

2. Allgemeine Sedimentfrachtmodelle

2.1 Grundsätzliche Prognosekonzeptionen

Die Sedimentfracht ist die Menge an Feststoffen, die in einem Einzugsgebiet mobilisiert und über das Flusssystem abtransportiert wird (ALLEN 1997, SCHUMM 1977). Ihre Höhe hängt von der Art und Stärke denudativ-erosiver Prozesse sowie von der Transportkapazität im jeweiligen Flussabschnitt ab. Man unterscheidet zwischen der allgemeinen oder spezifischen Sedimentfracht (= Sediment Load in t/a oder Sediment Yield in t/km²/a). In Abhängigkeit von den strömungsmechanischen Prozessen existieren verschiedene Frachtarten, die sich wie folgt untergliedern lassen (Abb. 5; vgl. BROOKS et al. 1997, MORRIS & FAN 1997, SUMMERFIELD 1991).

- Suspensionsfracht

Feinere und mittelkörnige Partikel, welche schwebend im Flusssystem transportiert werden. Die Suspensionsfracht gliedert sich in die so genannte washload (= ständig in Suspension befindliche Partikel, v.a. Tonminerale) und Feststoffpartikel der Feinsand- und Schlufffraktion (= nur zeitweise und bei höheren Fließgeschwindigkeiten in Suspension). Sie ist die global gesehen mit Abstand dominierende Art des Sedimenttransports (ca. 85%, vgl. Anteil von Boden- und Lösungsfracht, s.u.).

- Bodenfracht

Größere Gesteinspartikel der Grobsand-, Kies- und Steinfraction. Der Transport findet ausschließlich an der Sohle des Flussbetts statt, wobei die Mobilisierung entweder durch die Strömung oder durch einen stoßweißen Kontakt mit anderen Partikeln ausgelöst wird. Die Bedeutung der Bodenfracht ist gering. Ihr relativer Anteil am globalen Feststofftransport beträgt nicht mehr als 10% (WALLING & FAN 2003, MEYBECK et al. 2003, WALLING 1987).

- Lösungsfracht

Im Wasser ionar oder kolloidal gelöste Stoffe, die vor allem durch die Lösung von Karbonaten, Evaporiten und der Zufuhr anthropogener Substanzen (z.B. Düngemittel, Herbizide, Pestizide) in das Flusssystem gelangt sind. Ihr Anteil am Sedimentaustrag ist unterschiedlich, je nach lithologischer Beschaffenheit der Einzugsgebiete und dem Einfluss des Menschen

(Karstgebiete, Landwirtschaft, etc.). Im globalen Mittel liegt er aber nur bei 15 % der Gesamtfracht (= Ergebnis eigener Auswertungen der beiden Datenbanken GLORI und GEMS mit insgesamt 435 Flusssystemen; vgl. FRASER et al. 2002, HODGSON & FRASER 1999 und MILLIMAN et al. 1995). Ähnliche Größenordnungen werden auch bei ALLEN (1997), SUMMERFIELD (1991) und WALLING (1987) angegeben.

Zur detaillierten Beschreibung der Prozesse, welche die Suspensions-, Boden- und Lösungsfracht steuern, wird auf die Lehrbücher von EINSELE (2000), ALLEN (1997), AHNERT (1996) und SUMMERFIELD (1991), sowie auf verschiedene Handbücher zur Beschreibung von Erosionsmodellen verwiesen (NEITSCH et al. 2002, MORGAN et al. 1998, RENARD et al. 1997, BORK & SCHRÖDER 1996). Das Hauptaugenmerk der vorliegenden Arbeit liegt auf der Modellierung der Suspensionsfracht und den sie steuernden Prozessen, da sie mengenmäßig bei weitem dominiert. Boden- und Lösungsfracht werden wegen ihrer geringen Bedeutung und grundsätzlich anderer Transportprozesse nicht weiter behandelt. Im Folgenden wird die Suspensionsfracht daher vereinfachend als Sedimentfracht bezeichnet und mit SSY (Suspended Sediment Yield in $\text{t}/\text{km}^2/\text{a}$) oder SSL (Suspended Sediment Load in t/a) abgekürzt.

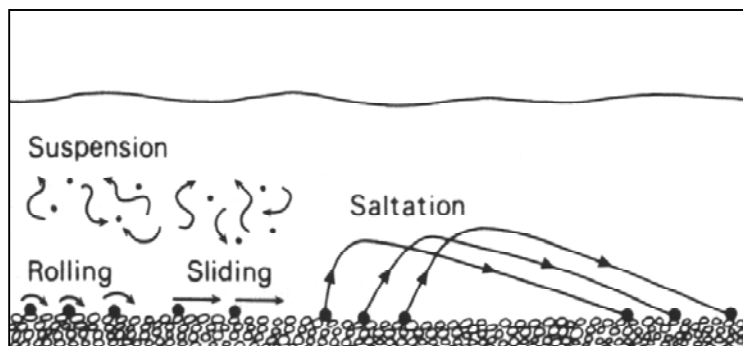


Abbildung 5: Arten des Sedimenttransports in einem Flusssystem. (Quelle: SUMMERFIELD 1991).

Die große Bedeutung, welche die Sedimentfracht innerhalb der lokalen und überregionalen Stoffkreisläufe besitzt, hat zu einer Vielzahl an Theorien und Modellen geführt, mit denen der wechselseitige Zusammenhang zwischen der Sedimentfracht und ihren Steuerfaktoren erklärt wird. Unter ihnen finden sich mathematisch-physikalische Modelle im Mikromaßstab, einfache empirische Gleichungssysteme für den lokalen und regionalen Bereich und eher qualitative Modellvorstellungen für die verschiedenen Geozonen. Diejenigen, welche sich prinzipiell zur

Modellierung der Sedimentfracht eignen, lassen sich in zwei grundsätzlich verschiedene Gruppen einteilen, denudativ-fluviatile⁴ Bodenerosionsmodelle auf der einen Seite und allgemeine Sedimentfrachtgleichungen auf der anderen. Sie unterscheiden sich in ihrer Komplexität, im Skalenbereich und der Anzahl der geomorphologisch wirksamen Prozesse, die bei der Simulation des Bodenabtrags und Sedimenttransports berücksichtigt werden. Die wichtigsten Charakteristika beider Gruppen werden nachfolgend skizziert (Abb. 6 und Tab. 1):

1. Denudativ-fluviatile Bodenerosionsmodelle im lokalen Maßstabsbereich⁵

Dazu gehören die Bodenabtragsgleichung USLE (Universal Soil Loss Equation; vgl. RENARD et al. 1997, WISCHMEIER & SMITH 1978), verwandte empirische Modelle wie RUSLE, AGNPS oder SWAT, sowie neuere physikalisch begründete Modellgleichungen, bei denen die Bodenerosion und der Sedimenttransport anhand mechanischer und hydrologischer Gesetzmäßigkeiten simuliert wird (z.B. EUROSEM, WEPP oder EROSION3D; vgl. Tab. 3). Sie berücksichtigen nur einen Prozess, und zwar den denudativ-fluviatilen Bodenabtrag und gelten streng genommen nur für Einzugsgebiete bis zu einer Größe von wenigen Quadratkilometern. Weiterführende Darstellungen finden sich in Tab. 1 und bei SCHÄUBLE (1999), MORGAN (1999), BORK & SCHRÖDER (1996) und NEARING et al. (1994).

2. Allgemeine Sedimentfrachtgleichungen im regionalen und globalen Maßstabsbereich

Zu den allgemeinen Sedimentfrachtgleichungen gehören u.a. die globalen Modelle von LUDWIG & PROBST (1996, 1998), AHNERT (1970) oder FOURNIER (1960). Sie sind empirische Regressionsgleichungen, mit denen die Sedimentfracht anhand der geoökologischen Eigenschaften in einem größeren Einzugsgebiet simuliert wird. Im Gegensatz zu den denudativ-fluviatilen Bodenerosionsmodellen wird hier der gesamte Sedimentaustrag berücksichtigt, unabhängig von welchen geomorphologischen Prozessen er im einzelnen verursacht wird (z.B. durch denudativ-fluviatile Prozesse, Massenverlagerungen, glaziale Abtragung oder rein fluviatilen Transport im Flusssystem). Die wichtigsten Charakteristika sind in Tab. 1 dargestellt.

⁴ Der Begriff denudativ-fluviatil meint die Kombination von flächenhaftem und linienhaftem Abtrag durch den Oberflächenabfluss am Hang bzw. in kleinen Einzugsgebieten (Rillen, Rensen, Rinnen). Die Strömungsdynamik in größeren Flüssen wird ebenso wenig berücksichtigt, wie andere denudative Prozesse (z.B. Winderosion, Massenbewegungen oder Gletscherabtrag).

⁵ Modellgleichungen, mit denen auch andere Prozesse simuliert werden (z.B. Massenbewegungen oder Winderosion) sind kaum verfügbar, z.T. widersprüchlich und nicht durch umfangreiche Feldversuche abgesichert. Im Gegensatz dazu ist der denudativ-fluviatile Abtrag der mit Abstand am besten erforschte und durch Daten belegte Prozess (vgl. Tab. 2).

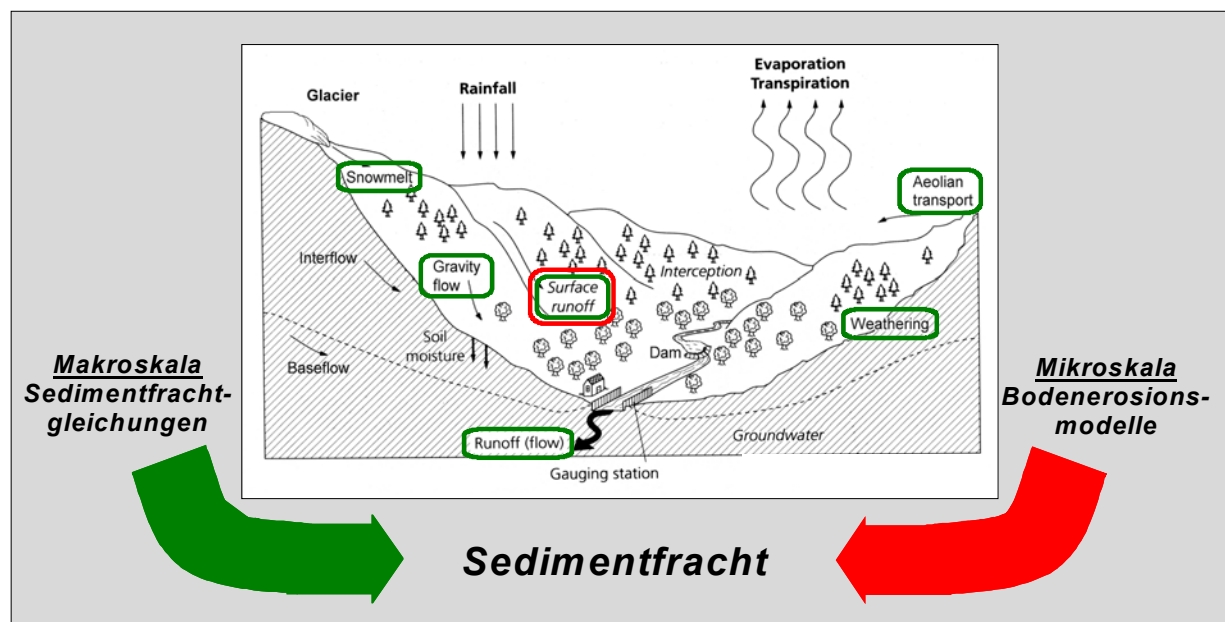


Abbildung 6: Modelltypen zur Simulation der Sedimentfracht. Grüne Farbe = allgemeine Sedimentfrachtgleichungen im überregionalen Bereich und von ihnen berücksichtigte Prozesse. Rote Farbe = denudativ-fluviatile Bodenerosionsmodelle im lokalen Bereich und ihr simulierter Prozess (Eigene Darstellung in Anlehnung an NEWSON 1994).

Sedimentfrachtgleichungen		Bodenerosionsmodelle
<ul style="list-style-type: none"> • Makroskala, überregionaler Bereich • Analyse größerer Einzugsgebiete ab ~ 100 km² 	Skala	<ul style="list-style-type: none"> • Mikroskala bis Mesoskala, lokaler Bereich • Analyse kleinerer Einzugsgebiete bis Mikrorelief
<ul style="list-style-type: none"> • Simulation der mittleren Sedimentfracht in einem größeren Einzugsgebiet 	Zweck	<ul style="list-style-type: none"> • Simulation des Bodenabtrags und z.T. der Sedimentfracht in einem eng umgrenzten Gebiet
<ul style="list-style-type: none"> • Mehrere Jahre bis geologische Zeiträume 	Zeitraum	<ul style="list-style-type: none"> • Einzelereignisse bis mehrere Jahre
<ul style="list-style-type: none"> • Sedimentfracht als Resultat aller geomorphologisch wirkenden Prozesse (fluviatil-denudativ, fluviatil, äolisch, glazial, Massenbewegungen) 	Prozesse	<ul style="list-style-type: none"> • Fast immer nur fluviatil-denudativer Abtrag (kaum verlässliche Modelle für Massenbewegungen, glazialen Transport, äolische Prozesse, etc.)
<ul style="list-style-type: none"> • Empirische Modellformel • Rückwärtsgewandt (Formel basiert auf Messdaten, die am Ausgang großer Einzugsgebiete gewonnen wurden) 	Methodik	<ul style="list-style-type: none"> • Empirische oder physikalische Modellformel • Vorwärtsgewandt (Formel basiert auf Gesetzmäßigkeiten, die auf kleinen Flächen gewonnen wurden)
<ul style="list-style-type: none"> • FOURNIER 1960, AHNERT 1970, MILLIMAN & SYVITSKI 1992, LUDWIG & PROBST (1996, 1998) 	Beispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Empirisch: USLE, EPIC, SWAT • Physikalisch: WEPP, EROSION3D, EUROSEM
<ul style="list-style-type: none"> • Unkomplizierte Anwendung • Geringe Anforderungen an das Datenmaterial • Sedimentfracht als Resultat aller Prozesse • Großräumige Prognosen möglich 	Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Hochauflösende Prognosen • Gute Übereinstimmung zwischen simulierter und gemessener Sedimentfracht in kleinen Gebieten • Abtrag bzw. Sedimentfracht eines Prozesses (klare Rückschlüsse auf Prozessdynamik möglich)
<ul style="list-style-type: none"> • Hochauflösende Prognosen nicht sinnvoll • Starke Abweichungen zwischen simulierter und gemessener Sedimentfracht in kleinen Gebieten • Abtrag bzw. Sedimentfracht aller Prozesse (kaum Rückschlüsse auf Stärke des einzelnen Prozesses) 	Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Expertenwissen notwendig • Hohe Anforderungen an Datenmaterial • Resultat eines Prozesses • Großräumige Prognosen nicht sinnvoll

Tabelle 1: Charakteristika denudativ-fluviatiler Erosionsmodelle und allgemeiner Sedimentfrachtgleichungen.

