

# Charakteristika des Sedimenttransports in einem Kleineinzugsgebiet der Aragonesischen Pyrenäen

Manuel Seeger, Trier, Mari-Paz Errea, Zaragoza, Noemí Lana-Renault, Zaragoza, Santiago Beguería, Zaragoza, José Arnáez, Logroño, Carlos Martí, Zaragoza, David Regüés, Zaragoza, Jose-María García-Ruiz, Zaragoza

Mit 7 Abbildungen und 4 Tabellen

**Zusammenfassung:** Der Transport von Schwebfracht während eines Niederschlag-Abfluss-Ereignisses ist sehr variabel. Dieser Umstand wird in der vorliegenden Arbeit genutzt, um die Ereignisse zu typisieren und zu untersuchen, welche Faktoren ihre Entstehung beeinflussen. Hierzu wird die Entwicklung des Verhältnisses von Abflussmenge und Schwebstoffkonzentration im Wasser graphisch dargestellt und aufgrund der daraus entstehenden Hysteresekurve in Gruppen unterteilt. Die Untersuchung von 19 Ereignissen in einem Kleineinzugsgebiet der Pyrenäen ergibt drei Gruppen: Eine mehrheitliche mit Hysteresekurven im Uhrzeigersinn, eine mit Kurven gegen den Uhrzeigersinn und eine letzte mit Acht-Förmigen Hysteresekurven. Die Analyse dieser Kurven mittels Kanonischer Diskriminanzanalyse verdeutlicht, dass die Bodenfeuchte der bestimmende Faktor der Ereignisentstehung ist. Weiterhin sind die Niederschlagshöhe und der an den vorangehenden drei Tagen gefallene Niederschlag für die unterschiedlichen Abfluss und Sedimenttransportvorgänge maßgeblich. Daraus lässt sich schließen, dass die Mobilisierung von Sedimenten in den Ereignissen mit Hysteresekurve im Uhrzeigersinn aus begrenzten Gebieten nahe dem Vorfluter erfolgt. Im Gegensatz dazu erfolgt die Schwebstoffzufuhr bei Ereignissen mit gegen den Uhrzeigersinn verlaufender oder Acht-Förmiger Hysterese aus weiter entfernten Bereichen, die erst im Laufe des Ereignisses dazugeschaltet werden. Die Ereignisse der letzteren Gruppe erfolgen unter trockenen Verhältnissen, so dass sie erst bei

ausreichend hoher Niederschlagsintensität auftreten.

**Summary: Characteristics of sediment transport in a small catchment in the Spanish Pyrenees.** The transport of suspended sediment during a stormflow event is very variable. The resulting hysteretic loop of the relationship of the discharge and suspended sediment concentration is used in the present paper to classify rainfall-runoff-events and identify by canonical discriminant analysis the factors determining the different event types. The analysis of 19 events in a headwater catchment of the Central Pyrenees leads to the identification of 3 types of floods. A majority with clockwise shaped hysteretic loop, a second one with anti-clockwise shaped hysteretic loop and a third group with eight shaped hysteretic loop. The most important factor for generating different types of events is the soil moisture in the catchment. On a secondary level, total rainfall amount and precipitation of the 3 days before are important. So, the different flood types are generated with different contributing areas or by different processes. Clockwise shaped events have limited sources of suspended sediment near the channel with limited supply. Anti clockwise shaped events lead sediments from all over the catchment to the ravine. Eight-shaped events are produced under dry conditions, when rainfall intensity exceeds infiltration capacity, so sediments sources may be localised all over the catchment, but their connection to the fluvial network is stopped rapidly with decreasing precipitation.

**Résumé: Caractéristiques du transport des sédiments dans un petit bassin versant dans les Pyrénées Centrales.** Le transport du sédiment en suspension au cours d'une crue est très variable. La relation de la boucle d'hystérésis résultante de la décharge et la concentration du sédiment en suspension est utilisée dans ce travail à fin de classer les événements précipitation-écoulement et identifier, à partir d'une analyse canonique discriminante, les facteurs qui déterminent les différentes classes. L'analyse de 19 événements dans un petit bassin versant des Pyrénées Centrales Espagnoles sert à identifier trois types différents de crues: la majorité des crues montrent une boucle d'hystérésis tournant à droite; un deuxième groupe est caractérisé par des boucles d'hystérésis

tournant à gauche; finalement il apparaît un troisième groupe de crues caractérisé par des boucles d'hystérésis en forme de huit. Le contenu d'humidité du sol dans le bassin versant est le facteur le plus important pour déterminer les différents types de crues, suivi de la quantité totale de précipitations ainsi que de la précipitation tombée trois jours avant la crue. Ces différents types de crues se forment donc par des processus différenciés ou à partir de zones de contributions différentes. Ainsi, les crues avec une boucle d'hystérésis tournant à droite ont des sources de sédiments en suspension près du cours d'eau avec un apport limité. Les crues avec une boucle d'hystérésis tournant à gauche ont du sédiment qui provient de partout dans le bassin versant, arrivant même jusqu'au ravin. Les crues avec une forme de huit se produisent sous des conditions sèches, quand l'intensité des précipitations dépasse la capacité d'infiltration et les sources de sédiment en suspension peuvent être localisées partout dans le bassin, mais leur connectivité au réseau fluvial s'arrête rapidement avec la diminution de la précipitation.

## **Einleitung**

In Kleineinzugsgebieten, zumal in lithologisch homogenen, ist die Identifikation der Herkunftsbereiche von Sedimenten mit den herkömmlichen Fingerprinting-Methoden oder mit der Analyse natürlicher Tracer kaum möglich, da kaum unterscheidbare Sedimente oder gelöste Begleitstoffe produziert und ins Gerinne transportiert werden. Die Kenntnis dieser Herkunftsbereiche ist jedoch wichtig, um die jeweiligen Prozesse der Ablösung und des Transports von Schwebstoffen im Einzugsgebiet zu identifizieren. Es können somit Rückschlüsse auf die geomorphodynamische Prozessaktivität und die sie steuernden Faktoren gezogen werden. Andererseits konnte festgestellt werden, dass es kaum Zusammenhänge gibt zwischen Niederschlag bzw. Abfluss und der Schwebstoffkonzentration gibt (Arnáez et al., 1999), und diese saisonal abhängig sind. Weiterhin ist die Schwebstoffkonzentration während eines Hochwasserereignisses stark variabel, so dass dies zu einer großen Unschärfe der ermittelbaren Daten führt (Chikita et al., 2002, Hodgkins, 1999, Batalla & Sala 1994). Doch gerade dieser Umstand lässt sich für

die Charakterisierung der einzelnen Ereignisse verwenden, wenn die Veränderung des Verhältnisses von Abflussmenge und Schwebstoffkonzentration gewissen Gesetzmäßigkeiten oder Schemata entspricht.

Eine Möglichkeit, solche Schemata, und damit die Gruppierung von Ereignissen, zu schaffen ist die Erstellung von so genannten Hysteresekurven und deren Klassifikation. Hierzu werden Abfluss und Schwebstoffkonzentration während eines Ereignisses in einer Graphik gegeneinander aufgetragen die die daraus entstehende Form charakterisiert. Williams (1989) beschreibt und klassifiziert eine Anzahl von Hysteresekurven (lineare, im Uhrzeigersinn drehende, gegen den Uhrzeigersinn drehende, kombiniert lineare mit einer Schleife und Acht-Förmige Hysteresekurven), belegt diese zum Teil mit Beispielen aus der Literatur und versucht anhand dieser die Transportvorgänge zu deuten, welche die ungleichmäßige Entwicklung von Sedimenttransport und Abfluss verursachen. Einige Autoren nutzen den Umstand, dass die Hysterese vom Herkunftsgebiet der Sedimente abhängig ist, um diese zu identifizieren (diCenzo & Luk, 1997, Lenzi & Marchi, 2000, Jansson, 2002). In mediterranen Einzugsgebieten ist die Hysteresekurve auch zur Beschreibung einzelner Ereignisse und Identifikation unterschiedlicher Abflusstypen verwendet worden (Llorens et al., 1997, Regüés et al., 2000). Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Hysterese von der Größe des Einzugsgebietes wie auch von der Niederschlagscharakteristik des Ereignisses und der Ausgangsbodenfeuchte abhängig ist (Klein, 1984, DeBoer & Campbell, 1989).

Auf der Grundlage dieser Vorbetrachtungen werden in der vorliegenden Arbeit einzelne Niederschlags-Abfluss-Ereignisse (N-A-Ereignisse) hinsichtlich der Entwicklung der Schwebstoffkonzentration und des Abflusses in kleinen Zeitschritten untersucht und typisiert. Diese Ereignistypen werden mit den Bedingungen, die dazu geführt haben – sowohl Niederschlagscharakteristika als auch Gebietszustand– in Verbindung gebracht, woraus zum einen die Prozesse, welche die Sedimente bis zum Gerinne transportieren erkannt werden, wie auch damit zusammenhängend die Herkunftsgebiete der Schwebstoffe für die jeweiligen Ereignistypen eingegrenzt werden.

