

HET RIJNMONDGEBIED IN HET VROEG-HOLOCEEN: INZICHTEN UIT EEN DIEPE PUT BIJ BLIJDORP (ROTTERDAM)

Een 21 m diepe bouwput in Rotterdam bood de gelegenheid de basis van het Holocene pakket te bekijken. De afzettingen lieten een verdrinkend rivier- en duinlandschap zien als gevolg van snelle zeespiegelstijging en een overgang naar estuariene condities. Deze overgang vond plaats tussen 9.000 en 8.000 jaar geleden en verliep geleidelijk met twee versnellingen: één rond 8.400 jaar geleden als gevolg van een zeespiegelsprongetje en één rond 8.000 jaar geleden, mogelijk als gevolg van een zware storm of de uitrollende Storegga-tsunami.

meter (RandstadRail Statenwegtracé, Rotterdam, Afb. 1). De door diepwanden ingesloten en droog bemalen bouwput werd in lagen van ca. 3 meter uitgegraven. De put is een eerste maal bezocht toen men bezig was van 13 naar 16 m te verdiepen waarbij het verdronken landschap van 8.500 - 8.000 jaar oud was ontsloten. De put is nog een tweede maal bezocht toen van 18 naar 21 m verdiept werd. Dit artikel beschrijft de bezochte ontsluitingen, aangevuld met analyses van het bemonsterde materiaal.

Inleiding

Het huidige Rijnmond gebied is zowel onderdeel van het kustgebied, als onderdeel van de Rijn-Maas delta. De ondergrond bestaat er uit Holocene kust- en rivierafzettingen waarvan de dikte onder Rotterdam zo'n 15 m bedraagt. Het Holocene pakket bedekt een Rijn-Maas rivierenlandschap uit het einde van de laatste ijstijd. Het is ontstaan als gevolg van zeespiegelstijging en landinwaarts oprukken van de Noordzee (transgressie). De gekoppelde geologische geschiedenis van kust- en rivierontwikkeling in Nederland is onderwerp van onderzoek aan de Universiteit Utrecht. In het gebied rond Rotterdam heeft vooral de eerste helft van het Holocene (11.700 - 5.000 jaar geleden) in lopende projecten onze interesse.

Waar kustonderzoekers van de laatste 5.000 jaar nog wel eens een ontsluiting in strandwal of polder kunnen bekijken, moeten Vroeg Holocene onderzoekers het in de regel doen met boringen en sonderingen. De aanleg van een ondergronds station voor de RandstadRail bij Blijdorp (Rotterdam) bood in december 2005 en januari 2006 de gelegenheid de ontsloten basis van het Holocene pakket te bekijken in een bouwput van 24 bij 147 m die een uiteindelijk diepte bereikte van maar liefst 21



Afbeelding 1.

Tracé boortunnel RandstadRail onder Rotterdam (zie de website www.randstadrail.nl voor meer informatie). Station Blijdorp (in aanbouw) bevindt zich onder de Statenweg.

Tabel 1: Tijdbalk Laat Pleistoceen en Holoceen Rotterdam

Tijdvakken				HOLOCEEN				
Wereldwijd	PLEISTOCIEEN			HOLOCEEN				
NW Europa	Laat-Pleistoceen			Vroeg	Midden	Laat		
	WEICHSELIJEN			(FLANDRIEN)				
	Pleniglaciaal	Laat-glaciaal		Vroeg	8.2*	Midden	Laat	
Nederland	Laat-Pleniglaciaal LGM	Bølling, Oude-Dryas, Allerød	Jonge-Dryas	Preboreaal	Boreaal	Atlanticum	Subboreaal	Subatlanticum
Jaren voor 'nu' (= 1950 n Chr.)	ca. 21.000	12.850	11.653	10.250	8.700	5.700	2.600	heden
	14.640	12.850	11.653	11.653 **	10.250	8.700	5.700	2.600
¹⁴ C jaren 'BP'	ca. 18.000	12.500	10.950	10.100	9.150	7.900	5.000	2.500
	12.500	10.950	10.100	10.100	9.150	7.900	5.000	2.500

Landschap ter plekke van Rotterdam							
Klimaat	ijstijd	opwarming, ontthooien	opwarming, ontthooien	terugval, droogte	opwarming, bebossing	gematigd warm klimaatoptimum	gematigd warm, menselijke ontbossing
Rijndal	brede vlechtende rivier		Meerdere meanderende geulen	afname # geulen	delta	>50 km stroomopwaarts	
Rijnmond	> 400 km stroomafwaarts	> 200 km stroomafwaarts		100-30 km stroomafwaarts	nabij	ver ten noorden (Leiden)	
Kust	kust ligt bij Bretagne		Engels Kanaal loopt onder water	Rijndal verdrinkt, wordt estuarium		lagune met strandwal ervoor	
Zeespiegelstand	ca. -120 m	ca. -70 m	ca. -50 m	ca. -25 m	ca. -18 m	zie Afbeelding 6	
Mens	onbewoonbaar	Late-Oude-Steentijd: Laat-Paleolithicum		Midden-Steentijd: Mesolithicum		Nieuwe-Steentijd Neolithicum	Bronstijd, IJzertijd etc.

... - tijdvak loopt door in vroegere tijd; LGM = 'Last Glacial Maximum': maximum wereldwijd ijsvolume in laatste ijstijd, ca. 21.000 jr geleden.
 * '8.2 ka klimaatgebeente': anderhalve eeuw lang koelte ten gevolge van ijsvrij raken van de Hudson-baai in Noordoost Canada, 8250 - 8100 jaar geleden.
 ** gebaseerd op telling jaarlaagjes in ijskern NGRIP op Groenland. 11.653 jaarlaagjes onder 1950 jaarlaagje = 11.703 jaarlaagjes onder oppervlak in 2000.

Tabel 1. Chronologisch overzicht van tijdvakken en landschapontwikkelingen voor het gebied rond Rotterdam. Ontwikkelingen in Rotterdam naar inzicht van de auteurs (dit artikel; Hijma in voorb.). Ouderdommen van tijdvakken volgens de meest recente inzichten (W.Z. Hoek, Universiteit Utrecht; INTIMATE werkgroep) o.a. uit Groenlands ijskern- en NW-Europees geologisch/palaeoecologisch klimaatonderzoek (Hoek, 2008; Van Geel et al., 1981).

Overgang Pleistoceen-Holoceen: rivierlopen en duincomplexen

Het totaal aan Holocene kust- en delta-afzettingen in Nederland vormt een wig van sediment die 'het Pleistoceen oppervlak' (feitelijk een vroegst Holoceen oppervlak) bedekt. Aan de kust is het Holocene pakket het dikst en landinwaarts wigt het pakket uit naar enkele meters dikte nabij de Duits-Nederlandse grens. Onder Rotterdam en in Midden-Nederland bedekken de Holocene afzettingen het dal van de Rijn en Maas uit de laatste ijstijd. De rivierafzettingen die dit dal markeren zijn zowel stroomopwaarts als stroomafwaarts van Rotterdam uitgekarteerd: zij vormen de jongste eenheden van de Formatie van Kreftenheye (Busschers, 2008). Het dal was 15.000 jaar geleden een vele kilometers brede actieve rivierlakte met geulen en zandbanken. Dit veranderde in de aanloop naar het Holoceen, door klimaatverbetering die ongeveer 15.000 jaar geleden inzette. Voor Rijn en Maas had de klimaatverbetering vooral veranderingen in gemiddelde afvoer (debiet) en verdeling van afvoerpieken tot gevolg.

