Attribuut	Toelichting
BRH_BOREHOLE <i>Boring</i>	NITG_NR	Boornummer
	END_AH_DEPTH	Einddiepte
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).

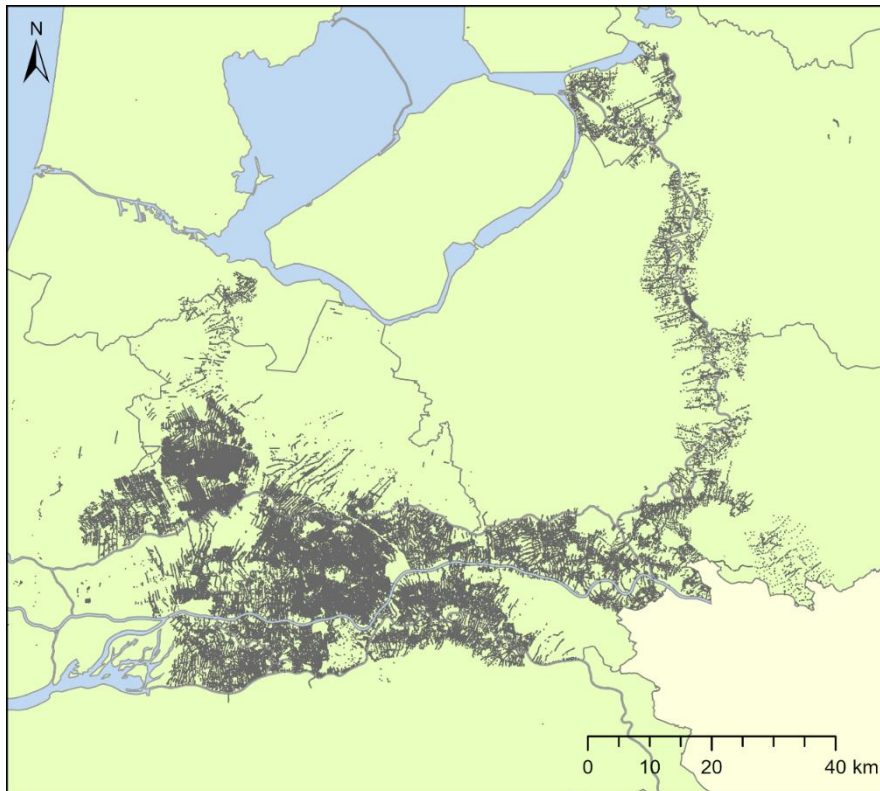
Entiteit	Attribuut	Toelichting
	BOTTOM_DEPTH	Basis van het boorbeschrijving interval, gemeten langs de boring.
	LITHOLOGY_CD	Hoofdlithologie
	SAND_MEDIAN	Zandmediaan (numerieke waarde)
	SAND_MEDIAN_CLASS_CD	Zandmediaan (klasse)
	CLAY_ADMIX_CD	Bijmenging klei (klasse).
	SILT_ADMIX_CD	Bijmenging silt (klasse).
	SAND_ADMIX_CD	Bijmenging zand (klasse).
	LUTUM_PCT	Lutumgehalte (percentage)
LTH_CAT_VALUE <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>	CATEGORY_CD	Categorie: <ul style="list-style-type: none"> <li>• CLASTIC_ADMIX_TYPE</li> </ul> wordt gebruikt om de aanwezigheid van kleibrokjes vast te stellen
	VALUE_CD	Deze waarde van de categorie: <ul style="list-style-type: none"> <li>• 'KLB2'</li> <li>• 'KLB3'</li> <li>• 'KLBX'</li> </ul> duiden op de aanwezigheid van kleibrokjes

## 4.2 Boorbeschrijvingen Universiteit Utrecht

In midden Nederland langs de grote rivieren en in het IJsseldal is een groot aantal ondiepe handboringen van de Universiteit Utrecht (UU) meegenomen (Figuur 4.5). Het betreft handboringen die door studenten en hun begeleiders gezet zijn in het kader van het veldwerk Laaglandgenese. Van de handboringen zijn er ruim 125.000 gedigitaliseerd en opgeslagen in de Laaglandgenese boringendatabase (Cohen, 2017).

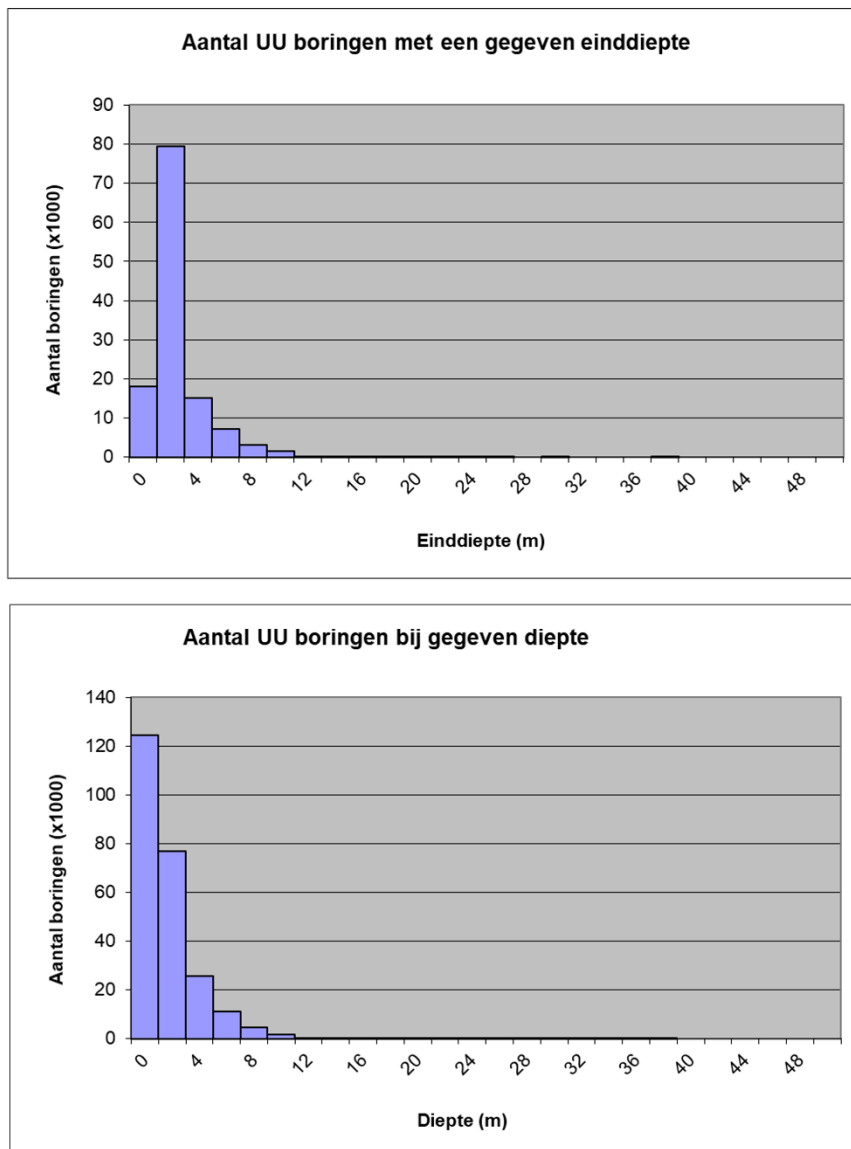
Deze gedigitaliseerde UU boringen zijn aan TNO geleverd in een Microsoft Access database. Met behulp van query's in Access zijn de boorbeschrijvingen vertaald naar het formaat van de DINO boorbeschrijvingen (zie vorige paragraaf).





**Figuur 4.5:** Kaart met de ligging van de in NL3D gebruikte UU boringen in de Rijn-Maas Vallei en in het IJsseldal (N = 124.541).

Vergeleken met DINO is het dieptebereik van de UU boringen geringer. Ter vergelijking is het dieptebereik van de in NL3D gebruikte boringen weergegeven in Figuur 4.6.



**Figuur 4.6:** Histogram met het aantal in NL3D gebruikte UU boringen bij een gegeven einddiepte onder maaiveld (boven) en het aantal boringen dat minimaal een bepaalde diepte bereikt (onder). N = 124.541; interval 2 m.

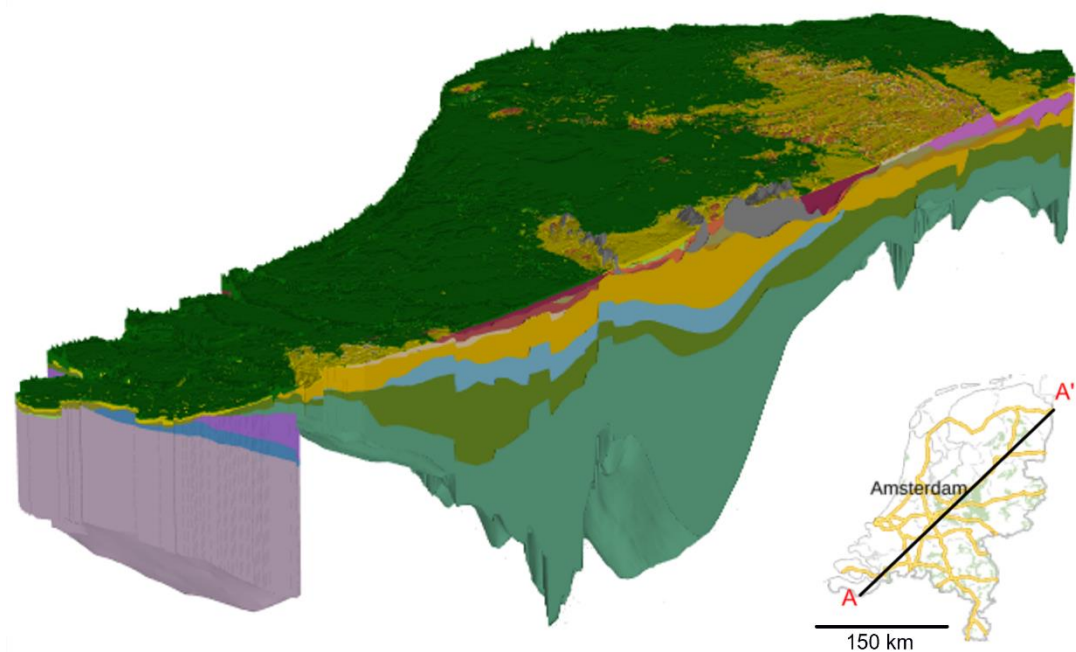
### 4.3 Tauw veenboringen

Ingenieursbureau Tauw heeft in opdracht van de Provincie Utrecht een groot aantal ondiepe handboringen gezet in het Utrechtse Veenweidegebied. De digitale boorbeschrijvingen van Tauw zijn eerst vertaald naar boorbeschrijvingen conform die van de Universiteit Utrecht, en vervolgens vertaald naar het formaat van DINO boorbeschrijvingen. De set boringen van Tauw omvat 6711 ondiepe handboringen. Al deze boringen zijn circa 2 m diep.

### 4.4 DGM

Eind jaren '90 van de vorige eeuw werd de klassieke kartering van de 'ondiepe ondergrond' van Nederland, uitmondend in de hierboven beschreven, op papier gedrukte kaarten en

profielen, stopgezet en werd het werkproces sterk geautomatiseerd. Vanaf die tijd is het Digitaal Geologisch Model (DGM) ontwikkeld, een grootschalig landsdekkend lagenmodel waarin de geometrie van de geologische eenheden wordt weergegeven tot een diepte van ongeveer 500 m met in de Roerdalslenk een maximale diepte van circa 1200 m (Gunnink et al., 2013). De onderscheiden geologische eenheden zijn formaties volgens de lithostratigrafische indeling van de ondiepe ondergrond van Nederland (TNO, 2024). In DGM worden de Holocene afzettingen gerepresenteerd door één geologische eenheid (Figuur 4.7).



**Figuur 4.7:** 3D aanzicht van het DGM lagenmodel waarbij het deel ten zuidoosten van profiellijn A-A' is weggelaten.

DGM is gebaseerd op een set matig diepe boringen. De set omvat circa 26.500 boringen, met dieptes tussen 10 en 500 m. Deze boringen set is op basis van kwaliteit van de boorbeschrijvingen uit de DINO database geselecteerd, waarbij een evenwichtige geografische spreiding, in relatie tot de geologische complexiteit, is beoogd. Met het oog op de toepassing in REGIS II 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 database zijn voorzien van een stratigrafische interpretatie in geologische eenheden. Uit de interpretaties is een lagenmodel geconstrueerd waarin de ondergrond wordt weergegeven als een stapeling van geologische eenheden die begrensd worden door een top- en een basisvlak. Beide vlakken worden weergegeven als een raster met cellen van 100 x 100 m. Elke rastercel heeft de diepteligging van top resp. basis in meters onder NAP als attribuut. Uit de top- en basisrasters wordt een dikteraster afgeleid met de dikte van de geologische eenheid in meters. Tot slot zijn er voor zowel de top als basis betrouwbaarheidsrasters beschikbaar die de modelonzekerheid van het lagenmodel representeren.

Voor NL3D wordt gebruik gemaakt van de top- en basisrasters van DGM v2.2 (Hummelman et al., 2019a).

## 4.5 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 4.8). 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 Roerdaalslenk, het belangrijkste tektonische fenomeen in de Nederlandse ondiepe ondergrond, is in deze breukenkartering gebruikt.

In NL3D wordt de versie gebruikt die ook bij het maken van DGM v2.2 is toegepast (Hummelman et al., 2019).



**Figuur 4.8:** Overzichtskaart met de ligging van de breuken (breukenmodel versie 2.2 (2014)) in de ondiepe ondergrond van Nederland.