# Material und Methoden

## ***Das Untersuchungsgebiet***

Die Untersuchungen zu Abfluss und Sedimenttransport werden seit 1996 im 284 ha großen Arnás Tal durchgeführt (Abb. 1). Es befindet sich, auf einer Höhe zwischen 950 und 1350 m ü. d. M., in der Flysch-Zone der Zentralen Pyrenäen Spaniens. Das Untersuchungsgebiet gehört zum oberen Einzugsgebiet des Aragón, einem der wichtigsten Tributäre des Ebro. Das Klima ist als mediterran sub-humid einzustufen, mit einer starken ozeanischen Prägung. Der mittlere Jahresniederschlag beträgt etwa 1150 mm, die Jahresdurchschnittstemperatur 10°C. Das Arnás-Tal ist vollständig in Flysch-Bereich der Zentralen Pyrenäen eingebettet, somit lithologisch homogen und von einer nach N einfallenden Wechsellagerung von Mergeln und Sandsteinen mit carbonatischer Matrix bestimmt. Die einzelnen Bänke sind zumeist nur wenige dm mächtig, und streichen am S-exponierten Hang aus, so werden sie von den Gerinnen durchschnitten. Die darauf entwickelten Böden -klassifiziert nach der WRB (FAO, ISRIC & ISSC, 1998)- sind von der Jahrhunderte langen ackerbaulichen Nutzung, die seit etwa 40 Jahren vollständig durch extensive Beweidung ersetzt wurde, geprägt. Auf dem SW-Exponierten und deutlich steileren Hang dominieren stark erodierte Regosole unterschiedlicher Gründigkeit. Auf dem Grat können Lithosole mit stark humosem A-Horizont kartiert werden, auf dem Talboden oder an den wenigen terrassierten Flächen sind schwach entwickelte Cambisole zu finden, die aufgrund des lehmigen Ausgangsmaterials und durch Hangzugwasser zu Staunässe neigen und deswegen *stagnic* Eigenschaften aufweisen können. Die weitaus flachere gegenüberliegende Talseite ist weitgehend terrassiert und es konnten sich dort in großen Arealen Böden der Typen Phaeozem und Kastanozem erhalten. An diesem NE-Exponierten Hang sind einige Vernässungsbereiche zu finden, in denen sich, wie auch nahe dem Vorfluter, Gleisols entwickeln konnten.

Die Vegetation ist, auch Jahrzehnte nach der Aufgabe der ackerbaulichen Nutzung, aufgrund der extensiven Beweidung (Ries et al. 2000) und der

zum Teil starken sommerlichen Austrocknung der Böden (Sauer & Ries, 2002, Seeger 2001), von Strauchformationen unterschiedlicher Deckung geprägt. Vorherrschend ist *Genista scorpius*, begleitet von *Buxus sempervirens* und *Rosa canina*. Einige höher gelegene Bereiche sind dicht mit *Echinopartum horridum* bewachsen. Dort wandern langsam Baumarten wie *Quercus cerrioides*, *Pinus nigra* und *P. sylvatica* ein, die in den höchsten Bereichen des Schatthanges kleinere geschlossene Bestände bilden. An einigen wenigen Standorten sind noch Mähwiesen und Weiden erhalten, die von einer unterschiedlich dicht wachsenden Strauchschicht bedeckt sind. Auffällig ist, dass insbesondere die sonnenbeschienene Talseite zumeist eine nur sehr spärliche Krautschicht aufweist.

Die Hänge sind durch weite Rotationsrutschungen geformt, die steilere SW-Exponierte Talseite weist dadurch eine dichte Abfolge konvexer und konkaver Hangbereiche auf. An diesem Hang sind auch mehrere flachgründige *debris-flows* zu beobachten, die großteils nach der Aufgabe der Landwirtschaft entstanden sind. Auf beiden Talseiten können ausgedehnte Areale mit aktiver Flächenspülung erkannt werden, die sogar unter Strauchformationen zu einer auffälligen residualen Steinakkumulation führen. Das gesamte Gebiet ist von zahlreichen mehr oder weniger isohypsenparallelen und sich vielfach kreuzenden Viehgangeln durchzogen, die allesamt komplett Vegetationsfrei sind und eine zum Teil mehrere Zentimeter mächtige residuale Gesteinsauflage aufweisen.

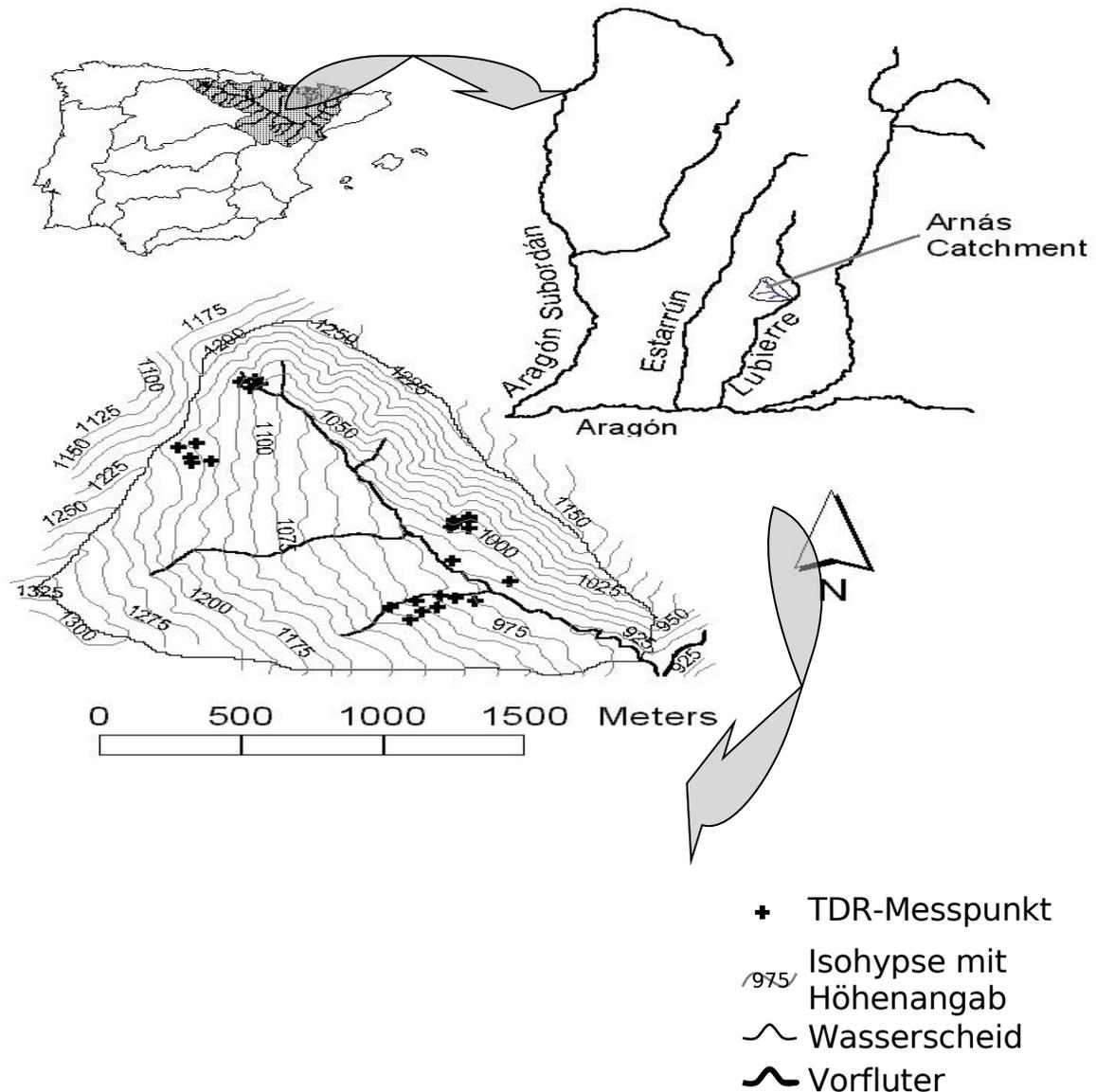


Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebietes Barranco der Arnás.

### **Die Ausstattung**

Im Untersuchungsgebiet wird der Abfluss an einem in Beton gefassten Rechteckspegel mit Hilfe eines Ultraschall-Wasserstandsmessgerätes erfasst. Der Maximalabfluss beträgt etwa  $3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Weiterhin werden am Pegel Wassertemperatur und Leitfähigkeit sowie die Trübung des Abflusses aufgezeichnet. Diese Daten werden alle 5 Minuten in einem Datenlogger gespeichert. Zusätzlich ist ein automatischer Probennehmer installiert, der ab einem Wasserstand von 30 cm ( $660 \text{ l s}^{-1}$ ) nach einem

festgelegten Schema (zuerst 10 Proben alle 5 Minuten, danach Erhöhung der Entnahmeabstände) Proben entnimmt. Anhand dieser wurde der Trübungsmesser kalibriert.

Die Klimadaten, Temperatur, Strahlung, Luftfeuchte und Niederschlag werden ebenfalls elektronisch in derselben Datendichte aufgezeichnet. Zusätzlich ist im Quellbereich, auf etwa 1100 m Höhe, ein weiterer elektronischer Niederschlagsschreiber installiert.

Die Bodenfeuchte wurde im Zeitraum 1996 bis 1997 an 25 verschiedenen Messtandorten (Abb. 1) mit einem TDR-Messgerät (Tektronix Cable Tester) wöchentlich für die obersten 20 cm erfasst. Die Standorte wurden nach morphologischen Kriterien ausgesucht, also nach ihrer Exposition, Neigung und Konvexität.

