

Earth, Life & Social SciencesPrincetonlaan 6
3584 CB Utrecht
Postbus 80015
3508 TA Utrechtwww.tno.nl

T +31 88 866 42 56

F +31 88 866 44 75

TNO-rapport**TNO 2015 R10685****Vervaardiging digitale paleo-hoogtemodellen**

Datum	19 november 2015
Auteur(s)	Roula Dambrink Jan Stafleu Jeroen Schokker Kim Cohen Kay Koster
Exemplaarnummer	
Oplage	
Aantal pagina's	24 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	
Opdrachtgever	RCE
Projectnaam	RCE Paleo-hoogtemodellen
Projectnummer	060.12484

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.

© 2015 TNO

Inhoudsopgave

1	Introductie	3
2	Basisbestanden	4
2.1	GeoTOP.....	5
2.2	Paleogroundwaterspiegels	7
2.3	Selecties uit de landschapskaarten T1, T2, T3	9
2.4	Gebiedsgrens	10
2.5	Niet verwerkte bestanden	10
2.6	Eigenaarschap basisbestanden	111
3	Modelleermethode.....	122
4	Beperkingen en suggesties.....	144
4.1	Beperkingen van de paleo-hoogtemodellen	144
4.2	Aansluiting van hoogtemodellen en landschapskaarten	166
5	Ondertekening	18
6	Literatuur	19
7	Bijlagen T0, Top T1, Top T2 en Top T3.....	21

1 Introductie

In het kader van de evaluatie van de Malta wetgeving is binnen de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed (RCE) het programma Kenniskaart Archeologie opgezet. Eén van de onderwerpen binnen dit programma is het maken van tools voor archeologische verwachtingskaarten waarin waar mogelijk een specificering wordt gegeven naar archeologische periode en verwachte diepteligging van de archeologische resten.

In twee parallelle opdrachten vanuit de RCE zijn door TNO – Geologische Dienst Nederland (TNO-GDN) paleo-hoogtemodellen berekend (opdracht RCE-10A) en door Deltares landschapskaarten gegenereerd (opdracht RCE-10B). Deze dataproducten zullen als onderdeel van de tools voor archeologische verwachtingskaarten worden ondergebracht en geïntegreerd in een landelijk digitaal portaal van de RCE.

Binnen het programma Kenniskaart zijn vier tijdsneden gespecificeerd waarvoor hoogtemodellen en archeologische landschapskaarten worden gegenereerd. De vier tijdsneden omvatten de periode van het Laat Paleolithicum tot de Moderne Tijd. De tijdsneden zijn: T1: 12.000-3400 v. Chr., T2: 3400-1500 v. Chr., T3: 1500 v. Chr. tot 900 n. Chr. en T4: 900 n. Chr. tot heden. Het begin van tijdsnede T1 omvat de landschapstoestand op de overgang van het Pleistoceen naar het Holoceen (12.000 - 9.000 v. Chr.). In de delen van Nederland die door Holocene afzettingen bedekt zijn, bevinden de landschappen van de begintoestand T0 en uit de tijdsneden T1, T2 en T3 zich grotendeels in de ondergrond. Daarom worden voor deze tijdsneden naast landschapskaarten ook paleo-hoogtemodellen berekend voor het einde van elke tijdsnede. De T0 komt overeen met het Top Pleistoceen niveau in GeoTOP.

Voor de paleo-hoogtemodellen is het 3D ondergrondmodel GeoTOP gebruikt (Stafleu et al., 2012), aangevuld met basisbestanden van Deltares en de Universiteit Utrecht. De ontwikkelde methode is zodanig opgezet dat indien basisbestanden wijzigen met weinig moeite nieuwe paleo-hoogtemodellen gegenereerd kunnen worden. De gebruikte basisbestanden, ontwikkelde methode en beperkingen van de paleo-hoogtemodellen worden in dit deelrapport beschreven. De eindproducten zijn ter illustratie toegevoegd als bijlage en worden daarnaast digitaal opgeleverd.

Als onderdeel van project RCE-10B (Deltares) wordt voor T0 en voor tijdsneden T1, T2 en T3 in kaart gebracht waar welke landschapseenheden aanwezig en/of (deels) geërodeerd zijn. De landschapseenheden van tijdsnede T4 volgen uit geomorfologische oppervlaktekarteringen en worden voor dit project door RCE zelf in kaart gebracht ("de archeologische landschappenkaart"). Meer achtergrond over het kader en de opzet van het project, en over de samenhang tussen de producten uit de twee opdrachten RCE-10A en RCE-10B, is te lezen in het gezamenlijke opleggerrapport en het geïntegreerd plan van aanpak (bijlage 3).

2 Basisbestanden

De paleo-hoogtemodellen voor T1, T2 en T3 zijn het resultaat van een combinatie van bestanden die zijn ontwikkeld en worden bijgehouden bij TNO-GDN, de Universiteit Utrecht en Deltares. In tabel 1 worden alle gebruikte basisbestanden vermeld. De bestanden zijn deelelementen uit ondergrondmodellen of berekeningen gebaseerd op modellen (zie 1^e kolom). Indien een nieuwe versie van de paleo-hoogtemodellen gewenst is, worden deze regelmatig herziene bestanden opnieuw geselecteerd of aangeleverd. In deze paragraaf wordt meer achtergrondinformatie gegeven over de basisbestanden.

Bron	Bestand	Aanpassingen
GeoTOP (TNO-GDN)	Top Fm v. Nieuwkoop, Basisveen Laag	
	Top Fm v. Naaldwijk, Lp v. Wormer	
	Top Fm v. Nieuwkoop, Hollandveen Lp	
	Basis Fm v. Naaldwijk, Lp v. Walcheren	
	Top Fm v. Naaldwijk, Lp v. Zandvoort	
	Top beddinggordelzand (‘geulen’) per generatie, met 0.5 meter verhoogd	Indeling in generaties ‘GeoTOP’ aangepast naar tijdsnedes T1-T3
	Huidig maaiveld (‘mv’)	GeoTOP vlak aangevuld met DGM maaiveld.
	Top Pleistoceen (‘toppl’)	GeoTOP vlak aangevuld met landsdekkend stuurvlak (zie par. 2.1).
Grondwaterspiegel- vlakken (UU-TNO)	GW-spiegel 900 n. Chr. (gw1000)	Dekking uitgebreid van het door 3DVEEN (onderzoek Koster) gedekte gebied, tot ‘heel Holoceen Nederland’ (zie par. 2.2).
	GW-spiegel 1500 v. Chr. (gw3400)	
	GW-spiegel 3400 v. Chr. (gw5400)	
	GW-spiegel 8800 v. Chr. (gw10800)	
Erosiemaskers (RCE-10B)	Erosiegrids T1, T2,T3, Maskergrids strandwallen T1, T2	Vergrid naar 100x100 m
Gebiedsbegrenzing (RCE)	Gebiedsgrens, incl. ‘buitenwater’	Vergrid naar 100x100 m

Tabel 1: Overzicht gebruikte bestanden. Fm is formatie en Lp is laagpakket, alle GeoTOP- en Paleo-grondwaterspiegelbestanden zijn hoogt grids in meters t.o.v. NAP.

2.1 GeoTOP

GeoTOP is een 3D-geologisch ondergrondmodel van de bovenste 30 meter van de Nederlandse ondergrond (Stafleu et al., 2011; Stafleu, 2014). Het model is een detaillering van de bovenkant van de modellen DGM en REGIS II (Van der Meulen et al., 2013; Vernes & Van Doorn, 2005). Op dit moment zijn de modelresultaten van de modelgebieden (regio's) Zeeland, Goeree-Overflakkee, Zuid-Holland, Noord-Holland, het Rivierengebied en Westelijke Wadden beschikbaar (fig. 1). Alle GeoTOP bestanden die gebruikt zijn komen uit versie 1.2. GeoTOP kan bekeken worden op en gedownload worden van de website www.dinoloket.nl. Een gedetailleerde beschrijving van GeoTOP is te vinden in Stafleu et al., 2012.

