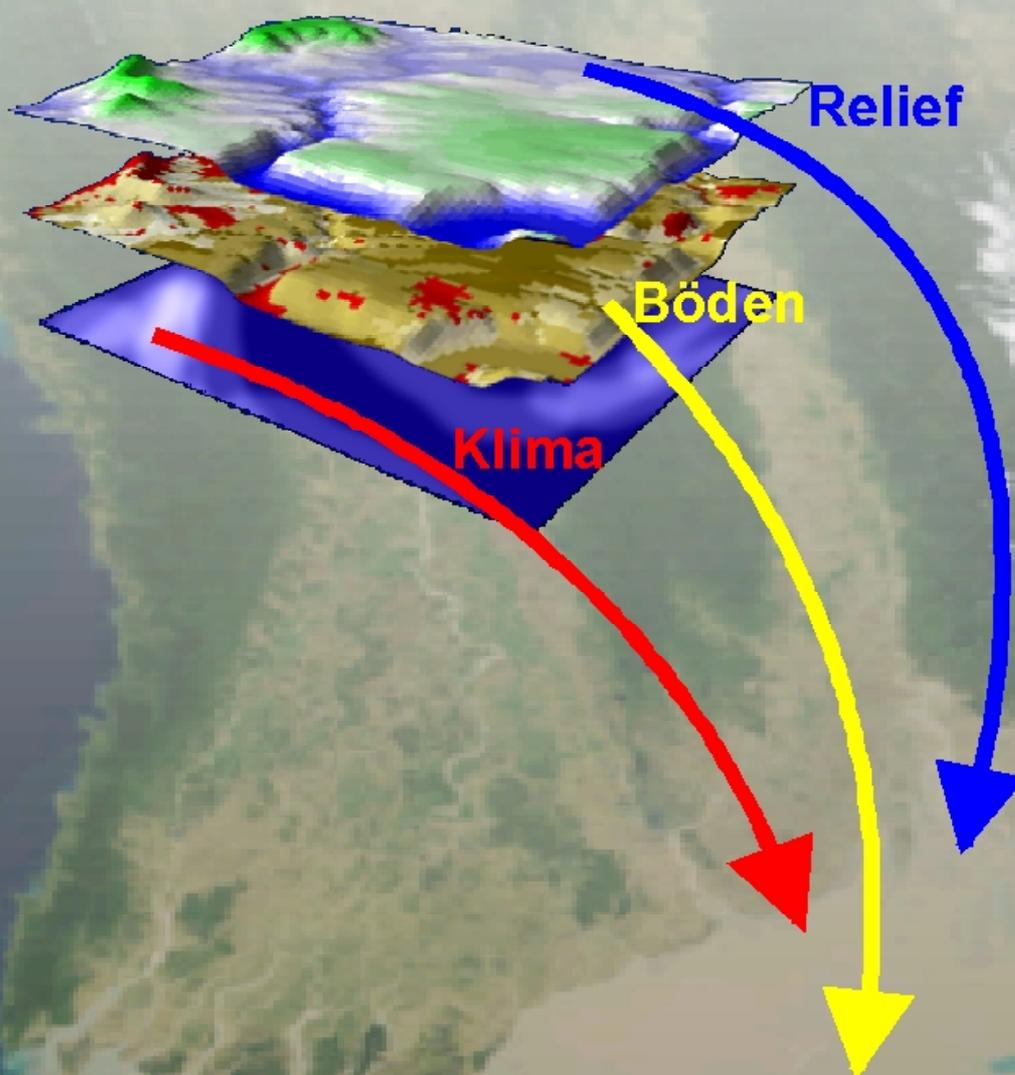


Sediment Yield Tools 1.03 für ArcView 3.x

Ein Programm zur hydrologischen Analyse von Einzugsgebieten
und zur Erstellung von überregionalen Sedimentfrachtmodellen



Inhalt

1. Einleitung und Installation	2
2. Das Fenster „Preparation“: Funktionen zur Korrektur digitaler Höhenmodelle	5
3. Das Fenster „Hydrology“: Funktionen zur hydrologischen Analyse von Einzugsgebieten.....	7
4. Das Fenster „Modelling“: Funktionen zur Erstellung von Sedimentfrachtmodellen	13
4.1 Complex Mean.....	15
4.2 Calibration Value	17
4.3 Model Simulation.....	19
4.4 Model Visualisation.....	24
5. Literatur	27
6. Schlusswort.....	28
7. Impressum	28

1. Einleitung und Installation

Das Programm **Sediment Yield Tools 1.03 (STools)** ist eine Erweiterung für die GIS-Software ArcView 3.x. und dient dazu, neue Sedimentfrachtmodelle zu entwickeln und existierende so genau wie möglich umzusetzen. STools stellt dazu eine Vielzahl an hydrologischen Funktionen und Simulationsroutinen bereit und ermöglicht neben allgemeinen hydrologischen Analysen ganz besonders die Modellierung von Sedimentflüssen in Einzugsgebieten jedweder Größe. Im Gegensatz zu anderen hydrologischen Analyseprogrammen wie TAPES-G (vgl. WILSON & GALLANT 2000) oder HSPF (vgl. SINGH 1995) bietet STools zwei entscheidende Vorteile:

- Es werden genau diejenigen Funktionen zur Sedimentfrachtmodellierung bereitgestellt, die bei der täglichen Arbeit mit umfangreichem digitalen Datenmaterial auch benötigt werden, darunter viele neuartige Modellierungsroutinen (z.B. eine Rechenfunktion, mit welcher der zeitlich und räumlich variable Einfluss des Menschen auf die Sedimentfracht berücksichtigt werden kann).
- Durch die vollständige Integration in das weitverbreitete GIS-System ArcView 3.x ist der Lernaufwand minimal. Darüber hinaus beherrscht STools das ArcView-eigene Rasterformat GRID und ermöglicht so ein flüssiges Arbeiten ohne zeitraubende Datenkonvertierungen

STools besteht aus zwei verschiedenen Dateien, der Steuerungsdatei **yield.avx** und der Programmdatei **yield.dll**. Während die Steuerungsdatei als Schnittstelle für den Informationsaustausch zwischen dem Anwender und ArcView sorgt, sind in der Programmdatei yield.dll Programmroutinen enthalten, auf die bei erweiterten Simulationen und Analysen zugegriffen wird. Die **Installation** ist einfach, da beide Dateien lediglich in folgende Verzeichnisse kopiert werden müssen:

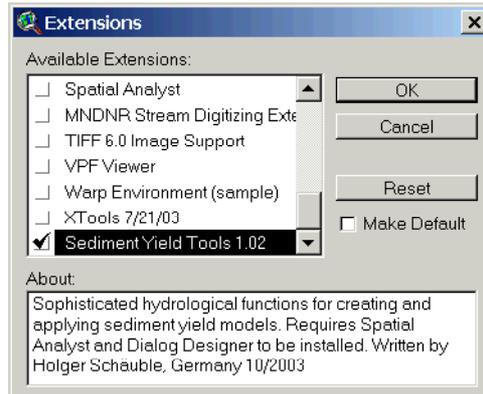
- Die Steuerungsdatei yield.avx muss in das Erweiterungsverzeichnis von ArcView kopiert werden. Auf Computern mit Windows 95/98/ME/2000/XP hat dieses Verzeichnis den Namen EXT32 und befindet sich eine Ebene unter dem Programmverzeichnis von ArcView (z.B. ...\\Av_gis30\\ArcView\\Ext32\\...).
- Die Programmdatei yield.dll muss in das Programmverzeichnis von ArcView kopiert werden. Auf Computern mit Windows 95/98/ME/2000/XP hat dieses Verzeichnis den Namen BIN32 und befindet sich ebenfalls eine Ebene unter dem Programmverzeichnis von ArcView (z.B. ...\\Av_gis30\\ArcView\\Bin32\\...). Die in C/C++ geschriebene Laufzeitbibliothek yield.dll funktioniert nur in einer Windows-Umgebung, nicht jedoch auf Systemen mit anderen Betriebssystemen wie etwa LINUX oder MACOS.

Nach der Installationsprozedur kann STools - wie jede andere Erweiterung für ArcView auch - auf die übliche Weise gestartet werden, d.h. mit der Auswahl von Sediment Yield Tools 1.03 im Menüpunkt *File/Extensions...* (Abb. 1).

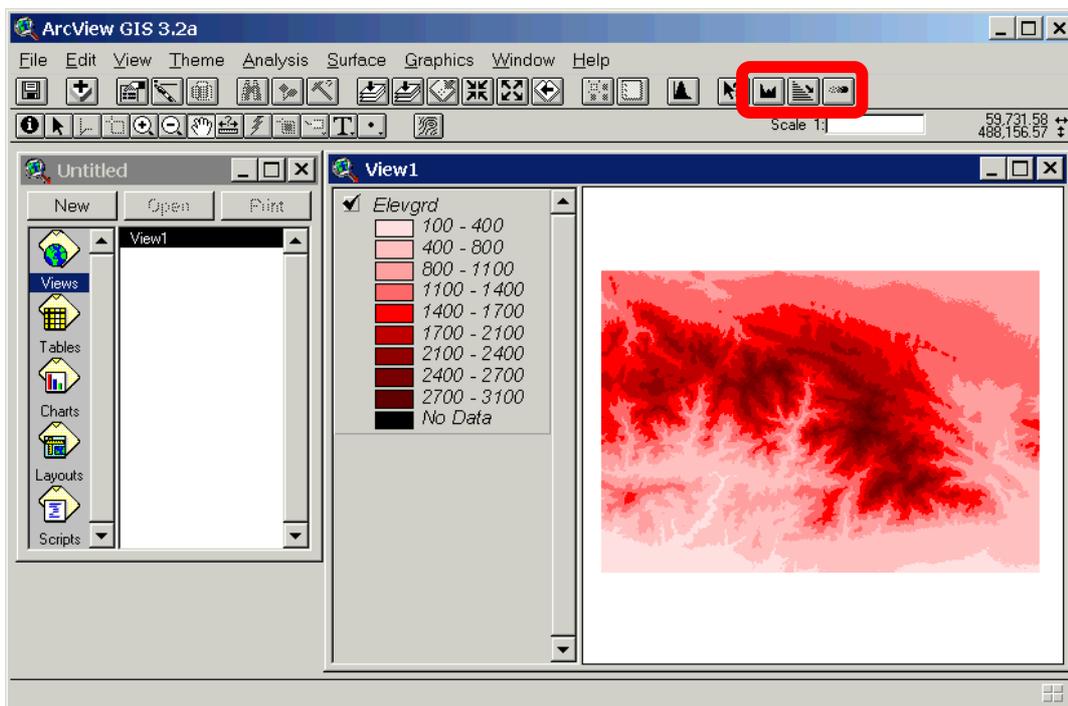
Nach erfolgter Aktivierung erscheinen mit jedem neuen Ansichtsfenster (= View) drei neue Schaltflächen (Abb. 2). Jede dieser Schaltflächen startet wiederum ein eigenes Analysefenster, das unterschiedliche Funktionen zur Korrektur von digitalen Höhenmodellen, zur hydrologischen Analyse von Einzugsgebieten oder zur Erstellung von Sedimentfrachtmodellen bietet. Alle Funktionen werden im Folgenden umfassend beschrieben und mit ausführlichen Beispielen illustriert. Alle dabei benutzten Dateien finden sich entweder auf der beiliegenden CDROM oder stehen unter www.terracs.de zum Download bereit.

