

Abstract

The Northern Ethiopian Highlands are a fragile environment, characterised by steep slopes, intense rainfall and a sparse vegetation cover. The extreme poverty, stagnating technology and high population and livestock densities induce serious soil erosion and degradation problems in these Highlands. This not only leads to lower crop yields but has also important off-site consequences: the life expectancy of many dams and reservoirs (used for power generation or water supply in the dry season) is threatened by massive sedimentation. Although these problems demand for a thorough solution, not much is known about the magnitude and dynamics of sediment transport in the Northern Ethiopian Highlands. Therefore, an intensive measuring campaign was conducted during the rainy season of 2006 in ten subcatchments of the Geba (drainage area: 5180 km²), a tributary of the Tekeze. The catchments had drainage areas between 120 km² and 4330 km² (mean: 1068 km²) and represented a rather variable range of environments. Annual rainfall ranges from 700 mm to more than 1200 mm. The estimated area-specific sediment yields (SY) varied between 400 and 2500 ton/km²/yr. These values were obtained with rating curves, based on manual discharge and suspended sediment concentration measurements. The error on these yields was assessed by Monte Carlo simulations and varied between 6 and 48 %. In some cases, however, the uncertainty is larger, since a dominant part of the sediment is transported during short but intense flash floods at night. Sampling these events is very difficult. A few flash floods were, however, monitored in detail. The results showed a clear positive hysteresis effect. Throughout the season runoff response generally increased, while sediment concentration generally decreased. The increase in runoff response can most likely be related to vertic properties of the soils, while the decrease in sediment concentrations is mainly related to the depletion of sediment and the development of a vegetation cover. Some differences, mainly in grain-size distributions, were noted between higher and lower catchments of the Geba. To explain variation in SY between the catchments, a semi-quantitative model (FSM) was adapted. Topography, soil cover, lithology and the presence of gullies explained a large part of the observed variance. Although further refinement is needed, semi-quantitative models seem a promising tool for predicting SY in a cheap and efficient way when no detailed data is available.

Key words: Ethiopian Highlands, Land Degradation, Sediment Export, Rainfall Runoff, Monte Carlo Simulation, Flash Floods, Semi-quantitative Models

Grootteorde en dynamiek van sedimentexport in het Geba Bekken, Noord Ethiopische Hoogland.

Matthias Vanmaercke*

Onder leiding van: Jean Poesen, Gert Verstraeten, Amanuel Zenebe

*Afdeling Fysische en Regionale Geografie, Celestijnenlaan 200^E, 3001 Heverlee, matthiasvanmaercke@geo.kuleuven.be

Abstract

The Northern Ethiopian Highlands are a fragile environment, characterised by steep slopes, intense rainfall and a sparse vegetation cover. The extreme poverty, stagnating technology and high population and livestock densities induce serious soil erosion and degradation problems in these Highlands. This not only leads to lower crop yields but has also important off-site consequences: the life expectancy of many dams and reservoirs (used for power generation or water supply in the dry season) is threatened by massive sedimentation. Although these problems demand for a thorough solution, not much is known about the magnitude and dynamics of sediment transport in the Northern Ethiopian Highlands. Therefore, an intensive measuring campaign was conducted during the rainy season of 2006 in ten subcatchments of the Geba (drainage area: 5180 km²), a tributary of the Tekeze. The catchments had drainage areas between 120 km² and 4330 km² (mean: 1068 km²) and represented a rather variable range of environments. Annual rainfall ranges from 700 mm to more than 1200 mm. The estimated area-specific sediment yields (SY) varied between 400 and 2500 ton/km²/yr. These values were obtained with rating curves, based on manual discharge and suspended sediment concentration measurements. The error on these yields was assessed by Monte Carlo simulations and varied between 6 and 48 %. In some cases, however, the uncertainty is larger, since a dominant part of the sediment is transported during short but intense flash floods at night. Sampling these events is very difficult. A few flash floods were, however, monitored in detail. The results showed a clear positive hysteresis effect. Throughout the season runoff response generally increased, while sediment concentration generally decreased. The increase in runoff response can most likely be related to vertic properties of the soils, while the decrease in sediment concentrations is mainly related to the depletion of sediment and the development of a vegetation cover. Some differences, mainly in grain-size distributions, were noted between higher and lower catchments of the Geba. To explain variation in SY between the catchments, a semi-quantitative model (FSM) was adapted. Topography, soil cover, lithology and the presence of gullies explained a large part of the observed variance. Although further refinement is needed, semi-quantitative models seem a promising tool for predicting SY in a cheap and efficient way when no detailed data is available.

Key words: Ethiopian Highlands, Land Degradation, Sediment Export, Rainfall Runoff, Monte Carlo Simulation, Flash Floods, Semi-quantitative Models

Sleutelwoorden: Ethiopische Hoogland, land degradatie, sedimentafvoer, waterafvoer, Monte Carlo simulatie, Vloeden, semi-kwantitatieve modellen

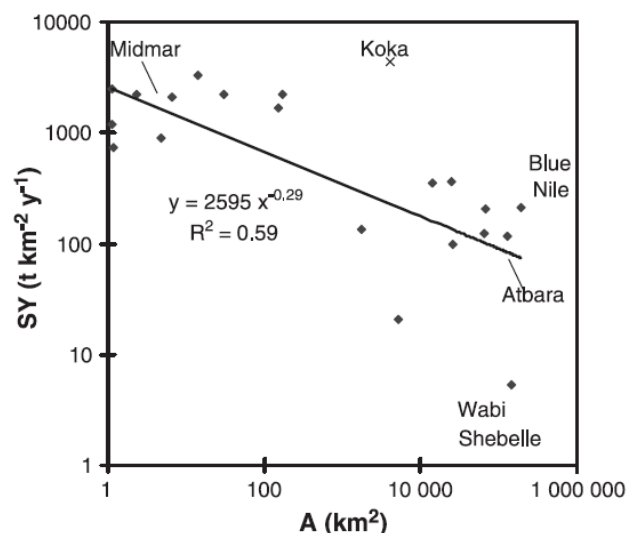
1. Inleiding

1.1. Probleemstelling

Het Noord Ethiopische Hoogland is met zijn steile hellingen en intense regens een gebied dat erg gevoelig is voor bodemerosie (Nyssen et al., 2004). De combinatie van deze fragiele omgeving met de grote bevolkingsdruk, armoede en gestagneerde landbouwtechnieken leidde er tot ernstige landdegradatie. Door bodemerosie gaat vruchtbare bodem verloren waardoor ook de gewasopbrengsten dalen en de voedselonzekerheid toeneemt. Naast het verminderen van gewasopbrengsten heeft bodemerosie echter ook belangrijke stroomafwaartse gevolgen, waaronder het dichtslibben van reservoirs en stuwwerken.

De bevolkingstoename in Ethiopië leidde immers ook tot een grote toename van de energiebehoefte. Naar schatting 90% van deze behoefte wordt echter ingevuld door het verbranden van hout, wat gepaard gaat met grootschalige ontbossingen. Desalniettemin heeft Ethiopië een erg groot potentieel om energie op te wekken met behulp van waterkrachtcentrales. De afzetting van sediment in stuwwerken, kort de levensduur (en rendabiliteit) van deze constructies aanzienlijk in (Zenebe et al., 2008). Zo werd bijvoorbeeld in 2002 de constructie aangevat van een 188 meter hoge dam op de Tekeze die 300 megawatt dient op te wekken. Deze centrale zou actief moeten zijn vanaf 2008. Toch is er nagenoeg niets geweten over de levensduur van dit stuwmeer, aangezien er nagenoeg geen sedimentafvoer gegevens beschikbaar zijn voor de Tekeze (Nyssen et al., 2007). Ook voor kleinere reservoirs vormt sediment een groot probleem. In Tigray (Noord-Ethiopië) werden tussen 1994 en 2002 grote inspanningen geleverd om afstromend water te vangen in reservoirs achter aarden dammen zodat dit water benut kan worden voor irrigatielandbouw. Veel van de gebouwde reservoirs zijn echter niet meer bruikbaar doordat deze in geen tijd dichtslibden (Haregeweyn et al., 2006).

