

TNO PUBLIEK

Geologische Dienst NederlandPrincetonlaan 6
3584 CB Utrecht
Postbus 80015
3508 TA Utrechtwww.tno.nl

T +31 88 866 42 56

TNO-rapport**TNO 2022 R12013****Totstandkomingsrapport Kleine Release
REGIS II onzekerheden geometrie**

Datum	18 oktober 2022
Auteur(s)	R. Reindersma H.J. Hummelman W. Dabekaussen J. Stafleu
Aantal pagina's	23
Aantal bijlagen	0
Opdrachtgever	De directeur Geologische Dienst Nederland
Projectnaam	GIP Ondiepe Kartering 2022
Projectnummer	060.51867

Alle rechten voorbehouden.

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

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

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

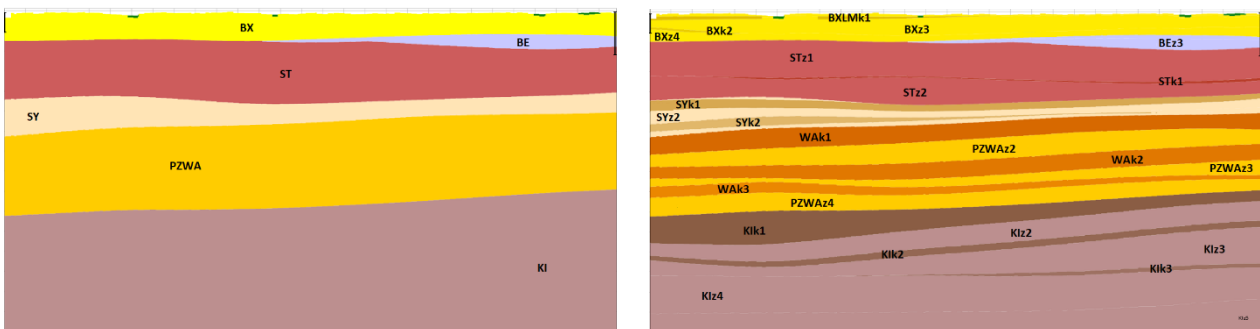
© 2022 TNO

Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
2	Methodiek	5
2.1	Algemene methodiek	5
2.2	Regionale onzekerheid	6
2.3	Datanabijheid	10
2.4	Lokale onzekerheid	11
2.5	Afleiden standaard deviatie uit de twee berekende standaard deviaties	11
2.6	Belangrijkste verschillen met DGM	12
3	Toepassing op gekarteerde eenheden in REGIS II	14
3.1	Algemene toepassing van de berekeningswijze	14
3.2	Uitzonderingen	14
4	Nieuwe en gewijzigde bestanden	20
4.1	Basisgegevens	20
4.2	Lagenmodel	20
5	Literatuuropgave	22
6	Ondertekening	23

1 Inleiding

Het geologische BRO-model DGM en het hydrogeologische BRO-model REGIS II zijn regionale lagenmodellen van de Nederlandse ondergrond tot een diepte van ongeveer 500 m, met een maximum diepte van 1200 m onder NAP in de Roerdalslenk. Beide modellen zijn gebaseerd op een selectieset van circa 26.500 boringen. In DGM wordt zowel de diepteligging van de top en de basis (de geometrie) van lithostratigrafische eenheden gemodelleerd, als de onzekerheid van deze diepteligging. In REGIS II worden geometrieën en hydraulische parameters gemodelleerd van hydrogeologische eenheden die voorkomen binnen de begrenzing van de in DGM onderscheiden lithostratigrafische eenheden (Figuur 1.1).



Figuur 1.1 De relatie tussen DGM (links, met lithostratigrafische eenheden) en REGIS II model (rechts, met hydrogeologische eenheden binnen de begrenzing van DGM).

De hydrogeologische eenheden van REGIS II kunnen gefragmenteerd voorkomen, waardoor de geometrie soms op basis van een klein aantal boringen is berekend. De methode voor de bepaling van geometrische onzekerheid zoals gebruikt in DGM (Gunnink et al., 2010; Hummelman et al., 2019a) is daardoor niet direct toepasbaar voor REGIS II. De geometrie van hydrogeologische eenheden in REGIS II v2.2 werd dan ook uitgeleverd zonder een inschatting van de onzekerheid.

Inmiddels hebben Dabekaussen en Hummelman (2018) een methode voor onzekerheidsbepaling beschreven die de methode zoals gebruikt in DGM op een aantal punten verbetert. Hierdoor is het mogelijk ook voor gekarteerde hydrogeologische eenheden een onzekerheid voor de geometrie van de grensvlakken te berekenen. Voor de berekening van de onzekerheden wordt de crossvalidatie methode gebruikt. Hiervoor dienen de geïnterpreteerde diepteliggingen van de grensvlakken in de boringen als input. Andere onzekerheden zoals dataonzekerheid, onzekerheid in de ligging van de breuken, onzekerheid in de verbreidingen, en onzekerheid in de gebruikte stuurvlakken worden momenteel niet meegenomen.

Dit rapport beschrijft hoe de methode van Dabekaussen en Hummelman (2018) is toegepast op de geometrie van de gekarteerde hydrogeologische eenheden in REGIS II. De resulterende onzekerheidsinformatie is toegevoegd aan het BRO-model REGIS II in de vorm van een *kleine release*. Deze kleine release heeft als versienummer REGIS II v2.2.1. De modelbestanden die al in REGIS II v2.2 aanwezig waren blijven daarbij ongewijzigd.

Dit geldt ook voor de onzekerheidsinformatie van de *doorlatendheden* die aan de hydrogeologische eenheden zijn toegekend.

Dit rapport beschrijft alleen de uitbreiding met onzekerheden; een volledige beschrijving van de totstandkoming van het BRO-REGIS II model is te vinden in TNO-rapport *R11654 Totstandkomingsrapport Hydrogeologisch Model (REGIS II)* (Hummelman et al., 2019b).

2 Methodiek

2.1 Algemene methodiek

In dit hoofdstuk wordt een samenvatting gegeven van de in Dabekaussen en Hummelman (2018) beschreven methode. Voor een validatie van de methode wordt verwezen naar het rapport zelf.

De geometrie van lithostratigrafische eenheden in DGM wordt gemodelleerd door apart de diepteligging van de basis van iedere eenheid te berekenen. In REGIS II worden de top en basis (of top en dikte) van hydrogeologische eenheden berekend binnen de grenzen van de eenheden in DGM. Het modelleren van de diepteligging van de *top* of *basis* (grensvlakken) van een eenheid volgt in beide modellen in hoofdlijnen de volgende stappen:

1. Op basis van de diepteligging van het grensvlak op boorlocaties (G_i) wordt door kriging met een lineair variogram (γ_l) een vrij grof trendvlak bepaald (\hat{T}). Dit trendvlak volgt de regionale trend in het diepteverloop van de hydrogeologische eenheid.
2. Van het verschil tussen grensvlak en trendvlak op de boorlocaties, het residu ($R_i = G_i - \hat{T}_i$), wordt een variogrammodel gemaakt (γ_r). Vervolgens wordt R_i met kriging geïnterpoleerd tot het vlakdekkend grid \hat{R} .
3. Voor de bepaling van de diepteligging van het grensvlak kan nu het residu worden opgeteld bij het trendvlak: $\hat{G} = \hat{R} + \hat{T}$

Bij interpolatie van de *dikte* van hydrogeologische eenheden in REGIS II is het niet nodig eerst te corrigeren voor een regionale trend, en worden de diktes zoals bekend op boorlocaties direct met kriging geïnterpoleerd.

