

## Flysch en turbidieten

### *zandrijke afzettingen in de diepzee*

door Anne Rutger Fortuin

Afd. Sedimentologie, Faculteit Aard- en Levenswetenschappen, Vrije Universiteit, De Boelelaan 1085, 1081 HV Amsterdam  
anne.fortuin@falw.vu.nl

In de flanken van gebergtes, zoals in Europa de Alpen, Karpaten, Apennijnen en Pyreneeën, komen vaak sterk geplooide en vele honderden meters dikke sedimentpakketten voor, die opvallen door een eentonige afwisseling van fossielarme schalies en zandstenen (soms met grofkorreliger inschakelingen). Ze worden vaak aangeduid met de naam Flysch (afb. 1). De Zwitserse geoloog Bernhard Studer introduceerde deze naam in 1837 bij zijn pionierswerk in het Berner Oberland. Het was de naam (Duits 'fliessen' = vloeien, stromen) die plaatselijke alpenboeren gebruikten voor de geplooide, donkere zandsteen-

schalieafwisselingen, die bekend stonden om hun instabiliteit (die zich manifesteert in aardverschuivingen en bergstortingen) en steile, drassige weidegronden vol losse blokken zandsteen opleverden. Studer benoemde hiermee een kenmerkend, maar landschappelijk gezien niet al te aantrekkelijk gesteente, dat bovendien vaak slecht ontsloten is.

Voor Studer was het een simpele stap om deze lokaal ingeburgerde naam te gebruiken voor een kenmerkende gesteente-associatie. Door dit te doen introduceerde hij echter, zonder het

zich voldoende te realiseren, een koppeling tussen dit gesteentetype en zijn ontstaanswijze, zowel in sedimentologisch als in tektonisch opzicht. Want deze afwisseling van fossielarme schalies en zandstenen zijn op een specifieke manier ontstaan. Anders gezegd: een term invoeren die een juiste interpretatie van zowel de ontstaanswijze als de tektonische positie impliceert, vraagt om discussie over het



*Afb. 1. De enorme Schlierenflysch-ontsluiting boven Sörenberg, Zwitserland. Zowel links als rechts op de foto zijn dik ontwikkelde turbidieten te zien, terwijl in het middendeel schalie domineert, afgezet in een periode waarin de plaatselijke aanvoer van zandig materiaal stagneerde, bijvoorbeeld omdat de aanvoergeulen zich verlegden. Goed is te zien dat dankzij de zwaartekracht de grootste puinbrokken het verst de helling afrollen.*

juiste gebruik als vakgenoten die term ook gaan gebruiken voor in hun ogen vergelijkbare afzettingen. En dat gebeurde dan ook, want sterk gelijkende sedimenten bleken door de hele alpenboog voor te komen.

## Flysch en faciës

Onder welke omstandigheden en in wat voor milieu deze gesteenten afgezet waren, kon Studer nog niet weten. In die tijd nam men voetstoots aan dat zanden in een marien milieu nooit ver buiten de kust konden worden afgezet. Zij waren dus altijd ondiep. Ook menig hedendaags alpenwandelaar, die met bemodderde bergschoenen mopperend een flyschvoorkomen passeert, zal niet vaak beseffen dat hij of zij hier met gesteenten uit een diepe zee te maken heeft. Inzicht over de wijze van afzetting zou pas meer dan een eeuw later volgen. Laten we dit soort bepaald niet zeldzame afzettingen eens wat nader onder de loupe nemen.

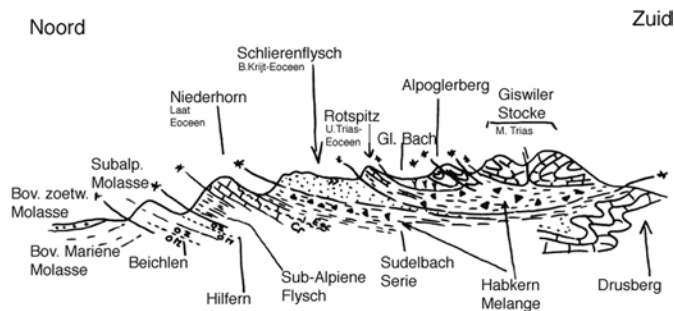
Al tijdens zijn leven schijnt Studer spijt gekregen te hebben van de introductie van het woord flysch (Trümpy, 2003), omdat hij er alleen een lokaal voorkomend pakket mee had willen benoemen en vond dat de term flysch maar al te gemakkelijk toegepast werd. Vooral toen ook nog eens bleek dat men dit soort gesteenten in andere plooiingsgebergtes ging waarnemen en beschrijven onder de noemer flysch. Vaak met toevoeging van het woord 'faciës' (van het Latijnse woord voor aangezicht). Faciës is een veelgebruikte term in de geologie en slaat op het totaal van de gesteente-eigenschappen (ook fossielen horen daarbij) dat het gesteente bij zijn vorming meekreeg en daarmee de ontstaanswijze weerspiegelt (die je vervolgens poogt te interpreteren). De zuivere toepassing van faciës is zuiver beschrijvend, niet interpretatief. Interpretatie is pas een afgeleide ervan<sup>1</sup>. Hedendaagse alpengeologen houden het er overigens op dat flysch vooral een 'tektofaciës' is; ze vinden de tektonische positie tijdens en na de afzetting het meest bepalend voor het eindproduct.

