



# Tsunami's in de Noordzee en Noordwest-Europa door afglijdingen voor de Noorse kust

PIETER A. M. GAEMERS  
HONORAIR MEDEWERKER  
OERTIJD MUSEUM  
BOXTEL  
PAMGAE143@GMAIL.COM

Weinig mensen in Nederland hebben er een idee van dat Nederland ooit getroffen is of getroffen zou kunnen worden door een tsunami. Zelfs deskundigen onder geologen of waterbouwkundig ingenieurs zouden kunnen denken dat we dat in ons land niet zouden kunnen meemaken. In krantenartikelen is vaker te lezen dat ingenieurs ervan overtuigd zijn dat onze dijken en de Deltawerken nog steeds zo goed zijn dat ze het gevaar van de zeespiegelstijging nog een flinke poos kunnen tegenhouden. Het scenario van een tsunami die op Nederland af zou kunnen komen, wordt door veel ingenieurs in Nederland zelfs niet serieus genomen. Omdat de Atlantische Oceaan passieve continentranden heeft en er dus geen subductiezones zijn waar oceaankorst onder het continent zou kunnen schuiven, hetgeen dikwijls met zware aardbevingen gepaard gaat, kunnen ook geologen denken dat tsunami's Noordwest-Europa niet gauw zullen optreden.



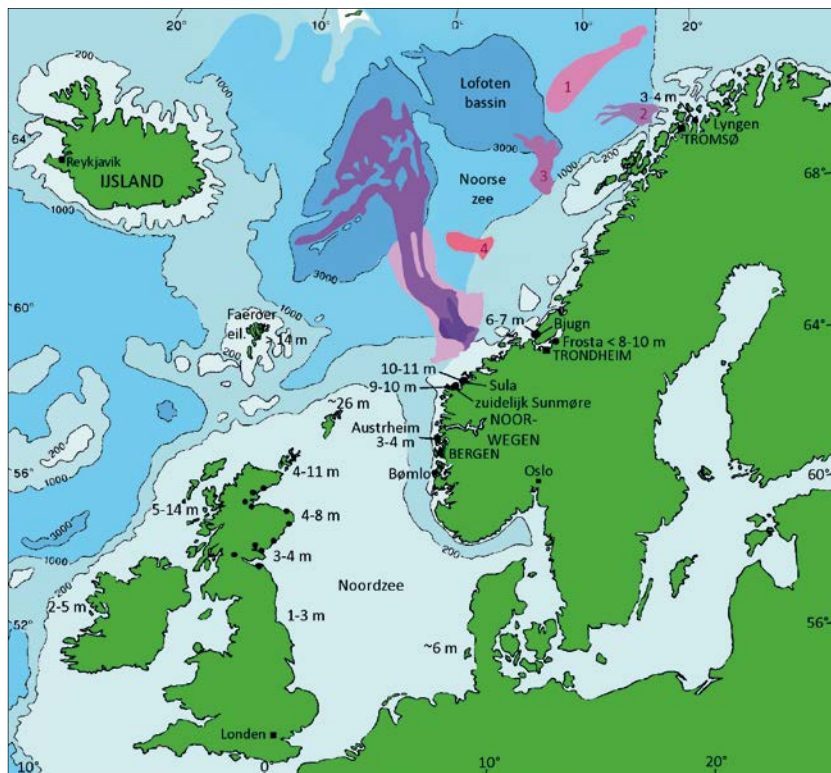
AFBEELDING 1 LINKER PAGINA. | *Reconstructie van het stadium van de tsunamigolf, veroorzaakt door de Storegga-afglijding, waarbij IJsland, de Færoer- en Shetlandeilanden werd bereikt. (naar: [https://www.southampton.ac.uk/oes/research/projects/frequency\\_and\\_emplacement\\_dynamics\\_of\\_submarine\\_landslides.page](https://www.southampton.ac.uk/oes/research/projects/frequency_and_emplacement_dynamics_of_submarine_landslides.page))*

## Inleiding

Wat een tsunami is, weet tegenwoordig bijna iedereen sinds de grote en verwoestende tsunami's van december 2004 bij Sumatra, van maart 2011 bij Japan en van de maar liefst twee in 2018 in Indonesië. Veel minder bekend is dat ook Noordwest-Europa, inclusief het Noordzeegebied, ruim 8000 jaar geleden getroffen is door een hele grote tsunami. En ook meerdere kleinere hebben zich hier voorgedaan. Door het zoeken naar olie en gas voor de Noorse kust zijn er veel onderzeese afglijdingen (aardverschuivingen) van dikke sedimentpakketten gevonden, waarvan al gauw duidelijk werd dat die tsunami's hebben veroorzaakt. Bugge is de eerste geweest die daarover in 1983 gepubliceerd heeft. Er zijn sindsdien meer dan 150 publicaties verschenen over meerdere afglijdingen en de gevolgen ervan.

De laatste hele grote tsunami die West-Europa getroffen heeft, vond plaats op 1 november 1755 en werd veroorzaakt door een zeer zware zeebeving voor de kust van Portugal, die een magnitude van ongeveer 9 op de schaal van Richter had. Deze veroorzaakte een tsunami met golven tot 20 meter hoog waardoor Lissabon toen grotendeels verwoest is. Alleen al in die stad kwamen tienduizenden mensen om, maar ook elders langs de kusten van Portugal, Spanje en Marokko waren veel mensen slachtoffer.

Tsunami's worden doorgaans veroorzaakt door zware aardbevingen met een kracht van 7 of meer op de schaal van Richter waarbij grote onderzeese verticale



AFBEELDING 2. | *Kaart met de uitbreiding van de belangrijkste onderzeese afglijdingen sinds het Midden-Pleistoceen. De schattingen van de hoogten van de run-up tijdens de tweede Storegga-afglijding langs de kusten worden in meters aangegeven. Plaatselijke verschillen kunnen heel groot zijn (naar Bondevik et al., 1997a, Bondevik et al., 2003, Laberg & Vorren, 1993, 1996, 2000, Laberg et al. 2000, 2002a, 2002b, aangevuld met data uit andere bronnen en eigen interpretatie van run-ups uit de literatuur).*

verplaatsingen optreden. Ook kan een tsunami ontstaan door een onderzeese instorting van een deel van een steile vulkaan. Dit is op 22 december 2018 gebeurd bij de Anak Krakatau tussen Java en Sumatra. Er zijn echter maar weinig vulkanen op aarde die zulke steile wanden hebben en tsunami's kunnen veroorzaken, vermeldt geofysicus Govers in de NRC van 29 december 2018. Ook als in zee een grote komvormige krater, een caldera, instort, kan er een tsunami ontstaan. Andere mogelijke oorzaken zijn een pyroklastische golf uit een vulkaan die heet gas en puin met snelheden tot 700 km per uur in zee doet stromen, en een grote hoeveelheid heet magma die in zee stroomt waardoor het water verdampt en explosies veroorzaakt. Natuurlijk kunnen ook combinaties, zoals een zware aardbeving tijdens een vulkaanruptie, een tsunami teweegbrengen. Tenslotte kunnen ook grote onderzeese afglijdingen tsunami's veroorzaken (Afb. 1).

## Omvangrijke onderzeese afglijdingen voor de kust van Noorwegen

Onderzeese afglijdingen langs de Noorse kust zijn bekend vanaf het Laat-Plioceen tot het Holoceen, maar de meeste komen voor vanaf het Midden-Pleistoceen (Evans *et al.*, 2005; Safronova *et al.*, 2017). Van noord naar zuid zijn er sinds het Midden-Pleistoceen minstens vijf belangrijke onderzeese afglijdingen ('slides') langs de Noorse kust geweest en één ten westen van de Barentsz-zee (Afb. 2).

### 1. Bjørnøya-afglijding, ten westen van de Barentsz-zee.

Deze afglijding is beschreven door Laberg & Vorren (1993, 1996) en vond 200.000 tot 300.000 jaar geleden plaats. De afgeleden sedimentpakketten omvatten 1100 km<sup>3</sup> materiaal en beslaan een gebied van 12.500 km<sup>2</sup>. De maximale afstand waarover het gesteentemateriaal getransporteerd is, de run-out genoemd, bedraagt ongeveer 400 km en de maximale diepte tot waarop gesteentemassa's verplaatst zijn, bedraagt ruim 3000 m.

In dit gebied hebben drie eerdere, nog veel grotere, afglijdingen plaatsgevonden (Hjelstuen *et al.*, 2007). De eerste, die plaatsvond tussen 0,78 en 1 miljoen jaar geleden, had een volume van 25.500 km<sup>3</sup> en besloeg een oppervlakte van 115.000 km<sup>2</sup>. De tweede vond tussen 0,5 en 0,78 miljoen jaar





geleden plaats. Hierbij ging het om een volume van 24.500 km<sup>3</sup> over een oppervlakte van 120.000 km<sup>2</sup>. De derde vond minder dan 500.000 jaar geleden plaats met een volume van 11.600 km<sup>3</sup>. Deze beslaat een oppervlakte van 66.000 km<sup>2</sup>.