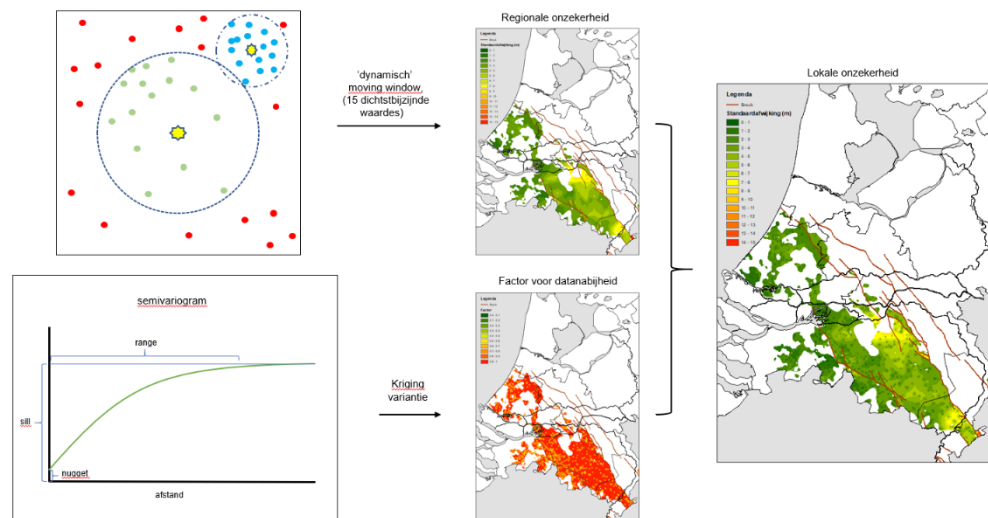
Vanuit de top en basis (of top en dikte) wordt de derde geometrie voor de betreffende eenheid (dikte of basis) afgeleid. Zo ook wordt de onzekerheid van de afgeleide geometrie uit de berekende onzekerheden afgeleid.

Voor DGM is er een methode beschikbaar om de onzekerheid van de berekende grensvlakken te bepalen. Aangezien bij het modelleren van eenheden in DGM niet alleen gebruikt gemaakt wordt van informatie uit boringen, maar er ook aanvullende geologische kennis wordt toegevoegd in de vorm van stuurvlakken, steunpunten, wigpunten, breuklijnen en breuksteunpunten, levert de kriging variantie geen bruikbare maat voor onzekerheid. In Gunnink et al. (2010) wordt een op cross validatie gebaseerde methode van onzekerheidsbepaling beschreven, die is gebruikt in DGM v2.2 (vanaf nu: *methode DGM*).

De methode voor onzekerheidsbepaling zoals ontwikkeld in dit onderzoek wordt in detail beschreven in de rest van dit hoofdstuk. In hoofdlijnen is deze gelijk aan de methode DGM (**dikgedrukte** stappen zijn weergegeven in Figuur 2.1):

1. Met een op cross validatie gebaseerde methode wordt een **regionale onzekerheid** berekend: de onzekerheid van het model 'ver weg' van boorlocaties. Deze berekening wordt toegelicht in paragraaf 2.2.
2. Gebaseerd op het variogram γ_r wordt een **factor voor datanabijheid** bepaald. Dit resulteert in waarden tussen 0 (dicht bij data) en 1 (ver van data). Deze berekening wordt toegelicht in paragraaf 2.3.

3. De **lokale onzekerheid** is vervolgens het product van de regionale onzekerheid en de factor voor datanabijheid (zie paragraaf 2.4).



Figuur 2.1 Stroomschema voor berekening van de lokale onzekerheid uit de regionale onzekerheid en de factor voor datanabijheid, weergegeven voor de top van de hydrogeologische eenheid Stramproy klei 1 (SYk1).

2.2 Regionale onzekerheid

2.2.1 Cross validatie

'[cross validation] can be seen as an experiment in which we mimic the estimation process by pretending that we had never sampled a certain location.' (Isaaks and Srivastava, 1989; p352).

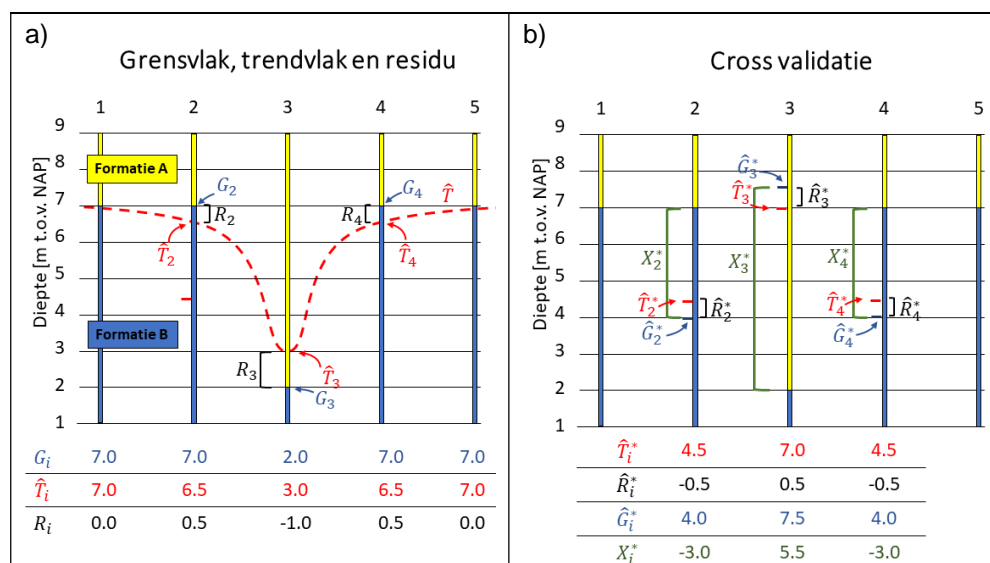
De regionale onzekerheid wordt berekend op basis van cross validatie. Hierbij wordt de waarde berekend van grensvlak \hat{G} op boorlocatie i , zoals die zou zijn berekend indien de betreffende boring er niet zou zijn geweest. Voor de berekening van \hat{G} worden in DGM en REGIS II interpolaties uitgevoerd van G_i en R_i , resulterend in respectievelijk een trendvlak \hat{T} en een vlakdekkend grid van residuele waarden \hat{R} . Beide interpolaties leveren een eigen bijdrage aan de positie van \hat{G} . De cross validatie zal dus zo moeten worden opgezet dat de invloed van beide geïnterpoleerde variabelen wordt meegenomen. Met inachtneming van de beide interpolatie stappen die leiden tot \hat{G} , kan nu een volledige cross validatie worden uitgevoerd:

1. Op basis van G_i wordt cross validatie uitgevoerd door middel van kriging met variogram γ_l . Dit resulteert in cross validatie waarden van het trendvlak op de boorlocaties (\hat{T}_i^*).
2. Op basis van R_i wordt cross validatie uitgevoerd door middel van kriging met variogram γ_r . Dit resulteert in cross validatie waarden van het residu op de boorlocaties (\hat{R}_i^*).
3. De cross validatie waarde voor het grensvlak op boorlocaties volgt dan uit $\hat{G}_i^* = \hat{T}_i^* + \hat{R}_i^*$

Voor de verdere berekening van onzekerheid is het verschil tussen de werkelijke waarde en de met cross validatie voorspelde waarde van het grensvlak relevant:

$$X_i^* = \hat{G}_i^* - G_i$$

De betekenis van de verschillende cross validatie waarden worden in Figuur 2.2 toegelicht aan de hand van een zeer schematisch voorbeeld. Weergegeven zijn vijf fictieve boringen, met daarin voorkomend formaties A en B, waarbij G_3 veel dieper ligt dan het grensvlak in de overige vier boringen. In Figuur 2-2a zijn de dieptes van \hat{T} en \hat{T}_i , en de waarden van R_i , gegeven zoals deze zouden kunnen volgen uit de stappen die leiden tot het grensvlak \hat{G} . Figuur 2.2b geeft \hat{T}_i^* en \hat{R}_i^* weer die volgen uit de twee afzonderlijke cross validaties, de hieruit berekende diepte \hat{G}_i^* , en de waarde voor X_i^* .



Figuur 2.2 Fictief voorbeeld met a) variabelen zoals volgende uit de berekening van \hat{G} , en b) de afzonderlijke cross validatie stappen die leiden tot X_i^* .

De inschatting van \hat{G}_i^* is met de huidige methodiek nog niet perfect. De afwezigheid van het datapunt G_i zou namelijk leiden tot een andere waarde van \hat{T} op de boorlocaties die locatie i omringen, wat weer zou leiden tot een iets andere \hat{R}_i^* . Er is voor gekozen om deze onnauwkeurigheid te accepteren, zodat de berekeningen relatief eenvoudig uitgevoerd kunnen worden met de standaard cross validatie functies die in geostatistische software aanwezig zijn.

2.2.2 Regionale standaardafwijking

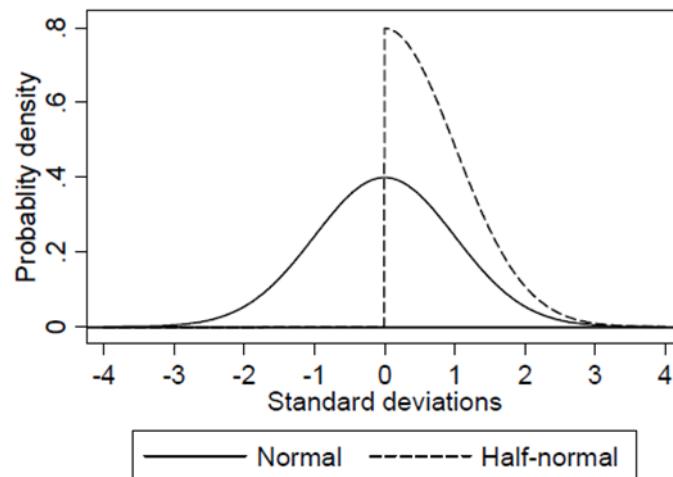
Onzekerheid van \hat{G} wordt uitgedrukt als de standaardafwijking (σ) van een normale verdeling rond \hat{G} . Uit de gevonden waarden van X_i^* in een bepaald gebied kan nu de regionale standaardafwijking (σ_{reg}) worden afgeleid. De kans op een hogere ligging van het grensvlak is even groot als een lagere ligging, dus de normale verdeling van de onzekerheid is gecentreerd rond \hat{G} . De waarden voor X_i^* kunnen dus worden gebruikt voor de berekening van σ_{reg} , zonder dat het gemiddelde \bar{X}_i^* invloed heeft op de positie van de normale verdeling. Rekenkundig is dit het eenvoudigst te implementeren door gebruik te maken van de half-normale verdeling

(zie Figuur 2.3), waarin een vaste relatie bestaat tussen de gemiddelde absolute waarden van de waarnemingen en σ (Bland, 2005). Hiervoor wordt eerst op boorlocaties de mean absolute deviation (MAD) berekend via:

$$MAD = \frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} |X_i^*|$$

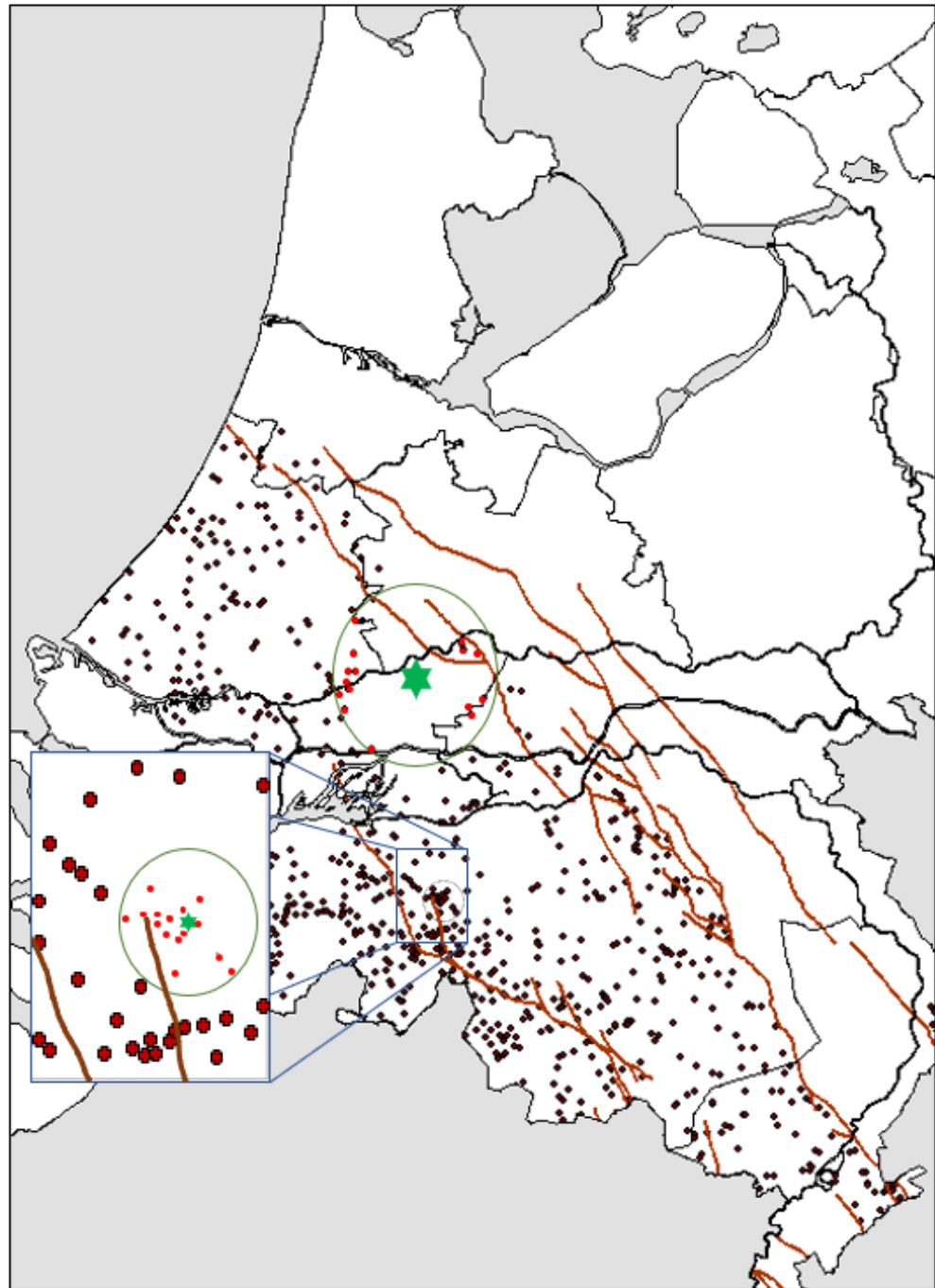
En vervolgens σ_{reg} via:

$$\sigma_{reg} = MAD \sqrt{\frac{\pi}{2}}$$



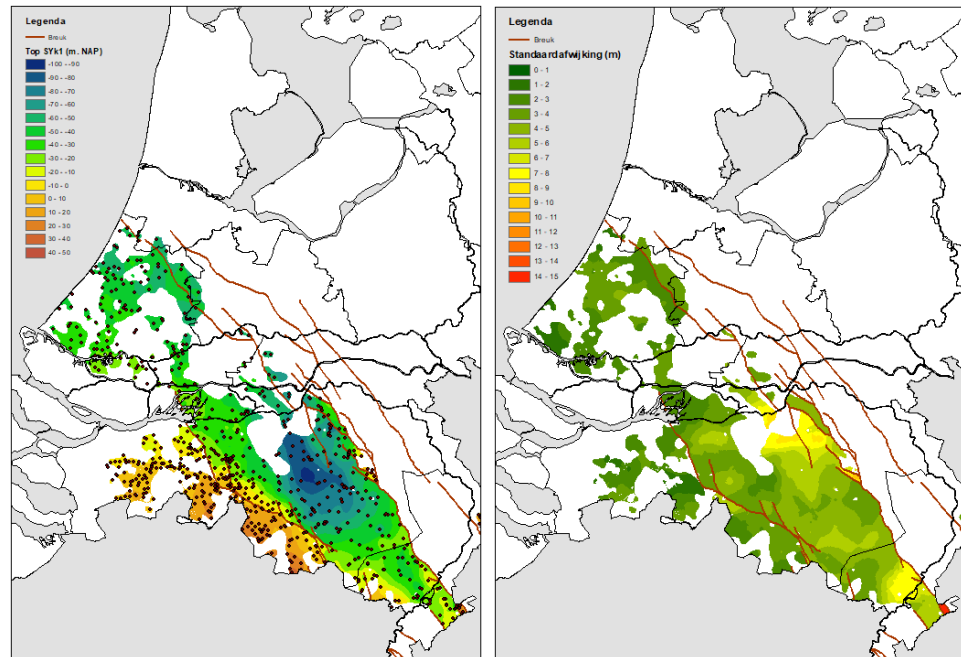
Figuur 2.3 Relatie tussen normale en half-normale verdeling, figuur uit Bland (2005).

Het aantal boorlocaties waarvan X_i^* dat wordt meegenomen is van groot belang voor enerzijds een accurate bepaling van σ_{reg} , anderzijds de variatie in σ_{reg} die lokaal kan worden weergegeven. Er is voor gekozen om de MAD altijd in te schatten aan de hand van 15 dichtstbijzijnde waarden, een getal dat nader wordt onderbouwd in bijlage 1 van Dabekaussen en Hummelman (2018). Door te kiezen voor een neighbourhood met weinig punten kan er meer detail worden aangebracht in de inschatting van onzekerheid in data-dichte gebieden vergeleken met data-arme gebieden (zie Figuur 2.4).



Figuur 2.4 De boorlocaties waar X_i^* wordt meegenomen voor de bepaling van de σ_{reg} in een data-arm gebied (rivieren gebied) en een data-rijk gebied (midden Brabant) voor de top van de hydrogeologische eenheid SYk1. <ster> is locatie waar σ_{reg} wordt bepaald, de 15 dichtstbijzijnde boorlocaties in <rood>.

Een vlakdekkende regionale standaardafwijking ($\hat{\sigma}_{reg}$) wordt vervolgens verkregen door kriging met een variogram γ_l van de ingeschatte σ_{reg} op de boorlocaties. Voor de hydrogeologische eenheid SYk1 zijn de diepteligging van de top en de $\hat{\sigma}_{reg}$ gegeven in Figuur 2.5.



Figuur 2.5 De top van de hydrogeologische eenheid SYK1 met links de boringen en diepteligging zoals in REGIS II v2.2, en rechts de regionale standaardafwijking ($\hat{\sigma}_{reg}$).

2.3 Datanabijheid

Hoe dicht er bij een boorlocatie, hoe kleiner de onzekerheid over de diepteligging van een grensvlak wordt. De ruimtelijke correlatie van R_i is in DGM en REGIS II vastgelegd in het variogram γ_r . De kriging variantie ($\hat{\sigma}_{SK}^2$) die wordt berekend bij de interpolatie van R_i kan nu worden gebruikt als maat voor de datanabijheid, aangezien de grootte van $\hat{\sigma}_{SK}^2$ afhankelijk is van de configuratie van de data rond de te schatten locatie. Een genormaliseerde kriging standaarddeviatie ($\hat{\sigma}_{norm}$), met waarden tussen 0 (dicht bij data) en 1 (ver van data), kan nu worden berekend door normalisatie van $\hat{\sigma}_{SK}^2$ (naar Cressie, 1993):

$$\hat{\sigma}_{norm} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i^{SK} \gamma_r(d_{0i})}{\hat{s}_r}} = \sqrt{\frac{\hat{\sigma}_{SK}^2}{\hat{s}_r}}$$

Waarin

λ_i^{SK} de gewichten toegekend aan individuele datapunten met simple kriging $\gamma_r(d_{0i})$ variogram waarde van een datapunt t.o.v. de te schatten locatie \hat{s}_r de sill van γ_r

De $\hat{\sigma}_{norm}$ wordt bepaald met simple kriging (SK) i.p.v. ordinary kriging (OK) waarmee interpolatie van de geometrie standaard wordt uitgevoerd. De $\hat{\sigma}_{OK}^2$ kan een hogere waarde aannemen dan \hat{s}_r indien er geen data beschikbaar is binnen de range van $\gamma_r(r_r)$, terwijl de maximaal mogelijke $\hat{\sigma}_{SK}^2$ altijd gelijk aan \hat{s}_r . Als er data aanwezig is binnen en afstand r_r is $\hat{\sigma}_{SK}^2$ vrijwel gelijk aan $\hat{\sigma}_{OK}^2$. Door de vaste (en bekende) maximale waarde van $\hat{\sigma}_{SK}^2$ is $\hat{\sigma}_{SK}^2$ eenvoudiger te normaliseren dan $\hat{\sigma}_{OK}^2$.