Het geleidelijk veranderende debietregime zorgde voor aanpassingen in riviergrootte en type en in de efficiëntie van sedimenttransport. Op de overgang van het Pleistoceen naar het Holoceen ongeveer 11.700 jaar geleden; Tabel 1), waren nog slechts enkele meanderende Rijn- en Maastakken binnen het veel bredere dal actief. Het oppervlak van de meandergordels van deze rivieren ligt bij Rotterdam op ca. 17 à 18 m onder NAP, 1 à 2 meter lager dan het niveau van 15.000 jaar geleden. Tussen de gordels lagen duincomplexen. Periodiek droogvallende zandbanken in de riviergordels waren het bronmateriaal voor deze binnenlandse duinen ('donken').

In het vroegste deel van het Holoceen was er dus nog geen sprake van Noordzeestranden, kustduinen of lagunes in West-Nederland. Ondanks de wereldwijde

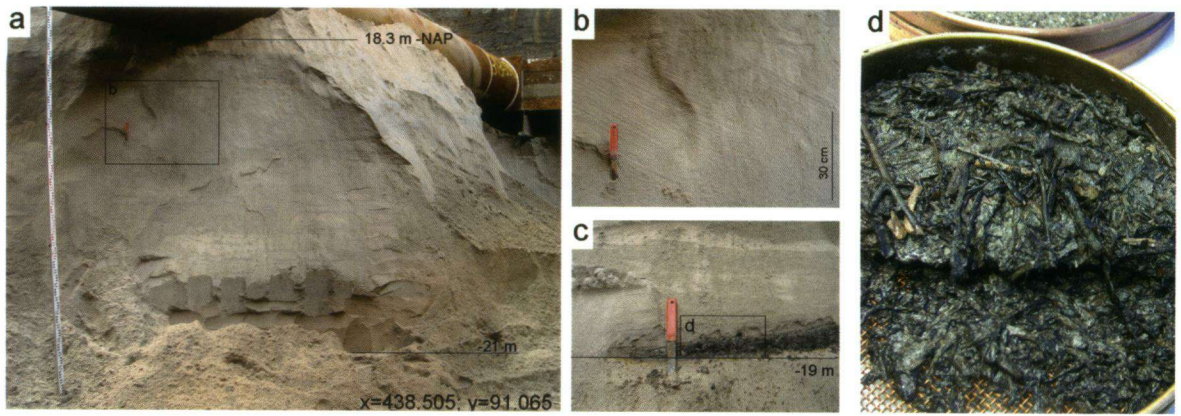
zeespiegelstijging die vanaf ongeveer 20.000 jaar geleden inzette (Tabel 1), stond het zeeniveau nog niet hoog genoeg om de zuidelijke Noordzee onder water te zetten.

Hoe begon de kustontwikkeling in West-Nederland?

Tussen 10.000 en 6.000 jaar geleden vond wereldwijd de laatste etappe van zeespiegelstijging plaats. Daarna was er wat betreft zeespiegelstand een redelijk stabiele situatie en voor de jongste periode is er daardoor veel bekend over de Holocene kustgeschiedenis. De kust begon zich vanaf toen namelijk uit te bouwen, waarbij landinwaarts veel afzettingen bewaard bleven. Op zich is dat een prettig gegeven, bijvoorbeeld bij het reconstrueren van zeespiegelstijging op basis van veendateringen uit de lagune (Kiden et al., dit nummer). Schommelingen in zeespiegelstand in de laatste 6.000 jaar zijn wereldwijd niet meer dan 2 meter geweest. Voor Nederland wordt in de afgelopen 6.000 jaar nog wel ca. 5 m stijging waargenomen ('relatieve zeespiegelstijging'), maar dat komt vooral door lokale bodemdaling.

Om te begrijpen hoe en waarom de kustlijn 6.000 jaar geleden lag waar hij lag (ruwweg op de lijn Rijswijk-Leiden), is juist de periode 10.000 - 6.000 interessant. In tegenstelling tot de laatste 6.000 jaar, was dit een tijd van zeer snelle zeespiegelstijging, tot wel 60 cm/ eeuw. Dit liet West-Nederland verdrinken en het riviergebied naar riviermond- en kustgebied overgaan. Onder Rotterdam liggen de afzettingen uit deze periode tussen 8 en 19 m diep. Het is Rijn- en Maassediment afgezet in en langs verdrinkende rivierlopen en estuaria. De basis van dit pakket is een markante sedimentaire grens in boringen en dwarsprofielen: er zijn grote verschillen in facies, verbreiding en fossieleninhoud met de onderliggende 'einde-ijstijd' rivierafzettingen.

Afbeelding 2. (A) Riviersedimenten bezoek '17 - 21 m - NAP'. (B, C): Detail scheve gelaagdheid, duidend op afzetting in de bedding van riviergeulen. (D): Zeef met plantenresten, verzameld als mat in scheefgelaagde sets, onder de rivierduin in de NO hoek van de bouwput (Afb. 3).



Door te kijken naar de opbouw van de laatste rivierafzettingen (tot in het Vroeg-Holoceen, Tabel 1) en de overgang naar de eerste 'kust'-afzettingen direct daarbovenop, kunnen we beter begrijpen hoe dit gebied zich transformeerde. Het moment waarop en op welke hoogte rivieren veranderden in zoete getijdenrivieren zegt iets over de toenmalige positie van de kustlijn. De snelheid waarmee het zoete getijdengebied zich landinwaarts uitbreidde geeft belangrijke informatie over zeespiegelstijging, kustontwikkeling en verschuivingen in de positie van de belangrijkste riviermondingen van Rijn en Maas.

Bouwput ondergronds station Blijdorp

- 20 - 18 m onder NAP: een Vroeg-Holocene Rijn rivierafzetting

De diepste ontsloten afzettingen (Formatie van Kreftheneye) werden gekenmerkt door gestapelde scheefgelaagde sets die ooit afgezet moeten zijn als zandbank in een riviergeul (Afb. 2A-C). De sedimenten bestonden uit grindloos, (matig) fijn zand. Op enkele plekken kwamen in de scheefgelaagde sets bijgespoelde plantenresten voor met onder andere veel bladmateriaal van eik en wilg (Afb. 2D). ¹⁴C-datering hiervan (zie

Grondboor en Hamer 2005, nr. 3 voor uitleg van deze methode), genomen op ca. 19 m onder NAP, geeft aan dat het riviersysteem actief was tot in het Laat-Boreaal (UtC-14955; 8300 ± 50 ¹⁴C jr; Tabel 2).