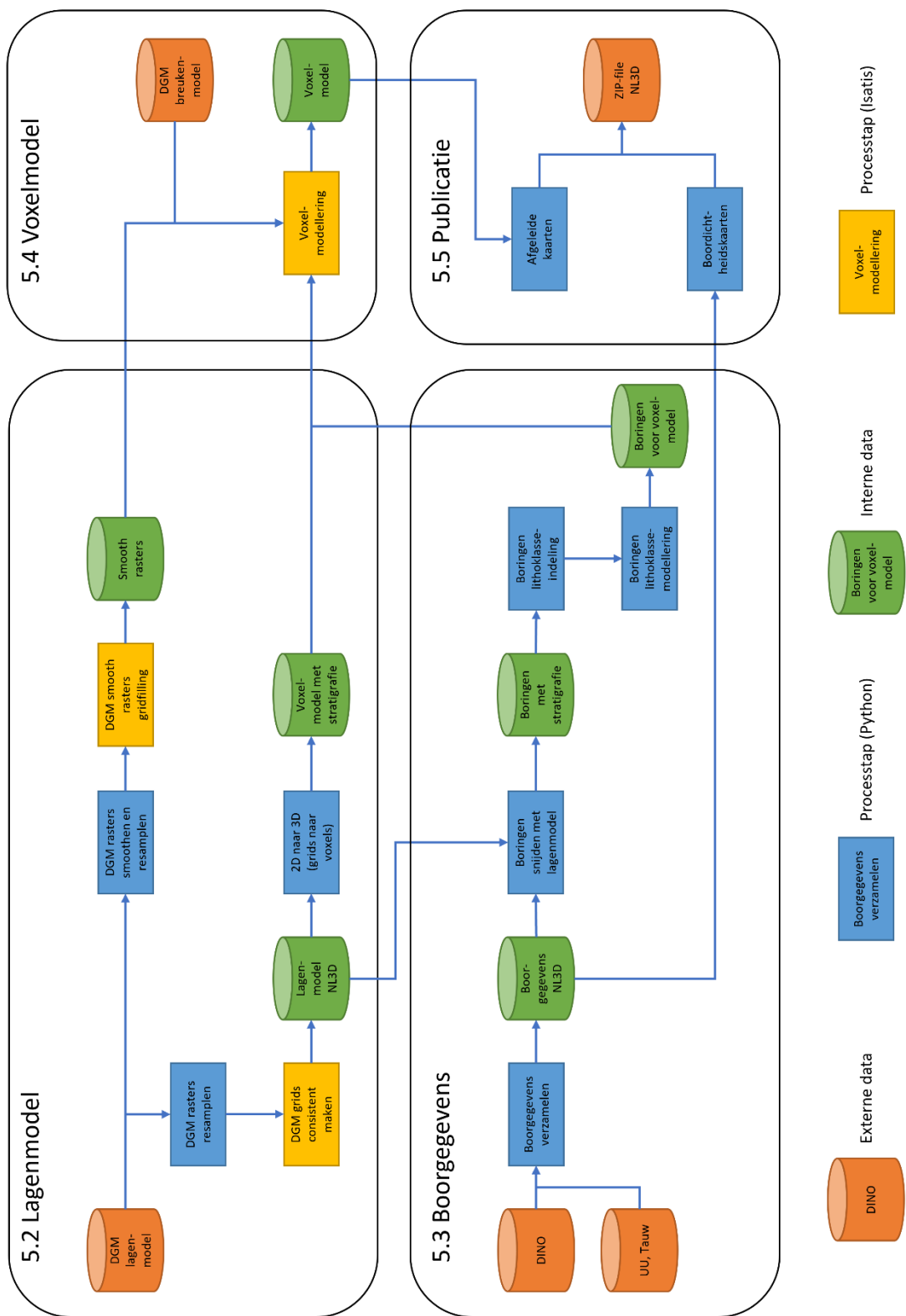
# 5 Procesbeschrijving

## 5.1 Inleiding

Het proces waarmee NL3D gemaakt wordt bestaat uit de volgende stappen (Figuur 5.1):

- › Het construeren van een geologisch lagenmodel op basis van DGM v2.2. Op basis van dit lagenmodel worden de voxels van NL3D in de juiste geologische eenheid geplaatst.
- › Het samenstellen van de dataset met boorbeschrijvingen. Boorbeschrijvingsintervallen krijgen een geologische eenheid toegekend op basis van het lagenmodel. Daarnaast wordt uit de lithologische beschrijving de lithoklasse afgeleid.
- › Het maken van het voxelmodel, waarbij elke voxel op basis van het lagenmodel in een geologische eenheid wordt geplaatst. Vervolgens wordt per geologische eenheid de lithoklasse van de voxels geschat op basis van de boorbeschrijvingsintervallen van de overeenkomstige geologische eenheid. Bij het schatten van de lithoklasse wordt rekening gehouden met de breuken die in de betreffende geologische eenheid werkzaam zijn.
- › Het maken van de te publiceren datasets.

In de navolgende paragrafen 5.2 – 5.5 wordt elk van deze stappen beschreven.



Figuur 5.1: Processchema NL3D. De nummers 5.2 t/m 5.4 verwijzen naar de betreffende paragrafen in de tekst.

## 5.2 Lagenmodel

### 5.2.1 Resamplen 100 naar 250 m

Uitgangspunt voor het lagenmodel is DGM v2.2. Dit model omvat 34 geologische eenheden met elk een 2D raster van de diepteligging van de top en van de basis. DGM heeft een resolutie (celgrootte) van 100 x 100 m, terwijl NL3D een lagere resolutie van 250 x 250 m kent. Ook is de oorsprong van NL3D anders dan die van DGM (Tabel 5.1). De top- en basisrasters van het lagenmodel worden daarom eerst opgeschaald (geresampled) naar de lagere resolutie. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van GIS-functionaliteit in ArcMap met de volgende stappen:

1. Resample het DGM raster eerst naar een hogere resolutie van 25 bij 25 m. Elke oorspronkelijke rastercel wordt daarbij in 16 delen opgedeeld en de 16 nieuwe rastercellen krijgen een waarde gelijk aan de oorspronkelijke rastercel.
2. Bereken de gemiddelde celwaarde voor blokken van 10 bij 10 cellen in het raster uit stap 1 ('Block Statistics Mean'). Elk blok is dan 250 bij 250 m groot en omvat 100 cellen van 25 bij 25 m. Alle rastercellen in het blok krijgen als waarde het gemiddelde van de 100 rastercellen in het blok toegekend.
3. Resample het raster uit stap 2 naar een raster met een celgrootte van 250 m. Voor elke nieuwe rastercel wordt de dichtstbijzijnde oude cel (25 bij 25 m) gezocht. In stap 2 zijn alle buurcellen met dezelfde gemiddelde waarde gevuld. Het resultaat is daarom een 250 bij 250 m raster met als waarde het gemiddelde van de 100 oorspronkelijke, 25 bij 25 meter cellen.

**Tabel 5.1:** Parameters van de rasters in het lagenmodel van DGM en NL3D.

Parameter		DGM v2.2	NL3D v2.0
Celgrootte		100 m	250 m
Bereik (extent)	Links (West, X <sub>0</sub> )	0 m	-125 m
	Onder (Zuid, Y <sub>0</sub> )	300.000	299.875 m
	Rechts (Oost)	280.000	280.125 m
	Boven (Noord)	625.000	625.125 m
Aantal rastercellen	X	2800	1121
	Y	3250	1301

### 5.2.2 Consistent maken

Het lagenmodel van DGM is consistent, dat wil zeggen dat elke top samenvalt met de basis van de bovenliggende eenheden en dat elke basis samenvalt met de top van de onderliggende eenheden. Bij het resamplen naar 250 bij 250 m kunnen echter inconsistenties optreden. De eenheden overlappen dan met elkaar of er ontstaan kieren. Het lagenmodel moet daarom opnieuw consistent gemaakt worden, waarbij dezelfde afleidingsregels gebruikt worden als bij het consistent maken van het oorspronkelijke lagenmodel in DGM (Hummelman et al., 2019a). De afleidingsregels gaan uit van de basisvlakken uit het lagenmodel. Deze worden systematisch vergeleken met de basisvlakken van de stratigrafisch hoger gelegen eenheden. Uit deze vergelijking kan blijken dat de basis van een hoger gelegen eenheid de basis van een onderliggende eenheid doorsnijdt. In dat

geval wordt de onderliggende eenheid geclipt door de bovenliggende. Een uitzondering geldt voor eenheden die tegen het reliëf van de stuwwallen zijn afgezet. In die gevallen wordt de bovenliggende eenheid geclipt door de top van de onderliggende stuwwal.

Na het consistent maken van de basisvlakken wordt voor elke eenheid opnieuw een top vlak afgeleid uit de bovenliggende basisvlakken. In de meerderheid van de gevallen zullen per geologische eenheid verschillende basissen van bovenliggende geologische eenheden als top gebruikt worden. De rastercel van de top van een eenheid krijgt dus de waarde van de basis van de direct erboven liggende geologische eenheid toegekend. Voor de stuwwallen geldt dat de top ongewijzigd blijft en niet opnieuw wordt afgeleid. Ook voor (delen van) eenheden die aan maaiveld liggen blijft de top ongewijzigd.

Het consistent maken gebeurt in Isatis®.

## 5.2.3 Rasters smoothen en landsdekkend maken

Voor de voxelmodellering van een aantal geologische eenheden zijn rasters nodig die het algemene diepteverloop weergeven (zie ook paragraaf 5.4.3.6). Voorbeelden 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. De rasters met het algemene diepteverloop worden berekend door de rasters van het lagenmodel te 'smoothen'. De 'smoothing' wordt uitgevoerd op de rasters van DGM en het resultaat wordt vervolgens opgeschaald naar 250 bij 250 m volgens de in paragraaf 5.2.1 beschreven methode. De rasters worden vervolgens landsdekkend gemaakt met een procedure die bekend staat als 'gridfilling' waarbij elke lege cel in het raster een waarde krijgt toegekend door extrapolatie vanuit de gevulde cellen. De 'smoothing' wordt uitgevoerd met ArcGIS, de 'gridfilling' in Isatis.

## 5.3 Boorgegevens

### 5.3.1 Extractie / boorgegevens verzamelen

Boorbeschrijvingen in de DINO database worden met behulp van SQL geëxtraheerd en opgenomen in een CSV-bestand. Elke regel in het bestand is een boorbeschrijvingsinterval. In elke regel worden de kopgegevens van de boring (nummer, locatie, maaiveldhoogte en einddiepte) steeds herhaald. Aan het CSV-bestand worden de boorbeschrijvingen van de Universiteit Utrecht en de veenboringen van Tauw toegevoegd. Op deze manier ontstaat één bestand met alle benodigde boorgegevens.

Boringen die in GeoTOP zijn uitgesloten van de modellering worden vervolgens uit het CSV-bestand verwijderd. Het gaat om boringen die handmatig of geautomatiseerd (op basis van vooraf opgestelde kwaliteitscriteria) zijn uitgesloten. In totaal gaat het om 35.000 boringen in die delen van het land waar GeoTOP al beschikbaar is.

### 5.3.2 Boringen snijden met lagenmodel

De boorbeschrijvingen worden van stratigrafie voorzien door ze te snijden met het lagenmodel van NL3D (met een resolutie van 250 bij 250 m). De procedure is als volgt:



1. Voor elke geologische 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 stap 1 wordt gesorteerd zodat een lijst wordt verkregen met per boring per geologische 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 uit de boorbeschrijving.

Deze eenvoudige procedure wordt voor alle boorbeschrijvingen gevolgd, er wordt dus geen gebruik gemaakt van de stratigrafische interpretaties van DGM en/of GeoTOP.

### 5.3.3 Indelen boorbeschrijvingen in lithoklassen

De lithologische boorbeschrijvingen worden vertaald naar lithoklassen. Hierbij wordt het classificatieschema van REGIS II (Vernes & Van Doorn, 2005) gehanteerd. Lithoklassen hebben een nummer en een afkorting. Het nummer wordt gebruikt om de voxels te voorzien van een lithoklasse: voxels hebben net als rasters namelijk altijd numerieke waarden als attribuut (Tabel 5.2).

**Tabel 5.2:** De in NL3D gebruikte lithoklassen met nummer, afkorting en, indien van toepassing, korrelgrootte-mediaan.

Lithoklasse	Nummer	Afkorting	Korrelgrootte (mediaan)
Organisch materiaal (veen)	1	o	-
Klei	2	k	-
Kleilig zand, zandige klei en leem	3	kz	-
Fijn zand	5	zf	$\geq 63 \mu\text{m}$ en $< 150 \mu\text{m}$
Midden zand	6	zm	$\geq 150 \mu\text{m}$ en $< 300 \mu\text{m}$
Grof zand	7	zg	$\geq 300 \mu\text{m}$ en $< 2 \text{mm}$
Grind	8	g	$\geq 2 \text{mm}$
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, de aanwezigheid van kleibrokjes, zandmediaan (numeriek) en zandmediaanklasse.

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>2</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 (glaucanietzand), met zandmediaan  $\geq 63 \mu\text{m}$  en  $< 150 \mu\text{m}$ , of een van de volgende zandmediaan klassen:
  - ZFC (zand fijne categorie).
  - ZUF (zand uiterst fijn).
  - ZUFO (zand uiterst fijn).
  - ZZF (zand zeer fijn).
  - ZZFO (zand zeer fijn).

<sup>2</sup> Volgens de SBB komt bijmenging K3 alleen bij hoofdlithologie veen voor. In de DINO databank komt K3 echter ook bij hoofdlithologie zand voor, met als betekenis sterk kleilig zand.

- Indien er sprake is van bijmenging K3<sup>2</sup> of KX, kleibrokjes en/of een lutumpercentage  $\geq 5\%$ , dan is de lithoklasse echter *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:
  - ZGC (zand grove categorie).
  - ZZG (zand zeer grof).
  - ZZGO (zand zeer grof).
  - ZUG (zand uiterst grof).
  - ZUGO (zand uiterst grof).

#### *Lithoklasse 8, grind*

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

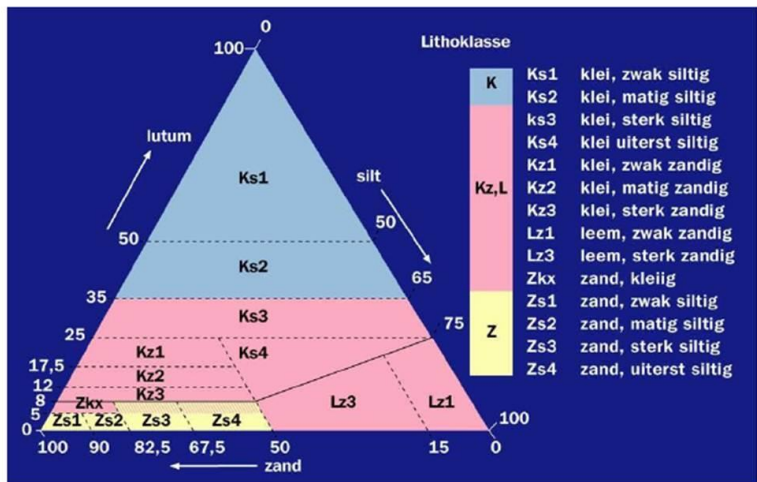
#### *Lithoklasse 9, schelpen*

- Hoofdlithologie is SHE (schelpen).