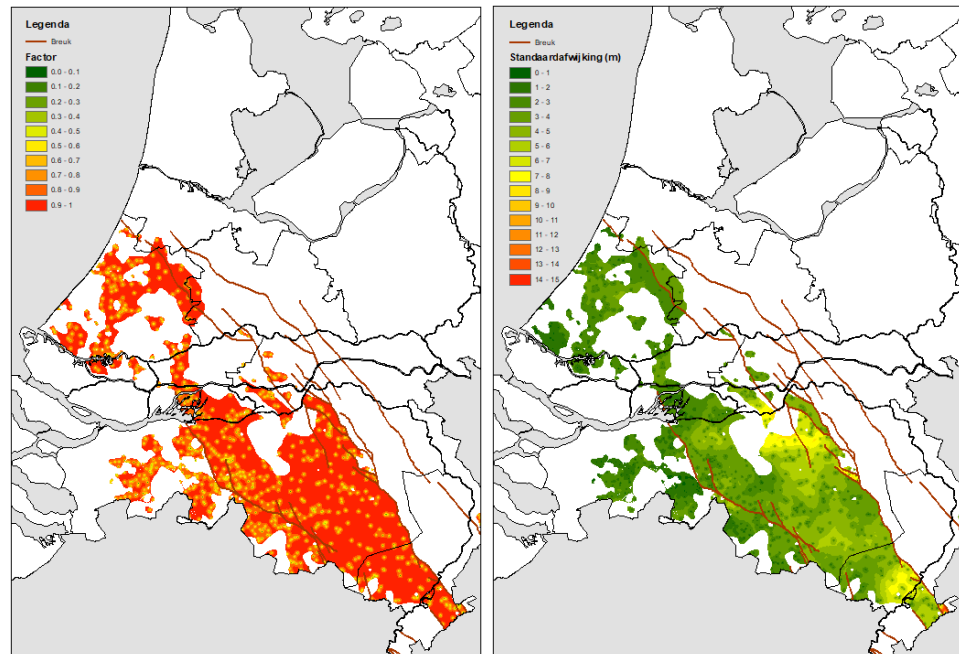
Voor de top van de hydrogeologische eenheid SYK1 is $\hat{\sigma}_{norm}$ gegeven in Figuur (links).

2.4 Lokale onzekerheid

De lokale onzekerheid ($\hat{\sigma}_{loc}$) wordt nu berekend door:

$$\hat{\sigma}_{loc} = \hat{\sigma}_{reg} * \hat{\sigma}_{norm}$$

Voor de top van de hydrogeologische eenheid SYK1 is $\hat{\sigma}_{loc}$ gegeven in Figuur 2.6 (rechts).



Figuur 2.6 Top SYK1; genormaliseerde kriging standaardafwijking (links), lokale standaardafwijking (rechts).

2.5 Afleiden standaard deviatie uit de twee berekende standaard deviaties

Zoals al in voorgaande is gesteld, wordt voor iedere eenheid een onzekerheid in de vorm van een standaard deviatie van de top en dikte, of van top en basis berekend. De derde standaard deviatie (basis of dikte) wordt hieruit als volgt afgeleid:

$$\hat{\sigma}_{loc3} = \sqrt{((\hat{\sigma}_{loc1})^2 + (\hat{\sigma}_{loc2})^2 - (2 \times \hat{\sigma}_{loc1} \times \hat{\sigma}_{loc2} \times \rho_{12}))}$$

$\hat{\sigma}_{loc3}$ = afgeleide lokale standaard deviatie

$\hat{\sigma}_{loc1}$ = berekende lokale standaard deviatie

$\hat{\sigma}_{loc2}$ = berekende lokale standaard deviatie

ρ_{12} = correlatie factor

In een heel enkel geval wordt een standaard deviatie voor de top afgeleid uit een berekende standaard deviatie van de dikte en de basis. In die gevallen wordt de afgeleide standaard deviatie berekend volgens:

$$\hat{\sigma}_{loc3} = \sqrt{((\hat{\sigma}_{loc1})^2 + (\hat{\sigma}_{loc2})^2 + (2 \times \hat{\sigma}_{loc1} \times \hat{\sigma}_{loc2} \times \rho_{12}))}$$

Op basis van de twee berekenende geometrieën (top en dikte of top en basis) wordt voor iedere rastercel een correlatiefactor berekend volgens de Karl Pearson methode, waarbij alleen rekening wordt gehouden met berekende rastercelwaarden die binnen een 'moving window' liggen. De grootte van dit 'moving window' bedraagt voor iedere modeleenheid binnen REGIS II 50 x 50 rastercellen. De grootte van het 'moving window' is daarmee gelijk aan die gebruikt is in DGM v2.2. Mogelijk kunnen betere resultaten worden verkregen als voor elke modeleenheid afzonderlijk de grootte van het 'moving window' wordt afgestemd op de dataconfiguratie van de betreffende eenheid.

2.6 Belangrijkste verschillen met DGM

De methodiek van onzekerheidsbepaling van Dabekaussen en Hummelman (2018) wijkt op een aantal punten af van de methode DGM (Gunnink et al., 2010). Hierbij is vooral aandacht geweest voor de berekening van onzekerheid in data-arme gebieden, het vinden van een meer realistische grootte van de onzekerheid, en het vervangen van harde grenzen gestuurd door het gebruikte moving window naar geologisch verklaarbare overgangen in onzekerheid. Een overzicht van de aanpassingen is gegeven in Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Verandering in onzekerheidsbepaling tussen de methode DGM en de werkwijze uit dit onderzoek.