De eerste Zwitserse geologen waren regionaal werkzaam, goede gebergteonderzoekers, maar met weinig of geen ervaring met het mariene milieu. Hoe kan dat anders in een land zonder zee in een tijd waarin men nog niet veel buiten de eigen grenzen werkte. Daarom werd vooral de betekenis van deze afzettingen binnen het alpiene bouwwerk onderzocht. Net voor de overgang naar de twintigste eeuw postuleerde Schardt (1898) al dat dit soort afzettingen moest zijn afgezet tijdens de gebergtevorming. En wel na afzetting van de Helvetische dekbladen, die hij en anderen als eerste ontdekt en beschreven hadden. Met name tijdens het omhoogkomen en voortbewegen van die dekbladen in het gebergtefront. Synorogene afzetting heet dat met een duur woord (afb. 2). Mijn vroegere sedimentologie-leermeester in Utrecht, Professor De Raaf, wist er ook alles van. Net voor de Tweede Wereldoorlog (1937) had hij in Zwitserland zijn proefschrift over de Niesenflysch verdedigd.

Maar dat de alpiene gebergtevorming samenhangt met plaattektoniek was toen nog niet bekend. En hoe het ontstaan – de genese – van flysch daarin past, was een onderwerp dat pas na mijn studententijd in de zestiger jaren uit de verf zou komen. Wij studenten moesten het destijds vooral doen met dure termen voor lastig te omschrijven begrippen en hypothesen om gebergtevorming en sedimentatie te kunnen koppelen. Maar er was een duidelijk lichtpuntje: sinds halverwege de vijftiger jaren was bekend dat de zandsteenlagen uit de flysch vooral moeten zijn afgezet uit troebelingsstromen ('turbidity currents'), waarvan het Nederlandse woord 'turbidiet' is afgeleid

<sup>1</sup> Een voorbeeld: Als gezegd wordt "deze grofzandige faciës is marien vanwege de aanwezigheid van oesters", dan is dat correct. Je hoort niet te spreken over "mariene faciës". Gebruik van een term als "flysch faciës" is twijfelachtig, omdat dit feitelijk een interpretatie inhoudt. Het is beter om een aantal faciëstypen te onderscheiden binnen het geheel van afzettingen die samen flysch genoemd worden (en die vervolgens naar afzettingwijze te interpreteren).

Geologisch profiel van de Molasse naar de Giswiler Stocke (naar O.J. Simon)



Afb. 2. De tektonische positie van de Schlierenflysch in de Habkern-syncline. De gesteenten van het Niederhorn-dekblad vormen de belangrijkste randketen van de Helvetische dekbladen. Dit Niederhorn-dekblad ligt enerzijds opgeschoven over relatief weinig gedeformeerde Oligocene mariene afzettingen van de zich ontwikkelende alpenboog. Op dit dekblad volgt – eveneens via een tektonisch contact – een zwaar gedeformeerd pakket, de zgn. Habkern-melange, waarop een aantal minder gedeformeerde maar sterk verplaatste eenheden liggen, zoals de Schlierenflysch (afb. 1). Alle flyschafzettingen in de Alpen ondergingen na hun afzetting in diep water in het toenmalige gebergtevoorland belangrijke deformaties en verplaatsingen gedurende jongere fasen van gebergtevorming en maken nu deel uit van de dekbladeenheden van de Alpiene frontketens.

als benaming voor de afzetting die is ontstaan uit een troebelingsstroom, waarover verderop meer.

Mijn eerste kennismaking met flysch dateert uit juni 1964. Als eind-tweedejaarsstudent en onder leiding van geologiedocent Ernst ten Haaf (in 1959 gepromoveerd op turbidietenonderzoek in de noordelijke Apennijnen) werden mijn jaargenoten en ik een maand lang op Eocene Pyreneëflysch losgelaten. Wat turbidieten waren en wat flysch inhield was ons beginners tamelijk vaag bekend gemaakt, want dit onderwerp was vooral kost voor de onderzoekers zelf. Feitelijk waren we hun 'veldslaven'. Daar is helemaal niets mis mee, zolang het een proces is dat bijdraagt aan je vorming (al denkt men hier tegenwoordig heel anders over; er moeten duidelijke onderwijsdoelen nagestreefd worden). En vormen deed het, al bestond dit vooral uit klauteren tegen steile watervalletjes, uitgeslepen in de turbidieten, en het opmeten van laagstanden en laagdiktes in de hoop de interne opbouw van deze sterk geplooidde pakketten te kunnen onderscheiden. Het werkterrein van mijn teamgenoot en mij bestond uit een moeilijk toegankelijke flank van de Manchoya berg, die zich tussen 800 en ruim 2000 meter verheft boven de westoever van de Ara rivier even bezuiden Broto, provincie Huesca (afb. 3). Broto vormt samen met het aangrenzende dorp Torla de toegangspoort tot het bekende Ordesa Nationale Park, tegenwoordig een UNESCO World Heritage monument. Bij de tussentijdse bespreking van de veldresultaten lachte de hoogleraar Rutten ons hartelijk uit om onze diktemetingen. Ze waren uitgewerkt tot een stratigrafische kolom van meer dan twee meter lengte om zo de honderden meters waargenomen sediment nog een beetje op schaal te kunnen weergeven. Wie schetst mijn verbazing toen ik jaren later merkte dat een van de belangrijkste turbidietenspecialisten ter wereld, de Italiaan Emiliano Mutti, hier het Broto Turbidieten Stelsysteem onderscheidde en dit in samenhang met de regionale context uitgebreid documenteerde in diverse publicaties (afb. 4). Jaren daarvoor had ik deze innemende onderzoeker uit Parma leren kennen tijdens promotieonderzoek op Kreta, waar ik hem persoonlijk 'mijn' Kretenzische turbidieten kon tonen en zijn bevestiging daarvan als een flinke opsteker beschouwde.

