

# Onderzeese afglijdingen en tsunami's in het Kwartair van NW-Europa

Pieter A.M. Gaemers<sup>1</sup>

## Inleiding

Wat een tsunami is weet tegenwoordig bijna iedereen sinds de grote en verwoestende tsunami's van december 2004 bij Sumatra en van maart 2011 bij Japan. Veel minder bekend is, dat ook Noordwest-Europa ruim 8000 jaar geleden getroffen is door een hele grote tsunami en ook door andere, kleinere. De laatste hele grote tsunami in West-Europa vond plaats op 1 november 1755 en werd veroorzaakt door een zware zeebeving voor de kust van Portugal. De aardbeving met een magnitude van 9 of iets minder op de schaal van Richter en de daardoor veroorzaakte tsunami met golven tot 20 meter hoog hebben Lissabon toen grotendeels verwoest en er zijn toen tienduizenden mensen in die stad omgekomen, maar ook elders langs de kusten van Portugal, Spanje en Marokko. Als u meer wilt weten over tsunami's, kunt u daarover lezen in de internetsites die ik aan het eind van de literatuurlijst heb bijgevoegd.

In dit artikel wordt een samenvatting gegeven van de omvangrijke geologische literatuur over tsunami's in Noordwest-Europa, die in de laatste jaren sterk in de belangstelling staan.

## Kort overzicht van kwartaire tsunami's

Er zullen niet veel Nederlanders zijn, die weten dat ook ons land in het verleden getroffen is door tsunami's. Deze tsunami's zijn, voor zover bekend, allemaal veroorzaakt door zeebevingen die reusachtige onderzeese aardverschuivingen (afglijdingen) voor de kust van Noorwegen in werking hebben gezet. In de laatste half miljoen jaar moeten er minstens zeven grote onderzeese afglijdingen geweest zijn die grote tsunami's hebben veroorzaakt, minstens één keer in de 100.000 jaar (Solheim et al., 2005). Deze tsunami's hebben niet alleen in Noorwegen, IJsland en Groenland, maar ook in landen rond de Noordzee overstromingen veroorzaakt.

Er zijn nu verschillende holocene tsunami's door middel van afzettingen op het land bekend. De oudste vond zo'n 10.000 jaar geleden in Zuidwest-Noorwegen plaats (Bøe et al., 2007). Sedimenten die door deze tsunami zijn afgezet, zijn gevonden in het gebied van Boknafjord en zijn gekoppeld aan de Arneset-afglijding. Veel archeologische vuursteenartefacten van het Laat-Paleolithicum tot Vroeg-Mesolithicum zijn daar toen de zee ingespoeld.

De tweede Storegga-afglijding, die ongeveer 8100 jaar geleden plaatsvond, heeft de grootste tsunami in Noordwest-Europa veroorzaakt die we momenteel kennen. Deze is heel goed gedocumenteerd en wordt in de volgende paragraaf uitvoerig behandeld.

Een minder krachtige, maar toch nog aanzienlijke tsunami heeft afzettingen achtergelaten op de Shetland-Eilanden ten noordoosten van Schotland tot minstens 10 meter boven

het toenmalige zeeniveau; deze heeft ongeveer 5500 jaar geleden plaatsgevonden (Bondevik et al., 2005b). Het is nog niet bekend, welke afglijding deze tsunami heeft teweeggebracht. Het zou de Trænadjupet-afglijding geweest kunnen zijn.

Op dezelfde eilanden is er door dezelfde auteurs ook nog een zandlaagje van een kleinere tsunami gevonden van ongeveer 1500 jaar geleden, die tot minstens 5 à 6 meter boven de toenmalige gemiddelde vloedlijn reikte. Ook van deze tsunami is de oorzaak nog niet bekend.

## Kort overzicht van grote onderzeese aardverschuivingen langs de Noorse kust

In de laatste jaren zijn er door geologen steeds meer grote onderzeese aardverschuivingen (in het vervolg steeds kortweg afglijdingen genoemd) ontdekt. De meeste moeten nog verder in detail onderzocht worden en moeten nog preciezer gedateerd worden. Waarschijnlijk hebben ze allemaal tsunami's veroorzaakt. Als ze eerder plaatsvonden dan het Weichselien (dit is de laatste ijstijd), is de kans klein, dat er op het land nog tsunami-afzettingen van bewaard zijn gebleven, omdat latere vergletsjeringen deze afzettingen zeker weggeërodeerd zullen hebben. Alleen in gebieden die sterk gedaald zijn, zoals West- en Noord-Nederland, zouden er misschien in de ondergrond resten van gevonden kunnen worden. De hoogten van de oploop boven zeeniveau van oudere tsunami's zullen dan ook meestal niet meer rechtstreeks vastgesteld kunnen worden. Die oudere tsunami's zullen dan alleen indirect uit de gegevens van de afglijdingen afgeleid kunnen worden.