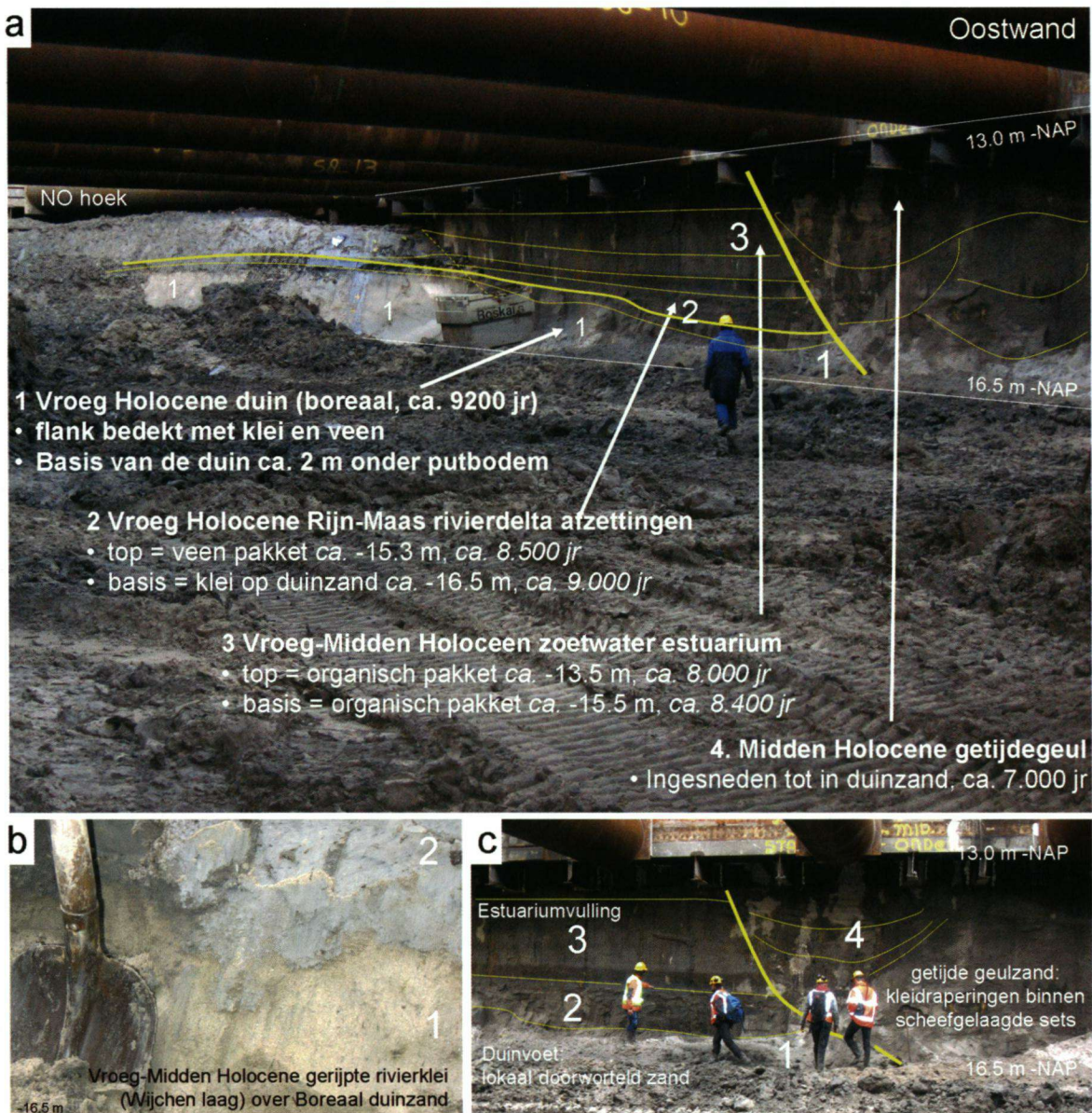
- 17,5 - 15,3 m onder NAP: Vroeg-Holocene rivierduinen
In de noordoosthoek van de bouwput lag op het Vroeg-Holocene systeem een zandpakket van 2 - 3 m dik (Afb. 3). De hogere ligging, de beperkte verbreiding (getuige boringen en sonderingen in de directe omgeving), de vrij uniforme korrelgrootte en sortering, het kalkarme zand, het hellende oppervlak en contact met overliggende pakketten wijzen er op dat het een opgewaaid duin betrof. Ook in de ruimere omgeving van de bouwput zijn her en der voorkomens van pakketten duinzand van beperkte dikte in vergelijkbare stratigrafische positie bekend. In de put werd het duin afgedekt door een dunne kleilaag met in de top een vegetatiehorizont die naar boven toe overging in veen. Dit veen is door het Bureau Oudheidkundig Onderzoek Rotterdam (BOOR) gedateerd en heeft een ouderdom van 8.500 jaar (Tabel 2).

Een belangrijk nieuw inzicht is dat het duincomplex in de bouwput rond ~9.200 jaar geleden opgestoven moet

Tabel 2: Blijdorp stratigrafie en ¹⁴C dateringen

Diepte	Sedimentbeschrijving	Ingestuurd	Monster	Ouderdom		
in m t.o.v. NAP	afzetting, afzettingmilieu	geselecteerd organisch materiaal	Lab. code en daterings- nummer	¹⁴ C jr voor 1950	meet fout (jr)	Gekalibreerd: Echte jaren voor 1950 n. Chr.
Overliggend licht brak estuarien pakket						
-13,39	Top bovenste gyttja	Brokje gyttja	GrA-32101	7160	± 45	8.100 à 7.900
-13,39	Top bovenste gyttja	Brokje gyttja	GrA-32037	7180	± 45	8.100 à 7.900
Gelamineerde zoetwater klei						
~ -15,5	Basis onderste gyttja	Diverse zaad- fragmenten, o.a. Els	UtC-14953	7610	± 60	8.550 à 8.300
-15,17	Top	Brok veen	GrN-30066	7560	± 40	8.400 à 8.200
-15,21	Veen op duinzand	Brok veen	GrN-30067	7560	± 40	8.400 à 8.200
-15,26	Basis	Brok veen	GrN-30068	7740	± 40	8.600 à 8.400
~ -15,5	Geulvulling (top)	Diverse zaad- fragmenten, o.a. Els en Wilg	UtC-14952	7730	± 42	8.600 à 8.400
~ -16,5	Geulvulling (organisch niveau)	Wilgezaad- fragmenten	UtC-14954	8210	± 50	9.400 à 9.000
T: -15,3 B: ~ -17,5	Rivierduinzand boven GW spiegel					ca. 9.200
~ -19,0	Matje plantenresten in scheef gelaagde set	Wilgezaad- fragmenten	UtC-14955	8300	± 50	9.450 à 9.100

Tabel 2. De ¹⁴C dateringsuitslagen zijn omgerekend naar kalenderjaren volgens de thans geldende conventie (INTCAL04). Op individuele dateringen is de onzekerheid in werkelijke ouderdom zo'n 150 jaar, en is hier op 50 jaar afgerond weergegeven. Met de serie dateringen is de ouderdom van intervallen sediment in de Blijdorp ontsluiting was tot ca. 100 jaar nauwkeurig te begrenzen.