Wegen der unterschiedlichen Skalenebenen und geomorphologischen Prozesse, die von ihnen berücksichtigt werden, haben beide Modelltypen komplementäre Anwendungsbereiche. Zur Simulation der Sedimentfracht eignen sich nur die allgemeinen Sedimentfrachtmodelle und weniger die denudativ-fluviatilen Erosionsgleichungen, obwohl diese mangels Alternativen in der Praxis häufig zu diesem Zweck eingesetzt werden (vgl. u.a. BRAZIER et al. 2001, MILLWARD & MERSEY 1999, MARKS et al. 1992). Sie werden bei der vorliegenden Arbeit nicht weiter verfolgt und zwar aus folgenden Gründen:

- Sie benötigen extrem genaues und zeitlich hochauflösendes Datenmaterial. Dieses ist in größeren Einzugsgebieten nicht flächendeckend vorhanden und kann in vielen Fällen überhaupt nicht (Paläo-Geoökosysteme) oder nur zu einem unverhältnismäßig hohen Kostenaufwand beschafft werden (rezente Geoökosysteme; vgl. Tab. 2 und 3). Eine grobe Abschätzung anhand eines Klassifikationsschlüssels oder einer Regressionsformel ist nicht sinnvoll, da die denudativ-fluviatilen Modellgleichungen bei weniger genauen Daten in unvorhergesehener Weise reagieren können und ihre Aussagekraft dadurch dramatisch sinkt (vgl. DE ROO 1996, BORK & SCHRÖDER 1996).
- Sie berücksichtigen nur einen geomorphologisch relevanten Prozesstyp, die denudativ-fluviatile Mobilisierung von Bodenmaterial über den Oberflächenabfluss. Andere relevante Prozesse werden nicht beachtet, wie z.B. Winderosion, Rutschungen, Veränderung der Transportkapazität im Flusssystem durch die Zufuhr von Grundwasser und Interflow, Variationen durch den Abtrag warmer Gletscher. Ihre Aussagekraft im überregionalen Skalenbereich ist daher grundsätzlich begrenzt.
- Die Berechnung der Sedimentfracht ist nur durch ergänzende Modellformeln möglich, z.B. solchen zur Bestimmung Sediment-Delivery-Ratio (SDR), die sich stark voneinander unterscheiden und nicht ausreichend verifiziert worden sind. Somit hängt die Qualität mehr von der willkürlichen Wahl einer passenden SDR - Formel ab, als von tatsächlich ablaufenden Prozessen (Tab. 2, vgl. HUDSON 1993, FRENETTE & JULIEN 1987, WALLING 1983).

Zur Problematik denudativ-fluviatiler Erosionsmodelle bei der Erfassung komplexer Prozesse in größeren Einzugsgebieten existiert eine umfangreiche Literatur. Empfehlenswerte Darstellungen finden sich u.a. in BORK & SCHRÖDER (1996), HUDSON (1993) oder CAMPBELL (1992).

USLE-Formel:		Schritt 1
A = R * K * L * S * C * P		nach WISCHMEIER & SMITH (1978) und RENARD et al. (1997)
A = langjähriger Bodenabtrag in t/ha/a R = klimatischer Erosivitätsfaktor (wird mit einer umfassenden Formel bestimmt, die u.a. halbstündige Niederschlagsdaten benötigt) K = Bodenerodibilitätsfaktor (wird mit einer umfassenden Formel bestimmt, die u.a. Daten zur Textur und Durchlässigkeit benötigt) L = topographischer Faktor, der die erosionsfördernde Wirkung der Hanglänge beschreibt S = topographischer Faktor, der die erosionsfördernde Wirkung der Hangneigung beschreibt C = Bedeckungsfaktor, der die erosionsrelevanten Einflüsse der Vegetation beschreibt (wird je nach Version mit einer oder mehreren separaten Berechnungsformeln bestimmt, die u.a. Daten über die Vegetation und den Verlauf der Vegetationsperiode benötigen) P = Bearbeitungsfaktor, der die erosionsrelevanten Einflüsse bestimmter Bearbeitungsmethoden beschreibt		
SDR-Formeln:		Schritt 2
SDR = $e^{(-c*L/S^{0,5})}$		nach FERRO (1997)
SDR = $c*(1-W)$		nach KOTHYARI & JAIN (1997)
SDR = $27,07 * E^{-0,23}$		nach WANIELISTA et al. (1996)
SDR = $1,4*10^{-11} * E^{-0,1} * U/L^{0,4} * CN^{5,4}$		nach WILLIAMS (1977)
SDR = C_{soil} / C_{sed}		nach WALLING (1983)
....		
SDR = Sediment-Delivery-Ratio (Verhältnis zwischen der Sedimentfracht und dem gesamten erodiertem Bodenmaterial) e = Eulersche Zahl (2,718) c = Koeffizient L = Länge des hydraulischen Pfades bzw. des Einzugsgebiets S = Neigung des hydraulischen Pfades W = relativer Flächenanteil des Waldes E = Fläche des Einzugsgebiets in km ² U = Höhenunterschiede in m CN = SCS Curve Number; vgl. USDA-NRCS (2001, 1986) C _{soil} = Tongehalt im Boden in % C _{sed} = Tongehalt im Sediment in % SSY = Spezifische Sedimentfracht in t/km ² /a		
Endformel:		Schritt 3
SSY = A * SDR * 0.01		

Tabelle 2: Sedimentfrachtberechnung mit Erosionsmodellen am Beispiel der USLE. Die grundlegenden Berechnungsprinzipien, denudativ-fluviatiler Erosionsgleichung und passende SDR-Formel, gelten auch für andere empirische oder physikalische Bodenerosionsgleichungen.

Erosionsmodell	Modelltyp	Datenqualität	Abfluss	Abtrag	Sediment	Verifizierung
USLE ^{a)} , RUSLE ^{b)}	Empirisch	Grob - Mittel	k.B.	USLE	SDR	UMP, > 10000 Jahre ^{c)}
MUSLE 75 ^{c)}	Empirisch	(Grob) - Mittel	EXM	USLE	Abfluss	EZP, k.I.
MUSLE 87 ^{d)}	Empirisch	(Grob) - Mittel	k.B.	USLE	Bilanz	EZP, k.I.
CREAMS ^{e)}	Phys./Empirisch	Mittel	SCS CN, SPEZ	USLE	Abfluss	EZP, k.I.
EPIC ^{f)}	Phys./Empirisch	(Grob) - Mittel	SCS CN, RM, SPEZ	USLE	Abfluss	EZP, k.I.
ANSWERS ^{g)}	Phys./Empirisch	Mittel	SPEZ	USLE	Abfluss	EZP, k.I.
AGNPS ^{h)}	Phys./Empirisch	Mittel	SCS CN	USLE	Abfluss	EZP, k.I.
EUROSEM ⁱ⁾	Physikalisch	Hoch	SPEZ	SPEZ	Abfluss	EZP, k.I.
WEPP ^{j)}	Physikalisch	Mittel - Hoch	SCS CN, SPEZ	SPEZ	Abfluss	UMP, > 1000 Jahre ^{k)}
KINEROS ^{k)}	Physikalisch	Mittel	SPEZ	SPEZ	Abfluss	EZP, k.I.
OPUS ^{l)}	Physikalisch	Mittel - Hoch	SPEZ	USLE	Abfluss	EZP, k.I.
SWAT ^{m)}	Empirisch	(Grob) - Mittel	SCS CN, RM, SPEZ	USLE	Abfluss	EZP, k.I.
SWRRB ⁿ⁾	Phys./Empirisch	(Grob) - Mittel	SCS CN, RM	USLE	Abfluss	EZP, k.I.
EROSION 2D/3D ^{o)}	Physikalisch	Mittel - Hoch	SPEZ	SPEZ	Abfluss	EZP, k.I.

Tabelle 3: Denudativ-fluviatile Bodenerosionsmodelle und ihre Eigenschaften in Bezug auf Sedimentfrachtprognosen. Erklärungen, Anmerkungen und Literaturreferenzen finden sich auf der nächsten Seite.

Anmerkungen:

- Grob: Geringe Anforderungen an Eingabeparameter und ihre zeitliche Auflösung (z.B. Klimadaten in monatlicher Auflösung).
- Mittel: Erweiterte Anforderungen an Eingabeparameter, die z.Zt. noch nicht erfüllt werden können (noch keine flächendeckenden GIS Datensätze in dieser Qualität vorhanden) (z.B. 15 minütige Regenmaxima, Flussbreite, Bodenrauigkeit).
- Hoch: Extrem hohe Anforderungen an Eingabeparameter, mit angemessenem Aufwand nicht für größere Gebiete zu gewinnen (z.B. Mikrorelief, Wasserspeicherung über Interzeption).
- k.B.: Keine Berücksichtigung
- k.I.: Keine weitergehenden Informationen bekannt.
- EXM: Bestimmung über externes Modell oder Messung vor Ort, keine Rechenvorschriften in Originaltext definiert.
- SCS CN: Berechnung des Oberflächenabflusses nach der SCS Curve-Number-Methodik, vgl. NDEC (1989, 1999).
- RM: Berechnung des Spitzenabflusses nach der Rational Methodik, vgl. <http://www.brc.tamus.edu/swat/index.html>.
- USLE: Berechnung des Bodenabtrags vor Ort mit der USLE – Methodik, vgl. <http://www.sedlab.olemiss.edu/rusle/document.html>.
- SPEZ: spezielle Berechnungsmethodik, in der Regel mit einem großen Aufwand an genau zu bestimmenden Parametern.
- SDR: Berechnung der Sedimentfracht unter Verwendung des Konzepts der Sediment-Delivery-Ratio.
- Abfluss: Die Berechnung der Sedimentfracht ist eng mit der Berechnung der Abflussmenge verknüpft. Hierzu sind äußerst genaue und zeitlich hochauflösende Daten erforderlich.
- Bilanz: Berechnung der Sedimentfracht über Saldobildung von zu und abgeführtem Material, vgl. HENSEL 1991 und SCHÄUBLE 1999.
- EZP: Überprüfung anhand weniger kleinräumiger Einzelstudien.
- UMP: Überprüfung anhand langjähriger Messwerte bzw. zahlreicher und umfassender Einzelstudien.
- *) : Aufsummierte Messzeiten aller einzelnen Feldversuche (Plotstudien), die bei Gewinnung des Modells verwendet wurden.

Referenzen:

- ^{a)} WISCHMEIER & SMITH 1978; USLE-Datenbasis: <http://topsoil.nserl.purdue.edu/nserlweb/usle/index.htm>
- ^{b)} RENARD et al. 1994; <http://www.sedlab.olemiss.edu/rusle/index.html>
- ^{c)} WILLIAMS (1975, 1977), WILLIMANS & BERNDT 1977
- ^{d)} BORK & SCHRÖDER 1996, HENSEL 1991, BORK & HENSEL 1988
- ^{e)} KNISEL 1980, FOSTER et al. 1980, <http://www3.bae.ncsu.edu/bae473/models/creams.html>
- ^{f)} WILLIAMS 1995; <http://www.brc.tamus.edu/epic/>
- ^{g)} BEASLEY & HUGGINS 1991, BEASLEY et al. 1990
- ^{h)} YOUNG et al. 1987, <http://www.sedlab.olemiss.edu/agnps.html>
- ⁱ⁾ MORGAN et al. 1998, <http://www.silsoe.cranfield.ac.uk/nsri/research/erosion/eurosem.htm>
- ^{j)} USDA (1995a, 1995b), <http://topsoil.nserl.purdue.edu/nserlweb/weppmain/wepp.html>
- ^{k)} WOOLHISER et al. 1990, <http://www.tucson.ars.ag.gov/kineros/>
- ^{l)} SMITH 1992; <http://www.wmuinfo.usda.gov/model/opus.html> ; <http://www.gsf.de/UFIS/ufis/modell59/modell.html>
- ^{m)} NEITSCH et al. 2002, <http://www.brc.tamus.edu/swat/index.html>
- ⁿ⁾ ARNOLD et al. 1990, <http://www.cce.odu.edu/cce/model/swrrbwq.html>
- ^{o)} VON WERNER 1995, http://www.geog.fu-berlin.de/~erosion/manual_e/

Grundsätzlich geeignet zur Simulation der überregionalen Sedimentfracht sind die allgemeinen Sedimentfrachtgleichungen. Sie basieren weder auf kleinräumigen Feldversuchen noch auf einem mathematisch-physikalischen Formelgerüst, sondern sind als statistische Modellgleichungen allein aus Regressionsanalysen hervorgegangen, bei denen die erosionsrelevanten Eigenschaften der Einzugsgebiete und die gemessenen Sedimentfrachten analysiert wurden. Die grundlegende Vorgehensweise zur Erstellung einer allgemeinen Sedimentfrachtgleichung wird in Abb. 7 illustriert und umfasst folgende Schritte:

1. Bestimmung der mobilisierten Sedimentfracht in verschiedenen Einzugsgebieten durch direkte Messungen in Flüssen oder über indirekte Methoden (vgl. Kap. 4.1).
2. Ermittlung der geoökologischen Eigenschaften der Einzugsgebiete anhand analogen Datenmaterials (Lexika, thematische Karten, Sachartikel) oder mit digitalen Datensätzen in einem GIS (digitale Karten, räumliche Datenbanken). Hierbei sind alle geoökologischen Eigenschaften wichtig, die in einer Beziehung zur Bodenerosion und zum Sedimenttransport stehen, wie

- z.B. die maximale und mittlere Niederschlagsmenge, verschiedene Bodeneigenschaften (Schluffanteil, C-Gehalt, Bodendurchlässigkeit), Eigenschaften der Pflanzendecke, das Relief, etc. (vgl. Tab. 7 und Anhang C).
3. Übertragung der ermittelten Daten in eine Auswertungstabelle (vgl. Anhang B) und anschließende statistische Analyse mit der Sedimentfracht als abhängiger Variablen und den geoökologischen Eigenschaften der Einzugsgebiete als unabhängigen Variablen (vgl. Lehrbücher zur Statistik und multivariaten Analyseverfahren: BACKHAUS et al. 2000, SWAN & SANDILANDS 1995, BAHRENBURG et al. 1992).