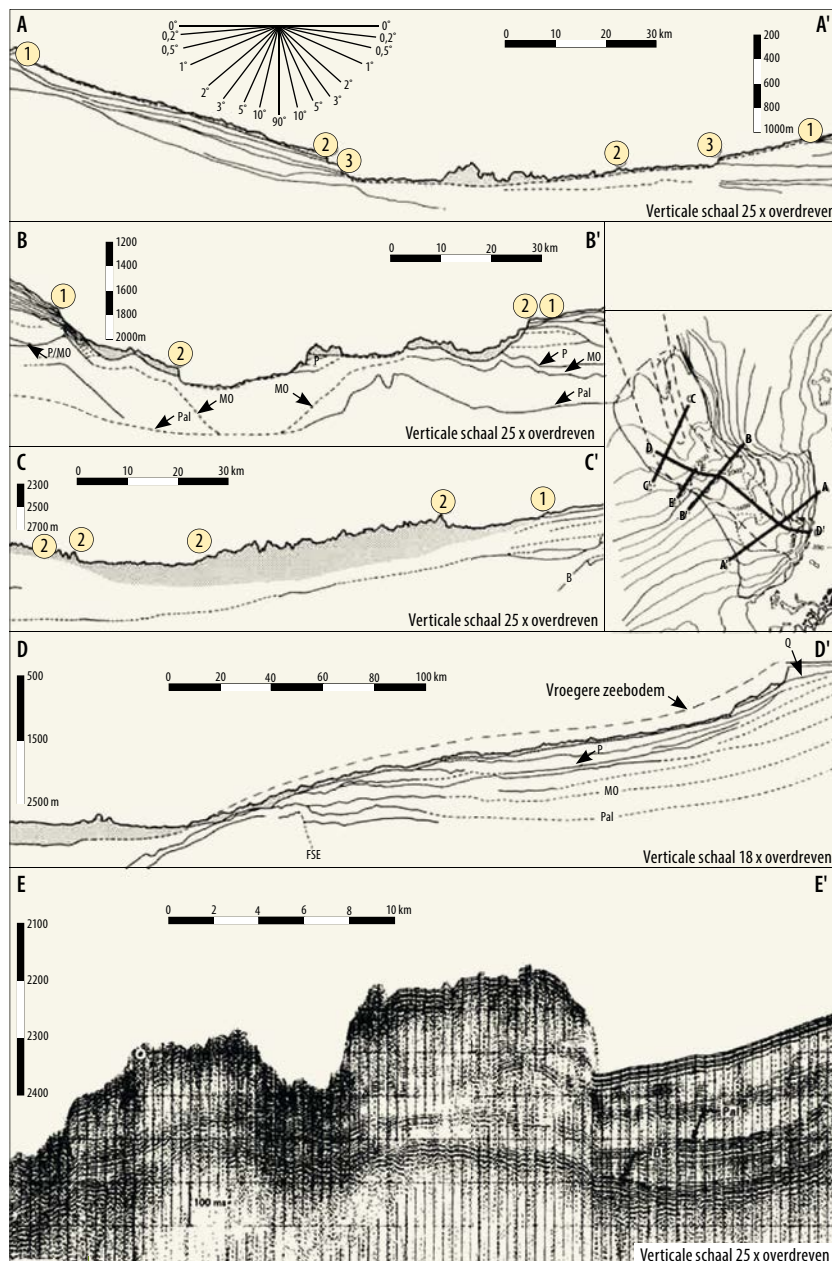
**2. Andøya-afglijding**, ten noorden van de Lofoten, Noord-Noorwegen (zie Afb. 2), en is beschreven door Laberg *et al.* (2000) en beslaat een gebied van ongeveer 9700 km<sup>2</sup> waarvan het 'litteken' (het gedeelte waar de sedimenten verdwenen zijn) ongeveer 3600 km<sup>2</sup> inneemt. De run-out is ongeveer 190 km tot op een diepte van meer dan 2500 m. Omdat er heel weinig of geen jongere, ongeconsolideerde sedimenten over de afgleden massa liggen, moet de afglijding tijdens het Holoceen hebben plaatsgehad. De exacte ouderdom van de afglijding is nog niet vastgesteld.

**3. Trønadjupet-afglijding**, ten zuiden en ten westen van de Lofoten, Noordwest-Noorwegen. Deze afglijding is beschreven door Laberg & Vorren (2000), Laberg *et al.* (1999, 2002a, b). De afglijding vond waarschijnlijk tijdens het Midden-Holoceen plaats, ruim 4000 <sup>14</sup>C jaar geleden. Deze afglijding beslaat een gebied van ongeveer 14.100 km<sup>2</sup>. Het afgleden materiaal omvat ongeveer 9100 km<sup>2</sup> en het litteken ongeveer 5000 km<sup>2</sup>. De hoeveelheid verplaatst gesteentemateriaal wordt geschat op 500-700 km<sup>3</sup> (Løvholt *et al.*, 2017) tot 900 km<sup>3</sup> (Laberg, 2002a, b). De run-out is ongeveer 200 km. Sedimenten zijn verplaatst tot een diepte van meer dan 3000 m in het Lofoten-Bekken.

#### 4. Sklinnadjupet-afglijding

Midden-Noorwegen ten zuidoosten van het Vøring Plateau, ca. 250.000 jaar geleden (Elsterien-glaciaal) en is beschreven door Rise *et al.* (2006). Het litteken van de afglijding op het bovenste deel van de continentale helling is 90 km breed. Dit litteken is begraven onder jongere sedimenten. De hellingshoek bedraagt slechts 0,5°. Glaciaal gesteentepuin en fijner sediment uit het Elsterien tot een dikte van 350 m werd de diepte in gevoerd.

**5. Storegga-afglijdingen**, West-Noorwegen (zie Afb. 2 met respectievelijk de kleuren roze, licht- en donkerpaars). Het totale gebied waarover de

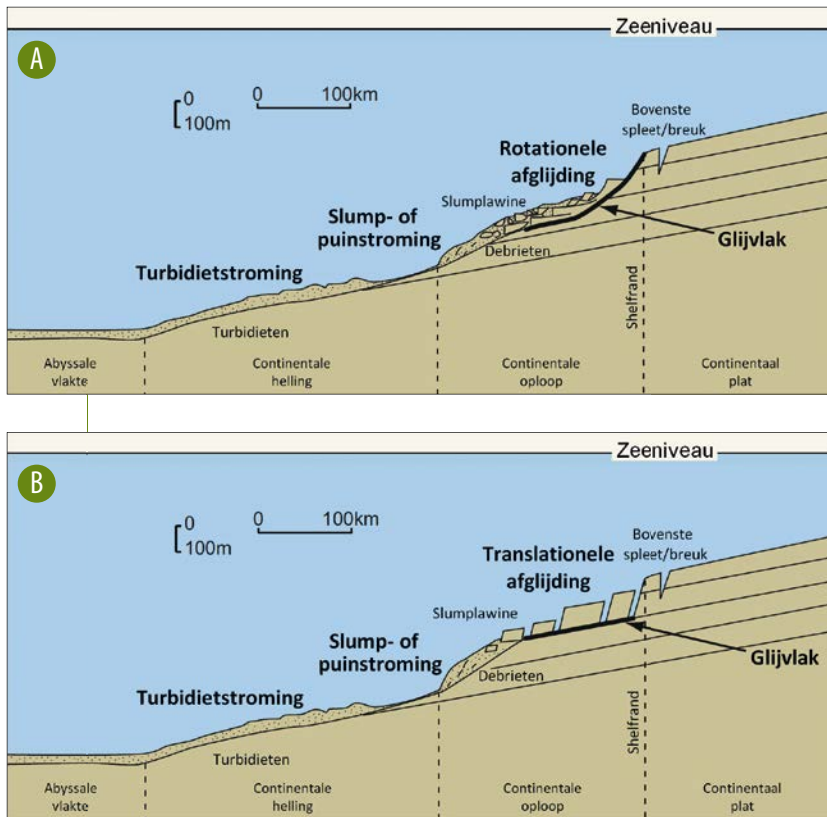


AFBEELDING 3. | Dwarsdoorsneden en een lengtedoorsnede door het bovenste deel van de Storegga-afglijdingen gebaseerd op analoge sparkerprofielen. De omcirkelde 1, 2 en 3 in profielen A – C markeren de laterale uitbreiding van de drie Storegga-afglijdingen. De reconstructie van de voormalige zeebodem is met streep- en stippellijnen aangegeven in profiel D-D'. Profiel E-E' toont een sparkerprofiel van twee zeer grote sedimentblokken die tot 10 x 30 km lang en breed en 200 m dik zijn op een gemiddelde helling van slechts 0,3° tijdens de tweede Storegga-afglijding. Q = basis Pleistoceen, P = basis Plioceen, MO = Midden-Oligoceen, Pal = Paleoceen/Onder-Eoceen, B = Tertiaire basalt, FSE = begraven Færøer-Shetland-steiltereliëf. De afglijdings sedimenten zijn met grijs aangegeven (naar Bugge *et al.*, 1987).

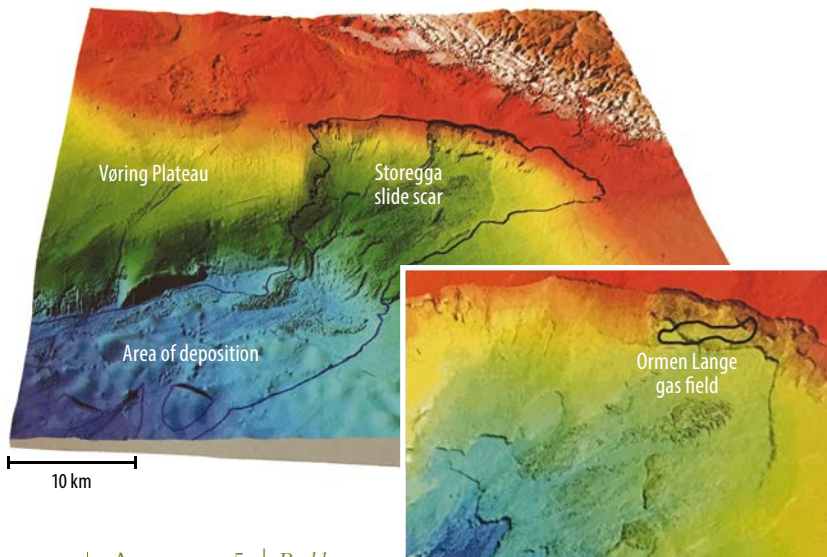
Storegga-afglijdingen hebben plaatsgevonden, bedraagt 112.500 km<sup>2</sup>. Deze afglijdingen hebben afzetting gesteenten van Kwartaire tot vroeg-Eocene ouderdom de diepte in gesleurd (Bugge *et al.*, 1987, 1988). Deze afglijdingen behoren daardoor tot de grootste die er op aarde bekend zijn. Tezamen zijn ze 450 meter dik en hun totale volume bedraagt volgens Bugge *et al.* (1987) ongeveer 5600 km<sup>3</sup>. Afbeelding 3 laat de erosie en afzetting zien in een deel van het Storegga-gebied. Het onregelmatige zeebodemreliëf is daarbij zeer opvallend.