De volgende grote afglijdingen langs de Noorse kust zijn inmiddels bekend. Ik geef ze in alfabetische volgorde:

- 1 Andøya-afglijding, noordkant van de Lofoten, Noord-Noorwegen, minder dan 10.000 jaar geleden (Holoceen) (Laberg et al., 2000).
- 2 Arneset-afglijding, Zuidwest-Noorwegen, ca. 10.000 jaar geleden (eind Weichselien-glaciaal) (Bøe et al., 2007).
- 3 Sklunnadjupet-afglijding, Midden-Noorwegen, ca. 250.000 jaar geleden (Elsterien-glaciaal) (Rise et al., 2006).
- 4 Storegga-afglijding 1, West-Noorwegen, gedateerd op 30.000 – 50.000 jaar geleden (Bugge et al., 1987, 1988); meer waarschijnlijk lijkt mij de voorlaatste ijstijd, het Saalien, omdat er nog geen tsunami-afzettingen van deze afglijding op het land gevonden zijn.
- 5 Storegga-afglijding 2, West-Noorwegen, ca. 8100 jaar geleden, (Vroeg-Holoceen) (Haflidason et al., 2005).
- 6 Trænadjupet-afglijding, Midden-Noorwegen ten zuiden en westen van de Lofoten, ruim 4000 jaar geleden (Midden-Holoceen) (Laberg & Vorren, 2000; Laberg et al., 2002).

### De Storegga-afglijdingen en tsunami's

Dankzij de exploratie van de Noorse Zee voor het vinden van olie en gas, zijn er duidelijke bewijzen gevonden dat er in het verleden grootschalige onderzeese aardverschuivingen hebben plaatsgevonden vóór de Noorse kust. Tom Bugge (1983) ontdekte de Storegga-afglijdingen en is de eerste geweest die daarover gepubliceerd heeft. Toen daarmee was gebleken, dat de sedimenten op de zeebodem hier niet altijd stabiel zijn, wilden geologen er meer van weten, omdat dit wellicht een bedreiging vormde voor de olie- en gaswinning. Daardoor is er een grote stroom van vele tientallen, zelfs enkele honderden publicaties op gang gekomen over de Storegga-afglijdingen (in het Engels 'slides' genoemd), zodat we er nu heel veel van weten, en wel voornamelijk van de tweede Storegga-afglijding. Als je op Google scholar (<http://scholar.google.nl>) 'Storegga' intypt verschijnt er een spreekwoordelijke goudmijn aan publicaties, waarvan ik voor dit artikel gretig gebruik heb gemaakt.

Er worden drie Storegga-afglijdingen beschreven. 'Storegga' is het Noorse woord voor 'grote rand'. Op ongeveer 70 kilometer voor de kust van Midden-Noorwegen (het Møre-gebied) ligt namelijk een scherpe overgang van het continentaal plat (= shelfzee) naar de continentale helling. Deze scherpe overgang is ontstaan door minstens drie afglijdingen, die over een lengte van maar liefst 290 kilometer langs de kust een enorm litteken hebben achtergelaten. De hoeveelheden sedimentair gesteente die in die afglijdingen van de rand van het continentaal plat de diepzee zijn ingegleden, zijn immens groot. Deze afglijdingen behoren daardoor tot de grootste die er op aarde bekend zijn. Tensamen zijn ze 450 meter dik en hun totale volume bedraagt volgens Bugge et al., (1987) ongeveer 5600 km<sup>3</sup>. Maar waarschijnlijk is het totale volume nog groter geweest, want als we de latere schattingen van de tweede Storegga-afglijding optellen bij de schatting van de eerste afglijding, komen we op een volume van 6280 tot 7080 km<sup>3</sup>. De grootste afstand die het gesteente over de oceanbodembodem heeft afgelegd, bedraagt maar liefst meer dan 850 kilometer! Het totale gebied waarover de Storegga-afglijdingen hebben plaatsgevonden, bedraagt 112.500 km<sup>2</sup>. Deze afglijdingen hebben afzettingsgesteenten van kwartaire tot vroeg-eocene ouderdom de diepte in gesleurd (Bugge et al., 1987, 1988). De eerste Storegga-afglijding was de grootste van de drie, waarbij ongeveer 3880 km<sup>3</sup> gesteente langs de continentale helling gegleden is; deze heeft volgens Bugge et al. (1987, 1988) tussen 30.000 en 50.000 jaar geleden plaatsgevonden, maar zoals hierboven al aangegeven lijkt mij een hogere ouderdom meer waarschijnlijk. Al is er nog geen bewijs voor een tsunami die door deze afglijding veroorzaakt is, toch moet er gezien de kolossale omvang van de afglijding een grote tsunami geweest zijn. Bij deze afglijding is alleen een geografisch zeer uitgebreid pakket van jongere sedimenten de diepzee in geleden. Het schuifvlak waarlangs de afglijding plaatsvond, lag niet zo diep als in de tweede afglijding en er is meer sediment in suspensie gegaan, waardoor er relatief veel turbidieten gevormd zijn. De tweede afglijding is de best onderzochte van de drie,