Onzekerheidsbepaling DGM	Onzekerheidsbepaling REGIS II	Gevolg
<i>Regionale onzekerheid ($\hat{\sigma}_{reg}$)</i>		
Cross validatie enkel van R_i	Cross validatie van \hat{T}_i én R_i	Een realistischer (vaak hogere) onzekerheid
Bepaling $\hat{\sigma}_{reg}$ in moving window, grootte van window gespecificeerd per formatie	Bepaling σ_{reg} eerst alleen op boorlocaties, op basis van X_i^* van 15 dichtstbijzijnde boringen.	Onzekerheidsbepaling mogelijk in gebieden met lage datadichtheid, en gedetailleerd beeld in gebieden met hoge datadichtheid.
	Interpolatie van σ_{reg} op boorlocaties naar $\hat{\sigma}_{reg}$.	Vloeiende overgang tussen gebieden met verschillende onzekerheid, in plaats van harde grenzen gestuurd door het moving window.
Directe bepaling $\hat{\sigma}_{reg}$ uit X_i^*	σ_{reg} via half-normale verdeling uit $ X_i^* $	Betere bepaling $\hat{\sigma}_{reg}$ op basis van kleine set boringen
<i>Genormaliseerde kriging standaardafwijking ($\hat{\sigma}_{norm}$), bepaald met:</i>		
ordinary kriging	simple kriging	Realistischer (grotere) verlaging van $\hat{\sigma}_{loc}$ dicht bij boorlocaties.
Genormaliseerd variogram ($\gamma_{norm} = \frac{\gamma_r}{s_r}$)	'Gewoon' variogram (γ_r) zonder nugget	

Punt kriging op gridcel middens	Block kriging	
uitkomst afgekapt op 1	Genormaliseerd naar \hat{s}_r	

Een ander verschil met DGM is dat in REGIS II de invloed van breuken wel is meegenomen. In de verschillende interpolaties fungeren de breuken als barrières die voorkomen dat data aan weerszijden van de breuk met elkaar in verband worden gebracht.

3 Toepassing op gekarteerde eenheden in REGIS II

3.1 Algemene toepassing van de berekeningswijze

De in hoofdstuk 2 beschreven methode is toegepast op de top, de basis en/of de dikte van de gekarteerde eenheden in REGIS II (Tabel 3.1, kolom 'Modeleenheid'). Het is daarbij niet nodig om alle drie expliciet te berekenen, het volstaat om de onzekerheid van top en dikte te berekenen en de basis daaruit af te leiden. Een alternatief is het berekenen van de onzekerheid van top en basis en de dikte daaruit af te leiden. In Tabel 3.1 (kolom 'Berekeningswijze') is de berekeningswijze aangegeven.

3.2 Uitzonderingen

In een aantal gevallen valt de top of de basis van een gekarteerde eenheid geheel samen met de top of basis van de lithostratigrafische eenheid in DGM. In die gevallen is de onzekerheid niet opnieuw berekend, maar overgenomen van DGM. In de meeste gevallen geldt dat de onzekerheid van DGM eenheden kleiner is dan die van REGIS II eenheden, omdat er in DGM over het algemeen meer boringen zijn gebruikt. Zo komt het in enkele gevallen voor dat de basis van een REGIS II eenheid een kleinere onzekerheid heeft dan de top, als de basis is overgenomen uit DGM.

Verder is in een aantal gevallen de top of basis van een gekarteerde eenheid in belangrijke mate gebaseerd op de top of basis van de lithostratigrafische eenheid in DGM. Top en basis van DGM fungeren dan als 'stuurvlak'. Voor deze eenheden geldt dat de onzekerheid daarom mede afhangt van de kwaliteit van het stuurvlak. De onzekerheid van het stuurvlak is echter niet verdisconteerd in de berekende onzekerheidsinformatie. In vlakken waarbij een stuurvlak gebruikt wordt ontbreekt de regionale onzekerheid en is er alleen sprake van lokale onzekerheid o.b.v. residuen. Daarmee is de onzekerheid enkel een minimale waarde.

De uitzonderingen zijn per eenheid zij opgenomen in Tabel 3.1, kolom 'relatie met DGM v2.2' en 'Overige bijzonderheden'. Tevens zijn de uitzonderingen per gekarteerde eenheid hieronder kort beschreven.

Tabel 3.1 Gekarteerde eenheden in REGIS II met de berekeningswijze van de onzekerheid.

Modeleenheid	Berekeningswijze			Relatie met DGM v2.2	Overige bijzonderheden
	T	D	B		
HLc	.	.	.	De top en basis zijn gelijk aan de geologische eenheid	
BXSck1	x	x	o		
BXLMk1	x	x	o		
BXk1	x	x	o		
BXk2	x	x	o		
KRWYk1	.	o	x	De top is gelijk aan de geologische eenheid	
KRk1	x	x	o		
KRZUk1	x	x	o		

Modeleenheid	Berekeningswijze			Relatie met DGM v2.2	Overige bijzonderheden
KRTWk1	x	o	x		De geologische basis is gebruikt als stuurvlak voor de geometrie
BEROk1	x	x	o		
BEk1	x	x	o		
BEk2	x	x	o		
WBv1	.	.	.	De top en basis zijn gelijk aan de geologische eenheid	
EEk1	x	x	o		
EEk2	x	o	x		De geologische basis is gebruikt als stuurvlak voor de geometrie
DRUIk1	x	o	x		
DRGk1	x	o	x		De geologische basis is gebruikt als stuurvlak voor de geometrie
DRGIk2	o	x	.	De basis is gelijk aan de geologische eenheid	
DTc	.	.	.	De top en basis zijn gelijk aan de geologische eenheid	
URk1	x	x	o		
URk2	x	x	o		
URk3	x	x	o		
PEk1	x	o	x		
PEk2	x	o	x		
STk1	x	x	o		
SYk1	x	x	o		
SYk2	x	x	o		
SYk3	x	x	o		
WAK1	x	x	o		De geologische top is gebruikt als stuurvlak voor de geometrie
WAK2	x	x	o		
WAK3	x	x	o		
PZk1	x	x	o		
PZc	x	x	o		
MSk1	x	x	o		De geologische top is gebruikt als stuurvlak voor de geometrie
MSk2	x	x	o		
MSc	x	x	o		
KIk1	x	x	o		
KIk2	x	x	o		
KIk3	x	x	o		
KIk4	x	x	o		
OOk1	x	x	o		
OOc	x	o	.	De basis is gelijk aan de geologische eenheid	
IEk1	x	x	o		
IEk2	x	x	o		
BRk1	x	o	.	De basis is gelijk aan de geologische eenheid	
Vlb1	x	x	o		
Vlb2	x	x	o		
RUBOk1	x	x	o		

Modeleenheid	Berekenings-			Relatie met DGM v2.2	Overige bijzonderheden
	wijze				
RUK1	x	x	o		
RUK2	x	x	o		
TOGOk1	x	x	o		
TOZEWak1	x	o	x		
DOAsk1	.	x	o	De top is gelijk aan de geologische eenheid	
DOK1	.	o	.	De top en basis zijn gelijk aan de geologische eenheid	
DOEIk1	x	o	.	De basis is gelijk aan de geologische eenheid	
LAc	.	.	.	De top en basis zijn gelijk aan de geologische eenheid	
HTc	.	.	.	De top en basis zijn gelijk aan de geologische eenheid	
HOq	.	.	.	De top en basis zijn gelijk aan de geologische eenheid	
MTq	.	.	.	De top en basis zijn gelijk aan de geologische eenheid	
GUq	.	.	.	De top en basis zijn gelijk aan de geologische eenheid	
VAc	.	.	.	De top en basis zijn gelijk aan de geologische eenheid	
AKc	.	.	.	De top en basis zijn gelijk aan de geologische eenheid	

Modeleenheden	
BX	Lithostratigrafische eenheid van DGM waartoe de hydrogeologische eenheid behoort
k	Kleiige hydrogeologische eenheid, overwegend bestaande uit klei, zandige klei en/of kleiig zand of leem.
c	Complexe hydrogeologische eenheid, bestaande uit een afwisseling van zandige, kleiige en organogene afzettingen.
v	Venige hydrogeologische eenheid, overwegend bestaande uit veen en/of bruinkool en andere organogene afzettingen.
b	Hydrogeologische bruinkool eenheid, overwegend bestaande uit bruinkool.
q	Hydrologische kalksteeneenheid, overwegend bestaande uit kalksteen, al dan niet afgewisseld met vuursteenbanken.
1	Volgnummer van de eenheid indien er meerdere eenheden van dezelfde lithologische karakteristiek binnen de lithostratigrafische eenheid zijn. De hoogstgelegen eenheid heeft het laagste nummer.