- De eerste Storegga-afglijding vond tussen 30.000 en 50.000 jaar geleden plaats tijdens het Weichselien (Bugge *et al.*, 1987,1988). Hierbij is ongeveer





AFBEELDING 4. | Schematische weergave van twee systemen waardoor afglijdingen kunnen ontstaan. A. Rotatieve afglijding met een glijvlak dat de gelaagdheid doorsnijdt; B. Translatie afglijding met een glijvlak dat de gelaagdheid volgt (naar Smith et al., 2013).



AFBEELDING 5. | Beeld van het litteken en van de zeebodem van het bovenste gedeelte van de Storegga-afglijding, die de gecompliceerdheid van het gebied laat zien. Met de rode kleur wordt het continentaal plat aangegeven. Naar het blauw toe wordt de zee steeds dieper (Afb. naar NGF, *The making of a land by Ivar Ramberg et al., 2008, pg 559*).

ongeveer 95.600 km bedraagt; de oppervlakte van het litteken bedraagt ongeveer 50.000 km<sup>2</sup>. Het litteken langs de shelfrand is 310 km lang (al deze gegevens uit Hafidason *et al.*, 2004).

De grootste afstand die het gesteente over de oceaانبodem heeft afgelegd, bedraagt meer dan 810 kilometer en de afglijding gaat tot de diepste delen van de Noorse Zee, tot ongeveer 3600 m. Grotere en kleinere massa's gesteente zijn in hun geheel over 410 km getransporteerd en in het verlengde daarvan heeft een troebelingsstroom nog over een lengte van 400 km een dikke turbidiet afgezet.

- De derde Storegga afglijding vond ongeveer 5700 jaar geleden plaats (Hafidason *et al.*, 2005). De maximale run-out bedraagt ongeveer 145 km en de twee lobben hebben sediment gedeponeerd tot op ongeveer 1500 m, respectievelijk ruim 1900 m diepte. Het litteken langs de shelfrand was ongeveer 56 km lang (afgeleid uit Bugge *et al.*, 1987). 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).

**6. Arneset-afglijding**, in het buitenste deel van het Boknafjord, Zuidwest-Noorwegen (zie Figuur 1). In tegenstelling tot de eerder genoemde afglijdingen was deze van beperkte omvang, maar vanwege de geologische ouderdom en vanwege archeologische vondsten toch het vermelden waard.

Deze afglijding is beschreven door Bøe *et al.* (2007); het volume ervan is ongeveer 28x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> en bedekt een gebied van ongeveer 1.4x10<sup>6</sup> m<sup>2</sup> in 420–550 m diep water. Schattingen van de sedimentatiesnelheden en de stratigrafische positie van de afgeglede sedimenten duiden erop dat de afglijding 10.000 <sup>14</sup>C jaren plaats vond. Dit wordt nog bevestigd door ongeveer 17.500 vuurstenen artefacten van Laat-Paleolithische tot Vroeg-Mesolithische ouderdom die tijdens de tsunami verspoeld zijn. Deze artefacten zijn deels weer gebruikt bij een latere relatieve laagstand van de zee en in een tot 1 meter dikke strandafzetting gevonden. De artefacten wijzen er op dat de nederzettingen 10.000–9700 <sup>14</sup>C jaren geleden bewoond

3880 km<sup>3</sup> gesteente afgeglede. De maximale run-out bedraagt 370 km en gaat tot een diepte van ongeveer 3100 m. Het litteken langs de shelfrand was maar liefst 290 km lang.

- De tweede Storegga-afglijding vond ongeveer 8150 jaar geleden plaats. Deze afglijding heeft minimaal 2400 km<sup>3</sup> en maximaal 3200 km<sup>3</sup> sediment verplaatst, waarbij de totale oppervlakte waarover het gesteentemateriaal is vervoerd,



moeten zijn geweest; het betreft één van de oudste steentijdvondsten van Zuid-Noorwegen. Een lokale tsunami met een run-up van 2,5-4 m die veroorzaakt werd door de afglijding, is de meest waarschijnlijke oorzaak van de overstroming, verplaatsing en erosie van de artefacten. Ook op ander plaatsen langs de Noorse kust hebben kleinere afglijdingen en tsunami's plaatsgevonden, waarbij waarschijnlijk prehistorische mensen zijn omgekomen.

### Inwendige opbouw van onderzeese afglijdingen

De plaats waar een onderzeese afglijding begint, is in het buitenste deel van het continentale plat, niet ver van de continentale helling. Daar ontstaat een grote breuk door een aanzienlijk pakket sedimenten, die bovenin steil is en naar onderen steeds vlakker wordt. Deze breuk, listrische breuk genaamd, gaat als een glijvlak functioneren (Afb. 4A). Er ontstaat een groot litteken dat parallel aan de kust verloopt, in het Engels 'headwall' genoemd vanwege de relatieve steilte die daardoor in het onderzeese reliëf ontstaat (Afb. 5). Deze breuk gaat in zee-waartse richting over in een glijvlak dat een zwakke sedimentlaag gaat volgen. Parallel aan de primaire listrische breuk kunnen meerdere dergelijke breuken ontstaan, waardoor in het afglijdende pakket verschillende schollen ontstaan die roterend verschuiven. Er kan ook een glijvlak

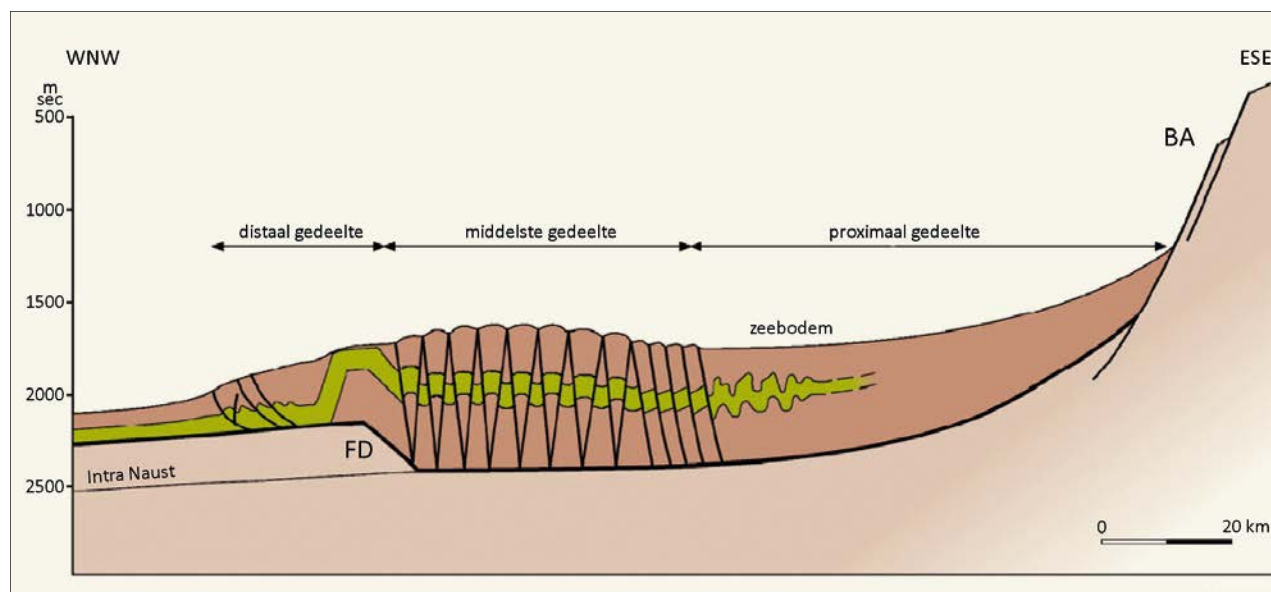
ontstaan dat een zwakke sedimentlaag helemaal volgt nadat er een diepe, steilstaande breuk in het sedimentpakket ontstaan is aan de rand van het continentaal plat. Als het aanvankelijk aaneengesloten sedimentpakket daarna opgebroken wordt in grote gesteentebrokken, kunnen die zonder rotatie van elkaar gescheiden raken (Afb. 4B).