## Methoden

Anhand der zu Stundenwerten zusammengefassten Pegelmessungen wurden im Zeitraum der Bodenfeuchtemessungen alle erfassten N-A-Ereignisse identifiziert. Von diesen insgesamt 19 Ereignissen wurden folgende Kenngrößen bestimmt:

1. TNiederschlagsdauer
2. PNiederschlagshöhe
3. P30      Max. Niederschlag in 30 min (mm)
4. P5        Max. Niederschlag in 5 min (mm)
5. IP        Mitt. Niederschlagsintensität (mm h<sup>-1</sup>)
6. AP 6h    Antezedenter Niederschlag 6 h vor Ereignis
7. AP 1d    Antezedenter Niederschlag 1 Tag vor Ereignis
8. AP 3d    Antezedenter Niederschlag 3 Tage vor Ereignis
9. AP 7d    Antezedenter Niederschlag 7 Tage vor Ereignis
10. AQ 24h Antezedenter Abfluss 24 Stunden vor Ereignis
11. Θ        Mitt. Bodenfeuchte im Einzugsgebiet

Die Kenngrößen 1 bis 5 beschreiben den ereignisauslösenden Niederschlag, die Parameter 6 bis 11 sind beschreibende Summengrößen für den Gebietszustand. Da eine hohe Korrelation zwischen den Werten

der Bodenfeuchte aller Messpunkte besteht ( $r^2 > 0,8$ ) wurden diese über das gesamte Einzugsgebiet gemittelt. Auf Grundlage der Arbeiten von Hargreaves & Samani (1985) zur Berechnung der Evapotranspiration und von Thornthwaite & Mather (1957), Pfau (1966), Lanfer (1995) sowie Havans (1955) zur Bestimmung der Bodenwasserbilanz wurde daraufhin der Bodenwassergehalt für jeden Tag berechnet und Anhand der Messwerte kalibriert.

Zur Klassifikation der N-A-Ereignisse wurden die Hysteresekurven des Sedimenttransports konstruiert und nach Williams (1989) klassifiziert. Dazu werden der Abfluss auf der Abszisse und die Sedimentkonzentration auf der Ordinate gegeneinander Aufgetragen. Daraufhin erfolgt eine graphische Klassifikation der resultierenden Kurven.

Die entstandenen Klassen von Hochwasser-Sedimenttransport-Ereignissen wurden mit Hilfe eines statistischen Programmpakets untersucht. Nach einer deskriptiven statistischen Charakterisierung der einzelnen Ereignisgruppen wurde eine Kanonische Diskriminanzanalyse durchgeführt, bei der die statistisch irrelevanten Variablen aus den Diskriminanzfunktionen entfernt wurden. Die Trennung der Gruppen erfolgte nach dem Kriterium der Mahalanobis-Distanz zum Gruppenzentroiden. Ein Test auf Konsistenz der Klassifikation wurde mit einer Kreuzvalidierung durchgeführt.

Anschließend wurde mit den resultierenden Variablen eine Varianzanalyse (ANOVA) durchgeführt, um den Einfluss der einzelnen Variablen auf die jeweiligen Gruppen zu testen.

Die deskriptive Statistik der einzelnen Gruppen erlaubt eine erste Konsistenzanalyse der untersuchten Parameter. Die Diskriminanzanalyse führt zur Identifikation der relevanten Parameter, welche die einzelnen Gruppen voneinander trennen. Außerdem dient die Interpretation der Ergebnisse dem Verständnis der Variabilität jeder einzelnen Gruppe hinsichtlich der sie trennenden Parameter. Abschließend lässt die Varianzanalyse einen Rückschluss auf die Gewichtung jedes einzelnen Parameters auf die Trennung der Gruppen, so dass in der Kombination beider multivariater Verfahren sowohl die Ähnlichkeit innerhalb der

Gruppe berücksichtigt wird, wie auch die Unähnlichkeit zwischen den Gruppen hinsichtlich der sie identifizierenden Parameter.

## Ergebnisse

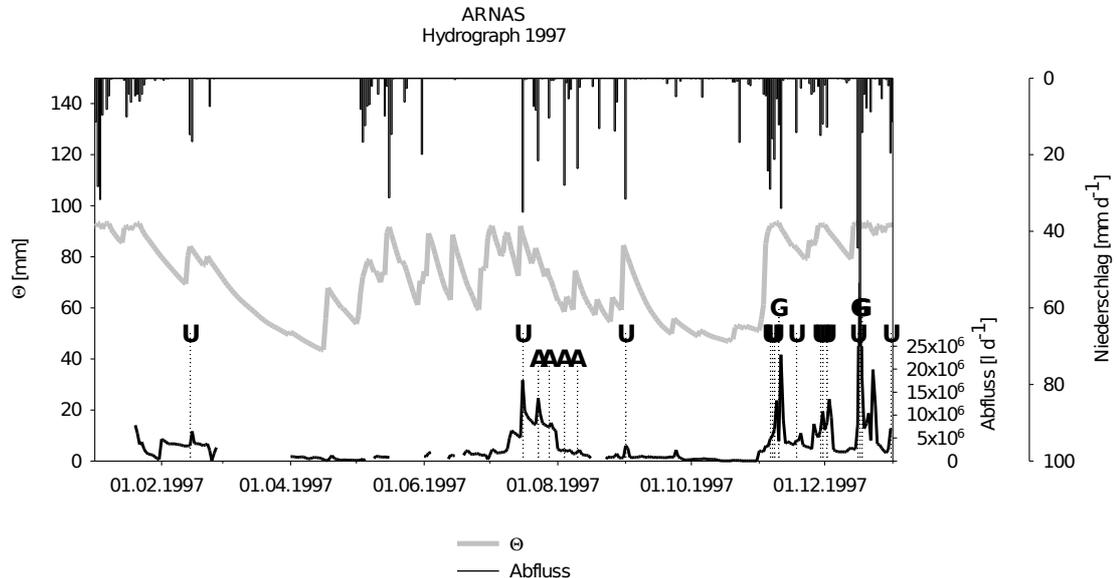


Abb. 2: Hydrograph des Jahres 1997. Dargestellt sind weiterhin der tägliche Niederschlag (Balken), die modellierte mittlere Bodenfeuchte ( $\Theta$ ) des Einzugsgebietes auf Tagesbasis wie auch die klassifizierte Ereignisse. U: Hysterese im Uhrzeigersinn, G: gegen den Uhrzeigersinn, A: Acht-Förmig.

Während des Erfassungszeitraumes für die Bodenfeuchte im Untersuchungsgebiet konnten 19 N-A-Ereignisse identifiziert werden (vgl. Abb. 2). 12 davon wiesen eine Hysteresekurve im Uhrzeigersinn auf (Abb. 3), drei wurden als gegen den Uhrzeigersinn drehend klassifiziert (Abb. 4), die Hysteresekurve der verbliebenen vier Ereignisse wurden als Acht-Förmig beschrieben (Abb. 5). Hierbei verändert die Hysteresekurve während des Ereignisses ihren Drehsinn: bei niedrigen Abflüssen ist eine im Uhrzeigersinn drehende Kurve zu beobachten, die sich mit zunehmendem Abfluss in eine gegen den Uhrzeigersinn wandelt. Diese Gruppe von Ereignissen fand vorwiegend im Juli und August bei erkennbar niedrigen Bodenfeuchtwerten statt. Ereignisse mit einer Hysteresekurve im oder gegen den Uhrzeigersinn entstanden hingegen während des gesamten Jahres, wobei Ereignisse der letzteren Gruppe

stets unmittelbar nach einem oder mehreren N-A-Ereignissen mit Hysterese im Uhrzeigersinn stattfanden. Eine Zusammenfassung aller Daten der einzelnen Ereignisse kann in Tabelle 1 ersehen werden.

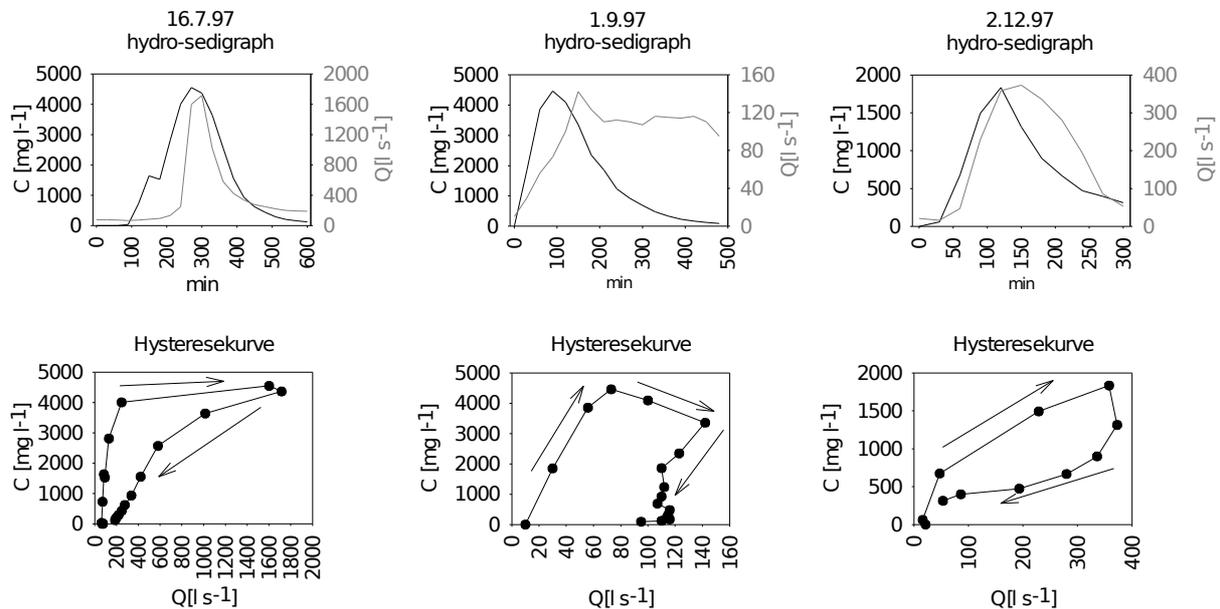


Abb. 3: Ereignisse vom 16.7., 1.9. und 2.12.1997 als Beispiele für Hysteresekurven im Uhrzeigersinn. Die oberen Graphen zeigen die Hydrographen (grau) und Sedigraphen (schwarz), die unteren Graphiken die Entwicklung des Abflusses (Q) und der Schwebstoffkonzentration (C) während des Ereignisses. Man beachte die unterschiedliche Skalierung der Achsen!