Afbeelding 3. Oostwand en NO hoek van de bouwput, bezoek '13 - 16 m -NAP'. (A) Tegen de betonnen wand kleefte een nog een randje sediment, een vergelijkbaar effect als bij lakprofielen. Het verloop van organische en kleiige niveaus steekt af. In de NO hoek was een deel van het duinzand nog niet weg gegraven. (B) Rivierklei afgezet over de voet van de duin (Wijchen laag, hier 9.000 à 8.500 jaar oud). (C) Onderkant van een getijdgeul. De kleidraeperingen binnen de scheve gelaagdheid indiceren regelmatig kenterende stromingscondities.

zijn, dus pas laat in het Boreaal! Dit volgt uit de datering van de onderliggende rivierafzettingen, en uit versnijding van de duinzanden door een geultje dat elders in de put was ontsloten (UtC-14954; 8210 ± 50 ^{14}C jr; datering I in Afb. 4). De oeverwal van het geultje ligt over het duinzand (Afb. 4A). Zij vertoont de kenmerken van de zogenaamde Wijchen-laag: gerijpt, stug en blauwig van kleur en ingeschakeld tussen deltatische en rivierafzettingen. De grootte van de geul laat zien dat dit zeker geen hoofdloop van Rijn of Maas was.

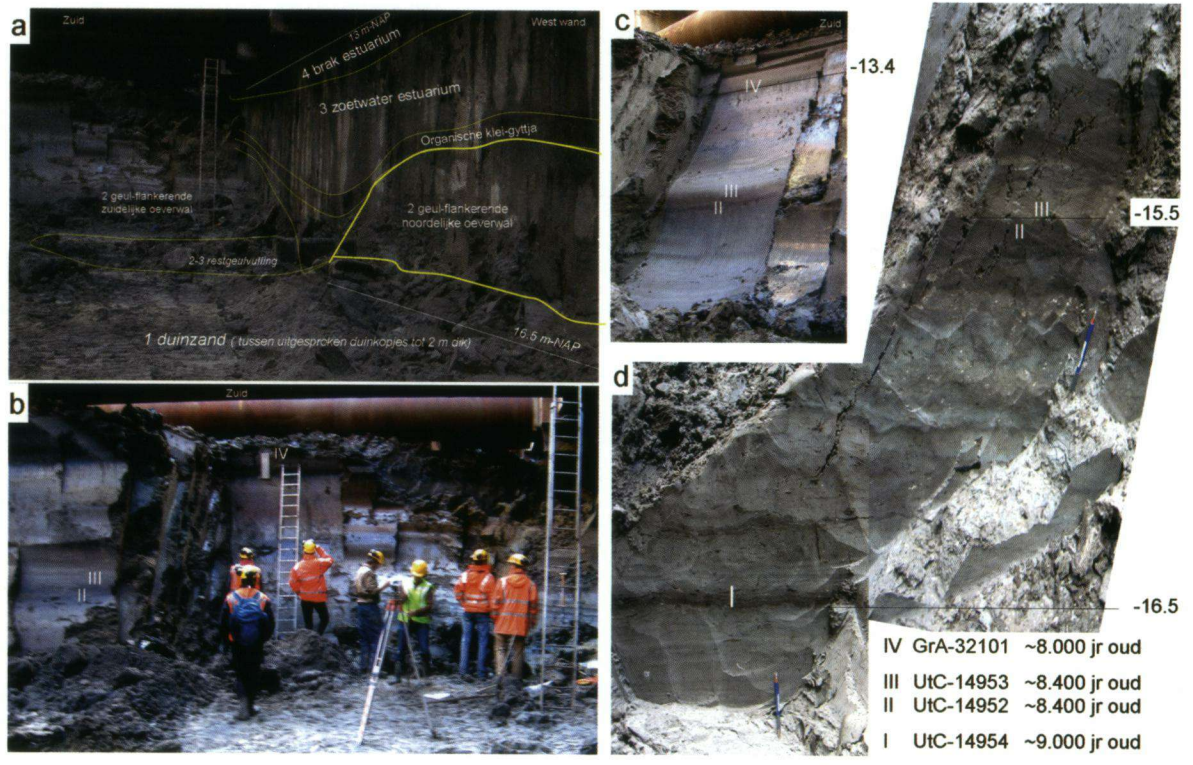
In een in de jaren '50 gegraven dokput bij Schiedam was al eens vastgesteld dat in het gebied duinafzettingen voorkwamen van Boreale ouderdom (Pons & Bennema, 1958). Ook in de Alblasserwaard vond Van der Woude (1983) eerder aanwijzingen voor verstuvingen tot in het Boreaal. In algemeenheid is echter lang aangenomen dat rivierduinen in de ondergrond van de Rijn-Maas delta ouder zijn, omdat rivierduinvorming in typegebieden verder bovenstrooms in Noord Limburg en het Land van Maas en Waal, vooral in het Jonge-Dryas en Preboreaal plaatsvond (~12.500 tot ~10.000 jaar geleden; Tabel 1). De Blijdorpwaarnemingen en dateringen bevestigen het bestaan en de relatief grote verbreiding van Boreale rivierduincomplexen in de ondergrond van Rotterdam en omgeving. Dit sluit overigens niet uit dat andere delen van het rivierduincomplex onder Rotterdam (bv. 'Hille-

gersberg') en stroomopwaarts in de Alblasserwaard (bv. 'Brandwijk', 'Den Donk') wel degelijk al in het Jonge-Dryas of Preboreaal waren opgestoven.

• **15,5 - 13,5 m onder NAP: zoetwater estuarium**
In de bouwput lag direct over het rivierduin een veenlaag (~15,2 m onder NAP), die ook verder in de bouwput vervolgd kom worden. Het golvende karakter markeerde de hoogteverschillen in het landschap met duinen en rivieren van 8.500 jaar geleden (Afb. 4A). Buiten de directe omgeving van het duin bestond de organische laag niet uit opgegroeid veen, maar uit in water bezonken fijn organisch materiaal en klei ('kleiige gyttja'). Pollen- en diatomeeënonderzoek aan de 22 cm dikke gyttjalaag op ca. - 15,5 m laten zien dat het pakket is afgezet in voedselrijk, ondiep zoet water met weinig tot geen rivierstroming. Er is geen enkele mariene indicator onder de diatomeeën noch in de pollen. Grote aantallen pollen van de gele plomp (*Nuphar lutea*) duiden op een dichte begroeiing van waterplanten. Bovenin het aangetroffen geultje is de gyttjalaag gedateerd op 8.400 jaar geleden (UtC-14952; 7730 ± 42 ^{14}C jr; Tabel 2; dateringen II en III in Afb. 4). Er was dus sprake van een verdrinkend landschap, met langs de duinflanken veengroei.