Betrouwbare sedimentexport gegevens zijn dan ook niet enkel van wetenschappelijk belang, maar ook onontbeerlijk, wil men op een duurzame manier reservoirs of stuwwerken aanleggen. Toch is er erg weinig data beschikbaar. Dit werd geïllustreerd in een onderzoek van Nyssen et al. (2004): figuur 1 geeft een overzicht van alle beschikbare sedimentexport data van rivieren die het Ethiopische Hoogland draineren. Het aantal punten op deze figuur is beperkt, maar vooral voor middelgrote bekkens (100-5000 km²) is nagenoeg geen data beschikbaar. Ook over de temporele dynamiek en ruimtelijke variatie in sedimentexport is nagenoeg niets geweten.



Figuur 1: Oppervlaktespecifieke sedimentexport (SY) versus bekkengrootte (A) voor verschillende bekkens in het Ethiopische Hoogland. De data van Koka zijn waarschijnlijk overschat en werden niet in rekening gebracht bij de regressieanalyse (Bron; Nyssen et al., 2004).

1.2. Doelstellingen

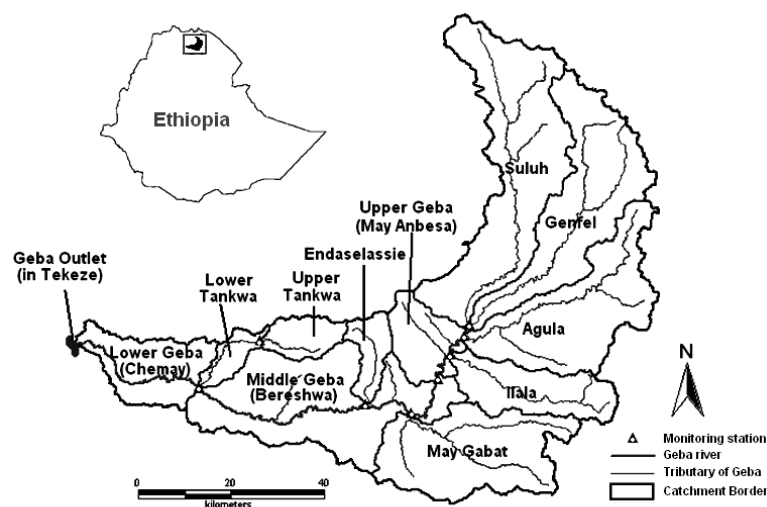
De hoofddoelstelling van dit onderzoek was meer inzicht verkrijgen in de grootteorde en dynamiek van sedimentexport voor middelgrote bekkens in het Noord-Ethiopische Hoogland. Meer specifieke doelstellingen waren:

- Een begroting maken van de totale water- en sedimentafvoer voor tien deelbekkens van de Geba rivier.
- Inzicht krijgen in de temporele dynamiek van deze water- en sedimentexport.
- Inzicht verwerven in de ruimtelijke variabiliteit van de sedimentexport en de eventueel waargenomen verschillen tussen de bekkens verklaren aan de hand van een eenvoudig model.

Hiervoor werd in de zomer van 2006 een meetcampagne uitgevoerd in het Geba bekken, een zijrivier van de Tekeze, gelegen in het Noordelijk Ethiopische Hoogland. Deze campagne werd voorafgegaan door meetcampagnes in 2004 (Vanhulle, 2005) en 2004 (Beel, 2006; Beel, 2007). In deze campagnes werden echter enkel 5 deelbekkens in de bovenloop van de Geba bestudeerd. In 2006 werden 10 deelbekkens bemonsterd, waardoor ook het grootste deel van de benedenloop bestudeerd werd. Dit artikel beschrijft de resultaten van deze laatste meetcampagne.

2. Studiegebied

Het Geba bekken (zie figuur 2) is gelegen in het Ethiopische Hoogland en draineert een gebied van 5180 km². De bovenloop van de Geba wordt gevormd door de bekkens Suluh, Genfel, Agula, Ilala en May Anbesa. Deze werden ook in de voorgaande meetcampagnes bemonsterd. De deelbekkens van de benedenloop zijn: May Gabat, Endaselassie, Tankwa, Bereshwa en Chemay. Enkel deze laatste werd niet onderzocht in de meetcampagne van 2006. Het bekken bestaat hoofdzakelijk uit plateaus die diep ingesneden worden door rivieren en is gelegen tussen de 955 en 3295 meter boven zeeniveau (gemiddelde: 2146 meter) met helling tussen 0 en 56% (Asfaw, 2005). De geologie in het bekken varieert erg sterk en bestaat uit een breed scala van Precambische gesteenten, Mesozoïsche afzettingen (voornamelijk zand- en kalksteen) en Tertiaire basaltafzettingen (Vandecasteele, 2007). De voornaamste bodems in het bekken zijn Leptosolen, Cambisolen en Lixisolen (FAO,1998). Veel van de bodems hebben krimp-zwel eigenschappen (engels: vertic properties).



Figuur 2: Het Geba Bekken en zijn voornaamste zijrivieren. Ook de meetstations zijn aangeduid op de figuur.

Afhankelijk van de hoogte, varieert de gemiddelde jaartemperatuur er tussen de 15 en 25°C. De jaarlijkse neerslag varieert tussen de 700 en 1200 mm en is eveneens afhankelijk van de topografie. Ongeveer 80% van de regen valt tijdens het regenseizoen (juni-september). Meestal worden door convectie wolken gevormd in de voormiddag waardoor het in de namiddag regent. Deze regens zijn vaak intens en gaan gepaard met hevig onweer (Nyssen et al., 2004).

3. Materiaal en methoden

Om een begroting te maken van de totale sediment- en waterafvoer, alsook de variaties hierin te detecteren was een continue dataset nodig, waarbij het waterafvoerdebiet (Q , m³/s) alsook de suspensiedimentconcentratie (SSC, g/l) op ieder moment gekend was. De brongegevens voor deze dataset werden verzameld tijdens een intensieve meetcampagne in het regenseizoen (van 12 juli t.e.m. 10 september 2006). Aan 10 meetstations werden metingen uitgevoerd (zie figuur 2). Ieder station bestond uit een steiger vanwaar bij hoog water representatieve waterstalen konden verzameld worden. In deze steigers waren drukmeters geïnstalleerd die automatisch iedere tien minuten de waterdruk registreerden. De riviersectie aan iedere meetpost werd opgemeten d.m.v. een elektronische theodoliet. Verder werden minstens dagelijks en op een stroom-proportionele basis verschillende metingen uitgevoerd. De waterdiepte (d , m) werd manueel bepaald. Tezelfdertijd werd de oppervlakte snelheid gemeten d.m.v. een lege plasticfles en werd een SSC-staal genomen. Beddingslast werd niet gemeten. De nadruk van deze studie ligt dan ook hoofdzakelijk op de export van sediment in suspensie.

Eens terug in België, werden de drukmetingen gekalibreerd tot een continue reeks van waterdieptes doorheen het regenseizoen. De gemeten oppervlaktesselheden werden met behulp van een empirische formule omgezet naar gemiddelde snelheden. Met behulp van deze snelheid en de opgemeten riviersecties kon Q bepaald worden. Deze manueel gemeten debieten en waterdieptes werden gebruikt om d - Q -relaties (Eng.: 'Depth-Discharge Rating Curves') op te stellen voor iedere meetpost. Met behulp van deze relaties konden de continue reeksen waterdieptes omgezet worden in continue waterafvoerdebiet reeksen.

Om de sedimentconcentratie op ieder moment te schatten, werden verbanden opgesteld tussen het manueel gemeten debiet en de SSC (Eng.: 'Q-SSC Rating Curves'). De spreiding van de metingen rond deze relaties was meestal erg groot. Sediment concentratie hangt immers niet enkel af van stromingskarakteristieken maar vooral van de aanvoer van sediment in het bekken. Dit bleek reeds uit verschillende voorgaande studies (vb. Moliere et al., 2004; Goudie, 2004). Daarom werd, naar analogie met de meetcampagne in 2005, het seizoen opgesplitst in drie arbitrair gekozen periodes. Voor elk van deze periodes (begin, midden en einde van het regenseizoen) werd een afzonderlijke Q -SSC relatie opgesteld. Dit leidde tot duidelijk betere performanties. Met behulp van deze relaties werd ook de SSC op een continue basis geschat. Het product van deze concentraties met het afvoerdebiet leverde op zijn beurt de instantane sedimentafvoer op een continue basis. Uit de sommatie van deze waarden kon de totale sedimentexport berekend worden.