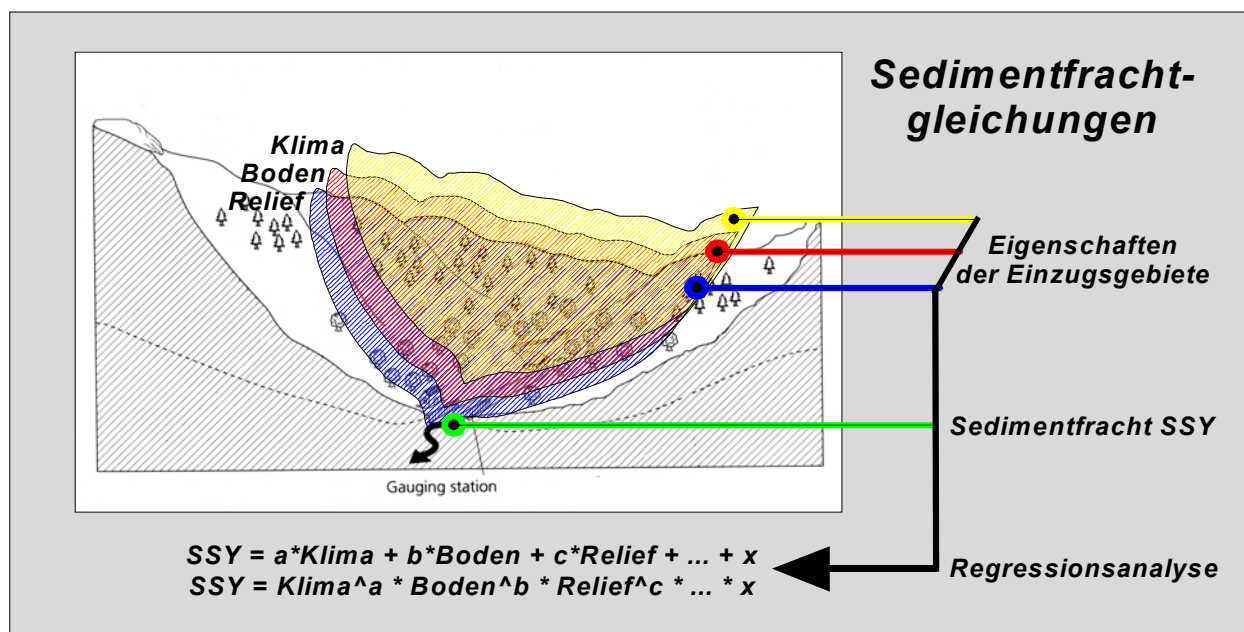


Abbildung 7: Grundprinzipien allgemeiner Sedimentfrachtmodelle. Entstehung in zwei aufeinanderfolgenden Schritten: Ermittlung mittlerer Eigenschaften der Einzugsgebiete mit nachfolgender Regressionsanalyse.

Das Resultat aller drei Schritte ist eine empirische Modellformel, welche die quantitative Beziehung zwischen den geoökologischen Eigenschaften in einem Einzugsgebiet und der daraus resultierenden Sedimentfracht beschreibt. Die Grundstruktur der Modellformel (1) variiert je nachdem wie das Modell zu Beginn der Regressionsanalyse formuliert wurde. Generell sind nur zwei Typen von Gleichungen von Bedeutung, und zwar lineare (2) und exponentielle Modellformeln (3), die sich wie folgt darstellen lassen:

$$\text{SSY} = \text{Funktion} (\text{Klima, Relief, Boden, Vegetation, Mensch, Geologie}) \quad (1)$$

$$\text{SSY} = a * \text{Parameter_1} + b * \text{Parameter_2} + \dots + z * \text{Parameter_n} + x \quad (2)$$

$$\text{SSY} = \text{Parameter_1}^a * \text{Parameter_2}^b * \dots * \text{Parameter_n}^z * x \quad (3)$$

Lineare und exponentielle Modellgleichungen sind mit gängigen Statistikprogrammen wie SPSS, Statistica oder Winstat relativ einfach zu ermitteln, lineare Gleichungen ohne besondere Zusatzschritte, exponentielle nach einer zuvor erfolgten Linearisierung der einzelnen Parameter (z.B. durch eine Logarithmierung, vgl. dazu u.a. BACKHAUS et al. 2000, BÜHL & ZÖFEL 2000). Modelle mit komplexeren mathematischen Verknüpfungen sind dagegen nur über iterative Simulationsroutinen oder umfangreiche mathematische Ableitungen möglich (mündliche Auskunft von PD Dr. R. Lidl, Universität Tübingen, November 2003), nicht aber mit den standardisierten Funktionen herkömmlicher Statistikprogramme. Sie spielen in der Literatur bisher keine Rolle und werden in dieser Arbeit nicht weiter verfolgt. Bedeutender als eine möglichst komplexe Berechnungsformel sind ohnehin verlässliche Daten zur Sedimentfracht und den erosionsrelevanten Eigenschaften in einem Einzugsgebiet. Werden diese aus irgendeinem Grunde nicht genau oder nur unvollständig erfasst, so wird die resultierende Sedimentfrachtformel in jedem Fall fehlerhaft, unabhängig mit welcher Berechnungsmethodik sie im Detail ermittelt wurde (z.B. durch multiple Regressionsberechnung, Faktorenanalyse oder pfadanalytische Verfahren wie den LISREL-Ansatz; vgl. STATSOFT 2002, BACKHAUS et al. 2000, SWAN & SANDILANDS 1995). Die sich daraus ergebenden Folgen und weitere grundlegende Probleme bei der Berechnung von allgemeinen Sedimentfrachtformeln werden in Kap. 2.3 ausführlich behandelt.

2.2 Überregionale Sedimentfrachtmodelle

Zur Erforschung der Zusammenhänge zwischen Sedimentfracht und den erosionsrelevanten Steuerfaktoren wurden viele Studien unternommen, sowohl auf regionaler wie auch auf globaler Ebene. Teilweise konnten quantitative Modellformeln entwickelt werden (d.h. allgemeine Sedimentfrachtgleichungen nach den Prinzipien von Abb. 7), größtenteils beschränkten sich die Autoren nur auf die Abschätzung der relativen Bedeutung von einzelnen Steuerfaktoren, d.h. den Korrelationen zur Sedimentfracht wie z.B. bei JANSSON (1988) in einer umfangreichen globalen Untersuchung. Eine Übersicht von regionalen und globalen Arbeiten findet sich in Tab. 4.

Maßstab	Autor	Allgemein	Quantitativ
Global	PECKHAM 2003	X	
	MOREHEAD 2003	X	
	DEARING & JONES 2003	X	
	HARRISON 2000		X
	HOOKE 2000	X	
	HAY 1998 *)		X
	LUDWIG & PROBST (1998, 1996)		X
	HOVIUS 1998		X
	MULDER & SYVITSKI 1996		X
	DEDKOV & MOZZHERIN (1996,1984)	X	
	SUMMERFIELD & HULTON 1994	X	
	MILLIMAN & SYVITSKI 1992		X
	PHILLIPS 1990	X	
	PINET & SOURIAU 1988		X
	JANSSON 1988	X	
	OHMORI 1983	X	
	JANSEN & PAINTER 1974		X
	WILSON 1973	X	
	AHNERT 1970		X
	HOLEMAN 1968	X	
	FOURNIER 1960		X
	LANGBEIN & SCHUMM 1958		X
Regional	BOBROVITSKAYA et al. (2003, 1997)		X
	MONTGOMMERY & BRANDON 2002		X
	MIXON 2002		X
	LEWKOWICZ & KOKELJ 2002	X	
	VERSTRAETEN & POESEN 2001		X
	VAN ROMPAEY et al. 2001		X
	SMITH et al. 2001	X	
	BOGENA 2001	X	
	SYVITSKI et al. 2000		X
	DEDKOV & MOZZHERIN 1997	X	
	PAZZAGLIA & BRANDON 1996		X
	RENWICK 1996	X	
	COLLINS 1996	X	
	KOTHYARI 1996		X
	GURNELL et al. 1996		X
	BOGEN 1995	X	
	ROOSEBOOM et al. 1992		X
	JINZE 1991	X	
	CHURCH & SLAYMAKER 1989		X
	HAY et al. 1987		X
	ICHIM & RADOANE 1987		X
	YAIR & ENZEL 1987	X	
	MEADE & PARKER 1985	X	
	SCHMIDT 1984 *)		X
	INBAR 1982	X	
	JUDSON & RITTER 1964	X	
	FLAXMANN 1966		X
	SCHUMM 1963		X

Tabelle 4: Sedimentfrachtmodelle und Untersuchungen über Steuerfaktoren der Sedimentfracht. Allgemein = Allgemeine oder qualitative Aspekte, keine geeignete Modellformeln zur praktischen Simulation der Sedimentfracht in überregionalen Einzugsgebieten. Quantitativ = Quantitative Modellformel(n), die zur praktischen Simulation der Sedimentfracht geeignet sind. *) Übersicht über Sedimentfrachtmodelle anderer Autoren.

Von allen Autoren werden nur diejenigen weiter berücksichtigt, welche eine quantitative Sedimentfrachtformel entwickelt haben, die im überregionalen und globalen Maßstabsbereich gilt, auf Sedimentfrachtmessungen in größeren Einzugsgebieten beruht und in der Literatur häufig Verwendung findet (= insgesamt 9 Autoren). Dazu zählen die Arbeiten von FOURNIER (1960), AHNERT (1970), JANSEN & PAINTER (1974), PINET & SOURIAU (1988), MILLIMAN & MEADE

(1992), MULDER & SYVITSKI (1996), HOVIUS (1998), LUDWIG & PROBST (1996, 1998) und HARRISON (2000). Häufig zitierte aber nicht quantitative Studien, z.B. von JANSSON (1988), SUMMERFIELD & HULTON (1994) oder Untersuchungen von nur regionaler Gültigkeit, z.B. von ROOSEBOOM et al. (1992) oder RENWICK (1996) werden nicht weiter verfolgt. Gleiches gilt für rein konzeptionelle Arbeiten zum Sedimenttransport wie z.B. denjenigen von PECKHAM (2003) und MOREHEAD (2003). Sie formulieren sehr spezielle Gleichungen und eignen sich daher nicht zur praktischen Simulation der Sedimentfracht in größeren Einzugsgebieten.

2.2.1 Korrelationen und einfache Modellgleichungen

Die in der Literatur am weitesten verbreitete Methoden zur Analyse der überregionalen Sedimentfracht sind Korrelationsanalysen und univariate Regressionsberechnungen. In beiden Fällen wird versucht, die Zusammenhänge zwischen der Sedimentfracht und dem wichtigsten erosionsrelevanten Einflussfaktor zu ermitteln, im Fall der Korrelationsanalyse auf qualitative, im Fall der univariaten Regressionsanalyse auf quantitative Weise. Bekannte Arbeiten sind z.B. (Tab. 4 und 5; Anhang B):

1. Studien von LANGBEIN & SCHUMM (1958) und OHIMORI (1983), welche die Rolle des Jahresniederschlags als entscheidenden Einflussfaktor der Sedimentfracht betonen. Im Gegensatz zu den zeichnerisch ermittelten Zusammenhängen von OHIMORI (1983), haben LANGBEIN & SCHUMM (1958) zwei separate Gleichungen entwickelt, mit denen sich die Sedimentfracht auch tatsächlich berechnen lässt.
2. AHNERT (1970), der in der Geländerauhigkeit (= lokales Relief) den maßgeblichen Einflussfaktor der Sedimentfracht sieht. Die von ihm erstellte univariate Regressionsgleichung spielt auch heute immer noch eine bedeutende Rolle (MONTGOMERY & BRANDON 2002 und SLINGERLAND et al. 1994). Sie ist in Tab. 5 mit ihren wichtigsten Kennwerten dargestellt.
3. PINET & SOURIAU (1988), welche die durchschnittliche Höhe in einem Einzugsgebiet als maßgebenden Einflussfaktor benennen und zusätzlich zwischen alten und jungen Orogenen unterscheiden (älter oder jünger als 250 Mio. Jahre). Sie entwickelten zwei Gleichungen mit unterschiedlichem Geltungsbereich.
4. MILLIMAN & SYVITSKI (1992) und HOLEMAN (1968), die in der Größe des Einzugsgebiets den entscheidenden Einflussfaktor sehen. Im Gegensatz zur rein qualitativen Studie von HOLE-

MAN (1968) haben MILLIMAN & SYVITSKI (1992) mehrere quantitative Modellgleichungen erstellt, bei denen die Gewichtung der Einzugsgebietsgröße in Abhängigkeit von der mittleren Höhe variiert.

5. JANSSON (1988), JUDSON & RITTER (1964) und SUMMERFIELD & HULTON (1994), bei denen die mittlere Abflussmenge die maßgebliche Größe ist. Zu dieser zählt nach SUMMERFIELD & HULTON (1994) außerdem die Geländerauhigkeit nach AHNERT (1970) und Höhe des Einzugsgebiets. In allen 3 Studien wurden keine quantitativen Modelformeln erstellt, sondern lediglich einfache Korrelationen zur Sedimentfracht ermittelt.

Zusammenfassende Darstellungen über die relative Rolle der einzelnen Steuerfaktoren und unter Berücksichtigung weiterer Autoren finden sich bei SYVITSKY (2003), EINSELE (2000), HAY (1998), ALLEN (1997) und GOUDIE (1995).

2.2.2 Multivariate Regressionsmodelle

Aufgrund der zunehmenden Verfügbarkeit an wichtigen Geodaten (digitale Höhenmodelle, Daten zur Sedimentfracht z.B. in FRASER et al. 2002 und MILLIMAN et al. 1995) und der weiten Verbreitung leicht zu bedienender Statistikprogramme, wurden in den letzten Jahrzehnten zunehmend komplexere Modelle erstellt. Neben einer Vielzahl regionaler Modellgleichungen, sind vor allem die globalen Modellgleichungen von insgesamt neun Autoren bedeutsam. Sie sind allesamt multivariate Regressionsmodelle, die jeweils mehrere Steuerfaktoren berücksichtigen und so die Qualität einer Sedimentfrachtmodellierung beträchtlich steigern (Tab. 5 und Anhang B).