GeoTOP v1.2 dekt circa 47% van Nederland en daarmee een groot deel van Holoceen Nederland, wat het projectgebied van deze studie is. Oplevering van het noordoostelijk gebied (Groningen) staat gepland voor eind 2015. Modelering van Flevoland is nog niet ingepland, maar dit wordt de komende jaren verwacht. Voor deze gebieden wordt in de hoogtemodellering nu alleen gebruik gemaakt van de grondwaterspiegelvlakken (paragraaf 2.2). In toekomstige versies van de hoogtemodellen zal GeoTOP in deze gebieden meer detail toevoegen.

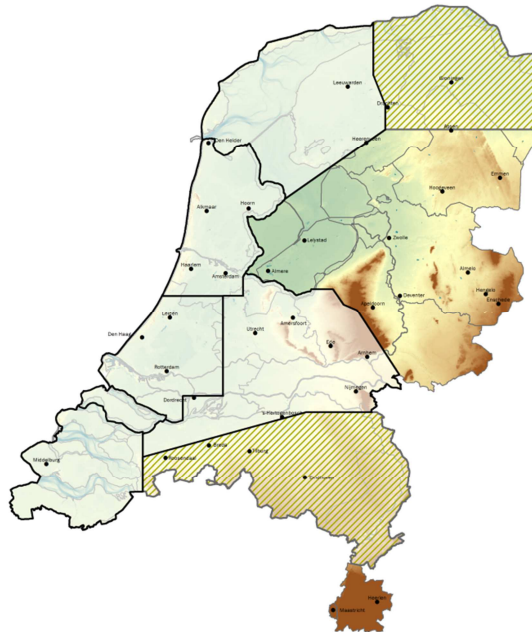


Fig. 1: Status van de GeoTOP-modellering april 2015. Het zwart omrande gebied is gekarteerd, aan het gearceerde gebied wordt nu gewerkt.

Uitgangspunt voor het model zijn de boorbeschrijvingen in de DINO database (beheerd door TNO-GDN), aangevuld met boorbeschrijvingen van derden. Naast boorinformatie wordt er in GeoTOP ook gebruik gemaakt van geologische expertise zoals verwerkt in digitaal kaartmateriaal, waaronder de bestaande geologische kaarten (TNO-GDN) en de Geologische-geomorfologische kaart van de Rijn-Maasdelta (Universiteit Utrecht; Berendsen & Stouthamer, 2001; Cohen et al. 2009; Cohen et al. 2012). Met behulp van interpolatietechnieken worden de boringen vertaald naar voxels (3D-gridcellen) van 100 bij 100 m horizontaal en 50 cm verticaal, zodat een continu 3D beeld ontstaat van de geologische opbouw van de ondergrond. Sturing in de interpolatie vindt plaats door per geologische eenheid

(lithostratigrafische eenheid: formatie, laagpakket of laag) te werken, en door harde grenzen uit bestaande kaarten op te leggen. Aan iedere voxel wordt naast de lithostratigrafische eenheid nog een aantal attributen toegekend: de meest waarschijnlijke lithoklasse (veen, klei, zandige klei/kleilig zand, fijn zand, midden zand, grof zand, grind of schelpen) en de kansen op de afzonderlijke lithoklassen. Voor de modellering van de paleo-hoogtemodellen zijn alleen de top en basis van geologische eenheden gebruikt (fig. 2).

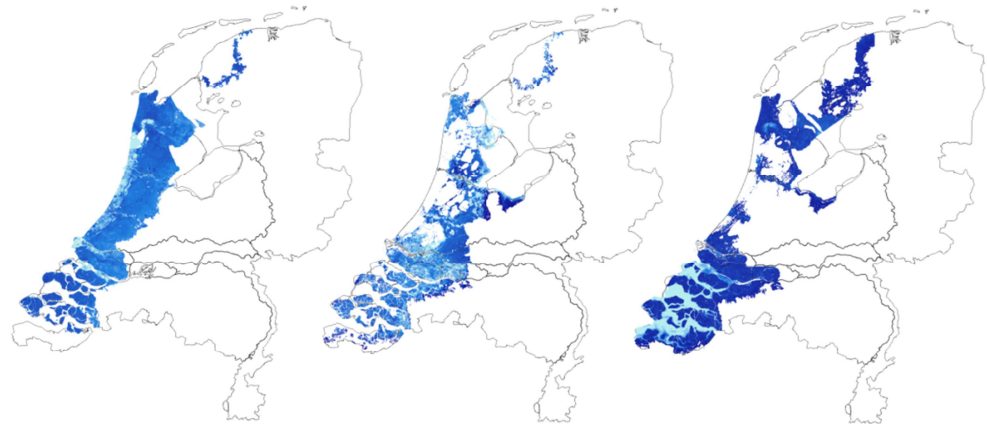


Fig. 2: Als voorbeeld de dekking van enkele toppen/basissen van geologische eenheden die gebruikt zijn als basisbestand. Lichtblauw is laag, donkerblauw hoog. A. is de top van de Fm v. Naaldwijk, Lp v. Wormer, B. is de top van de Fm v. Nieuwkoop, Hollandveen Lp, C. is de basis van de Fm v. Naaldwijk, Lp v. Walcheren.

In het Rivierengebied, Zuid-Holland en Noord-Holland zijn in GeoTOP ook de Holocene geulsystemen (beddinggordels) als aparte eenheden gemodelleerd. De verbreiding en de indeling naar ouderdom (generatie) van deze eenheden zijn onder andere gebaseerd op de informatie in eerder genoemde geologische kaarten (Berendsen & Stouthamer, 2001; Cohen et al., 2012). Voor de paleo-hoogtemodellen is per onderscheiden generatie bepaald voor welke tijdsnede(n) (T1-T3) de beddinggordel relevant was (fig. 3). Daarnaast zijn de toppen van het beddingzand is met 0.5 meter verhoogd, om de bijkomende hoogte van de oeverwal te verrekenen.

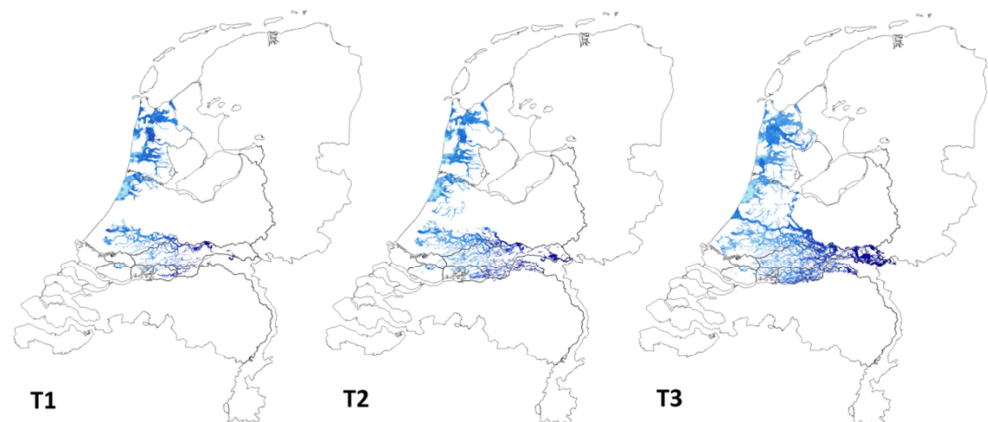


Fig. 3: De dekking van de drie toppen van de geulgeneraties voor T1-T3. Lichtblauw is laag, donkerblauw hoog.