waarin oudere, meer geconsolideerde sedimenten zijn meegevoerd dan in de eerste; deze heeft een strook van 6 tot 8 kilometer breedte dicht bij de kust weggesneden en heeft daardoor ongeveer 450 km<sup>2</sup> van het continentale plat afgehaald (Jansen et al., 1987); daarbij werden grote blokken sedimentair gesteente in hun geheel meegevoerd tot in de abyssale vlakte, de bodem van de diepzee; twee reusachtige plakken gesteente, met een dikte van 150 tot 200 meter en met een oppervlakte tot 10 bij 30 kilometer groot, werden over een gemiddelde helling van slechts 0,3° over een afstand van 200 kilometer naar beneden getransporteerd (Bugge et al., 1988). De totale hoeveelheid gesteentemateriaal die hierin meegevoerd werd, wordt op 2400 tot 3200 km<sup>3</sup> geschat, waarvan rond 250 km<sup>3</sup> is afgezet als turbidieten (Hafidason et al., 2004, 2005). In het diepste deel van het Noorse Bekken (tot 3500 meter) en op een afstand van meer dan 750 kilometer van het litteken langs het continentale plat, is een meer dan 6 meter dikke, fijnkorrelige turbidiet afgezet (Bugge et al., 1988). De totale oppervlakte waarover het gesteentemateriaal is vervoerd, bedraagt ongeveer 95.000 km<sup>2</sup> (Hafidason et al., 2005)! Dat is meer dan twee keer de totale oppervlakte van Nederland! De hoeveelheid gesteente in deze afglijding zou genoeg zijn om heel Schotland onder een laag sediment te bedekken van 80 meter (Masson et al., 2010). Bondevik et al. (2005b) hebben berekend, dat de omvang en hoogte van de tsunami te verklaren zijn met een snelheid van de afglijding van 25 tot 30 meter per seconde. Door veldwaarnemingen te combineren met computersimulaties, hebben Bondevik et al. (2005a) de hoogte van de eerste tsunami-golf in de noordoostelijke Atlantische Oceaan berekend op ongeveer 3 meter. Met hun berekeningen zou deze golf de Shetland- en Faerøer-Eilanden in anderhalf uur bereikt hebben en in twee uur de oostkust van IJsland. Doorrekenend moet de tsunami het dichtstbijgelegen deel van Groenland binnen 3 uur bereikt hebben. De snelheid waarmee de tsunami-golf zich verplaatste, kan daaruit afgeleid worden en moet ongeveer 400 kilometer per uur bedragen hebben.

Het kolossale van deze gebeurtenis is voor een mens bijna niet te bevatten, maar dat het een echte ramp in de vorm van een grote tsunami tot gevolg had, is natuurlijk wel te begrijpen. Met radioactieve koolstofdateringen, die gecorrigeerd zijn met dateringen aan jaarringen van bomen, hebben dezelfde auteurs vastgesteld, dat de tweede afglijding ongeveer 8100 jaar geleden heeft plaatsgehad (Hafidason, et al., 2005).

De derde afglijding was aanzienlijk kleiner van omvang en heeft een litteken achtergelaten dat een oppervlak had van slechts een derde van dat van de tweede afglijding. Het laatstgevoerde litteken was beperkt tot het bovenste deel van het litteken dat de tweede afglijding bij de rand van het continentaal plat had gevormd (Bugge et al., 1988; Dawson et al., 1991). De derde afglijding vond ongeveer 5700 jaar geleden plaats (Hafidason et al., 2005). Tenslotte is er 2200 tot 2800 jaar geleden nog een kleine afglijding geweest, die vermoedelijk slechts 1 km<sup>3</sup> gesteentemateriaal in beweging heeft gezet (Hafidason et al., 2005).

### Geografische uitgebreidheid van de tsunami van de tweede Storegga-afglijding

De hypothese dat er vóór de kust van Noorwegen een grote tsunami is opgewekt door een onderzeese afglijding, is het eerst voorgesteld door Svendsen (1985). Daarna kon men in Noordwest-Europa gericht gaan zoeken naar bewijzen in afzettingsteentent. Die zijn er in steeds meer landen inderdaad gevonden.