Bovenop de gyttja was een tot 2 meter dik, intern gelaagd kleipakket zichtbaar (Afb. 3, 4), dat afgedekt werd door

Afbeelding 4. Westwand van de put, bezoek '13 - 16 m -NAP'. (A) In de ontsluiting zijn drie organische lagen te zien, (B & C) rond -13,3 m, (C & D) -15,5 m en -16,5 m, gedateerd met ¹⁴C (dateringen I-IV; zie ook Tabel 2). De onderste is onderdeel van een restgeulvulling. De middelste markeert versnelde verdrinking rond 8.400 jr geleden. De bovenste markeert definitieve verdrinking in brak water rond 8.000 jr.



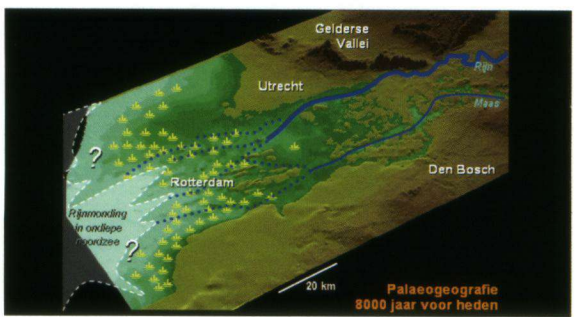
een tweede kleiige gyttjalaag. De kleilaag tussen -15,5 en -13,5 meter vertoont gelijkenis met de kleiige geulvulling direct onder de 8.400 jaar oude gyttjalaag (Afb. 4C). Wel heeft de bovenste kleilaag een grotere ruimtelijke verspreiding in de put: ze reikt tot over de oeverwal heen (Afb. 4A). De gelaagde klei is in hetzelfde waterlichaam afgezet, waarin even daarvoor de gyttja accumuleerde. De gelaagdheid is vrij onregelmatig van dikte en wordt vermoedelijk veroorzaakt door periodieke toenames in sedimentatie bij rivieroverstromingen. Getijdeninvloed kan wellicht een beperkte rol hebben gespeeld, maar was in het zoetwatergebied vermoedelijk gedempt door uitstromend rivierwater.

Op 13,5 m onder NAP bevond zich een tweede overdekkende organische laag (datering IV in Afb. 4). Deze laag kan op deze diepte onder vrijwel geheel Rotterdam gevolgd worden. De 13,5 - 13,3 m onder NAP organische laag is veel minder golvend dan de diepere laag van ca. 8.400 jaar oud (Afb. 4, ter hoogte van dateringen II en III): tijdens de sedimentatie van het gelaagde kleipakket zijn overgeërfde hoogteverschillen over een groot gebied vereffend. Ten tijde van de afzetting van deze laag, staken alleen de hoogste rivierduintoppen nog boven het maaiveld uit. Afbeelding 5 geeft een impressie van deze situatie. Dateringen in de bouwput wijzen op een ouderdom van 8.150 - 7.900 jaar [GrA-32037, -32101; Tabel 2]. In de onmiddellijke nabijheid van Blijdorp (Bouwput Centraal Station) vallen dateringen van zaden uit deze laag in hetzelfde bereik (Hijma, in voorb.).

• 13,5 m onder NAP en hoger: brak estuarium
De organische laag markeert de definitieve verdrinking van het Rijnmondgebied kort na 8.000 jaar geleden. Het zoete rivierenlandschap maakte plaats voor een milieu met duidelijke getijdeninvloed en op veel plaatsen brakke condities, waarvan de afzettingen tussen 13,5 en 8 m onder NAP voorkomen. Dit volgt uit sedimentologisch, paleogeografisch en paleo-ecologisch onderzoek in de ruimere omgeving van Rotterdam (o.a. Hijma, in voorb.). Het gebied blijkt onderdeel van een estuarium te zijn geworden, met geulen en opslibbende wadplaten, slikken, schorren en rietmoerassen ertussen. In de oostwand was de erosieve basis van een kleine estuariene getijdgeul uit deze tijd te zien (Afb. 3c).

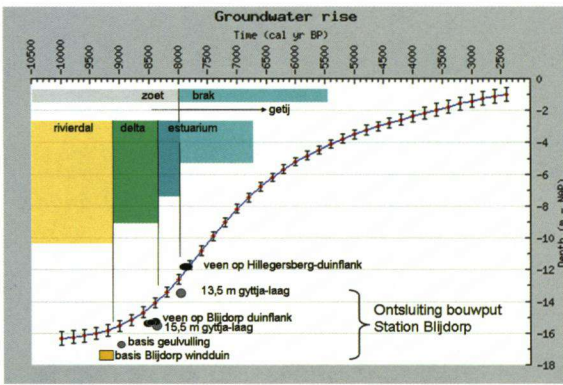
Vooraf ten westen, maar ook direct ten zuiden van Rotterdam neemt de 'zoete' rivierinvloed drastisch af en de getijde-invloed toe. Ook ter plekke van Rotterdam raakte het estuarium steeds meer verstoken van zoet Rijnwater doordat de belangrijkste Rijnmond voortdurend richting het noordoosten opschoof. Toch bleef zoetwatervegetatie de organische pakketten in het Rotterdamse domineren, door blijvende zoetwater input van Maas en kleinere Rijnstakken.

Afbeelding 5. Impressie van het Rijnmondgebied 8.000 jaar geleden. Rijn en Maas monden uit in een breed estuarium: het verdronken Rijn-Maas rivierdal uit het vroegste Holoceen. In Rotterdam is een zoetwatergetijdemilieu ontstaan, met uitgestrekte rietmoerassen (gele symbolen). Direct stroomopwaarts van Rotterdam steken de koppen van rivierduinen (geelbruin) boven het delta oppervlak (groen) uit.



Zeespiegelstijging in de riviermond: van zoet naar brak

Het in Blijdorp ontsloten interval van 21 tot 13 m onder NAP is een sedimentair archief van de overgang van een rivierengebied naar estuarium. De periode 9.000 - 8.000 jaar geleden kan beschouwd worden als de aanloop naar de definitieve transgressie, gemarkeerd door het ontstaan van brak estuariene condities. In eerste instantie verdringt het gebied in zoet water, pas daarna komt de zee. In het unieke geval van de Blijdorp bouwput kan dit niet alleen gesteld worden op basis van monsterdieptes en ¹⁴C dateringen (waar meetfouten op zitten, zodat op de exacte snelheden wel wat is af te dingen), maar blijkt de geleidelijkheid van de verandering ook uit de sedimentaire waarnemingen (getij-indicaties) en paleoecologische indicatoren (pollen, diatomeeën).



Afbeelding 6.

Nieuwe gegevens uit de Blijdorp ontsluiting vergeleken met een interpolatie van grondwaterspiegelstijging volgens Cohen (2003, 2005), op basis van toen beschikbare veendateringen in de omgeving. Dergelijke curves zijn voor iedere lokatie in de Rijn-Maas delta op te vragen via de website van de auteurs.

<http://www.geo.uu.nl/fg/palaeogeography/results/groundwater/model; Blijdorp: X=91, Y=438>.

