

7. Zusammenfassung

In der vorliegenden Dissertation wurden Methoden entwickelt und umgesetzt, die zu stark verbesserten überregionalen Sedimentfrachtmodellen führen. Ergänzend dazu wurden bisherige Modelle einer ausführlichen Überprüfung unterzogen, unter anderem diejenigen von HARRISON (2000), LUDWIG & PROBST (1998, 1996), MILLIMAN & SYVITSKI (1992), AHNERT (1970) und FOURNIER (1960). Als Datenbasis dienten zwei speziell aufgebaute Geoinformationssysteme, ein globales GIS mit Sedimentfrachtdaten aus 1523 Einzugsgebieten und Geodaten in einer Auflösung von 1*1 km bis 20*20 km, sowie ein regionales GIS der USA mit Sedimentfrachtdaten aus 676 Einzugsgebieten und Geodaten in einer Auflösung von 30*30 m bis 4*4 km. Es zeigte sich, dass mit keinem der bestehenden Modelle der Sedimentaustrag genau simuliert werden kann, weder auf globaler noch auf regionaler Ebene. Verantwortlich dafür sind konzeptionelle Schwächen, wie z.B. die mangelnde Berücksichtigung des räumlichen Zusammenspiels von Geofaktoren oder des Sedimentrückhalts von Staudämmen in einem Flusssystem. Diese werden mit dem neuentwickelten GIS-gestützten Modellkonzept AGISY (Advanced GIS-based Sediment Yield Modeling) und dem auf ihm basierenden Analyseprogramm STools (Sediment Yield Tools) überwunden. In AGISY sind unter anderem folgende Methodiken implementiert:

- Ein Distributed-Area Simulationsansatz, bei dem das räumliche Zusammenspiel der Steuerfaktoren auf lokaler Ebene berücksichtigt wird. Alle bisherigen Modelle basieren auf Mittelwertbildungen ganzer Einzugsgebiete.
- Ein spezieller Rechenalgorithmus, mit dem sowohl der Sedimentrückhalt von Senken als auch der zeitliche Wandel bei der Modellierung berücksichtigt werden kann. Dies setzt allerdings entsprechende Daten voraus.

Alle im Zuge von AGISY neu entwickelten Konzepte wurden am Beispiel der USA praktisch umgesetzt, da dort alle notwendigen Daten in einer hinreichenden Genauigkeit verfügbar waren. Die dabei ermittelte Sedimentfrachtformel erklärt mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,56 und einer Modelleffizienz von 0,55 (nach NASH & SUTCLIFFE 1970) die Zusammenhänge zwischen der Sedimentfracht und den Geofaktoren weit besser als alle nach bisherigen Methodiken erstellten Modelle. Diese erreichen in den USA nur Werte von maximal 0,37. Eine ähnliche Verbesserung dürfte für weltweit gültige Sedimentfrachtformeln zu erreichen sein, die beim Vorliegen der notwendigen Daten und leistungsfähigerer Hardware in Zukunft mit AGISY entwickelt werden

können. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt lassen sich die neuen Konzepte aber noch nicht im globalen Rahmen umsetzen. Globale Sedimentfrachtformeln, die nach Art der bisherigen Modelle erstellt wurden, überschreiten in keinem Fall ein Bestimmtheitsmaß von 0,27.

Neben der Erprobung neuer Modellstrategien konnte noch eine Reihe an weiteren Aspekten geklärt werden, die bei überregionalen Sedimentfrachtmodellierungen eine wichtige Rolle spielen:

1. In einer separaten Studie wurde ermittelt, dass in den USA die minimal zulässige Messdauer von Suspensionsdaten an Flüssen 5 Jahre und bei volumetrischen Ablagerungen in Reservoiren 25 Jahre beträgt (5/25-Regel). Bei geringeren Messzeiten sind die Daten so ungenau, dass sich keine statistisch signifikanten Sedimentfrachtformeln mehr erstellen lassen. Ob auf globaler Ebene ähnliche Gesetzmäßigkeiten gelten, muss allerdings noch geklärt werden.
2. Das repräsentative Ereignis, bei dem an einem Tag so viel Sedimentfracht transportiert wird, wie im langjährigen Mittel, liegt für die USA bei einem Quantil von 88 % und wird so an 321 Tagen im Jahr unter- und an 44 Tagen im Jahr überschritten. Das „magnitude-frequency concept“ von WOLMAN & MILLER (1960) konnte bestätigt und zum ersten Mal auf breiter Basis quantifiziert werden, mit täglichen Messdaten aus 1257 US-amerikanischen Einzugsgebieten.
3. Der Sedimentrückhalt durch Staudämme ist auf der überregionalen Ebene deutlich höher als bestehende Studien vermuten lassen (vgl. VÖRÖSMARTY et al. 2003, 1997). Er beträgt für das Gebiet der USA mindestens 70 %. Dieser Mittelwert wird in einzelnen Einzugsgebieten zum Teil beträchtlich über- oder unterschritten. Eine Sedimentfrachtformel, welche Staudämme und ihren zeitlichen Wandel nicht berücksichtigt, ist notwendigerweise nicht zuverlässig.
4. Der bedeutendste Steuerfaktor auf dem Gebiet der USA ist die Niederschlagsvariabilität. Sie wurde in der vorliegenden Arbeit zum ersten Mal mit messzeitspezifischen Niederschlagsdaten bestimmt (= lückenlose flächendeckende Rasterdateien zum Niederschlag von Januar 1895 bis Dezember 1997). Alle übrigen Steuerfaktoren wie Relief, Vegetation, Böden oder Lithologie üben nur einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Sedimentfracht aus. Auf globaler Ebene scheint das Relief zu dominieren. Eine abschließende Bewertung ist jedoch zum jetzigen Zeitpunkt nicht möglich, weil es außerhalb der USA noch keine hochauflösenden und flächendeckenden Zeitreihen zum Niederschlag gibt.

5. Sedimentfrachtmodelle des exponentiellen Typs sind den linearen Modellen auch im überregionalen Skalenbereich überlegen. Dies gilt allerdings nur dann, wenn sie mit einem Distributed-Area Ansatz wie AGISY berechnet und umgesetzt werden. Bei einer mittelwertbasierten Regressionsanalyse nach Art der bisherigen Modelle unterscheiden sich beide Typen nicht. Das Bestimmtheitsmaß liegt in diesen Fällen weit unter den Werten, die von einem mit AGISY optimierten exponentiellen Sedimentfrachtmodell erzielt werden.

Für zukünftige Untersuchungen zum Sedimenttransport bieten AGISY und STools weitere Möglichkeiten, die in der vorliegenden Arbeit aus zeitlichen und datentechnischen Gründen allerdings nicht ausgeschöpft werden konnten. Dazu zählen, z.B.

- die Berücksichtigung einzelner Ereignisse, welche die Sedimentfracht ab einem bestimmten Zeitpunkt erhöhen oder vermindern (Vulkanausbrüche, Rutschungen, Buschfeuer, Berg- und Straßenbau, Rodungen, Änderungen im Betrieb von Staudämmen, Erosionsschutz, etc.).
- die Optimierung von provisorischen Modellgleichungen mit AGISY und STools, die über eine Hauptkomponentenanalyse, kausalanalytische Pfadanalyse oder andere multivariate Analysemethoden erstellt worden sind,
- die Erstellung und Optimierung spezieller Modelle zur Lösungs- oder Bodenfrachtfracht mit AGISY und STools nach den gleichen Prinzipien wie im Fall der Suspensionsfracht.

Ob die Einbeziehung dieser zusätzlichen Aspekte zu weiter verbesserten oder umfassenderen überregionalen Modellen führen wird, bleibt zukünftigen Studien überlassen. Ein Aspekt sollte aber nie aus den Augen verloren werden. Aufgrund des Distributed-Area Ansatzes und der exponentiellen Modellstruktur ist AGISY in überaus starker Weise auf verlässliche und genaue Daten angewiesen, z.B. messzeitspezifische Niederschlagsvariablen, langjährige Sedimentfrachtdaten und Angaben zur Berechnung der effektiven Trap-Efficiency von Staudämmen. Sollten diese nicht vorhanden sein, dann macht die Anwendung von AGISY keinen Sinn. AGISY und genaues Datenmaterial sind immer zwei Seiten derselben Medaille.