Abbildung 1:

Aktivierung von Sediment Yield Tools 1.03 über das Extensionsfenster von ArcView 3.x

**Abbildung 2:**

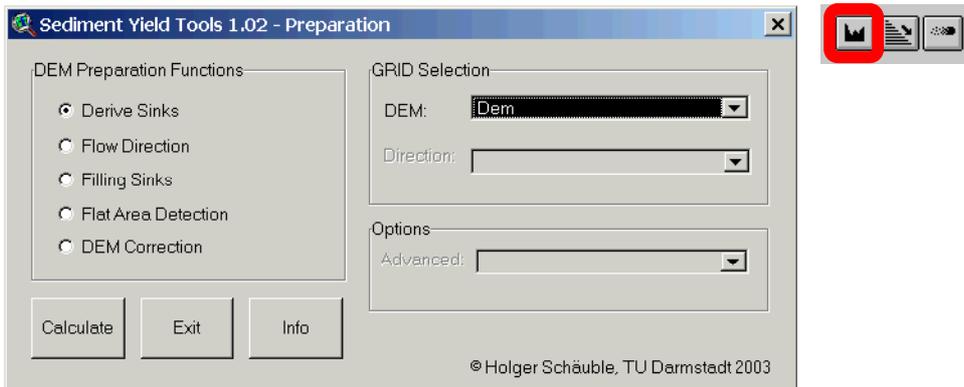
Buttons von Sediment Yield Tools (rot umrandet) zur Auswahl von verschiedenen Analysefenstern



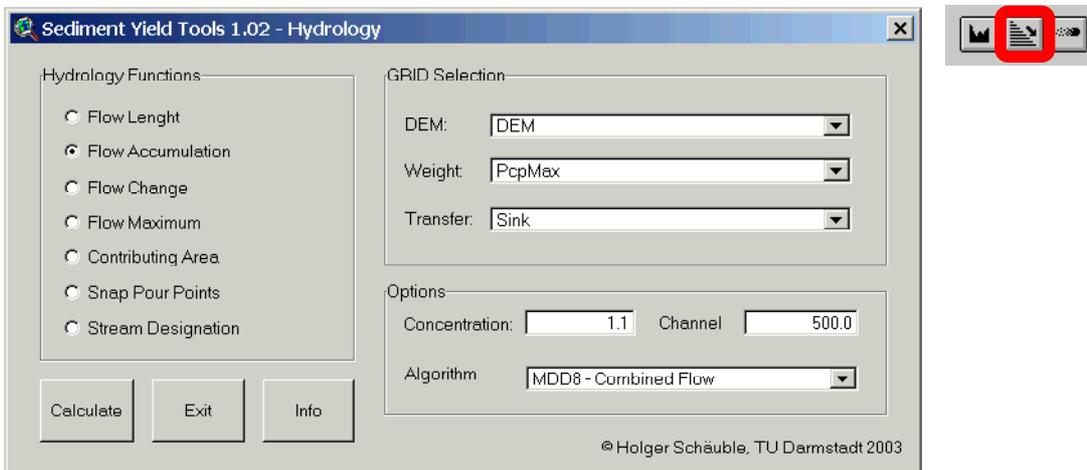
Jeder der neuen Schaltfläche stellt spezielle Analysefunktionen zur Verfügung, die entweder zur Korrektur von digitalen Höhenmodellen, hydrologischen Analysen oder zur Erstellung von Sedimentfrachtmodellen dienen. Mit dem linken Button () wird das Fenster „**Preparation**“ geöffnet (Abb. 3), mit dem Mängel in digitalen Höhenmodellen aufgespürt und gegebenenfalls korrigiert werden können. Ohne eine solche Korrektur würden alle nachfolgenden Berechnungen u.U. fehlerhaft, deshalb steht dieses Analysefenster am Beginn aller Berechnungen mit STools. Dagegen bleibt es dem Anwender überlassen, ob er nun die Funktionen im Fenster „**Hydrology**“ (), Abb. 4) oder im Fenster „**Modelling**“ ( , Abb. 5) benutzt. Sollen ganz allgemein hydrologische Untersuchungen durchgeführt bzw. schon existierende Sedimentfrachtmodelle mit GIS umgesetzt werden, dann sind die Funktionen im ersteren Fenster die Mittel der Wahl. Im Gegensatz dazu sind alle Funktionen im Fenster „**Modelling**“ ausschließlich dazu da, ein neues Sedimentfrachtmodell zu erstellen oder ein existierendes an schon vorhandene Untersuchungsdaten anzupassen.

Abbildung 3:

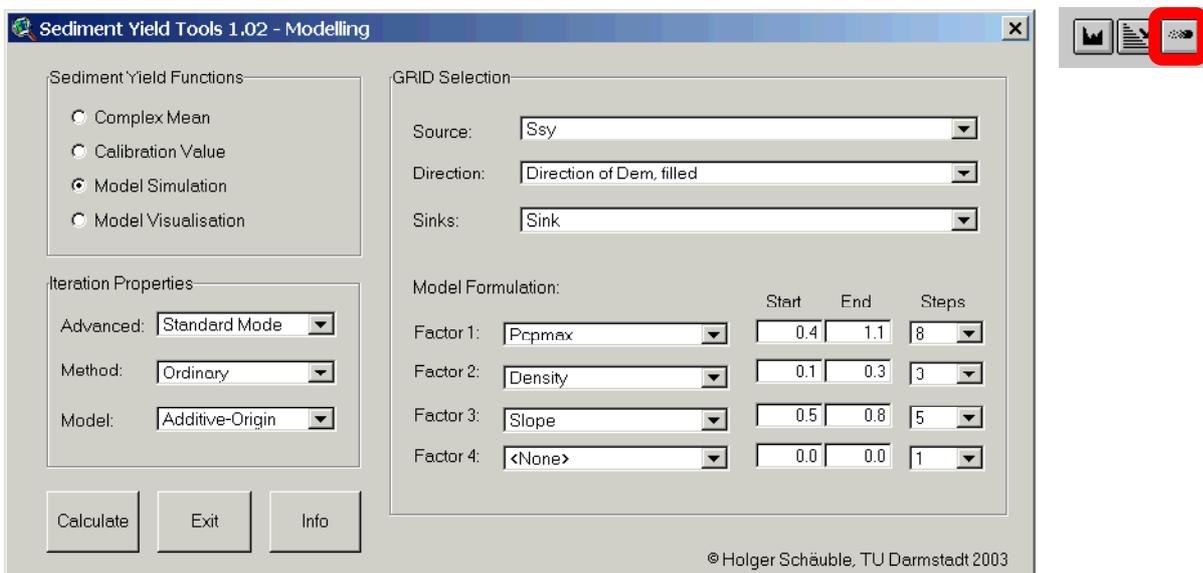
Das Fenster „Preparation“ mit Funktionen zur Korrektur von digitalen Höhenmodellen

**Abbildung 4:**

Das Fenster „Hydrology“ mit Funktionen zur Untersuchung von Einzugsgebieten

**Abbildung 5:**

Das Fenster „Modelling“ mit Funktionen zur Erstellung neuer Sedimentfrachtmodelle



2. Das Fenster „Preparation“: **Funktionen zur Korrektur digitaler Höhenmodelle**

Vor Durchführung hydrologischer Untersuchungen bzw. der Erstellung von Sedimentfrachtmodellen muss die **hydrologische Korrektheit** der verwendeten Höhenmodelle sichergestellt werden. Dies ist notwendig, da Geländemodelle fast immer kleine Mängel aufweisen, die im Zuge ihrer Berechnung entstanden sind (z.B. künstliche Artefakte, abflusslose Senken oder kleine Erhebungen). Besonders kritisch sind in diesem Zusammenhang abflusslose Senken, die zu einer Unterbrechung der Fliesswege führen und damit hydrologische Berechnungen unbrauchbar machen (Abb. 6, links und Abb. 7). Zu ihrer Erkennung und Korrektur werden im Fenster „Preparation“ 4 Funktionen zur Verfügung gestellt, die außerdem von einer Routine zur Berechnung der Fliesswege ergänzt werden (Abb. 3):

1. *Derive Sinks*:

Funktion, die abflusslose Senken in einem Höhenmodell feststellt und diese der Reihe nach durchnummeriert. Es wird ein neues GRID aus einem digitalen Höhenmodell berechnet, das im Auswahlfenster DEM ausgewählt worden ist. Den hydrologisch korrekten Flächen im neuen GRID wird der Wert NoData zugeordnet, abflusslose Senken erhalten dagegen ganze Zahlenwerte.

2. *Filling Sinks*:

Funktion, die abflusslose Senken in einem Höhenmodell solange auffüllt, bis eine Höhengleichheit zur Umgebung hergestellt ist (Abb. 6, Mitte). Dazu wird im Auswahlfenster DEM ein digitales Höhenmodell ausgewählt. Durch das iterative Verfahren kann die Berechnung bei großen Dateien recht lange dauern.

3. *Flat Area Detection*:

Funktion, die flache Gebiete in einem Höhenmodell feststellt und diese der Reihe nach durchnummeriert. Die Bedienung und die Wertezuweisung ist dieselbe wie bei *Derive Sinks* (korrekte Bereiche = NoData, ebene Flächen = ganze Zahlenwerte).

4. *Flow Direction*:

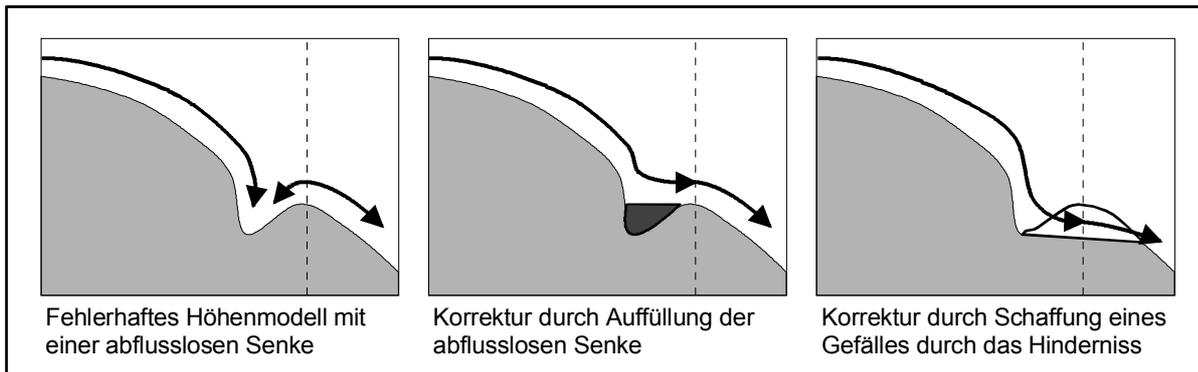
Funktion, mit der die Fliessrichtungen aus einem digitalen Höhenmodell berechnet werden. Es wird ein neues GRID aus einem (zuvor mit *Filling Sinks* korrigierten) digitalen Höhenmodell berechnet. Die Werte des neuen GRIDs schwanken je nach Fliessrichtung zwischen 1 und 128 (vgl. ARCVIEW 3.X ONLINE HILE, BURROUGH & MCDONNELL 1998). In dem separaten Optionsfenster *Advanced* kann angegeben werden, ob die Fliesswege am Rand aus oder in das GRID hinein führen sollen (Force Edges = aus dem GRID heraus, No Force Edges = in das GRID hinein).