De top van GeoTOP wordt gevormd door het maaiveldbestand (versie 1.2). Buiten het dekingsgebied van GeoTOP is dit bestand aangevuld met het maaiveldbestand (versie 1.4; fig. 4a) dat binnen TNO-GDN voor het landelijke ondergrondmodel DGM wordt gebruikt. Dit maaiveldbestand is gebaseerd op AHN1, aangevuld met waterbodemoogten welke zijn afgeleid uit bathymetrische metingen van Rijkswaterstaat en diverse provincies en waterschappen (Stafleu et al., 2012). Gebouwen zijn uit het maaiveldbestand gefilterd en de celgrootte is opgeschaald naar 100x100m.

Het Top Pleistoceenbestand vormt de ondergrens van de paleo-hoogtemodellen (fig. 4b). Dit vlak is berekend uit het Top Pleistoceen van GeoTOP, aangevuld met een landsdekkend stuurvlak (versneden Top Pleistoceen versie 1.4). Het stuurvlak is een basis hoogtebestand dat ook als input wordt gebruikt voor de modellering van GeoTOP en de basis van het Holoceen in DGM. Deze eerste inschatting van de hoogte van het Top Pleistoceen is ontstaan uit een interpolatie van hoogtes uit boringen. Het stuurvlak geeft de ligging weer van de top van het Pleistoceen, versneden door Holocene geulsystemen en vormt hiermee de actuele basis van de T1 tijdsnede.

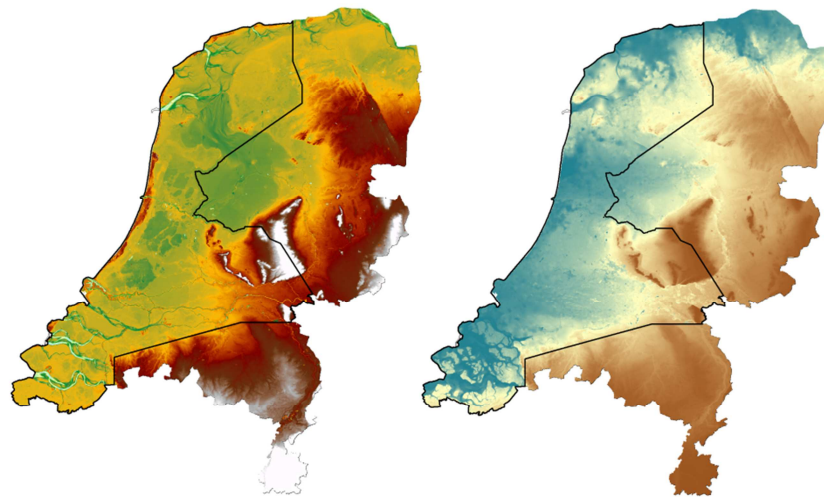


Fig. 4: A. Het basisbestand maaiveld, B. Basisbestand Top Pleistoceen. De zwarte lijn geeft het GeoTOP gebied aan (zie ook fig. 1).

2.2 Paleogroundwaterspiegels

Naast de GeoTOP bestanden is in dit project ook gebruik gemaakt van interpolaties van grondwaterspiegels. Deze zijn afkomstig uit het promotieproject 3DVEEN (promovendus Kay Koster, UU-TNO, 2013-2017). In dit project worden paleogroundwaterspiegels uit series ^{14}C dateringen in een 3D-interpolatie gebiedsdekkend gereconstrueerd (Koster et al. – in prep.; Cohen 2003; 2005).

De ondergrens van 3DVEEN is berekend o.b.v. het landsdekkend Top Pleistoceenvlak zoals hierboven beschreven (TNO-GDN; Stafleu et al. 2012) en gegevens over grondwaterspiegels in het vroeg Holoceen (10800 cal BP; Hoek, 1997; LDEM cf. Cohen 2005, appendix; Bos et al, 2007). Als top wordt een handmatig geconstrueerd grondwatervlak voor 1000 n. Chr. gebruikt (HDEM cf. Cohen 2005, appendix). Tussen deze basis en top worden

paleogroundwaterstanden berekend. Een trend gebaseerd op ^{14}C punten wordt gebruikt om grondwaterhoogtes te interpoleren in de tijd. De 3D resultaten worden vervolgens met een interval van 200 jaar weggeschreven. Uit deze 3D modellering zijn voor ca. 3400 v. Chr., ca. 1500 v. Chr. en ca. 900 n. Chr. hoogtevlakken geëxtraheerd. Deze vlakken (versie februari 2015) zijn gebruikt als grondwaterspiegel voor Einde T1, Einde T2, Einde T3 (fig. 5).

Het 3DVEEN project dekt echter niet het volledige gebied van de paleo-hoogtemodellen (fig. 5). Om een gebiedsdekkend basisbestand te creëren was er aanvulling nodig in Zuidwest-Nederland, Noord-Nederland en het IJsseldal. De in 3DVEEN berekende modellen voor het kerngebied zijn daarom door Dr. K.M. Cohen handmatig uitgebreid. De stappen waren:

- Selecteren van isolijnen van grondwaterspiegels (met een 0,25-0,50 m interval) uit de interpolatieresultaten '3DVEEN Koster',
- vergelijken van beeld isolijnen met beeld hoogte Top Pleistoceen om de trend in de uit te breiden gebieden in te kunnen schatten,
- handmatig karteren van aanvullende grondwater-isolijnen; ad-hoc check met regionale literatuur over zeespiegelstijging en dateringen veen-op-Pleistoceen (o.a.: Cohen et al. (2009; 2012) en referenties daarin, Kiden 1995; Kiden et al. (2008), Kiden pers. comm., Roeleveld (1974), Griede (1978), Vink et al. (2007), Vos et al. 2011; Vos & De Vries, 2013; Vos et al. 2015). Met daarbij toevoeging van expert knowledge (samenhang topografisch verloop beekdalen, kennis over doorlatendheid van bovenste Pleistocene afzettingen, doorwerking stijgende grondwaterspiegel in kustgebied op landinwaartse grondwaterspiegels)
- interpolatie (TOPOGRID algoritme) van de aangevulde set.

Vervolgens is in de modellering berekend waar de 3DVEEN grondwaterspiegels over gaan in de handmatige uitbreiding. Om artefacten bij de 3DVEEN gebiedsgrens te vermijden is ervoor gekozen om de hoogste waarde van de twee modellen over te nemen. Hierbij wordt het 3DVEENVlak zoveel mogelijk behouden, aangezien dit vlak over het algemeen de hoogste waarde heeft. Dit is ook wenselijk aangezien 3DVEEN het meest intensief gecontroleerd is.

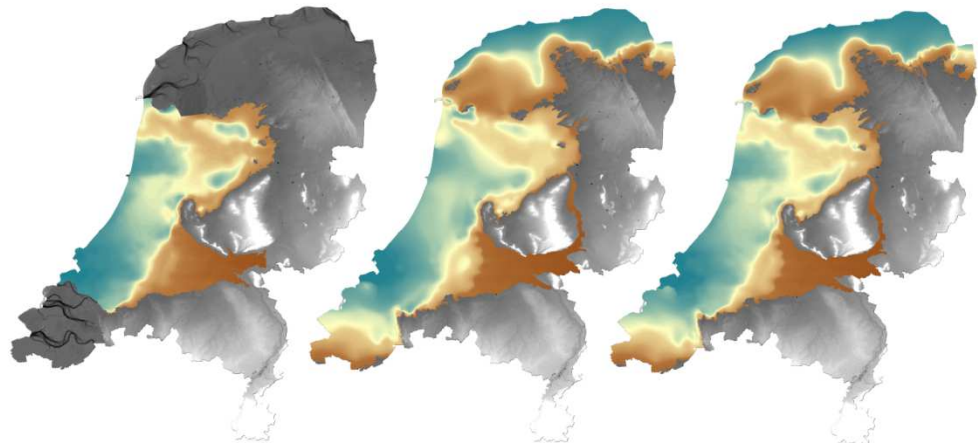


Fig. 5: Paleogroundwaterspiegels t.o.v. NAP voor T2, blauw is laag, bruin is hoog. A. is het 3DVEEN gebied, B. is de handmatige uitbreiding, C. is het gecombineerde vlak (3DVEEN met daarbuiten het vlak van B).