Wanneer sedimenten nog niet volledig geconsolideerd zijn, kunnen deze tijdens het afglijden ook deels vervormd raken en allerlei plooistructuren krijgen, waarin kleinere of grotere, rigide gesteentebrokken opgenomen kunnen zijn. Dit wordt een slump genoemd, een term die uit het Engels is overgenomen. Hellingafwaarts kunnen daardoor nog meer slumps opgewekt worden, maar zachte, waterrijke sedimenten gaan hellingafwaarts ook meestal over in een dichte modderbrei waarin de sedimentdeeltjes los van elkaar in suspensie raken. Dit wordt een troebelingsstroom genoemd, waarvan de stroomsnelheid steeds meer afneemt en eerst de grofste componenten tot afzetting komen en naar dieper water toe geleidelijk aan de fijnere (Afb. 4). Er ontstaat ook een karakteristieke 'fining upwards' in de afzetting van een troebelingsstroom, die turbidiet genoemd wordt. Want tijdens het afzetten van een turbidiet neemt de stroomsnelheid op een gegeven plaats ook steeds meer af.

De zeebodem is zelden helemaal vlak. Als een aaneengesloten afglijdend pakket stuit op plaatselijk wat hogere gedeelten, wordt de snelheid ervan ter plaatse afgeremd en ontstaan er door de druk van het hogere gedeelte dat meer snelheid heeft, een serie opschuivende breuken waardoor het pakket ingekort wordt (Afb. 6). Tertiaire sedimenten die sterker geconsolideerd zijn, zullen tijdens het afglijden meer in losse grote gesteentemassa's opbreken, waarvan de afzonderlijke stukken ieder hun eigen oriëntatie kunnen krijgen door verschillen in rotatie. Dit levert een grootschalige chaotische afzetting en zeebodempopografie op.

### Hoe zijn tsunami's in Noordwest-Europa ontdekt?

Door de ontdekking van afglijdingen door geologen uit de olie-industrie werd het duidelijk dat er in Noordwest-Europa tsunami's geweest zijn. In verband met eventuele gevaren voor het winnen van olie en gas is er veel gedetailleerd onderzoek naar gedaan. De jongste afglijdingen die nog niet of nauwelijks bedekt zijn met jongere sedimenten, konden in kaart gebracht worden met side-scan sonar, multibeam-dieptemetingen en opnamen met echoloding. Met behulp van multichannel-seismiek kan men de dikte en uitgebreidheid van de afgegleden pakketten bepalen en ook begraven afgegleden sedimentpakketten



AFBEELDING 6. | Schematisch profiel van de afglijding (slump). Pliocene afzettingen van de Naust Formatie worden met donkerbruin aangegeven. Daarbinnen komen oudere sedimenten van de Tampen-afglijding voor (groen). De verkorting in het westelijke deel is duidelijk te zien aan de plooiing, opschuivende breuken en de overschuiving over oudere sedimenten. FD: Frontale drempel, het begin van de overschuiving; BA: Breuk waarlangs de afglijding plaatsvond (naar Færseth & Sætersmoen, 2008).





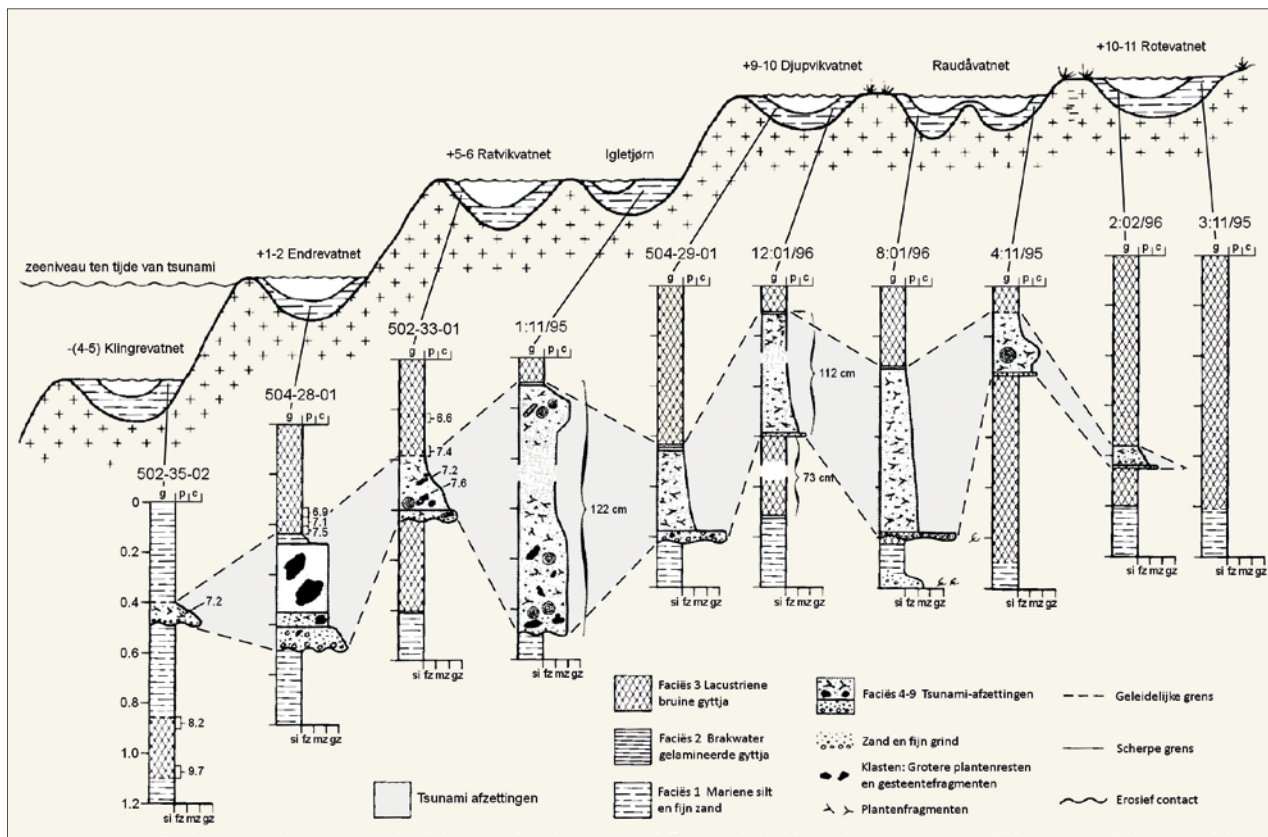
opsporen. Valboringen die gebruik maken van de zwaartekracht kunnen tot ongeveer 10 m lange kernen opleveren van zachte sedimenten van een afglijding. Diepere spoelboringen die gebruikelijk zijn bij de exploratie van olie en gas kunnen in combinatie met seismische gegevens de omvang en aard van de afglijdingen vaststellen. Dit zijn natuurlijk allemaal indirecte gegevens om tsunami's aannemelijk te maken.

Henk Duyverman, onze hoofdredacteur van Grondboor & Hamer, herinnert zich nog uit de tijd dat hij bij Statoil Noorwegen werkte dat de eerste maal dat hij betrokken was bij een boring in diep water, dat juist in het Storegga-gebied was. De boring bleek heel lastig te zijn, want hoewel de afglijdingen al lang geleden hadden plaatsgevonden, was de grens tussen zeebodem en diepwater nog steeds onscherp, en er lag boven de bodem een dikke laag van modderig zeewater (wat hij erwtensoep noemde) waarin allerlei apparatuur verdween, zoals boorkoppen en slangen.

Alleen op het (toenmalige) vasteland zijn afzettingen te vinden die ondubbelzinnig aan tsunami's zijn toe te schrijven. Op veel plaatsen zijn die door latere erosie weer verdwenen. De beste plekken om deze afzettingen te vinden, zijn meren en meertjes die niet al te ver van de kust aflagen en door een lage barrière van de zee afgescheiden waren. Het is daarbij in veel gevallen mogelijk om de hoogte van de tsunamigolven te bepalen, vooral wanneer er veel meertjes bij elkaar liggen die verschillende waterspiegelhoogten hadden en hebben. Een mooi voorbeeld is een serie meertjes op het noordoostelijke deel van het eiland Sula, ten zuidoosten van Ålesund in het Sunnmøre-gebied van Noorwegen (Afb. 7). De ligging van de meertjes ten opzichte van elkaar is in werkelijkheid anders dan in de afbeelding. Links is het laagstgelegen meertje aangegeven dat toen 4 à 5 m onder zeeniveau lag. Rechts is het hoogstgelegen meertje aangegeven dat toen 10 à 11 meter boven het zeeniveau lag; de tsunami-afzettingen waren daarin alleen aan de zeezijde aanwezig, hetgeen bewijst dat de tsunamigolf maar weinig