De eerste twee Storegga-afglijdingen moeten vanwege hun reusachtige omvang allebei grote tsunami's veroorzaakt hebben. Hoewel de eerste afglijding een grotere omvang gehad heeft dan de tweede, zijn er tot nu toe alleen bewijzen gevonden voor de tweede Storegga-tsunami, die ongeveer 8100 jaar geleden optrad. Door de snelheid waarmee een tsunami zich over het land voortbeweegt, en het grote volume water dat erbij betrokken is, kan het water over een vlak gebied diep landinwaarts komen (in het Engels 'run-in' genoemd) en kan het ook een tijdje hellingopwaarts lopen langs steile kusten door de snelheid, de massa van het water en de hoogte van de golf (in het Engels 'run-up'). De zeespiegelstijging die veroorzaakt werd door het afsmelten van grote hoeveelheden landijs, ging rond 8100 jaar geleden nog heel snel. Dat laten reconstructies van de zeespiegelcurve duidelijk zien. Daarom is het belangrijk een zo nauwkeurig mogelijke ouderdomsbepaling te hebben, om een zo exact mogelijk zeespiegelniveau te kunnen bepalen ten tijde van de tsunami. De primaire nauwkeurigheid van de ouderdomsbepaling met radioactief koolstof ( $^{14}\text{C}$ ) is niet groter dan plus of min 250 jaar, maar door kalibratie met jaarringen van bomen is de nauwkeurigheid te vergroten tot 8110 jaar  $\pm$  50 jaar (Weninger et al., 2008). Om onduidelijke redenen gaan deze auteurs er vervolgens vanuit, dat er een grotere onzekerheid zou zijn van 8100 jaar  $\pm$  100 jaar. Deze ouderdomsbepaling komt goed overeen met een gekalibreerde ouderdom van Bondevik et al. (2003) van ongeveer 8150 jaar geleden. Met de reconstructie van de zeespiegelcurve van Behre (2003) betekent dit, dat de zeespiegel ten tijde van de tsunami 17 meter  $\pm$  1 meter lager stond dan tegenwoordig, maar Weninger et al. (2008) durven ten onrechte niet nauwkeuriger te gaan dan 17 meter  $\pm$  2 meter. Afzettingen van de tsunami worden gekenmerkt door een erosieniveau, waarboven een zandlaagje met resten van mariene organismen zoals schelpen en kiezelwieren (diatomeeën) gevonden wordt. Ook worden er dikwijls verspoelde stukjes veen, klontjes verspoelde silt en verspoelde resten van landplanten in aangetroffen. Het erosieniveau veroorzaakt een discordant contact en is het gevolg van de aanvankelijk eroderende werking van de tsunami-golf, die bij voortgaande overspoeling van het land zeezand met skeletresten van zeedieren meeneemt en op het land afzet. Bondevik et al. (1997a en b) hebben de tsunami-afzettingen bestudeerd in kustnabije zoetwatermeren langs de westkust van Midden-Noorwegen. Zij kwamen tot de conclusie, dat het water van de tsunami direct tegenover de afglijding maximaal 11 tot 12 meter boven het toenmalige zeeniveau is gekomen. Verder naar het noorden moet het water tot 6-7

meter boven het gewone niveau zijn gekomen. Romundset & Bondevik (2010) vonden tsunami-afzettingen in meren in Finnmark, het noordelijkste deel van Noorwegen, op 2 à 3 meter boven het toen gemiddelde hoogwater. Daarmee hebben zij het bewijs gevonden dat de Storegga-tsunami tot in de Barentszee merkbaar geweest moet zijn. Het is niet verbazingwekkend, dat Storegga-afzettingen ook gevonden zijn op de Faeröer-Eilanden (Grauert et al., 2001) en op de Shetland-Eilanden, waar ze langs de gewone, open kust tot op 20 meter boven het toenmalige zeeniveau zijn gevonden (Bondevik et al., 2005b). Maar in inhammen op de Shetland-Eilanden bereikten afzettingen van de tsunami hoogten tot minstens 25 meter (Smith et al., 2004). Ook langs de oostkust van Schotland en de noordoostkust van Engeland zijn veel bewijzen gevonden. Daar is de afzetting van zand door de tsunami meestal 3 tot meer dan 5 meter hoger gekomen (Smith et al., 2004); deze auteurs gaan er trouwens van uit, dat de tsunami feitelijk nog enkele meters hoger geweest moet zijn, aangezien afzetting alleen mogelijk is als de in het water zwevende zandkorrels op de bodem terecht zijn gekomen.

Via het grote Schotse estuarium van de Firth of Forth, waaraan Edinburgh ligt, zijn zandlaagjes van de Storegga-tsunami tot maar liefst 80 kilometer landinwaarts aangetroffen (Bryant, 2008). Een zware stormvloed zou zoiets nooit kunnen bewerkstelligen, alleen een grote tsunami. Smith et al. (2004) vermelden bovendien, dat de kusten van Groot-Brittannië door de tsunami over een lengte van minstens 600 km overstroomd werden. Dawson & Smith (2000) vonden tsunami-afzettingen tot 4,6 meter boven het toenmalige zeeniveau in Noord-Schotland ten westen van de Orkney-Eilanden, dus buiten het Noordzeebekken. Maar de tsunami reikte nog verder. Hansom & Briggs (1991) vonden bewijzen in sedimenten in het noordwesten van IJsland. En ook in het oosten van Groenland (Wagner et al., 2007) en zelfs in het noordoosten van Groenland (Klug, 2009) heeft de tsunami zijn sporen in de sedimenten nagelaten. Tenslotte is het zeer waarschijnlijk, dat de tsunami zelfs een overstroming in een groot deel van het Oostzeegebied heeft veroorzaakt. Veski (2002) beschrijft een afwijkend en duidelijk zandlaagje van 1 à 2 centimeter dikte met brakwaterdiatomeeën dat in Estland gevonden is, dat bewijst, dat de zee plotseling en kortstondig het laagland overstroomd heeft in de periode dat de tsunami plaatsvond. Met zo'n verreikende verbreiding naar het noorden, noordwesten en zuidwesten moet er ook een invloed van de Storegga-tsunami in het zuidelijke deel van de Noordzee en dus ook in Nederland geweest zijn. Het promotieonderzoek van Marc Hijma in de delta van de Rijn en de Maas (Hijma, 2009) heeft de veranderingen in dit gebied ten tijde van de tsunami aan het licht gebracht. Vóór de tsunami bestond het landschap rond Rotterdam uit een zoetwatergetijdenmilieu met uitgestrekte rietmoerassen; door de tsunami moesten de rietmoerassen weggeslagen zijn, waardoor een groot deel van de delta open water werd dat door opslibbing in een waddenlandschap met brak estuariene condities overging en waarin geulen en wadplaten gevonden zijn. In een