Tijdens onze meetcampagne werden we echter geconfronteerd met verschillende problemen. Deze leidden tot onnauwkeurigheden in het meten van de stroomsnelheid, waterdieptes en sediment concentraties. De grootste problemen werden veroorzaakt door de voorkomende 'flash floods' (plotse vloed). Deze zijn erg belangrijk in de totale sediment export, maar treden vooral 's nachts op. Werken in deze condities was moeilijk en vaak zelfs gevaarlijk. Vandaar dat slechts weinig metingen konden uitgevoerd worden tijdens deze hoge piekdebieten. Bovendien werden door deze flash floods van 5 van de 10 meetbruggen weggespoeld (zie figuur 3). Eén brug werd zwaar beschadigd. Hierdoor werden ook de digitale drukmeters weggespoeld of moesten deze verplaatst worden en zijn er voor 6 van de

10 meetstations dagen waarvoor geen continue drukmetingen beschikbaar is. De water- en sedimentexport tijdens deze dagen moest geschat worden aan de hand van modellen, gebaseerd op manuele metingen, regenvaldata en gegevens verzameld in andere meetstations. De kwaliteit van deze modellen kon door gebrek aan data niet geëvalueerd worden, maar ligt voor veel bekkens waarschijnlijk erg laag.



Figuur 3: Flash flood met een waterhoogte van ca. 5m aan het Agula station. De linker foto werd genomen vlak na de piek van de vloedgolf (25/07/2006). Deze vloedgolf bereikte het oevervol debiet en vernietigde de 5.5m hoge betonnen meetsteiger. De rechter foto werd de volgende morgen genomen toen het waterpeil terug gezakt was tot zijn normaal peil (ca 0.5m).

Op de genomen SSC-stalen werden korrelgrootte-analyses uitgevoerd. Omdat het totale aantal stalen (>1100) te groot was en veel stalen te weinig sediment bevatten om afzonderlijk te analyseren, werden per meetpost de genomen SSC-stalen gegroepeerd. De stalen werden opgedeeld in drie periodes. Dit waren dezelfde periodes die gebruikt werden bij het opstellen van de Q-SSC relaties. Binnen deze periodes werden de stalen opgedeeld in groepen met een lage, middelhoge en hoge sedimentconcentratie. De grenzen hiervoor werden visueel bepaald door natuurlijke breekpunten op te sporen. Stalen met een uitzonderlijk hoge SSC (meestal genomen tijdens het piekdebiet van een vloed) werden wel afzonderlijk geanalyseerd. Het sediment werd na het samenvoegen gedispergeerd voor de feitelijke korrelgrootte-analyse werd uitgevoerd.

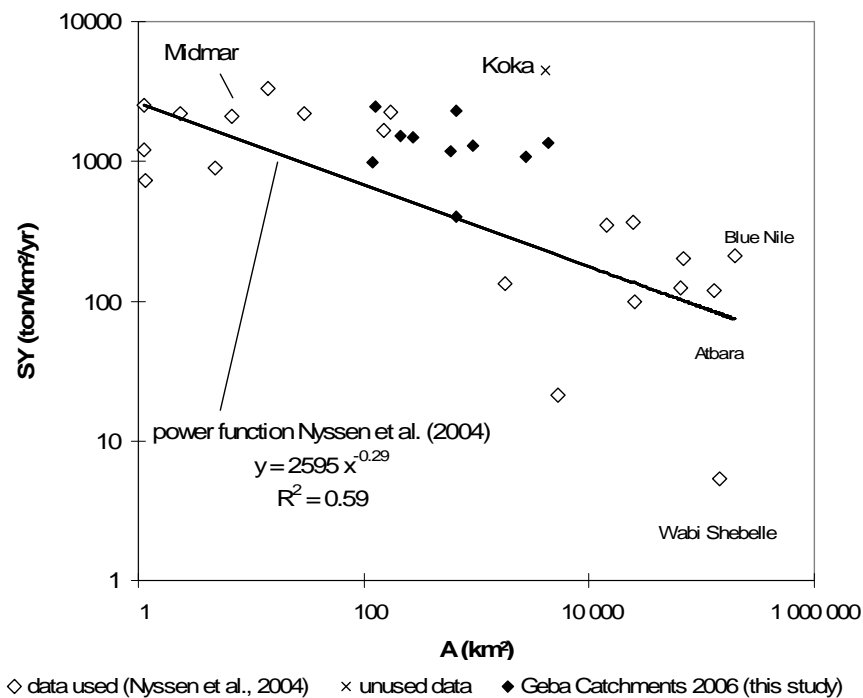
4. Resultaten en discussie

4.1. Totale water- en sedimentafvoer

Een begroting van de totale water- en sedimentafvoer voor de tien bestudeerde bekkens wordt gegeven in tabel 1. Via een lineaire extrapolatie (op basis van de gevallen neerslag tijdens de meetcampagne en de totale neerslag in 2006) werd ook een begroting gemaakt van de totale oppervlakte-specifieke sedimentafvoer in 2006. Figuur 4 toont dat de berekende waarden voor nagenoeg alle bekkens merkbaar hoger liggen dan de eerder voorgestelde regressievergelijking voor het Ethiopische Hoogland (Nyssen, 2004; zie ook figuur 1).

Tabel 1: Begroting van de water- en sedimentafvoer voor de tien bestudeerde deelbekkens van de Geba alsook de onzekerheid op de uitgevoerde metingen. Voor een aantal meetstations moest een deel van water- en sedimentafvoer voorspeld worden aangezien geen continue dieptereeksen beschikbaar waren. Het aandeel van deze voorspellingen in de totale water- en sedimentafvoer staat tussen haakjes weergegeven. De waarden van Middle Geba zijn wellicht overschat. Voor de sedimentexport van Agula en May Gabat kon geen onzekerheid berekend worden omdat de residu's niet normaal verdeeld waren.

Naam van bekken (afkorting)	bekken-oppervlakte (km ²)	Totale waterafvoer, m ³	Fout op gemeten waterafvoer (% voorspeld van totaal)	Totale sedimentexport, ton	Fout op gemeten sedimentexport (% voorspeld van totaal)	SY, ton/km ²	SY extrapolatie voor 2006, ton/km ² /yr
Suluh (S)	943	1,06E+07	6,3% (0%)	6,65E+05	13,5% (0%)	705	1303
Genfel (G)	660	3,30E+07	5,4% (0%)	1,64E+05	31,0% (0%)	248	400
Agula (A)	667	5,12E+07	7,2% (27,7%)	9,01E+05	? (29,2%)	1350	2277
Ilala (I)	271	3,85E+07	6,5% (0%)	2,42E+05	9,3% (0%)	893	1502
Upper Geba (OB)	2763	1,50E+08	7% (2,9%)	1,73E+06	47,7% (1,4%)	626	1059
May Gabat (M)	585	5,74E+07	8,6% (0%)	4,24E+05	? (0%)	725	1174
Endaslassie (E)	121	6,73E+06	26,3% (24,0%)	5,79E+04	13,3% (20,4%)	479	989
Upper Tankwa (UT)	128	1,35E+07	5,9% (41,8%)	1,72E+05	6,2% (36,2%)	1349	2468
Lower Tankwa (LT)	214	2,18E+07	13,3% (25,3%)	1,93E+05	12,1% (28,2%)	904	1512
Middle Geba (MG)	4331	4,20E+08	9,7% (70,2%)	1,10E+07	13,1% (79,4%)	2540	?



Figuur 4: Oppervlakte-specifieke sedimentexport (SY) versus bekkenoppervlakte (A) voor verschillende bekens die het Ethiopische Hoogland draineren (Nyssen et al., 2004; zie figuur 1). De SY-waarden van de Geba voor 2006, bekomen in deze studie, zijn aangeduid met zwarte punten.