Berekeningswijze onzekerheid	
x	berekend
.	overgenomen van DGM v2.2
o	afgeleid uit de andere twee geometrieën

3.2.1 *Holoceen complex (HLc)*

De eenheid HLc is exact gelijk aan de lithostratigrafische eenheid HL uit DGM v2.2, de betrouwbaarheden voor top, dikte en basis zijn daarom overgenomen. De top van de lithostratigrafische eenheid HL wordt volledig bepaald door het maaiveld, voor de basis is gebruik gemaakt van een stuurvlak.

3.2.2 *Boxtel-Schimmert (BXSCk1)*

De top van de lithostratigrafische eenheid Boxtel (BX) uit DGM v2.2 is gebruikt als stuurvlak voor de top van BXSCk1. De top van BX is op zijn beurt weer afgeleid van het maaiveld. De top van zowel BX en BXSCk1 hebben hierdoor een relatief lage onzekerheid. De basis van de lithostratigrafische eenheid Boxtel (BX) uit DGM v2.2 is gebruikt als stuurvlak voor de basis van BXSCk1.

3.2.3 *Kreftenheye-Wychen klei 1 (KRWYk1)*

In het voorkomingsgebied van de hydrogeologische eenheid KRWYk1 is de top exact gelijk aan de top van de geologische eenheid Kreftenheye (KR). De betrouwbaarheid van de top is daarom rechtstreeks overgenomen uit DGM v2.2. De betrouwbaarheid van de dikte is afgeleid uit de top en basis.

3.2.4 *Kreftenheye-Twello klei 1 (KRTWk1)*

De basis van de lithostratigrafische eenheid Kreftenheye (KR) uit DGM v2.2 is gebruikt als stuurvlak voor de basis van KRTWk1. Binnen het voorkomingsgebied van KRTWk1 is voor de lithostratigrafische basis zelf ook een stuurvlak gebruikt.

3.2.5 *Beegden klei 1 (BEk1)*

De top van de lithostratigrafische eenheid Beegden (BE) uit DGM v2.2 is gebruikt als stuurvlak voor de top van BEk1.

3.2.6 *Woudenberg veen 1 (WBv1)*

De eenheid WBv1 is exact gelijk aan de lithostratigrafische eenheid WB uit DGM v2.2, de betrouwbaarheden voor top, dikte en basis zijn daarom overgenomen.

3.2.7 *Eem klei 2 (EEK2)*

De basis van de lithostratigrafische eenheid Eem (EE) uit DGM v2.2 is gebruikt als stuurvlak voor de basis van EEK2. Binnen het voorkomingsgebied van EEK2 is voor de lithostratigrafische basis ook een stuurvlak gebruikt.

3.2.8 *Drente-Gieten klei 1 (DRG1k1)*

De basis van de lithostratigrafische eenheid Drente (DR) uit DGM v2.2 is gebruikt als stuurvlak voor de basis van DRG1k1. Binnen het voorkomingsgebied van DRG1k1 is voor de lithostratigrafische basis ook een stuurvlak gebruikt.

3.2.9 *Drente-Gieten klei 2 (DRG1k2)*

Binnen het voorkomingsgebied van de eenheid DRG1k2 is de basis exact gelijk aan de basis van de lithostratigrafische eenheid Drente (DR), de betrouwbaarheid van de basis is overgenomen uit DGM v2.2. Voor de lithostratigrafische basis is ook een stuurvlak gebruikt. Dit is de enige eenheid waarbij de top wordt afgeleid uit de basis en de dikte.

- 3.2.10 *Gestuwde eenheden complex (DTc)*
De eenheid DTc is exact gelijk aan de lithostratigrafische eenheid DT uit DGM v2.2, de betrouwbaarheden voor top, dikte en basis zijn daarom overgenomen. Voor zowel top als basis van de lithostratigrafische eenheid DT wordt gebruik gemaakt van een stuurvlak.
- 3.2.11 *Peelo klei 2 (PEk2)*
De eenheid PEk2 (en in mindere mate ook PEk1) ligt hoofdzakelijk in de diepe V-vormige insnijdingen van de lithostratigrafische eenheid PE uit DGM v2.2. Doordat de berekende kleilagen consistent worden gemaakt kan de geometrie voor een deel afkomstig zijn van de bijbehorende lithostratigrafische eenheid. Door de vorm van de insnijdingen (naar beneden toe smaller) wordt de basis van de kleilaag voor een groot deel bepaald door eenheid PE, voor de top is dit veel minder het geval. Door de relatief hogere betrouwbaarheid van de lithostratigrafische basis heeft de basis van de kleilaag een hogere betrouwbaarheid dan de top.
- 3.2.12 *Stramproy klei 1 (SYk1)*
De top van de lithostratigrafische eenheid Stramproy (SY) uit DGM v2.2 is gebruikt als stuurvlak voor de top van SYk1.
- 3.2.13 *Waalre klei 1 (WAK1)*
De top van de lithostratigrafische eenheid Peize-Waalre (PZWA) uit DGM v2.2 is gebruikt als stuurvlak voor de top van WAK1.
- 3.2.14 *Maassluis klei 1 (MSk1)*
De top van de lithostratigrafische eenheid Maassluis (MS) uit DGM v2.2 is gebruikt als stuurvlak voor de top van MSk1.
- 3.2.15 *Maassluis complex (MSc)*
De basis van de lithostratigrafische eenheid Maassluis (MS) uit DGM v2.2 is gebruikt als stuurvlak voor de basis van MSc.
- 3.2.16 *Kiezeloöliet klei 1 (KIk1)*
De top van de lithostratigrafische eenheid Kiezeloöliet (KI) uit DGM v2.2 is gebruikt als stuurvlak voor de top van KIk1.
- 3.2.17 *Oosterhout klei 1 (OOK1)*
De top van de lithostratigrafische eenheid Oosterhout (OO) uit DGM v2.2 is gebruikt als stuurvlak voor de top van OOK1.
- 3.2.18 *Oosterhout complex (OOc)*
Binnen het voorkomingsgebied van de eenheid OOc is de basis exact gelijk aan de basis van de lithostratigrafische eenheid Oosterhout (OO), de betrouwbaarheid van de basis is overgenomen uit DGM v2.2. Omdat de geologische basis is berekend op basis van meer boringen, heeft de basis van OOc een relatief grotere betrouwbaarheid dan de top.
- 3.2.19 *Inden klei 1 (IEk1)*
De top van de lithostratigrafische eenheid Inden (IE) uit DGM v2.2 is gebruikt als stuurvlak voor de top van IEk1.