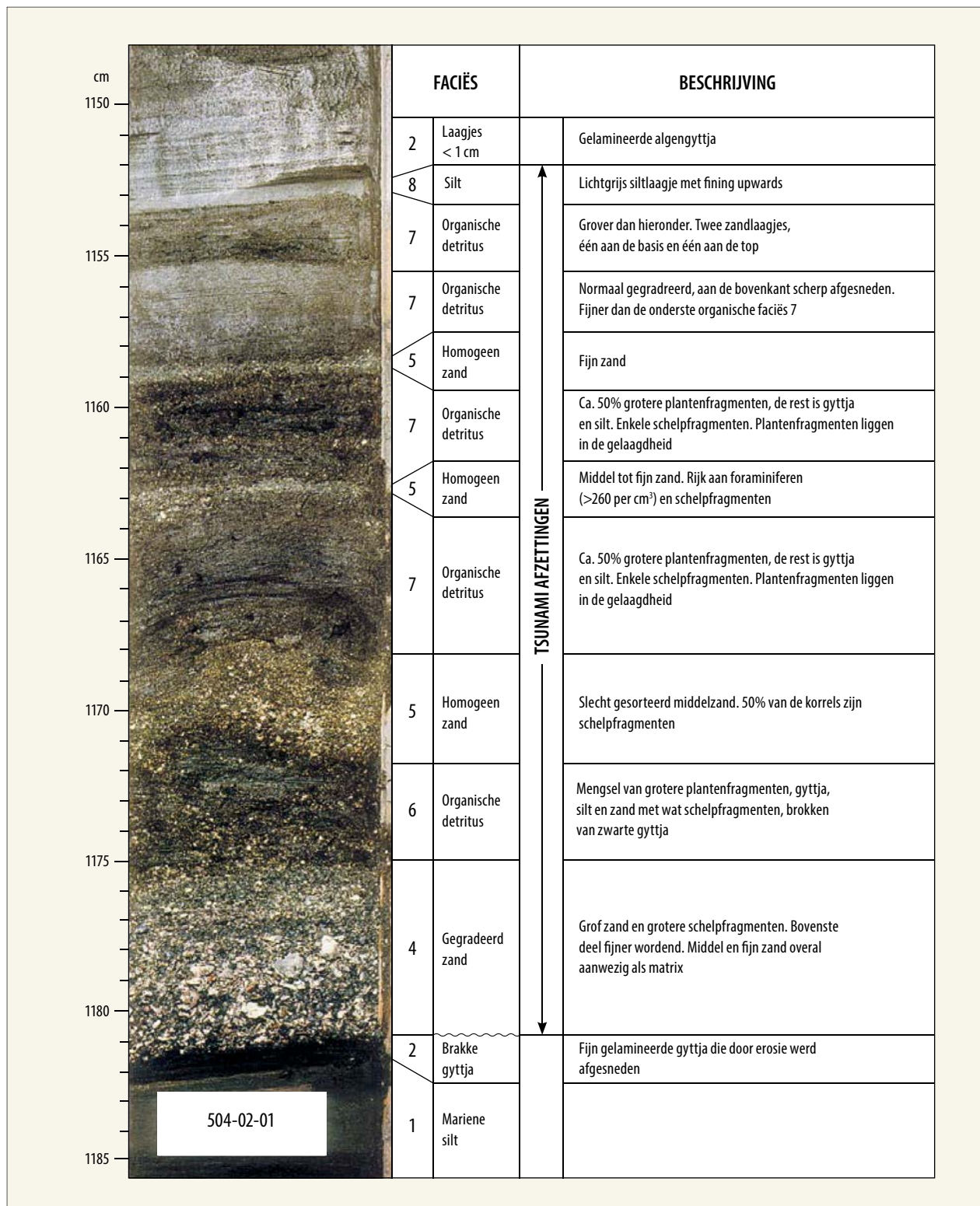
hoger is geweest dan het toenmalige waterniveau van het meertje. Een mooi voorbeeld van tsunami-afzettingen is een kernboring van het meer Kvennavatnet in het gebied van Bjugn (Afb. 8) (Bondevik *et al.*, 1997b). Het meerdere malen afwisselen van homogeen zand (faciës 5) met organische detritus (faciës 7) duidt op meerdere golven die de tsunami heeft geproduceerd. Dat de zandlagen van onder naar boven steeds dunner worden en steeds fijner materiaal bevatten, laat zien dat de golven steeds minder hoog en heftig werden.

Het proces van erosie en sedimentatie voor, tijdens en na een tsunami is enigszins gecompliceerd (Afb. 9). Na normale sedimentatie (a), overstroomt en erodeert de tsunami de kust en stroomt in het meer, waarbij het brokken veen van de meerbodem opbreekt: faciës 4 en 5 (b). De tsunami overstroomt het meer en erodeert veen en vegetatie langs de kust; er wordt ook zand ingebracht: faciës 4 en 5 (c). Tijdens de hoogste waterstand wordt materiaal in suspensie zoals losgewerkte brokken, twijgjes,



AFBEELDING 7. | Een schematische dwarsdoorsnede van de onderzochte meertjes op het eiland Sula ten opzichte van het geschatte zeeniveau ten tijde van de tsunami. De meertjes liggen ongeveer in een cirkel op het noordoostelijke deel van het eiland Sula, maar niet in de volgorde van laag naar hoog. De diepte van de boringen wordt in meters aangegeven: 1.2 is bijvoorbeeld 1 m 20 cm (naar Bondevik *et al.*, 1997a).





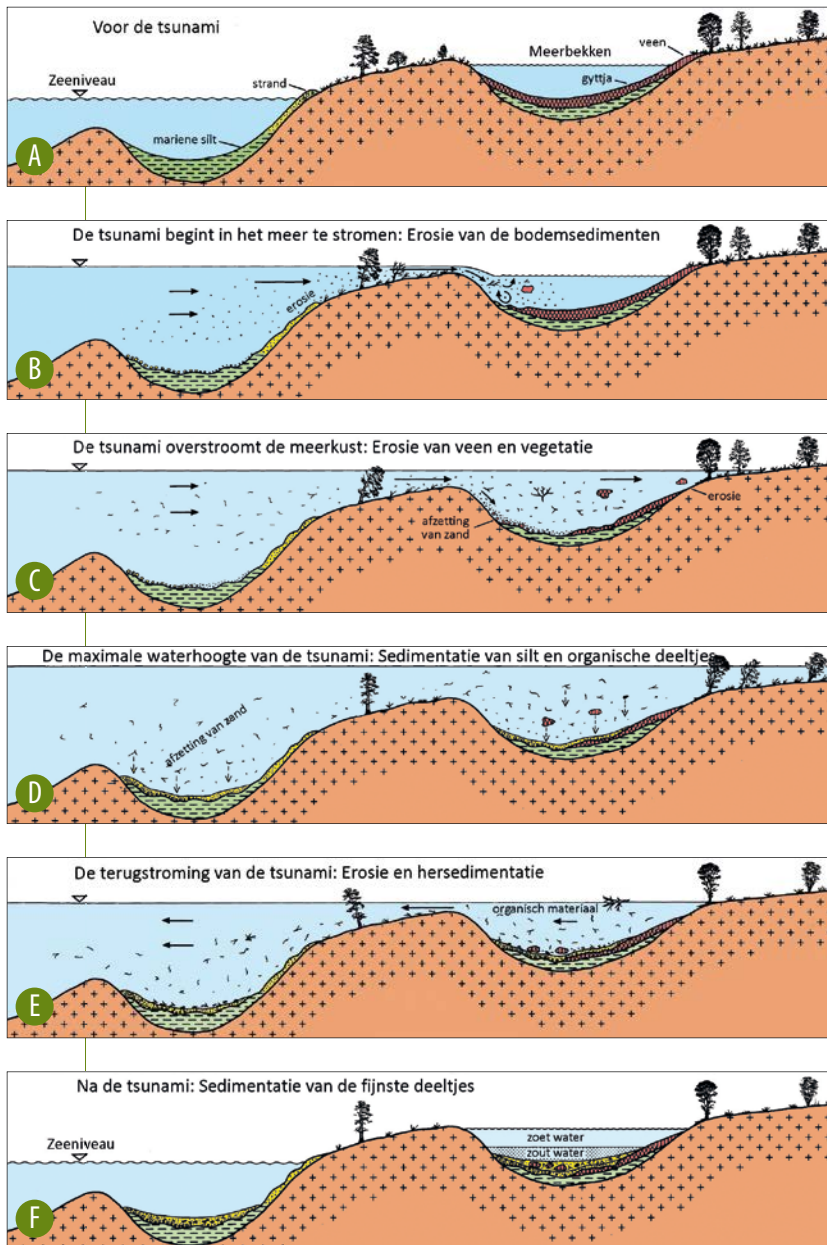
AFBEELDING 8. | Kernboring 504-02-01 in tsunami-afzettingen in het Kvvennavatnet, dat 1 à 2 meter boven het toenmalige zeeniveau lag. Momenteel ligt de drempel aan de zeezijde op 37 m boven zeeniveau (naar Bondevik et al., 1997b).

gyttja, zand en silt van grof naar fijn afgezet, wat een normaal gegradreerde, organische laag vormt: faciës 6 gevolgd door faciës 7 (d). Bij het terugtrekken van de golf vindt erosie en resedimentatie van tsunami-afzettingen plaats en wordt organisch materiaal het meer uitgevoerd (e). Na de tsunami

vindt in het meer afzetting van fijne deeltjes uit suspensie plaats samen met organisch materiaal afkomstig uit omgewerkte tsunami-afzettingen (f).

Maar we kunnen de hoogte van de tsunamigolven alleen bepalen, als we zowel de hoogte van het toenmalige zeeniveau en de eventuele latere stijging of daling van de bodem kunnen vaststellen. Na het maximum van de laatste ijstijd, waarin de zeespiegel meer dan 100 m lager stond dan tegenwoordig, is het niveau eerst heel snel gestegen en nam de snelheid daarvan vervolgens steeds meer af.





AFBEELDING 9. | Het proces van erosie en sedimentatie voor, tijdens en na een tsunami in een kustnabij bekken en in een meer. Meertjes dichtbij het toenmalige zeeniveau zijn getroffen door meerdere tsunamigolven. Dit blijkt uit meerdere afwisselingen van zand en organisch materiaal. De siltlagen in het meer zijn in zoetwater afgezet. Voor verdere verklaring, zie de tekst (naar Bondevik et al., 1997b).

Door berekende zeespiegelcurves te gebruiken en uit organische resten  $^{14}\text{C}$ -dateringen te bepalen, kunnen we de kruising vinden van de tijd met de zeespiegelcurve. Tenslotte moeten we nog achterhalen hoeveel de bodem ter plekke omhoog of omlaag is gegaan. De Noorse kust, evenals het grootste deel van Scandinavië, is na de laatste ijstijd door isostasie omhoog gekomen doordat het landijs dat met zijn gewicht op het subcontinent drukte, verdween. Noorse geologen hebben stijgingscurves kunnen reconstrueren, waarbij de grootste stijging optrad in het centrale deel van Scandinavië waar de ijsbedekking het dikst was en naar de kust toe afnam.