Die erste bedeutende multivariate Regressionsgleichung stammt von FOURNIER (1960). In einer umfangreichen Untersuchung ermittelte er mit der saisonalen Niederschlagsvariabilität (= Quadrierter Niederschlag des regenreichsten Monats / Jahresniederschlag), der mittleren Höhe und dem durchschnittlichen Gefälle die seiner Meinung nach entscheidenden Steuerfaktoren der Sedimentfracht. Die gewonnene Formel besteht aus 3 Gliedern, die in linearer Weise miteinander verknüpft sind. Der von ihm eingeführte Niederschlagsfaktor spielt in gleicher oder abgewandelter Form bei vielen späteren Untersuchungen eine wichtige Rolle (z.B. bei SUN et al. 2003, LUDWIG & PROBST 1998, RENARD & FREIMUND 1994, CEC 1992). Fournier macht jedoch keinerlei Angaben über die statistische Güte der ermittelten Regressionsgleichung (Bestimmtheits-

maß, Signifikanztests, etc.), was die praktische Anwendbarkeit seiner Formel beeinträchtigt. Im Gegensatz dazu geben JANSEN & PAINTER (1974) das Bestimmtheitsmaß r^2 ihrer Regressionsformel an. Sie halten insgesamt sieben Parameter als Steuerfaktoren der Sedimentfracht für bedeutsam: den Oberflächenabfluss, die Größe des Einzugsgebiets, die mittlere Höhe, der Jahresniederschlag, die Temperatur, und zwei eigens entworfene Indizes, mit denen die erosionsrelevanten Eigenschaften der Vegetation und der Gesteinsschichten numerisch ausgedrückt werden.

Mit der globalen Sedimentfrachtformel von MULDER & SYVITSKI (1996) (Tab. 5) beginnt eine neue Generation von Modellgleichungen, die sich vor allem durch ein verbessertes Datenmaterial und einer größeren Anzahl an Untersuchungsgebieten auszeichnet. So verwenden beide Autoren eine von MILLIMAN & SYVITSKI (1992) erstellte Datenbank mit Sedimentfrachtmessungen aus insgesamt 279 Einzugsgebieten. Diese Datenbank ist insofern bemerkenswert, als in ihr auch mittelskalige Einzugsgebiete von wenigen 1000 km² enthalten sind. Die von MULDER & SYVITSKI (1996) publizierte Sedimentfrachtgleichung ist reliefbetont und berücksichtigt nur die Größe des Einzugsgebiets und die maximale Höhe. Das angegebene Bestimmtheitsmaß von 0,67 ist in Anbetracht der vielen untersuchten Einzugsgebiete überaus hoch, was jedoch v.a. durch die Verwendung der Gesamtfracht SSL (= Sediment Load in t/a) verursacht wird. Diese Variable wächst naturgemäß mit zunehmendem Einzugsgebiet stark an. Insofern ist die Güte der Formel von MULDER & SYVITSKI (1996) irreführend⁶.

Den gegenwärtigen Stand der Forschung auf dem Gebiet der global gültigen Sedimentfrachtgleichungen markieren die Arbeiten von HOVIUS (1998), LUDWIG & PROBST (1996, 1998) und HARRISON (2000). Sie basieren auf aktuellen Geo- und Messdaten und sind darüber hinaus sogar teilweise unter vollständiger Nutzung von Geoinformationssystemen und digitalem Datenmaterial erstellt worden, z.B. das Modell von LUDWIG & PROBST (1996, 1998). LUDWIG & PROBST (1996, 1998) verwenden als Steuerfaktoren den Oberflächenabfluss, die mittlere Geländeneigung und die saisonale Niederschlagsvariabilität. Obwohl ihre Modellformel multivariat erscheint, ist sie von ihrem Charakter her jedoch eigentlich univariat. Der Term $Q_{\text{spec}} * S_{\text{rad}} * P_{\text{Four}}$ (vgl. Tab. 5) wird als eine einzelne komplexe Größe behandelt, da die einzelnen Parameter nicht separat gewichtet werden. Als Bestimmtheitsmaß geben die Autoren einen Wert von 0,83 an.

⁶ In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass in der verwendeten Datenbank vor allem Einzugsgebiete enthalten sind, die sich in ihrer Größe stark voneinander unterscheiden, weniger stark dagegen bei anderen Steuervariablen. Auf diese Weise sind hohe Korrelationen zwischen der Sedimentfracht SSL (t/a) und der Einzugsgebietsgröße eine logische Folge.

Im Gegensatz dazu kommen die kurz danach entstandenen Modellgleichungen von HOVIUS (1998) und HARRISON (2000) auf geringere Bestimmtheitsmaße von 0,49 bzw. 0,55. Sie basieren beide auf dem selben Datenmaterial, der „Oxford Global Sediment Flux Database“ (HOVIUS 1998, ALLEN 1997). Als Steuerfaktoren werden im Modell von HOVIUS (1998) insgesamt fünf Parameter berücksichtigt: die Größe des Einzugsgebiets, seine maximale Höhe, die Jahrestemperatur und ihre maximale Differenz sowie der Oberflächenabfluss.

Auch HARRISON (2000) verwendet fünf verschiedene Parameter, die sich allerdings von HOVIUS (1998) unterscheiden. So sieht HARRISON (2000) in der Geländeneigung und der Länge der Einzugsgebiete, dem maximalen Oberflächenabfluss, der Jahrestemperatur und ihrer maximalen Differenz die entscheidenden Einflussfaktoren. Einen entscheidenden Vorteil gegenüber der Gleichung von HOVIUS (1998) ergibt sich jedoch nicht, da die leichte statistische Verbesserung (r^2 von 0,55 gegenüber 0,49) durch den Ausschluss von Einzugsgebieten mit der größten Abweichung erzielt worden ist.

Autor	Modellformel	Korrelation
Langbein & Schumm (1958)	$SSY = 10 P_{inch}^{2,3} / (1 + 0,0007 P_{inch}^{3,33})$ [*KonAD] (Flüsse) $SSY = 20 P_{inch}^{2,3} / (1 + 0,0007 P_{inch}^{3,33})$ [*KonAD] (Dämme)	k.A.
Fournier (1960)	$\log SSY = 2,65 \log(p_{max}^2/P) + 0,46 \log H * \tan S - 1,56$	k.A.
Ahnert (1970)	$SSY = 1,535 \cdot 10^{-4} H_{loc} - 0,01088$ [*KonDS]	$r^2 = 0,96$
Jansen & Painter (1974)	$\log SSY = 0,1 \log Q_{spec} - 0,314 \log A + 0,75 \log H + 1,104 \log P$ $+ 0,368 \log T + 0,786 \log LI + 2,324 \log VI - 2,032$	$r^2 = 0,58$
Ohmori (1983)	SSY = ?, (handgezeichnete Kurve für Zusammenhang zwischen Niederschlag und Denudation; keine Modellformel)	k.A.
Jansson (1988)	SSY = ?, (keine signifikante Formel, qualitative Bewertung)	k.A.
Pinet & Souriau (1988)	$SSY = 419 \cdot 10^{-6} H - 0,245$ [*KonDS] (junge Orogene) $SSY = 61 \cdot 10^{-6} H$ [*KonDS] (alte Orogene)	$r^2 = 0,95$ $r^2 = 0,87$
Milliman & Syvitski (1992)	$SSY = c \cdot A^f$ (Formeln für verschiedene Reliefhöhen mit unterschiedlichen Gewichtungen nach dem Muster: $SSY = c \cdot A^f$)	$r^2 = 0,32 - 0,84$
Summerfield & Hulton (1994)	SSY = ?, (Korrelation mit H_{max} , H_{loc} und Q , keine Modellformel)	$r^2 = 0,2 - 0,64$
Mulder & Syvitski (1996)	$\log Ld = 0,4058 \log A + 1,2789 \log H_{max} - 3,679$	$r^2 = 0,67$
Hovius (1998)	$\ln SSY = -0,416 \ln A + 4,26 \cdot 10^{-4} H_{max} + 0,15 T + 0,095 T_{range}$ $+ 0,0015 Q_{spec} + 3,585$	$r^2 = 0,49$
Ludwig & Probst (1996, 1998)	$SSY = 0,02 * Q_{spec} * S_{rad} * P_{Four}$	$r^2 = 0,83$
Harrison (2000)	$\ln SSY = 1,2 \ln S_b + 0,5 \ln L_b + 7,521 \cdot 10^{-4} Q_{max} + 0,151 T$ $+ 0,085 T_{range} - 5,66$	$r^2 = 0,55$

Tabelle 5: Globale Modelle und quantitative Untersuchungen zur Sedimentfracht. Korrelationskoeffizienten nach Angaben der Autoren. Erklärungen zu den Variablen finden sich auf der nächsten Seite.

Variablen:

SSY = Sedimentfracht in $t/km^2/a$, A = Einzugsgebiet in km^2 , Ld = Sedimentfracht in kg/s , S = mittlere Neigung in $^\circ$, S_{rad} = mittlere Neigung in rad, S_b = eigener Neigungsfaktor, S_c = Flussneigung in m/km , Q_{spec} = mittlerer spezifischer Abfluss in mm , Q = mittlerer Abfluß in m^3/s ; Q_{max} = maximaler Abfluß in m^3/s , T = Jahrestemperatur in $^\circ C$, T_{range} = Temperaturvariabilität in $^\circ C$, H = mittlere Höhe in m , H_{max} = maximale Höhe in m , H_{loc} = lokales Relief in m , L_b = Länge des Einzugsgebiets in km , p_{max} = maximaler Monatsniederschlag in mm , P = Jahresniederschlag in mm bzw. in $inch$ (P_{inch}), P_{Four} = spezieller Erosivitätsindex des Niederschlags in mm , LI = lithologischer Erodibilitätsindex, VI = Index für die Schutzwirkung der Vegetation, c,f = spezifische Regressionskoeffizienten, KonDS = 2500 (Konversionsfaktor zur Umrechnung der Denudation in $m/1000a$ nach SSY in $t/km^2/a$, angenommene Dichte = $2500 kg/m^3$), KonAD = 2,59 (Konversionsfaktor zur Umrechnung von SSY in $t/mile^2/a$ nach SSY in $t/km^2/a$).

2.3 Probleme bestehender Modellgleichungen

Die bedeutenden globalen Modellgleichungen, welche im vorigen Abschnitt skizziert wurden (Tab. 5 und Anhang B), lassen sich in Abhängigkeit von den Steuerfaktoren in drei grundsätzlich verschiedene Gruppen unterteilen:

- Reliefbezogene Modelle, hauptsächlich mit den Steuerfaktoren Neigung und Größe des Einzugsgebiets (z.B. MULDER & SYVITSKY 1996, PINET & SOURIAU 1988, AHNERT 1970),
- Klimabezogene Modelle, hauptsächlich mit den Steuerfaktoren Niederschlagsmenge und Intensität (z.B. FOURNIER 1960, LANGBEIN & SCHUMM 1958),
- Gemischte Modelle (z.B. HARRISON 2000, LUDWIG & PROBST 1998, HOVIUS 1998).

Die Existenz grundsätzlich unterschiedlicher Modellgleichungen zeigt die eingeschränkte Anwendbarkeit und mangelnde Zuverlässigkeit. Diese wird bei WALLING (1996), ADAMS et al. (1996) und STOCKING (1987) auf anschauliche Weise thematisiert, unter anderem am Beispiel Afrikas (Abb. 8). Nach dem Modell von FOURNIER (1960) treten die größten Sedimentfrachten Afrikas in den wechselfeuchten Tropen auf, mit Werten von über $1000 t/km^2/a$. Im Gegensatz dazu werden nach DEDKOV & MOZZHERIN (1984) maximal $250 t/km^2/a$ erreicht. Zwischen beiden Extremen bewegen sich die Sedimentfrachten nach WALLING (1984). Neben den starken absoluten Unterschieden ist auch die räumliche Verteilung nicht deckungsgleich. So treten bei FOURNIER (1960) die maximalen Sedimentausträge im äußersten Westen auf, bei DEDKOV & MOZZHERIN (1984) und WALLING (1984) dagegen im Norden (Marokko und Algerien) und Südosten Afrikas (Tansania, Kenia, etc.).

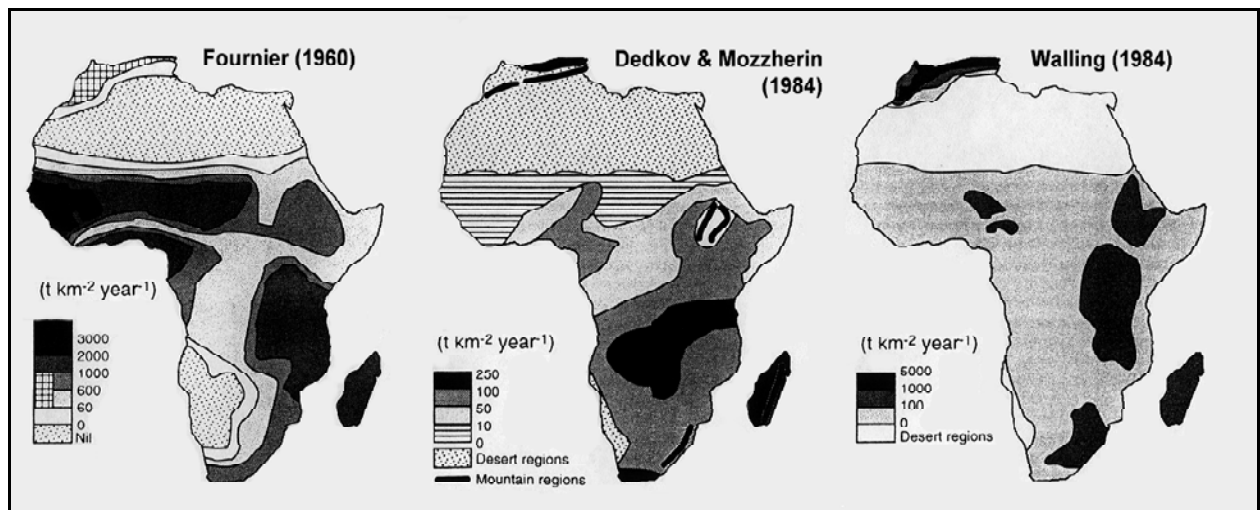


Abbildung 8: Sedimentfracht nach verschiedenen Autoren am Beispiel Afrikas. Zeichnerische Darstellungen bei WALLING 1996, ADAMS et al. 1996 und STOCKING 1987.

Noch deutlicher als in Abb. 8 zeigen sich die Unterschiede, wenn die Sedimentfrachten zellengenau berechnet und nicht mehr zeichnerisch generalisiert dargestellt werden. In einer eigenen Vergleichsstudie wurden dazu die Modelle von AHNERT (1970), LUDWIG & PROBST (1998) und HOVIUS (1998)⁷ mit GIS und hochauflösendem digitalen Datenmaterial umgesetzt, wie zuvor ebenfalls am Beispiel Afrikas (Abb. 9). Nach dem Modell von LUDWIG & PROBST (1998) beträgt die mittlere Sedimentfracht Afrikas danach $5 \text{ t/km}^2/\text{a}$, nach HOVIUS (1998) $351 \text{ t/km}^2/\text{a}$ und nach dem Modell von AHNERT (1970) $77 \text{ t/km}^2/\text{a}$. Der gemessene Sedimentausttrag liegt bei $35 \text{ t/km}^2/\text{a}$ (flächengewichteter Mittelwert unter Verwendung aller afrikanischen Messstellen in der globalen Sedimentfrachtdatenbank, insgesamt 147 Einzugsgebiete mit einer Abdeckung von 50 % der Gesamtfläche Afrikas, vgl. Anhang D).