5. *DEM Correction*:

Funktion, die abflusslose Senken und ebene Flächen in einem Höhenmodell durch Absenkung der Umgebung korrigiert (Abb. 6, rechts). Dabei wird ein ausgewähltes Höhenmodell in Richtung der Fliesswege untersucht, die in einem zuvor mit *Flow Direction* errechneten GRID gespeichert sind. Im Falle eines gegenläufigen Gefälles oder einer ebenen Fläche wird das Geländemodell in Richtung der Fliesswege um einen minimalen Betrag erniedrigt (um genau 0.0001), solange bis kein Widerspruch mehr zwischen den Fliessrichtungen und dem Relief des Höhenmodells vorhanden ist. Bei einem korrekten Gefälle, d.h. in Richtung der Fliesswege wird das Höhenmodell nicht verändert.

Abbildung 6:

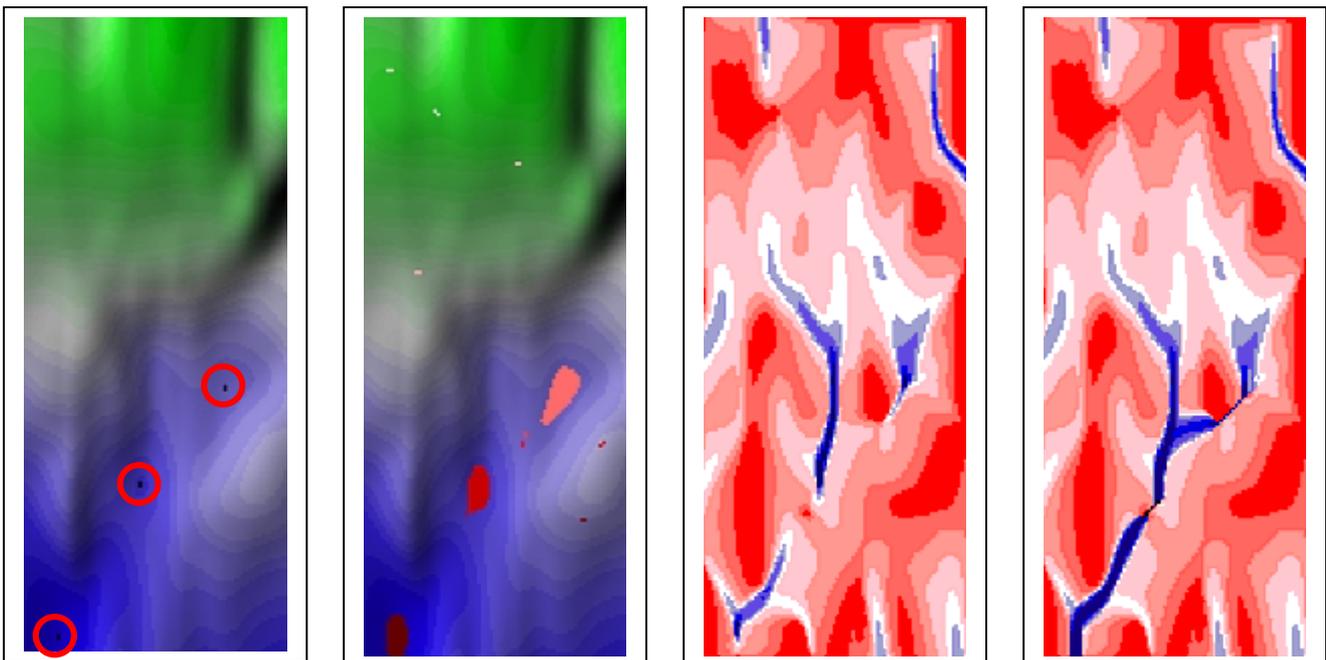
Abflußlose Senken und ihre Behandlung in einem Höhenmodell



Links: Abflusslose Senken und ihre Auswirkungen auf den Wasserfluss, illustriert am Beispiel eines Hanges; Senken unterbrechen den Wasserfluss und verfälschen dadurch hydrologische Berechnungen, insbesondere dann, wenn sie als Artefakte bei der Berechnung eines Höhenmodells entstanden sind; **Mitte:** 1. Möglichkeit, ein Höhenmodell für hydrologische Analysen vorzubereiten: Auffüllung einer abflusslosen Senke mit der Funktion Fill Sinks (benötigt für nachfolgende Analysen nach der D8 – Single Flow Methodik); **Rechts:** 2. Möglichkeit, ein Höhenmodell für hydrologische Analysen vorzubereiten: Durchbruch einer abflusslosen Senke mit der Funktion DEM Correction (benötigt für nachfolgende Analysen nach der MD – Multiple Flow und der MDD8 – Combined Flow Methodik)

Abbildung 7:

Notwendigkeit und Funktionen zur Korrektur eines digitalen Höhenmodells



Links: Digitales Höhenmodell mit abflusslosen Senken (rot umrandete schwarze Pixel); **Mitte Links:** Korrigiertes digitales Höhenmodell mit aufgefüllten abflusslosen Senken, die nun als ebene Flächen vorhanden sind (rötliche Gebiete); **Mitte Rechts:** Wasserabfluss, berechnet aus dem linken nicht korrigierten Höhenmodell (Abflussmenge steigt von rot nach blau); **Rechts:** Wasserabfluss, berechnet aus einer korrigierten Version des linken Höhenmodells (Abflussmenge steigt von rot nach blau)

3. Das Fenster „Hydrology“: **Funktionen zur hydrologischen Analyse von Einzugsgebieten**

Im Fenster „Hydrology“ werden die verschiedensten Funktionen zur **hydrologischen Analyse von Einzugsgebieten und zur Umsetzung bestehender Sedimentfrachtmodelle** zur Verfügung gestellt. Davon sind einige schon in der erweiterten Grundausstattung vieler GIS-Systeme enthalten (z.B. Fließlängenanalyse oder einfache Akkumulationsberechnung), die meisten jedoch überhaupt nicht oder zumindest nicht mit den zur Verfügung stehenden Analyseoptionen. Dazu zählen insbesondere die Funktionen *Flow Accumulation*, *Flow Change* und *Flow Maximum*. Diese bieten zum einen die Möglichkeit, unterschiedliche Versickerungsraten zu berücksichtigen, zum anderen kann die Hydrologie auch mit unterschiedlichen Fließalgorithmen simuliert werden, mit einem herkömmlichen Single-Flow Algorithmus (D8), mit einem Multiple-Flow Algorithmus (MD) oder mit einer Kombination aus beiden. Über die Funktionsweise der einzelnen Fließalgorithmen, ihre Vor- und Nachteile geben u.a. COSTA-CABRAL & BURGESS 1994, WILSON & GALLANT 2000, SCHÄUBLE 1999, TARBOTON 1997 und MOORE 1996 Auskunft. Insgesamt kann zwischen folgenden Analysefunktionen gewählt werden (Abb. 4):

1. *Flow Length*:

Funktion, welche die Fließlängen aus einem digitalen Höhenmodell berechnet. Dabei wird jedem Pixel der Wert des längsten möglichen Fließwegs zugeordnet. Es können gewichtete Fließlängenberechnungen mit einem Gewichtungsgrid (bei einer Selektion im Auswahlfenster *Weight*) durchgeführt werden. Ferner kann zwischen abwärts gerichteter Analyse in Richtung des Gefälles (Downward from divides) oder aufwärts gerichteter Analyse gegen das Gefälle (Upward from divides) gewählt werden. Da diese Funktion ein Teil der Funktionalität von ArcView ist, finden sich in der Onlinehilfe unter dem Stichwort FLOWLENGTH weitere Informationen und Beispiele.

2. *Flow Accumulation*:

Funktion, welche die Fließakkumulation aus einem digitalen Höhenmodell berechnet. Die Fließakkumulation ist eine Funktion, welche die Wasser- oder Stoffmenge berechnet, die sich von den Wasserscheiden bis in die Tiefenlinien des Reliefs bewegt (vgl. Abb. 11, links). Es kann zwischen folgenden Methoden gewählt werden:

- **D8 – Single Flow**: Akkumulationsberechnung nach dem Single-Flow-Prinzip (D8 Single-Flow-Algorithmus nach O'CALLAGHAN & MARK 1984). Die Funktionsweise dieser Berechnungsmethodik ist in Abb. 8 dargestellt. STools benötigt für die Analyse zumindest mit *Flow Direction* erstelltes Fließrichtungsraster (Selektion im Auswahlfenster *Direction*), ein Gewichtungs- oder Transfergrid kann optional ausgewählt werden (s.u.).
- **MD – Multiple Flow**: Akkumulationsberechnung nach dem Multiple-Flow-Prinzip (MD Multiple-Flow-Algorithmus nach QUINN ET AL. 1991). Die Funktionsweise dieser Berechnungsmethodik findet sich in Abb. 8. STools benötigt für die Analyse zumindest 2 Daten: ein digitales Höhenmodell (Selektion im Auswahlfenster *DEM*) und eine Zahlenangabe über die Art der Weiterleitung (Optionsfeld *Concentration*: Zahl < 1 => disperse Weiterleitung, Zahl > 1 => konzentrierte Weiterleitung, vgl. auch Abb. 9).
- **MDD8 – Combined Flow**: Akkumulationsberechnung mit kombinierter Anwendung des Multiple-Flow und des Single-Flow-Prinzips. Dabei findet ab einem bestimmten Schwellenwert ein Wechsel von der Multiple-Flow zur Single-Flow-Methodik statt, und umgekehrt (vgl. Abb. 8). STools benötigt für die Analyse zumindest 3 Daten: ein digitales Höhenmodell und eine Zahlenangabe über die Art der Weiterleitung (s.o.), sowie zusätzlich die Angabe eines Schwellenwertes, ab dem zwischen Single- und Multiple-Flow-Berechnungen gewechselt wird (Optionsfeld *Channel*: Überschreitung der Zahl => Wechsel zur D8-Methodik, Unterschreitung der Zahl => Wechsel zur MD-Methodik).

2. *Flow Accumulation*: (Forts.)