2.3 Selecties uit de landschapskaarten T1, T2, T3

Erosiegrids

Als onderdeel van het parallelle project (RCE-10B) zijn door Deltares kaartbeelden geproduceerd van de status van preservatie en/of erosie van landschapsoppervlakken van het eind van de periodes T1, T2 en T3. Voor gebruik bij de hoogtemodellen zijn deze ook in gridversie geproduceerd, waarbij de celgrootte en positie van de cel-middens is overgenomen van GeoTOP (fig. 6). De erosiegrids (bijvoorbeeld T1_Erod_dekkend.img) bevatten 4 waarden:

- 0: buiten de gebiedsgrens (zie paragraaf 2.4),
- 1: 'bewaard' / 'gepreserveerd',
- 2: 'aangetast' / 'lokaal geërodeerd' / 50-50,
- 3: 'verdwenen' / 'geërodeerd' / 'aan ontginning ten prooi',
- 4: 'geërodeerd' en/of 'onder-waterbodemp' (grote wateren en kustzone/strandwal).

Voor de paleohoogtemodellen is ervoor gekozen om de waardes 3 en 4 als "nodata" te beschouwen. Op deze locaties is het de verwachting dat de tijdsnede afwezig is, het paleohoogtegrid is hier dus ook afwezig. Voor waarde 2 (aangetast/lokaal geërodeerd) is niet bepaald hoeveel van het sediment geërodeerd is. Bij de hoogtemodellen is er daarom voor gekozen om in deze gebieden de originele paleohoogte, zonder erosie, weer te geven. De hoogtemodellen zullen in deze gebieden een conservatieve, minimumdiepte weergeven.

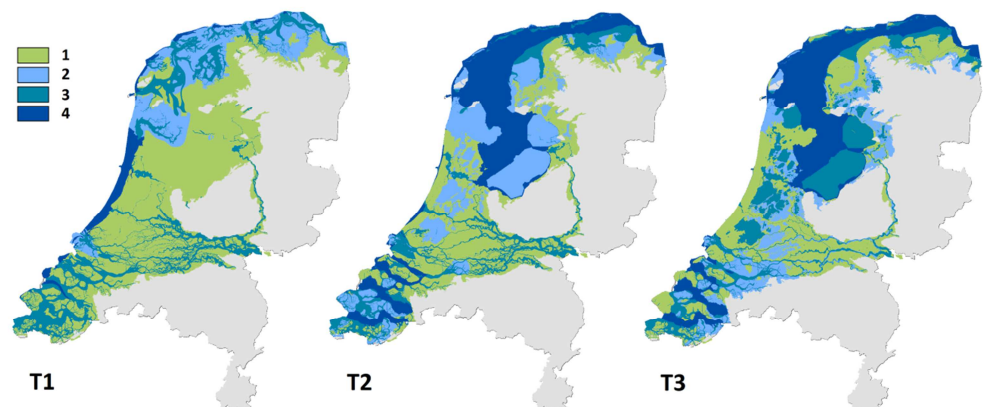


Fig. 6: De erosiegrids voor T1-T3. In blauw tot groen de 4 waarden 1-4, 0 is grijs.

Maskergrids strandwallen

Voor de strandwallen (en oude duinen) zijn voor de tijdstippen einde T1 en einde T2 maskergrids (0/1 rasters) gemaakt die de aan of afwezigheid van deze afzettingen in deze periode weergeven. Deze zijn gebruikt om de huidige verbreiding van de strandwallen in GeoTOP (Fm v. Naaldwijk, Lp v. Zandvoort), waar ook de later gevormde strandwallen in zijn meegenomen, te verkleinen, zodat de breedte van strandwallen in de paleo-hoogtemodellen gecorrigeerd wordt.

2.4 Gebiedsgrens

In de beginfase van het project is de gebiedsgrens vastgesteld waarbinnen de paleo-hoogtemodellen worden berekend. Dit gebied komt overeen met een selectie van hoofdlandschappen van de T4 kaart (RCE). Binnen deze selectie worden afgedekte landschappen verwacht (fig. 7, in de attributentabel LSCPHFDEEN 1-4, 7-10, 13, 14, 22). Daarnaast is het geselecteerde gebied aangevuld met 'buitenwater' zoals IJsselmeer en Waddenzee. Wat betreft de zeewaartse begrenzing van de buitengaatsse kustzone is de begrenzing overgenomen van het maaiveld- en waterbodemoogtebestand uit GeoTOP (zie paragraaf 2.1).

De resulterende verbreidingspolygoon is naar rasterformaat geconverteerd en opgeslagen als maskergrid, waarbij de celgrootte en positie van de cel-middens is overgenomen van GeoTOP. De huidige gebiedsgrens is conform de concept oplevering (mei 2015). Zie het deelrapport RCE-10B voor beslissingen over de gebiedsgrootte (bijlage 2).

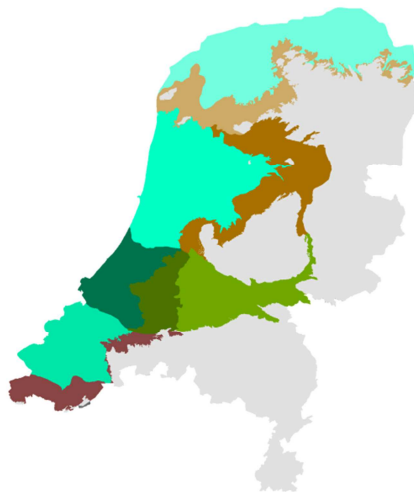


Fig. 7: De gebiedsindeling zoals gemaakt in project RCE-10B. Het gekleurde gebied komt overeen met dat van de paleo-hoogtemodellen. Voor details over de indeling in Holoceen-begraven hoofdlandschappen zie deelrapport Deltares.

2.5 Niet verwerkte bestanden

Er is ook een aantal extra basisbestanden geëvalueerd voor gebruik bij de verschillende tijdsneden, waarvan het uiteindelijk niet zinvol was om deze mee te nemen in de modellering (tabel 2). Voor een volgende versie van de hoogtemodellen hoeven deze niet aangeleverd te worden, tenzij er conceptuele veranderingen plaatsvinden.

Tijdsneden	Bestand	Bronhouder
T1,T2,T3	HDEM, LDEM, Tijdstip eerste veenvorming 3DVEEN	UU, TNO-GDN
T1,T2,T3	Top Pleistoceen onversneden stuurvlak	TNO-GDN
T3	Basis Antropogene afzettingen GeoTOP	TNO-GDN

Tabel 2: Overzicht geëvalueerde bestanden die niet verwerkt zijn in de modellering.

2.6 Eigenaarschap basisbestanden

Als onderdeel van de oplevering van de paleo-hoogtemodellen wordt ook een kopie van de in de productie van de hoogtemodellen gebruikte basisbestanden meegeleverd. Eigenaarschap van deze deels 'levende' versies van de grids van geologische laageenheden (GeoTOP) en grondwatervlakken (VEEN3D) blijft bij respectievelijk TNO-GDN en de betrokken wetenschappers van de Universiteit Utrecht. De gebiedsindeling en de erosiekartering is in de aan RCE geleverde shapefile T0123.shp opgeslagen. Zie ook de betreffende paragrafen in het geïntegreerd plan van aanpak (bijlage 3).

3 Modelleermethode

Voor het modelleren van de paleo-hoogtevlakken is een werkomgeving opgezet met Python scripts die worden aangestuurd door een workflowmanager in Excel. Dit om de paleo-hoogtemodellen gestandaardiseerd en reproduceerbaar te kunnen berekenen en versiebeheer te kunnen toepassen. In de workflowmanager is vastgelegd welke bestanden en scripts in welke stap zijn gebruikt. Indien er extra parameters nodig waren voor berekeningen zijn deze ook ingevoerd (bijvoorbeeld bij het ophogen van de geulen met 0,5 m).