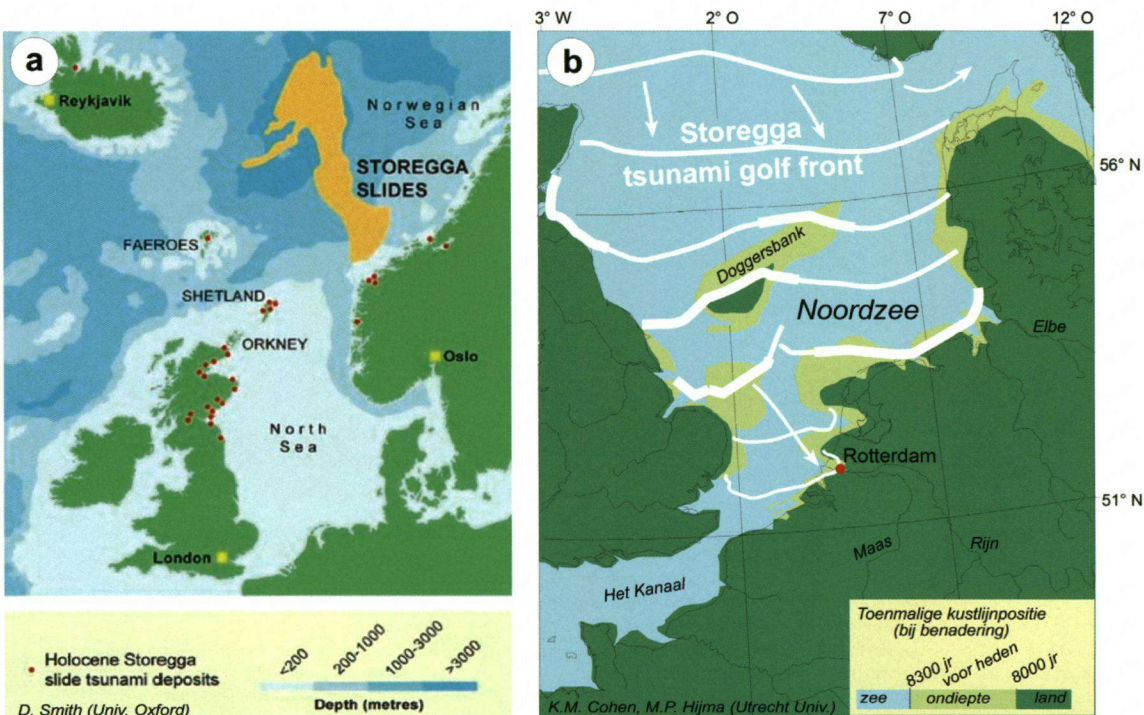
De basis van de duinafzettingen op ca. 17,5 m onder NAP is een goede indicatie van de grondwaterstand in dit gebied rond 9.200 jaar geleden. De datering van het veen op het duin, op 15,26 m onder NAP geeft de grondwaterstand weer van rond 8.500 jr geleden, die toen tot boven de duin was gestegen. De datering van de organische laag op -13,5 m NAP is in de bouwput minder goed aan een waterstand te koppelen, omdat het geen veen maar een onderwaterafzetting betreft. Bij Hillegersberg (2 km ten NW van de Blijdorpput) ligt ca. 8.000 jaar oud veen op 11,8 m onder NAP (Van de Plassche 1982; Berendsen et al. 2008). Dit duidt op ca. 2 meter waterdiepte ten tijde van de afzettingen, afgezien van waterstandschommelingen door eventueel getij.

In de periode na 8.000 steeg de waterspiegel in het Rotterdamse gebied bij benadering even snel als de zee-

spiegel op open zee (Van de Kiden et al., dit nummer; zie ook Afb. 6). In de periode voor 8.500 was dat zeker nog niet het geval, maar de grondwaterstand steeg al wel, geleidelijk aan versnellend. Tussen 9.200 en 8.500 jaar geleden bedroeg de stijgsnelheid ~0,30-0,35 m/eeuw; en tussen 8.500 en 8.000 maar liefst ~0,55-0,70 m/eeuw! De datering van de top van het veen-op-duinzand en basis-onderste-gyttja (GrN-30066; UtC-14953; Tabel 2) doen vermoeden dat de grootste versnelling in grondwaterstijging tussen 8.400 en 8.300 jaar geleden plaatsvond. Die acceleratie kan worden toegeschreven aan een wereldwijd vermoed sprongetje in de zeespiegelstijging, dat het gevolg was van het afsmelten van het laatste Noord-Amerikaanse landijs in de Hudsonbaai.

Het geleidelijk aanzwellen van de grondwaterstijgsnelheid (Afb. 6; 9.000 - 8.000 jaar geleden) is het gevolg van de voortdurende aanvoer van Rijn water. Op enige afstand stroomopwaarts van de monding in zee of lagune, remt het water in stroomsnelheid, waardoor zich water ophoopt en zich over enige afstand een veel flauwer verhang instelt (ca. 10 cm/km; 'deltaverhang') dan in het rivierdal verder stroomopwaarts (20 tot 30 cm/km). Dit geldt in een delta zowel voor het open water van de riviergeulen zelf, als voor het grondwater in het zeer natte overstromingsgebied ('kommen') tussen de geulen in.

De situatie met rivierdalverhang was in Rotterdam tot ca. 9.000 jaar geleden van toepassing. Zeespiegelstijging op enige afstand benedenstrooms zorgde daarna voor landwaartse opschuiving van de zone met flauw deltagverhang. Rotterdam kende in de periode ~9.000 - 8.500 jaar geleden een deltagverhang. De duinbedekkende oeverwal en bijbehorend duinversnijddend geultje (Afb. 4A) stammen uit deze korte periode. Tussen 8.500 - 7.000 schoof de Rijn-Maas delta verder op richting in midden Nederland en dat gebied is sindsdien lagunedelta gebleven, nu al zo'n 8000 jaar lang. In Rotterdam was daar en tegen slechts 500 à 700 jaar sprake van rivierdeltalandschap, want daarna werd het gebied estuarium en getij-gedomineerd.



Afbeelding 7. (A) Locatie Storregga onderzeese aardverschuiving (oranje) en waargenomen tsunami afzettingen langs Noordzee en Atlantische Oceaan (rode stippen). Bron: Prof. D. Smith, Oxford.

(B) Onzekere kustlijnposities Nederland ten tijde van de tsunami - zie tekst. De witte lijnen illustreren hoe het tsunami golf front de Noordzee binnen liep - de dikste lijnen zijn de vermoedelijke brekerzones.

De overgang van zoet naar brakke condities binnen één millennium onder invloed van zeespiegelstijging wordt in het bovenstaande dus als een relatief snel verlopend, maar in essentie geleidelijk proces beschouwd. Men kan zich echter afvragen of de transgressie over Rotterdam wel echt één en al geleidelijkheid was! Een snel opbouwend verdrinkingspakket zou juist ook goed moeten zijn in het als afzonderlijke laagjes registreren van extreme gebeurtenissen (Cohen et al., 2006), zoals zware stormvloed, grote rivieroverstromingen en/of bekende zeespiegelstijgingsprongetjes en tsunamis!