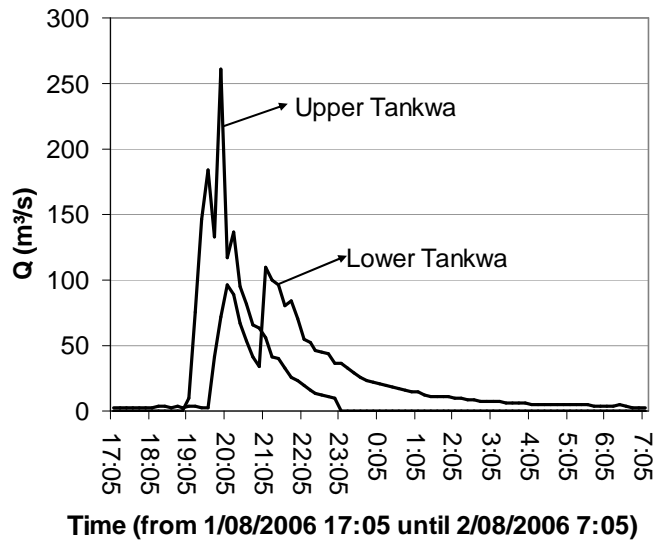
Om een idee te krijgen van de onzekerheid op onze berekeningen, werden Monte Carlo simulaties uitgevoerd. Eerst werden de residu's berekend van de d-Q en Q-SSC relaties door telkens het verschil te bepalen tussen de voorspelde en geobserveerde waarden. Op twee uitzonderingen na (de sedimentexport van Agula en May Gabat), kenden al deze residuen een

normale verdeling. Vervolgens werden telkens duizend ‘nieuwe’ datasets gecreëerd door aan elke originele metingen een willekeurige, normaal verdeelde fout toe te kennen met dezelfde standaardafwijking als de oorspronkelijke residu's. Voor deze duizend datasets werden telkens nieuwe d-Q en Q-SSC relaties berekend. Deze werden gebruikt om duizend alternatieve totale water- en sedimentafvoer waarden te berekenen. Deze waarden waren op hun beurt normaal verdeeld waardoor de relatieve fout op de berekeningen bepaald kon worden (tabel 1; voor een gedetailleerde beschrijving van de methode: zie Vanmaercke, 2007). Er dient echter vermeld te worden dat deze fout enkel geldt voor de berekeningen. Zoals eerder vermeld, werden veel van de drukmeters weggespoeld tijdens de vloed en zijn er voor 6 van de 10 meetstations dagen waarvoor geen continue waterdieptes gekend zijn. De water- en sedimentafvoer voor deze dagen werd voorspeld aan de hand van regressiemodellen. De onzekerheid op deze voorspellingen kon niet achterhaald worden wegens een gebrek aan data, maar is vermoedelijk erg groot. In tabel 1 staat voor ieder meetstation aangegeven welk aandeel van de totaal geschatte water- en sedimentafvoer bestaat uit voorspellingen aan de hand van deze modellen. Voor Middle Geba is dit aandeel erg groot, aangezien de drukmeter wegspoelde tijdens een grote vloed op het einde van het regenseizoen en de opgeslagen metingen hierdoor verloren gingen. Aangezien voordien erg weinig grote vloed werden geregistreerd aan dit station, was het erg moeilijk de afvoerdebieten te correleren met andere variabelen. De begrotingen van de water- en sedimentafvoer van dit station zijn daarom naar alle waarschijnlijkheid overschat.

4.2. Water- en sedimentafvoer tijdens flash floods

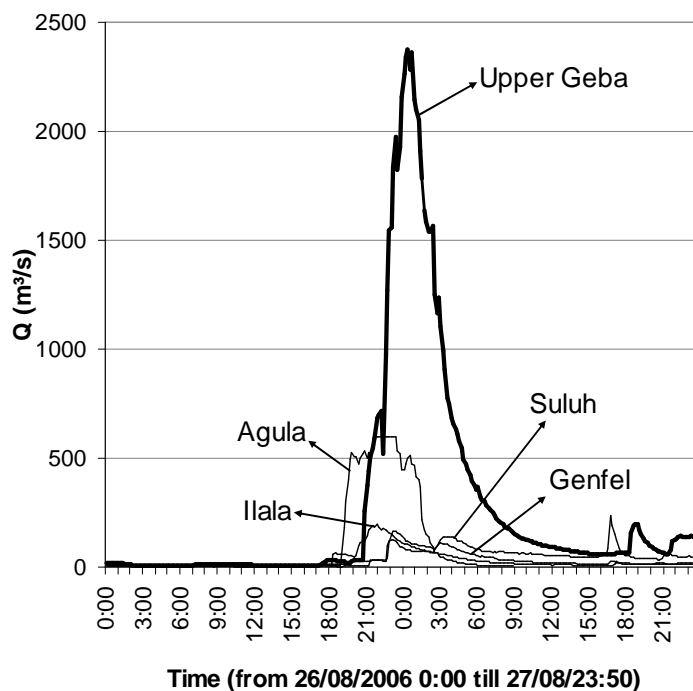
Het grootste aandeel van het water en sediment werd afgevoerd tijdens flash floods. Over het algemeen bestaat er erg weinig water- en sedimentafvoer data over dergelijke vloed omwille van hun onvoorspelbaar karakter, en omdat metingen tijdens dergelijk grote debieten niet evident zijn (Baker et al., 2004). Ook tijdens deze meetcampagne werden veel moeilijkheden ondervonden bij het bemonsteren van deze vloed. Twee flash floods konden echter in detail bemonsterd worden, dit wil zeggen: tijdens verschillende waterhoogtes kon het debiet gemeten worden en kon de SSC bepaald worden.

Wat het afvoerdebiet betreft, worden deze flash floods gekenmerkt door een erg snelle toename in waterniveau tot het piekdebiet. De afname in waterhoogte verloopt een stuk trager. Dit wordt geïllustreerd in figuur 5. Deze scheefheid wordt verklaard doordat het water tijdens het stijgende deel van de vloed slechts weinig hinder ondervindt. De piek van de vloedgolf houdt echter het hierna volgende water op in de rivier, waardoor de afname van het waterniveau trager verloopt (Lohani et al., 2006). Verder werden duidelijke verschillen opgemerkt in de piekigheid van de hydrografen van flash floods in de bestudeerde bekkens. Zo hadden vloed in Agula en Upper Tankwa een erg gepiekte hydrograaf. In andere bekkens was deze vaak meer gespreid. Dit wordt ook geïllustreerd in figuur 5: hoewel het totale volume afgevoerd water in beide stations gelijk is, werd een veel groter piekdebiet genoteerd in het Upper Tankwa station dan het verder stroomafwaarts gelegen Lower Tankwa station. Dit verschil kan verklaard worden doordat de vloedgolf tussen beide stations ongeveer 19 kilometer aflegde en zo een groot deel van zijn energie verloor. Verder bepalen ook de bekkengrootte, bekkenvorm, lithologie en gemiddelde helling in het bekken de mate van de piekigheid van de vloed hydrografen (Baker et al., 2004; Gregory and Walling, 1973).



Figuur 5: Hydrografen van Upper en Lower Tankwa tijdens de vloed van 01/08/2006.

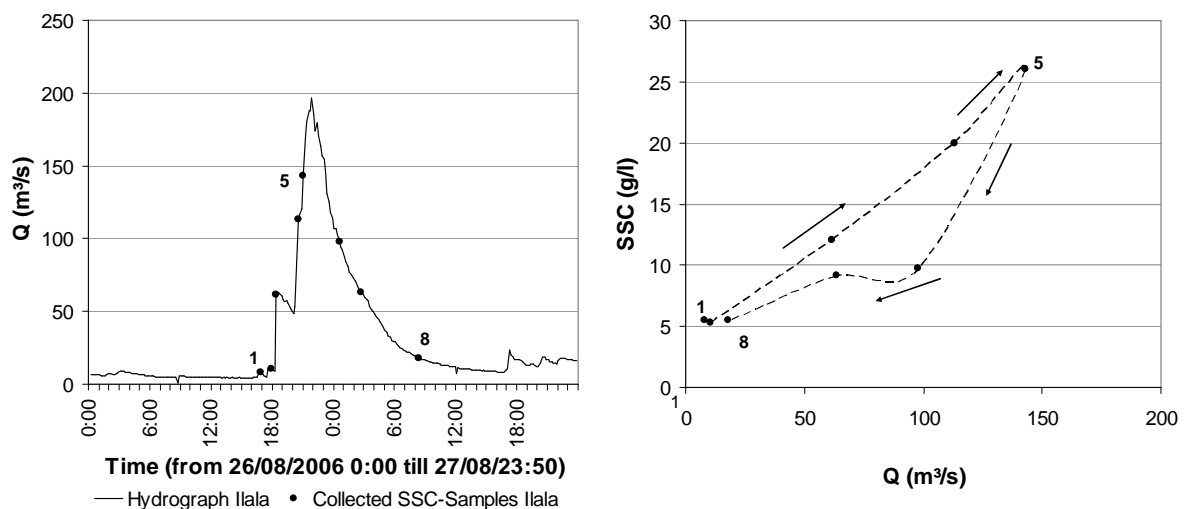
Tijdens twee flash floods kon ook de SSC op verschillende tijdstippen bepaald worden. Eén van deze twee flash floods (opgemeten aan het Upper Geba station) was een uitzonderlijk grote vloed. De waterhoogte steeg toen tot ca. 7 meter en de rivier trad voor een groot stuk buiten zijn oevers. Exacte schattingen van het afvoerdebiet zijn erg moeilijk, aangezien de opgestelde d-Q relaties niet geschikt waren voor deze stroomcondities. Uit een analyse van de piekdebieten, opgemeten in de hoger gelegen deelbekkens van de Upper Geba, bleek echter dat het piekdebiet aan het Upper Geba station wellicht inderdaad meer dan 2000 m^3/s bedroeg (zie figuur 6).