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

- Hoofdlithologie is Z (zand) of GCZ (glauconietzand), zandmediaan is onbepaald en de zandmediaanklasse is onbepaald of wijkt af van een van de bij lithoklasse 5, 6 en 7 genoemde zandmediaanklassen.
- Lithoklasse 10 wordt wel toegekend aan de boorintervallen, maar komt in het uiteindelijke voxelmodel niet meer voor omdat alle voxels met lithologie zand in het voxelmodel een voorspelling van de korrelgrootte krijgen (lithoklasse 5, 6 of 7). De boorintervallen met lithoklasse 10 worden in het voxelmodel wel meegenomen om te bepalen of een voxel met zand of met ander materiaal is gevuld, maar niet bij de bepaling van de korrelgrootte van het zand (zie verder paragraaf 5.4.3.5).

De criteria voor het onderscheid in klei, zand en kleilig zand, zandige klei en leem zijn schematisch weergegeven in Figuur 5.2.



**Figuur 5.2:** Belangrijkste criteria voor de indeling in lithoklassen klei (blauw), zand (geel) en kleiig zand, zandig 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 de meeste geologische eenheden komen de lithoklassen grind en schelpen slechts sporadisch voor. In deze eenheden zijn deze lithoklassen daarom samengevoegd met grof zand. Eenheden in NL3D waarvoor het grindpercentage hoog genoeg is om als aparte klasse te modelleren zijn:

- › Formatie van Beegden.
- › Formatie van Kreftenheye.
- › de gestuwde afzettingen.
- › Formatie van Urk.
- › Formatie van Sterksel.
- › Formatie van Appelscha.
- › de gecombineerde formaties van Peize en Waalre.
- › Kiezeloëliet Formatie.
- › Formatie van Inden.

Eenheden waarin schelpen als aparte lithoklasse zijn gemodelleerd zijn:

- › Formatie van Oosterhout.
- › Formatie van Maassluis.

Deze processtap is volledig geautomatiseerd met Python scripts.

### 5.3.4 Regulariseren lithoklasseintervallen

De in lithoklassen ingedeelde boorbeschrijvingen worden geregulariseerd in intervallen van maximaal 100 cm dikte (dat is de dikte van de voxels; Figuur 5.5.8). De regularisatie gaat uit van de intervalgrenzen van de boorbeschrijving.

Intervallen die dikker zijn dan 100 cm worden opgedeeld in geregulariseerde intervallen van 100 cm. Een eventueel restant wordt onderaan het oorspronkelijke boorinterval toegevoegd.

Boorintervallen die dunner zijn dan 100 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 100 cm klei. Door te regulariseren wordt een interval van 200 cm zand opgedeeld in 2 intervallen van 100 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.

Het regulariseren van de boorbeschrijvingen is een geautomatiseerde processtap.

### 5.3.5 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 ‘NUKR1’ (Formatie van Kreftenheye) in modelblok ‘B11’ is gegeven in Tabel 5.3.

**Tabel 5.3:** Voorbeeld van globale verhoudingen voor de eenheid ‘NUKR1’ (Formatie van Kreftenheye) in modelblok ‘B11’.

Lithoklasse (“categorie”)	Nummer	Fractie
Organisch materiaal (veen)	1	0,0174
Klei	2	0,0448
Kleilig zand, zandige klei en leem	3	0,0708
Fijn zand	5	0,1125
Midden zand	6	0,3858
Grof zand	7	0,3542
Grind	8	0,0145
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 'NUKR1' (Formatie van Kreftenheye) in modelblok 'B11' is gegeven in Tabel 5.4.

**Tabel 5.4:** Voorbeeld van de verdeling tussen de categorieën *zand* en *niet-zand* voor de eenheid 'NUKR1' (Formatie van Kreftenheye) in modelblok 'B11' (vergelijk met Tabel 5.3)

Categorie	Nummer	Fractie
Zand	1	0,8670
Niet-zand	2	0,1330
<b>Totaal</b>		<b>1,0000</b>

Voor het voorbeeld geeft Tabel 5.5 de verdeling binnen de categorie *niet-zand*.

**Tabel 5.5:** Voorbeeld van de verdeling binnen de categorie *niet-zand* in de eenheid 'NUKR1' (Formatie van Kreftenheye) in modelblok 'B11' (vergelijk met Tabel 5.3 en Tabel 5.4).

Categorie	Nummer	Fractie
Organisch materiaal (veen)	1	0,1311
Klei	2	0,3368
Kleilig zand, zandige klei en leem	3	0,5321
<b>Totaal</b>		<b>1,0000</b>

Voor het voorbeeld geeft Tabel 5.6 de verdeling binnen de categorie *zand*.

**Tabel 5.6:** Voorbeeld van de verdeling binnen de categorie *zand* in de eenheid 'NUKR1' (Formatie van Kreftenheye) in modelblok 'B11' (vergelijk met Tabel 5.3, Tabel 5.4 en Tabel 5.5).

Categorie	Nummer	Fractie
Fijn zand	1	0,1295
Midden zand	2	0,4442
Grof zand	3	0,4078
Grind	4	0,0185
<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.

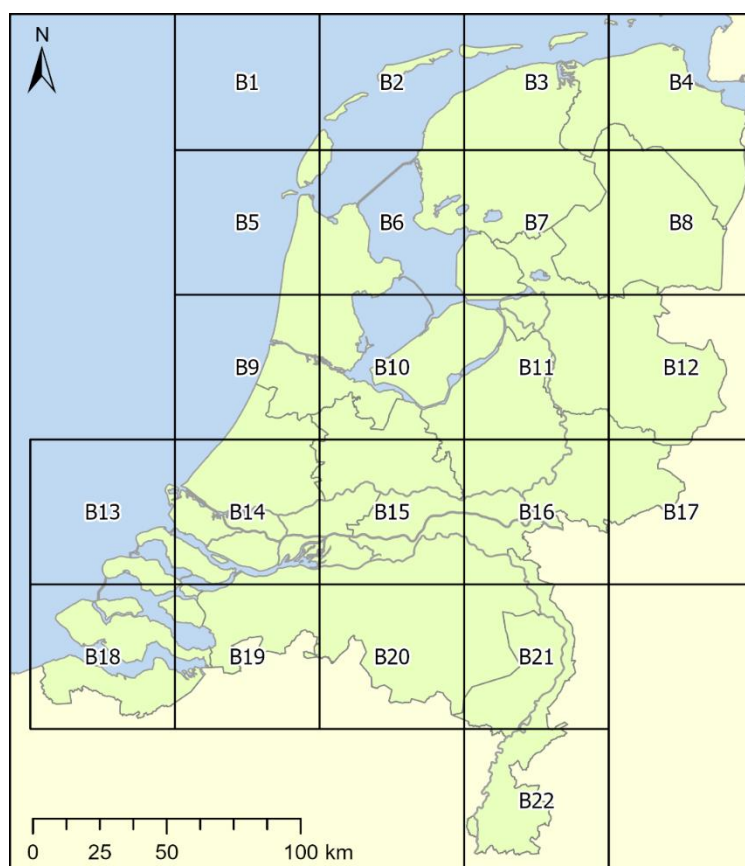
Deze processtap is geautomatiseerd; de resultaten van de tellingen worden in de vorm van een lijst in de *workflow manager* van de voxelmodellering vastgelegd.

## 5.4 Voxelman

### 5.4.1 Definiëren modelblokken

NL3D bevat een zeer groot aantal voxels. Van deze voxels bevinden zich ruim 37 miljoen voxels binnen de modelgebied grenzen. Alleen voor deze voxels moeten in dit werkproces lithoklassen geschat worden. De overige voxels bevinden zich in de lucht, in de Noordzee of buiten de landsgrenzen.

In de praktijk is gebleken dat de modelleringssoftware Isatis® niet in één keer met dergelijke grote hoeveelheden voxels kan rekenen. Om deze reden wordt NL3D opgedeeld in blokken (Figuur 5.3).



**Figuur 5.3:** Blokindeling van NL3D.

De aan elkaar grenzende blokken overlappen elkaar in de horizontale richtingen met 20 voxels (dat wil zeggen een overlapzone van 5 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: 160 in blok 'B01' t/m 'B21' en 375 in blok 'B22' (Zuid-Limburg).

## 5.4.2 Vertalen lagenmodel naar voxelmodel

Het lagenmodel van NL3D 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 (zie paragraaf 5.2.2). 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. Een logisch gevolg van een consistent lagenmodel is dat elk willekeurig punt in de ruimte zich altijd tussen de top en basis van één enkele geologische eenheid bevindt. Dit gegeven gebruiken we om van de middelpunten van de voxels te bepalen tot welke geologische eenheid ze behoren.

## 5.4.3 Lithoklassemodellering in Isatis

### 5.4.3.1 Importeren data (rekening houdend met breuken)

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.
- › De 'smooth' rasters ten behoeve van het modelleren van hellende eenheden.

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*.

### 5.4.3.2 Maken selecties

In Isatis® wordt in elke *lines file* per geologische 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 geologische 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*.

### 5.4.3.3 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.

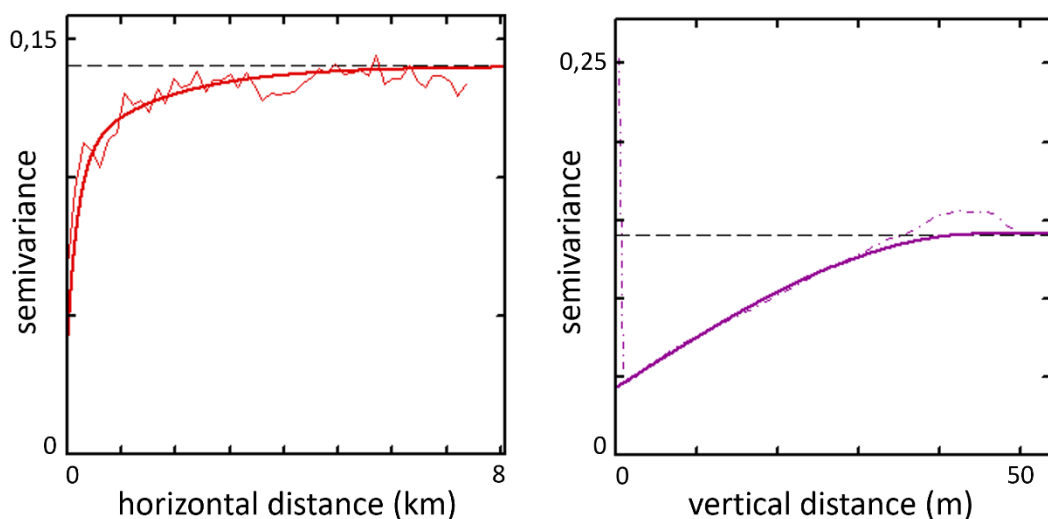


Voor elke te modelleren eenheid zijn variogrammen gemaakt op basis van de boorgegevens. Daarbij is steeds gebruik gemaakt van de boorgegevens van het gehele modelleergebied of van een representatief deel daarvan. Er zijn dus geen variogrammen per blok gemaakt.

*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 5.4.



**Figuur 5.4:** 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.

### 5.4.3.4 Simuleren lithoklassen

De lithoklassen in de boorbeschrijvingen worden gebruikt om een 3D interpolatie uit te voeren. Deze interpolatie geeft een schatting 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 geologische eenheid afzonderlijk uitgevoerd, zodat de geostatistische karakteristieken van de afzonderlijke modeleenheden gehonoreerd worden. Verder wordt de simulatie in elk blok 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) 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) 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 per te modelleren eenheid vastgesteld. 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). 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.

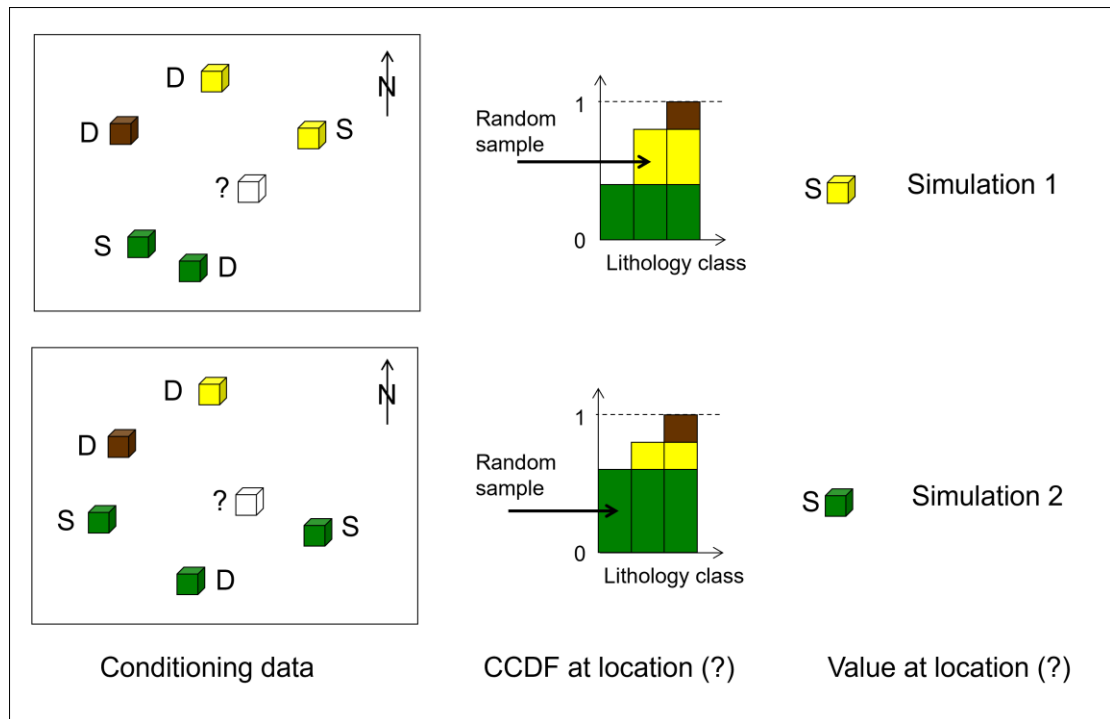
De gevonden datapunten worden vervolgens gecodeerd in een set indicatoren (vandaar de naam *Indicator Simulation*). Voor elke lithoklasse wordt voor elk datapunt met een indicator aangegeven of de lithoklasse wel (indicator = 1) of niet (indicator = 0) aanwezig is.