Unabhängig vom Algorithmus kann bei *Flow Accumulation* die Berechnung mit einem optionalen Gewichtungsgrid und /oder einem optionalen Transfergrid beeinflusst werden. Mit einem Gewichtungsgrid (Auswahlfeld *Weight*) kann der Initialwert eines Pixels, der normalerweise 1 beträgt, modifiziert werden (z.B. um die Auswirkungen räumlich unterschiedlicher Niederschlagsmengen zu simulieren), mit einem Transfergrid (Auswahlfeld *Transfer*) lässt sich die Weiterleitung in tiefer liegende Bereiche beeinflussen (z.B. um die Auswirkungen unterschiedlicher Versickerungsraten im Boden zu simulieren). Ohne ein Transfergrid wird bei einem Gefälle die gesamte Stoffmenge in die jeweils tiefer liegenden Pixel weitergeleitet, mit einem Transfergrid kann dagegen der Stofffluss verstärkt oder abgeschwächt werden (Pixelwert = 1: 100% ige Weitergabe; Pixelwert < 1: Abschwächung mit einer Weitergabe in %*100; Pixelwert > 1: Verstärkung mit einer Weitergabe in %*100).

3. *Flow Change*:

Funktion, welche die Veränderung in Richtung des Gefälles ermittelt. Anhand eines ausgewählten Werterasters wird berechnet, ob sich die Pixelwerte in der Fließrichtung erhöhen oder erniedrigen (vgl. Abb. 11, links). Es können verschiedene Optionen ausgewählt werden:

- **D8 – Single Flow**: Veränderung in Fließrichtung nach dem Single-Flow-Prinzip. Dabei wird in Richtung des stärksten Gefälles ermittelt, ob sich die Werte des Werterasters erhöhen oder erniedrigen. Die Funktionsweise dieser Berechnungsmethodik ist in Abb. 9 dargestellt. STools benötigt für die Analyse zumindest ein mit *Flow Direction* erstelltes Fließrichtungsraster (Selektion im Auswahlfenster *Direction*) und ein Grid mit Zahlenwerten, deren Veränderung untersucht werden soll (Auswahlfenster *Value*).
- **MD – Multiple Flow**: Veränderung in Fließrichtung nach dem Multiple-Flow-Prinzip. Die Funktionsweise dieser Berechnungsmethodik findet sich in Abbildung 9. STools benötigt für die Analyse zumindest 3 Daten: ein digitales Höhenmodell (Selektion im Auswahlfenster *DEM*), ein Grid mit Zahlenwerten, deren Veränderung untersucht werden soll und eine Zahlenangabe über die Art der Weiterleitung (Optionsfeld *Concentration*: Zahl < 1 => disperse Weiterleitung, Zahl > 1 => konzentrierte Weiterleitung).
- **MDD8 – Combined Flow**: Veränderung in Fließrichtung, berechnet mit kombinierter Anwendung des Multiple-Flow und des Single-Flow-Prinzips. Dabei findet ab einem bestimmten Schwellenwert ein Wechsel von der Multiple-Flow zur Single-Flow-Methodik statt, und umgekehrt (vgl. Abb. 9). STools benötigt für die Analyse zumindest 4 Daten: ein digitales Höhenmodell und eine Zahlenangabe über die Art der Weiterleitung (s.o.), sowie zusätzlich die Angabe eines Schwellenwertes, ab dem zwischen Single- und Multiple-Flow-Berechnungen gewechselt wird (Optionsfeld *Channel*: Überschreitung der Zahl => Wechsel zur D8-Methodik, Unterschreitung der Zahl => Wechsel zur MD-Methodik).

4. *Flow Maximum*:

Funktion, welche die maximalen Werte ermittelt, die in einem rückwärtigen Einzugsgebiet aufgetreten sind (vgl. Abb. 11, Mitte). Im Unterschied zur Funktion *Flow Accumulation* werden hier nicht alle Werte kumulativ aufsummiert, sondern nur der jeweils höchste Einzelwert ermittelt und in Fließrichtung durchgeschleust. Es können verschiedene Optionen ausgewählt werden:

- **D8 – Single Flow**: Ermittlung des Maximalwertes in Fließrichtung nach dem Single Flow Prinzip. STools benötigt für die Analyse zumindest ein mit *Flow Direction* erstelltes Fließrichtungsraster (Selektion im Auswahlfenster *Direction*) und ein Grid mit Zahlenwerten, das auf die Maximalwerte untersucht werden soll (Auswahlfenster *Value*).

4. *Flow Maximum:* (Forts.)

- **MD – Multiple Flow:** Ermittlung des Maximalwertes nach dem Multiple Flow Prinzip. STools benötigt für die Analyse zumindest 2 Daten: ein digitales Höhenmodell (Selektion im Auswahlfenster *DEM*) und ein Grid mit Zahlenwerten, das auf die Maximalwerte untersucht werden soll. Im Gegensatz zur Funktion Flow Accumulation kann hier jedoch keine Zahlenangabe über die Art der Weiterleitung angegeben werden, da eine solche für Maximumberechnungen irrelevant ist.
- **MDD8 – Combined Flow:** Ermittlung des Maximalwertes, berechnet mit kombinierter Anwendung des Multiple-Flow und des Single-Flow-Prinzips. Dabei findet ab einem bestimmten Schwellenwert ein Wechsel von der Multiple-Flow zur Single-Flow-Methodik statt, und umgekehrt (vgl. Abb. 9). STools benötigt für die Analyse zumindest 3 Daten: ein digitales Höhenmodell, ein Grid mit Zahlenwerten, das auf die Maximalwerte hin untersucht werden soll und zusätzlich die Angabe eines Schwellenwertes, ab dem zwischen Single und Multiple-Flow-Berechnungen gewechselt wird (Optionsfeld *Channel*: Überschreitung der Zahl => Wechsel zur D8-Methodik, Unterschreitung der Zahl => Wechsel zur MD-Methodik).

5. *Contributing Area:*

Funktion, mit der das Einzugsgebiet von verschiedenen Messpunkten oder –flächen berechnet werden kann (vgl. Abb. 13, links). STools benötigt für die Analyse genau zwei Dateien: ein mit *Flow Direction* erstelltes Fließrichtungsraster (Auswahlfenster *Direction*) und eine Rasterdatei, in der die Endpunkte (z.B. Messstationen) der zu bestimmenden Einzugsgebiete enthalten sind (Endpunkte = ganze Zahlenwerte, übriger Bereich = NoData-Werte). Da diese Funktion ein Teil der Funktionalität von ArcView ist, finden sich in der Onlinehilfe unter dem Stichwort WATERSHED weitere Informationen und Beispiele

6. *Snap Pour Points:*

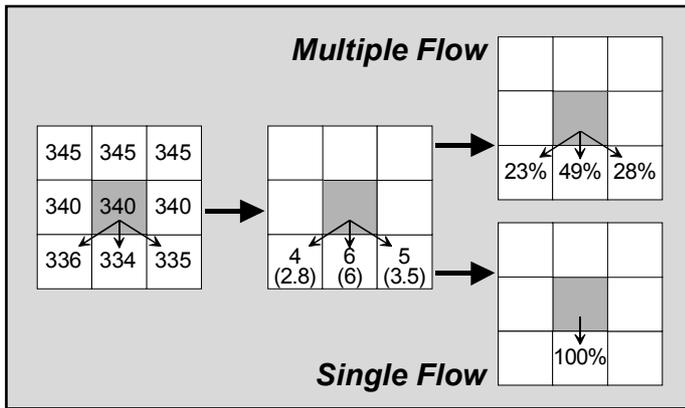
Funktion, mit der ungenau lokalisierte Messpunkte automatisch an ihre optimale Position verschoben werden können (vgl. Abb. 13, rechts). Dabei werden einzelne Pixelpunkte innerhalb eines bestimmten Suchradius dorthin verschoben, wo ein Gewichtungsraster die höchsten Werte besitzt. STools benötigt dafür 3 verschiedene Daten: ein Messpunkteraster (Auswahlfeld *Points*; Messpunkte sind Ganzzahlen; NoData-Werte sind Flächen dazwischen, die nicht berücksichtigt werden), ein Werteraster (Auswahlfenster *Value*) und eine Angabe über die Größe des maximalen Suchradius, innerhalb dessen die entsprechenden Pixel verschoben werden dürfen (Optionsfenster *Distance*). Da diese Funktion ein Teil der Funktionalität von ArcView ist, finden sich in der Onlinehilfe unter dem Stichwort SNAPPOURPOINT weitere Informationen und Beispiele

7. *Stream Designation:*

Funktion, mit der einzelne Flussäste gekennzeichnet und nummeriert werden (vgl. Abb. 13, Mitte). Dabei wird eine linienhafte Rasterdatei (Auswahlfenster *Streams*; Flusslinien als Ganzzahlen, NoData-Werte als Fläche dazwischen) mit Hilfe eines Fließrichtungsrasters (Auswahlfenster *Direction*) untersucht und die einzelnen Flussäste nach einer von 3 möglichen Auswahlmethoden durchnummeriert (Optionsfenster *Method* mit den Auswahlmöglichkeiten: Stream Link = Einfache Nummerierung, bei der jeder Flussast eine unterschiedliche ID-Nummer bekommt; Stream Order – Strahler => Charakterisierung der Flussäste nach Strahler; Stream Order – Shreve => Charakterisierung der Flussäste nach Shreve). Da diese Funktion ein Teil der Funktionalität von ArcView ist, finden sich in der Onlinehilfe unter den Stichworten STREAMLINK und STREAMORDER weitere Informationen und Beispiele

Abbildung 8:

Grundlegende Algorithmen zur Berechnung des Fließverhaltens (Single Flow und Multiple Flow)



Links:

Ausschnitt eines Höhenmodells mit Höhen in m und den möglichen Fließpfaden vom mittleren Pixel aus in Richtung des Gefälles

Mitte:

Höhenunterschiede in Richtung der Fließpfade in m und korrigierte Höhenunterschiede in Richtung der Eckpixel (Höhenunterschied / $\sqrt{2}$ wegen des längeren Weges)

Rechts oben:

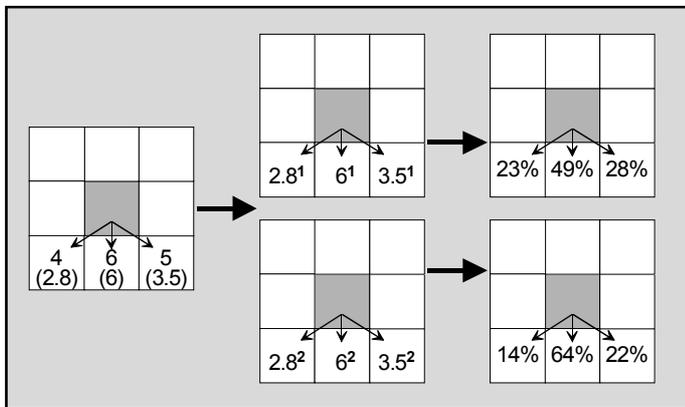
Zugeführte Fließanteile nach dem Multiple Flow Prinzip (berechnet nach: Teilgefälle / \sum Teilgefälle)

Rechts unten:

Zugeführter Fließanteil nach dem Single Flow Prinzip (berechnet nach: 100% in Richtung des stärksten Gefälles)

Abbildung 9:

Multiple Flow Berechnungen mit veränderten Gewichtungen



Links:

Höhenunterschiede in Richtung der Fließpfade in m wie bei Abbildung 8, Mitte

Oben, Mitte-Rechts:

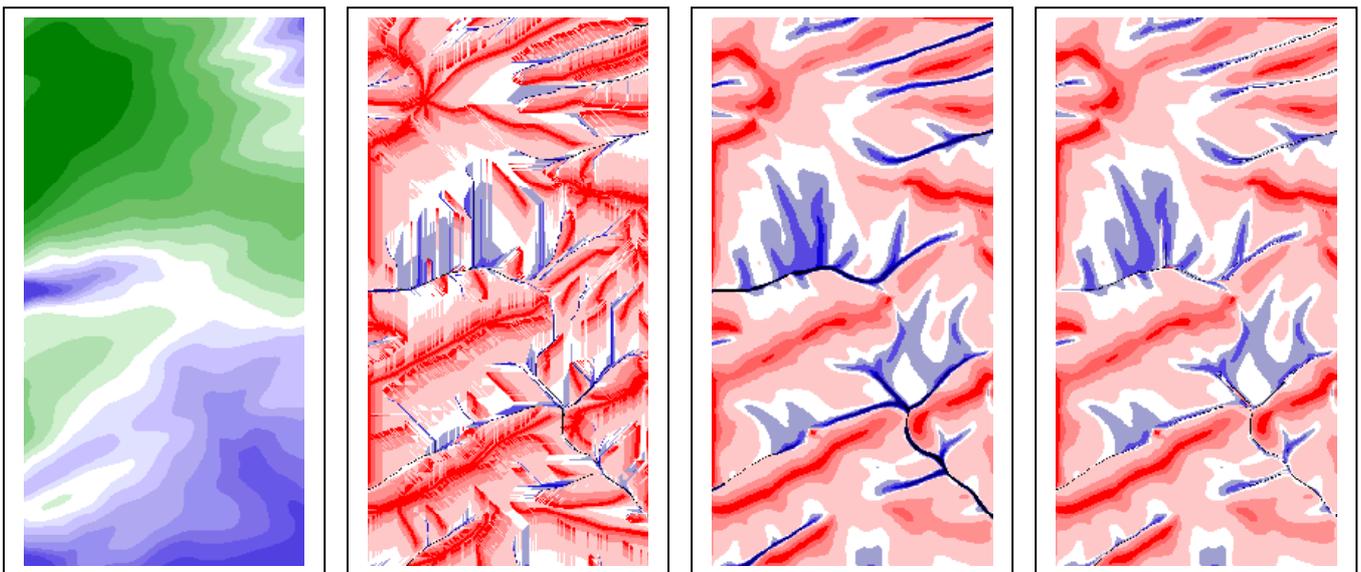
Zugeführte Fließanteile nach dem Multiple-Flow-Prinzip, berechnet mit einem Konzentrationswert von $c=1$ nach der Formel: $\text{Teilgefälle}^c / \sum \text{Teilgefälle}^c$

Unten, Mitte-Rechts:

Zugeführte Fließanteile nach dem Multiple-Flow-Prinzip, berechnet mit einem Konzentrationswert von $c=2$ nach der Formel: $\text{Teilgefälle}^c / \sum \text{Teilgefälle}^c$

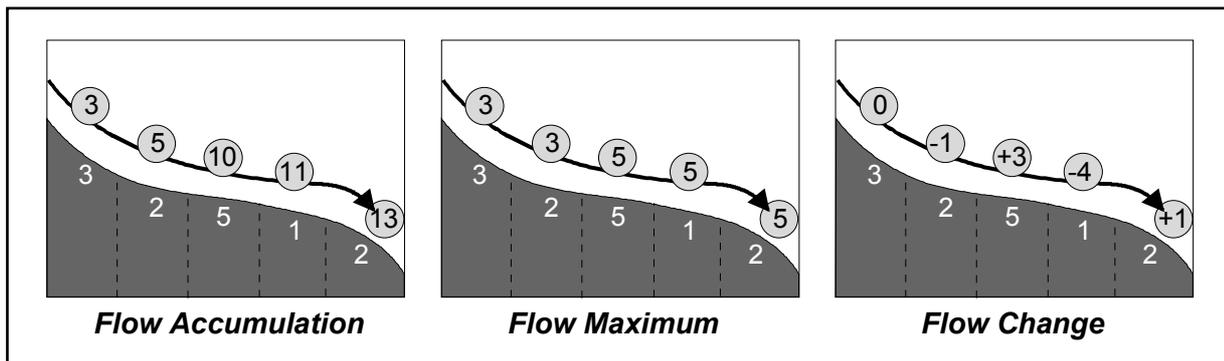
Abbildung 10:

Beispiele für Akkumulationsberechnungen mit unterschiedlichen Algorithmen



Links: Digitales Höhenmodell (ansteigende Höhen von blau nach grün); **Mitte Links:** Flow Accumulation nach dem D8 Single-Flow-Prinzip (Abflussmengen steigen von rot nach blau); **Mitte Rechts:** Flow Accumulation nach dem MD Multiple-Flow-Prinzip; **Rechts:** Flow Accumulation nach dem MDD8 Combined-Flow-Prinzip

Abbildung 11:
Grundlegende hydrologische Analysefunktionen



Funktionsweise von Fließfunktionen am Beispiel eines Hanges; die weißen Zahlen an der Hangoberfläche kennzeichnen die Wassermenge in l, die auf den jeweiligen Hangabschnitt gefallen ist. Die umrandeten schwarzen Zahlen oberhalb der Hangoberfläche sind die berechneten Werte der jeweiligen Analysefunktion; **Links:** Kumulierte Wassermenge, berechnet mit der Funktion *Flow Accumulation*; **Mitte:** Höchste gefallene Wassermenge im rückwärtigen Gebiet, berechnet mit *Flow Maximum*; **Rechts:** Veränderung der gefallenen Wassermenge in Richtung des Gefälles, berechnet mit der Funktion *Flow Change*

Abbildung 12:
Berechnungen mit einem Gewichtungsraster oder einem Transferraster

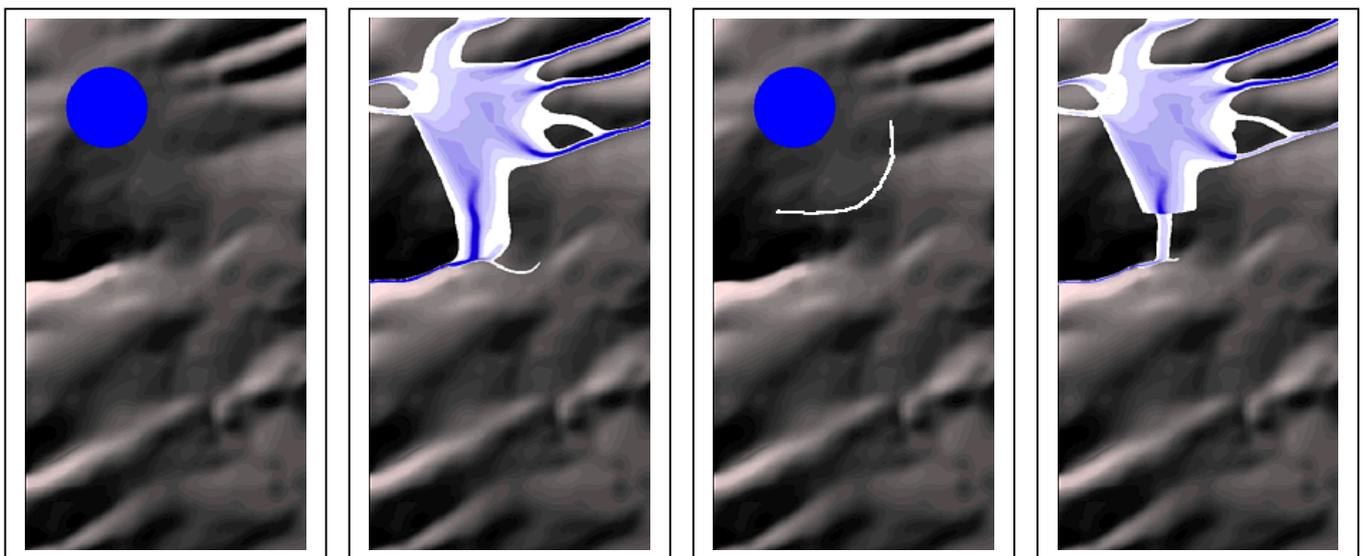


Illustration von Berechnungen mit der Funktion *Flow Accumulation*, mit Berücksichtigung von Gewichtungs- und Transferrastern. **Links:** Gewichtungsraster vor schattiertem Höhenmodell, die blaue Fläche im Gewichtungsgrid ist eine Wasser- oder Schadstoffquelle; **Mitte Links:** *Flow Accumulation*, berechnet aus dem linken Gewichtungsraster und dem Höhenmodell, die Wassermenge steigt von weiß nach blau; **Mitte Rechts:** Gewichtungs- und Transferraster vor einem reliefierten Höhenmodell. Die blaue Fläche entspricht dem Gewichtungsgrid oben, die weiße Linie entspricht einem Wert von 0,1 im Transferraster (hier wird die Wirkung eines Damms symbolisiert, bei dem der Wasser- oder Schadstofftransfer um 90% reduziert wird); **Rechts:** *Flow Accumulation*, berechnet aus dem linken Höhenmodell und den beiden Gewichtungs- und Transferrastern, die Wassermenge steigt von weiß nach blau

PS: **No Data Werte:**

Hydrologische Analysen mit den oben beschriebenen Funktionen können generell durch die Benutzung von No-Data-Werten entscheidend verfeinert werden. Dabei bewirken Pixel mit NoData Werten eine Unterbrechung des Wasserflusses und wirken somit als hydrologische Barrieren bzw. Flächen ohne jedweden Abfluss. Einige Beispiele dazu finden sich in Abb. 14.