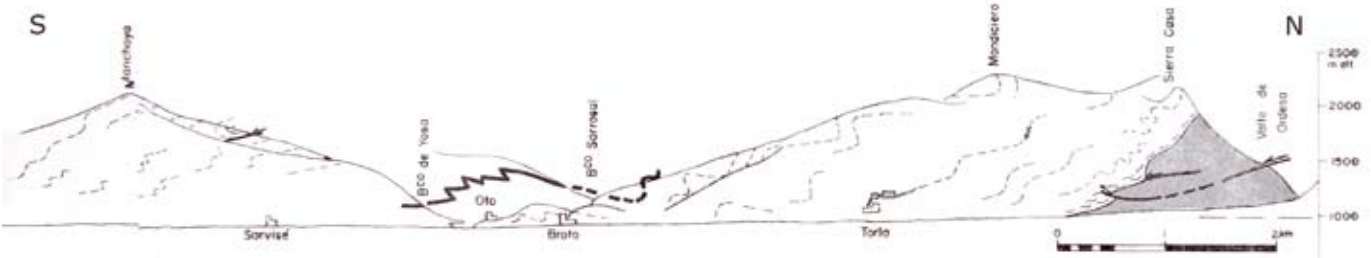
## Turbidieten

Het turbidietenconcept dateert uit 1950. De bedenkers ervan,



Afb. 3a. De Manchoya berg (2034 m; foto genomen tijdens veldwerk in 1963), gezien vanaf de oostkant van het Ara dal is geheel opgebouwd uit Eocene turbidieten van het zgn. Broto turbidiet systeem als onderdeel van de Hecho Groep.

Het N-S profiel (afb. 3b, ten Haaf, 1966) toont hoe deze ca. 4.5 km dikke, zwak geplooid flyschserie zich bevindt boven de kalken en dolomieten (Krijt-Paleoceen) die het bekende Ordesa dal vormen. De dikke lijn ter hoogte van Broto geeft de positie van de zogenoemde dikke bank aan, een door het terrein te vervolgen correlatieniveau.

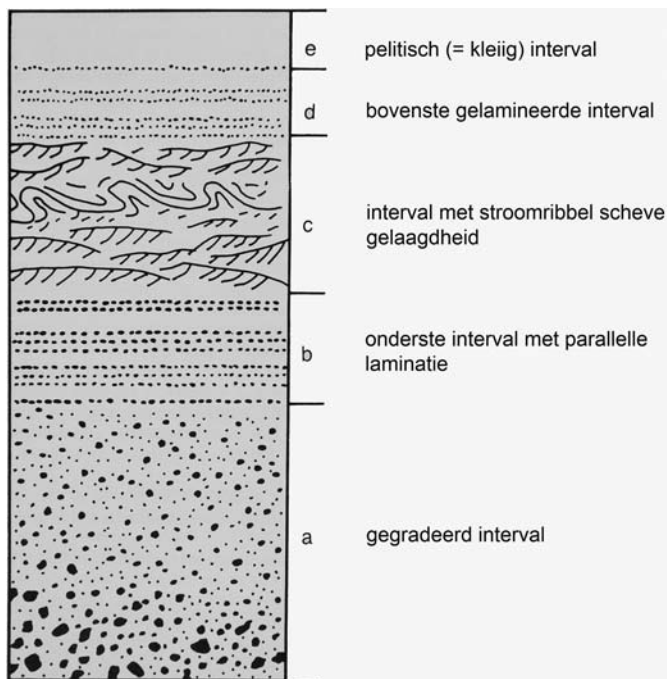


de Italiaan Migliorini en Professor Kuenen uit Groningen, trokken met hun artikel 'Turbidity currents as a cause of graded bedding' wereldwijd de aandacht en worden beiden tot de grootste geologen van hun natie gerekend (zie betreffende websites aan het eind van dit artikel). Migliorini was een geoloog met internationale praktijkervaring, die op basis van veldwerk in



de Apennijnen (flysch heet daar 'Macigno') tijdens de Tweede Wereldoorlog tot de hypothese was gekomen dat dit soort zandstenen in dieper water was afgezet en dat dat alleen verklaard kon worden door middel van afzetting uit suspensierijke en turbulente stromingen. Kort na de oorlog had Kuenen op basis van laboratoriumexperimenten dit soort turbulente suspensies kunnen ontwikkelen. Zij bundelden hun krachten in dit gezamenlijke paper, dat vervolgens insloeg als een bom in de aardwetenschappelijke gelederen van die tijd. Tot op dat moment was het namelijk nog altijd niet duidelijk en zeer omstreken of, en op welke wijze, zand en andere grofkorreliger afzettingen in dieper water terecht konden komen. Wat hadden Kuenen en Migliorini ontdekt? Ze postuleerden dat de typische flysch zandstenen een kenmerkende, interne opbouw vertonen, die alleen verklaard kan worden door uit te gaan van afzetting uit stromingen met een hoge sedimentdichtheid. Onder invloed van de zwaartekracht gaat deze overmatig dichte massa vloeien, waarbij de korrels in suspensie gehouden worden door interne turbulentie. Sneeuwlawines op berghellingen zijn een voorbeeld van een vergelijkbaar mechanisme. Kenmerkende eigenschappen van flyschafzettingen zijn de scherpe contacten met de onderliggende klei (of schalie of mergel), opwaartse afname van de korrelgrootte, al of niet gevolgd door vlakke laminatie en stroomribbelgelaagdheid en uiteindelijk bezinking van diepwaterklei (dit noemen we pelagisch sediment, dat bij een kalkiger samenstelling door de aanwezigheid van ingesloten kalkplankton de term mergel verdient boven klei). De term turbidiet introduceerde Kuenen overigens pas in 1957.

Afb. 4. Een oude veldopname. Deze toont de kenmerkende habitus van de turbidieten met hun scherp gemarkeerde ondervlak waarop (vaag zichtbaar) ondervlakstructuren zijn te zien. De gemiddelde laagdikte fluctueert en neemt hier naar boven toe.