De volgende stap bestaat uit een kriging (block kriging) op basis van de verkregen informatie. In de kriging wordt het een 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). 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; Goovaerts, 1997; Chilès & Delfiner, 2012):

1. Bepaal een *random* pad waarmee elke voxel van de modeleenheid eenmaal wordt bezocht.
2. Bepaal voor elke voxel van de modeleenheid de statistische parameters van de CCDF voor die voxel. Doe dit met behulp van kriging op basis van de geconditioneerde data binnen het zoekgebied en het variogrammodel. De conditionerende data bestaat uit de indicatoren van de lithoklassen van de boorgegevens en van de vooraf gespeelde 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 100 simulaties en kies telkens een ander *random* pad.



**Figuur 5.5:** Schematische weergave van twee verschillende simulaties van lithoklasse voor dezelfde voxel op de met een “?” weergegeven locatie. 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.

Vooral 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 processtap bepaald is. Er wordt dan een *random* waarde getrokken uit de globale verdeling.

### 5.4.3.5 Simuleren korrelgrootteklassen

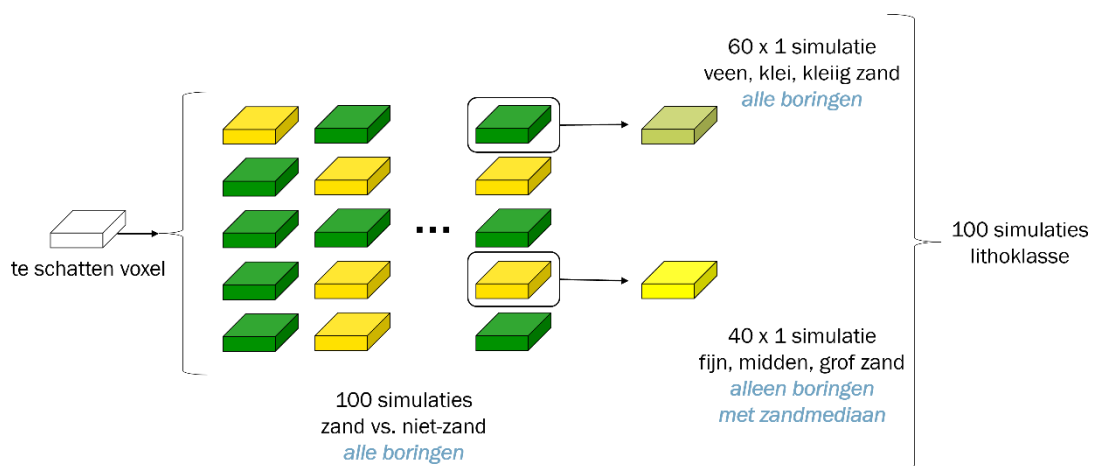
In totaal worden er 6 lithoklassen met SIS gesimuleerd<sup>3</sup>. Drie van de zes lithoklassen betreffen ‘slappe grond’: veen, klei, en kleilig zand/zandige klei. De andere drie lithoklassen zijn korrelgrootteklassen of zandmediaanklassen van zand: fijn zand, midden zand en grof zand. Met betrekking tot de korrelgrootteklassen geldt dat een belangrijk deel van de zandige boorbeschrijvingsintervallen een onbekende korrelgrootte heeft. Deze intervallen geven geen informatie over de korrelgrootte, maar wel over de verdeling van zand en ‘slappe grond’. Dit probleem is opgelost door de simulatieprocedure in een aantal stappen op te delen. In Figuur 5.6 zijn deze stappen geïllustreerd aan de hand van een enkele te schatten voxel.

1. Eerst worden alle boorbeschrijvingsintervallen gebruikt om 100 simulaties uit te voeren waarin onderscheid gemaakt wordt tussen *zand* en *niet-zand* (links in Figuur 5.6).
2. Vervolgens wordt voor elk van de 100 realisaties waarbij er *niet-zand* is geschat 1 simulatie doorgerekend (rechtsboven in Figuur 5.6). In deze simulaties worden alle

<sup>3</sup>Voor een beperkt aantal geologische eenheden wordt een aparte lithoklasse ‘grind’ of ‘schelpen’ onderscheiden (zie paragraaf 5.3.3 voor een overzicht). In de overige eenheden worden eventuele (kleine) hoeveelheden grind en schelpen in de lithoklasse ‘grof zand’ meegeteld.

- boorbeschrijvingsintervallen met ‘slappe grond’ gebruikt om van het *niet-zand* te bepalen of het veen, klei, of kleilig zand/zandige klei betreft.
3. Dezelfde procedure wordt toegepast op elk van de 100 realisaties waarbij er *zand* is geschat (rechtsonder in Figuur 5.6). In deze simulaties worden echter alleen die boorbeschrijvingsintervallen met *zand* gebruikt waarvan een korrelgrootte bekend is. Alleen met deze intervallen kan immers bepaald worden of het fijn zand, midden zand of grof zand betreft.
  4. In totaal zijn er voor de voxel dan  $100 + 100 = 200$  simulaties uitgevoerd, resulterend in 100 realisaties van lithoklasse (rechts in Figuur 5.6).

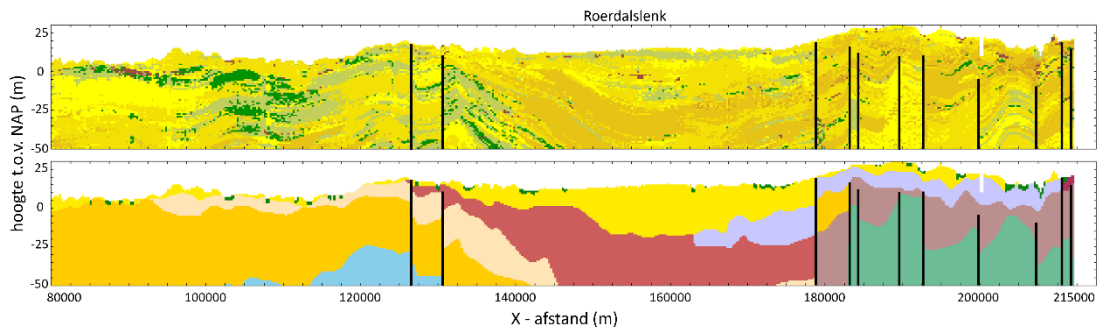
Zowel de standaard- als de nieuwe werkwijze resulteert in de gewenste 100 realisaties van lithoklasse. Het is in stap 2 en 3 van de verbeterde werkwijze daarom niet nodig om 10 of 100 simulaties per zand of niet-zand voxel door te rekenen.



**Figuur 5.6:** Werkwijze voor het simuleren van lithoklassen met 100+100 simulaties in een enkele te schatten voxel.

### 5.4.3.6 Simuleren lithoklassen in 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 Limburg hellen de Pleistocene formaties als gevolg van tijdens de sedimentatie optredende bewegingen langs de Peelrandbreuk en andere breuken langs de Roerdalslenk (Figuur 5.7, Tabel 5.7).

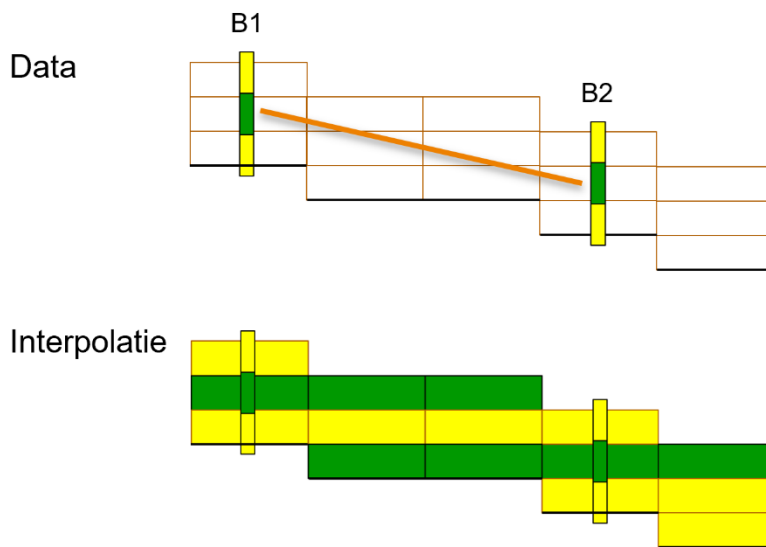


**Figuur 5.7:** Hellende lagen in Noord-Brabant en Limburg ongeveer ter hoogte van Roosendaal – Tilburg – Eindhoven – Venray (Y = 392250). Boven: lithoklassen, onder: geologische eenheden. Breuken zijn als zwarte lijnen weergegeven. Kleurcodering voor geologische eenheden en lithoklassen is gegeven in Bijlage A.

**Tabel 5.7:** Eenheden in NL3D 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) en bij ‘Basis’ volgt het referentievlak de basis van de eenheid.

Code	Omschrijving	Referentievlak
NUBX	Formatie van Boxtel	Midden
NUBE	Formatie van Beegden	Midden
NUST	Formatie van Sterksel	Midden
NUSY	Formatie van Stramproy	Midden
NUPZ-WA	Formaties van Peize en Waalre	Midden
NUKI	Kiezeloöliet Formatie	Midden
NUIE	Formatie van Inden	Midden
NUMS	Formatie van Maassluis	Midden
NUOO	Formatie van Oosterhout	Midden
NUBR-VI	Formaties van Breda en Ville	Kwart
NMVE	<b>Formatie van Veldhoven</b>	Basis
NMRU	<b>Rupel Formatie</b>	Basis
NLTO	<b>Formatie van Tongeren</b>	Basis
NLDO	<b>Formatie van Dongen</b>	Basis
NLLA	<b>Formatie van Landen</b>	Basis
NUHT	<b>Formatie van Heijenrath</b>	Basis
CKVA	<b>Formatie van Vaals</b>	Basis
CKAK	<b>Formatie van Aken</b>	Basis

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 5.8).

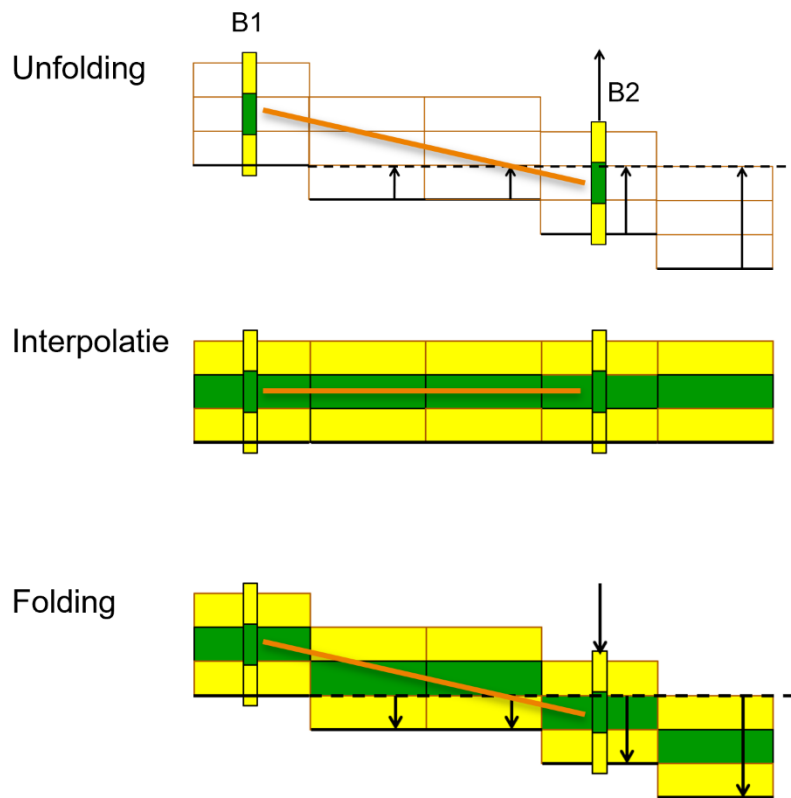


**Figuur 5.8:** Horizontale interpolatie van een hellende kleilaag (groen) die in boring B1 en B2 is aangetroffen leidt tot een onrealistisch beeld van twee horizontale kleilagen in het model.

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 Limburg zijn (in de meeste gevallen) referentievlakken geconstrueerd die het gemiddelde van de top en de basis van de formaties volgen. De referentievlakken zijn de ‘smooth’ vlakken die afgeleid zijn uit het lagenmodel.