Der ereignisauslösende Niederschlag schwankte zwischen 3,4 und 47,8 mm, seine Intensität erreichte Werte von 0,4 bis hin zu 11,6 mm 5min<sup>-1</sup>. Die mittlere Niederschlagsintensität erreichte Werte zwischen 1,2 und 20,8 mm h<sup>-1</sup>. Der antezedente Niederschlag während 7 Tagen vor dem Ereignis reichte von keinem Niederschlag bis hin zu 109 mm. Dementsprechend konnten während der 6 h vor dem erfassten N-A-Ereignis 18,4 mm, einen Tag davor 71,2 mm sowie 3 Tage vor dem Ereignis 86,8 mm gemessen werden.

Die untersuchten Abflussereignisse wiesen eine sehr starke Schwankung der Abflüsse auf. Der mittlere Abfluss reichte von 47,7 l s<sup>-1</sup> bis hin zu 707,7 l s<sup>-1</sup>, während die höchsten Abflussspitzen zwischen 86,9 l s<sup>-1</sup> und 2347 l s<sup>-1</sup> lagen. Der mittlere Abflussbeiwert betrug 0,17, wobei auch

dieser zwischen 0,1 und 0,70 variierte. Der mittlere Beitrag des Basisabflusses zum Gesamtabfluss betrug 34,3 % (8,9 %-74,7 %).

Die gemessenen Werte der Schwebstoffkonzentration streuten ebenfalls sehr stark. Schwankten die mittleren Schwebstoffmengen im Wasser zwischen  $34,9 \text{ mg l}^{-1}$  und  $2288,6 \text{ mg l}^{-1}$ , so betragen die Spitzenwerte  $86 \text{ mg l}^{-1}$  bis  $4780 \text{ mg l}^{-1}$ . Die Abflussereignisse entstanden bei Bodefeuchtegehalten der obersten 20 cm des Bodens zwischen 58,7 mm und 93,4 mm, bei einem Mittelwert von 86,4 mm, was über der Feldkapazität liegt.

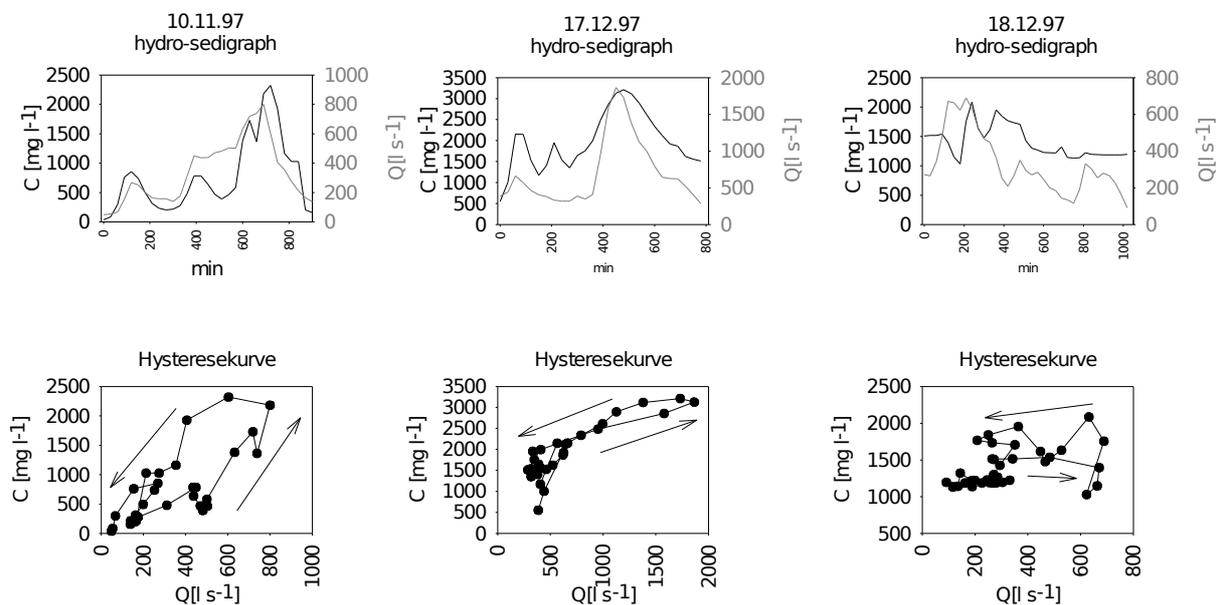


Abb. 4: Ereignisse vom 10.11, 17.12 und 18.12.1997 als Beispiele für Hysteresekurven gegen den Uhrzeigersinn. Die oberen Graphen zeigen die Hydrographen (grau) und Sedigraphen (schwarz), die unteren Graphiken die Entwicklung des Abflusses ( $Q$ ) und der Schwebstoffkonzentration ( $C$ ) während des Ereignisses. Man beachte die unterschiedliche Skalierung der Achsen!

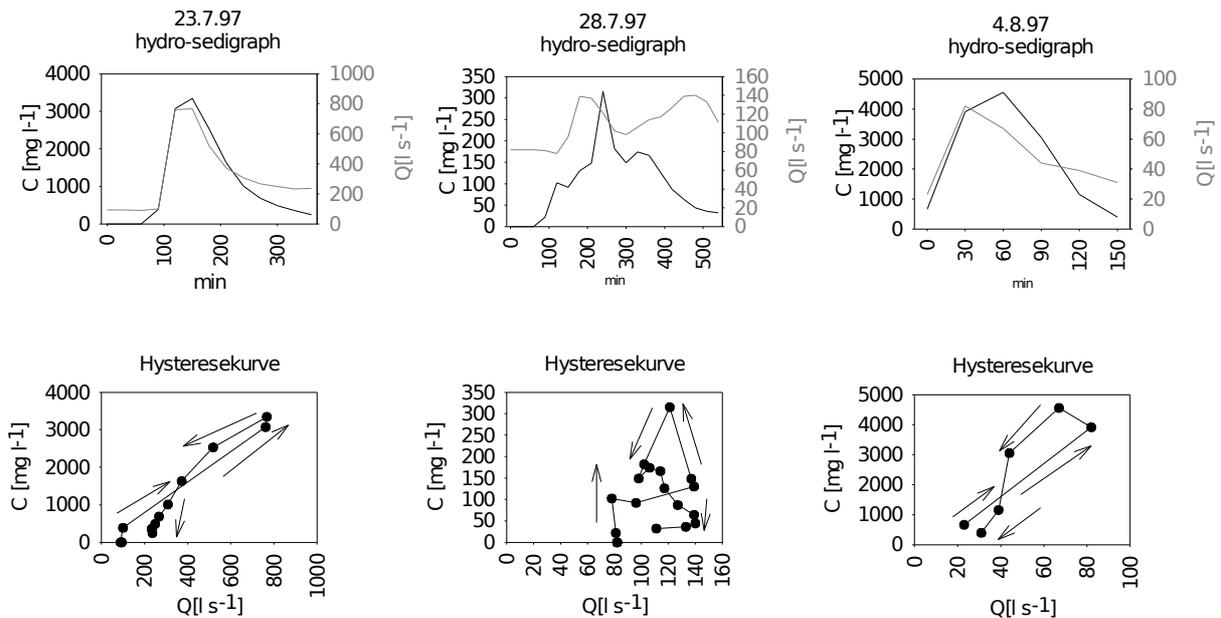


Abb. 5: Ereignisse vom 23.7, 28.7 und 4.8.1997 als Beispiele für Acht-Förmige Hystereskurven. Die oberen Graphen zeigen die Hydrographen (grau) und Sedigraphen (schwarz), die unteren Graphiken die Entwicklung des Abflusses (Q) und der Schwebstoffkonzentration (C) während des Ereignisses. Man beachte die unterschiedliche Skalierung der Achsen!