Afb. 5. De complete Bouma turbidietsequentie (Ta-e, naar Bouma, 1962).

Kuenen en Migliorini initieerden een golf van discussie en onderzoek; promovendi gingen aan het werk. Allereerst landgenoten, zoals Ernst ten Haaf en Arnold Bouma. Met name het werk van deze laatste is klassiek geworden. Zijn analyse en gedetailleerde beschrijving van honderden turbidieten in het Peira Cava gebied in Zuidoost-Frankrijk (Bouma, 1962) voerden hem tot het inzicht dat er binnen deze gegradeerde zandstenen een vaste opeenvolging van structuren bestaat; idealiter in vijf divisies (afb. 5). Deze 'ideale' ontwikkeling van een turbidiet is op een gegeven moment 'de Bouma-sequentie' gaan heten en is een wereldwijd begrip geworden.

Turbidieten bleken bovendien niet alleen aan de fliet-faciës gebonden, ze bleken overal ter wereld voor te komen in alle diepere milieus. Daarbij is de fliet-faciës kenmerkend voor de gebieden waar lithosfeerplaten met elkaar in botsing zijn, dus waar diepe, snel deformerende bekkens ontstaan, terwijl turbidieten ook zeer veel voorkomen in de zich rustig spreidende oceanen.

Hoe troebelingsstromen in beweging kunnen raken, zich ontwikkelen en in dieper water weer tot afzetting komen, valt moeilijk in de praktijk te bestuderen. Lawines kun je filmen, maar met troebelingsstromen is dat alleen in proefopstellingen mogelijk. Eigenlijk was het effect van een troebelingsstroom al bekend voor ze ontdekt waren. Het is een vaak geciteerd voorbeeld: november 1929 schudde een aardbeving

Afb. 6. Flute casts aan de onderkant van een donkere kalkzandsteenturbidiet (Kalamavka Formatie, B.-Mioceen, Kreta). Voor de monsternamen werd de Noordpijl met viltstift aangegeven, zodat (boven) te zien is dat de transportrichting van NNO naar ZZW gericht was. De lengte van de zaagsnede is 30 cm. Het beeld onder toont een deel van deze zaagsnede. De doorgezaagde flutecast vertoont net als het begrenzend basisdeel (Ta-interval) een zwakke gradering, al snel gevolgd door zwak gelamineerd siltig materiaal (Tb), dat net voor de nieuwe zandige laag overgaat in het allerfijnste silt (Te). Het volgende zandige laagje toont vooral zwak ontwikkelde (en scheef aangesneden) stroomribbel laminatie (Tc).

de oostelijke continentrand van Amerika, ter hoogte van New England en Zuidoost-Canada. Deze zo genoemde Grand Banks beving zette een enorme massa modderig sediment, afgezet aan de rand van de continentale shelf, in beweging. Eenmaal in beweging geraakt, ontwikkelde dit zich tot zich een turbulente sedimentmassa die de continentale helling afraasde en zich tot ver over de vlakke diepzeebodem uitspreidde. Razen kun je in dit verband best zeggen, want de snelheid is bekend geworden doordat op verschillende plaatsen in totaal 13 transatlantische telegraafkabels knapten. De verst gelegen kabel, 500 zeemijl van de shelfrand, knapte 13 uur na de beving. Uit het tijdsverschil en de onderlinge afstand tussen gebroken kabels werd een snelheid van ongeveer 70 km/uur berekend. De erosieve kracht van modderrijke turbidieten was hiermee ruimschoots bewezen. Naar schatting heeft deze turbidiet een gebied ter grootte van ruim 300.000 km<sup>2</sup> bedekt met een sedimentlaag van een halve tot een hele meter dik.

Het proces hoe sediment in suspensie kan raken en enige tijd kan blijven, zullen we hier niet behandelen. Nog steeds is men niet geheel uitgestudeerd en uitgemodelleerd op de hydrodynamica van turbulente sedimentmassa's. Dit geldt trouwens niet alleen voor de troebelingsstromen in strikte zin, maar voor alle door de zwaartekracht in beweging gezette sedimentmassa's in een waterig milieu ('gravity flows'; denk o.a. aan modderstromen). De hydrodynamische achtergrond van de al genoemde Bouma-sequentie (afb. 5) heeft in zijn totaliteit te maken met afnemende stroomsnelheid. Dat wil zeggen, zo is de klassieke opvatting, maar er zijn bedenkingen geuit tegen dit volgens sommigen te eenvoudige model. Bovendien is gebleken dat het Bouma-model voor maar een deel van het brede spectrum van wat turbidiet genoemd wordt, toepasbaar is. Vooral relatief grofkorrelige en zandrijke turbidietassociaties vertonen deze volgorde zelden.





Afb. 7. Een vulkanoklastische turbidiet, Sumba, Indonesië. Het Boven-Mioceen van Oost-Sumba (een eiland ten westen van Timor) is voor een belangrijk deel opgebouwd uit turbidieten die bij nader onderzoek (Fortuin et al., 1997) niet alleen veel vulkanisch glas en ander vulkanische producten bleken te bevatten, maar ook nog eens in de echte diepzee werden afgezet (een waterdiepte van ca. 4 km is aantoonbaar). Deze diepzeeturbidieten kwamen pas rond een miljoen jaar geleden boven water. Deze turbidiet valt op door een vrijwel niet ontwikkeld Ta-interval en een juist wel erg mooi gelamineerd Tb-interval, gevolgd door een Tc-interval met klimmende ribbels, wat wijst op snelle afzetting van suspensie. Dat de laminatie hier zo goed zichtbaar is komt ook door de aanwezigheid van donkere vulkanische mineralen.