Abbildung 13:

Analyse der Einzugsgebietsflächen und der Flusslinien, Positionskorrektur von Messstationen

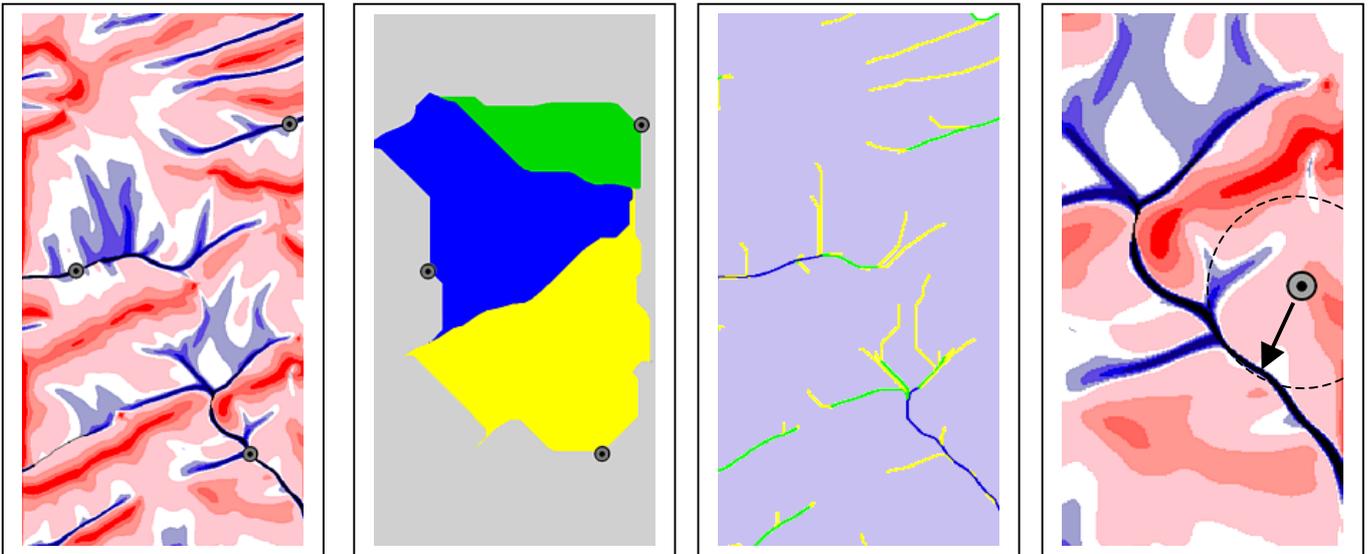


Illustration von hydrologischen Funktionen zur Charakterisierung von Einzugsgebieten und Flusssystemen, sowie zur Korrektur ungenau lokalisierter Messstellen. **Links:** Flussmessstellen (= graue Punkte), hinterlegt mit einem durch *Flow Accumulation* berechneten Abflussraster; **Mitte Links:** Einzugsgebiete der links gezeigten Messstellen, berechnet mit der Funktion *Contributing Area*; **Mitte Rechts:** Klassifizierung aller einzelnen Flussarme nach der Methodik von Strahler (gelb = 1.Ordnung, grün = 2.Ordnung, blau = 3.Ordnung), berechnet mit der Funktion *Stream Designation*; **Rechts:** Illustration der Funktion *Snap Pour Points* anhand eines ungenau lokalisierten Punktes, der auf das Pixel mit dem maximalen Wasserfluss innerhalb eines frei definierten Suchradius verschoben wird.

Abbildung 14:

Verfeinerte Analysen mit NoData Werten: Hydrologische Barrieren und punktförmige Ausbreitung von Schadstoffen

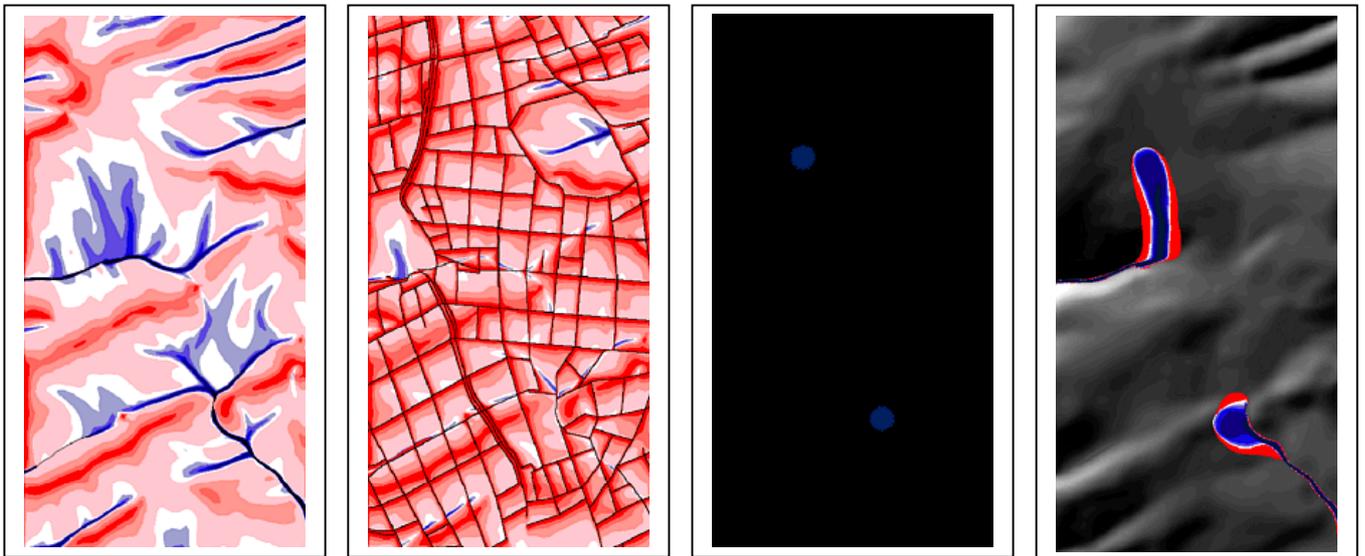


Illustration von hydrologischen Analysen mit der Nutzung von datenlosen Bereichen (= einzelne NoData-Werte bzw. weitreichende Flächen mit NoData-Werten); **Links:** *Flow Accumulation* nach dem MD Multiple-Flow-Prinzip, herkömmliche Berechnung; **Mitte Links:** *Flow Accumulation* nach dem MD Multiple Flow Prinzip, Berechnung unter Berücksichtigung von abflusshemmenden Barrieren, die in einem Gewichtungsraster als NoData-Werte enthalten waren (= schwarze Linien, d.h. Schutzgräben, die den Wasserfluss unterbinden); **Mitte Rechts:** Gewichtungsraster mit zwei Abflussquellen (= blaue Kreise) und Gebiete ohne jedweden Vorrat an fließfähigem Oberflächenwasser (= schwarze Bereiche als Flächen mit NoData Werten); **Rechts:** *Flow Accumulation* nach dem MD Multiple-Flow-Prinzip, Berechnung unter Berücksichtigung des linken Gewichtungsrasters mit den darin enthaltenen beiden Schadstoffquellen.

4. Das Fenster „Modelling“: **Funktionen zur Erstellung von Sedimentfrachtmodellen**

Im Fenster „Modelling“ finden sich Analyseroutinen, mit denen **überregionale Sedimentfrachtmodelle** erstellt werden können, etwa in der Art wie sie bei ALLEN (1997), LUDWIG & PROBST (1998) oder HARRISON (2000) beschrieben sind (z.B. eine Formel nach folgendem Muster: $\text{Sedimentfracht} = 3 * \text{Neigung}^{0,3} * \text{Niederschlag}^{0,9}$). Dazu zählen Funktionen, mit denen sich die Einflussfaktoren der Sedimentfracht analysieren lassen, Funktionen zur Kalibrierung bestehender Sedimentfrachtmodelle und vor allem Funktionen, mit denen auf iterative Weise ein neues Sedimentfrachtmodell simuliert werden kann. Trotz der kompakten äußeren Form ist dieses Modul sehr vielseitig, da sich fast alle Funktionen mit verschiedenen Optionen aufrufen lassen. So kann beispielsweise entschieden werden, ob:

- das zukünftige Sedimentfrachtmodell eine additive oder multiplikative Form ausweisen soll
- nach der Einzugsgebietsgröße gewichtet werden soll oder nicht,
- Sedimentsenken wie z.B. Staudämme berücksichtigt werden sollen und wenn ja, ob dabei zusätzlich der Zeitfaktor in Bezug auf die Messdauer berücksichtigt werden soll.

Jenseits aller Unterschiede besitzen die hier beschriebenen Analysefunktionen einen gemeinsamen Kern, d.h. eine **identische Grundroutine**, die bei jeder Berechnung zur Anwendung kommt und die auf der folgenden Seite beschrieben wird. Diese Routine berechnet die gewichtete *Flow Accumulation* mit einem Gewichtungsraster und einem D8 Single-Flow Algorithmus (vgl. Abb. 11) und dividiert diese dann automatisch durch die Größe des zurückliegenden Einzugsgebietes. Als Ergebnis entsteht ein Raster mit Mittelwerten, die sich nur auf ihr jeweils zurückliegendes Einzugsgebiet beziehen. Eine Illustration findet sich in Abb. 15, wo am Beispiel der gefallenen Regenmenge der mittlere Wasserabfluss berechnet wird. Analog kann mit allen möglichen Variablen verfahren werden, die für die Sedimentfracht in irgendeiner Form relevant sind (z.B. mit einer Berechnung der durchschnittlichen Vegetationsbedeckung oder der Bodendichte im rückwärtigen Einzugsgebiet). Neben der automatischen Ermittlung der Mittelwerte besitzt diese Grundroutine jedoch noch eine weitere und entscheidende Eigenschaft, die sie von allen hydrologischen Funktionen im zuvor beschriebenen Fenster „Hydrology“ grundlegend unterscheidet: sie kann den **Faktor Zeit** bei der Berechnung berücksichtigen.

Der Faktor Zeit ist bei Sedimentfrachtanalysen von grundlegender Bedeutung, weil sich viele geökologische Eigenschaften im Laufe der Zeit ändern und die meisten Sedimentfrachtdaten während unterschiedlicher Zeiträume ermittelt wurden (vgl. z.B. die Messdaten von MILLIMAN ET AL. 1995 oder MEADE & PARKER 1985). Ein Staudamm im rückwärtigen Einzugsgebiet hat beispielsweise ganz unterschiedliche Auswirkungen auf die gemessene Sedimentfracht, je nachdem, ob er schon vor der Messung bestand oder erst im Verlauf der Messperiode gebaut worden ist. Zeitlich variable Einflüsse wie diese beeinflussen die gemessene Sedimentfracht im Endeffekt ebenso wie die einzelnen Geofaktoren Relief, Klima, Boden und Vegetation und müssen daher berücksichtigt werden (vgl. SCHÄUBLE 2004). Dies geschieht in STools durch die Einbeziehung von 3 **zusätzlichen Jahresrastern**, die ein Transfer- und Quellenraster um die notwendigen Jahresangaben ergänzen (vgl. Abb.16/18): Während ein Jahresraster in Kombination mit einem Transferraster den Beginn eines verstärkten oder abgeschwächten Sedimenttransports dokumentiert, markieren zwei weitere Jahresraster den Beginn und das Ende jeder Sedimentfrachtmessung, deren Werte in einem Stationsraster zu finden sind (Abb.18). Damit kann die zeitliche Variabilität in einem Einzugsgebiet berücksichtigt werden. Die Vorgehensweise und Logik, nach denen dies in STools berechnet wird, zeigen die folgenden Abbildungen, wobei in Abb. 15 das generelle Grundprinzip und in Abb. 16 die eher technische Umsetzung illustriert werden.