Figuur 6: Hydrografen van de meetstations van de bovenloop van de Geba tijdens voor de flash flood in de nacht van 26 op 27 augustus 2006. Het piekdebiet aan het meetstation van Agula is wellicht onderschat door een probleem met de digitale drukkometer.

De hoogst gemeten SSC-waarde tijdens deze vloed was 67 g/l, maar de werkelijke maximumconcentratie ligt wellicht hoger doordat de meetsteiger net voor het piekdebiet omkantelde. De waterstalen moesten vanaf toen van langs de kant genomen worden en zijn hierdoor wellicht onderschat.

Bij beide bestudeerde flash floods werd echter een positieve hysteresis vastgesteld: voor eenzelfde afvoerdebiet, waren de concentraties hoger in het stijgend dan in het dalend deel van de vloed. Dit wordt geïllustreerd in figuur 7 die de metingen weergeeft, uitgevoerd tijdens een flash flood aan het meetstation van Ilala. Dergelijke trends kunnen vaak toegeschreven worden aan de uitputting van sedimentbronnen tijdens een vloed (Moliere et al., 2004). Toch zijn er ook alternatieve hypothesen denkbaar die dergelijke hysteresis kunnen verklaren. Door verdamping komt vaak natrium (in zoutvorm) aan de oppervlakte. Wanneer dit natrium opgelost wordt door afstromend water, kan dit de dispersie van het (klein) sediment sterk in de hand werken. Na verloop van tijd raakt dit natrium echter uitgespoeld en vormt het sediment makkelijker vlokken. Deze zijn moeilijker te transporteren door het afstromende water zodat naar het einde van de vloed minder grote hoeveelheden sediment de riviermonding bereiken. Gelijkaardige mechanismen werden ondermeer geobserveerd tijdens flash floods in semi-aride bekkens in Marokko (Imeson en Verstraten, 1981). In de meetcampagne van 2004 werd aan hetzelfde meetstation één vloed in detail bemonsterd, waarbij echter een negatieve hysteresis vastgesteld werd (Vanhulle, 2005). Meer onderzoek zal nodig zijn om de mechanismen van deze hystereses te achterhalen. Deze hysteresis heeft immers nefaste gevolgen voor de accuraatheid van de sedimentexport voorspellingen: door de scheve vorm van de hydrograaf worden deze wellicht overschat wanneer slechts één SSC waarde toegepast wordt voor gelijke debieten tijdens het stijgende en dalende deel van de vloed. Er was echter niet genoeg data beschikbaar om voor beide delen aparte Q-SSC relaties op te stellen.



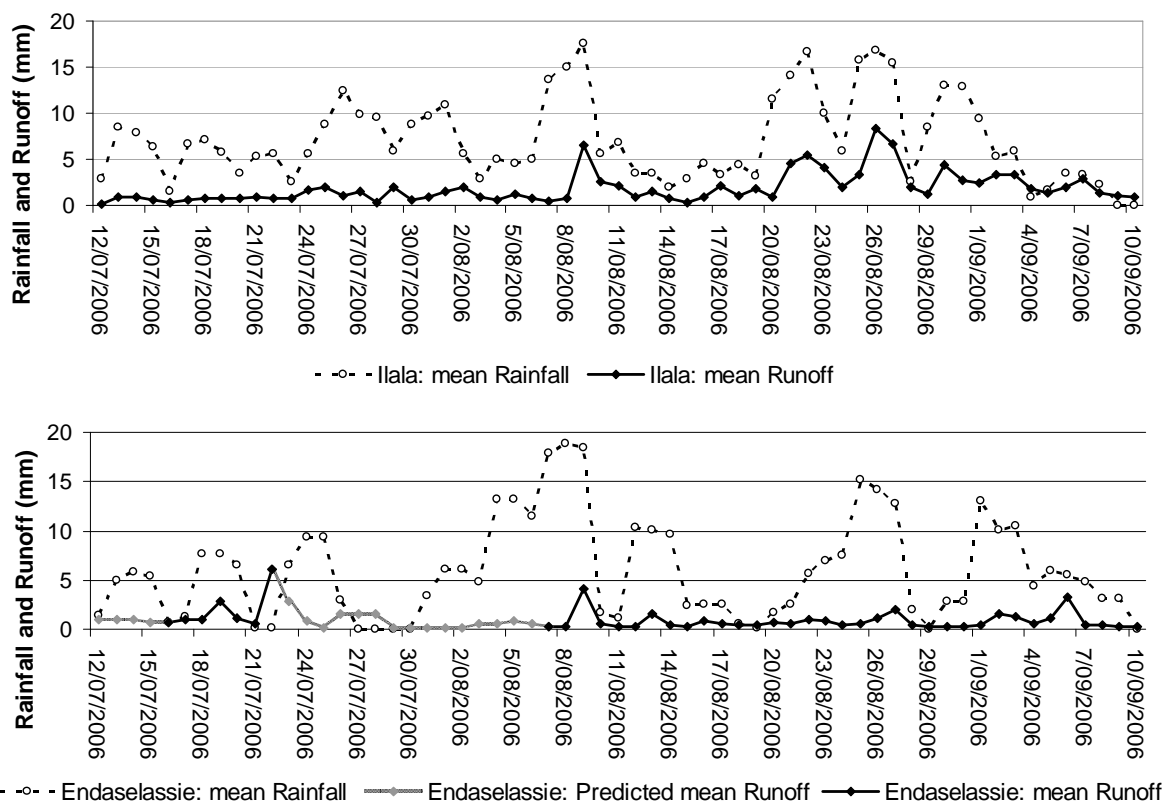
Figuur 7: Hydrograaf van een flash flood aan het Ilala station tijdens de nacht van 26 op 27 augustus 2006 (links). De zwarte punten geven aan op welk tijdstip een SSC staal genomen werd. De rechter figuur geeft de sedimentconcentratie in deze stalen weer, in relatie tot het afvoerdebiet (Q).

4.3. Water- en sedimentafvoer doorheen het regenseizoen

Ook doorheen het regenseizoen werden belangrijke variaties in waterafvoer en sedimentconcentraties vastgesteld. Hierbij werden licht verschillende trends geobserveerd voor de bekkens in de bovenloop van de Geba (zie figuur 2: Suluh, Genfel, Agula, Ilala en

Upper Geba) en de bekkens in de benedenloop (May Gabat, Endaselassie, Upper Tankwa, Lower Tankwa en Middle Geba).