Toch maar even stilstaan bij het Bouma-concept. De zeer turbulente kop van de troebelingsstroom is in staat om onderliggend bodemsediment op te pakken. Als een draaikolkje in deze massa de bodem raakt (zoals de slurf van een wervelwind de aardbodem raakt), wordt sediment opgeslurpt en meegevoerd, terwijl het kolkgat korte tijd later opgevuld zal worden door uitzakkende suspensie. De grootste korrels zakken daarbij het eerst uit en vormen zo een, qua korrelgrootte, gegradeerd, maar structuurloos interval (interval Ta; afb. 5). Omdat de kolken die de bodem raken zich met een zekere snelheid voortbewegen, maar ook weer snel verdwijnen binnen het turbulente geheel, zal er een sleuf in de zeebodem ontstaan die snel minder diep wordt. Dit soort sleuven staat bekend onder de naam 'flute marks', zodat de afgietsels ervan die we onderaan de verharde laag kunnen zien zitten als 'flute casts' te boek staan (afb. 6). Hun oriëntatie is een betrouwbare indicatie voor de richting waarin de turbidiet zich bewoog, terwijl hun lengte doorgaans varieert tussen een decimeter en een meter. De eerste onderzoekers merkten al snel dat troebelingsstromen weliswaar eerst een onderzeese helling afglijden, maar vervolgens afbuigen in de lengterichting van het bekken.

Het gelamineerde interval Tb ontstaat bij zulke hoge stroomsnelheden dat ribbelforming nog niet mogelijk is. Zodra dit wel mogelijk is, ontstaan stroomribbels (interval Tc). Als er daarbij veel materiaal uit de suspensie zakt, gaan de ribbelkammen over elkaar heen klimmen ('klimmende ribbels'; afb. 7). Interval Td toont net als interval Tb parallelle laminatie, maar in dit geval door zeer zwakke stroming met heel subtiele korrelsortering. Het is het overgangsstadium naar interval Te, het eigenlijke diepzeesediment.

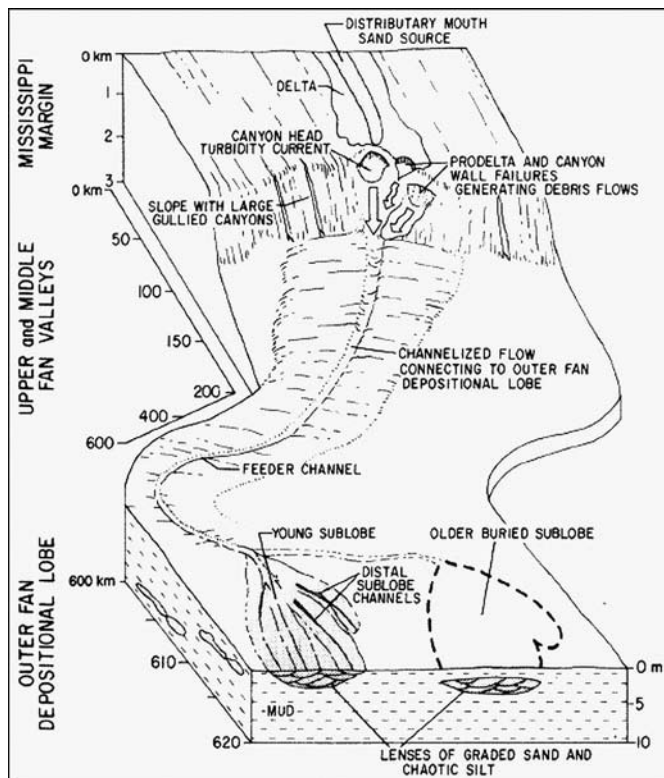
De Bouma-volgorde van afzetting is dus een idealisering, omdat complete Ta-d sequenties eerder uitzondering dan regel zijn vanwege aanzienlijke onderlinge verschillen in omvang en dynamiek van de troebelingsstroom en de samenstelling en korrelgrootte van het meegevoerde sediment. En dan is er nog een probleem met de naamgeving. Voor de ene onderzoeker hoort het begrip turbidiet vooral te slaan op strict die afzettingen die uit turbulente stroming zijn afgezet, terwijl anderen ruimer van opvatting zijn en een breder begrip hanteren voor alle sediment dat door de zwaartekracht in beweging wordt gezet (van lage dichtheid tot zeer hoge dichtheid). Dit is voor de specialisten. Gemakshalve houden wij het hier bij de bredere visie, anders wordt de veel voorkomende associatie van flosch met turbidieten een zaak van verdere onderverdeling naar hun hydrodynamische achtergrond, die de niet-specialist moeilijk kan aanbrengen.

Waar diepzeeslik een gemiddelde sedimentatiesnelheid heeft van enkele centimeters per 1000 jaar, kan een turbidiet binnen een etmaal zijn afgezet en bijvoorbeeld 50 cm dik zijn. Waar turbidieten zich manifesteren verloopt diepzeesedimentatie dus met horten en stoten. Lange periodes van rustige bezinking van pelagische bestanddelen worden afgewisseld met massale aanvoer van sediment. Dit tot verdriet van de bodembewoners. Je zult ineens maar door een flink pakket sediment begraven worden. Wormen weten wel te ontsnappen. Zij wurmen zich in veel gevallen door de bedekkende laag heen en vormen zo (sub)



Afb. 8. Wormsporen op het ondervlak van een turbidiet uit het O.-Eoceen van Spaans Baskenland (Zumaia). Lengte van het grootste kruispoor 11 cm.

verticale ontsnappingskokers. Veel microbenthos zal na bedekking echter het leven laten. Veel niet-erosieve 'zolen' van turbidieten laten een rijkdom aan wormsporen zien (afb. 8). Wie geïnteresseerd is in zogenaamde 'levenssporen', of ichnofossielen, moet vooral de onderkanten van turbidieten zeker niet vergeten. Een recente studie aan de verspreiding van kruispoo-