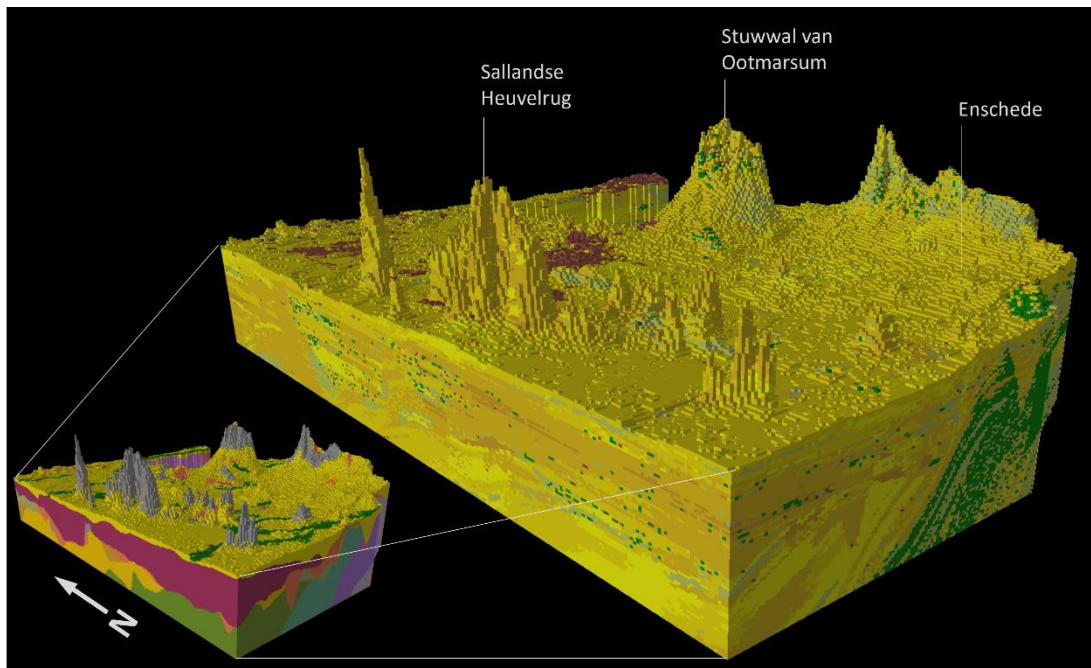
De *Unfolding/Folding* procedure is in Figuur 5.9 geïllustreerd met een hypothetische stratigrafische eenheid. De figuur toont het zijaanzicht van 5 x 3 voxels met daaronder de basis van de eenheid (dikke lijn). Voor elke rastercel van het basisvlak wordt bekeken hoeveel verticale verplaatsing er nodig 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 5.9:** Interpolatie van een hellende kleilaag (groen) die in boring B1 en B2 is aangetroffen met de *Unfolding/Folding* procedure.

Na *Unfolding* wordt de 3D simulatie uitgevoerd wat in Figuur 5.9 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 Limburg is te zien in Figuur 5.10.



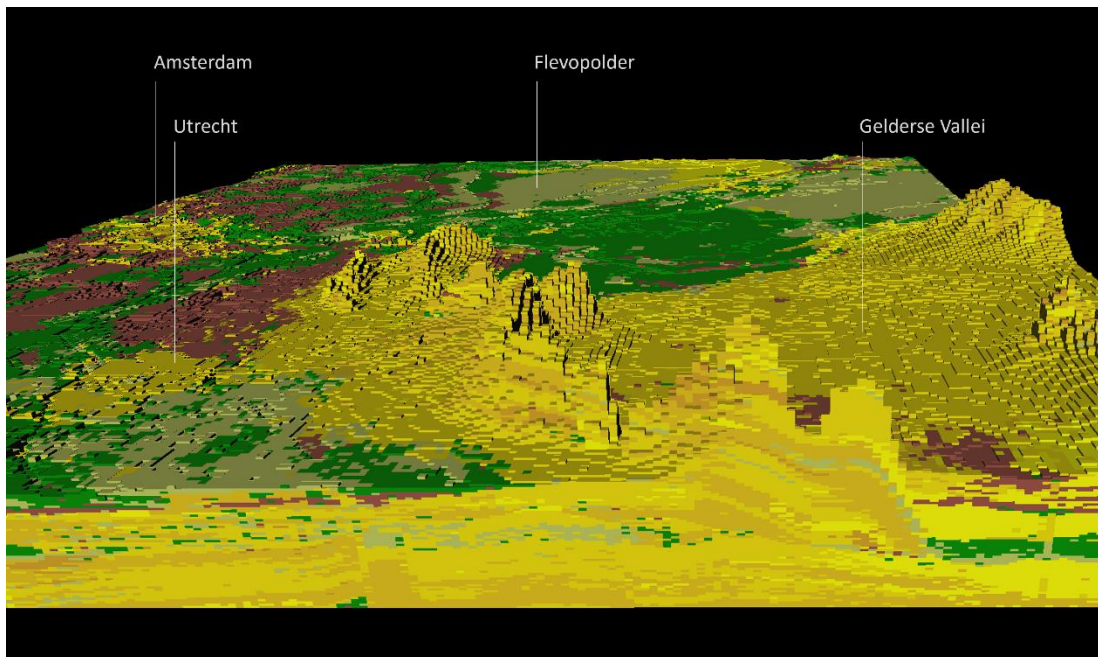
**Figuur 5.10:** Geologische eenheid (linksonder) en lithoklasse (rechtsboven) in blok 'B12' met hellende lagen die zijn gemodelleerd met behulp van de Unfolding/Folding methode. Lithoklassen volgen de naar het westen hellende oudere geologische eenheden. Het scheefgestelde pakket wordt afgedekt door een pakket niet-hellende afzettingen. Kleurcodering voor geologische eenheden en lithoklassen is gegeven in Bijlage A. Het weergegeven deel van het blok beslaat 46x64 km. Verticale overdrijving 160x.

#### 5.4.3.7 Simuleren lithoklassen in gestuwde afzettingen

De in de voorgaande paragraaf beschreven procedure voor het simuleren van lithoklassen in hellende eenheden wordt ook toegepast op de scheefstaande lagen in door landijs gestuwde eenheden (stuwwallen). Als referentievlak wordt hier echter niet de basis van de stuwwallen gebruikt, maar een vlak dat een eerste orde benadering geeft van de hellingshoek en strekkingsrichting van de stuwing. Informatie over de interne opbouw van de Nederlandse stuwwallen is vooral verkregen uit Maarleveld (1981), Bakker & van der Meer (2003) en Bakker (2004). Maarleveld (1981) bevat een kartering van de strekkingen (en deels hellingen) van gestuwde lagen, zoals waargenomen in bouwputten en met de hand gegraven profielkuilen. Bakker & van der Meer (2003) en Bakker (2004) gaan in op de diepere structuur met behulp van GPR (ground penetrating radar) en seismiek. Naast genoemde publicaties zijn ook andere publicaties en ontsluitingsrapporten gebruikt. Gebieden welke niet of niet afdoende zijn meegenomen in deze studies zijn in 2011 ('t Gooi) en 2012 (Salland en Twente) door TNO – Geologische Dienst Nederland onderzocht met aanvullend GPR onderzoek.

Een voorbeeld van het resultaat van *Unfolding/Folding* in de stuwwallen is te zien in Figuur 5.11.



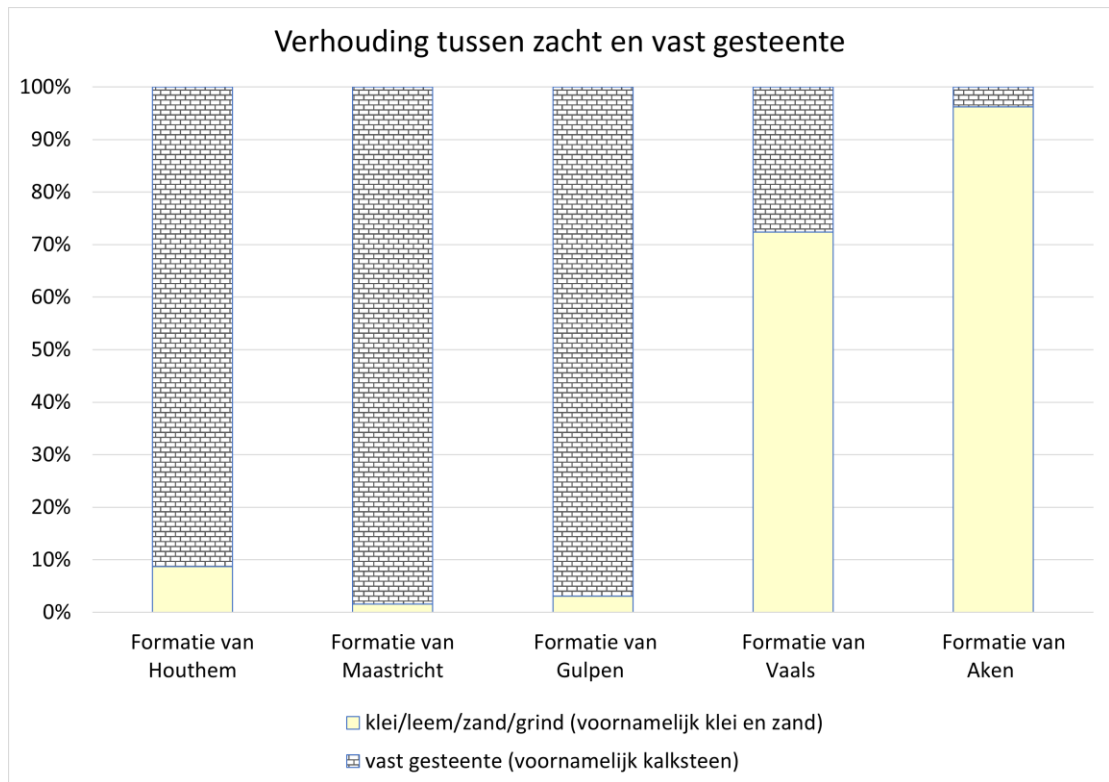


**Figuur 5.11:** West-oost aansnede van scheefgestelde lagen in de Utrechtse Heuvelrug ter hoogte van Doorn. Kleurcodering voor lithoklassen is gegeven in Bijlage A. Het weergegeven blok beslaat 59x64 km. Verticale overdrijving 80x.

Een belangrijke kanttekening is dat de hellingen van de sedimenten in de stuwwallen enkel een eerste orde beeld geven van de complexe structuur in de stuwwallen. Voor grote delen van de gestuwde afzettingen is de structuur hypothetisch omdat er onvoldoende informatie over beschikbaar is. De interne structuur van de stuwwallen is belangrijk voor het inschatten van de hydrogeologische situatie (aquifers en aquitards wisselen elkaar af, in scheef gestelde posities), en voor de voorkomens van grof zand en grind. De eerste orde benadering van de stuwning in NL3D kan echter niet gebruikt worden om bijvoorbeeld een gedetailleerd hydrologisch model te maken. Daarvoor is meer gedetailleerde kennis nodig over de daadwerkelijke structuur in de stuwwallen.

#### 5.4.3.8 Lithoklassen in de Krijtkalk Groep

De geologische eenheden van de Krijtkalk Groep liggen in Zuid-Limburg dicht aan maaiveld en binnen het bereik van NL3D. Het gaat om de formaties van Houthem, Maastricht, Gulpen, Vaals en Aken. De drie eerstgenoemde formaties bestaan voor het grootste deel uit vast gesteente, voornamelijk kalksteen (Figuur 5.12). De lithoklasse van deze eenheden krijgt daarom een vaste waarde ‘vast gesteente’ toegekend. Vaals en Aken liggen stratigrafisch onder de kalksteen, maar zijn desondanks niet of nauwelijks geconsolideerd. De boorbeschrijvingsintervallen laten daar vooral zand en klei zien. De lithoklassen van Vaals en Aken worden daarom op de reguliere wijze van lithoklassen voorzien.



**Figuur 5.12:** Verhouding tussen ongeconsolideerd (zacht) gesteente en vast gesteente (kalksteen) in boorbeschrijvingsintervallen van de vijf eenheden van de Krijtkalk Groep. Houthem, Maastricht en Gulpen krijgen een enkele lithoklasse ‘vast gesteente’ toegekend; Vaals en Aken volgen de reguliere lithoklasseindeling op basis van de boorbeschrijvingsintervallen met voornamelijk klei en zand.

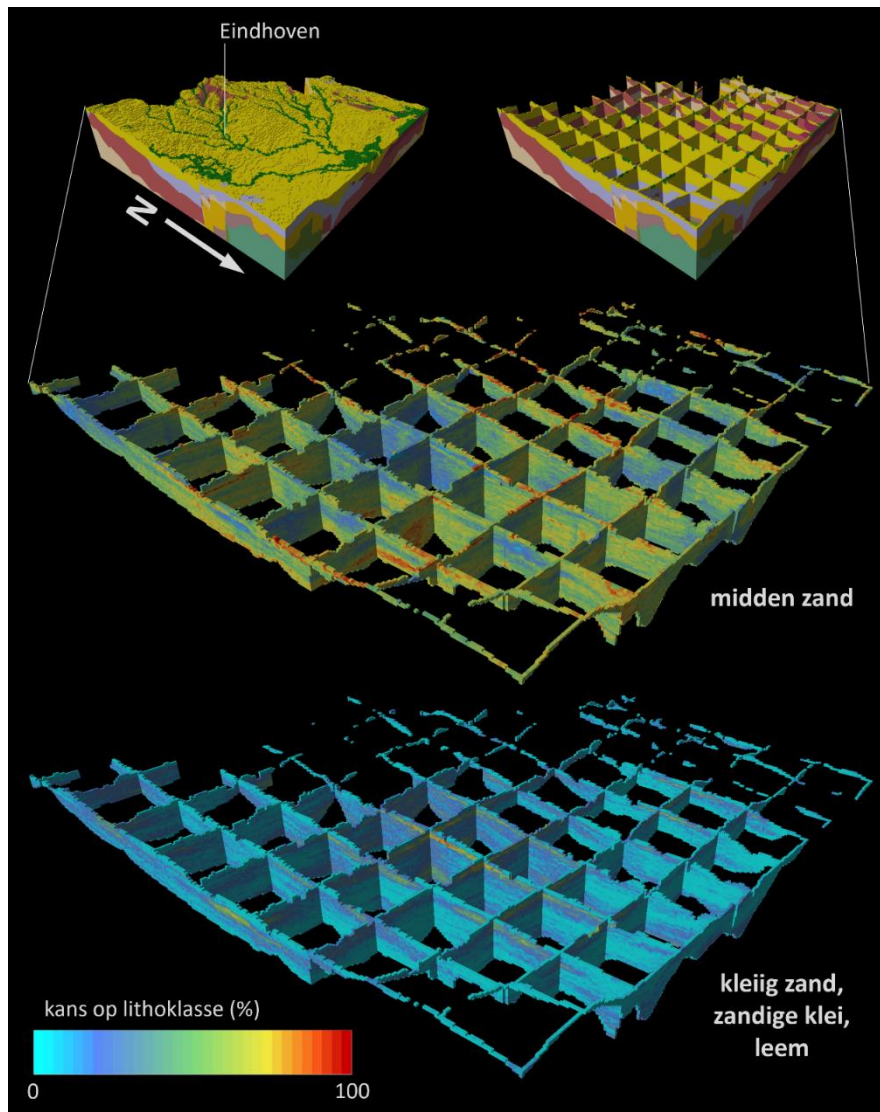
### 5.4.3.9 Berekenen kans op lithoklasse

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 5.13 geeft een voorbeeld van kans op lithoklasse.