Voor elke tijdsnede wordt een minimum paleodiepte berekend die verwacht wordt aan het eind van de tijdsnede. Voor T1 (12.000-3400 v. Chr.) wordt dus de hoogte horend bij de landschapstoestand van 3400 v. Chr. gemodelleerd.

Als uitgangspunt voor elk paleohoogtemodel wordt de vlakdekkende 3DVEEN paleogroundwaterspiegel (paragraaf 2.2) genomen van het eind van de tijdsnede. Het bewoonbare landschap ligt immers boven de grondwaterspiegel. De NAP-hoogtes van het grondwatervlak worden vervolgens vergeleken met de hoogtes van enkele geselecteerde geologische eenheden uit de GeoTOP modellering, waarbij de meest conservatieve hoogte wordt overgenomen. Er is per tijdsnede bepaald welke geologische eenheden van dezelfde of grotere ouderdom zijn dan die gemarkeerd door het einde van de tijdsnede (zie ook bijlage 3, geïntegreerd Plan van Aanpak). De basisregel voor vergelijking en overname in het paleo-hoogtemodel is:

*Als Sedimenthoogte > Grondwaterhoogte:
dan Sedimenthoogte, anders Grondwaterhoogte*

De workflow van de modellering is samen te vatten in 5 stappen:

- **Kopiëren van alle basisdata naar de modelleeromgeving:**
De bestanden worden samen met de scripts en workflowmanager in een mappenstructuur bij elkaar gezet, zodat versiebeheer mogelijk is.
- **Standaardiseren van de basisdata:**
Alle grids krijgen dezelfde grootte (conform het maaiveldbestand), de grids worden geprojecteerd a.d.h.v. het Rijksdriehoekstelsel, de grids worden geconverteerd naar hetzelfde gridtype (ERDAS Imagine).
- **Basisbestanden bewerken:**
Paleogroundwaterspiegel-bestanden (3DVEEN en aanvulling) samenvoegen tot 1 bestand,
Top-zand van beddingordels met 0,5 m verhogen,
Top Pleistoceen uit GeoTOP samenvoegen met stuurvlak,
Maaiveld uit GeoTOP samenvoegen met DGM maaiveld.
- **modelleren hoogtemodellen T1, T2 en T3:**
De uiteindelijke berekening voor elke tijdsnede gebruikt de volgende bestanden om te bepalen welk deelbestand de meest ondiepe waarde geeft:
T1 = waterhoogte 3400 v. Chr. + Top Pleistoceen + Top Basisveen
+ Top T1 geulen + Top Wormer + Top Zandvoort T1
T2 = Waterhoogte 1500 v. Chr. + Top Pleistoceen + Top Basisveen
+ Top Hollandveen+ Top T1&T2 geulen + Basis Walcheren + Top Zandvoort T2

T3 = Waterhoogte 900 n. Chr. + Top Pleistoceen + Maaiveld
+ Top T1&T2&T3 geulen

- **Hoogtemodellen bijnijden (clippen) a.d.v. erosiegrids en gebiedsgrens**

Het resultaat van de modellering is ter illustratie toegevoegd in bijlagen 7.1 t/m 7.4. De paleo-hoogtemodellen worden als digitale producten opgeleverd. Een uitgebreid overzicht van de digitale producten staat in hoofdstuk 2 van het hoofdrapport.

Naast de gemodelleerde paleo-hoogtemodellen worden kopieën van de volgende basisbestanden meegeleverd: Maaiveld, Top Pleistoceen en de paleogrondwatervlakken (zoals beschreven in paragraaf 2.1 en 2.2). Ook zijn er enkele afgeleide producten berekend die worden meegeleverd. Dit zijn de paleo-hoogtemodellen omgerekend naar meters t.o.v. maaiveld en de diktes van T1, T2 en T3. De dikte van T1 is berekend door de hoogte van het Top Pleistoceen af te trekken van het T1 vlak. T2 en T3 gebruiken respectievelijk het T1 en T2 vlak.

4 Beperkingen en suggesties

4.1 Beperkingen van de paleo-hoogtemodellen

Gebruik GeoTOP

GeoTOP is een subregionaal ondergrondmodel met een gebruiksschaal die past bij toepassingen op provinciaal of gemeentelijk niveau. Deze gebruiksschaal is vergelijkbaar met de schaal van 1:50.000 die bij Geologische Kaart van Nederland, een voorloper van GeoTOP, gehanteerd werd. GeoTOP is niet geschikt voor gebruik op lokale schaal, zoals bijvoorbeeld bij bouwlocaties, individuele huizen of huizenblokken, en waterkeringen. Om een goede schatting van de geometrie en de eigenschappen van de ondergrond op een lokale schaal te kunnen geven zullen vrijwel altijd aanvullende gegevens nodig zijn. Wel kan GeoTOP dienen als raamwerk waarbinnen meer detail kan worden aangebracht. Daarnaast is GeoTOP nog in ontwikkeling en daarmee nog niet landsdekkend.

Het GeoTOP model is nog niet eerder in een toepassing gebruikt waarbij de absolute ouderdommen van (Holocene) afzettingen van specifiek belang waren. In essentie is de (litho)stratigrafische indeling van het model gebaseerd op visuele kenmerken en op de aangetroffen stratigrafische opeenvolging (relatieve ouderdom), en niet op absolute ouderdom. Aan de top (of basis) van een geologische eenheid kan wel een absolute minimum (of maximum) ouderdom worden toegekend, maar de actuele ouderdom kan lateraal binnen een eenheid sterk variëren. Dit geldt zeker voor eenheden die landsdekkend gemodelleerd zijn en over een langere periode zijn afgezet. Een voorbeeld hiervan is de top van het Laagpakket van Wormer. Deze getijbekkenafzettingen variëren regionaal in ouderdom, door het niet overal gelijktijdig aaneensluiten van de strandwalkust (en afsluiting van getijbekkens). Ondanks de diachroniteit is de top van het laagpakket langs de hele kust gebruikt als sedimenthoogte voor het einde van T1. Hiermee wordt uiteraard een fout geïntroduceerd.

Antropogene afzettingen maken deel uit van de ondergrond en beïnvloeden als zodanig de hoogte van het maaiveld. Gebouwen zijn er uitgefilterd, maar ophogingen als snelwegen en stadscentra zijn nog in het maaiveldbestand aanwezig. Voor het T3-vlak is geldt dat het huidige maaiveld in grote delen van het te modelleren gebied door ontwatering inmiddels lager ligt dan het maaiveld rond 900 n. Chr, daarom is deze meegenomen in Stap 4 in de modellering. Dit geldt echter niet voor de gebieden met antropogene ophogingen zoals de stadscentra van de grote steden, die dan ook lokaal boven het gemodelleerde grondwateroppervlak van T3 uitkomen. De wens is de basis van het Antropogene pakket in toekomstige versies steeds beter in GeoTOP te modelleren, maar de huidige basis van de antropogene afzettingen is nog niet goed genoeg om de T3 te corrigeren.

Ook voor de top van het laagpakket van Zandvoort (oude strandwallen en zanden van de Fm v. Naaldwijk) zijn enkele aandachtspunten van belang. De basis van het bovenliggende laagpakket van Schoorl (en daarmee de top van de Zandvoort) is niet overal even uniform geïdentificeerd gedurende de deels geautomatiseerde modellering. Hierdoor zijn in de kop van Noord-Holland lokaal oneffenheden zichtbaar in het T2-vlak. Daarnaast wordt in het midden van Noord-Holland de top

van de Zandvoort in het T1 en T2 vlak mogelijk wat overschat en in Zuid-Holland en Zeeland zijn de oude strandwallen deels afwezig, wat een onderschatting van de hoogte oplevert.