Afb. 9. Een model van een deel van de Mississippi diepwaterfan op basis van uitgebreid zeeonderzoek. Het diagram geeft links in de zijkant de drie morfologische hoofddomeinen aan: Mississippi deltarand op de shelf, de bovenste en middelste fandalen op de continentale helling en tenslotte de buitenste fan afzettingslobben in het vlakke zeebodembereik. Via de riviermonding ('distributary mouth') kan zand via de submariene canyon aan de rand van de shelf komen. Deze rand is hier tussen de 50 en 100 km van het vasteland verwijderd. Turbidieten worden gegenereerd in de 'canyon head'. Er zijn meerdere geulsystemen die naar de diepte voeren. Vanuit het hoofdgeulstelsel leggen troebelingsstromen honderden kilometers af. Een deel van het materiaal zal aan weerszijden van de toevoergeul ('feeder channel') afgezet worden en een ander deel bereikt de verste sedimentlobben, die rijk zijn aan gegradeerd zand en silt, maar lateraal beperkt zijn van uitbreiding. Deze lobben verplaatsen zich zijdelings met verloop van tijd, zoals in het voorste blokdiagram aangegeven staat. Bron: <http://pubs.usgs.gov/fs/seafloor-images/>.

ren in de Eocene Pyreneeënflysch (Heard en Pickering, in druk) toont aan dat het aantal 'soorten' en hun verspreiding te gebruiken is bij de nadere karakterisering van de submilieus binnen een turbidietensysteem.

## Turbidieten en sedimentwaaiers in de diepzee

De ruimtelijke samenhang van turbidieten hoort nog ter sprake te komen. Troebelingsstromen blijken niet helemaal willekeurig over zeebodems uitgespreid te worden. Het merendeel van troebelingsstromen wordt gevoed vanuit een sedimentbron. Niet onlogisch, want daar waar veel sediment permanent aangevoerd wordt, zoals bij de uitmonding van een rivier in zee, kan het makkelijkst bodeminstabiliteit ontstaan. Sedimentaanvoer is dus een belangrijke factor. Maar er zijn uiteraard de nodige uitzonderingen. Ook door een plotseling optredende oorzaak, een flinke aardbeving of een superstorm, kan zomaar ergens op een onderzeese helling sediment bezwijken en zich ontwikkelen tot een troebelingsstroom.

Zeebodemonderzoek leert dat veel shelfsediment naar de continentale helling afgevoerd wordt via uitgeschuurde, onderzeese dalen (submariene canyons; afb. 9), om zich van daaruit in waaiervormige patronen (submariene fans) uit te spreiden. Dit doet denken aan de manier waarop alluviale sedimentwaaiers voor een gebergtefront gevormd worden. Qua grootte en

morfologie bestaat er een vrijwel oneindige variatie aan diepzeefans en minder gestructureerde sedimentwaaiers. De kleinste zijn enkele kilometers lang, de grootste overtreffen 2500 km lengte (zoals de Bengalen fan, die door de Indus gevoed wordt).

De wijze van vorming van submariene fans laten we grotendeels onbesproken. Het is hier voldoende te noemen dat er een aantal morfologische hoofdelementen is. Zoals aanvoersystemen via submariene canyons bij de shelfrand en dieper, die zich vertakken naar kleinere verdeelsystemen (van al of niet meanderende geulen). Langs deze geulranden en hun uiteinde zullen deze doorgangskanalen voor de troebelingsstromen al veel sediment neerleggen. Daar zandkorrels eerder tot afzetting komen dan de fijnere sedimentpartikels zullen de zandrijkere turbidieten zich vooral aan weerszijden van deze geulen bevinden en verder binnen lobvormig uitbouwende turbidietwaaiers aan het eind van de geulsystemen (afb. 9). Tussen deze geulsystemen en sedimentlobben in zullen er modderrijke afzettingen, samen met dunne, fijnerkorreliger turbidieten worden afgezet. Sedimentologen die oude turbidietensystemen bestuderen, al of niet in flysches, zullen steeds proberen onderscheid te maken tussen de diverse morfologische elementen, om zo de wijze van bekkenvulling te kunnen begrijpen. Zij onderscheiden dus de nodige faciëstypen en proberen vervolgens die te koppelen aan hun ontstaan en positie binnen het systeem. Dat niet alleen vanuit academische gedrevenheid naar kennis en inzicht, maar ook omdat belangrijke olie- en gasvoorraden tegenwoordig gewonnen worden uit diepwaterzanden (zie ook de websites aan het eind van deze bijdrage).

Naast de al genoemde sedimentaanvoer spelen ook andere factoren, zoals tektoniek en klimaat een belangrijke rol bij de vorming van turbidietassociaties. Sedimentaanvoer is bijvoorbeeld afhankelijk van klimatologische omstandigheden. Nattere klimaten zorgen voor meer sedimentafvoer naar zee. (Plaat)tektoniek bepaalt niet alleen de aard van het bekken, maar ook het al of niet frequent optreden van aardbevingen en beïnvloeding van het onderzeese reliëf door breuksystemen. Ook zeespiegelschommelingen hebben duidelijk effect. Bij wereldwijd lage zeespiegelstanden, zoals tijdens glaciële periodes, zullen sedimentbronnen als delta's en rivieren direct bij de shelfrand komen te liggen en kan het aangevoerde sediment makkelijker via troebelingsstromen naar de diepzee getransporteerd worden. Het lijkt erop dat juist onder zulk soort omstandigheden de grootste en verst reikende troebelingsstromen mogelijk zijn. Gedurende hoge zeespiegelstanden (tijdens warme interglaciële periodes zoals nu) zijn de shelfgebieden het grootst, zodat daarop relatief veel zand en klei blijven liggen en troebelingsstromen veel minder vaak tot ontwikkeling komen. Kortom, er spelen vele factoren een rol van betekenis, zeker als je de ruimtelijke eigenschappen van de afzetting van turbidieten wilt bestuderen en begrijpen.