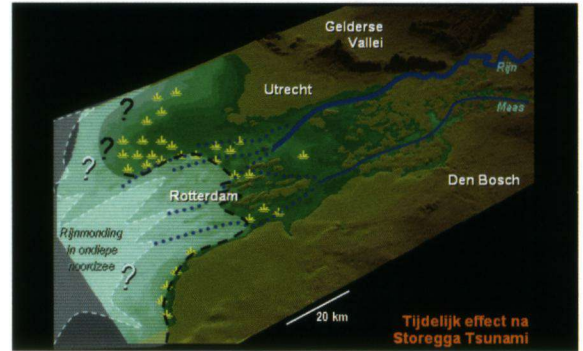
Impact van de Storegga-tsunami?

Uit opgeheven kustafzettingen in Schotland en Noorwegen is bekend dat op enig moment tussen 8.300 en 8.000 jaar geleden een middelgrote tsunami de Noordzee binnen rolde. De tsunami werd veroorzaakt door een onderzeese massabeweging in het Storegga gebied voor de kust van Noorwegen (Afb. 7A). Het is zeker dat de tsunami heeft plaatsgevonden en tegen de zuidelijke kust van de toenmalige Noordzee is uitgerold. Het is ook duidelijk dat het Rijnmondgebied toen een inham in de kust was. Ten noorden en zuiden ervan lagen oudere afzettingen van Rijn en Maas, bedekt met een dunne deken van dekzand, enkele meters hoger dan de toenmalige Rijn overstromingsvlakte (Afb. 5). Het Rijnmondgebied is redelijkerwijs het meest zuidelijke gebied waar impact van de uitrollende tsunami verwacht mag worden. Computermodellering door WL|Delft (Twigt & Blaas, 2007; Vatvani, 2007) sluit dan ook niet uit¹ dat Rotterdam 8.000 jaar geleden binnen het bereik van de Storegga-tsunami lag.

In de zuidelijke Noordzee zou de binnentrekende tsunami golf zijn gebroken rondom de Doggersbank, en daarbij zuidwaarts zijn uitgerold in en over het toenmalige Rijnmond gebied (Afb. 7B). Waar de kustlijn op het moment van de tsunami precies lag en hoe diep de zuidelijke Noordzee toen was is echter onzeker - alleen al omdat het onbekend is of een situatie 8.300 of 8.000 jaar geleden of daar tussen beschouwd moet worden. Aangezien de zeespiegelstijging toentertijd zo'n 0,5 m per eeuw bedroeg en het verdrinkende laagland maar zeer flauw helde, maakt dat al snel vele kilometers in kustlijnpositie uit. Ten tweede is de voormalige hoogte van het dekzandoppervlak ten westen van Den Haag-Haarlem en Texel-Vlieland vandaag de dag alleen te schatten. Sinds haar transgressie, heeft de Noordzee dat oppervlak afgevlakt en het geërodeerde materiaal naar de strandwallen verplaatst. Ten derde zakte de bodem van de Noordzee rondom Noord Nederland in het Holoceen harder dan in meer zuidelijker gedeelten, door een na-ijlend bodembewegingseffect ('glacio-isostasie') van de ijskappen op Scandinavië en Schotland uit de laatste ijstijd. Het ruimtelijke verschil zou opgeteld over de laatste 8.000 jaar van 1 m tot wel 5 m kunnen bedragen² - afhankelijk van hoe men geologische data over zeespiegels en ijsranden interpreteert en welke reconstructie door de modellers is overgenomen. Je kunt in ieder geval niet simpelweg de Noordzee-waterspiegel denkbeeldig 15 m laten zakken

en dan stellen dat de 15 m waterdieptelijn van nu, een kustlijn van ooit was!

De 13,5 m -NAP organische laag en het direct overliggende estuarium pakket zijn over een opvallend groot gebied te vervolgen. Tot zo'n 10 km ten NW en 15 km ten ZO van de Blijdorp put markeert dit contact stevast de overgang naar de eerste brak estuariene condities. Op een handvol locaties is het contact gedateerd (¹⁴C dateringen direct onder én direct boven het contact), stevast resulterend in ouderdommen 8150 à 7900 jr.



Afbeelding 8.

Vermoede impact van de uitrollende Storegga tsunami op de Rijnmond, 8.000 jr geleden. In vergelijking met Afb. 5 zijn vooral de rietmoerassen rondom de toenmalige riviermondingen weggeslagen.

Dit zijn sterke aanwijzingen dat het hier één plotseling inbraakgebeurtenis vanuit zee betreft, zoals een zware stormvloed of: inderdaad de uitrollende Storegga tsunami! Deze gebeurtenis trof een groot zoetwatergetijdegebied, met opslibbende riviermondingen van Rijn en Maas en uitgestrekte rietmoerassen, dat tussen 8.500 en 8.000 jaar geleden snel-maar-geleidelijk was ontstaan (Afb. 8). Wij achten het zeer waarschijnlijk dat de grootschalige overgang van zoet naar meer brakke condities rond 8.000 jaar geleden samenhangt met het uitrollen van de Storegga-tsunami in de Rijnmond, te meer omdat reeds bekend is dat deze tsunami de Noordzee tussen 8.300 en 8.000 jaar geleden binnenrolde (Afb. 7A). Als het een stormgebeurtenis was, dan was het een zeldzaam grote storm, die toevalligerwijs binnen het ouderdoms-domein van de Storegga-tsunami plaatsvond. De serie ¹⁴C-dateringen van onder Rotterdam sluit uit dat de wijdverbreide estuariene gyttja op 13,5 m -NAP het gevolg is van het vermoede Hudsonbaai-deglaciatie zeespiegelsprongetje, dat aan een bekende klimaatschommeling gekoppeld is van ongeveer 8.200 jaarlaagjes in de Groenlandse ijskap geleden. Het voorkomen van tenminste twee sterk op elkaar lijkende organische lagen van verschillende ouderdom (Blijdorp: ~8.400 jaar, 15,5 m onder NAP en 8.150 à 7.900 jaar, 13,5 m onder NAP; Afb. 4), maakt wel dat voorzichtigheid geboden is bij het al te snel aanwijzen van 'het'

¹ Het betreft een ad-hoc uitgevoerde modelleer-exercitie, met focus op het voltrekken van de onderzeese massabeweging en het voortplanten van de golven over het diepere deel van de Noordzee. Een gevoeligheidsanalyse op de aangenomen Nederlandse kustconfiguratie en zuidelijke Noordzee bathymetrie is niet uitgevoerd en het gedrag van de tsunami-golf in haar brekingszone is niet mee gemodelleerd. De modellering voorspelt een opzet van 0,5 meter in het Rijnmondingsgebied. Dat is in hoogte vergelijkbaar met een flinke storm, maar niet in snelheid, golfengte en vooral energie. De laatste maken dat tsunami-impact bij dezelfde opzet veel groter is dan de impact van een geleidelijk aanvallende en afzakkende storm.