21 meter diepe put bij Blijdorp in Rotterdam wordt de basis van de definitieve verdrinking van het Rijnmondgebied gevormd door een gyttja-laag die zich bevindt tussen 13,5 en 13,3 meter onder N.A.P. (Een gyttja is een afzetting bestaande uit modder waarin zeer veel (fijn) plantaardig materiaal voorkomt). Deze gyttja heeft een grote uitbreiding onder vrijwel heel Rotterdam (en waarschijnlijk nog veel verder) en kan vanwege zijn uitgestrektheid en ouderdom eigenlijk niets anders zijn dan de tsunami-laag. Het is het begin van een 5,5 meter dik pakket van brakke wadafzettingen (13,5 tot 8 meter onder N.A.P.) (Cohen & Hijma, 2008; Hijma et al., 2009).

Hoe kunnen deze grote onderzeese afglijdingen ontstaan? De onderzeese hellingen, waarlangs de gesteentemassa's zijn afgegleden, zijn vergeleken met de hellingen waarbij aardverschuivingen op het land gewoonlijk optreden slechts heel gering, hooguit enkele graden. Zo is de tweede Storegga-afglijding ontstaan in een gebied waar de helling gemiddeld slechts 0,6 tot 0,7° bedraagt (Kvalstad et al., 2005). De grote afglijdingen ontstaan door een combinatie van factoren. Allereerst moet er in de omgeving een zware aardbeving plaatsvinden. Door het smelten van het landijs op Scandinavië dat tot ongeveer 3 kilometer dik is geweest, verdwijnt het gewicht van het ijs steeds meer, waardoor Scandinavië isostatisch omhoog komt. Dat ijs heeft niet of nauwelijks gelegen op de zeebodem vóór de kust van Noorwegen, zodat dit gebied niet omhoog zal komen, maar juist zal zakken als compensatie voor het stijgen van het vasteland. Direct voor de Noorse kust en parallel daaraan lopend, bestaan inderdaad grote breuken, waarlangs door de bewegingen in de aardkorst aan het einde van een ijstijd flinke verticale verplaatsingen moeten hebben plaatsgehad. Deze moeten de oorzaak zijn van de zware aardbevingen.

Aan het einde van een ijstijd tot in het begin van een interglaciaal (warmere tijd tussen twee ijstijden) treedt er een versnelde afsmelting van gletsjerijs op, waardoor er in korte tijd veel gesteentemateriaal dat in het ijs opgesloten zat, in zee wordt afgezet. Daardoor ontstaat er in de onderliggende fijnkorrelige sedimenten een overdruk in het water dat zich in de poriën bevindt; dat veroorzaakt instabiliteit in een dik pakket aardlagen (Solheim et al., 2005). Er zijn allerlei bewijzen voor de overdruk van het poriënwater. Het pokdalige landschap op de huidige zeebodem en schoorsteenstructuren in die bodem die aan de oppervlakte koepelvormige structuren vormen, wijzen op het onderdruk van het bovenliggende gesteente uitdrijven van vloeistof uit het sediment, wat vergemakkelijkt werd door de vorming van methaangas (Paull et al., 2008). Als methaan gevormd wordt door rotting van organisch materiaal in sedimenten in diep en koud water, kan dit door chemische binding aan watermoleculen in die sedimenten in vaste vorm opgeslagen worden als methaanhydraten. Dit zijn kleurloze kristallen die ook wel 'brandend ijs' worden genoemd. Als deze methaanhydraten instabiel worden, kunnen ze in afzettingen in diep water leiden tot hellinginstabiliteit (Mienert & Posewang, 1999). Nabil et al. (2004) hebben aangetoond, dat methaanhydraten in de bovenste aardlagen waar ze in