Ook in estuaria, rivierdalen en fjorden is er een grote kans om tsunami-afzettingen op het land aan te treffen, waar de 'run-up', het oplopend effect van de tsunamigolf, versterkt wordt, omdat deze tussen de hogere omgeving omhoog geperst wordt.

## Hoe ontstaan deze afglijdingen?

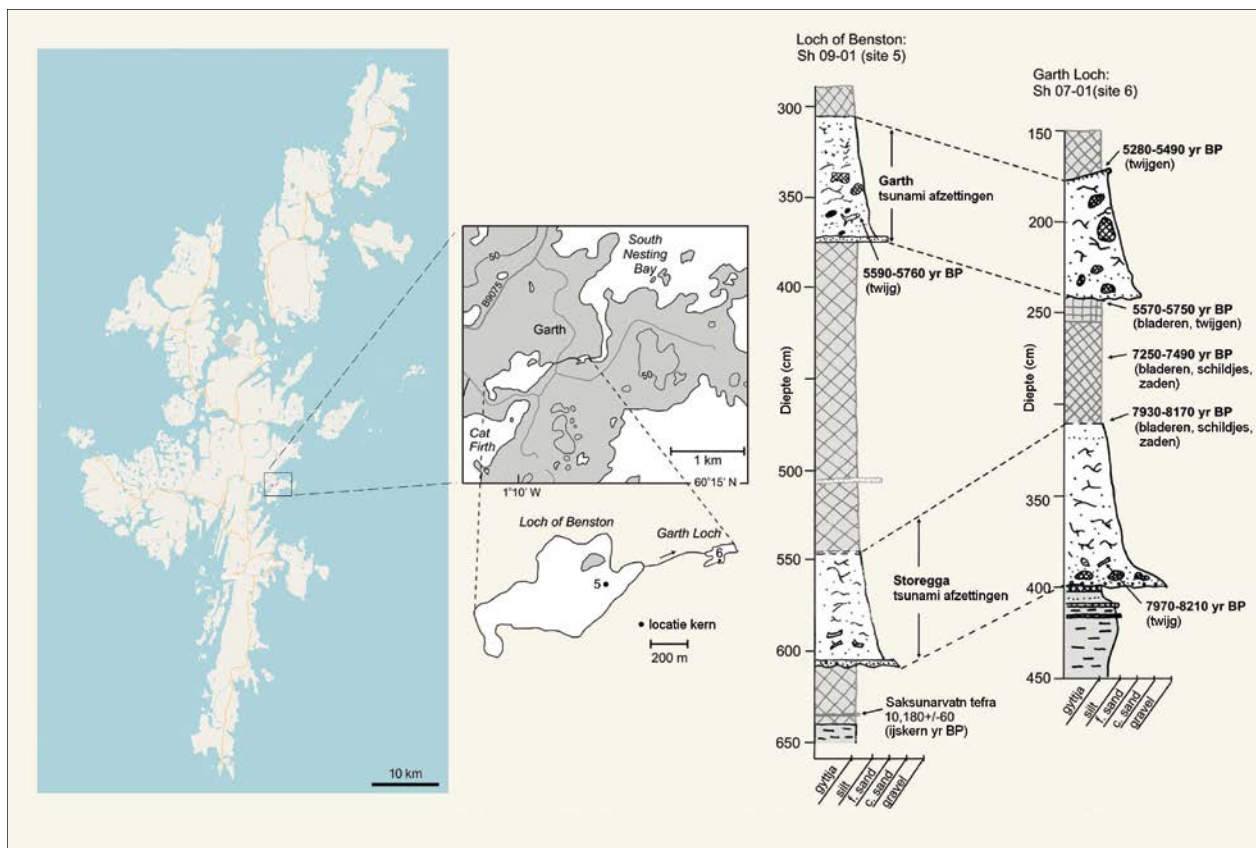
De continentale helling waarlangs de afglijdingen voor de Noorse kust plaatsvinden, helt maar heel weinig, maximaal hooguit enkele graden. De gemiddelde helling voor de Storegga-afglijding bedraagt slechts  $0,6-0,7^\circ$ . Er is dus veel meer nodig om afglijdingen te krijgen. Tijdens glaciële maxima wordt er in korte tijd heel veel sediment afgezet. Dit kan leiden tot instabiliteit van de glaciële sedimenten. Als water en/of gas uit de relatief dunne lagen van interglaciële en interstadiale sedimenten niet kan ontsnappen vanwege de slechte doorlatendheid van bovenliggende glaciële sedimenten, kan dat leiden tot de opbouw van buitengewoon hoge poriëndruk in de interglaciële/interstadiale sedimenten. Daardoor gaan deze lagen functioneren als vlakken van zwakte, waarlangs een sedimentpakket kan gaan afglijden. Ook kunnen kleilagen door belasting deformeren waardoor de schuifweerstand verkleind wordt en langs deze lagen breukvorming en afglijding gaan optreden (Kvalstad *et al.*, 2005). Deze instabiliteit zal juist in het onderste, zeewaartse deel van de Storegga-helling beginnen en dan landwaarts en hogerop verder gaan als een retrograde verzwakking (Nabil *et al.*, 2004; Kvalstad *et al.*, 2005). Het proces van afglijden wordt heel waarschijnlijk in beweging gezet door één grote aardbeving of een serie kleinere, die veroorzaakt worden door differentiële postglaciële opheffing van de aardkorst van Scandinavië (Laberg & Vorren, 2000).

Met dat laatste kunnen afglijdingen tijdens glacialen nog niet verklaard worden. Het lijkt mij waarschijnlijk dat ook differentiële toenemende ijsdruk bij verdikking van de ijskap waardoor de aardkorst naar beneden gedrukt wordt, tot aardbevingen kan leiden. Deze aardbevingen veroorzaken dan weer breukvorming en reactivering van breuken en kunnen zo de trigger zijn voor het in beweging zetten van onderzeese sedimentpakketten.

Het bewijs voor het uitdrijven van vloeistoffen en het uitstromen ervan door sedimenten uit grootschalige onderzeese afglijdingen wordt geleverd door de aanwezigheid van kraters (pockmarks) en schoorsteenstructuren







AFBEELDING 10. | Ligging van de twee vindplaatsen waar twee tsunami-afzettingen boven elkaar gevonden zijn: van de oudere Storegga en de jongere Garth tsunami. Het Garth Loch bevindt zich iets boven het hoogwaterniveau en het Loch of Benston ligt 1,6 m hoger en watert af in het Garth Loch. De dateringen van de Garth Loch tsunami-afzettingen liggen tussen 5300 en 5700 jaar geleden. Ongeveer 45% van de gedetermineerde diatomeeën is van mariene oorsprong (naar Bondevik et al., 2005).

in de sedimenten ten noorden van het litteken van de tweede Storegga-afglijding (Paull *et al.*, 2008). De aanwezigheid van deze structuren wijst op duidelijke overdrukken in de ondergrond. Gashydraten, zoals methaan dat gebonden is aan ijskristallen, kunnen bij het vrijkomen van methaan als gas ook bijgedragen hebben aan het instabiel worden van een sedimentpakket en aldus een afglijding veroorzaakt hebben (Berndt *et al.*, 2005).

### Hoeveel tsunami's zijn er in de Noordzee geweest?

Voor de hele periode waarover afglijdingen bekend zijn, dus vanaf het Laat-Pliocoon, is het moeilijk om vast te stellen hoeveel tsunami's de landen rond de Noordzee getroffen hebben. Bovendien kunnen nog lang niet alle afglijdingen al aan tsunami-afzettingen gekoppeld worden; dit geldt bijvoorbeeld voor de Trænadjupe-afglijding (Løvholt *et al.*, 2017; Pope *et al.*, 2018). Als we ons beperken tot het Holoceen, kunnen we stellen dat er drie zijn geweest die hun sporen hebben achtergelaten. De belangrijkste

publicatie in dit verband is die van Bondevik *et al.* (2005). Hierin worden de bewijzen voor deze drie tsunami's geleverd door gedateerde tsunami-afzettingen op de Shetland-Eilanden ten noordoosten van Schotland. De oudste tsunami-afzettingen dateren van ongeveer 8100 jaar geleden en kunnen gekoppeld worden aan de Storegga-afglijding en zijn gevonden in meertjes en op venige heuvelhellingen tot 9,2 m boven het huidige zeeniveau. Tijdens de tweede Storegga-afglijding stond de zeespiegel ongeveer 17 m lager, zodat de run-up ongeveer 26 m hoger kwam. In twee meren vonden Bondevik *et al.* (2005) eveneens afzettingen van een jongere tsunami die gedateerd werd op 5500 jaar geleden (Afb. 10). Dit wordt de Garth-tsunami genoemd naar een van de vindplaatsen. De sedimenten vertoonden soortgelijke kenmerken als die van de tweede Storegga-afglijding: opgebroken (veen)brokken, zandlaagjes, opnieuw afgezet materiaal en mariene diatomeeën. De run-up was toen waarschijnlijk meer dan 10 m. Bondevik *et al.* (2005b) vonden ook nog een zandlaag in veenontsluitingen met een ouderdom van ongeveer 1500 jaar. Deze laag wordt landinwaarts dunner en fijner en werd op twee plaatsen gevonden die ver uit elkaar lagen; de run-up van deze laag liep tot 6 à 7 m boven het toenmalige zeeniveau. Het is nog onbekend wat de oorzaken zijn van de twee jongste tsunami's.