**Figuur 5.13:** Kans op voorkomen van twee lithoklassen in de Formatie van Boxtel in blok B21. De formatie bestaat voor het grootste deel uit zand. Bovenin de formatie komt echter een lemig pakket tot uiting, dat overeenkomt met het Laagpakket van Liempde (niet als aparte eenheid gemodelleerd). Het weergegeven deel van het blok beslaat 59x46 km. Afstand tussen de doorsneden van het hekdiagram is 6250 m. Verticale overdrijving 160x.

### 5.4.3.10 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. Een voor de hand liggende manier om dit te doen is de lithoklasse met de hoogste kans te selecteren. 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. 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 ‘NUKR1’ (Formatie van Kreftenheye) in modelblok ‘B11’ (Tabel 5.8, gelijk aan Tabel 5.3).

**Tabel 5.8:** Voorbeeld van globale verhoudingen van lithoklassen binnen eenheid ‘NUKR1’ (Formatie van Kreftenheye) in modelblok ‘B11’.

Lithoklasse (“categorie”)	Nummer	Fractie
Organisch materiaal (veen)	1	0,0174
Klei	2	0,0448
Kleilig zand, zandige klei en leem	3	0,0708
Fijn zand	5	0,1125
Midden zand	6	0,3858
Grof zand	7	0,3542
Grind	8	0,0145
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 5.9.

**Tabel 5.9:** Voorbeeld *estimate data* van vijf voxels met twee mogelijke lithoklassen.

Voxelnummer	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

Voxelnummer	Kans op lithoklasse 1	Kans op lithoklasse 2
5	0,90	0,10

Het *target histogram*, gebaseerd op boorinformatie is weergegeven in Tabel 5.10.

**Tabel 5.10:** Voorbeeld *target histogram* van vijf voxels met twee lithoklassen.

Lithoklasse	Fractie
1	0,74
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 5.11.

**Tabel 5.11:** 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.

Voxelnummer	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*.

### 5.4.3.11 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 2.4.3) 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*.

Er geldt een aantal beperkingen bij de modelonzekerheid van lithoklasse:

- › De modelonzekerheid is gebaseerd op de in NL3D gebruikte stochastische interpolatietechnieken. Deze technieken houden niet expliciet rekening met onzekerheidsmarges in de gebruikte brongegevens (voornamelijk boorbeschrijvingen).
- › 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.

### 5.4.3.12 Exporteren voxelmodel met alle attributen

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 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.

## 5.5 Publicatie

### 5.5.1 Kaarten op basis van het voxelmodel

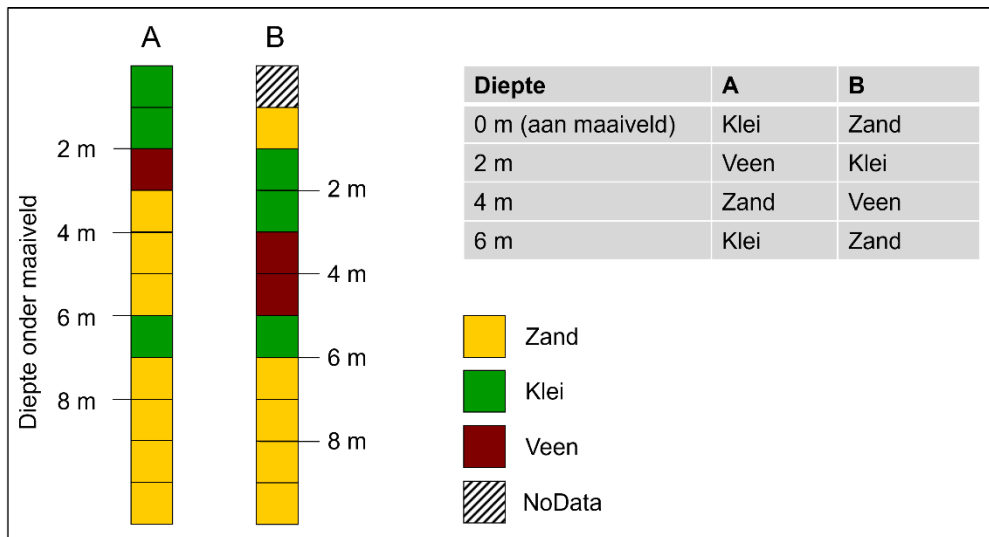
NL3D wordt uitgeleverd als een set 2D-rasterkaarten die een attribuut van het voxelmodel (bijvoorbeeld lithoklasse) op een bepaalde diepte ten opzichte van maaiveld weergeven. De drie uitgeleverde attributen zijn:

- › Geologische eenheid
- › Meest waarschijnlijke lithoklasse
- › Modelonzekerheid van lithoklasse

Van elk attribuut zijn 16 kaarten beschikbaar, voor dieptes van 0 ... 15 m onder maaiveld. De diepteaanduiding geldt voor de top van de op de kaart weergegeven voxel.

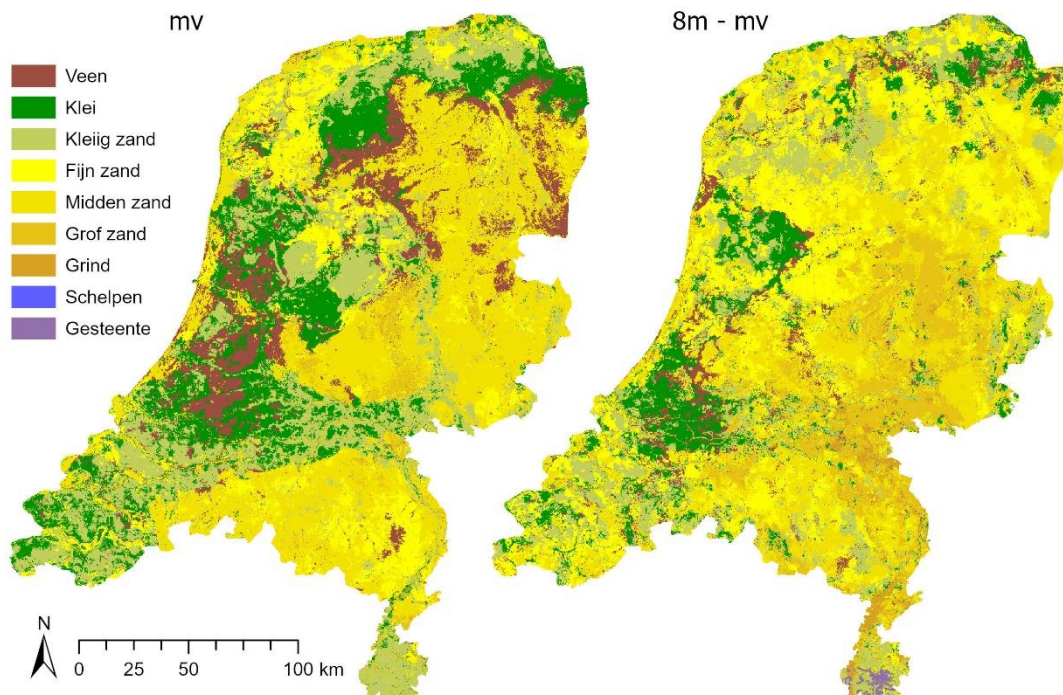
De kaarten met attributen van het voxelmodel worden gebaseerd op een verticale voxel-stack analyse. Een verticale voxel-stack geeft voor een (x,y)-locatie de verticale

openvolging van de attribuutwaarden van de voxels weer. Uit de voxel-stack kan de waarde van een attribuut (bijvoorbeeld lithoklasse) op een bepaalde diepte ten opzichte van maaiveld worden afgelezen. Deze waarde wordt dan toegekend aan de rastercel op de (x,y)-locatie in de 2D-rasterkaart. In Figuur 5.14 wordt deze werkwijze geïllustreerd voor de lithoklasse en in twee verschillende voxel stacks op locaties A en B.



Figuur 5.14: Verticale voxel-stack analyse op twee locaties A en B.

De resulterende kaart toont de lithoklasse aan maaiveld of, bijvoorbeeld op 8 m onder maaiveld (Figuur 5.15).



Figuur 5.15: Lithoklasse aan maaiveld (links) en 8 m onder maaiveld (rechts). Omschrijvingen van de lithoklassen in de legenda zijn ingekort; zie Bijlage A voor de volledige omschrijvingen.



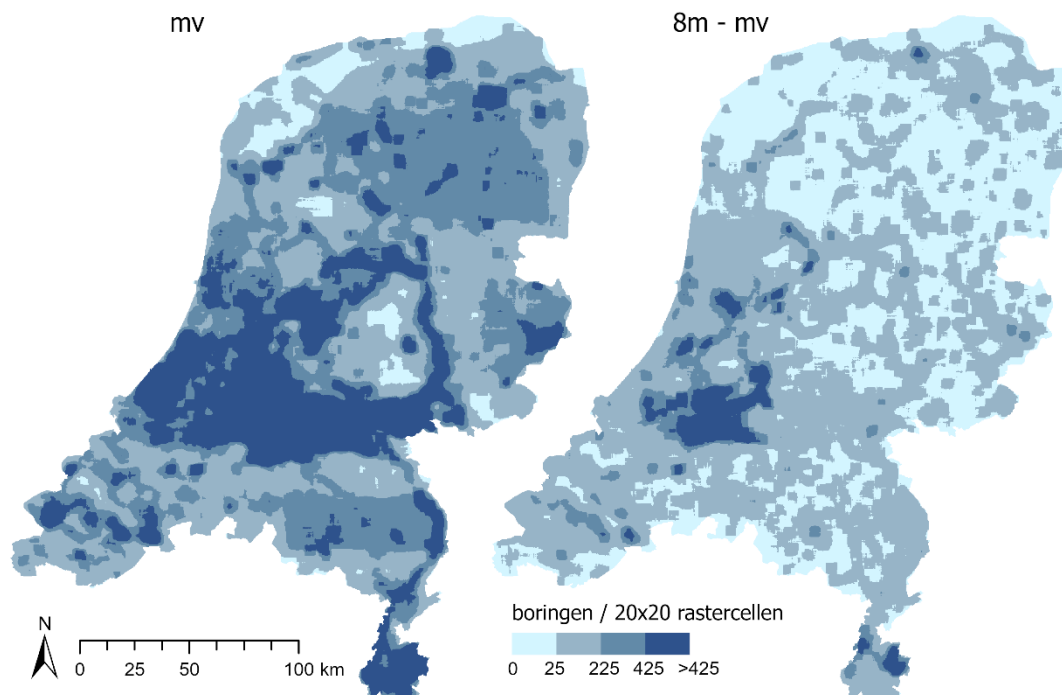
## 5.5.2 Boordichtheidskaarten

Een aanvullende maatstaf voor modelonzekerheid is de boordichtheid. In het algemeen geldt dat een hoge boordichtheid leidt tot een lage modelonzekerheid. Er zijn echter uitzonderingen, in geologisch complexe gebieden met veel heterogeniteit kan een hoge boordichtheid gepaard gaan met een hoge modelonzekerheid. Omgekeerd kan een lage boordichtheid bij een ondergrond met een eenvoudige opbouw tot een lage modelonzekerheid leiden. Met NL3D worden boordichtheidskaarten meegeleverd van de in het model gebruikte boorinformatie op verschillende dieptes onder maaiveld.

De boordichtheidskaarten worden direct berekend uit de boorlocaties en de einddiepte van de boringen. Als eerste stap wordt bepaald welke boringen op een bepaalde diepte onder maaiveld beschikbaar zijn. Aan maaiveld zijn dat alle boringen (Figuur 4.1 en Figuur 4.5), op 10 m onder maaiveld zijn het er veel minder (Figuur 4.2). Uit de boorlocaties wordt vervolgens een rasterkaart geconstrueerd waarbij alle boringen geteld worden die in een rastercel van 250 bij 250 m vallen. Deze rasterkaart wordt vervolgens samengevat door per rastercel de celwaarden van een vierkant gebied van 20 bij 20 rastercellen (5 bij 5 km) te sommeren.

De boordichtheidskaart is beschikbaar voor dieptes van 0 ... 15 m onder maaiveld. De diepteaanduiding geldt voor de top van de op de kaart weergegeven voxel.

Figuur 5.16 laat de boordichtheidskaarten voor twee dieptes zien.