Tabelle 1: Eigenschaften der untersuchten N-A-Ereignisse. Nicht alle Variablen sind in der statistischen Auswertung verwendet worden. N: Anzahl; StA: Standardabweichung

	Alle Ereignisse					Uhrzeigersinn (U)					Gegen-Uhrzeigersinn (G)					Acht-Förmig (A)				
	N	mi	max	mitte	StA	N	mi	max	mitte	StA	N	min	max	mitte	StA	N	min	max	mitte	StA
P	1	3.4	47.8	21.3	12.3	1	3.4	47.8	19.1	13.3	3	28.9	37	34.1	4.5	4	11.0	27.6	18.5	7.3
IP30 (mm)	1	1.6	20.6	6.2	5.8	1	1.6	15.6	4.3	4.1	3	2.6	8.6	4.7	3.4	4	3.6	20.6	12.7	7.9
IP5 (mm)	1	0.4	11.6	2.3	3.0	1	0.4	5.6	1.5	1.6	3	0.6	0.8	0.7	0.1	4	0.8	11.6	5.7	5.0
IP	1	1.2	20.8	4.6	5.0	1	1.2	12.7	3.4	3.3	3	2.5	2.9	2.7	0.2	4	2.9	20.8	9.8	8.2
AP6h	1	0	18.4	4.0	5.0	1	0	8.6	2.9	3.1	3	2.4	18.4	10.7	8.0	4	0	9.4	2.4	4.7
AP1d	1	0	71.2	14.3	20.2	1	0	39.4	9.5	11.4	3	9	71.2	46.1	32.8	4	0	12.4	5.0	6.1
AP3d	1	0	86.8	25.9	26.8	1	0	62.2	23.2	23.7	3	38.2	86.8	61.0	24.4	4	0	16.6	7.3	8.5
AP7d	1	0	109.	39.3	32.2	1	0	82.2	31.1	27.9	3	60.2	109.	86.1	24.8	4	11.8	47	26.8	15.5
AQ24h	1	3.1	576.	128.	149.	1	3.1	359.	91.8	98.5	3	202.	576.	372.	189.	4	14.4	93.7	55.8	41.2
Q	1	4	701.	199.	167.	1	6	376.	157.	107.	3	328.	701.	455.	212.	4	47.6	314.	131.	125.
Q30	1	8	1865	475.	533.	1	8	1716	383.	470.	3	688.	1865	1117	649.	4	81.5	767.	269.	332.

Q5	1	8	2347	545.	652.	1	8	2347	445.	639.	3	716.	1947	1161	682.	4	90.4	1185	382.	535.
	9	6.9	.1	4	5	2	6.9	.1	6	9	3	4	.3	.4	6	4	.1	4	4	9
BF%	1	8.9	74.7	34.3	20.6	1	1	69.4	34.1	20.7	3	8.9	26.3	17.6	8.7	4	29.3	74.7	47.3	20.4
	9					2	1.0													
RC	1	0	0.70	0.17	0.16	1	0	0.70	0.18	0.18	3	0.18	0.42	0.27	0.13	4	0.01	0.12	0.07	0.06
	9	.01				2	.04													
SSC	1	3	2288	730.	698.	1	3	1533	488.	525.	3	759.	1980	1381	611.	4	98.4	2288	970.	963.
	9	4.9	.6	9	5	2	4.9	.4	3	9	3	2	.6	.3	0	4	.6	9	8	
SSC30	1	8	4558	1823	1537	1	8	4549	1465	1547	3	2085	3212	2539	594.	4	315.	4558	2361	1937
	9	6.0	.1	.7	.5	2	6.0	.3	.7	.8	3	.4	.6	.3	7	4	2	.1	.0	.3
SSC5	1	8	4780	1926	1549	1	8	4583	1570	1554	3	2193	3212	2575	555.	4	335.	4780	2508	1989
	9	6.0	.7	.4	.2	2	6.0	.4	.3	.2	3	.0	.6	.2	6	4	.7	.1	.6	
Θ	1	5	93.4	86.4	9.7	1	8	93.4	89.8	4.2	3	93.4	93.4	93.4	0.0	4	58.4	80.5	70.8	9.1
	9	8.4				2	2.0													

Alle in die Untersuchungen eingegangenen Ereignisse fügen sich dem typischen hydrologischen Verhalten des Untersuchungsgebietes (vgl. García-Ruiz et al., 2000, Lorente et al., 2000, Arnáez et al., 1999), indem sie sehr schnell auf die Niederschläge mit dem Ansteigen des Abflusses reagieren. Dabei können einige charakteristischen Eigenschaften der einzelnen Gruppen erkannt werden:

1. Ereignisse mit einer Hysteresekurve gegen den Uhrzeigersinn sind lange andauernde Abflussereignisse mit anhaltender Schwebstofffracht. Weiterhin weisen sie eine sehr unregelmäßige Abflussentwicklung auf, die sich im zeitweise nicht eindeutig ersichtlichen Drehsinn der Hystereseschleife widerspiegelt.
2. Acht-Förmige Hysteresekurven werden von sehr kurzen Ereignissen produziert, die eine unregelmäßige Entwicklung der Schwebstoffkonzentration aufzeigen.
3. Trotz der großen Streuung der beschreibenden Daten der Abflussereignisse mit Hysteresekurve im Uhrzeigersinn sind diese klar im Einzelnen und als eigenständige Gruppe zu identifizieren, und in ihrem Verlauf des Abflusses wie auch des Sedimenttransports als charakteristisch für das Einzugsgebiet anzusehen.

Die Diskriminanzanalyse generierte 2 Funktionen die lediglich 3 Variablen der Abflussentstehung beinhalteten (Tabelle 2, 1. Abschnitt): die Gesamtniederschlagsmenge, den antezedenten Niederschlag 3 Tage vor dem Ereignis sowie die Bodenfeuchte zum Zeitpunkt des Ereignisses. Dabei erklärt die erste kanonische Diskriminanzfunktion (f1) etwa 80 % der Varianz unter den Gruppen (Tabelle 2, 2. Abschnitt). Sie korreliert dabei sehr hoch mit dem Bodenwassergehalt (Korrelationskoeffizient

0.957) (Tabelle 2, 3. Abschnitt, Abb. 6), während die beiden restlichen Variablen nur in minderm Maße in diese Funktion eingehen. Dass heißt, dass eine Zunahme der Funktionswerte von F1 weitestgehend einer Zunahme der Bodenfeuchte entsprechen. Die zweite Diskriminanzfunktion (f2) korreliert deutlich, jedoch in weitaus geringerem Maße positiv mit AP3d (0,542) und P (0,443) und negativ mit dem Bodenwassergehalt (-0,229).

Die Betrachtung der Zentroide der einzelnen Gruppen innerhalb der neu geschaffenen zwei Dimensionen fällt auf, dass die Gruppe der Ereignisse mit im Uhrzeigersinn verlaufender Hysteresekurve nahe null zu finden ist (f1=0,654; f2=-0,652) (Tabelle 2, 5. Abschnitt, Abb. 7). Die beiden anderen Gruppen stehen sich gegenüber, das heißt dass sie vollkommen unterschiedliche Eigenschaften bezüglich ihrer Entstehungsvoraussetzungen aufweisen. Der Zentroid der Gruppe mit Hysterese gegen den Uhrzeigersinn ist in einem Bereich mit hohen Werten beider Funktionen zu finden (f1=1,856; f2=1,820), was bedeutet, dass diese Ereignisse durch ergiebige Niederschläge bei extrem hohen Bodenfeuchtebedingungen und nach einer hohen antezedenten Niederschlagsmenge ausgelöst wurden. Die Verteilung der Ereignisse in der Graphik (Abb. 7) deutet darauf hin, dass sie zwar aufgrund des auslösenden wie auch der im Voraus gefallenen Niederschlags variieren, jedoch die Bodenfeuchte stets konstant hoch ist. So ist festzustellen, dass alle drei dieser Gruppe zugehörigen Ereignisse bei Sättigung des Bodens entstanden.

Im Gegensatz dazu scharen sich die Ereignisse mit einer Acht-Förmigen Kurve der Abfluss-Schwebfracht-Beziehung in einem Bereich mit sehr niedrigem Wert der ersten Funktion bei einem Wert der zweiten Funktion nahe 0 (f1=-3,189; f2=0,427). Das heißt, dass diese Ereignisse unter besonders trockenen Bedingungen im Einzugsgebiet entstanden, jedoch ohne Besonderheiten der sie auslösenden Niederschläge.

Eine detaillierte Betrachtung der in die Diskriminanzfunktionen eingehenden Variablen ist zu erkennen, dass die auslösenden Niederschläge der gegen den Uhrzeigersinn charakterisierten Gruppe mit durchschnittlich 34,1 mm deutlich höher sind als bei den anderen

Gruppen, deren Gesamtniederschläge lediglich 19 mm erreichen. Die in den drei vorangehenden Tagen gefallenen Niederschläge sind dagegen in der Gruppe der Acht-Förmigen Hysterese im Durchschnitt um eine Größenordnung niedriger (7,1 mm) als in der Gruppe gegen den Uhrzeigersinn (61 mm). Doch auch hier weisen Acht-Förmige Gruppe und die Gruppe im Uhrzeigersinn eine große Ähnlichkeit dieser Variablen: in beiden sind auch Ereignisse zu finden, an denen in den vorangehenden drei Tagen kein Niederschlag fiel.