- 3.2.20 *Breda klei 1 (BRk1)*
Binnen het voorkomingsgebied van de eenheid BRk1 is de basis exact gelijk aan de basis van de lithostratigrafische eenheid Breda (BR), de betrouwbaarheid van de basis is overgenomen uit DGM v2.2. Voor het berekenen van de lithostratigrafische basis is ook een stuurvlak gebruikt.
- 3.2.21 *Rupel-Boom klei 1 (RUBOk1)*
Zowel de top als basis van de lithostratigrafische eenheid Rupel (RU) uit DGM v2.2 zijn gebruikt als stuurvlak voor de top en basis van RUBOk1.
- 3.2.22 *Rupel klei 1 (RUK1)*
Zowel de top als basis van de lithostratigrafische eenheid Rupel (RU) uit DGM v2.2 zijn gebruikt als stuurvlak voor de top en basis van RUK1.
- 3.2.23 *Tongeren-Goudsberg klei 1 (TOGOk1)*
De top van de lithostratigrafische eenheid Tongeren (TO) uit DGM v2.2 is gebruikt als stuurvlak voor de top van TOGOk1.
- 3.2.24 *Tongeren-Zelzate-Watervliet klei 1 (TOZEWak1)*
De top van de lithostratigrafische eenheid Tongeren (TO) uit DGM v2.2 is gebruikt als stuurvlak voor de top van TOZEWak1.
- 3.2.25 *Dongen-Asse klei 1 (DOASk1)*
Binnen het voorkomingsgebied van de eenheid DOASk1 is de top exact gelijk aan de top van de lithostratigrafische eenheid Dongen (DO), de betrouwbaarheid van de top is overgenomen uit DGM v2.2. De eenheid wordt niet landelijk gekarteerd.
- 3.2.26 *Dongen klei 1 (DOK1)*
Binnen het voorkomingsgebied van de eenheid DOK1 zijn zowel de top als de basis exact gelijk aan de lithostratigrafische eenheid Dongen (DO), de betrouwbaarheid van de top en basis zijn overgenomen uit DGM v2.2. De eenheid wordt niet landelijk gekarteerd.
- 3.2.27 *Dongen-leper klei 1 (DOIEk1)*
Binnen het voorkomingsgebied van de eenheid DOIEk1 is de basis exact gelijk aan de basis van de lithostratigrafische eenheid Dongen (DO), de betrouwbaarheid van de basis is overgenomen uit DGM v2.2. Omdat de geologische basis is berekend op basis van meer boringen, heeft de basis van DOIEk1 een relatief grotere betrouwbaarheid dan de top.
- 3.2.28 *Oudere eenheden (LAc, HTc, HOq, MTq, GUq, VAc, AKc)*
De oudste gekarteerde eenheden LAc, HTc, HOq, MTq, GUq, VAc, AKc zijn allemaal exact gelijk aan hun corresponderende lithostratigrafische eenheden uit DGM v2.2. De betrouwbaarheden voor toppen, diktes en basissen zijn overgenomen.

4 Nieuwe en gewijzigde bestanden

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de nieuwe bestanden met onzekerheidsinformatie die in de ZIP-file van het BRO model REGIS II versie 2.2.1 zijn opgenomen. Bij de overige bestanden is aangegeven of ze ten opzichte van de voorgaande versie 2.2 gewijzigd zijn.

De ZIP-file kent de volgende hoofdcomponenten:

- Basisgegevens;
- Lagenmodel.

4.1 Basisgegevens

4.1.1 Model, modelgebied en modelsamenstelling

De actuele versie van het BRO-model REGIS II is gewijzigd van 2.2 naar 2.2.1. De actuele versie van het modelgebied Nederland is eveneens gewijzigd van 2.2 naar 2.2.1.

4.1.2 Boringen, boorbeschrijvingen en interpretaties

Geen wijzigingen.

4.1.3 Referentielijsten

Geen wijzigingen.

4.2 Lagenmodel

4.2.1 Raster bestanden

xxxx-t-c.img	(top hydrogeologische eenheid)	Ongewijzigd
xxxx-d-c.img	(dikte hydrogeologische eenheid)	Ongewijzigd
xxxx-b-c.img	(basis hydrogeologische eenheid)	Ongewijzigd
xxxx-t-c-ql.img	(standaard deviatie top in meters)	Nieuw
xxxx-d-c-ql.img	(standaard deviatie dikte in meters)	Nieuw
xxxx-b-c-ql.img	(standaard deviatie basis in meters)	Nieuw
xxxx-kh-s.img	(horizontale doorlatendheid)	Ongewijzigd
xxxx-sdh.img	(standaard deviatie horizontale doorlatendheid)	Ongewijzigd
xxxx-kd-verz.img	(transmissiviteit)	Ongewijzigd
xxxx-kv-s.img	(verticale doorlatendheid)	Ongewijzigd
xxxx-sdv.img	(standaard deviatie verticale doorlatendheid)	Ongewijzigd
xxxx-c.img	(weerstand)	Ongewijzigd
mv_regis_v02r2.img	(Maaiveld en waterbodemoogte)	Ongewijzigd
freatisch.img	(Freatsch vlak)	Ongewijzigd

4.2.2 Layer bestanden

PDOK BRT achtergrondkaart (xxxx.lyr) Ongewijzigd

4.2.3 Punt en lijn bestanden

xxxx_boring_aanwezig.shp	Ongewijzigd
xxxx_boring_afwezig.shp	Ongewijzigd
xxxx_boring_parameters.shp	Ongewijzigd
xxxx_breuk.shp	Ongewijzigd

xxxx_karteergebied.shp
kaartbladen

Ongewijzigd
Ongewijzigd

5 Literatuuropgave

Bland, J. M., 2005. The Half-Normal distribution method for measurement error: two case studies. Unpublished talk, available on <http://www-users.york.ac.uk/~mb55/talks/halfnor.pdf>

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

Gunnink, J., Maljers, D. & Hummelman, J., 2010. Quantifying uncertainty of geological 3D layer models, constructed with a-priori geological expertise. 14th Annual Conference of the International Association for Mathematical Geosciences, IAMG 2010, 29 August 2010 through 2 September 2010, Budapest.

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

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

Isaaks, E.H. & Srivastava, R.M., 1989. An Introduction to Applied Geostatistics. Oxford University Press, New York, 561 pp.

6 Ondertekening

Utrecht, november 2022

TNO

Naam en paraaf tweede lezer

Drs. J.T. Buma

Ondertekening

Autorisatie vrijgave

Drs. Ing. R. Reindersma
Auteur

Drs. D. Maljers
Research Manager