Volgens Chacón-Barrantes *et al.* (2013) zouden er tussen de jaren 842 en 1761 na Christus op grond van historische en geologische gegevens zelfs zes tsunami's in de Noordzee geweest zijn. Ik beschik helaas niet over het hele artikel en ken alleen de samenvatting die op Internet te vinden is. Welke bewijzen deze auteurs naar voren brengen, weet ik dus jammer genoeg nog niet.

### Wat is het risico voor een nieuwe tsunami?

In mijn eerdere artikel over tsunami's (Gaemers, 2011) had ik al aangegeven dat de Storegga-tsunami Nederland moet hebben bereikt. In het proefschrift van Hijma (2009) wordt beschreven, dat het gebied rond Rotterdam juist ten tijde



van de Storegga-tsunami overstroomd werd door de zee. Dit wordt ook aangegeven in het artikel van Cohen & Hijma (2008). Waterbouwkundige ingenieurs en ambtenaren van het Ministerie van Infrastructuur & Waterstaat in Nederland gaan ervan uit dat de dreiging van een tsunami voor Nederland nauwelijks reëel is, en dat, zelfs als er een zou komen, die in de ondiepe zuidelijke Noordzee zodanig afgeremd en gedempt wordt, dat Nederland weinig gevaar loopt. De snelheid waarmee een tsunami zich voortplant, zal zeker sterk afgeremd worden naarmate de zee ondieper wordt, maar de hoogte van de tsunamigolf neemt daarbij dan juist sterk toe. Zo'n golf wordt dan juist steeds gevaarlijker en verwoestender. Dit verschijnsel is zeer goed bekend van recente tsunami's.

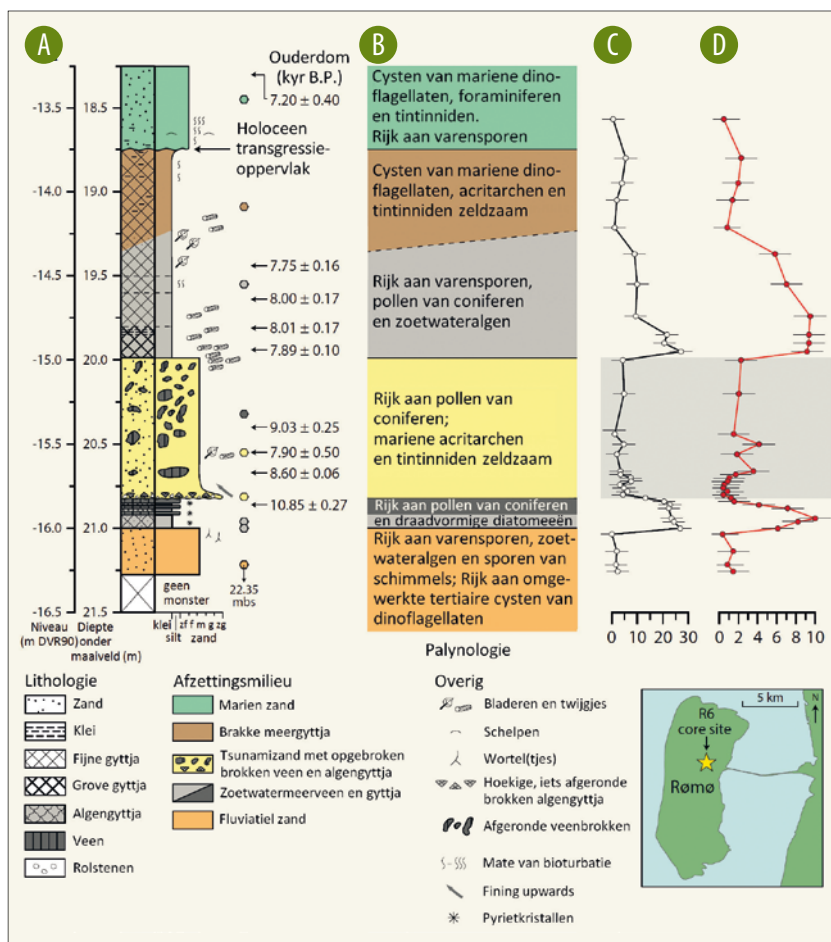
De ontdekking van tsunami-afzettingen op het Deense Waddeneiland Rømø (Fruegaard *et al.*, 2015) bewijst ondubbelzinnig dat de Storegga-tsunami wel degelijk een bedreiging geweest is voor de kustlanden rond het ondiepe gedeelte van de Noordzee (Afb. 11). Over de hoogte van de tsunamigolf die Rømø getroffen heeft, bestaat wel enige onzekerheid, maar aannemelijk is dat deze minimaal tussen de 4 en 5,5 m gelegen heeft, volgens de zeespiegelcurven van respectievelijk Behre (2007) en Vink *et al.* (2007).

Interessant is ook de publicatie van Petersen (1981) waarin hij de Holocene transgressie aan de Jammerbocht beschrijft. Via enkele diepe erosiegeulen uit het Laat-Weichselien die het Skagerrak met het Limfjord verbonden, is de zee binnengedrongen. Petersen vermeldt vier gecalibreerde <sup>14</sup>C-dateringen aan

tweekeppige schelpen en zeepokken aan de basis van het mariene Holocene op een diepte van 24,5–25 m onder het huidige zeeniveau. Deze zijn afkomstig uit kernboringen bij het dorp Vust. De ouderdomsbepalingen liggen tussen 7980 en 8260 jaar geleden. Deze stemmen goed overeen met de tijd waarop de Storegga-tsunami heeft plaatsgevonden. Het Holocene is hier 30 m dik en het onderste deel bestaat uit landafzettingen in de vorm van veen. Deze transgressie die via de diepe erosiegeulen binnenkwam, kan alleen maar door de Storegga-tsunami verklaard worden.

De Storegga-tsunami heeft waarschijnlijk zelfs nog in de Oostzee bij Estland zijn sporen achtergelaten in een laagje met resten van brakwaterorganismen dat is ingeschakeld tussen landafzettingen (Andrén & Andrén, 2000). Deze enorme tsunami heeft ook Groenland (Wagner *et al.*, 2007) en de Barentsz-zee bereikt (Romundset & Bondevik, 2011), en natuurlijk ook de Schotse en Oost-Engelse kust (Smith *et al.*, 2004).

Bellwald *et al.* (2019) geven een goed overzicht van massabewegingen langs de Noorse kust en de risico's die ze vormen. De auteurs hebben maar liefst 125 postglaciale – dus Holocene – afzettingen van massatransport gevonden. Dit zijn dus afzettingen die niet alleen door tsunami's zijn veroorzaakt maar ook door minder heftige gebeurtenissen. Grote activiteit van massabewegingen zagen zij in de perioden tussen 11.000–9700 jaar geleden, tussen 8300–7700 jaar en van ongeveer 4200 jaar tot heden. Voor de eerste periode wordt geschat dat eens in de 80 jaar een flinke aardbeving plaatsvond; voor de twee andere perioden eens in de 200 jaar, met een rustige periode in het Midden-Holocene. Zij schatten dat er tenminste 36 regionale aardbevingen met een magnitude van meer dan zes tijdens het Holocene hebben plaatsgevonden langs de kust van West- en Midden-Noorwegen. Enkele van de massabewegingen koppelen zij aan klimaatsoorzaken en tsunami's, maar de meeste van deze gebeurtenissen lijken te zijn veroorzaakt door regionale seismische activiteit. Dit resulteerde in het instabiel worden van hellingen die al door eerdere klimaatsinvloeden 'op scherp' waren komen



AFBEELDING 11. | Gedeelte van kernboring R6 op het eiland Rømø met het traject waarin de tsunami-afzettingen zich bevinden. A = de sedimentaire kolom. Het zand is onderverdeeld in zf: zeer fijn-, f: fijn-, m: middel-, g: grof- en zg: zeer grofkorrelig. De tsunami-afzettingen bevinden zich tussen 15,0 en 15,8 m beneden het huidige zeeniveau. DVR = Danish Vertical Reference system. De <sup>14</sup>C-ouderdomsbepalingen wordt in kilojaren aangegeven. B = samenvatting van palynologische gegevens. C = percentage koolstof, en D = percentage zwavel in de monsters (naar Fruegaard *et al.*, 2015).





te staan. De instabiliteit leidde weer tot het ontstaan van troebelingsstromen.

Experimenten met computersimulaties van Lehfeldt *et al.* (2007), Chacón-Barrantes *et al.* (2013) en anderen voor Duitsland en Groot-Brittannië tonen aan dat tsunami's in de zuidelijke Noordzee veel meer schade aan kunnen richten dan zware stormen, ook al zijn tsunami's van veel kortere duur. De omstandigheid dat de zuidelijke Noordzee ondiep is en naar het zuiden steeds smaller wordt, zal de hoogte van tsunamigolven alleen maar doen toenemen. Waar de duinen van de Nederlandse waddenkust en westkust laag en smal zijn, zal een tsunami er gemakkelijk overheen komen en het duin vernietigen. Het enige voordeel is dat er door de afremming van de

golf iets meer tijd zal zijn om maatregelen te nemen. Het opzetten van een tsunami-waarschuwingssysteem voor de Noordzee is beslist geen overbodige luxe. Het zal echter onmogelijk zijn om iedereen uit de Randstad en andere lage delen van ons land op tijd te evacueren; dat is bij monde van de overheid al terecht opgemerkt. Een tsunami vanuit Noorwegen of IJsland kan binnen tien uur ons land bereikt hebben. Zou er ooit een tsunami op ons land afkomen, dan zijn hoge gebouwen de beste plekken om naar toe te vluchten wanneer je in het lage deel van Nederland woont. Tsunami's kunnen niet uitgesloten worden als een serieuze dreiging in de zuidelijke Noordzee.