Neben den absoluten Zahlen sind auch in diesem Fall die räumlichen Verteilungsmuster aufschlussreich. So simuliert das Modell von AHNERT (1970) die höchsten Sedimentausträge dort, wo Gebirge mit einem starken lokalen Relief vorliegen. Teilweise werden dort tatsächlich hohe Sedimentfrachten gemessen (Atlasgebirge im Norden oder Drakengebirge im Süden Afrikas), oft findet aber wegen mangelnder Niederschläge überhaupt kein Sedimentausttrag statt (Ahaggar- und Tibestigebirge in der Sahara), was durch die Reliefbezogenheit überhaupt nicht berücksichtigt wird. Ebenso wenig entsprechen die Modelle von LUDWIG & PROBST (1996, 1998) und HO-

⁷ Die Modellgleichung von AHNERT (1970) wurde ausgewählt, weil sie auch heute noch in der Literatur und bei Beckensimulationsprogrammen eine große Rolle spielt (z.B. bei SLINGERLAND et al. 1994), die Gleichungen von LUDWIG & PROBST (1996, 1998) und HOVIUS (1998), weil sie mit den z.Zt. aktuellsten und umfassendsten Datenmaterialien gewonnen wurden, bei LUDWIG & PROBST (1996, 1998) als bisher einziger globaler Modellformel sogar unter Nutzung von GIS.

VIUS (1998) in jedem Fall der Realität, allerdings aus anderen Gründen. Beim Hovius-Modell werden in (semi)ariden Steppen- und Wüstengebieten weit überhöhte Sedimentfrachten simuliert, eine zwangsläufige Folge der extremen Betonung von Temperatur und Relief und der geringen Gewichtung des niederschlagsbezogenen Parameters Q_{spec} (vgl. Tab. 5). Folglich sind mit dem Hovius-Modell die Sedimentfrachten immer dort unrealistisch hoch, wo hohe Temperaturen und ein ausgeprägtes Relief nicht von einem starken Oberflächenabfluss begleitet werden. Hin- gegen ist das Modell von LUDWIG & PROBST (1996, 1998) sehr abflussbetont (spezifischer Abfluss, Neigung und saisonale Niederschlagsvariabilität) und bildet daher die regionale Verteilung der Sedimentfrachten in Afrika vergleichsweise gut ab. Allerdings bestehen auch hier z.T. gravierende Abweichungen von den absoluten Werten. Die hohen Austräge in den Maghrebstaaten Nordafrikas werden nicht erfasst und die Sedimentfracht des Niger fällt viel zu hoch aus.

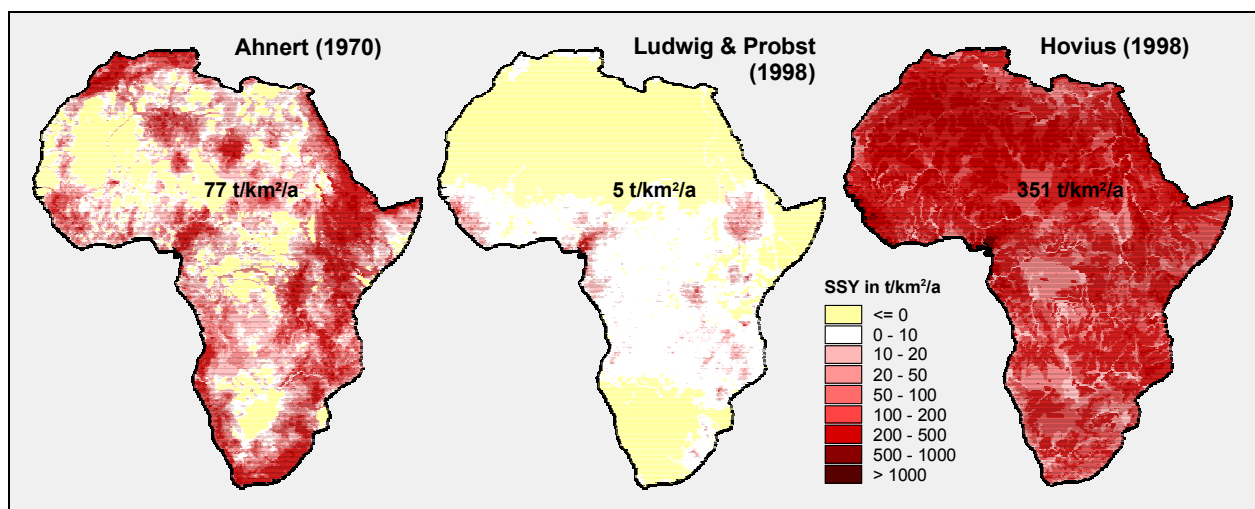


Abbildung 9: Sedimentfracht nach verschiedenen Modellen am Beispiel Afrikas. Räumliche Verteilung und Durchschnittswerte. Eigene GIS-gestützte Berechnungen in einer Auflösung von 1*1 km. Verwendung der Geodaten des IWMI (World Water & Climate Atlas), USGS (HYDRO1k - Höhenmodell) und GRDC (Composite Runoff Fields V 1.0), vgl. Anhang A.

Die exemplarisch angeführten Beispiele zeigen die typischen Unzulänglichkeiten der globalen Modellgleichungen. Regional zutreffenden Angaben stehen Gebiete gegenüber, in welchen die Sedimentfracht vollkommen falsch eingeschätzt wird. Wie gering die Verlässlichkeit insgesamt ist, zeigen Korrelationsanalysen, bei denen Messwerte und simulierte Sedimentfrachten zueinander in Beziehung gesetzt werden (Abb. 10, links). Die Messwerte (SSY_{val}) stammen aus der neu erstellten globalen Sedimentfrachtdatenbank GLOSSY (vgl. Kap. 4.1 und Anhang D), die simulierten Sedimentfrachten (SSY_{sim}) aus eigenen Berechnungen, bei denen die jeweiligen Modellgleichungen exakt mit den Geodaten des neu aufgebauten globalen GIS umgesetzt worden sind

(vgl. Kap. 4.1 und Anhang B)⁸. Die äußerst geringen Korrelationen und starken Streuungen zwischen den simulierten und den tatsächlich gemessenen Werten (vgl. Abb. 10, rechts: Modell von AHNERT (1970) mit $r^2 = 0,14$) zeigen, dass die bestehenden Sedimentfrachtmodelle nicht nur in bestimmten Regionen, sondern insgesamt fragwürdig sind. Die Gründe und Ursachen dafür werden im folgenden Abschnitt erläutert.

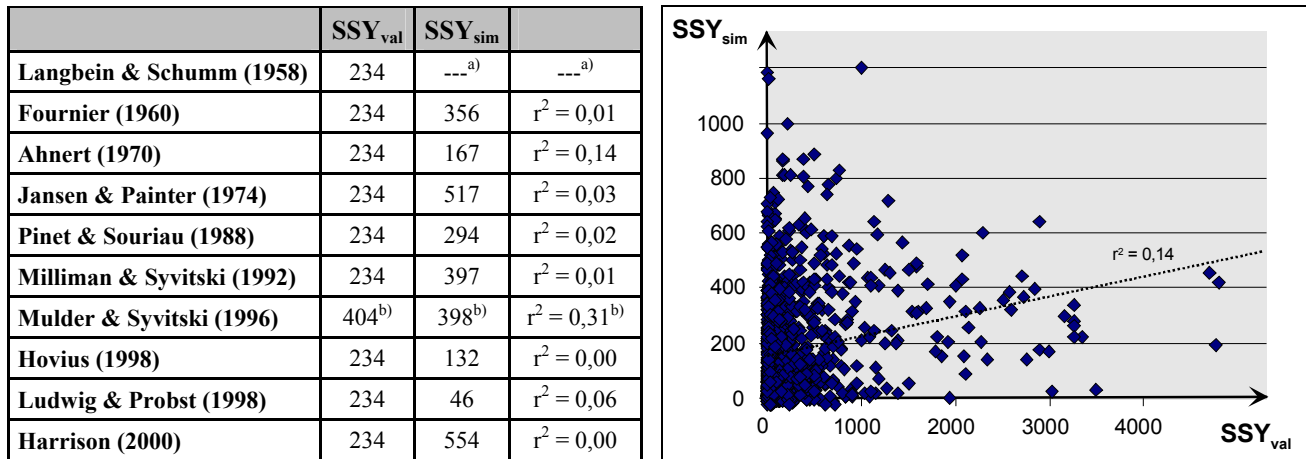


Abbildung 10: Aussagekraft globaler Sedimentfrachtmodelle. Links: Globale Sedimentfrachtmodelle im Vergleich zu den Messwerten der globalen Sedimentfrachtdatenbank GLOSSY. Verwendete Daten und Modellformeln vgl. Anhang A, B und D. Rechts: Streudiagramm von simulierten und gemessenen Werten, dargestellt am Beispiel des Modells von AHNERT (1970). Legende: SSY_{val} = mittlere Sedimentfracht in t/km²/a, Messwerte aus der globalen Sedimentfrachtdatenbank [1515 Einzugsgebiete]; SSY_{sim} = mittlere Sedimentfracht in t/km²/a, simuliert nach dem jeweiligen Modell [1515 Einzugsgebiete]. r^2 = Korrelation zwischen gemessenen und simulierten Werten; ^{a)} keine Berechnung, da separate Gleichungen für Staudämme und Flussstationen (globale Datenbanken unterscheiden nicht zwischen Staudammablagerungen und Suspensionsmessungen an Flüssen). ^{b)} SSL in t/a anstatt SSY in t/km²/a.

2.3.1 Sediment-, Geodaten und Größe der Einzugsgebiete

Ein wichtiger Grund für mangelnde Zuverlässigkeit bisher erstellter globaler Sedimentfrachtgleichungen liegt in den verwendeten Geo- und Messdaten. Sedimentfrachtmodelle basieren auf einem entscheidenden Grundprinzip: Sie versuchen die Variabilität der Suspensionsfrachten anhand der Variabilität der Eigenschaften der Einzugsgebiete zu erklären (Abb. 7):

$$\text{Variabilität SSY} \Leftrightarrow \text{Variabilität [Steuerfaktoren]} + \text{Variabilität [Fehlerquellen]} \quad (4)$$

⁸ Zur Umsetzung einer Modellgleichung wurden immer drei aufeinander folgende Schritte durchgeführt: 1. Ermittlung der jeweiligen Parameter und ihrer Durchschnittswerte in jedem Einzugsgebiet des globalen GIS, 2. Übertragung in eine Auswertungstabelle (vgl. Abb. 38 und Anhang C), 3. Errechnung der Sedimentfracht mit der jeweiligen Formel.

⁹ Fehlerquellen sind Parameter, Messfehler und sonstige Größen, die einen signifikanten Einfluss auf die Sedimentfracht haben, aber nicht bestimmt wurden oder werden können. Zu ihnen gehören zu kurze Messzeiten, nicht berücksichtigte Parameter, etc.

Verlässliche Ergebnisse sind nur möglich, wenn eine Veränderung der erosionsrelevanten Parameter zu einer deutlichen Veränderung der gemessenen Sedimentfracht führt. Liegen die Fehlerquellen dagegen höher, dann verschwindet ein direkter Bezug. Die Art, Anzahl und Gewichtung der Steuerfaktoren schwankt dann in scheinbar zufälliger Weise in Abhängigkeit von den gerade selektierten Einzugsgebieten und dem verfügbaren Datenmaterial. Es entsteht eine Modellformel, die lediglich einen nominellen Zusammenhang zwischen der Sedimentfracht und z.T. beliebigen Steuerfaktoren herstellt. Funktionale Zusammenhänge werden dadurch bis zur Unkenntlichkeit überlagert. Derartige Modelle sind reine Best-Fit Lösungen¹⁰, die nicht auf andere Einzugsgebiete übertragbar sind.

Die Überlagerung der funktionaler Zusammenhänge ist ein charakteristisches Kennzeichen aller bestehenden globalen Modellgleichungen. Neben nicht berücksichtigten Parametern (Kap. 2.3.2 – 2.3.5) spielen Mängel in Qualität, Quantität und Repräsentativität der Ausgangsdaten eine wichtige Rolle. Dazu gehören:

1. Zahl der Einzugsgebiete

Die meisten Autoren berücksichtigen weniger als 90 Einzugsgebiete (Tab. 6). Für verlässliche Modelle reicht dies nicht aus, da bei einer statistischen Untersuchung die Zahl der Fälle mindestens 10-20 mal höher sein muss, als die Zahl der verwendeten Variablen (STATSOFT 2002). Ansonsten werden die Regressionsgeraden sehr instabil. Zudem treten bei einer geringen Zahl an Einzugsgebieten regionale Besonderheiten stärker in den Vordergrund und überlagern den Einfluss der Steuerfaktoren sehr leicht.

2. Größe der Einzugsgebiete

Die verwendeten Einzugsgebiete haben im Durchschnitt eine Fläche zwischen 300.000 und 600.000 km² (Tab. 6). Dies wirft zwei Probleme auf. Erstens unterscheiden sich Einzugsgebiete in dieser Größenordnung nur noch relativ schwach voneinander. Der relative Einfluss von Fehlerquellen vergrößert sich dadurch stark. Zweitens stammt ein Großteil der Sedimentfracht aus Gebieten im Oberlauf, mit einem Flächenanteil von nur wenigen Prozent an der Gesamtfläche des Einzugsgebiets (GOUDIE 1995, MEADE & PARKER 1985, CORLEY et al. 1984). Quantifizierungen existieren vom Mississippi oder Amazonas, wo 95 % der Sedimentfracht aus 5 % des Einzugsgebiets (Mississippi), bzw. 82 % aus 12 % des Einzugsgebiets

¹⁰Best Fit = Anpassung an das verwendete Datenmaterial ohne einen tatsächlichen Bezug zu den in Wirklichkeit stattfindenden Prozessen; vgl. Lehrbücher zur Statistik, u.a. BACKHAUS et al. 2000, SWAN & SANDILANDS 1995, BAHRENBERG et al. (1992, 1990), ERHARD et al. 1989.

stammen (Amazonas) (CHORLEY et al. 1984). Steuerfaktoren in den kleinen Gebieten der Sedimentfrachtentstehung, den „zones of production“ nach SCHUMM (1977), haben zwar einen entscheidenden Einfluss auf die Sedimentfracht, in einer auf Mittelwerten basierenden Regressionsgleichung spielen sie dagegen keine Rolle. Lokale Extrema wie Advektionsniederschläge am Rand von Gebirgen oder ein starkes Gefälle beeinflussen „nur“ die tatsächlich gemessene Sedimentfracht, nicht aber die Mittelwerte der Steuerfaktoren, die sich auf das gesamte Einzugsgebiet beziehen. Bei größeren Einzugsgebieten wird so mit Größen gearbeitet, die für die Entstehung der Sedimentfracht nicht relevant sind, d.h. Steuerfaktoren, deren Ausprägung von den Flächen bestimmt wird, in denen fast keine Sedimentfrachtgenese stattfindet („transfer zones“ und „zones of deposition“ nach SCHUMM 1977).