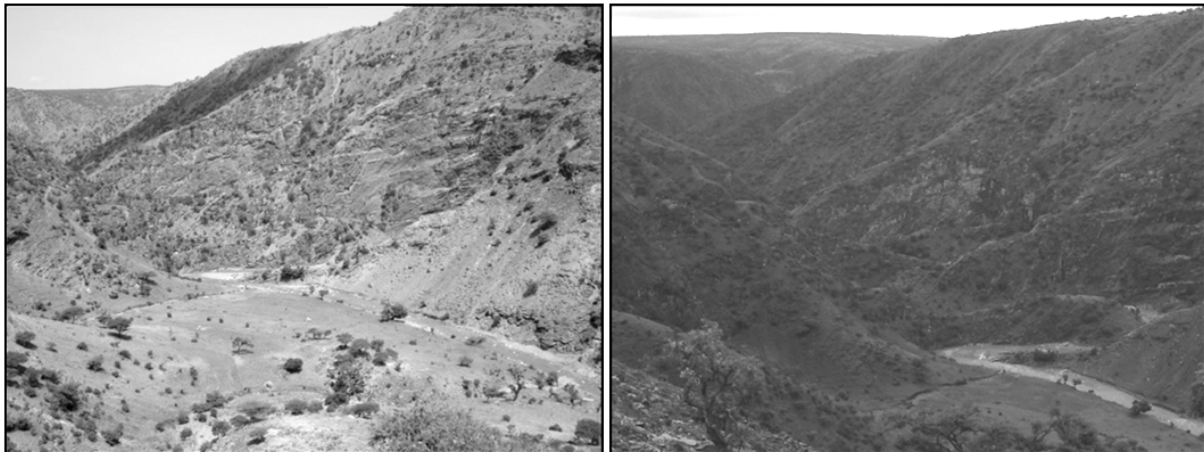
In de hoger gelegen bekkens werd vastgesteld dat de waterafvoer respons (engels: runoff response) toenam doorheen het regenseizoen. Dit wordt geïllustreerd in figuur 8 (boven) voor het Ilala bekken. De andere bestudeerde bekkens in de bovenloop kenden een gelijkaardige trend. Deze toename in respons werd ook tijdens de meetcampagne van 2005 vastgesteld. Een mogelijke verklaring hiervoor zijn de krimp-zwel eigenschappen van deze kleiige bodems in deze bekkens: na het lange droog seizoen hebben deze bodems diepe barsten waardoor het water snel kan infiltreren. Naarmate het regenseizoen vordert en de regenbuien deze bodems bevochtigen, sluiten deze barsten zich waardoor een oppervlak gevormd wordt die veel minder water doorlatend is (Beel, 2006). Onze data lijkt deze hypothese te bevestigen. Zo werd niet enkel vastgesteld dat naarmate het seizoen vorderde een groter deel van de regenval afstroomde, maar ook dat de optredende flash floods groter werden en de piekigheid van hun hydrografen toenam. In de benedenloop van de Geba was deze toename veel minder op te merken. In sommige bekkens werd zelf een lichte afname van de afvoer respons vastgesteld (vb. in het Endaselassie bekken, zie figuur 8). Ook dit lijkt deze hypothese te ondersteunen, aangezien bodems met krimp-zwel eigenschappen veel minder voorkomen in deze lager gelegen, warmere bekkens. De soms vastgestelde afname in afvoer respons kan daar wellicht toegeschreven worden aan de ontwikkeling van een betere vegetatieve bedekking.



Figuur 8: Dagelijkse regenval en afvoerhoogte in het Ilala bekken (boven) en het Endaselassie bekken (onder)

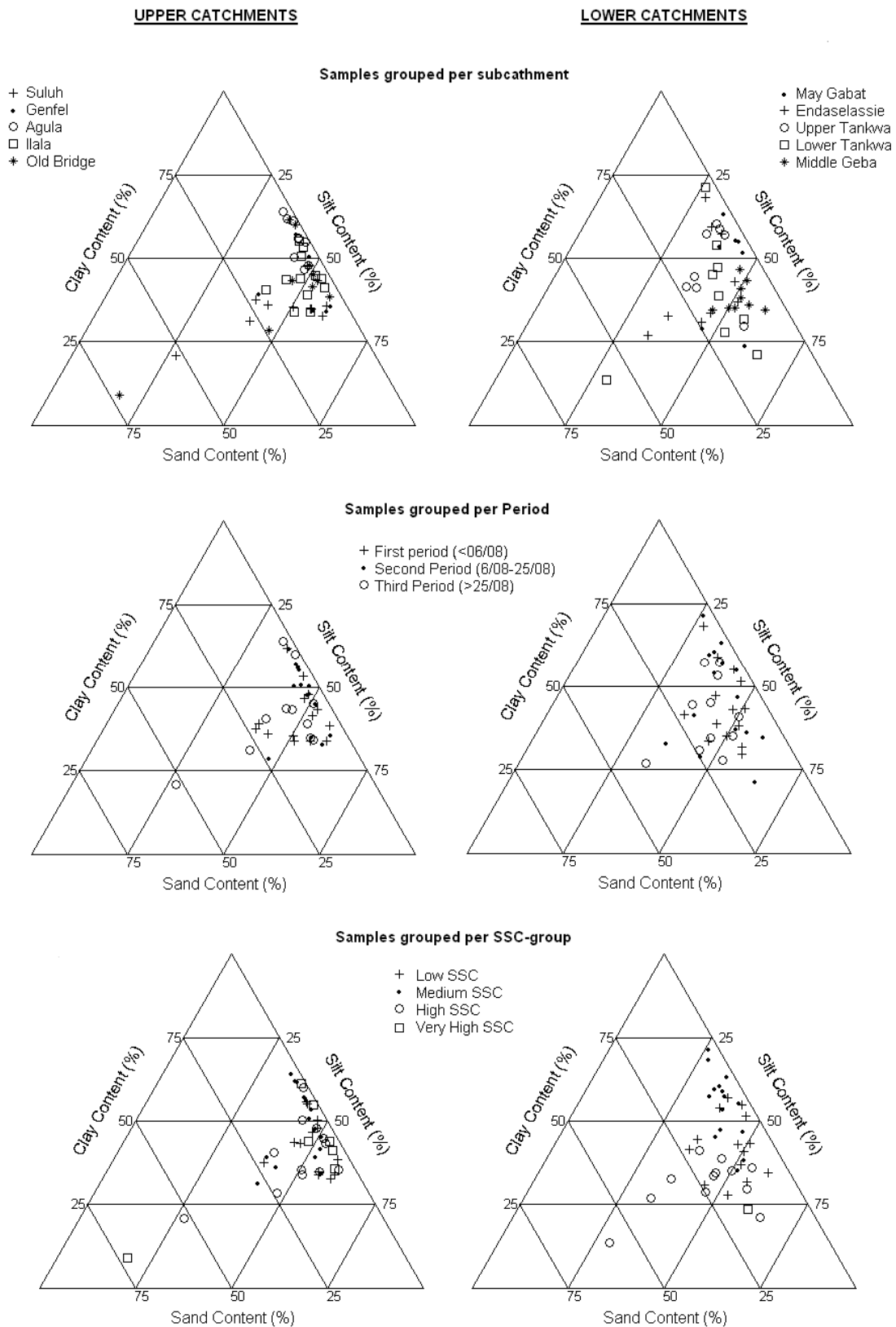
Wat de suspensiesedimentconcentraties betreft, werd over het algemeen een afname doorheen het regenseizoen waargenomen. Enkel voor een aantal bekkens in de benedenloop van de Geba was dit minder duidelijk. Dit was vooral het geval voor het Endaselassie bekken en wordt mogelijk verklaart door de steile hellingen en de kleinere bekkenoppervlakte. Deze afname in SSC stemt overeen met de bevindingen van de meetcampagne in 2004 (Vanhulle,

2005) en 2005 (Beel, 2006, 2007) en kent verschillende oorzaken. Vooreerst is er in het begin van het regenseizoen veel meer sediment beschikbaar. Tijdens het lange droge seizoen worden de bodems op de hellingen en plateaus in belangrijke mate losgemaakt, ondermeer door de grote aantallen vee. Dit losliggende bodemmateriaal wordt tijdens de eerste regenbuien weggespoeld en beland zo in het riviersysteem. Bovendien ploegen veel boeren hun akkers vlak voor de eerste regenbuien. Een tweede belangrijke oorzaak is de ontwikkeling van een vegetatieve bedekking. Aan het einde van het regenseizoen zijn de meeste hellingen nagenoeg niet bedekt, ondermeer doordat de meeste vegetatie opgegeten wordt door grazende kuddes geiten en runderen. Na een aantal weken regen, ontstaat op veel plekken echter een behoorlijk goede vegetatieve bedekking. Dit wordt geïllustreerd in figuur 9. Vegetatie vermindert de druppelimpact, waardoor minder bodemmateriaal losgemaakt wordt. Verder verhinderen de wortels voor een deel dat materiaal losgemaakt wordt door het afstromende water en vertraagt de aanwezige vegetatie in belangrijke mate het afstromende water, waardoor een deel van het meegevoerde sediment meteen weer afgezet wordt op de helling en de rivier dus niet bereikt. Vegetatieve bedekking is dan ook van cruciaal belang in het verminderen van de sedimentafvoer in deze Hoogland bekkens, iets wat reeds in verschillende studies aangetoond werd (vb. Nyssen et al., 2004; Descheemaeker et al., 2006). Een ander meespelend effect in het dalen van de SSCs is het stijgen van de grondwaterspiegel door infiltrerend regenwater. Zo werd in verschillende bekkens vastgesteld dat na een aantal weken sinds de aanvang van het regenseizoen bronnen actief werden. Dit grondwater bevat nagenoeg geen sediment, maar draagt wel bij aan het debiet van de rivier. Dit wordt ondermeer geïllustreerd in figuur 8 (Ilala): aan het einde van het regenseizoen is het afvoerdebiet hoger dan de regenval. Een laatste effect dat mogelijk van belang is, zijn de eerder aangehaalde aanwezigheid van aanwezige natriumzouten. Door verdamping van water in het droge seizoen kunnen aanzienlijk grote hoeveelheden zout op het bodemoppervlak afgezet worden. Wanneer deze zouten door afstromend water opgelost en afgevoerd worden, kunnen zij de meegevoerde kleipartikels dispergeren en zo het transport van deze in de hand werken (Imeson en Verstraten, 1981).