Tabelle 2: Daten der Kanonischen Diskriminanzfunktionen (KDF). Es werden die standardisierten kanonischen Funktionskoeffizienten der in die Untersuchung einbezogenen Daten aufgezeigt, die Eigenwerte der kanonischen Diskriminanzfunktionen und deren Strukturmatrix. Die höchsten Korrelationen werden fett hervorgehoben, die ausgenommenen Variablen sind kursiv markiert. Im vierten Teil der Tabelle sind die Koeffizienten der Diskriminanzfunktionen, darunter die Funktionswerte der zentroide der einzelnen Gruppen aufgeführt

	Funktion	1	2
Kanonische Funktionskoeffizienten	P	0.316	0.779
	AP3d	0.141	1.008
	Θ	0.946	-0.478
	Eigenwert	3.714	1.023
Eigenwerte der KDF	Varianz (%)	78.4	21.6
	Akkumulierte Varianz (%)	78.4	100.
	Kanonische Korrelation	0.888	0.711

Struktur-matrix der KDF	<b>SWC</b>	<b>0.95</b>	-0.22
		<b>7</b>	<b>9</b>
	<i>IP</i>	<b>0.33</b>	0.16
		<b>0</b>	<b>0</b>
	<b>AP3d</b>	0.339	<b>0.54</b>
			<b>2</b>
	<i>AQ24h</i>	0.408	<b>0.48</b>
			<b>7</b>
	<b>P</b>	0.148	<b>0.44</b>
			<b>3</b>
	<i>IP30</i>	0.091	<b>0.38</b>
			<b>5</b>
	<i>AP1d</i>	0.186	<b>0.34</b>
			<b>0</b>
<i>AP7d</i>	0.287	<b>0.29</b>	
		<b>2</b>	
<i>AP15d</i>	-0.14	<b>-0.2</b>	
	<b>4</b>	<b>85</b>	
<i>AP21d</i>	-0.13	<b>-0.2</b>	
	<b>2</b>	<b>46</b>	
<i>AP6h</i>	0.110	<b>0.24</b>	
		<b>0</b>	
<i>IP5</i>	0.149	<b>0.20</b>	
		<b>9</b>	
KDF-Koeffizienten	<b>P</b>	0.028	0.06
			<b>8</b>
	<b>AP3d</b>	0.006	0.04
			<b>6</b>
	<b>Θ</b>	0.189	-0.09
			<b>6</b>
	(const.)	-17.1	5.61
		<b>51</b>	<b>2</b>
Gruppen-Zentroide	<b>c</b>	0.654	-0.65
			<b>2</b>
	<b>a</b>	1.856	1.82
			<b>0</b>
	<b>e</b>	-3.18	0.42
		<b>9</b>	<b>7</b>

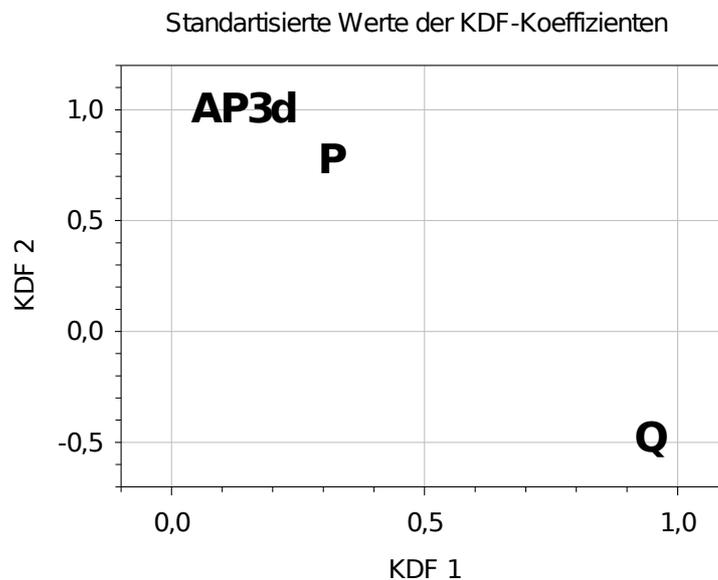


Abb. 6: Standardisierte Koeffizienten der in Diskriminanzfunktionen integrierten Variablen. Die genauen Werte können in Tabelle 2, 1. Abschnitt abgelesen werden.

Anders verhält es sich mit im Falle der Bodenfeuchte. Ereignisse mit Hysteresekurven im und gegen den Uhrzeigersinn entstanden bei sehr hohem Bodenwassergehalt (89,8 mm bzw. 93,4 mm), hingegen betrug der durchschnittliche Bodenwassergehalt bei der Entstehung von Acht-Förmigen Ereignissen nur 70,8 mm.

Mit Hilfe des Dunnet-T3 Tests ist zu erkennen (Tabelle 3), wie Anhand jeder der drei extrahierten Variablen die drei Typen des Sedimenttransports unterschieden werden können. Der den Ereignissen vorausgegangene Niederschlag ist nicht signifikant für die Unterscheidung aller drei Gruppen. Der Gesamtniederschlag des Ereignisses eignet sich lediglich dazu, die Gruppe der Ereignisse mit Hysterese gegen den Uhrzeigersinn von den beiden anderen zu unterscheiden. Der Bodenwassergehalt hingegen eignet sich um alle drei Gruppen zu differenzieren. Dabei ist der p-Wert zur Unterscheidung der Acht-Förmigen Gruppe von der im Uhrzeigersinn nur geringfügig größer als 0,05, so dass auch hier von einer Signifikanz ausgegangen werden kann.

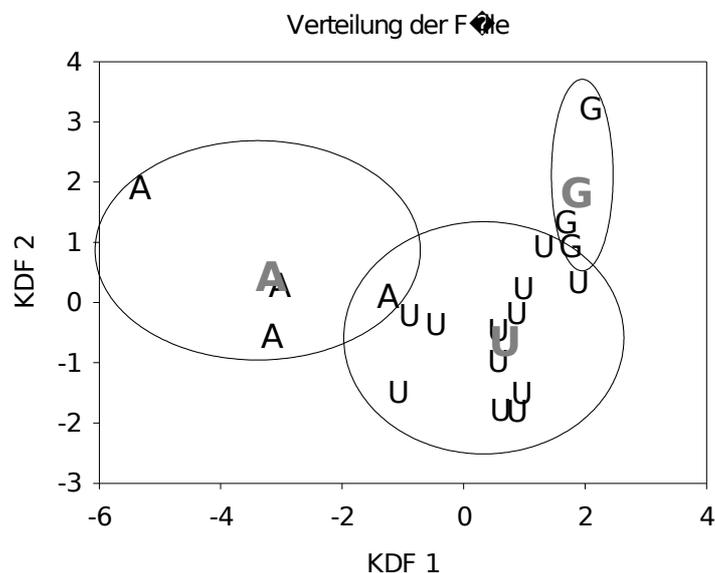


Abb. 7: Verteilung der einzelnen Ereignisse (schwarz) anhand der Diskriminanzfunktionen. In grau sind die Gruppenzentroide dargestellt.

Tabelle 3: Post-Hoc Test Dunnet-T3 zum ANOVA der in die Diskriminanzfunktionen aufgenommenen Variablen. Signifikante Werte sind fett markiert

Gruppe	Gruppe	Variablen	mitt. Diff.	mitt. Fehler	Signifik.
U	G	<b>P</b>	<b>-16.1</b>	4.3	0.01
		AP3d	-39.5	15.6	0.19
		<b>⊖</b>	<b>-3.2</b>	1.1	0.03
	A	P	-0.4	5.0	1.00
		AP3d	14.3	8.0	0.25
		<b>⊖</b>	<b>19.3</b>	4.7	0.05
G	U	<b>P</b>	<b>16.1</b>	4.3	0.01
		AP3d	39.5	15.6	0.19
		<b>⊖</b>	<b>3.2</b>	1.1	0.03
	A	<b>C</b>	<b>15.7</b>	4.5	0.05
		AP3d	53.8	14.7	0.11
		<b>⊖</b>	<b>22.5</b>	4.6	0.04
A	U	P	0.4	5.0	1.00
		AP3d	-14.3	8.0	0.25
		<b>⊖</b>	<b>-19.3</b>	4.7	0.05
	G	P	-15.7	4.5	0.05
		AP3d	-53.8	14.7	0.11
		<b>⊖</b>	<b>-22.5</b>	4.6	0.04

Die Anwendung des berechneten Diskriminanzmodells auf alle Daten führt lediglich zu einer Fehlklassifikation (siehe Tabelle 4): ein Acht-Förmiges Ereignis wird falsch in die Gruppe der Hysteresekurven im Uhrzeigersinn eingeordnet. Die Kreuztabellierung der einzelnen Ereignisse, als Test auf Konsistenz des Diskriminantenmodells, zeigt ebenfalls sehr zufrieden stellende Ergebnisse: hierbei werden zwei Ereignisse der Gruppe im Uhrzeigersinn der Gruppe Gegen den Uhrzeigersinn zugerechnet, gleichzeitig werden jeweils ein Ereignis aus der Gruppe der Acht-Förmigen und gegen den Uhrzeigersinn charakterisierten Ereignisse in die mehrheitliche Gruppe im Uhrzeigersinn hinzugerechnet.