3. Messdaten zur Sedimentfracht

Die Qualität der Sedimentfrachtdaten, wie sie den globalen Modellen zugrunde liegen, ist unzureichend (SUMMERFIELD 1991, WALLING & WEBB 1981). Neben rein messtechnischen Problemen, auf die hier nicht weiter eingegangen werden kann (vgl. u.a. EDWARDS & GLYSSON 1999, HUDSON 1993, WARD 1984), fehlen fast immer Angaben zur Dauer und Häufigkeit von Messungen. Dies macht Messdaten aus kleinen Einzugsgebieten fragwürdig, da ihre Sedimentfracht in überproportionaler Weise von kurzzeitigen Extremereignissen geprägt wird. Ein einzelnes erfasstes oder nicht erfasstes Ereignis kann zu vollkommen anderen Werten führen. In großen Einzugsgebieten bestehen vielfach stationäre Messstationen und die Transportraten sind verhältnismäßig konstant. Jedoch halten hier Staudämme und gelegentlich natürliche Seen einen Großteil der Fracht zurück, der dann nicht mehr die Messstellen erreicht (vgl. Abb. 12). MILLIMAN (1990) schrieb dazu, „*As a result, estimates of the sediment load for many large rivers (as well as the most small ones) are exactly that: estimates*“. Eine statistisch gewonnene Modellformel führt so zu keinem sinnvollen Ergebnis.

4. Geodaten über die Eigenschaften der Einzugsgebiete

Die meisten globalen Modellgleichungen basieren auf analog gewonnenen Geodaten von stark unterschiedlicher Qualität. Lediglich LUDWIG & PROBST (1996, 1998) verwendeten flächendeckende digitale Datensätze (Tab. 6). Bei den analogen Daten bleibt undokumentiert, nach welchen Kriterien die jeweiligen Zahlenwerte ermittelt wurden. Die Geodaten von LUDWIG & PROBST (1996, 1998) sind stark generalisiert mit Auflösungen zwischen $1^{\circ}1'$ und $0,5^{\circ}0,5'$. Dadurch wird die lokale Variabilität in den Einzugsgebieten nicht erfasst. Dies kann

zu einer beträchtlichen Minderung der Qualität einer Modellformel führen, wenn wenige Anteile eines Gebiets Sedimentfracht liefern (vgl. u.a. GOUDIE 1995, CHORLEY et al. 1984).

5. Unberücksichtigte Steuerfaktoren

Neben zu gering auflösenden Daten wurden oft erosionsrelevante Eigenschaften der Einzugsgebiete nicht berücksichtigt, z.B. die Erodibilität des Untergrunds (Bodentextur, Durchlässigkeit, etc.), die Vegetationsbedeckung (Pflanzenart, Waldanteil, etc.) oder komplexe hydrologische Parameter (SCS CN-Oberflächenabfluss nach USDA-NRCS (2001, 1986), Stream-Power Index nach MOORE (1996), etc.; vgl. Tab. 7 und Anhang C). Dies kann zu unzuverlässigen Modellgleichungen führen, v.a. wenn es sich um einen Steuerfaktor handelt, der in vielen Einzugsgebieten eine entscheidende Rolle spielt, wie z.B. die Bodenbeschaffenheit im Fall der chinesischen Lössgebiete. Autoren ohne pedologische Geodaten versuchten dieses Problem durch den Ausschluss der entsprechenden Einzugsgebiete zu lösen, wie z.B. HARRISON (2000), HOVIUS (1998) oder MILLIMAN & SYVITSKY (1992).

	Qualitätsklassen	Einzugsgebiete	Größenbereich in km ²	Mittlere Größe in km ²
Langbein & Schumm (1958)	---- ^{b)}	94-163	---- ^{b)}	---- ^{b)}
Fournier (1960)	---- ^{b)}	78	2500 – 1 Mio.	95000
Ahnert (1970)	---- ^{b)}	20	---- ^{b)}	---- ^{b)}
Jansen & Painter (1974)	---- ^{b)}	79	5000 - 6 Mio.	515000
Ohmori (1983) ^{a)}	---- ^{b)}	170	---- ^{b)}	---- ^{b)}
Jansson (1988) ^{a)}	---- ^{b)}	1358	350 - 100000	---- ^{b)}
Pinet & Souriau (1988)	---- ^{b)}	12-18	51000 - 6 Mio.	334000
Milliman & Syvitski (1992)	---- ^{b)}	15-90	100 - 6 Mio.	286000
Summerfield & Hulton (1994) ^{a)}	3	33	540000 - 6 Mio.	1600000
Mulder & Syvitski (1996)	---- ^{b)}	279	100 - 6 Mio.	286000
Hovius (1998)	---- ^{b)}	86	23000 - 6 Mio.	630000
Ludwig & Probst (1998)	34	58	9000 - 6 Mio.	890000
Harrison (2000)	---- ^{b)}	80	23000 - 6 Mio.	630000
Globales GIS (Kap. 4 - 5)	345	1515	300 - 6 Mio.	90000
GIS der USA (Kap. 4 - 5)	123456	218-676	300 - 3 Mio.	10000 - 30000

Tabelle 6: Daten und Einzugsgebiete bei globalen Sedimentfrachtmodellen. ^{a)} Qualitative Studie zur Sedimentfracht, keine quantitative Modellformel erstellt. ^{b)} Keine Angaben des Autors, bzw. Bedingung nicht erfüllt.

Qualitätsklassen:

- 1: Verlässliche Sedimentfrachtmessungen (= lückenlose Messungen und über mehrere Jahre)
- 2: Einflüsse von Dämmen im Hinterland berücksichtigt (= Korrektur von Messdaten und bei der Simulation)
- 3: Verwendung digitaler Geodaten (= flächendeckende GIS-gestützte Datensätze)
- 4: Geodaten zu den wesentlichsten Einflussfaktoren (= Bodentextur, Vegetationsbedeckung, etc.)
- 5: Räumlich hochauflösende Geodaten (= durchschnittliche Pixelgröße 1*1 km oder kleiner)
- 6: Zeitlich hochauflösende Geodaten (= messzeitspezifische Klimadaten oder tagesaktuelle Daten)

Die aufgeführten datenspezifischen Mängel reichen oft aus, um eine mit statistischen Mitteln erstellte Modellgleichung unzuverlässig zu machen. Sie führen dazu, dass die Sedimentfracht mehr mit externen Größen (= nicht berücksichtigte Steuerfaktoren) oder Fehlern korreliert und drängen die eigentlichen Steuerfaktoren in den Hintergrund. Zu den rein datenspezifischen Punkten gesellen sich noch weitere Größen, welche bei einer Nichtberücksichtigung die Zuverlässigkeit der jeweiligen Modellgleichung weiter schmälern können. Die wichtigsten von ihnen werden während der nächsten Abschnitte beschrieben (Kap. 2.3.2 – 2.3.5). Gelingt es, diese zusammen mit besseren Ausgangsdaten in Zukunft zu berücksichtigen, dann sind verlässliche Modellgleichungen möglich.

	Beispiele	Literaturquellen
Klima	- Niederschlagsintensität und –menge, Extremereignisse - Temperatur und Temperaturverlauf, Aridität - Windgeschehen, Abflussmenge	MOREHEAD et al. 2003, HASENPFLUG 1992, SCHMIDT 1985, GRIFFITHS 1979, SCHUMM 1977, WILSON 1973, FOURNIER 1960
Relief	- Neigung, Geländeverlauf, Einzugsgebiet - Struktur und Art des Flußsystems - Sedimentsenken im Einzugsgebiet (Seen, Becken)	MILLIMAN & SYVITSKY 1992, PHILLIPS 1990, OWENS & SLAYMAKER 1992, PINET & SOURIAU 1988, AHNERT 1970, SCHUMM 1963
Boden	- Textur (Anteil von Ton-/Sand/Schluff und Gesteinspartikeln) - Bodentiefe, Wasserdurchlässigkeit und Aggregate - Organisches Material, Organismen, Wurzelreste	MIXON 2002, MORGAN 1999, LUDWIG & PROBST 1998, RENARD et al. 1997, AUERSWALD 1993, FLAXMAN 1966
Geologie	- Verwitterungsbeständigkeit (mechanisch oder chemisch) - Wasserdurchlässigkeit (Karst oder Silikatgesteine) - Alter des Orogens	LUDWIG & PROBST 1998, PINET & SOURIAU 1988, JANSEN & PAINTER 1974
Vegetation	- Art der Pflanzenbedeckung - Grad der Pflanzenbedeckung	MIXON 2002, TRIMBLE 1988, OHIMORI 1983, DOUGLAS 1967
Mensch	- Intensität und Art von Landwirtschaft, Besiedlung, Rodung und Straßenbau - Eingriffe in das Flusssystem (Dämme und Flussregulierungen)	VÖRÖSMARTY et al. 2003, KUHNLE et al. 1996, GOUDIE 1994, MEADE & PARKER 1985, MEADE & TRIMBLE 1974, DOUGLAS 1967
Sonstiges	- Gletscherbedeckung (warme und kalte Gletscher), Zahl der Seen, Schneeschmelze (pluvialer oder nivaler Abfluss) - Endogene Faktoren (Vulkanismus, Tektonik)	SHANNON et al. 2002, HOVIUS 1998, GURNELL et al. 1996, DEARING & FOSTER 1993, FRENETTE & JULIEN 1987
Übersichten	Umfassende Übersichten zu allen Umweltparametern	DE VENTE & POESEN 2005, SYVITSKY 2003, EINSELE 2000, HOOKE 2000, HAY 1998, ALLEN 1997, EINSELE & HINDERER 1997, AHNERT 1996, GOUDIE 1995, SUMMERFIELD 1991, SCHMIDT 1984

Tabelle 7: Steuerfaktoren, welche die Höhe der Sedimentfracht beeinflussen.

2.3.2 Aktivphasen, Passivphasen und zeitlicher Wandel

Denudation, Erosion und der Transport von Sedimentfracht finden nicht kontinuierlich statt, sondern überwiegend während kurzer Zeiträume, so genannten Aktivphasen, die sich durch intensive Niederschläge und hohe Abflussmengen auszeichnen (Abb. 10, links). Ihre Dauer reicht von wenigen Minuten (denudativ-erosiver Abtrag durch Oberflächenabfluss; vgl. WANIELISTA et

al. 1996, NEDC 1989b, USDA-NRCS 1986) bis zu einigen Tagen (fluviale Erosion/Transport bei Hochwasser in Bächen und Flüssen). Während der restlichen Zeit herrscht Formungsruhe (= Passivphase, vgl. MEYBECK et al. 2003, MORGAN 1999, GOUDIE 1995, WOLMAN & MILLER 1960). Die Ursachen liegen in der Natur der geomorphologischen Prozesse sowie der Existenz von Schwellenwerten begründet, die überwunden werden müssen, um feste Boden- und Gesteinspartikel zu mobilisieren. Die notwendige Energie und Transportkapazität wird v.a. durch intensive Extremereignisse bereitgestellt. Eine ursachenadäquate Modellformel muss diesem Umstand Rechnung tragen indem sie abflussrelevante Parameter verwendet, die Aktivphasen abbilden und nicht das mittlere Geschehen, in welchem die Passivphasen dominieren.

Alle globalen und, soweit bekannt, auch regionalen Sedimentfrachtmodelle (Tab. 4 und 5) enthalten jedoch keine Parameter, welche die aktiven Phasen beim Sedimenttransport repräsentieren. Wenn überhaupt klimatische und abflussrelevante Größen verwendet werden, dann beziehen sich diese immer auf einen Zeitraum in dem Passivphasen anteilmäßig dominieren, wie z.B. beim mittleren Jahresniederschlag (OHMORI 1983, LANGBEIN & SCHUMM 1958), langjährigen Erosionsindices (LUDWIG & PROBST 1998, FOURNIER 1960) oder den Abflussmengen am Ausgang eines Einzugsgebiets (HARRISON 2000, HOVIUS 1998, LUDWIG & PROBST 1998, SUMMERFIELD & HULTON 1994, JANSSON 1988 und JANSEN & PAINTER 1974). Kurzfristige Extremereignisse sind in den verwendeten klimatisch-hydrologischen Daten dagegen nicht abgebildet, und zwar aus folgenden Gründen:

1. Die bisher verfügbaren flächendeckenden Daten zu Niederschlag und Klima basieren auf den Durchschnittswerten 30-jähriger Standardperioden (= Zeitraum von 1900-1930, 1930-1960 oder 1960-1990; vgl. IWMI 2000, NEW et al. 1999, LEGATES & WILLMOT 1990). Einfache Klimatologien liegen in einer jährlichen, komplexere in einer monatlichen Auflösung vor. Alle Klimaparameter sind dadurch immer stark generalisiert. Darüber hinaus werden langjährige Klimaveränderungen, die sich in den Messwerten zur Sedimentfracht widerspiegeln können, von derlei Daten nicht erfasst (Abb. 10, rechts).
2. Die aus direkten Messungen im Fluss abgeleiteten Parameter Q_{spec} und Q_{max} (= mittlere Abflussmenge im Jahr und mittlere Abflussmenge im regenreichsten Monat; vgl. Tab. 5), beziehen sich immer auf ein gesamtes Einzugsgebiet. Extremwerte werden nur soweit erfasst, wie sie auch am Ende des Einzugsgebiets in Erscheinung treten. Kurzfristige Abflussspitzen in

Subsystemen (= Oberlauf oder kleinere Einzugsgebiete innerhalb) oder der Oberflächenabfluss am Hang (= overland flow) bleiben unberücksichtigt.