Figuur 9: De linker foto werd genomen aan het meetstation van Lower Tankwa op 16 juli 2006. De rechter foto werd op nagenoeg dezelfde plaats genomen op 11 augustus 2006. Noteer de toename in vegetatieve bedekking.

Wat betreft de korrelgrootteverdelingen, werden opmerkelijke verschillen opgemerkt tussen de bekkens in de bovenloop en de bekkens in de benedenloop van de Geba. De resultaten van deze korrelgrootteanalyses werden in textuurdriehoeken uitgezet per deelbekken, per periode en per klasse van sedimentconcentratie (zie figuur 10).



Figuur 10: Resultaten van de korrelgrootteanalyses gegroepeerd per deelbekken (boven), periode in het regenseizoen (midden) en SSC-klasse (onder). De linker helft geeft de resultaten weer voor de bovenloop van de Geba, de rechter helft voor de benedenloop.

In de bovenloop van de Geba correleert de korrelgrootteverdeling behoorlijk goed met de aanwezige lithologie. Zo komen de grofste sedimenten hoofdzakelijk uit Suluh, een bekken

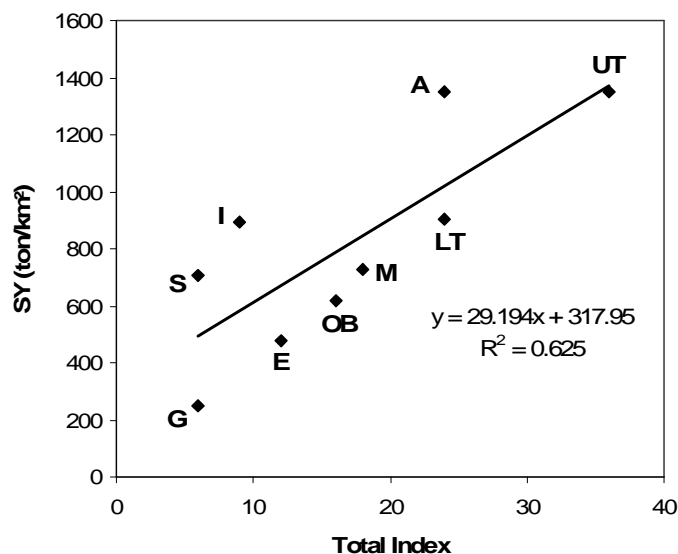
die hoofdzakelijk bestaat uit zandsteen. Ilala en vooral Agula bestaan vooral uit kalksteen, wat wordt weerspiegeld in het grote kleigehalte in de sedimenten. De andere bekkens zijn samengesteld uit een breder scala gesteenten, wat ook tot uiting komt in het textuurdiagram. Verder blijken de sedimenten kleirijker in het begin en zandrijker aan het einde van het regenseizoen. Waarschijnlijk is ook dit te verklaren door de uitputting van het fijnste sediment doorheen het seizoen. De eerste regens voeren losliggend stoffig en kleirijk bodemmateriaal van de hellingen naar de rivier, maar naarmate deze sedimentbronnen uitgeput raken en een vegetatieve bedekking zich ontwikkeld, worden dichterbij gelegen sedimentbronnen, vb. zandrijke sedimenten die afgezet werden naast de rivierbedding tijdens vloed, relatief belangrijker. Het eerder aangehaalde effect van de aanwezigheid van Na-zouten kan dit effect verder versterken. In de benedenloop van de Geba werden geen verbanden gevonden tussen de korrelgrootteverdeling en de bekkenlithologie of de periode in het regenseizoen. De korrelgrootteverdeling bleek echter opmerkelijk goed te correleren met de SSC-categorie: stalen met hoge sedimentconcentraties waren zandrijker, terwijl de stalen met een lage SSC vooral klei en fijn silt bevatten. Aangezien een duidelijke correlatie bestaat tussen de sedimentconcentratie en het afvoerdebiet, kan gesteld worden dat de grove fracties vooral tijdens vloed afgevoerd worden.

De resultaten van de korrelgrootteanalyses alsook de trend in SSC doorheen het seizoen suggereren dat sedimentafvoer in de bovenloop van de Geba vooral afhangt van de beschikbaarheid van sediment. Dit lijkt minder het geval voor de benedenloop, waar mogelijk stromingskarakteristieken meer van belang zijn. Meer onderzoek is echter nodig om deze hypothese te bevestigen.

4.4. Ruimtelijke verschillen in sedimentafvoer

Uit Tabel 1 blijken grote verschillen in oppervlakte-specifieke sedimentexport (SY, ton/km²) te bestaan. Aangezien weinig gedetailleerde informatie over de hierbij relevante bekkenkarakteristieken beschikbaar was, werd getracht deze verschillen te verklaren aan de hand van een aangepast semi-kwantitatief model: FSM (Factorial Scoring Model, Verstraeten et al., 2003; de Vente et al., 2004). Hoewel de opzet van dit model eenvoudig is, bewees FSM sedimentexport op een behoorlijke wijze te kunnen verklaren in ondermeer Spanje (de Vente et al., 2004 & 2005), Italië (de Vente et al., 2006) en een aantal bekkens in het Ethiopische hoogland (Haregeweyn et al., 2006).

Op basis van terreinobservaties en beschikbaar kaartmateriaal werden scores van 1, 2 of 3 toegekend aan bekkenkenmerken die relevant zijn in het verklaren van de sedimentexport, i.e.: topografie, lithologie, vegetatieve bedekking en de aanwezigheid van ravijnen. Wanneer verwacht werd dat een kenmerk sterk bijdroeg tot de sedimentexport (bv. bij erg steile hellingen en grote hoogteverschillen in de nabijheid van de rivier) werd een score van 3 toegekend. Wanneer verwacht werd dat de beschouwde factor maar weinig bijdroeg tot de sedimentafvoer in het bekken werd een score van 1 toegekend (bv. bij weinig hoogteverschil en zwakke hellingen). De scores van deze vier factoren werden vermenigvuldigd tot een totale index. Deze totale index werd vergeleken met de oppervlakte-specifieke sedimentafvoer tijdens de meetcampagne (zie figuur 11).



Figuur 11: Kalibratie van de toegekende totale FSM scores met alle beschikbare SY data. Middle Geba werd buiten beschouwing gelaten, aangezien de begroting van de SY voor dit station onbetrouwbaar was. Voor symbolen: zie tabel 1.

Hoewel het aantal bestudeerde bekkens te klein is om een statistisch relevante uitspraak te doen, suggereert de hoge R^2 dat een aanzienlijk deel van de geobserveerde variatie verklaard kan worden door deze vier factoren. Bovendien werd vastgesteld dat in veel bekkens met een SY die onder de regressievergelijking ligt (zijnde: Genfel, Endaselassie en May Gabat) zeer veel bodemconserveringsmaatregelen genomen werden, zoals stenen berm en controledammen in ravijnen. Uit een voorgaande studie (Haregeweyn et al., 2005) bleek dat deze conserveringsmaatregelen een aanzienlijk effect op de sedimentafvoer in kleine drainagebekkens hebben en werd er voorgesteld om deze maatregelen op te nemen in FSM via een extra factor. Helaas beschikten we niet over voldoende data om dit nauwkeurig te doen.