voorkomen, kunnen smelten en uit elkaar vallen, als de temperatuur en druk toenemen. Aan het einde van een ijstijd, wanneer het warmer wordt, loopt de temperatuur van het zeewater op en ook de temperatuur van de zeebodem-sedimenten. Door het afsmelten van het landijs stijgt de zeespiegel en neemt de druk dus ook toe onder de steeds groter wordende watermassa. De gasontwikkeling die dan uit de gashydraten ontstaat, draagt natuurlijk bij aan de instabiliteit van het gesteentepakket en het effect daarvan is veel groter dan Bouriak et al. (2000) denken. Deze instabiliteit zal juist in het onderste, zeewaartse deel van de Storegga-helling beginnen en dan landwaarts en hogerop verder gaan als een retrogressieve verzwakking (Nabil et al., 2004). De grootschalige afglijdingen zijn dus, door verschillende oorzaken tesamen, gekoppeld aan de klimaatverandering bij de overgang van een ijstijd naar een interglaciaal (Bryn et al., 2005). Om tenslotte de extreem grote afstand te kunnen verklaren waarover de aardverschuivingen hebben plaatsgevonden, moet het schuifvlak toenemend vochtig geworden zijn of zal er op het schuifvlak aquaplaning opgetreden zijn (Issler et al., 2002). Interessant is verder, dat er bewijs is, dat de tsunami uit vier opeenvolgende golven bestond, waarvan de eerste de grootste was, de tweede iets kleiner en de twee volgende aanzienlijk kleiner waren. Dit werd geconstateerd in het Kvennavatnet-meer bij Bjugn in Noorwegen, waar vier grovere laagjes van tsunami-afzettingen kort boven elkaar werden gevonden met ingespoelde mariene fauna-elementen, die van elkaar gescheiden zijn door rustiger, fijnkorreliger afzettingen, waarin alleen resten van landplanten voorkomen (Bondevik, 1997). Als bevestiging daarvan werden in Oost-Groenland in het Loonmeer-bekken eveneens vier vergelijkbare laagjes van vier opeenvolgende golven aangetroffen (Wagner et al., 2007). Het is voorstelbaar, dat de verticale beweging langs een onderzeese breuk die gepaard ging met een zware aardbeving, de eerste tsunami-golf heeft veroorzaakt. De afglijding kan iets later plaatsgevonden hebben en mogelijk de tweede tsunami-golf teweeggebracht hebben.

#### Literatuur

- Behre, K.-E. 2003. Eine neue Meeresspiegelkurve für die südliche Nordsee. Transgressionen und Regressionen in den letzten 10.000 Jahren. In E. Strahl, F. Bungenstock, J. Ey, S. Wolters, R. Kiepe, L. Spath (eds.), Probleme der Küstenforschung im südlichen Nordseegebiet. (*Niedersächsisches Institut für historische Küstenforschung*), Iseensee Verlag. Oldenburg: 9–63.
- Bøe, R., L. Prosch-Danielsen, A. Lepland, C.B. Harbitz, P. Gauer, F. Løvholt & M. Høgestøl, 2007. An early Holocene submarine slide in Boknafjorden and the effect of a slide-triggered tsunami on Stone Age settlements at Rennesøy, SW Norway. *Marine Geology*, 243 (1-4): 157-168.
- Bondevik, S., F. Løvholt, C. Harbitz, J. Mangerud, A. Dawson & J.I. Svendsen, 2005a. The Storegga Slide tsunami – comparing field observations with numerical simulations. *Marine and Petroleum Geology*, 22: 195-208.