Naast optimalisatie van de geologische sturing van individuele laagvlakken en van de modelleermethode zijn onderstaande verbeteringen in toekomstige versies van GeoTOP te verwachten. Sommige zijn mogelijk eind 2015 te realiseren, andere staan voor volgende jaren op de planning.

- Aangepaste verbreidingen van geologische eenheden meenemen in GeoTOP, waaronder de nieuwe geulenkaart Universiteit Utrecht (Cohen et al. 2012). Dit levert een betere aansluiting met de landschapskaarten.
- Landelijk modelleren van geologische eenheden binnen GeoTOP. Hierdoor zijn GeoTOP gebiedsgrenzen niet meer zichtbaar in het model.
- Afronden oostelijk waddengebied in 2015 (fig. 1) en incorporatie van het resulterende ondergrondmodel in het paleo-hoogtemodel. Op termijn kan een landelijk dekkend GeoTOP worden gebruikt.

Paleogrondwaterspiegelconstructie

Ook 3DVEEN is gemodelleerd als regionaal model en heeft hierdoor per gridcel een te verwachten onzekerheid van enkele decimeters. De gebruikersschaal van beide modellen is hiermee redelijk vergelijkbaar. De ad-hoc uitbreiding van 3DVEEN naar Noord- en Zuidwest-Nederland heeft naar inschatting een iets grotere onzekerheid (voor een kwantificering hiervan is eerst verdere evaluatie nodig). Naar aanleiding van eigen gebruik en review kunnen indien gewenst nog kleine aanpassingen volgen. Vervolgens kunnen deze nieuwe versies relatief makkelijk verwerkt worden tot een nieuw paleo-hoogtemodel.

Ondanks de maatregelen die genomen zijn om artefacten bij overgangen van 3DVEEN naar het uitgebreide paleogrondwaterspiegelmodel te voorkomen, zijn er wel overgangen zichtbaar aan de zuidrand van Zuid-Holland en ten zuiden van Texel. De combinatie van de twee modellen geeft echter op het moment de beste benadering van de paleogrondwaterspiegels. Op de overgang bedraagt het hoogteverschil over het algemeen niet meer dan 1 decimeter. De artefacten hebben derhalve nauwelijks invloed op het resultaat.

Modelleermethode

Er is bij de regionale modellering van paleohoogtes gekozen om de minimumdiepte ('attentiediepte') te berekenen waarop afzettingen uit een tijdsperiode aangetroffen kunnen worden in de ondergrond. Dit impliceert dat bekende erosie die niet de volledige tijdsnede heeft weggeërodeerd, niet meegenomen is in de modellering (zie ook paragraaf 2.3). Het voordeel hiervan is dat indien bijvoorbeeld de verbreiding van kleine geulen (door voortschrijdend inzicht) verandert, er geen te diepe paleohoogte is aangeleverd. Ook kunnen lokale erosievlakken, bijvoorbeeld door insnijding, niet gereproduceerd worden in dit regionale model. Deze beperkingen moeten goed gecommuniceerd worden. Vanwege deze beperkingen is het ook belangrijk dat de paleo-hoogtemodellen in combinatie met de landschapskaarten en erosiegrids gebruikt worden.

Daarnaast is er voor een uniforme, reproduceerbare modelleermethode gekozen. Er zijn geen lokale aanpassingen gedaan of details aan de paleo-hoogtemodellen

toegevoegd. Het voordeel van deze methode is dat de paleo-hoogtemodellen in korte tijd kunnen worden gemaakt en geüpdatet.

4.2 Aansluiting van hoogtemodellen en landschapskaarten

Ondanks dat er zoveel mogelijk is afgestemd tussen TNO-GDN en Deltares zijn er een aantal verschillen in basisbestanden die aansluitproblemen zullen veroorzaken tussen de landschapskaarten van Deltares en hoogtemodellen van TNO-GDN.

Binnen het project RCE-10B (fase 1) zijn een deel van de basiskaarten handmatig aangepast aan de huidige inzichten. Versieverschillen in gebruikte basisbestanden bij de hoogtemodellen en het karteringsdeel komen vooral tot uiting als lokale aansluitproblemen. Er worden met name afwijkingen verwacht tussen de attentiedieptes in de hoogtemodellen en aanwezigheid van landvormen in de landschapskartering. De onderliggende afstemmingsproblemen waren vanwege de korte doorlooptijd en hoge complexiteit van het doorrekenen van GeoTOP onvermijdelijk.

Bestanden waarbij op dit moment aansluitproblemen zijn geconstateerd zijn:

- Beddinggordels karteergebied Universiteit Utrecht: De landschapskartering is uitgegaan van de versie uit 2012 (Cohen et al., 2012), GeoTOP 1.2 gebruikt een versie uit 2009 (Berendsen & Stouthamer, 2001; Cohen et al., 2012).
- Correcties en aanvullingen die binnen RCE-10B aan GeoTOP verbreidingen van geologische eenheden zijn gedaan (met name binnen de 'donken' en 'dallaag'), zijn nog niet verwerkt in de basisbestanden die in de paleo-hoogtemodellen zijn gebruikt.
- Het droogmakerijenbestand (verbreidingen GeoTOP versie 1.2) dat door TNO-GDN is gebruikt in de GeoTOP modellering, wijkt lokaal af van de landschapszone "diepe droogmakerijen" uit de T4 kaart.

De wens is de inzichten uit deze aangepaste basisbestanden mee te nemen in de updates van het GeoTOP model. Vice versa is het idee dat met het voortschrijden van GeoTOP (completere dekking, verbeterde verbreidingskaarten) grenzen in de gebiedskaart (RCE-10B) worden aangepast. Hierdoor zullen aansluitproblemen in de toekomst stapsgewijs verminderen, en zullen de hoogtemodellen steeds verbeterd worden.


5 Ondertekening



Utrecht, 19 november 2015

Michiel van der Meulen
Afdelingshoofd

TNO



Roula Dambrink
Auteur

6 Literatuur

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

Bos, J.A.A., Van Geel, B., Van der Plicht, J. & Bohncke, S.J.P. (2007) Preboreal climate oscillations in Europe: wiggle-match dating and synthesis of Dutch high-resolution multi-proxy records (Ed. by W.Z. Hoek & J.A.A. Bos), Quaternary Science Reviews, 26(15-16), 1927 – 1950 DOI: 10.1016/j.quascirev.2006.09.012

Cohen, K.M. 2003. Differential subsidence within a coastal prism: Late-Glacial - Holocene tectonics in the Rhine-Meuse delta, The Netherlands. Proefschrift Universiteit Utrecht. Netherlands Geographical Studies 316, pp. 172.

Cohen, K M. 2005. 3D geostatistical interpolation and geological interpolation of palaeo-groundwater rise within the coastal prism in the Netherlands In: Giosan, L. & Bhattacharaya, J. P. (eds.). River Deltas: Concepts, models, and examples. Tulsa, Oklahoma: SEPM (Society for Sedimentary Geology), p. 341-364 502 p. (SEPM Special Publication; no. 83)

Cohen, K. M., Stouthamer, E., Hoek, W. Z., Berendsen, H. J. A. & Kempen, H. F. J. 2009. Zand in Banen - Zanddieptekaarten van het Rivierengebied en het IJsseldal in de provincies Gelderland en Overijssel. Arnhem: Provincie Gelderland. 130 p.