## Enkele turbidietvoorkomens nader bekeken

### Alpenflysch

Alpenwandelaars die willen weten of er in het gebied van hun keuze flyschvoorkomens zijn, kunnen het beste regionale geologische excursieboekjes raadplegen. Met Amsterdamse studenten werd altijd de Nünalpstock bezocht, een enorme ontsluiting boven Sörenberg in de Schlierenflysch (afb. 1). De flyschdekbladen van Centraal-Zwitserland worden met name vertegenwoordigd door deze Schlierenflysch. De belangrijkste ontsluitingen bevinden zich in de NO-ZW-verlopende Habkern Mulde, een syncline in de Helvetische Zone tussen de Brienzer See en het Meer van Luzern. De flysch ligt tektonisch ingeklemd tussen nog sterker gedeformeerde gesteenten (afb. 2). De Nünalpstock-ontsluiting is mede het gevolg van een enorme bergstorting in 1910, waarbij naar schatting 1.5 miljoen kubieke meter gesteente het dal in gleeed tot deels in het dorp. Via Google-Earth (als zoekterm Sörenberg intypen en u komt direct



Afb. 10. De paleocene– onder-eocene turbidieten van Baskenland zijn bijzonder fraai ontsloten bij Zumaia. Deze steilgesteld lagen lijken, dankzij de regelmatige afwisseling van schalie en zandsteen en de opvallend strakke gelaagdheid, wel op de bladzijden van een boek, klaar om gelezen te worden. Deze sectie met het aangrenzende oudere gedeelte is dan ook goed bekend in stratigrafiekringen.

vormde zich in het Eoceen een geleidelijk zuidwaarts migrerende, diepe trog als gevolg van de botsing (en gedeeltelijke onderschuiving) van de Iberische plaat en de Europese plaat.

In deze globaal west–oost-verlopende trog vormden zich dikke flyschpakketten, in totaal zo'n 4,5 km dik en worden Hecho Groep genoemd. Deze stratigrafische eenheid is opgebouwd uit een zestal verschillende, zich in westelijke richting uitbouwende turbidietensystemen, waaronder het al eerder genoemde Broto-systeem (afb. 4). De laterale correlatie van de diverse niveaus wordt vooral mogelijk gemaakt door een achttal zogenaamde megaturbidieten. Dit zijn zeer dikke banken, rijk aan, vanuit het ondiepe domein meegekomen, nummulieten en andere grote foraminiferen. Ze worden geïnterpreteerd als het gevolg van een enkele gebeurtenis, vermoedelijk een zware aardbeving, waardoor een deel van de bekkenrand, een platform waar kalkstenen werden afgezet, instortte. Op sommige plaatsen zijn deze megabeds 200 m dik, terwijl ze tot over 150 km door het bekken zijn te vervolgen. Ook door mijn vroegere veldwerkgebied liep zo'n 'megabed'; een opdracht was onder meer om het verloop van dit gidsniveau uit te zoeken. Deze bank was daar echter hooguit 10 m dik. Een recente studie (Remacha, 2003) laat zien dat het mogelijk is om door middel van zeer nauwkeurige veldopnames en met gebruik van de positie van deze megabeds nauwkeurige terreinrelaties te maken, zodat de interne opbouw van het systeem (positie van lobben, geulen, diepzeevlakte, etc.) duidelijk wordt. Daar Broto vlak bij de entree tot de fraaie Ordesa-vallei ligt, komen bezoekers voor dat gebied automatisch door de flysch heen.

## 2. De flysch van Zumaia

Langs de Baskische kust dagzoomt een goed ontsloten serie van B.-Krijt–Eoceen, waarbij Paleoceen–Eoceen flysch tussen de badplaatsen Zumaia en het volgende dorp Guetaria in mooie kliffen zijn ontsloten (afb. 10 + achterplaat). In Zumaia wijzen zelfs richtingborden naar de flyschontsluitingen, die vooral mooi zijn in het klif ten noorden van het kerkje van San Telmo. Aanvoerrichtingen wijzen hier op een, ten opzichte van de huidige kust, noordelijk tot noordoostelijk gelegen brongebied.

## Zuid-Spanje

Ten noordoosten van Almeria, tussen de Sierra de Los Filabres in het noorden en de Sierra Alhamilla in het zuiden, bevindt zich het Neogene Tabernas-Sorbas Bekken. Na de opening van dit bekken in het M.-Mioceen vond daling en verdieping plaats en werd gedurende het Tortonien een ruim 1 km dik pakket turbidieten en mergels afgezet. In het westelijke Tabernas-deel heeft collega Kick Kleverlaan eind tachtiger jaren zijn promotie-onderzoek gedaan. Hij kon daar door nauwkeurig veldonderzoek een kleine submariene fan reconstrueren (Kleverlaan, 1989). Sindsdien organiseert Kleverlaan daar regelmatig workshops voor oliegeologen vanwege het belang van deze afzettingen als goed te bestuderen terreinvoorbeeld van de inwendige opbouw van een oliereservoir in een diepwater setting. Het gebied rond Tabernas is interessant om te bezoeken, al was het alleen maar omdat hier midden tussen de turbidieten een groot aantal bekende en minder bekende westernfilms zijn opgenomen. Een tweetal 'Little Hollywood' filmnederzettinkjes zijn nog te bezoeken ter herinnering aan de cowboyglorietijd. Wie de doorgaans berijdbare bedding van de