Abbildung 15:

Gemeinsame Grundroutine aller Funktionen im Fenster „Modelling“

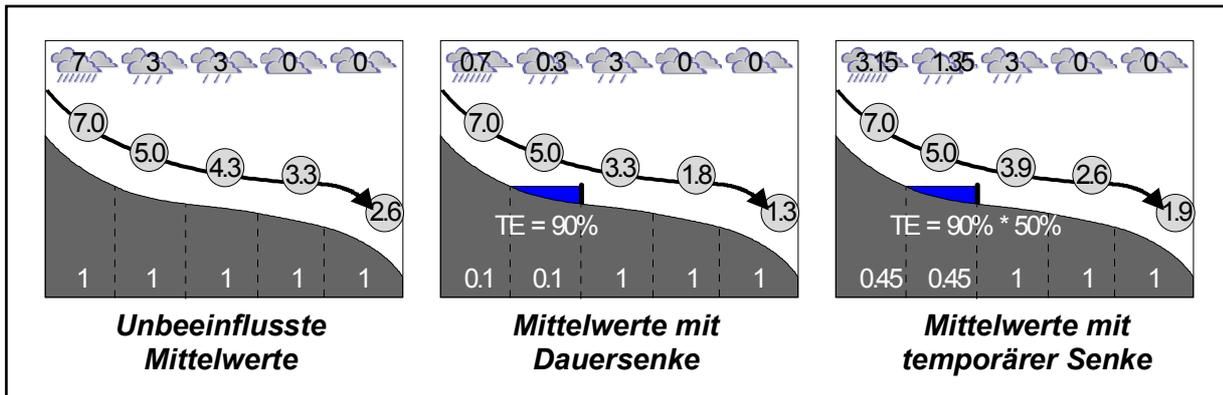
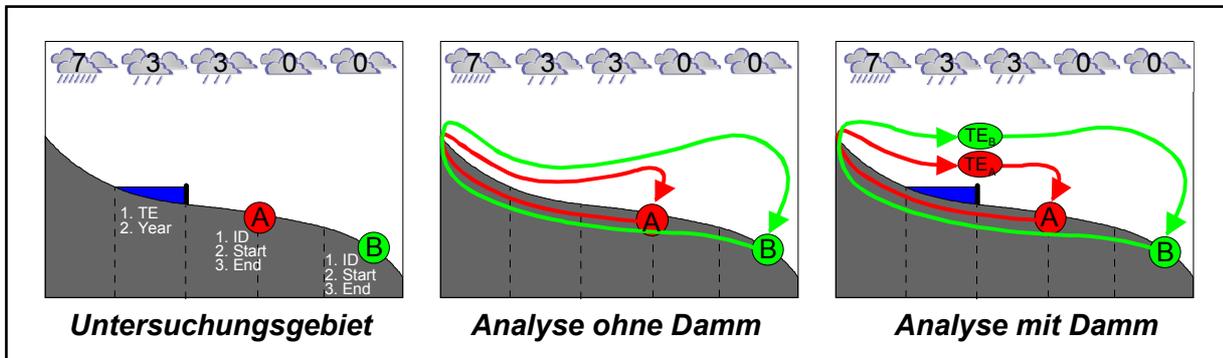


Illustration der grundlegenden Analyseroutine am Beispiel der mittleren Abflussmenge; die schwarzen Zahlen in den oberen blauen Wolken bezeichnen die wirksame Regenmenge, die weißen Zahlenwerte am unteren Rand die Größe der einzelnen Zelle (bzw. deren relative Gewichtung), die umrandeten Ziffern im schwarzen Fließpfeil zeigen die mittlere Abflussmenge, berechnet nach der Formel: $\sum \text{Regenmenge} / \text{Größe des Einzugsgebiets}$; **Links:** Mittlere Abflussmenge im rückwärtigen Einzugsgebiet ohne Berücksichtigung einer Versickerung; **Mitte:** Mittlere Abflussmenge, modifiziert durch einen Staudamm mit einer Trap Efficiency $TE = 90\%$ (d.h. einem Rückhaltevermögen von 90% oder einer Durchlässigkeit von 0,1); mit der verringerten Abflussmenge reduzieren sich in gleichem Maße die relativen Gewichte der oberhalb des Damms liegenden Abschnitte (0,1 anstatt 1 im linken Abschnitt) und die wirksamen Regenmengen von dort (0,7 bzw. 0,3 anstatt 7 bzw. 3); **Rechts:** Mittlere Abflussmenge, modifiziert durch einen Staudamm mit dem gleichen Rückhaltevermögen wie zuvor, aber einer reduzierten Einflussdauer von 50% (d.h. die Trap Efficiency des Damms ist nur in der Hälfte der Zeit wirksam und muss daher mit folgender Formel modifiziert werden: $TE = TE_{\text{Damm}} * \text{Wirkungsdauer in \%}/100$); die geringere Einflussdauer führt zu Abflusswerten, die zwischen denen der linken und mittleren Abbildung liegen; analoges gilt für das relative Gewicht der oberhalb des Damms liegenden Abschnitte bzw. der wirksamen Regenmenge von dort.

Abbildung 16:

Technische Funktionsweise der gemeinsamen Grundroutine



Technische Funktionsweise der Analysefunktion aus Abb. 15 am Beispiel zweier Messstationen; **Links:** Hypothetisches Untersuchungsgebiet und notwendige Daten; dabei bedeuten: TE = Trap Efficiency in %, Year = Baujahr des Staudamms, ID = Kennziffer der Messstation, Start = Anfangsjahr der Messung, End = Letztes Jahr der Messung; **Mitte:** Analyse der Abfluss- oder Sedimentmenge ohne einen Staudamm; beide Einzugsgebiete A und B werden nacheinander abgearbeitet, dabei ermittelt eine rekursive Rechenfunktion zuerst die Wasserscheiden des Einzugsgebiets, um danach die Abflussmenge in absteigender Richtung zu berechnen (= Funktionsprinzip des Single-Flow-Algorithmus aus Abb. 7); **Rechts:** Analyse der Abfluss- oder Sedimentmenge unter Berücksichtigung eines Staudamms und dessen Einflussdauer; auch hier werden beide Einzugsgebiete A und B nacheinander abgearbeitet, allerdings besitzt der Staudamm aufgrund verschiedener Messzeiten für jedes Einzugsgebiet A und B eine ganz andere Trap Efficiency, die unter Annahme folgender Angaben z.B. so aussehen würde:

- Staudamm: TE = 90%, Year = 1975
- Messstation A: ID = 1, Start = 1970, End = 1980; => $TE_A = 45\%$ (Wirkungsdauer von 5 Jahren bei 10 Jahren Messzeit)
- Messstation B: ID = 2, Start = 1980, End = 1990; => $TE_B = 90\%$

Die rekursive Funktionsweise der Rechenprozedur stellt sicher, dass die unterschiedlichen Trap Efficiencies auch ermittelt werden können: durch die kreisförmige Bewegung (d.h. das Einzugsgebiet hinauf und dann hinab), „weiß“ die Rechenfunktion immer, wie lang die Wirkungsdauer des Staudamms auf die jeweilige Messstation ist und ermittelt daraus die spezifische Trap Efficiency. Aus diesem Grund eignet sich auch nur ein D8 Single-Flow-Algorithmus für Berechnungen der beschriebenen Art: ein MD Multiple-Flow-Algorithmus führt keine kreisförmigen Analysebewegungen aus, sondern durchschreitet ein Einzugsgebiet lediglich von oben nach unten, er „besitzt“ daher an der Staudammposition keinerlei Informationen über die tiefer liegenden Abschnitte des Einzugsgebiets bzw. die Messstation, da er diese erst zu einem späteren Rechenzeitpunkt erreicht.

Im Fenster „Modelling“ sind insgesamt sind 4 Analysefunktionen verfügbar. Sie werden auf den folgenden Seiten beschrieben und arbeiten alle nach dem oben skizzierten Grundprinzip. Zur Illustration werden immer Screenshots benutzt, die das jeweils aktive Analysefenster in ArcView zeigen, zusammen mit den benutzten Daten, den ausgewählten Optionen und dem Ergebnis der Berechnung (als Tabelle oder als neu berechnetes Grid). Die verwendeten Dateien sind im gepackten **Installationsfile stools103.zip** enthalten, das auf der beiliegenden CD-ROM oder unter www.terracs.de zu finden ist. Damit können die nachfolgend beschriebenen Abläufe nachvollzogen werden:

4.1 Complex Mean

Eine Funktion, welche die **Mittelwerte von Variablen in einem Einzugsgebiet** berechnet. Dabei werden alle Grids berücksichtigt, die im jeweils aktiven View ausgewählt sind (im Screenshot unten sind dies die Raster Slope, Density und Pcpmax). Diese dienen als sogenannte Gewichtungsgrids und erfüllen damit die gleiche Funktion wie die Variable „Wirksame Regenmenge“ in Abb. 15. Alle werden nacheinander analysiert und die berechneten Mittelwerte in eine separate **Tabelle mit dem Titel „Complex Mean Values“** geschrieben (oben rechts). In der Spalte ID finden sich dabei die Kennnummern der jeweiligen Einzugsgebiete, in der Spalte Area die Größe des Einzugsgebiets in Pixeln (bei einer Pixelgröße von 1*1 km wie bei den Dateien im unteren Screenshot also die Größe in km²).

Für die Analyse mit STools müssen je nach gewählter Methodik insgesamt mindestens 3-7 Dateien ausgewählt werden:

- Ein Integerraster im Optionsfenster *Source*, in dem die Endpunkte der zu analysierenden Einzugsgebiete enthalten sind (als rote gepunktete Kreise dargestellt). Dabei werden alle Pixel mit Ganzzahlen als Endpunkte von Einzugsgebieten betrachtet und ihr Kennwert in die Spalte ID der Ergebnistabelle geschrieben. Die übrigen Pixel mit einem Wert von NoData sind Flächen ohne Messstellen, sie werden von STools nicht untersucht.
- Ein Fließrichtungsraster im Optionsfenster *Direction*, das zuvor mit der Funktion *Flow Direction* erstellt worden ist

ID	Area	Slope	Density	Pcpmax
216	590	6.2691	0.6820	129.8965
342	526	7.1751	0.5482	125.2205
340	2775	5.1754	0.7340	92.6474
337	672	2.7338	0.5715	101.1205
201	330	6.8434	0.8370	147.8242
202	557	10.0262	0.7274	174.0610
335	4057	4.4389	0.9595	100.0954
328	295	3.8877	1.0807	73.1051
327	2047	3.6501	0.9108	71.7446

- Mindestens ein markiertes Variablenraster im aktiven View (ein markiertes Raster entspricht einer zu untersuchenden Variablen). Es können beliebig viele Variablenraster gleichzeitig ausgewählt sein und damit alle Einzugsgebiete in einem Schritt umfassend charakterisiert werden.
- Je nach gewählter Option im Auswahlfenster *Advanced* werden bis zu 3 verschiedene zusätzliche Raster benötigt:

1. Wahl der Option **Standard Mode**:

Entweder kein Transferraster im Optionsfenster *Sinks* (d.h. keine Berücksichtigung von Senken bei der Berechnung), oder aber Auswahl eines Transferrasters mit Werten zwischen 0 und 1 und damit einer Berücksichtigung von Senken bei der Berechnung (die Werte dienen dabei als Multiplikatoren bei der Weiterleitung, vgl. dazu Abb. 15, Mitte). Insgesamt wird die Option *Standard Mode* also durch die fehlende Möglichkeit charakterisiert, den Faktor Zeit bei der Berechnung zu berücksichtigen.