Tabelle 4: Klassifikationsstatistik und Kreuzvalidierung der Kanonischen Diskriminanzfunktionen. Aufgezeigt werden absolute Werte und prozentuale

	Vorhergesagte Gruppe			Gesamt	Richtig klassifiziert
	U	G	A		
Hysterese					

Original	U	12 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	12 (100%)	95.00%
	G	0 (0%)	3 (100%)	0 (0%)	3 (100%)	
	A	1 (25%)	0 (0%)	3 (75%)	4 (100%)	
Kreuz- validierung	U	10 (83%)	2 (17%)	0 (0%)	12 (100%)	79.00%
	G	1 (33%)	2 (66%)	0 (0%)	3 (100%)	
	A	1 (25%)	0 (0%)	3 (75%)	4 (100%)	

Tabelle 4: Klassifikationsstatistik und Kreuzvalidierung der Kanonischen Diskriminanzfunktionen. Aufgezeigt werden absolute Werte und prozentuale Verteilung.

	Hysterese	Vorhergesagte Gruppe			Gesamt	Richtig klassifiziert
		U	G	A		
Original	U	12 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	12 (100%)	95.00%
	G	0 (0%)	3 (100%)	0 (0%)	3 (100%)	
	A	1 (25%)	0 (0%)	3 (75%)	4 (100%)	
Kreuz- validierung	U	10 (83%)	2 (17%)	0 (0%)	12 (100%)	79.00%
	G	1 (33%)	2 (66%)	0 (0%)	3 (100%)	
	A	1 (25%)	0 (0%)	3 (75%)	4 (100%)	

## Diskussion

Anhand des Verhältnisses von Abfluss und Sedimentkonzentration während N-A-Ereignissen konnten drei unterschiedliche Typen von Ereignissen unterschieden werden, die sich grundlegend in ihren Charakteristiken zu Abfluss, Sedimenttransport und zu den sie auslösenden Niederschlägen unterscheiden.

Die Ereignisse mit einer Hystereskurve im Uhrzeigersinn sind als typisch für das Einzugsgebiet anzusehen. Williams (1989) deutet den raschen Anstieg der Suspensionsfracht zu Beginn des Hochwassers mit der raschen Mobilisierung der im Gerinnebett vorhandenen Sedimente. Regüés et al. (2000) beschreiben denselben Abflusstypen in einem mediterranen Kleineinzugsgebiet und bestätigen diese Erklärung, fügen dabei hinzu, dass die Schwebstoffe von der Hochwasserwelle im Gerinne vorneweg geschoben werden. Ihre rasche Abnahme während des Ereignisses wird damit erklärt, dass die mobilisierbare Sedimentmenge

bei dieser Art von Ereignissen begrenzt ist. Daraus kann auch gefolgert werden, dass die Herkunft der Sedimente bei jedem dieser Ereignisse auf das Gerinnebett und auf dessen nächste Umgebung beschränkt ist.

In analoger Art und Weise kann auch die Entstehung der Ereignisse mit Hysterese gegen den Uhrzeigersinn, bei denen das Suspensionsmaximum nach dem Abflussmaximum den Pegel erreicht, erklärt werden. Vieles weist darauf hin, dass die Sedimentquellen insgesamt weiter entfernt vom Gerinne sind, da eine Hochwasserwelle mit Wellengeschwindigkeit bis zum Pegel fortgepflanzt wird, die transportierte Suspensionsfracht mit Fließgeschwindigkeit transportiert wird (Williams 1989). Andererseits werden bei einem solchen Ereignis mit einer solch hohen Abflussschwelle Sedimentquellen und -zwischenpeicher erst nach und nach in das Ereignis zugeschaltet, wie es von Threlfall (1986) für ein nivales Einzugsgebiet beschrieben worden ist. Dies hat zur Folge, dass sowohl mehr Sedimentquellen als auch solche zur Suspensionsfracht beitragen, die einen weiteren Transportweg bis hin zum Gerinne haben, oder auch unter anderen Bedingungen (weniger Bodenfeuchte und antezedenter Niederschlag) gar nicht bis dahin gelangt wären. Dafür spricht auch der hohe vorweg gefallene Niederschlag, bzw. auch das Auftauchen der Ereignisse mit Hysterese gegen den Uhrzeigersinn nach einem oder mehreren Ereignissen im Uhrzeigersinn, da somit größere Mengen an mobilisierbarer Fracht in die Nähe des Gerinnes transportiert worden sind. Es kommen dafür die am SW-Exponierten Hang zu findenden *debris-flows* in Frage, bzw. temporäre Sedimentspeicher wie einige Mulden und Senken am Schatthang. Nicht zuletzt ist jedoch auch die morphodynamische Wirkung des hohen Abflusses im Gerinne selbst als weitere Ursache für ein verstärktes und verzögertes Nachliefern von Sedimenten anzusehen. Der hohe Abfluss bewirkt die Destabilisierung von Uferböschungen, so dass im Laufe des Ereignisses immer wieder Suspensionsfracht durch Abbrüche usw. nachgeliefert werden kann. Bei Ereignissen mit Hystersekurve gegen den Uhrzeigersinn sind also mehr weiter im Einzugsgebiet verteilte Sedimentquellen und an der Nachlieferung der Schwebfracht beteiligt.

Die letzte hier beschriebene Gruppe von Ereignissen, die mit Achtförmiger Hysteresekurve, ist bisher in der Literatur kaum beschrieben worden (Arnborg 1967, Williams 1989). Die Autoren beschrieben jedoch die Kurven mit umgekehrter Orientierung. Im hier vorliegenden Fall kehrt sich die Orientierung der Hysteresekurve von einer im Uhrzeigersinn, während der niedrigen Abflüsse zu Beginn des Ereignisses, zu einer gegen den Uhrzeigersinn während der höchsten Abflüsse und Schwebstoffkonzentrationen, um dann am Ende des Ereignisses, mit sinkendem Abfluss und abnehmender Schwebstofffracht wieder im Uhrzeigersinn zu drehen. Dies deutet darauf hin, insbesondere nach den vorangehenden Betrachtungen, dass sich im Laufe des Ereignisses die Schwebstoffquellen und deren Transportpfade ändern. Alle Ereignisse fanden unter relativ trockenen Bedingungen statt, wobei die schweren tonig-schluffigen Böden des Einzugsgebietes sehr niedrige hydraulische Leitfähigkeiten ( $<1 \text{ mm h}^{-1}$ ) aufweisen (Seeger, 2001). Auftretende Niederschläge können zwar zuerst in die Trockenrisse versickern, doch weisen diese, erstens, eine begrenzte Aufnahmekapazität und, zweitens, führen sie das Wasser als Zwischenabfluss schnell in den Vorfluter. Hier werden als erstes die Mechanismen in Gang gesetzt, die im Abschnitt zur Hysteresekurve im Uhrzeigersinn beschrieben sind. Bei Sättigung der Makroporen entsteht jedoch, in Verbindung mit der niedrigen Leitfähigkeit der trockenen Böden, Oberflächenabfluss, weil einerseits die Zwischenschicht gesättigt ist, andererseits die Infiltrationskapazität der Bodenmatrix schnell überschritten wird. Aufgrund dessen werden unter diesen Bedingungen weiter entfernte Sedimentquellen und die Zwischenspeicher in den Transportprozessen hinzugeschaltet, da der Abfluss nun aus weiten Teilen des Einzugsgebietes in die Gerinne gelangt. Weiterhin steht viel mobilisierbares Material zur Verfügung, da die Edaphonaktivität leicht erodierbares Feinmaterial an die Bodenoberflächen verlagert hat (Reelfs, 1999, Seeger, 2001). So können während der Ereignisse mit Achtförmiger Hysterese, trotz niedriger Abflussmengen, beträchtliche Mengen an Schwebfracht transportiert werden.

Lässt im Laufe des Ereignisses die Niederschlagsintensität nach, so stoppt der Abflussbildungsprozess, und damit der Sedimenttransport aus dem gesamten Einzugsgebiet schnell und es stellt sich wieder die Hysteresekurve im Uhrzeigersinn ein. Auch in diesem Falle ist mit Sicherheit eine verstärkte Schwebfrachtmobilisierung aus dem Gerinne zu erwarten, wie bei den Ereignissen mit Hysteresekurve gegen den Uhrzeigersinn, insbesondere da im Vorfeld zu den Ereignissen dieser Gruppe der Abfluss besonders niedrig gewesen ist und einiges Material im Bachbett aufgrund der Trockenheit mobilisierbar wird. Aus Feldbeobachtungen kann jedoch bestätigt werden, dass es im Einzugsgebiet Arnás gerade unter den trockenen Bedingungen nach dem Sommer zu direktem flächigem Oberflächenabfluss ins Gerinne kommt. Die Böden sind dabei nur in geringem Maße oberflächlich durchfeuchtet. Somit geben Acht-förmige Hysteresekurven die Fähigkeit des Einzugsgebietes wider, bei relativ geringen Abflüssen im Gerinne und trotz einer vollständigen Vegetationsdecke unterschiedlicher Deckung beträchtliche Mengen an Sedimenten produzieren zu können. Und dass diese weitgehend aus dem gesamten Einzugsgebiet bis zum Gerinne geleitet werden können.