## Dankwoord

Dit artikel had niet geschreven kunnen worden als er door een groot aantal geologen niet zoveel over gepubliceerd was. Ik ben dankbaar dat ik allerlei afbeeldingen uit de literatuur heb kunnen gebruiken.

In het bijzonder dank ik Dr. Stein Bondevik en Dr. Mikkel Fruergaard die enthousiast hun toestemming hebben gegeven. Drs. Jaap J. Oppedijk ben ik dankbaar voor zijn hulp bij het aanpassen van de afbeeldingen en de Nederlandse teksten daarin.

*De afbeeldingen 2, 3, 7, 10 en 11 zijn tevens te vinden op onze website <http://www.geologienederland.nl>*

## LITERATUUR

- **Andrén T. & E. Andrén, 2000.** *Did the Storegga tsunami reach the Baltic Sea?* – In: Sandgren, P., (ed.), *Environmental changes in Fennoscandia during the Late Quaternary. Lundqua Report 37:* 108.
- **Behre, K.E., 2007.** *A new Holocene sea-level curve for the southern North Sea.* – *Boreas* 36: 82–102.
- **Bellwald, B., B.O. Hjelstuen, H.P. Sejrup, T. Stokowy, J. Kuvås, 2019.** *Holocene mass movements in west and mid-Norwegian fjords and lakes.* – *Marine Geology* 407: 192–212.
- **Berndt, C., J. Mienert, M. Vanneste & S. Bünz, 2005.** *Gas hydrate dissociation and sea floor collapse in the wake of the Storegga Slide, Norway.* – *Norwegian Petroleum Society Special Publications* 12: 285–292.
- **Bøe, R., L. Prøsch-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: 157–168.
- **Bondevik, S., J. Mangerud, S. Dawson, A. Dawson & Ø. Lohne, 2003.** *Record-breaking height for 8000-year-old tsunami in the North Atlantic.* – *Eos, Transactions, American Geophysical Union* 84 (31): 289–293.
- **Bondevik, S., J. Mangerud, S. Dawson, A. Dawson & Ø. Lohne, 2005.** *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.
- **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.
- **Chacón-Barrantes, S., R. Narayanan & R. Mayerle, 2013.** *Several tsunami scenarios at the North Sea and their consequences at the German Bight.* – *Science of Tsunami Hazards*, 32 (1): 8–28.
- **Cohen, K.M. & M.P. Hijma, 2008.** *Het Rijnmondgebied in het Vroeg-Holoceen: inzichten uit een diepe put bij Blijdorp (Rotterdam).* – *Grondboor & Hamer* 62 (3–4): 64–71.
- **Evans, D., Z. Harrison, P.M. Shannon, J.S. Laberg, T. Nielsen, S. Ayers, R. Holmes, R.J. Hoult, B. Lindberg, H. Hafidason, D. Long, A. Kuijpers, E.S. Andersen & P. Bryn, 2005.** *Palaeoslides and other mass failures of Pliocene to Pleistocene age along the Atlantic continental margin of NW Europe.* – *Marine and Petroleum Geology* 22 (2005) 1131–1148.
- **Fruergaard, M., S. Piasecki, P.N. Johannessen, N. Noe-Nygaard, T.J. Andersen, M. Pejrup, & L.H. Nielsen, 2015.** *Tsunami propagation over a wide, shallow continental shelf caused by the Storegga slide, southeastern North Sea, Denmark.* – *Geology* 43 (12): 1047–1050. Appendix: *GSA Data Repository* 2015351, 15 p.
- **Gaemers, P.A.M., 2011.** *Onderzeese afglijdingen en tsunami's in het Kwartair van NW-Europa.* – *Afzettingen, Werkgroep Tertiaire en Kwartaire Geologie* 32 (3): 66–71.
- **Hafidason, H., H.P. Sejrup, A. Nygard, 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.
- 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.
- Hijma, M., 2009. *From river valley to estuary. The early-mid Holocene transgression of the Rhine-Meuse valley, The Netherlands*. – Koninklijk Nederlands Aardrijkskundig Genootschap / Faculteit Geowetenschappen Universiteit Utrecht, *Netherlands Geographical Studies* 389, 190 p. (PhD thesis).
- Hjelstuen, B.O., O. Eldholm & J.I. Faleide, 2007. *Recurrent Pleistocene mega-failures on the SW Barents Sea margin*. – *Earth and Planetary Science Letters* 258: 605–618.
- 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.S. & T.O. Vorren, 1993. *A Late Pleistocene submarine slide on the Bear Island Trough Mouth Fan*, *Geo-Marine Letters* 13: 227–234.
- Laberg, J.S. & T.O. Vorren, 1996. *The Middle and Late Pleistocene evolution of the Bear Island Trough Mouth Fan*, *Global and Planetary Change* 12 (1-4): 309–330.
- 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 Andoya Slide and the Andoya Canyon, north-eastern Norwegian-Greenland Sea*. – *Marine Geology* 162 (2-4): 259-275.
- Laberg, J., T.O. Vorren, J. Mienert, P. Bryn & R. Lien, 2002a. *The Trænadjupet Slide: a large slope failure affecting the continental margin of Norway 4,000 years ago*. – *Geo-Marine Letters* 22 (1): 19-24.
- Laberg, J., T.O. Vorren, J. Mienert, D. Evans, B. Lindberg, D. Ottesen, N.H. Kenyon & S. Henriksen, 2002b. *Late Quaternary palaeoenvironment and chronology in the Trænadjupet Slide area offshore Norway*. – *Marine Geology* 188 (1): 35-60.
- Lehfeldt, R., P. Milbradt, A. Plüss & H. Schüttrumpf, 2007. *Propagation of a Tsunami-Wave in the North Sea*. – *Die Küste*, 72: 105-123.
- 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, Ch.K., W. Ussler III, W.S. Holbrook, T.M. Hill, R. Keaten, J. Mienert, H. Hafidason, J.E. Johnson, W.J. Winters & T.D. Lorenson, 2008. *Origin of pockmarks and chimney structures on the flanks of the Storegga Slide, offshore Norway*. - *Geo-Marine Letters* (2008) 28:43–51.
- Petersen, K.S., 1981. *The Holocene marine transgression and its molluscan fauna in the Skagerrak-Limfjord region, Denmark*. – *Special Publications International Association of Sedimentologists* 5:497-503.
- Pope, E.L., P.J. Talling & C. Ó Cofaigh, 2018. *The relationship between ice sheets and submarine mass movements in the Nordic Seas during the Quaternary*. – *Earth-Science Reviews* 178: 208-256.
- Ramberg, I.B., et al. (Eds.), 2008. *The making of a land, NGF, Trondheim, Noorwegen*.
- Rise, L., D. Ottesen, O. Longva, A. Solheim, E.S. Andersen & S. Ayers, 2006. *The Sklinmadjupet slide and its relation to the Elsterian glaciation on the mid-Norwegian margin*. – *Marine and Petroleum Geology* 23 (5): 569-583.
- Romundset, A., & S. Bondevik, 2011. *Propagation of the Storegga tsunami into ice-free lakes along the southern shores of the Barents Sea*. – *Journal of Quaternary Science* 26 (5): 457-462.
- Safronova, P.A., J. S. Laberg, K. Andreassen, V. Shlykova, T. O. Vorren & S. Chernikov, 2017. *Late Pliocene–early Pleistocene deep-sea basin sedimentation at high latitudes: mega-scale submarine slides of the north-western Barents Sea margin prior to the shelf-edge glaciations*. – *Basin Research* 29 (S1): 537-555.
- 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.
- Smith, D.E., S. Harrison & J.T. Jordan, 2013. *Sea level rise and submarine mass failures on open continental margins*. – *Quaternary Science Reviews*, 82: 93-103.
- Vink, A., H. Steffen, L. Reinhardt & G. Kaufmann, 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, p. 3249–3275.
- 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.

#### Interessante internetsites

- <https://nl.wikipedia.org/wiki/Stormvloed>
- <https://en.wikipedia.org/wiki/Tsunami>
- <https://nl.wikipedia.org/wiki/Tsunami>
- <http://kennislink.nl/publicaties/tsunami-de-onstuitbare-golf>
- <https://www.nemokennislink.nl/publicaties/tsunami-vernietigende-waterkracht/>
- <https://www.nemokennislink.nl/publicaties/hoer-ontstaan-tsunami-s-en-waarom/>
- <https://www.nemokennislink.nl/publicaties/tsunami-waarschuwingssysteem-hebben-wij-er-een-nodig-in-de-noordzee/>
- [http://vliz.be/docs/groterede/GRI2\\_tsunami.pdf](http://vliz.be/docs/groterede/GRI2_tsunami.pdf)
- <http://wvw.natuurwetenschappen.be/active/sciencenews/archive2005/tsunami>
- <http://www.nerc-bas.ac.uk/tsunami-risks/index.html>  
Doorklikken op deze site is helaas alleen mogelijk met toestemming.
- <https://geology.com/records/biggest-tsunami.shtml>
- <https://www.moviemeter.nl/film/32151>  
Duitse speelfilm van 101 minuten: *Tsunami, Terror in der Nordsee*
- <https://ngdc.noaa.gov/hazard/tsu.shtml>
- [https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu\\_db.shtml](https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.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.