² Dit is afhankelijk van hoe geologische data over zeespiegelstijging en ijsranden worden geïnterpreteerd, als mede van aannames over wereldwijde zeespiegelgeschiedenis en de elasticiteit en viscositeit van aardkorst en bovenste aardmantel her en der onder NW-Europa. De ruimtelijke verschillen in bodemdaling kunnen door geofysische modellen voor glacio-isostasie worden voorspeld - maar zijn in het Noordzeegebied ook direct uit relatieve zeespiegelgegevens af te leiden, bv. door België, Zeeland, Rotterdam, de Rijn-Maas delta, met Noord-Holland, de Dollard of het Weser estuarium te vergelijken (Kiden et al., 2002; Cohen, 2005; Vink et al., 2007).

tsunami laagje op één locatie. Het belangrijkste verschil tussen de twee lagen is de veel grotere ruimtelijke verspreiding van de bovenste - maar zo'n verschil kan nooit in een enkele bouwput of boring vastgesteld worden!

In ieder geval is de organische laag rond 13,5 m -NAP in de ruime omgeving van Rotterdam een markante gidslaag, afkomstig van één gebeurtenis rond ~8.000 jaar geleden, die vooral langs de randen van de Rijnmond zorgde voor een instantane omslag van zoet rietmoeras naar brak open water met sterkere getijde invloed (Afb. 8). Nabij de daadwerkelijke Rijnmond (Rotterdam ten NO van de Blijdorpput) was de verzilting minder, maar ook daar was er definitieve verdrinking en omslag naar open water met een grotere getijslag. Die plotselinge omslag volgde op eerder ingezette, geleidelijk versnellende maar nog overwegend zoete Vroeg-Midden-Holocene verdrinking van het Rotterdam gebied.

Meer weten?

<http://www.geo.uu.nl/fg/palaeogeography> Website 'Rhine-Meuse Delta Studies'
<http://noorderlicht.vpro.nl/afleveringen/26677726/> Radiouitzending 25 apr. 2006
<http://www.geo.uu.nl/staff/m.hijma>,
<http://www.geo.uu.nl/staff/k.cohen>,

MET DANK AAN:

Ruben Lelivelt, Jurrien Moree, Ton Guiran (BOOR Gemeente Rotterdam), Robert Berkelaar, Projectbureau RandstadRail en uitvoerders/aannemers RandstadRail. Ad van der Spek, Holger Cremer, Frans Bunnik (Deltares TNO Bouw & Ondergrond), Jan-Rik van den Berg, Wim Hoek (Universiteit Utrecht), Rike Wagner (Onderzoeksgroep Paleoecologie, Departement Biologie, Faculteit Bètawetenschappen, Universiteit Utrecht), Hanneke Bos (Paleoklimatologie en Geomorfologie, Faculteit Aard en Levenswetenschappen, VU Amsterdam), Daniël Twigt, Meinte Blaas (Deltares / WL|Delft Hydraulics), Freek Busschers (redactie G&H).

Het onderzoek van Hijma en Cohen wordt gefinancierd door Utrecht Centre of Geosciences: Universiteit Utrecht, Faculteit Geowetenschappen en TNO Bouw & Ondergrond. Het onderzoek en deze publicatie betreft ook gegevens verzameld en beschikbaar gesteld door BOOR Gemeente Rotterdam en het Ingenieursbureau van Gemeentewerken Rotterdam.

LITERATUUR

- Berendsen, H.J.A., Makaske, B., Van de Plassche, O., Van Ree, M.H.M., Das, S., Van Dongen, M., Ploumen S., & Schoenmakers, W., 2008.**
New groundwater-level rise data from the Rhine-Meuse delta. *Netherlands Journal of Geosciences | Geologie en Mijnbouw*, 86, pp. 333 - 354.
- Busschers, F.S., 2008.**
Unravelling the Rhine. *Academisch Proefschrift Vrije Universiteit Amsterdam / TNO B&O. Geology of the Netherlands* 1.
- Cohen, K.M., 2003.**
Differential Subsidence within a Coastal Prism. *Academisch Proefschrift Universiteit Utrecht / Nederlandse Geografische Studies* 316.
- Cohen, K.M., 2005.**
3D Geostatistical interpolation and geological interpretation of paleo-groundwater rise in the Holocene coastal prism in the Netherlands.

In: Giosan, L. & J.P. Bhattacharya (Eds.), *River Deltas - Concepts, models, and examples*. SEPM Special Publication 83, pp. 341 - 364.

Cohen, K.M., Hijma, M.P., Wagner, F., Hoek, W.Z., Blok, D. & Wolf, H. de, 2006.

The Storegga tsunami: A marked event at the base of the Rhine-Meuse delta? In: *Programme and Abstracts 8ste Nederlands Aardwetenschappelijk Congres, Veldhoven, 24-25 april 2006*, Abstract 31.

Hijma, M.P. (in voorbereiding; verwacht einde 2009) - Academisch proefschrift Universiteit Utrecht.

Hoek, W.Z., 2008.

The Last Glacial-Interglacial Transition. *Episodes*, 31 (june 2008).

Kiden, P., Denys, L. & Johnston, P., 2002.

Late Quaternary sea-level change and isostatic and tectonic land movement along the Belgian-Dutch North Sea coast: geological data and model results. *Journal of Quaternary Science* 17: pp. 535 - 546.

Pons, L.J. & Bennema, J., 1958.

De morfologie van het Pleistocene oppervlak in westelijk Midden-Nederland, voor zover gelegen beneden gemiddeld zeeniveau (N.A.P.). *Tijdschrift van het Koninklijk Nederlandsch Aardrijkskundig Genootschap* 75 (2): pp. 121 - 138.

Twigt, D. & Blaas, M., 2007.

Storegga tsunami simulations. Report Z3929, R&D Coastal Flooding, WL | Delft Hydraulics.

Vatvani, D., 2007.

Storegga tsunami simulations for the Dutch Coasts. In: *WL|Delft Hydraulics, R&D Annual Report 2006; Sect. hydrodynamics*, pp. 8 - 22.

Van Dijk, G.J., Berendsen, H.J.A. & Roeleveld, W., 1991.

Holocene water level development in the Netherlands' river area; implications for sea-level reconstruction. *Geologie en Mijnbouw* 70 (4): pp. 311 - 326.

Van Geel, B., Bohncke, S.J.P. & Dee, H., 1981.

A palaeoecological study of an upper Late-glacial and Holocene sequence from 'De Borchert', The Netherlands. *Review of Palaeobotany and Palynology* 31, pp. 367 - 448.

Van de Plassche, O., 1982.

Sea-level change and water-level movements in The Netherlands during the Holocene. *Academisch Proefschrift, Vrije Universiteit Amsterdam*.

Van der Woude, J.D., 1983.

Holocene paleoenvironmental evolution of a perimarine fluvial area - Geology and paleobotany of the area surrounding the archaeological excavation at the Hazendonk river dune (western Netherlands). *Analecta Praehistorica Leidensia* XVI: 1-124. Eerder verschenen als academisch proefschrift (1981), Vrije Universiteit Amsterdam.

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 (25 - 28): pp. 3249 - 3275.