goed aan) kunt u deze landslide uitstekend te zien krijgen. Bewegingen in deze massa worden nog steeds gemonitord, ook al omdat er zich kort voor de millenniumovergang – en na zware regenval – nieuwe verglijdingen voordeden. En dan te bedenken dat het nieuwe dorp deels op deze glijmassa is gebouwd. Hoe er te komen: Te voet van Sörenberg (1159 m) omhoog via de asfaltweg direct naast de kerk. Volg deze tot de laatste boerderij ten westen van de bergstorting. Vandaar gaat een pad verder omhoog tot een duidelijke houten vlonder met badkuip, die dient als drinkplaats voor vee. Ga hier niet rechts de blokkenvelden van de bergstort in (onbegaanbaar), maar volg eerst het pad verder omhoog. Dan bij het eerste duidelijke pad naar rechts door het bos naar boven. Dit met rood-wit gemarkeerde pad gaat vrij steil omhoog door het bos. Dit volgen tot een smal koeienhekje. Daar rechtsaf en het prikkeldraad, cq. een waterslang, volgen tot bij de landslide-gesteenten. Van daaruit volgen we nog even dit vlak verlopende mini-pad en dan door het bos linksaf (via boshut) naar de landslide scar (hoogte 1640 m). Het laatste stuk is geen aangegeven route. De ontsluiting, met een breedte van meer dan 200 m en ca. 100 m hoogte, toont een pakket steilstaande turbidieten, in afwisseling met kleiige tussenlagen, afgezet tijdens het Vroeg-Eoceen. De ontsluiting zelf is te gevaarlijk om te bezoeken door afstortende gesteente, maar de grote brokken afgestort materiaal laten voldoende interessants zien, zoals ondervlakstructuren en gradering. Bepaal zelf de verjongingsrichting van de lagen aan de hand van ook op afstand duidelijke zichtbare ondervlakstructuren.

## Pyreneeënflysch

### 1. Centrale Pyreneeën

In de Spaanse Pyreneeën, ruwweg tussen Ainsa en Jaca,

Afb. 11. De zandige turbidieten van het Sorbas Bekken in Zuidoost-Spanje. Mooie diepwatertussenlagen ontbreken hier vrijwel. Vooral de onderste Ta-b-sequenties zijn hier goed vertegenwoordigd.



Rambla de Tabernas inrijdt kan op vele plaatsen, zowel aan de noordkant als de zuidkant van de grote weg mooie ontsluitingen vinden. Aan de zuidkant is ook de overgang van niet-mariene naar mariene conglomeraten ontsloten. Het zandrijke turbidietencomplex in het oostelijke deel van dit bekken kan gemakkelijker bekeken worden. De E15/N340 autosnelweg naar Almeria snijdt er namelijk dwars doorheen. Wie deze afzettingen wil bekijken moet de afslag Sorbas nemen en de rustige oude weg (N340) volgen. Vlak voor het dorpje Peñas Negras kom je vanzelf langs ontsluitingen (afb. 11) van turbidieten afgezet in een zeer zandrijk systeem. Meer ontsluitingen ook langs de nieuwe weg naar Gafarillos. Amsterdammers hebben het nodige veldwerk in de hele regio gedaan. Tegenwoordig doen er vele Europese groepen inspiratie voor onderwijs en onderzoek op, omdat deze bekkens in geologisch opzicht zoveel te bieden hebben.

## Literatuur

Bouma, A.H., 1962. Sedimentology of some Flysch Deposits, a Graphic Approach to Facies Interpretation. Elsevier, Amsterdam, 162 pp.  
 Fortuin, A.R., Van der Werff, W., Wensink, H., 1997. Neogene basin history and paleomagnetism of a rifted and inverted forearc regio, on- and offshore Sumba, Eastern Indonesia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 15: 61-88.  
 Heard, T.G., Pickering, K.T. (in druk). Trace fossils as diagnostic indicators of deep-marine environments, Middle Eocene Ainsa-Jaca basin, Spanish Pyrenees, *Sedimentology*, doi:10.1111/j.1365-3091.2007.00922.x

Kleverlaan, K., 1989. Neogene history of the Tabernas basin (SE Spain) and its Tortonian submarine fan development. *Geologie en Mijnbouw*, 68: 421-432.  
 Mutti, E., 1992. Turbidite Sandstones. AGIP-Istituto di Geologia Università di Parma, 275 pp.  
 Remacha, E., Fernandez, L.P., 2003. High-resolution correlation patterns in the turbidite systems of the Hecho Group (South-Central Pyrenees, Spain). *Marine and Petroleum Geology*, 20: 711-726.  
 Ten Haaf, E., 1959. Graded Beds of the Northern Apennines. Proefschrift, Univ. Groningen, 102 pp.  
 Ten Haaf, E., 1966. Le Flysch Sud-Pyrénéen le long du Rio Ara (Huesca). *Actas V. Cong. Intern. Est. Pir. Jaca-Pamplona, Pirineos*, dl. 81-82: 143-150.

## Websites

Afbeelding en beschrijving van structuren in de Annot zandsteen, Peira Cava gebied, ZO-Frankrijk (door een Noorse sedimentologie-promovendus): <http://home.no.net/chemo/Thesis/Details/Sedimentology.htm>  
 Karpatenflysch met foto's van sedimentaire structuren: <http://www.uj.edu.pl/ING/atlas/atlas%20ang.html>  
 Levensloop Kuenen: <http://www.inghist.nl/Onderzoek/Projecten/BWN/lemmata/bwn5/kuenen>  
 Levensloop Migliorini: [www.speitaly.org/pages/past/MIGLIORINI%20spe\\_1\\_2005.pdf](http://www.speitaly.org/pages/past/MIGLIORINI%20spe_1_2005.pdf)  
 Rol van diepwaterzanden voor de industrie: <http://strata.geol.sc.edu/DeepwaterClasIntro.html>

Alle foto's door de schrijver.