Da die Mobilisierung von Sedimentfracht ausschließlich während der aktiven Phasen geschieht, das verfügbare Datenmaterial jedoch nur einen mittleren Zustand (= v.a. Passivphase) beschreibt, sind aussagekräftige Korrelationen zur Sedimentfracht prinzipiell nicht zu erwarten. Viele Autoren (u.a. LEWKOWICZ & KOKELJ 2002, MULDER & SYVITSKY 1996, PINET & SOURIAU 1988, AHNERT 1970) halten daher die Bedeutung klimatisch-hydrologischer Steuerfaktoren für gering und betonen stattdessen die herausragende Rolle des Reliefs (lokales Relief, Größe des Einzugsgebiets, mittlere Höhe, etc.). Tatsächlich wurden aber im überregionalen Skalenbereich bislang nur ungeeignete Daten verwendet, und zwar nivellierte Durchschnittsdaten, welche genau den Zeitraum erfassen, in dem kaum Sedimentfracht mobilisiert wird. Um überhaupt die Rolle der klimatisch-hydrologischen Parameter objektiv bewerten zu können, müssen folgende Daten vorliegen:

- Flächendeckende Klima- und hydrologische Daten in mindestens monatlicher Auflösung.
- Flächendeckende Zeitreihen von Niederschlagsdaten, die dem Messzeitraum der Sedimentfracht entsprechen (Abb.10).

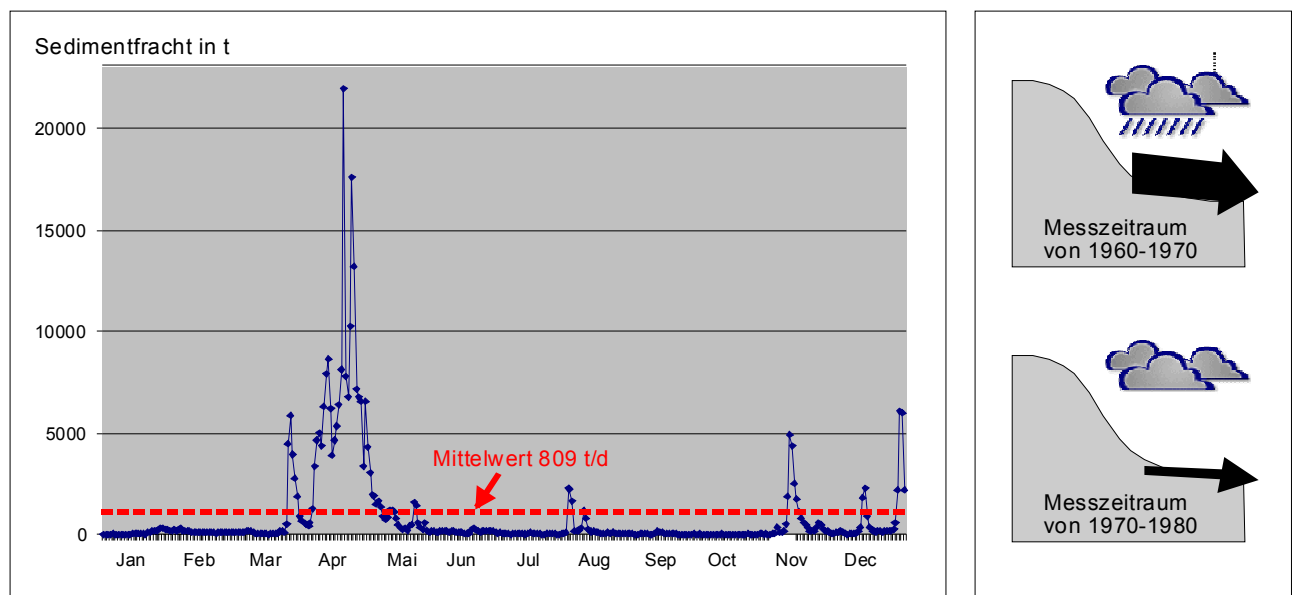


Abbildung 10: Aktiv- und Passivphasen beim Sedimenttransport. Links: Jahresgang der Sedimentfracht am Beispiel des Merrimack River 1969 (MA, USA). Flussdaten: Sedimentfracht (1969) = 809 t/d (arithmetisches Mittel) bzw. 116 t/d (Median); Einzugsgebiet: 12000 km², SSY = 25 t/km²/a. Rechts: Sedimentfracht in Abhängigkeit von der Messperiode (= regenreiche Aktivphase oder ereignisarme Trockenzeit).

2.3.3 Staudämme, Reservoirs und natürliche Seen

Die Sedimentfracht eines Einzugsgebiets wird von verschiedenen Größen beeinflusst. Zum Einen von flächenhaft wirkenden Steuerfaktoren (Klima, Relief, Boden, Vegetation, etc.) und zum Anderen von der Transportkapazität im Flusssystem. Während die flächenhaften Steuerfaktoren das Ausgangsmaterial liefern, sorgen flussdynamische Prozesse für den Abtransport. Hindernisse wie Staudämme, Reservoirs und natürliche Seen vermindern die Strömungsgeschwindigkeit und lösen eine vorzeitige Ablagerung aus. Folglich wird an den Messstellen weniger Sediment registriert als dies aufgrund der flächenhaft wirkenden Steuerfaktoren eigentlich der Fall sein müsste. Praktisch existieren in jedem größeren Einzugsgebiet natürliche und künstliche Sedimentsenken (vgl. u.a. WALLING & FANG 2003, VÖROSMARTY et al. (2003, 1997), MEADE & PARKER 1985, KEMPE (1993, 1990)).

Die Fähigkeit eines Staudamms oder natürlichen Sees zur Verminderung der Sedimentfracht wird als Trap-Efficiency (= Rückhaltekapazität) bezeichnet. Sie variiert in Abhängigkeit von Bauart, Volumen und Wasserzufluss und kann Werte zwischen 0 % (= kein Sedimentrückhalt) und 100 % (= vollständige Sedimentation im Stausee) erreichen (USACE, 1997, 1995, TRIMBLE & CAREY 1984, HEINEMANN 1984). Eigene Auswertungen haben ergeben, dass die durchschnittliche Trap-Efficiency eines Staudamms zwischen 85 % (bei Berücksichtigung der 549 größten Staudämme der USA mit einer Höhe > 50 m und einem Volumen > 1 Mio. m³) und 70 % liegt (bei Berücksichtigung der wichtigsten 1560 Dämme und Staustufen der USA mit einer Höhe > 5 m und einem Volumen > 1 Mio. m³; vgl. Anhang F).

MEADE & PARKER (1985) zeigen am Beispiel des Missouri den unmittelbaren Rückgang der Sedimentfracht nach der Inbetriebnahme von Staudämmen (Abb. 11, links) . Dies geschieht einerseits durch eine direkte Ablagerung hinter der Staudammmauer, andererseits durch die Kappung von Hochwasserspitzen, was stromabwärts zu einer Verminderung der Transportkapazität führt (vgl. MCCARTNEY et al. 2000, BRANDT 2000, MORRIS & FAN 1997). In größeren Einzugsgebieten mit mehreren hintereinander positionierten Staudämmen wird die Sedimentfracht durch beide Prozesse so nachhaltig verändert, dass keine Zusammenhänge zu den flächenhaft wirkenden Steuerfaktoren mehr erkennbar sind. Eine exemplarisch am Beispiel der USA erstellte Berechnung ergab eine durchschnittliche Verminderung der Sedimentfracht um das 3,5-fache, z.T.

wurden sogar Rückgänge um das 72-fache erreicht (= Canadian River, 50 km stromabwärts unterhalb eines kurz zuvor errichteten Staudamms; vgl. Kap. 5.1.3 und Anhang F).

Ein wichtiger und bislang wenig beachteter Punkt sind die zeitlichen Beziehungen zwischen den Sedimentfrachtmessungen und dem Bau von Staudämmen. Ein in einer Datenbank vorhandener Staudamm wirkt sich nur dann auf die stromabwärts gemessene Sedimentfracht aus, wenn er schon vor der Messperiode der Sedimentfracht bestand oder während der Messperiode in Betrieb genommen wurde (Abb. 11, rechts). Im ersten Fall wird die Sedimentfracht während der gesamten Messdauer um die Trap-Efficiency des Staudamms reduziert. Die reale – baulich bedingte – Trap-Efficiency entspricht dann der tatsächlich Wirksamen. Im zweiten Fall wird die Sedimentfracht erst ab dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme hinter der Staudammmauer abgelagert und die reale Trap-Efficiency vermindert sich entsprechend. In großen Einzugsgebieten, wo eine Vielzahl an Staudämmen mit unterschiedlichen Trap-Efficiencies zu verschiedenen Zeiten entstanden sind, ist die Situation äußerst komplex (Abb. 12, rechts). Wie hoch die Sedimentfracht des Gesamtgebiets gegenüber ihrem wirklichen Wert reduziert wird, hängt dann von der zeitlich-räumlichen Abfolge aller Staudämme in Bezug zur Dauer einer Sedimentfrachtmessung ab. Die Umsetzung dieses Sachverhalts in ein Modell wird in Kap. 3.2 und im Manual zum Analyseprogramm STools erläutert (Anhang J).

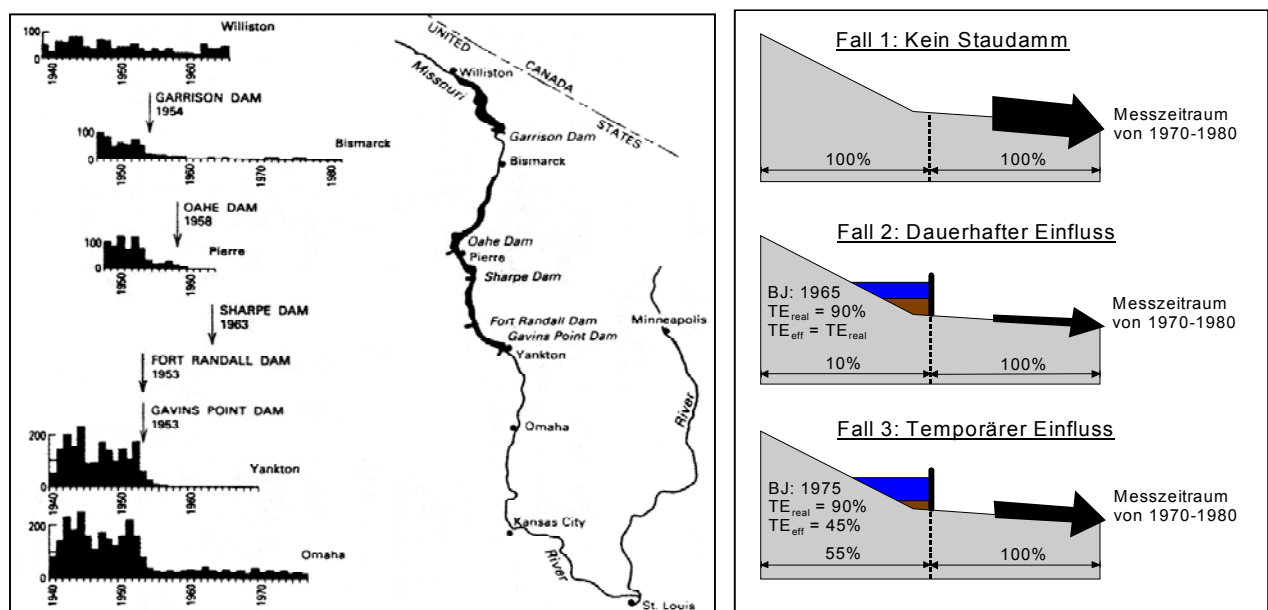


Abbildung 11: Einflüsse von Staudämmen auf die Sedimentfracht. Links: Sedimentfracht im Zusammenhang mit dem Bau von Staudämmen am Beispiel des Missouri (MEADE & PARKER 1985, leicht verändert). Rechts: Sedimentfracht in Abhängigkeit von der Existenz und dem Baujahr eines Staudamms. BJ = Baujahr, TE_{real} = Trap-Efficiency des Staudamms in % von 0 (= keine Ablagerung) bis 100 (= gesamte Sedimentfracht wird zurückgehalten), TE_{eff} = effektive Trap-Efficiency unter Berücksichtigung der Wirkungsdauer (vgl. Kap. 3.2). Die Prozentangaben am Boden der Grafiken zeigen den Anteil an Sediment, der vom jeweiligen Teilgebiet die Messstelle erreicht.

Die Berücksichtigung der zeitlich-räumlichen Abfolge ist umso wichtiger, da eine große Zahl von Sedimentfrachtmessungen zeitlich mit dem Bau von Staudämmen verknüpft ist (Abb. 12, links). Viele Projektstudien und Messprogramme wurden aus rein praktischen Gründen initiiert, z.B. zur Berechnung der voraussichtlichen Sedimentablagerung in zukünftigen Reservoiren und/oder zur Überwachung nach dem Bau. In einer Vielzahl von Fällen (vgl. Anhang F) existiert so eine auffällige räumliche Nähe zwischen dem Ort der Sedimentfrachtmessung und dem zukünftigen oder schon in Betrieb befindlichem Staudamm. Nicht berücksichtigte Staudämme bzw. Ungenauigkeiten bei ihrer Positionierung können so zu fatalen Fehlinterpretationen führen (Abb. 12, rechts).

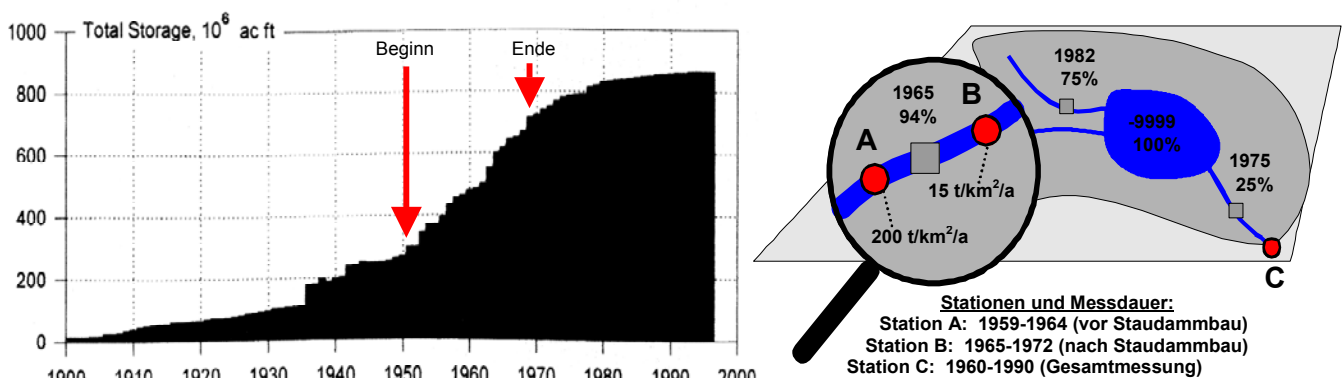


Abbildung 12: Staudammvolumen und Messzeiten am Beispiel der USA. Links: Entwicklung des Staudammvolumens und Zeitpunkte einer idealtypischen Sedimentfrachtmessung; rote Pfeile = mittlerer Beginn und Ende aller Sedimentfrachtmessungen in den USA; vgl. Anhang F (verändert nach GRAF 1999). Rechts: Gemessene Sedimentfrachten in Abhängigkeit von Staudämmen und Sedimentsenken. Rote Kreise = Messstellen, Graue Quadrate = Staudämme mit Baujahr und Trap-Efficiency.