## **Schlussbetrachtung**

In den meisten Einzugsgebieten ist es nur mit sehr hohem analytischem Aufwand möglich, Sedimentquellen, das heißt geomorphodynamisch aktive Bereiche zu identifizieren, bzw. ihre Aktivität bestimmten Prozessen oder Gebietszuständen zuzuordnen. Mit Hilfe der Hystereskurven des Abflusses und der Sedimentkonzentration, also der Veränderung des Verhältnisses zwischen diesen beiden Parametern im Laufe eines N-A-Ereignisses können den unterschiedlichen Gebietszuständen eines Kleineinzugsgebietes verschiedene Transportmechanismen zugeordnet und die Herkunftsgebiete eingegrenzt werden. Dabei wird deutlich, dass unter den jahreszeitlich veränderlichen Feuchtebedingungen verschiedene Abflussprozesse und zum Teil sehr veränderliche sedimentproduzierende Gebiete in Frage kommen. Es ist hervorzuheben, dass für den Sedimenttransport aus den Hängen bis ins

Gerinne und somit heraus aus dem Einzugsgebiet der Bodenfeuchte eine steuernde Funktion zufällt, denn von ihr sind die abflussbildenden Prozesse abhängig, welche dann die Loslösung und den Transport der festen Bestandteile steuern.

Es bleibt dann die Frage zu beantworten, welche Bereiche unter welchen Bedingungen zur Schwebfracht beitragen, und welche Voraussetzungen notwendig sind, damit die einzelnen Bereiche zum Abfluss und zur Schwebstoffzufuhr am Vorfluter beitragen.

## **Danksagung**

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen folgender Programme gefördert worden: *“Water resources management in a changing environment: the impact of sediment on sustainability”* (WARMICE, ENV4-CT98-0789) von der Europäischen Union, und *“Assessment of sediment sources and runoff generation areas in relation to land use changes”* (HIDROESCALA, REN2000-1709-C04-01/GLO) and *“Hydrological processes in semi-natural Mediterranean areas”* (PROHISEM, REN 2001-2268-C02-01/HID), beide vom CICYT (Regierungskommission zur Förderung von Forschung und Technologie). Die Dauerbeobachtung des Einzugsgebietes erfolgt aufgrund des Abkommens zwischen CSIC und der Spanischen Umweltministerium (Programm RESEL).

## **Literatur**

- Arnáez, J., Martí-Bono, C., Beguería, S., Lorente, A., Errea, M.P. und García-Ruiz, J.M. (1999): Factores en la generación de crecidas en una cuenca de campos abandonados, Pirineo Central Español. Cuadernos de Investigación Geográfica, 25: 7-24.
- Batalla, R.J. und Sala, M. (1994): Temporal variability of suspended sediment transport in a Mediterranean sandy gravel-bed river, Variability in Stream Erosion and Sediment Transport. IAHS Publ. 244. IAHS, Canberra, pp. 299-305.
- Chikita, K.H., Kemnitz, R. und Kumai, R. (2002): Characteristics of sediment discharge in the subarctic Yukon River, Alaska. Catena, 48: 235-253.

- DeBoer, D.H. und Campbell, I.A. (1989): Spatial scale dependence of sediment dynamics in a semi-arid badland drainage basin. *Catena*, 16: 277-290.
- diCenzo, P.D. und Luk, S.-h. (1997): Gully erosion and sediment transport in a small subtropical catchment. *Catena*, 29: 161-176.
- FAO, ISRIC und ISSS (1998): World Reference Base of Soil Resources. *World Soil Resources Report*, 84, Rome, 109 S.
- García Ruiz, J.M., Martí Bono, C., Arnáez Vadillo, J., Beguería-Portugués, S., Lorente-Grima, A. und Seeger, M. (2000): Las cuencas experimentales de Arnás y San Salvador en el Pirineo central español: escorrentía y transporte de sedimento. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 26: 23-40.
- Hargreaves, G.H. und Samani, Z.A. (1985): Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2): 96-99.
- Havans, A.V. (1956): Using climatic data to estimate water in soil. *New Jersey Agr.*, 38: 6-10.
- Hodgkins, R. (1999): Controls on suspended-sediment transfer at a high-arctic glacier, determined from statistical modelling. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24: 1-21.
- Jansson, M.B. (2002): Determining sediment source areas in a tropical river basin, Costa Rica. *Catena*, 47: 63-84.
- Klein, M. (1984): Anti-clockwise hysteresis in suspended sediment concentration during individual storms. *Catena*, 11: 251-257.
- Lanfer, N. (1995): Wasserbilanz und Bestandssklima als Grundlage einer agrarklimatischen Differenzierung in der COSTA Ecuadors. *Göttinger Beiträge zur Land- und Forstwirtschaft in den Tropen und Subtropen*, 104, Göttingen, 204 S.
- Lenzi, M. und Marchi, L. (2000): Suspended sediment load during floods in a small stream of the Dolomites (northeastern Italy). *Catena*, 39: 267-282.
- Llorens, P., Queralt, L., Plana, F. und Gallart, F. (1997): Studying solute and particulate sediment transfer in a small mediterranean mountainous catchment subject to land abandonment. *Earth*

Surface Processes and Landforms, 22: 1027-1035.

- Lorente, A., Martí-Bono, C., Beguería, S., Arnáez, J. und García-Ruiz, J.M. (2000): La exportación de sedimento en suspensión en una cuenca de campos abandonados, Pirineo Central Español. Suspended sediment output from an abandoned farmland catchment, Central Spanish Pyrenees. Cuaternario y Geomorfología, 14(1-2): 21-34.
- Pfau, R. (1966): Ein Beitrag zur Frage des Wasserhaushaltes und der Berechnungsbedürftigkeit landwirtschaftlich genutzter Böden im Raume der Europäischen Wirtschaftsgemeinschaft. Meteorologische Rundschau, 19: 33-46.
- Reelfs, C. (1999): Die geomorphologische Relevanz von Bodentieren. Untersuchungen zur Bioturbation durch regenwürmer, Ameisen, Wühlmäuse und maulwürfe. APT-Berichte, 4(10): 121-134.
- Regüés, D., Balasch, J.C., Castelltort, X., Soler, M. und Gallart, F. (2000): Relación entre las tendencias temporales de producción y transporte de sedimentos y las condiciones climáticas en una pequeña cuenca de montaña mediterránea (Vallcebre, Pirineos Orientales). Cuadernos de Investigación Geográfica, 26: 41-65.
- Ries, J.B., Marzoff, I. und Seeger, M. (2000): Der Einfluss von Beweidung auf die Vegetationsbedeckung und Bodenerosion in der Flyschzone der spanischen Pyrenäen. In: G. Zollinger (Hrsg.), Aktuelle Beiträge zur angewandten physischen Geographie der Tropen, Subtropen und der Regio Trirhena. Freiburger Geographische Hefte. Institut für Physische Geographie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br., Freiburg i. Br., S. 167-194.
- Sauer, T. und Ries, J.B. (2002): The water balance of different soils on abandoned fields along a transect from the High Pyrenees to the Central Ebro Basin. In: J.M. García-Ruiz, J.A.A. Jones and J. Arnáez (Hrsg.), Environmental change and water sustainability. Instituto Pirenaico de Ecología, CSIC, Zaragoza, S. 99-109.
- Seeger, M. (2001): Boden und Bodenwasserhaushalt als Indikatoren der Landdegradierung auf extensivierten Nutzflächen in Aragón / Spanien. Freiburger Geographische Hefte, 63. Institut für Physische Geographie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.,

Freiburg i. Br., 184+30 S.

Thornthwaite, C.W. und Mather, J.R. (1957): Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and water balance. Publications in Climatology, 10: 243-311.

Threlfall, J. (1986): The relationship between discharge and suspended sediment in a small nival subarctic catchment., In V. Gardiner, [Hrsg.], International Geomorphology, V. 1, John Wiley & Sons, Ltd., London, p. 823-841.

Williams, G.P. (1989): Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. Journal of Hydrology, 111: 89-106.

## **Adressen der Autoren**

Manuel Seeger : Physische Geographie, FB VI Geographie / Geowissenschaften, Universität Trier, D-54286 Trier. e-mail: [seeger@uni-trier.de](mailto:seeger@uni-trier.de)

Mari-Paz Errea, e-mail: [paz@ipe.csic.es](mailto:paz@ipe.csic.es). Pyrenean Institute of Ecology (CSIC), Campus de Aula Dei, PO Box 202, E-50080 Zaragoza, Spanien.

Noemí Lana-Renault, e-mail: [noemi@ipe.csic.es](mailto:noemi@ipe.csic.es). Pyrenean Institute of Ecology (CSIC), Campus de Aula Dei, PO Box 202, E-50080 Zaragoza, Spanien.

Santiago Beguería, e-mail: [S.Begueria@geog.uu.nl](mailto:S.Begueria@geog.uu.nl). Utrecht Centre for Environment and Landscape Dynamics. Department of Physical Geography, Utrecht University, NL-3508 Utrecht, Niederlande.

José Arnáez, e-mail: [jose.arnaez@dchs.unirioja.es](mailto:jose.arnaez@dchs.unirioja.es). Dep. of Physical Geography, University of La Rioja, E-26004 Logroño, Spanien

Carlos Martí, e-mail: [cmarti@ipe.csic.es](mailto:cmarti@ipe.csic.es). Pyrenean Institute of Ecology (CSIC), Campus de Aula Dei, PO Box 202, E-50080 Zaragoza, Spanien.

David Regüés, e-mail: [dregues@ipe.csic.es](mailto:dregues@ipe.csic.es). Pyrenean Institute of Ecology (CSIC), Campus de Aula Dei, PO Box 202, E-50080 Zaragoza, Spanien.

Jose-María García-Ruiz, e-mail: [humberto@ipe.csic.es](mailto:humberto@ipe.csic.es). Pyrenean Institute

of Ecology (CSIC), Campus de Aula Dei, PO Box 202, E-50080  
Zaragoza, Spanien.