Hoewel enkel een kalibratie van het model uitgevoerd werd en het aantal bestudeerde bekkens beperkt was, blijkt uit het resultaat dat dergelijk semi-kwantitatief model een behoorlijk potentieel heeft om sedimentafvoer voor bekkens in het Ethiopische Hoogland te verklaren. Mits verdere verfijning (ondermeer de opname van een factor die rekening houdt met bodemconserveringsmaatregelen) kan dergelijk model door zijn lage data-eis en eenvoudige structuur zelfs een beloftevol middel zijn om sedimentafvoer in niet-bestudeerde bekkens op een betrouwbare en efficiënte manier te voorspellen. Zoals in de inleiding aangehaald, is dergelijk middel meer dan welkom, ondermeer om sedimentatiesnelheden in reservoirs te kunnen voorspellen.

5. Besluit

In deze studie werd een begroting gemaakt van de water- en sedimentafvoer voor 10 deelbekkens van de Geba tijdens het regenseizoen van 2006. Hoewel de onzekerheid op deze begroting in veel gevallen behoorlijk groot is, wijzen onze resultaten erop dat de sedimentafvoer voor middelgrote bekkens beduidend hoger is dan verwacht werd uit het beperkte aantal beschikbare gegevens van andere bekkens in het Ethiopische Hoogland.

Een grote bron van onzekerheid op onze voorspellingen zijn de optredende flash floods. Deze waren erg moeilijk te bemonsteren, maar zijn van groot belang voor de totale sedimentafvoer. Meer onderzoek zal nodig zijn om de optredende variaties in sedimentconcentraties te verklaren en betere begrotingen toe te laten.

Doorheen het regenseizoen werden belangrijke variaties in afvoerdebieten en sedimentconcentraties gemeten: hoewel de afvoerrespons vaak toenam, daalden de sedimentconcentraties in de meest gevallen aanzienlijk. De voornaamste oorzaken hiervoor zijn de uitputting van sedimentbronnen en de ontwikkeling van een goede vegetatieve bedekking. Toch blijken een aantal verschillen te bestaan tussen bekkens in de bovenloop en de benedenloop van de Geba. Dit kwam vooral tot uiting in de korrelgrootteverdelingen van de sedimenten.

Ook wat de totale sedimentafvoer betrof, bleken er belangrijke verschillen te bestaan tussen de bestudeerde deelbekkens. Een eenvoudig semi-kwantitatief model leerde ons dat topografie, lithologie, vegetatieve bedekking en de aanwezigheid van ravijnen hierbij belangrijke verklarende factoren zijn. Mits verdere verfijning is dergelijk model een beloftevol middel om sedimentafvoer op een eenvoudige en betrouwbare manier te schatten. De bekomen gegevens uit deze studie zijn een eerste aanzet tot de voorspelling van sedimentexport voor middelgrote bekkens in het Noord-Ethiopische Hoogland.

6. Referenties

- Asfaw, M. G., 2005. Groundwater recharge and Water Balance assessment in Geba Basin, Tigray, Ethiopia. MSc. Thesis, Vrije Universiteit Brussel and K.U. Leuven.
- Baker, V.R., Kochel, R.C., Patton, P.C., 2004. Flood Geomorphology. Willey-Interscience, England, pp. 528
- Beel, A., 2006. Assessment of Sediment Export in the upper part of the Geba Catchment, Ethiopia. MSc. Thesis, Department of Geography and Geology, K.U. Leuven.
- Beel, A., Poesen, J., Verstraeten, G. & Zenebe, A. 2007. Sedimentexport in het Gebabekken in het noordelijke Ethiopische Hoogland. *De Aardrijkskunde* 2007/2-3:15-22.
- Descheemaeker, K., Nyssen, J., Rossie, J., Poesen, J., Haile, M., Raes, D., Muys, B., Moeyerson, J., Deckers, S., 2005. Sediment deposition and pedogenesis in exclosures in the Tigray highlands, Ethiopia. *Geoderma* (132): 291-314.
- de Vente, J., Poesen, J., 2004. Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: Scale issues and semi-quantitative models. *Earth-Science Reviews* (71): 95-125.
- de Vente, J., Poesen, J., Verstraeten, G., 2005. The application of semi-quantitative methods and reservoir sedimentation rates for the prediction of basin sediment yield in Spain. *Journal of Hydrology* (205): 63-86.
- de Vente, J., Poesen, J., Bazzoffi, P., Van Rompaey, A., Verstraeten, G., 2006. Predicting catchment sediment yield in Mediterranean environments: the importance of sediment sources and connectivity in Italian drainage basins. *Earth Surface Processes and Landforms* (31): 1017-1034.
- FAO, 1998 soil map, http://67.95.153.93/DevecolAfrica/GeoElinks/Africa/SahelEast/SahelEast_Level2/Tigray_soils.php# (consulted: 15 march, 2007)
- Goudie, A. S. (Editor), 2004. *Encyclopedia of Geomorphology*. Routledge, an imprint of Taylor & Francis Books Ltd, London, England, pp. 1200.
- Gregory, K.J., Walling, D.E., 1973. *Drainage Basin Form and Process. A Geomorphological Approach*. Edward Arnold, London.
- Haregeweyn, N., Poesen, J., Nyssen, J., De Wit, J., Haile, M., Govers, G., Deckers, S., 2006. Reservoirs in Tigray (Northern Ethiopia): Characteristics and Sediment Deposition Problems. *Land Degradation and Development* (17): 211-230.
- Haregeweyn, N., Poesen, J., Nyssen, J., Verstraeten, G., de Vente, J., Govers, G., Deckers, S., Moeyerson, J., 2005. Specific Sediment Yield in Tigray-Northern Ethiopia: Assessment and semi-quantitative modelling. *Geomorphology* (69): 315-331.
- Imeson, A. C., Verstraten, J. M., 1981. Suspended solids concentrations and river water chemistry. *Earth Surface Processes and Landforms* (6): 251-263.

- Lohani, A. K., Goel, N. K., Bhatia, K. K. S., 2006. Takagi-Sugeno fuzzy inference system for modeling stage-discharge relationships. *Journal of Hydrology* (331): 146-160.
- Moliere, D.R., Evans, K.G., Saynor, M.J., Erskine, W.D., 2004. Estimation of suspended sediment loads in a seasonal stream in the wet-dry tropics, Northern Territory, Australia, *Hydrological processes* (18): 531-544.
- Nyssen, J., Bayray, M., Taha, N., Deckers, J. (Eds.), 2007. Excursion Guide: Interdisciplinary excursion to Avergelle and Dogu'a Tembien (1 april 2007). MU-IUC programme Phase II programme formulation. Mekelle University – VLIR IUC-Program. pp. 25-31.
- Nyssen, J., Poesen, J., Moeyerson, J., Deckers, J., Haile, M., Lang, A., 2004. Human impact on the environment in the Ethiopian and Eritrean highlands – a state of the art. *Earth-Science Reviews* (64): 274-320.
- Vandecasteele, I., 2007. Hydrogeological investigation in the area of May Zegzeg, near to Hagera Selam (northern Tigray, Ethiopia). MSc. Thesis, Department of applied geology and hydrogeology, Universiteit Gent.
- Vanhulle, K., 2005, Sedimenttransport in de bovenloop van het Gibabekken, Ethiopië. MSc. Thesis, Department of Geography and Geology, K.U. Leuven.
- Vanmaercke, M., 2007. Magnitude and Dynamics of Runoff and Sediment Transport in the Geba River Catchment, Northern Ethiopia. MSc. Thesis, Departement Geografie – Geologie, K. U. Leuven, 121 pp.
- Verstraeten, G., Poesen, J., de Vente, J., Konincks, X., 2003. Sediment yield variability in Spain: a quantitative and semi-quantitative analysis using reservoir sedimentation rates. *Geomorphology* (50): 327-348
- Zenebe, A., Vanhulle, K., Beel, A., Poesen, J., Verstraeten, G., Nyssen, J., Govers, G., Deckers, J., Behailu, M., 2007. Assessment of spatial and temporal variability of suspended sediment loads of the Upper Geba Catchment, Northern Ethiopia. Article in preparation.