Eine Modellformel, bei der die genannten Punkte nicht berücksichtigt und entsprechend korrigierte Sedimentfrachtdaten verwendet werden, ist in ihrem Aussagewert reduziert. Dabei macht es keinen Unterschied, ob in einem regionalen oder globalen Rahmen gearbeitet wird. Weltweit sind derzeit über 47000 größere Staudämme registriert (WCD 2000, MCCARTNEY et al. 2000, <http://www.icold-cigb.org>) und es existieren kaum noch größere Einzugsgebiete, in denen Staudämme keine entscheidende Rolle spielen (Abb. 13). Die oben angeführten Zahlenbeispiele erscheinen zwar etwas selektiv, weil sie sich nur auf die „dam nation“ USA beziehen (GRAF 1999), grundlegend andere Schlussfolgerungen ergeben sich für andere Regionen aber nicht. Im Gegenteil, mit einer Dichte von 70 Dämmen pro 100.000 km^2 liegen die USA recht nah beim globalen Durchschnitt von 50 Dämmen pro 100.000 km^2 und sind damit repräsentativ (Abb. 13).

Land	Fläche in km ²	Dämme	Anteil in %	Dämme pro 100000 km ²
China	9.345.000	22.000	46	235
USA	9.387.000	6.575	14	70
Indien	3.151.000	4.291	9	136
Japan	358.000	2.675	6	747
Spanien	485.000	1.196	3	247
Kanada	9.590.000	793	2	8
Südkorea	91.000	765	2	841
Türkei	790.000	625	1	79
Brasilien	8.421.000	594	1	7
Frankreich	551.000	569	1	103
Sonstige	51.831.000	7.372	16	14
Gesamt ¹⁾	94.000.000	47.455	100	50



Abbildung 13: Verbreitung von Großstaudämmen nach den Schätzungen der World Commission on Dams (WCD 2000). Relative Staudammdichte nach eigenen Berechnungen. Zu den Großstaudämmen zählen alle Dämme mit einer Höhe > 15 m bzw. einem Speichervolumen > 3 Mio. m³ (Definition der ICOLD [= International Commission on Large Dams]; vgl. WCD 2000). ¹⁾ Globale Landfläche ohne Grönland, Antarktis und aride Wüsten. Rechts: Beispiel eines Großstaudamms bei Almendra (Spanien) (Quelle: ICOLD, www.icold-cigb.org).

2.3.4 Mittelwerte und räumliches Zusammenspiel der Steuerfaktoren

Bei Erstellung der bestehenden globalen Sedimentfrachtmodelle wurden ausschließlich die mittleren Eigenschaften der Einzugsgebiete verwendet (vgl. Abb. 7). In Hydrologie und Geoinformatik werden derartige Ansätze als „*lumped models*“ bezeichnet, im Gegensatz zu „*distributed area*“ - Modelltypen, bei denen eine pixelgenaue Berechnung der Sedimentfracht mit anschließendem Routing durch das Einzugsgebiet durchgeführt wird. Dazwischen stehen „*semi-lumped*“ - Modelle, die auf den mittleren Eigenschaften sog. Subcatchments beruhen (Abb. 14; vgl. u.a. VIEUX 2001, ASCE 1999, BROOKS et al. 1997, WILSON & GALLANT 1996).

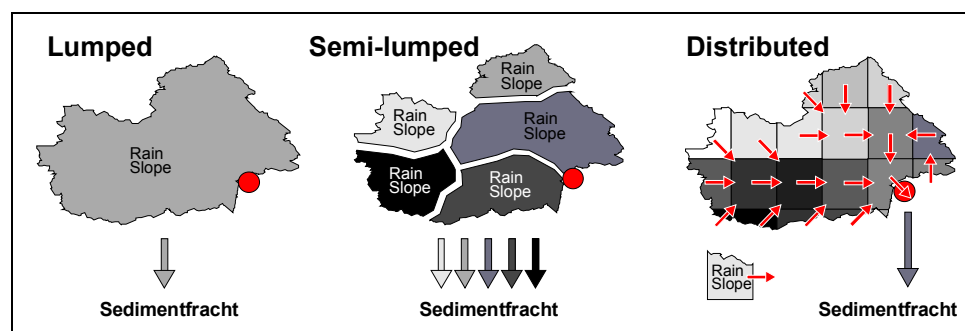


Abbildung 14: Modelltypen zur Analyse von Einzugsgebieten. Beispielhafte Berechnung der Sedimentfracht anhand der Parameter Rain und Slope. Roter Kreis = Messstation am Ende des Einzugsgebiets. Rote Pfeile = Fließpfade durch das Einzugsgebiet.

Die ausschließliche Fixierung auf Mittelwerte wie bei „*lumped*“ und „*semi-lumped*“ – Modellen hat den Nachteil, dass ein Einzugsgebiet homogener erscheint als es in Wirklichkeit ist und lokale Prozesse, die zur Mobilisierung oder Ablagerung von Sedimentfracht führen, nicht erfasst

werden können. Sedimentfracht wird erst dann mobilisiert, wenn mehrere Steuerfaktoren gleichzeitig eine bestimmte Stärke erreicht haben, z.B. wenn neben erodierbarem Bodenmaterial, auch genügend Strömungsenergie zur Verfügung gestellt wird. Bleibt nur ein wichtiger Steuerfaktor hinter den anderen zurück, dann wirkt er u.U. als limitierender Faktor. Dies ist z.B. dann der Fall, wenn das zur Verfügung stehende Bodenmaterial beschränkt ist (= supply limited erosion; vgl. ALLEN 1997, BROOKS et al. 1997 JULIEN 1995), nicht abgetragen werden kann (= detachment limited erosion; vgl. HOWARD 1994, FOSTER & WISCHMEIER 1974) oder die Transportkapazität des Oberflächenabflusses bzw. Flusssystems nicht ausreicht (= transport limited erosion; vgl. ALLEN 1997, JULIEN 1995, FOSTER & WISCHMEIER 1974).

Ein anschauliches Beispiel für diesen Sachverhalt, im Folgenden als räumliches Zusammenspiel bezeichnet, ist das Zusammentreffen intensiver Niederschläge mit einem starken oder geringen Relief (Abb. 15). Im Falle eines steilen Reliefs kann sich das Erosionspotential des Niederschlags vollständig entfalten und es werden große Mengen an Sedimenten mobilisiert (= positives räumliches Zusammenspiel). Genau entgegengesetzt stellt sich die Situation bei einem flachen Relief dar. Dort kann die erosive Energie eines Starkniederschlags nicht umgesetzt werden und es wird weniger Sediment mobilisiert, als eigentlich möglich gewesen wäre (= negatives räumliches Zusammenspiel). Eine empirische Untersuchung nach Art der bestehenden Sedimentfrachtgleichungen führt in derartigen Fällen zu keinem befriedigenden Ergebnis, weil die Variation der Sedimentfracht nicht auf identisch erscheinende Steuerfaktoren zurückgeführt werden kann.

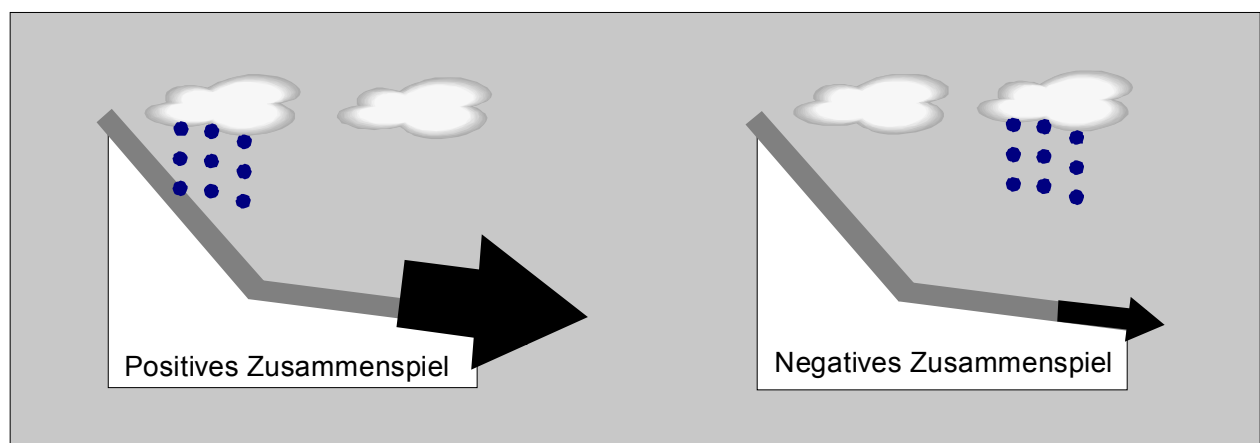


Abbildung 15: Sedimentausttrag und räumliches Zusammenspiel von Niederschlag und Gefälle, dargestellt am Beispiel zweier Einzugsgebiete mit gleichen Durchschnittswerten.

Die Berücksichtigung des räumlichen Zusammenspiels wird immer dann zu einer wesentlichen Voraussetzung für verbesserte Sedimentfrachtmodelle, je häufiger ein positives oder negatives räumliches Zusammenspiel in einem Einzugsgebiet auftritt. Dies ist immer dann der Fall, wenn ein Einzugsgebiet sehr inhomogen aufgebaut ist, bzw. wenn sich die Steuerfaktoren in räumlicher Hinsicht stark voneinander unterscheiden.

2.3.5 Sonstige Probleme

Neben den beschriebenen Problemen existieren noch weitere, die für die mangelnde Zuverlässigkeit der globalen Modellgleichungen verantwortlich gemacht werden können. Die wichtigsten von ihnen sind:

1. Rolle der Tektonik

Nach HOVIUS (1998) und ALLEN (1997) ist die Nichtberücksichtigung der Tektonik ein Hauptgrund für die fehlende Zuverlässigkeit von Sedimentfrachtgleichungen (Abb. 16). Tektonische Hebungen verursachen eine Materialzufuhr und steuern auf lange Sicht den Sedimentaustrag ebenso wirksam (= supply limited erosion) wie exogene Abtragsprozesse (= detachment limited erosion und transport limited erosion).

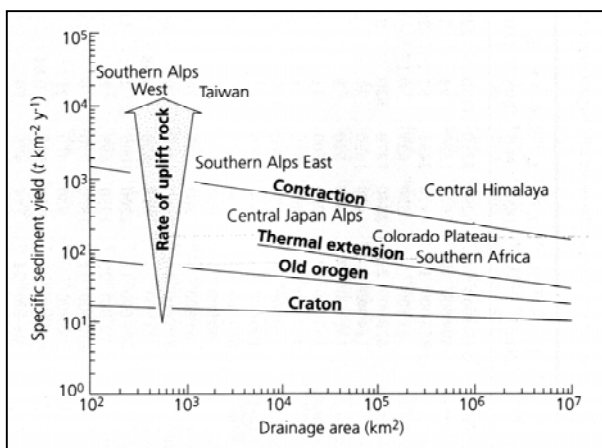


Abbildung 16: Rolle der Tektonik als möglicher Steuerfaktor der Sedimentfracht. Abbildung nach HOVIUS (1998) und ALLEN (1997).

Die von ihnen geforderte Einbeziehung eines zusätzlichen tektonischen Faktors ist allerdings problematisch. Zum einen wird die Intensität tektonisch bedingter Hebungen schon berücksichtigt, durch die Verwendung topographische Faktoren wie Reliefhöhe oder lokales Relief (vgl. Tab. 5). Zum anderen liegt die Messdauer von Sedimentfrachtdaten im besten Fall nur bei wenigen Jahrzehnten. Eine eventuelle Materialzufuhr spielt in diesem Zeitraum nur eine

untergeordnete Rolle. Im übrigen stellt sich die Frage, ob sich rezente Hebungen von wenigen mm/a überhaupt flächendeckend aus überregionalen Höhenmodellen ableiten lassen, da diese im besten Fall eine vertikale Genauigkeitstoleranz von +/- 10 Metern haben (PIKE 2002, HOLMES et al. 2000, ENDRENY et al. 2000, USGS 2000a).

2. Anthropogene Eingriffe in das Flusssystem und den Naturhaushalt

Neben dem Bau von Staudämmen und Reservoirn beeinflusst der Mensch auch auf andere Art und Weise die Sedimentfracht. Unter anderem verändert er diese durch

- direkte Eingriffe im Flusssystem, wie z.B. Flussbegradigungen, Staustufen, Befestigungen oder künstlich erzwungene Sedimentation (MOODY et al. 2003, KESEL 2003),
- Änderungen im Betrieb von Staudämmen (z.B. Spülungen oder ein verändertes Wassermanagement, MIXON 2002, ATKINSON 1996),
- Umgestaltungen der Landschaft und Nutzungsänderungen, wie z.B. Landwirtschaft, Straßen- und Siedlungsbau, Bergbau und Deponien (LASANTA et al. 2000, GOUDIE 1994, BLAIKIE & BROOKFIELD 1987).

Viele dieser Maßnahmen führen zu starken Veränderungen der Sedimentfracht, sind jedoch nur schwer zu erfassen. Satellitenbilder zeigen nur die grobe Landnutzung zur Zeit der Aufnahme, Rückschlüsse auf Nutzungsänderungen (Konturpflügen, Wechsel der Anbaufrüchte, Erosionsschutzmaßnahmen, etc.) oder kleinräumliche Eingriffe (Straßenbau, Deponien, kleinere Minen, etc.) sind nicht möglich.

3. Episodische Ereignisse und verborgene Anpassungsvorgänge

Episodische Ereignisse wie z.B. Vulkanausbrüche, Lawinen, Rutschungen oder Buschfeuer (SAYEEDUZZAMAN & WEIRICH 1996, GOUDIE 1995) haben einen starken Einfluss auf die Sedimentfracht und auf die Zuverlässigkeit einer Sedimentfrachtgleichung. Im Gegensatz zu klimatischen Extremereignissen wurden sie jedoch weder durchgehend noch flächendeckend erfasst. Eine ähnliche Unsicherheit geht von verborgenen Anpassungsvorgängen im Flusssystem aus. Zu früheren Zeiten abgelagerte oder erodierte Sedimentmassen können dazu führen, dass das Flusssystem nicht mehr im Gleichgewicht mit den gegenwärtig herrschenden Umweltbedingungen steht (CLAPP et al. 2000, CHURCH & SLAYMAKER 1989, SCHUMM 1977). Die notwendigen Anpassungsvorgänge manifestieren sich zwar in der Sedimentfracht, werden jedoch ebenfalls nicht von den rezenten Geodaten erfasst.