- Bondevik, S., J. Mangerud, S. Dawson, A. Dawson & Ø. Lohne, 2003. Record-breaking height for 8000-year-old tsunami in the North Atlantic. *Eos*, 84 (31): 289-300. (Deels te vinden op <https://bora.uib.no/bitstream/1956/729/1/Bondevik-al-03-EOS.pdf>).
- Bondevik, S., J. Mangerud, S. Dawson, A. Dawson & Ø. Lohne, 2005b. Evidence for three North Sea tsunamis at the Shetland Islands between 8000 and 1500 years ago. *Quaternary Science Reviews*, 24 (14-15): 1757-1775.
- Bondevik, S., J.I. Svendsen, G. Johnsen & J. Mangerud, 1997a. The Storegga tsunami along the Norwegian coast, its age and runup. *Boreas*, 26: 29-53.
- Bondevik, S., J.I. Svendsen & J. Mangerud, 1997b. Tsunami sedimentary facies deposited by the Storegga tsunami in shallow marine basins and coastal lakes, western Norway. *Sedimentology*, 44 (6): 1115-1131.
- Bouriaik, S., M. Vanneste & A. Saoutkine, 2000. Inferred gas hydrates and clay diapirs near the Storegga Slide on the southern edge of the Vøring Plateau, offshore Norway. *Marine Geology*, 163 (1-4): 125-148.
- Bryant, E., 2008. Tsunami: The Underrated Hazard (2nd Edition). *Springer, Praxis Books in Geophysical Sciences*, Berlin, Heidelberg, New York, 330 p. (1st edition: 2001, 320 p., 3rd edition: 2010, 330 p.).
- Bryn, P., K. Berg, C.F. Forsberg, A. Solheim and T.J. Kvalstad, 2005. Explaining the Storegga Slide. *Marine and Petroleum Geology*, 22, (1-2): 11-19.
- Bugge, T. 1983. Submarine slides on the Norwegian continental margin, with special emphasis on the Storegga area. *Continental Shelf Institute Publication* 110, 152 p.
- Bugge, T., S. Befring, R.H. Belderson, T. Eidvin, E. Jansen, N.H. Kenyon, H. Holtedahl & H.P. Sejrup, 1987. A giant three-stage submarine slide off Norway. *Geo-Marine Letters*, 7 (4): 191-198.
- Bugge, T., R.H. Belderson & N.H. Kenyon, 1988. The Storegga Slide. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A*, 325: 357-388.
- Cohen, K.M. & M.P. Hijma, 2008. Het Rijnmondgebied in het Vroeg-Holoceen: inzichten uit een diepe put bij Blijdorp (Rotterdam). *Grondboor en Hamer* 62 (3-44): 64-71.
- Dawson, A.G., D. Long, D.E. Smith, S. Shi & I.D.L. Foster, 1991. Tsunamis in the Norwegian Sea and North Sea caused by the Storegga submarine landslides. In: S. Tinti (ed.), Tsunamis in the World, Fifteenth International Tsunami Symposium. *Kluwer Academic Publishers, Dordrecht*, p. 31-42.
- Dawson, S. & D. E. Smith, 2000. The sedimentology of Middle Holocene tsunami facies in northern Sutherland, Scotland, UK. *Marine Geology*, 170 (1-2): 69-79.
- Grauert, M.S., S. Björck & S. Bondevik, 2001. Storegga tsunami deposits in a coastal lake on Suduroy, the Faroe Islands. *Boreas* 30: 263-271.
- Hafidason, H., R. Lien, H.P. Sejrup, C.F. Forsberg & P. Bryn, 2005. The dating and morphometry of the Storegga Slide. *Marine and Petroleum Geology*, 22 (1-2): 123-136.
- Hafidason, H., H.P. Sejrup, A. Nygård, J. Mienert, P. Bryn, R. Lien, C.F. Forsberg, K. Berg & D. Masson, 2004. The Storegga Slide: architecture, geometry and slide development. *Marine Geology*, 213 (1-4): 201-234.
- Hansom, J.D. & D.J. Briggs, 1991. Sea-level change in Vestfirðir, north west Iceland. In: J.K. Maizels & C. Caseldine (eds.), Environmental Change in Iceland: Past, Present and Future, *Kluwer Academic Publishers, Dordrecht*, p. 79-91.
- Hijma, M.P., 2009. Early Holocene drowning history of the Rhine Mouth, including 8.2 ka sea-level jumping and fluvial-coastal coevolution. *PhD thesis, Rijksuniversiteit Utrecht*.
- Hijma, M.P., K.M. Cohen, G. Hoffmann, A.J.F. Van der Spek & E. Stouthamer, 2009. From river valley to estuary: the evolution of the Rhine mouth in the early to middle Holocene (western Netherlands, Rhine-Meuse delta). *Netherlands Journal of Geosciences - Geologie en Mijnbouw*, 88 (1): 13-53.
- Issler, D., F.V. De Blasio, A. Elverhøi & T. Ilstad, 2002. Issues in the assessment of gravity mass flow hazard in the Storegga area off the western Norwegian coast. In: J. Locat & J. Mienert (eds.), Submarine Mass Movements and Their Consequences. *Advances in Natural and Technological Hazards Research. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht*, p. 255-266.
- Jansen, E., S. Befring, T. Bugge, T. Eidvin, H. Holtedahl & H.P. Sejrup, 1987. Large submarine slides on the Norwegian continental margin: Sediments, transport and timing. *Marine Geology*, 78: 77-107.
- Klug, M., 2009. The late Quaternary environmental and climatic history of North-East Greenland, inferred from coastal lakes. *PhD Thesis, Universität Köln, Deutschland*.
- Kvalstad, T.J., L. Andresen, C.F. Forsberg, K. Berg, P. Bryn & M. Wangen, 2005. The Storegga slide: evaluation of triggering sources and slide mechanics. *Marine and Petroleum Geology*, 22 (1-2): 245-256.
- Laberg, J. & T. O. Vorren, 2000. The Trænadjupet Slide, offshore Norway - morphology, evacuation and triggering mechanisms. *Marine Geology*, 171 (1-4): 95-114.
- Laberg, J., T. O. Vorren, J. A. Dowdeswell, N. H. Kenyon & J. Taylor, 2000. The Andøya Slide and the Andøya Canyon, north-eastern Norwegian-Greenland Sea. *Marine Geology*, 162 (2-4): 259-275.
- Laberg, J., T.O. Vorren, J. Mienert, P. Bryn & R. Lien, 2002. The Trænadjupet Slide: a large slope failure affecting the continental margin of Norway 4,000 years ago. *Geo-Marine Letters*, 22 (1): 19-24.
- Masson, D. G., R.B. Wynn & P.J. Talling, 2010. Large Landslides on Passive Continental Margins: Processes, Hypotheses and Outstanding Questions. *Advances in Natural and Technological Hazards Research, 1, Submarine Mass Movements and Their Consequences*, 28: 153-165.
- Mienert, J. & J. Posewang, 1999. Evidence of shallow and deep-water gas hydrate destabilizations in North Atlantic polar continental margin sediments. *Geo-Marine Letters*, 19 (1-2): 143-149.