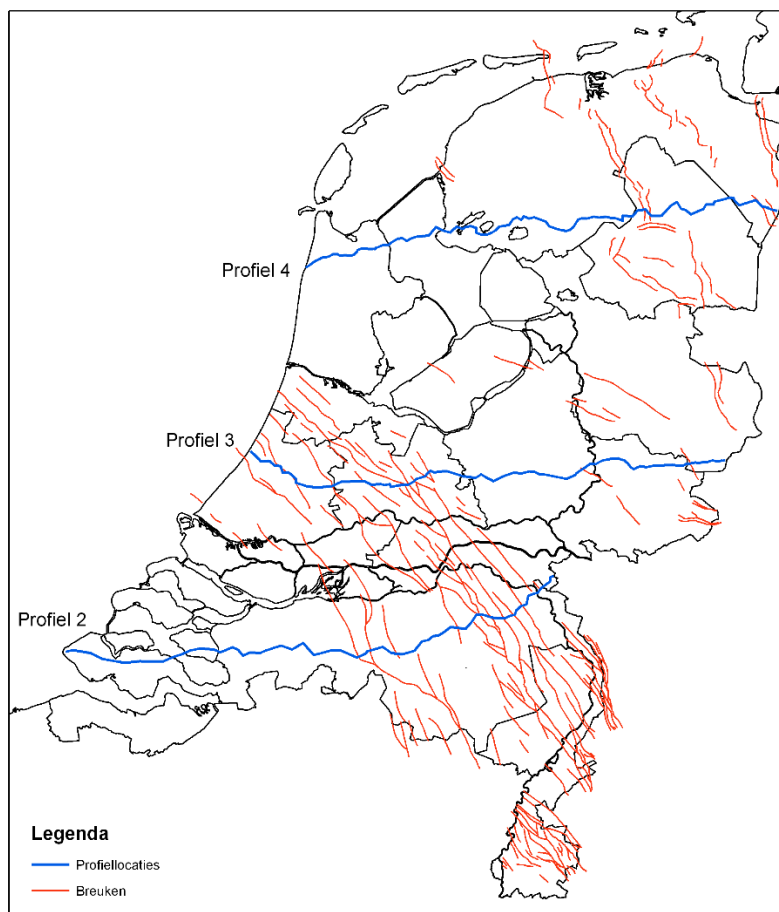


**Figuur 5.16:** Boordichtheid aan maaiveld (links) en 8 meter onder maaiveld (rechts).

## 6 Geologische beschrijving

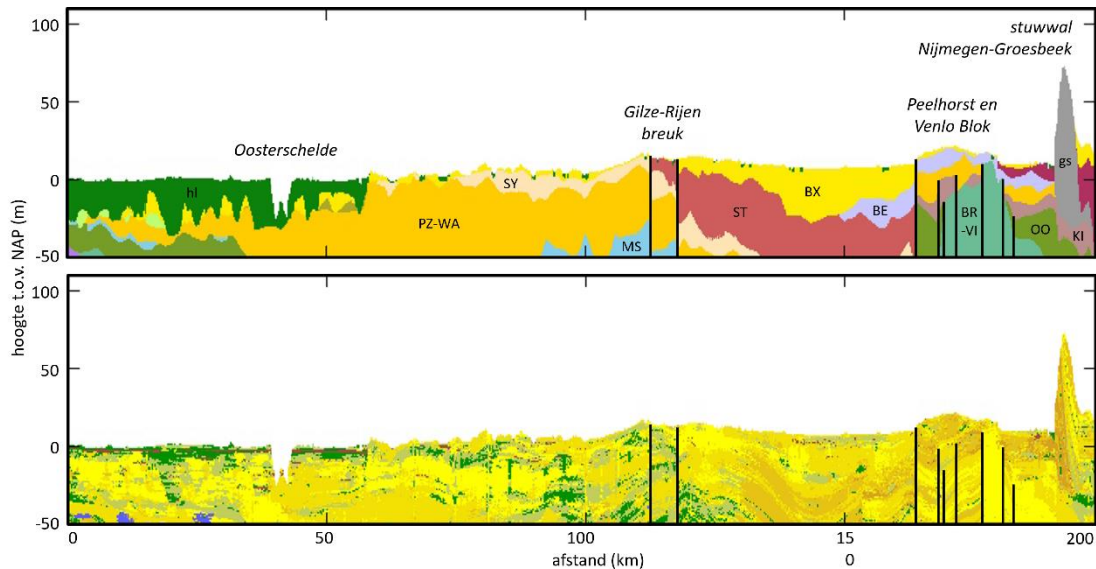
Dit hoofdstuk geeft een korte geologische beschrijving van het NL3D model aan de hand van een drietal west-oost georiënteerde profielen met een lengte van elk ca. 200 km (Figuur 6.1). De profielen worden in grote lijn van oud naar jong (dus van oost naar west) beschreven.

Elk profiel bestaat uit twee panelen: in het bovenste paneel is van de voxels de geologische eenheid (lithostratigrafie) weergegeven en in het onderste paneel zijn de voxels gekleurd naar de meest waarschijnlijke lithoklasse.



**Figuur 6.1:** Locaties van de drie besproken profielen. Profielnummers zijn conform de nummers van de 12 'kapstokprofielen' die bij het maken van het DGM-model gemaakt zijn. De drie west-oost profielen 2, 3 en 4 geven een goed beeld van de geologische opbouw in NL3D.

## 6.1.1 Profiel 2 – Van de kust in Zeeland naar de stuwwal van Nijmegen-Groesbeek



**Figuur 6.2:** Geologische eenheid (boven) en lithoklassen (onder) van profiel 2, dat loopt van Zeeland naar de stuwwal van Nijmegen-Groesbeek. Kleurcodering voor de geologische eenheden en lithoklassen is gegeven in Bijlage A. Geologische eenheden zijn gelabeld met een code, die ten behoeve van leesbare weergave is ingekort door weglating van de groepscode (NU, NM, NL). Breuken zijn als zwarte lijnen weergegeven.

Het oostelijk deel van het profiel (Figuur 6.2; traject van ca. 110 - 200 km) toont het tektonische dalingsgebied van de Roerdalslenk en de ten oosten daarvan gelegen en door breuken gescheiden getrapte blokken bekend als de Peelhorst en het Venlo Blok.

Ruwweg is ter plaatse van de Peelhorst en het Venlo Blok een tweedeling te zien tussen de fijne zanden en kleien van de neogene mariene afzettingen (Formatie van Breda – NUBR-VI en Formatie van Oosterhout - NUOO) en de daar stratigrafisch boven gelegen grovere rivierzanden. In Limburg intercaleert de Formatie van Breda met de relatief kleine Formatie van Ville. Deze formaties zijn in het model samengenomen in één geologische eenheid met de code NUBR-VI.

Op de mariene afzettingen liggen Rijn- en Maasafzettingen van pliocene ouderdom die behoren tot de Kiezeloöliet Formatie (NUKI) met daar boven vroeg-pleistocene Rijn- en Maasafzettingen van de Formatie van Waalre (NUWA). Noordelijk van het profiel ligt rivierzand van oostelijke herkomst dat behoort tot de Formatie van Peize (NUPZ) en intercaleert met de sedimenten van de Formatie van Waalre. Deze in Midden-Nederland moeilijk van elkaar te onderscheiden formaties zijn samengenomen in één geologische eenheid met de code NUPZ-WA.

De opvulling van de Roerdalslenk bestaat binnen het dieptebereik van het model uit een relatief dun pakket fijnzandig tot kleilig sediment van vroeg- tot midden-pleistocene ouderdom, dat is afgezet door zuidelijke rivieren en behoort tot de Formatie van Stramproy (NUSY). Daar boven komen de grovere midden-pleistocene Rijnafzettingen van de Formatie van Sterksel goed tot uiting.

Zowel in de Roerdalslenk als op de Peelhorst en het Venlo Blok komen grof grind en zand bevattende rivierafzettingen van de Maas voor. Deze zijn onderdeel van de Formatie van

Beegden (NUBE), die gedurende het hele pleistoceen werd afgezet. De laat-pleistocene grofzandige grindhoudende afzettingen van de Rijn in het oosten van het profiel zijn behoren tot de Formatie van Kreftenheye (NUKR1).

De lemige, fijne en matig grove zanden van de Formatie van Boxtel (NUBX), die over de gehele lengte van het profiel voorkomt, vormen in de Roerdalslenk een zeer dik pakket, dat duidelijk fijner is dan de eronder gelegen rivierafzettingen.

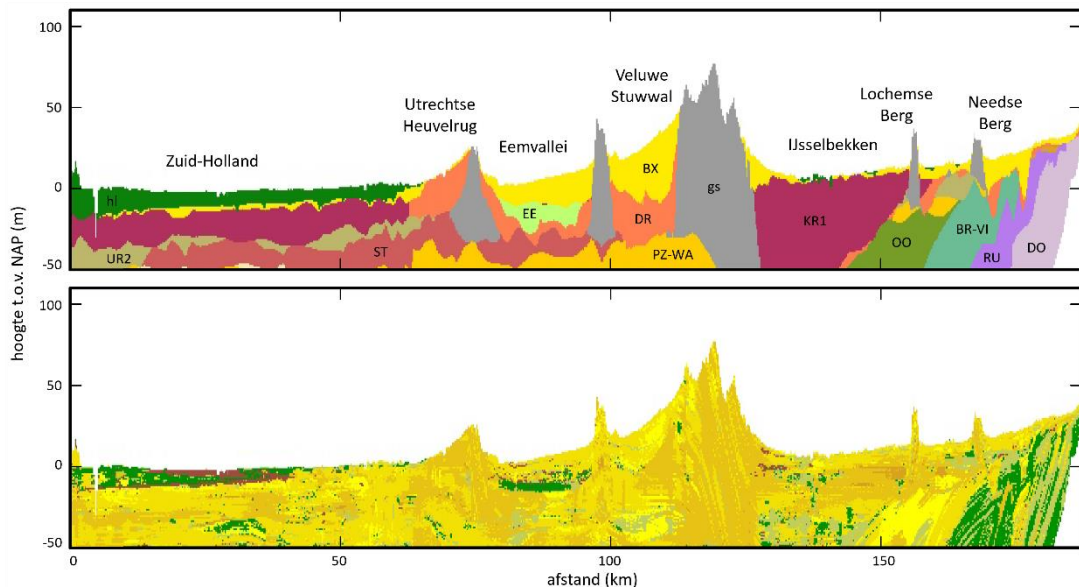
De gesimuleerde dominantie van grof zand met grind in de stuwwal van Nijmegen-Groesbeek (NUGs), uiterst rechts op het profiel, is een goede benadering van de werkelijke opbouw.

Het traject door het westen van Noord-Brabant (60 – 100 km) toont de afwisseling van zand en klei in Formatie van Waalre (onderdeel van geologische eenheid NUPZ-WA) en de fijne zanden en kleien van de Formatie van Stramproy (NUSY). Direct naast de westelijke randbreuk van de Roerdalslenk komen de mariene kleien en zanden van de Formatie van Maassluis (NUMS) nog net in het bereik van het profiel.

Het meest westelijke deel van het profiel, het traject 0 – 60 km, toont de kleien en de relatief fijne zanden van de mariene holocene afzettingen in Zeeland (Formatie van Naaldwijk). Aan de top komt lokaal veen voor van het Hollandveen Laagpakket, onderdeel van de Formatie van Nieuwkoop. Al deze afzettingen zijn in het model samengenomen in de geologische eenheid Holoceen (NUHl) die in NL3D niet verder is onderverdeeld. De suggestie van veen in de geulafzettingen is een tekortkoming van dit model. De GeoTOP modellen geven een beter beeld van de veenvoorkomens in dit gebied (Figuur 2.5).

Uiterst links in het profiel, onder de fijne, deels kleiige zanden van de Formatie van Maassluis en de Formatie van Oosterhout wordt nog net het niveau bereikt van de neogene mariene kleien van de formaties van Breda en Rupel (NUBR-VI, NMRU).

## 6.1.2 Profiel 3 - Van de kust in Zuid-Holland door Utrecht en Gelderland naar de grens met Duitsland



**Figuur 6.3:** Geologische eenheid (boven) en lithoklassen (onder) van profiel 3, dat loopt van de kust van Zuid-Holland naar de landgrens bij Enschede. Kleurcodering voor de geologische eenheden en lithoklassen is gegeven in Bijlage A. Geologische eenheden zijn gelabeld met een code, die ten behoeve van leesbare weergave is ingekort door weglating van de groepscode (NU, NM, NL).

In het oostelijk deel van het profiel (Figuur 6.3; traject van ca. 140-200 km) is te zien hoe de paleogene en neogene formaties van Dongen, Rupel, Breda en Oosterhout (resp. NLDO, NMRU, NUBR-VI en NUOO) naar het westen afhellen. Dit materiaal werd oorspronkelijk horizontaal afgezet, maar werd sindsdien door tektonische bewegingen scheefgesteld. De overwegend kleiige mariene afzettingen van deze formaties kennen een aantal niveaus met (kleinig) fijn zand en gaan uiteindelijk over in een bijna geheel zandig pakket. Die trend komt zeer duidelijk in het profiel tot uiting.

De relatief fijne mariene eenheden worden afgedekt door overwegend grove rivierzanden: vroeg-pleistocene afzettingen van een voormalig oostelijk riviersysteem, behorend tot de Formaties van Peize (NUPZ, in het model onderdeel van de geologische eenheid NUPZ-WA) en midden-pleistocene afzettingen van de Formatie van Urk (NUUR2). Deze liggen min of meer horizontaal over de fijnkorrelige oudere mariene eenheden.

De twee ‘torens’ in het oostelijk deel van het profiel zijn de heuvelruggen van de Needse Berg en Lochemse Berg in Salland. Ze bestaan uit sediment dat door het landijs is opgestuwd en dat in het model wordt gerekend tot de eenheid NUgs. De Formatie van Drente (NUDR), die allerlei ijsgerelateerde afzettingen bevat, bestaat hier hoofdzakelijk uit middelgrof tot grof zand en kan alle bovengenoemde eenheden bedekken.

De Formatie van Peize komt in een groot deel van het profiel (traject van ca. 0-120 km) aan de basis van het model voor. Deze wordt bedekt door relatief grove Rijnaafzettingen die behoren tot de formaties van Sterksel en Urk. In beide formaties kunnen kleilagen voorkomen. Deze geulopvullingen hebben in het algemeen vrij geringe verbreiding.

Tussen de Veluwe stuwwal en de Sallandse Heuvelrug ligt het IJsselbekken, een glaciaal bekken dat in de voorlaatste ijstijd door een gletsjertong is uitgesleten (traject van ca. 125-

160 km). De opvulling van het bekken bestaat overwegend uit zand dat door de Rijn is aangevoerd en behoort tot de Formatie van Kreftenheye (NUKR1). In de diepere delen (30-50 m - NAP) en in mindere mate bovenin het pakket (0-5 m - NAP) komen kleilagen en kleilig zand voor. Lokaal wordt de formatie afgedekt door de voornamelijk zandige Formatie van Boxtel (NUBX).