Cohen, K.M., Stouthamer, E., Pierik, H.J. & Geurts, A.H., 2012. Digitaal Basisbestand Paleogeografie van de Rijn-Maas Delta / Rhine-Meuse Delta Studies' Digital Basemap for Delta Evolution and Palaeogeography. Utrecht University. Retrieved 9 June 2014 from <http://persistent-identifier.nl/?identificer=urn:nbn:nl:ui:13-nqjn-zl>

Cohen K.M., Schokker, J. (2014). Geïntegreerd Plan van Aanpak: RCE-10A: Vervaardiging digitale paleo-hoogtemodellen voor de top van het Pleistoceen en tijdsnede 1, 2 en 3; RCE-10B: Landschapskartering van archeologisch relevante landschapseenheden, naar periode en diepte. Deltares & TNO Geologische Dienst Nederland. 11 pp.

Cohen, K.M., Dambrink, R., De Bruijn, R., Schokker, J., Hijma, M.P. (2015). Vervaardiging van hoogtemodellen en landschapskaarten naar periode en diepte voor archeologisch gebruik in Holoceen-afgedekte delen van Nederland. Deltares i.s.m. TNO Geologische Dienst Nederland en Universiteit Utrecht. Deltares rapport 1210450-000-BGS-0012 (tevens TNO rapport 2015 R10685-XXX, c. 45 pp.

Cohen, K.M., De Bruijn, R., De Vries, S., Vos, P.C., Hijma, M.P. (2015). Vervaardiging van begraven landschapskaarten voor Holoceen afgedekt Nederland: Kaartlaag T0123 voor RCE's Kenniskaart-portaal. Deltares rapport 1210450-000-BGS-0013. c. 90 pp

GRIEDE, J. W. (1978): Het ontstaan van Frieslands Noordhoek. — Thesis, Vrije Universiteit, Amsterdam: 186 pp.; Amstetdam.

Hoek, W.Z. (1997) Atlas to Palaeogeography of Lateglacial Vegetations – maps of Lateglacial and Early Holocene landscape and vegetation in The Netherlands, with an extensive review of available palynological data. Netherlands Geographical Studies 231

Kiden, P., 1995. Holocene relative sea-level change and crustal movement in the southwestern Netherlands. *Marine Geology* 124, 21e41.

Kiden, P., Makaske, B., van de Plassche, O., 2008. Waarom verschillen de zeespiegelreconstructies voor Nederland? *Grondboor en Hamer* 3/4, 54e61.

Koster, K., Stafleu, J., Cohen, K.M. (in prep.). A 3D interpolation model of Holocene groundwater level rise in two submerged Pleistocene valleys in the western part of the Netherlands. manuscript artikel / hoofdstuk Proefschrift Kay Koster, Universiteit Utrecht.

ROELEVELD, W. (1974): The Groningen coastal area. A study in holocene geology and lowland physical geography. Thesis, Vrije Universiteit, Amsterdam, 252 pp., Amsterdam.

Stafleu, J., Maljers, D., Gunnink, J.L., Menkovic, A. & Busschers, F.S., 2011. 3D modelling of the shallow subsurface of Zeeland, the Netherlands. *Netherlands Journal of Geosciences* 90: 293-310.

Stafleu, J., Maljers, D., Busschers, F.S., Gunnink, J.L., Schokker, J., Dambrink, R.M., Hummelman H.J & Schijf, M.L., 2012. GeoTop modellering. TNO-rapport 2012 R10991, 216 pp.

Stafleu, J., 2014. Productspecificatie Ondergrondmodel GeoTOP. TNO-rapport 2014 R11961, 35 pp.

Van der Meulen, M.J., Doornenbal, J.C., Gunnink, J.L., Stafleu, J., Schokker, J., Vernes, R.W., Van Geer, F.C., Van Gessel, S.F., Van Heteren, S., Van Leeuwen, R.J.W., Bakker, M.A.J., Bogaard, P.J.F., Busschers F.S., Griffioen, J., Gruijters, S.H.L.L., Kiden, P., Schroot, B.M., Simmelink, H.J., Van Berkel, W.O., Van der Krogt, R.A.A., Westerhoff, W.E. & Van Daalen, T.M., 2013. 3D geology in a 2D country: perspectives for geological surveying in the Netherlands. *Netherlands Journal of Geosciences* 92: 217-241.

Vernes, R.W. & Van Doorn, Th.H.M., 2005. Van Gidslaag naar Hydrogeologische Eenheid. Toelichting op de totstandkoming van de dataset REGIS II. Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO, Rapport 05-038-B, 105 pp.

Vink, A., Steffen, H., Reinhardt, L., Kaufmann, G., 2007. Holocene relative sea-level change, isostatic subsidence and the radial viscosity structure of the mantle of northwest Europe (Belgium, the Netherlands, Germany, southern North Sea). *Quaternary Science Reviews* 26, 3249e3275.

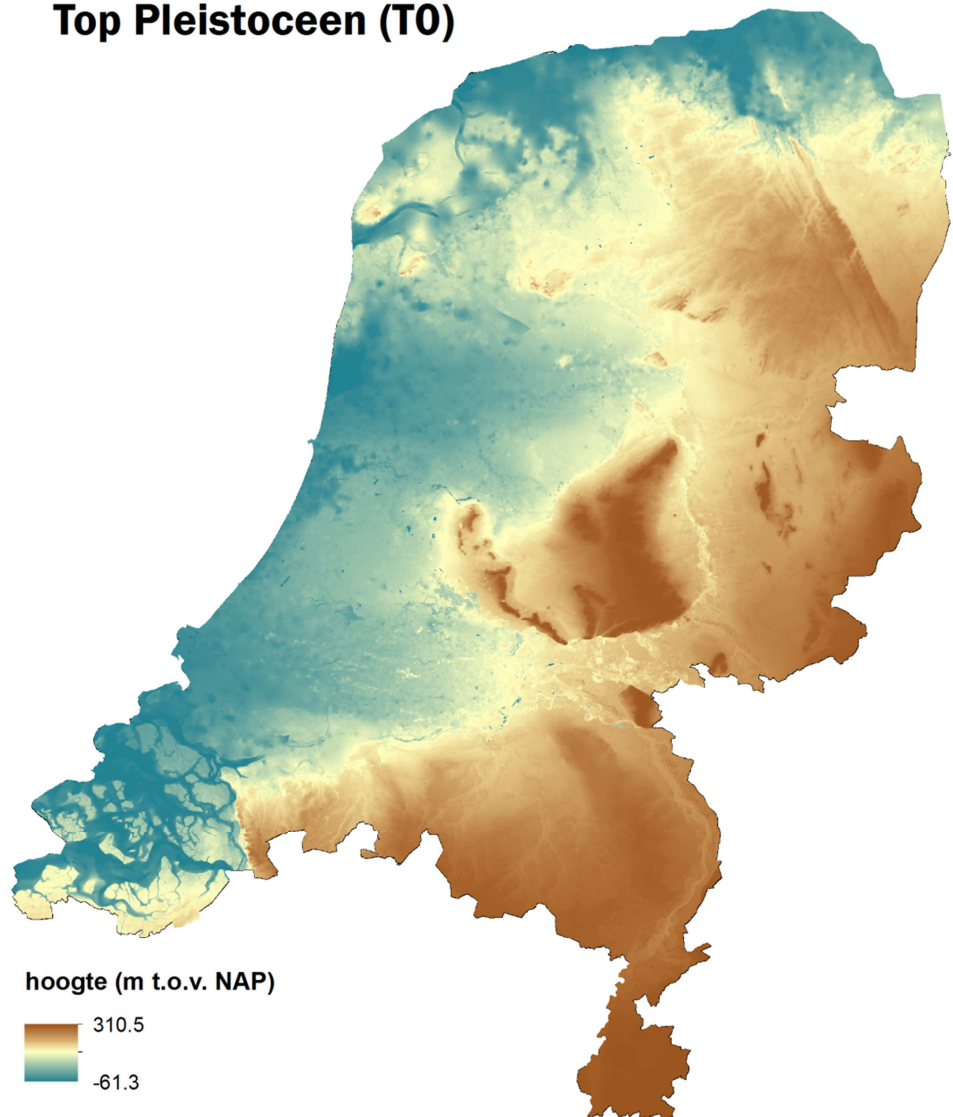
Vos, P.C., Bazelmans, J.G.A., Weerts, H.J.T., Van der Meulen, M.J. (Eds.) (2011). Atlas van Nederland in het Holoceen: landschap en bewoning vanaf de laatste ijstijd tot nu. BertBakker. 96 pp.