- Nabil, S., P. Cochonat, J.-P. Foucher, J. Mienert, 2004. Effect of gas hydrates melting on seafloor slope instability. *Marine Geology*, 213 (1-4): 379-401.
- Paull, C.K., W. Ussler, W.S. Holbrook, T.M. Hill, R. Keaten, J. Mienert, H. Hafidason, J.E. Johnson, W.J. Winters and T.D. Lorenson, 2008. Origin of pockmarks and chimney structures on the flanks of the Storegga Slide, offshore Norway. *Geo-Marine Letters*, 28 (1): 43-51.
- Rise, L., D. Ottesen, O. Longva, A. Solheim, E.S. Andersen & S. Ayers, 2006. The Sklinnadjupet slide and its relation to the Elsterian glaciation on the mid-Norwegian margin. *Marine and Petroleum Geology Volume 23, Issue 5, June 2006, Pages 569-583*.
- Romundset, A. & S. Bondevik, 2010. The first radiocarbon dated sea-level curves from northernmost Norway. *Oral Presentation Abstracts*.
- Smith, D. E., S. Shi, R. Cullingford, A. Dawson, S. Dawson, C. Firth, I. Foster, P. Fretwell, B. Haggart, L. Holloway & D. Long, 2004. The Holocene Storegga Slide tsunami in the United Kingdom. *Quaternary Science Reviews* 23: 2291-2311.
- Solheim, A., K. Berg, C.F. Forsberg & P. Bryn, 2005. The Storegga Slide complex: repetitive large scale sliding with similar cause and development. *Marine and Petroleum Geology*, 22 (1-2): 97-107.
- Svendsen, J.I., 1985. Standforskynning på Sunnmøre. Biogeostratigrafiske undersøkelser på Gurskøy, Leinøy og Bergsøy. *Thesis, University of Bergen*, 142 p.
- Veski, S., 2002. Prehistoric man and the Baltic Sea at Pärnu, southwestern Estonia. Shifting coasts and a possible tsunami in the Baltic Sea 8400–8200 years BP. - Environmental Catastrophes and Recoveries in the Holocene. Congress, August 29 - September 2, 2002. *Department of Geography & Earth Sciences, Brunel University, Uxbridge, UK*.
- Wagner, B., O. Bennike, M. Klug & H. Cremer, 2007. First indication of Storegga tsunami deposits from East Greenland. *Journal of Quaternary Science* 22 (4): 321-325.
- Weninger, B., R. Schulting, M. Bradtmöller, L. Clare, M. Collard, K. Edinborough, J. Hilpert, O. Jöris, M. Niekus, E.J. Rohling & B. Wagner, 2008. The catastrophic final flooding of Doggerland by the Storegga Slide tsunami. *Documenta Praehistorica*, 35, 24 p. (te downloaden van internet).
- [http://vliz.be/docs/groterede/GR12\\_tsunami.pdf](http://vliz.be/docs/groterede/GR12_tsunami.pdf)
- [http://vo.malmbergmethodes.nl/Sites/Files/0000060106\\_WW%20havo%20aarde%20H1%20CaseQest1.pdf](http://vo.malmbergmethodes.nl/Sites/Files/0000060106_WW%20havo%20aarde%20H1%20CaseQest1.pdf)  
(red.: werkt de link niet? Zoek 'CaseQest1' in Google.)
- <http://www.ecomare.nl/ecomare-encyclopedie/natuurlijk-milieu/waterhuishouding/waterstromingen/tsunami-in-de-noordzee>
- <http://www.kennislink.nl/publicaties/hoe-ontstaan-tsunamis-en-waarom>
- <http://www.kennislink.nl/publicaties/tsunami-waarschuwingssysteem-hebben-wij-er-eeen-nodig-in-de-noordzee>
- <http://www.natuurinformatie.nl/nnm.dossiers/natuurdatabase.nl/i003350.html>
- <http://www.natuurwetenschappen.be/active/sciencenews/archive2005/tsunami>
- <http://www.nerc-bas.ac.uk/tsunami-risks/index.html>
- <http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu.shtml>  
Op deze site van de U.S.A. zijn alle tsunami's van de laatste 4000 jaar te vinden. Ook is een tsunamiposter te downloaden, waarop een wereldkaart staat met alle tsunami's.

<sup>1</sup>Pieter A. M. Gaemers, Ververstraat 6 c, 2312 LT Leiden, e-mail: [pieterenlenygaemers@online.nl](mailto:pieterenlenygaemers@online.nl)

#### Internetsites over tsunami's

- <http://nl.wikipedia.org/wiki/Stormvloed>
- <http://en.wikipedia.org/wiki/Tsunami>
- <http://geology.com/records/biggest-tsunami.shtml>
- <http://home.planet.nl/~kwant017/wl/tsunami.htm>
- [http://nl.wikipedia.org/wiki/Allerheiligenvloed\\_\(2006\)](http://nl.wikipedia.org/wiki/Allerheiligenvloed_(2006))
- <http://nl.wikipedia.org/wiki/Tsunami>
- [http://nl.wikipedia.org/wiki/Watersnood\\_van\\_1953](http://nl.wikipedia.org/wiki/Watersnood_van_1953)
- <http://kennislink.nl/publicaties/tsunami-de-onstuitbare-golf>
- <http://www.kennislink.nl/publicaties/tsunami-vernietigende-waterkracht>