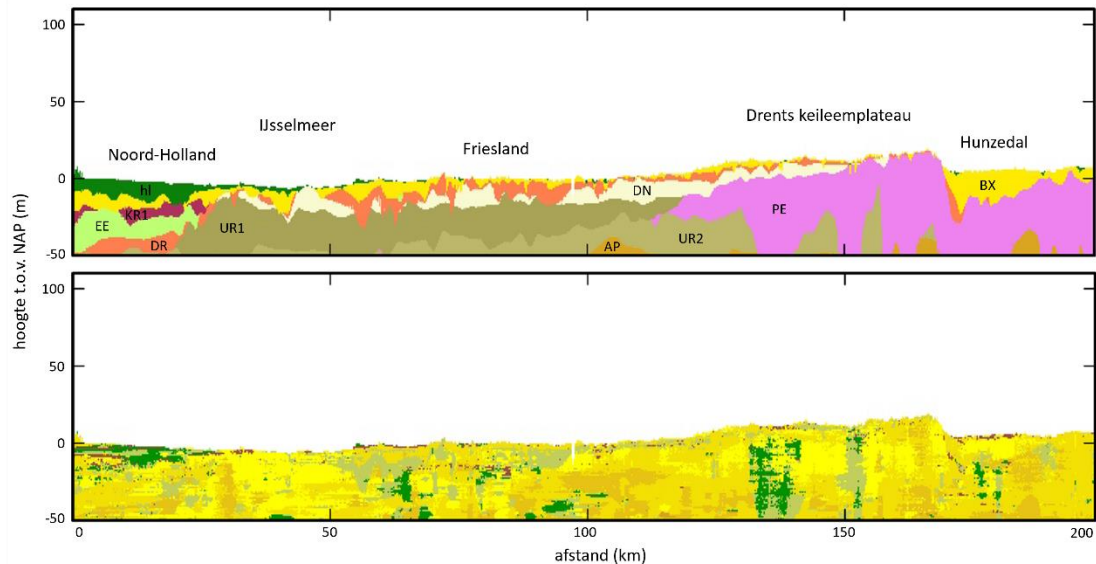
Lokaal voorkomende veenlagen aan de bovenzijde van de afzettingen van de Formatie van Kreftenheye en in de Formatie van Boxtel (NUBX), onder meer aan de voet van de Veluwe stuwwal worden eveneens goed gesimuleerd.

In het midden van het profiel (traject van ca. 80-95 km) ligt de het door stuwwallen begrensde glaciële bekken van de Eemvallei. De bekkenopvulling bestaat uit hoofdzakelijk zand van de Formatie van Drente (NUDR), mariene veelal kleiige afzettingen behorende tot de Eem Formatie (NUEE) en overwegend fijn zand (Formatie van Boxtel - BX). De begrenzing van het bekken wordt aan weerszijden gevormd door overwegend grove rivierzanden van de door een gletsjer opgedrukte lagen in de stuwwallen (NUgs).

De interne opbouw van de stuwwallen, met scheefgestelde lagen als gevolg van de stuwing door ijs, komt in het lithologisch profiel goed tot uiting.

In het meest westelijke deel van het profiel (traject van ca. 80-95 km) door Zuid-Holland en het westen van provincie Utrecht contrasteren de relatief grove pleistocene rivierzanden en de relatief fijnzandige Formatie van Boxtel sterk met de wig van veen en klei binnen de holocene deklaag (NUHl). De wig bestaat grotendeels uit mariene klei van de Formatie van Naaldwijk en rivierklei van de Formatie van Echteld. In dit gebied is zowel aan de basis als aan de top van de holocene wig een veenniveau herkenbaar. Deze niveaus corresponderen met de Basisveen Laag en Hollandveen Laagpakket van de Formatie van Nieuwkoop. Aan de westzijde van het profiel zijn de duinen, behorende tot het Laagpakket van Schoorl van de Formatie van Naaldwijk, voornamelijk zandig gemodelleerd. In de duinen langs de Noordzeekust is in de simulatie echter ook veel veen te zien. Dit is een tekortkoming in het huidige model. In GeoTOP wordt dit door meer sturing op de geologische details verholpen.

### 6.1.3 Profiel 4 - Kop van Noord-Holland- IJsselmeer- Friesland – Drenthe



**Figuur 6.4:** Geologische eenheid (boven) en lithoklassen (onder) van profiel 3, dat loopt van de kust van Noord-Holland naar de landgrens ten noorden van Emmen. Kleurcodering voor de geologische eenheden en lithoklassen is gegeven in Bijlage A. Geologische eenheden zijn gelabeld met een code, die ten behoeve van leesbare weergave is ingekort door weglating van de groepscode (NU, NM, NL).

In vrijwel het gehele profiel vormen de grofzandige midden-pleistocene Rijnafzettingen van de Formatie van Urk (NUUR2) de basis van het profiel. Hierin kunnen lokaal kleiige geulinvullingen voor. Lokaal wordt grof zand van de Formatie van Appelscha (NUAP) binnen het modelbereik aangetroffen.

In het oostelijk deel van het profiel (Figuur 6.4; traject van ca. 120-175 km) wordt de opbouw van de ondergrond in het dieptebereik van het model gedomineerd door de Formatie van Peelo (NUPE). Deze omvat de invulling van diep ingesneden tunneldalen en is sterk heterogeen: de formatie is deels fijnzandig, maar in de tunneldalen komen dikke kleilagen voor ('potklei'). Dit is in het lithoklassenmodel goed zichtbaar. Aan de westzijde wordt de formatie afgedekt door de grovere zanden van de Formatie van Urk (NUUR1). Het in westelijke richting uitwijken van de fijne zanden van de Formatie van Peelo tussen de grovere zanden van de Formatie van Urk (NUUR1 en NUUR2) komt in het lithoklassenmodel goed tot uiting.

In het oosten van het profiel (traject van ca. 170-200 km) ligt het Hunzedal, dat is ingevuld met voornamelijk zand van de formaties van Drente en Boxtel (NUDR, NUBX). Met name waar de Peelo Formatie relatief fijn is, zijn deze goed te herkennen.

De formaties van Urk en Peelo worden in een groot deel van het profiel (traject van ca. 30-150 km) afgedekt door fijn tot middelgrof zand van de Formatie van Drachten met daarop een dun dek bestaande uit de Formaties van Drente (NUBX) en daarop de Formatie van Boxtel (NUBX). De formatie van Drente is hier duidelijk lemig: de fijnkorrelige afzettingen van het Laagpakket van Gieten, hier niet apart onderscheiden, worden door het model consistent gesimuleerd. Het contrast met de zandige formaties eronder en erboven is groot.

In het westelijk deel van het profiel (traject van ca. 0-50 km) snijdt het profiel een deel van het Oervechtdal, een diep uitgesleten smeltwaterdal, aan. Het dal is ingevuld door grove zanden van de Formatie van Drente en later deels opgevuld geraakt met fijnere mariene zanden en kleien van de Eem Formatie, welke wordt bedekt door Rijnzand behorende tot de Formatie van Kreftenheye en zand van de Formatie van Boxtel. In de holocene deklaag (NUh1) worden klei- en veenlagen onderscheiden, evenals de zandige duinen in het uiterste westen.



# Referenties

Bakker, M.A.J. & Van der Meer, J.J.M., 2003. Structure of a Pleistocene push moraine revealed by ground-penetrating radar: the eastern Veluwe Ridge, the Netherlands. In: Bristow, C.S. & H.M. Jol (eds.): Ground-penetrating radar in sediments. Geological Society, London, Special Publications, 211, 143-151.

Bakker, M.A.J., 2004. The internal structure of Pleistocene push moraines. A multidisciplinary approach with emphasis on ground-penetrating radar. PhD thesis, Queen Mary, University of London, 177 pp.

Cohen, K.M., 2017. Laaglandgenese boringendatabase Universiteit Utrecht. DANS Data Station Archaeology, V1. Geraadpleegd op 02-05-2024 op <https://doi.org/10.17026/dans-zcv-knya>

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.

Van Ginkel, J., Ruigrok, E., Stafleu, J. & Herber, R., 2022. Development of a seismic site-response zonation map for the Netherlands. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 22, 41–63, 2022 <https://doi.org/10.5194/nhess-22-41-2022>

Goovaerts, P., 1997. Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Oxford University Press, New York, 483 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 DINOket: <https://www.dinoket.nl/meer-weten-over-dgm>

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 BROOket: <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 BROOket: <https://www.broloket.nl/toelichting/regis-ii>

Maarleveld, G.C., 1981. The sequence of ice-pushing in the central Netherlands. Mededelingen Rijks Geologische Dienst, 34, 2-6.

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

Stafleu, J., Hummelman, J., de Bruijn, R., Koster, K., Stam, J., Maljers, D. & Schokker, J., 2020. Totstandkomingsrapport GeoTOP – met nieuwe methodiek lagenmodellering. TNO Rapport 2020 R10758, 157 pp. Beschikbaar op BROloket: <https://www.broloket.nl/toelichting/geotop>

Stafleu, J., Stam, J.C., Menkovic, A., Koster, K., de Bruijn, R., Hummelman, H., Heerema, C., van de Ven, T., Dabekaussen, W., Kiden, P. & Busschers, F., 2022. Totstandkomingsrapport GeoTOP – aanvullingen bij versie 1.5. TNO Rapport 2022 R12127, 23 pp. Beschikbaar op BROloket: <https://www.broloket.nl/toelichting/geotop>

Stafleu, J., Reindersma, R., de Bruijn, R., Kars, R., Schokker, J., Menkovic, A., van de Ven, T., Heerema, C., & Koster, K., 2023. Totstandkomingsrapport GeoTOP – aanvullingen bij versie 1.6. TNO Rapport 2023 R11636, 40 pp. Beschikbaar op BROloket: <https://www.broloket.nl/toelichting/geotop>

TNO-GDN, 2024. Stratigrafische Nomenclator van Nederland, TNO – Geologische Dienst Nederland. Geraadpleegd op 17-04-2024 op <https://www.dinoloket.nl/stratigrafische-nomenclator>

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>

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.

# Ondertekening

TNO ) Energy & Materials Transition ) Utrecht, 20 augustus 2024

Naam en paraaf tweede lezer

Dr. R.H. Kars

Ondertekening Autorisatie vrijgave

Drs. D. Maljers  
Research Manager

Dr. J. Stafleu  
Auteur

# Bijlage A

## Geologische eenheden en lithoklassen

### Geologische eenheden

De 34 geologische eenheden in het voxelmodel van NL3D hebben een code die als volgt is opgebouwd (derde kolom in Tabel a.1):

- › Formeel gedefinieerde eenheden worden met hoofdletters geschreven, niet formeel gedefinieerde eenheden met kleine letters. Formeel gedefinieerde eenheden zijn opgenomen in de [Stratigrafische Nomenclator van de Ondergrond van Nederland](#) (TNO, 2024).
- › De eerste twee letters geven de groep aan, bijvoorbeeld NU is Boven Noordzee Groep.
- › De derde en vierde letter geven de formatie aan, bijvoorbeeld BX is Formatie van Boxtel.
- › Als een eenheid in twee afzonderlijke lagen is gemodelleerd, dan krijgt de bijbehorende codes een volgnummer, bijvoorbeeld KR1 en KR2.
- › Als twee eenheden in een laag zijn gecombineerd, dan worden beide codes opgenomen gescheiden door een koppelstreepje, bijvoorbeeld PZ-WA.

In het voxelmodel hebben de geologische eenheden een nummer (vierde kolom in Tabel a.1). Dit nummer geeft tevens de laagvolgorde weer, met 1 de hoogstgelegen eenheid (Holocene afzettingen) en 34 de laagst gelegen (Formatie van Aken).

Tabel A.1: Geologische eenheden in NL3D.

Groep	Formatie	Code	Nummer	Kleurcode
Boven-Noordzee Groep	Holocene afzettingen	NUhl	1	
	Formatie van Boxtel	NUBX	2	
	Formatie van Kreftenheye	NUKR1	3	
	Formatie van Beegden	NUBE	4	
	Formatie van Koewacht	NUKW	5	
	Formatie van Woudenberg	NUWB	6	
	Eem Formatie	NUEE	7	
	Formatie van Kreftenheye, gelegen onder de Eem Formatie	NUKR2	8	
	Formatie van Drente	NUDR	9	
	Door landijs gestuwde afzettingen	NUgs	10	
	Formatie van Drachten	NUDN	11	
	Formatie van Urk, Laagpakket van Tijnje	NUUR1	12	

Groep	Formatie	Code	Nummer	Kleurcode
	Formatie van Peelo	NUPE	13	
	Formatie van Urk	NUUR2	14	
	Formatie van Sterksel	NUST	15	
	Formatie van Appelscha	NUAP	16	
	Formatie van Stramproy	NUSY	17	
	Formatie van Peize en Formatie van Waalre	NUPZ-WA	18	
	Formatie van Maassluis	NUMS	19	
	Kiezeloöliet Formatie	NUKI	20	
	Formatie van Oosterhout	NUOO	21	
	Formatie van Inden	NUIE	22	
	Formatie van Breda en Formatie van Ville	NUBR-VI	23	
Midden- Noordzee Groep	Formatie van Veldhoven	NMVE	24	
	Rupel Formatie	NMRU	25	
	Formatie van Tongeren	NMTO	26	
Onder- Noordzee Groep	Formatie van Dongen	NLDO	27	
	Formatie van Landen	NLLA	28	
Boven- Noordzee Groep	Formatie van Heijenrath	NUHT	29	
Krijtkalk Groep	Formatie van Houthem	CKHM	30	
	Formatie van Maastricht	CKMA	31	
	Formatie van Gulpen	CKGP	32	
	Formatie van Vaals	CKVA	33	
	Formatie van Aken	CKAK	34	

# Lithoklassen

In het voxelmodel hebben de lithoklassen een volgnummer (tweede kolom in Tabel a.2). Lithoklasse 10 (zand met onbekende korrelgrootte) komt alleen voor in de boorbeschrijvingen. In het voxelmodel heeft het zand altijd een korrelgrootte (zie paragraaf 5.3.3 en 5.4.3.5).

**Tabel A.2:** Lithoklassen in NL3D.

Lithoklasse	Nummer	Code	Korrelgrootte (mediaan)	Kleurcode
Organisch materiaal (veen)	1	o	-	
Klei	2	k	-	
Kleilig zand, zandige klei en leem	3	kz	-	
Fijn zand	5	zf	$\geq 63 \mu\text{m}$ en $< 150 \mu\text{m}$	
Midden zand	6	zm	$\geq 150 \mu\text{m}$ en $< 300 \mu\text{m}$	
Grof zand	7	zg	$\geq 300 \mu\text{m}$ en $< 2 \text{mm}$	
Grind	8	g	$\geq 2 \text{mm}$	
Schelpen	9	she	-	
Zand met onbekende korrelgrootte	10	z	Onbekend	
Vast gesteente	11	-	-	

Energy & Materials Transition

Princetonlaan 6  
3584 CB Utrecht  
[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

**TNO** innovation  
for life