Vos, P.C. & De Vries, S. (2013). Tweede generatie palaeogeografische kaarten van Nederland (versie 2.0). Deltares, Utrecht. www.archeologieinNederland.nl

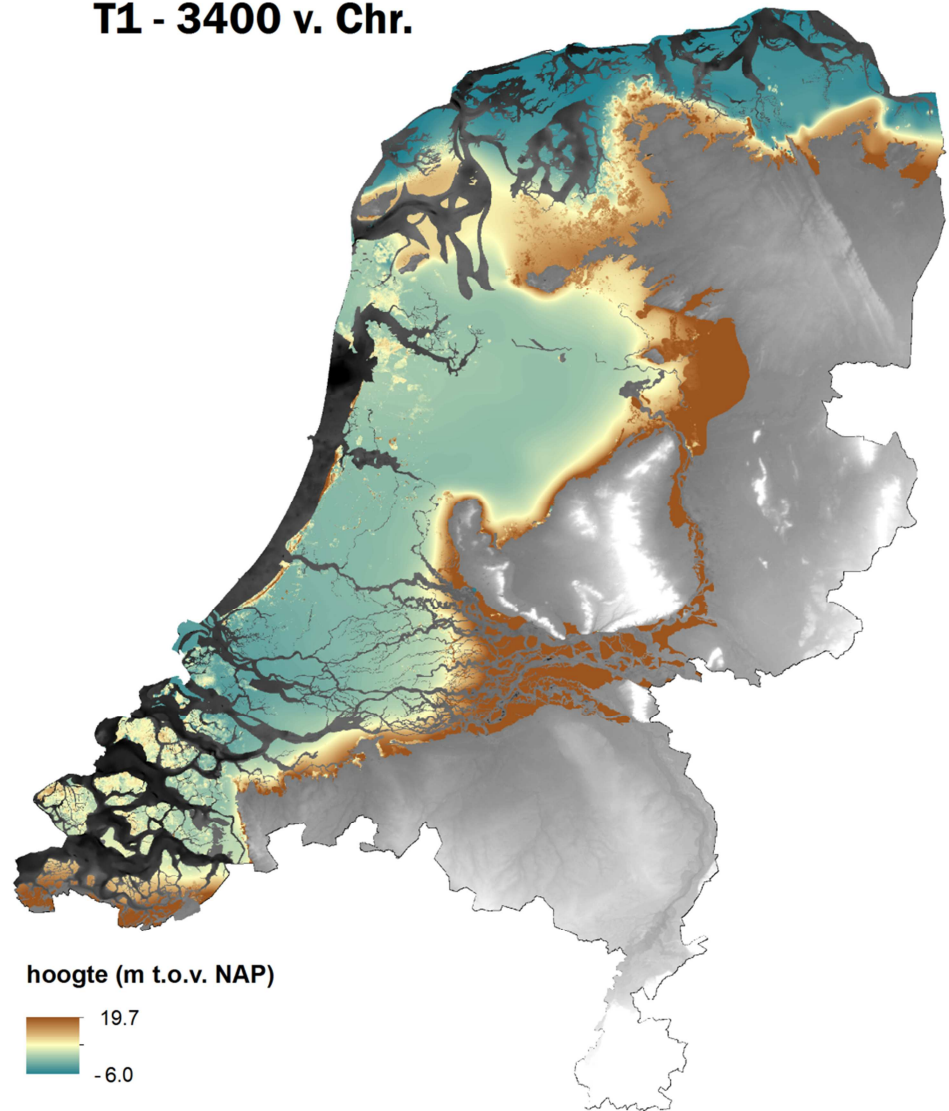
Vos, P.C., Bunnik, F.P.M., Cohen, K.M. & Cremer, H. (2015). A staged geogenetic approach to underwater archaeological prospection in the Port of Rotterdam (Yangtzehaven, Maasvlakte, The Netherlands) - A geological and palaeoenvironmental case study for local mapping of Mesolithic lowland landscapes. *Quaternary International* 367, 4-31.

7 Bijlagen T0, Top T1, Top T2 en Top T3

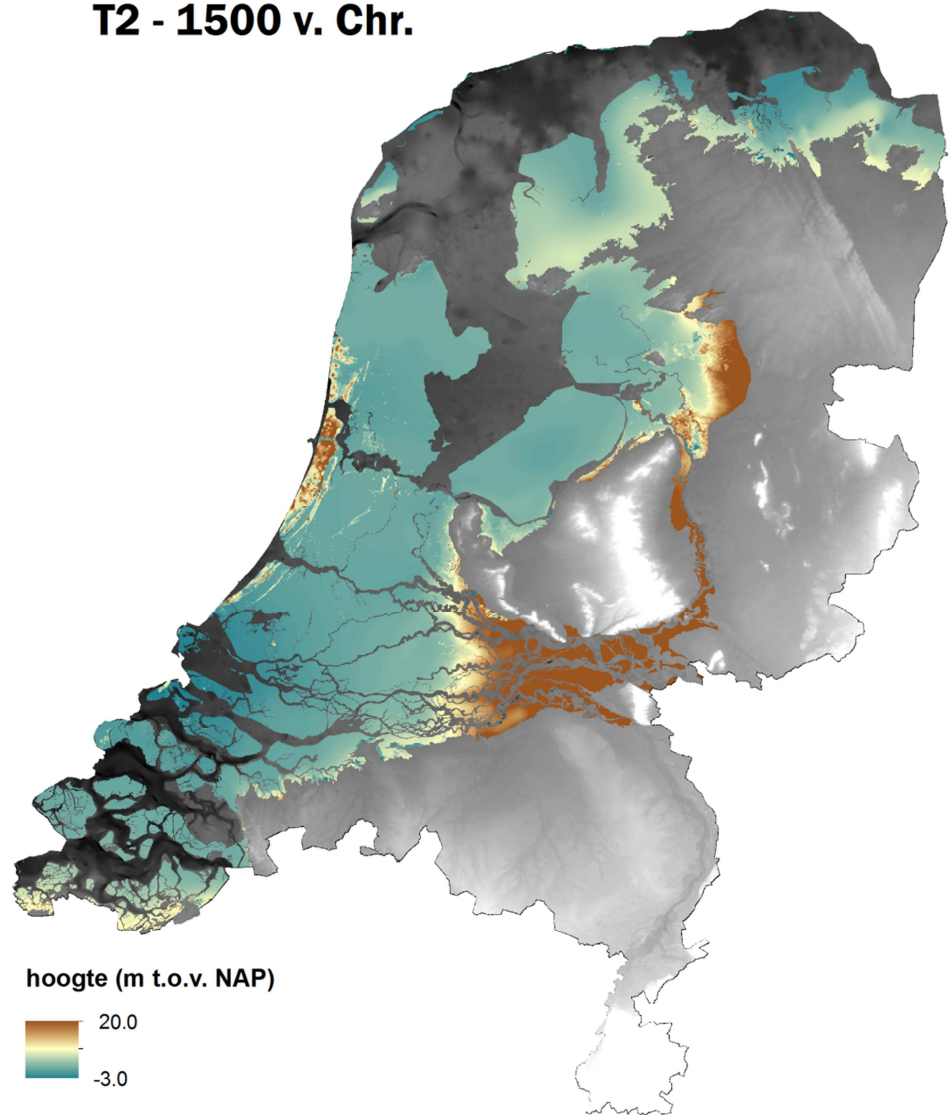
Top Pleistoceen (T0)



T1 - 3400 v. Chr.



T2 - 1500 v. Chr.



T3 - 900 n. Chr.