2. Wahl der Option **Time Variability** (selektiert im oberen Beispielbild):

Hier sind genau 4 zusätzliche Raster notwendig, ein Transferraster, das im Optionsfenster *Sinks* ausgewählt wird, sowie 3 zusätzliche Zeitraster, die mit bestimmten Namen im aktiven View vorhanden sein müssen. Im Gegensatz zur Option *Standard Mode* wird hier in jedem Fall der Faktor Zeit berücksichtigt (vgl. Berechnungsprinzip in Abb. 15, rechts). Dafür werden die 3 zusätzlichen Zeitraster mit Angaben über den Beginn und das Ende der Messungen sowie über den Zeitpunkt notwendig, ab dem die im Senkenraster (Auswahl im Optionsfenster *Sinks*) enthaltenen Werte angewandt werden sollen. Um das Analysefenster „Modelling“ nicht unnötig zu überfrachten, wählt STools die entsprechenden Jahresdateien automatisch aus. Dazu müssen diese folgende Namenskonventionen erfüllen:

- Rasterdateien mit Informationen über den Start der Messung haben den gleichen Namen wie die Integerdatei im Optionsfenster *Source*, ergänzt durch die **zusätzliche Endung „_start“** (z.B. die Datei „Source_ID_start“ im oberen Beispiel als Startraster zum Grid „Source_ID“)
- Rasterdateien mit Informationen über das Ende der Messung haben analog dazu die **zusätzliche Endung „_end“** (z.B. die Datei „Source_ID_end“ im oberen Beispiel als Messendraster zum Grid „Source_ID“)
- Rasterdateien mit Informationen über den Wirkungsbeginn der im Senkenraster angegebenen Werte, wie z.B. dem Baujahr eines Staudamms, haben analog dazu die **zusätzliche Endung „_year“** (z.B. die Datei „Sink_year“ im oberen Beispiel als Startraster zum Grid „Sink“)

Für einen reibungslosen Ablauf der zeitabhängigen Analyseprozedur ist wichtig, dass alle zusätzlichen Rasterdateien vorhanden und auch vollständig sind. D.h. an der Position jedes mit Werten behafteten Pixels im Senken- und Quellraster müssen auch zeitliche Angaben vorhanden sein (vgl. Abb. 18); das Fehlen nur einer Jahresangabe würde hier zu einer falschen Berechnung oder einem Programmabsturz führen.

4.2 Calibration Value:

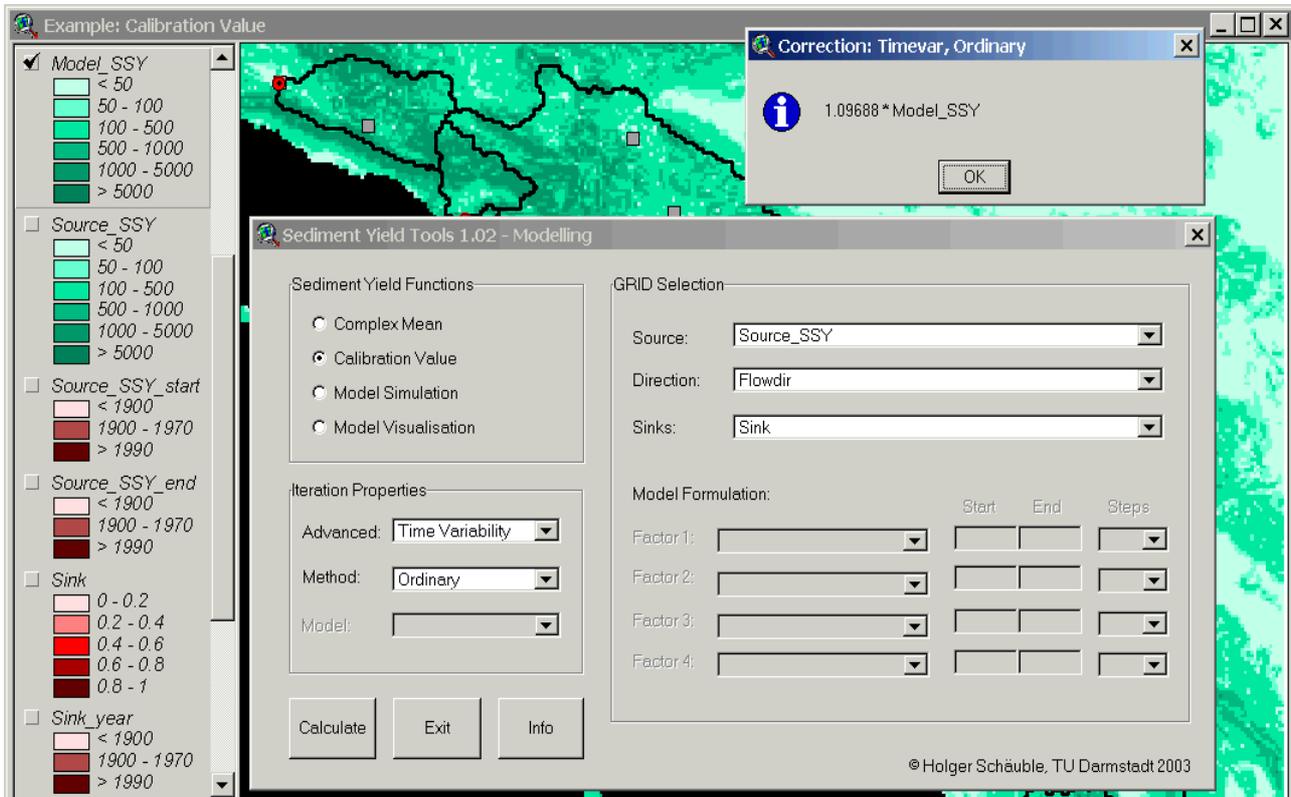
Eine Funktion, die ein Sedimentfrachtmodell an vorhandene Messwerte anpasst (= **Kalibrierung**). Dies geschieht durch die Ermittlung eines Zahlenwertes, mit dem das existierende Sedimentfrachtmodell wie folgt multipliziert werden muss:

$$\text{Sedimentfracht}_{\text{Messwerte}} = \text{Kalibrierungszahl} * \text{Sedimentfracht}_{\text{Modell}}$$

Damit wird eine einfache Kalibrierung erreicht, die dann angewandt werden kann, wenn das gewählte Modell an sich korrekt ist und lediglich die vorhandenen Geodaten eine andersartige Auflösung ausweisen (so sind z.B. Geländeneigungen, die aus einem 90m Höhenmodell ermittelt wurden zwangsläufig steiler als Neigungen aus einem 1km Höhenmodell des gleichen Gebiets; hier ist ein einfacher Korrekturfaktor sinnvoll und notwendig).

Die Vorgehensweise der Grobkalibrierung wird in Abb. 17 illustriert und besteht aus 3 aufeinanderfolgenden Schritten:

1. Die Spezifikation und Umsetzung eines Sedimentfrachtmodells mit ArcView als Gewichtungsgitter, etwa die Formel $\text{SSY}_{\text{Modell}} = \text{Pcpmax} * \text{Slope}$. Das so erstellte Modellraster muss im aktiven View markiert sein (siehe Model_SSY im unteren Bild), wobei bei mehreren aktiven Grids das oberste automatisch von STools ausgewählt wird.
2. Die Auswahl einer Quelldatei mit gemessenen Sedimentfrachten im Optionsfenster *Source* (z.B. Suspensionswerte aus Flussmessstationen oder abgelagertes Sediment in Reservoiren, beides in der gleichen Einheit, etwa in $\text{t}/\text{km}^2/\text{a}$). Es ist zu beachten, dass jedes einzelne Pixel mit einem Wert ungleich NoData als Meßpunkt interpretiert wird und die dort angegebene Zahl als gemessene Sedimentfracht (und nicht als ID-Nummer wie bei der vorherigen Analysefunktion *Complex Mean*)
3. Die Wahl der übrigen Optionen: einem Fließrichtungsraster im Auswahlfenster *Direction*, und je nach Absicht und Datenverfügbarkeit die Einbeziehung von Senken mit oder ohne Zeit bzw. die Wahl zwischen einer einfachen oder flächengewichteten Kalibrierung (siehe nächste Seite):



- Bei Auswahl einer der beiden Optionen *Standard Mode* oder *Time Variability* gelten die gleichen Dinge, die schon bei der Analysefunktion *Complex Mean* beschrieben worden sind, d.h. es kann zwischen zeitunabhängigen und zeitabhängigen Berechnungen ausgewählt werden, wobei im letzten Fall wieder das Vorhandensein der notwendigen Zeitraster sichergestellt sein muss.
- Zusätzlich kann im Optionsfenster *Method* zwischen zwei Möglichkeiten gewählt werden, einer normalen bzw. einer flächengewichteten Kalibrierung (Optionen *Ordinary* bzw. *Area Weighted*). Bei Wahl der Option *Ordinary* werden alle Stationen unabhängig von der Größe ihres Einzugsgebietes gleich behandelt, bei Wahl der Option *Area Weighted* bekommen diejenigen Messstationen mit einem größeren Einzugsgebiet ein anteilmäßig höheres Gewicht. Dieses wird für jedes einzelne Einzugsgebiet mit folgender Formel berechnet:

$$\text{Gewicht}_{\text{Station x}} = \text{Einzugsgebiet}_{\text{Station x}} / \text{Einzugsgebiet}_{\text{Durchschnitt aller Stationen}}$$

Im Gegensatz zur Analysefunktion *Complex Mean* kann bei *Calibration Value* deshalb zwischen zwei Gewichtungsoptionen gewählt werden, weil nicht mehr jedes Einzugsgebiet separat berechnet wird, sondern sich der Kalibrationsmultiplikator aus den Summen aller Messstationen mit ihren gemessenen und simulierten Werten ergibt (Abb. 17, Mitte). Dabei fungiert das im View gewählte Modellraster SSY_{Model} als Gewichtungsgrid, analog wie die Variable „Wirksame Regenmenge“ in Abb. 15 und auch die Berechnungsmethodik ist die Gleiche: eine gewichtete Mittelwertbildung in Bezug auf das jeweilige Einzugsgebiet. Dieser (simulierte) Wert der Sedimentfracht wird überall dort abgegriffen und temporär gespeichert, wo auch reale Messwerte vorhanden sind. Aus allen diesen Werten wird dann nach folgender Formel der Kalibrierungsfaktor bestimmt (mit x als Bezeichnung der jeweiligen Messstation):

$$\text{Kalibrierungsfaktor} = \sum \text{Messwert}_x * \text{Gewicht}_x / \sum \text{Simulationswert}_x * \text{Gewicht}_x$$

Der Kalibrierungsfaktor sorgt damit nur für eine schnelle und einfache Anpassung der gesamten Sedimentfrachtformel an das vorhandene Datenmaterial. Es werden keine statistischen Auswertungen über die Qualität der Kalibrierung ausgegeben, ebensowenig werden Aussagen über die durchschnittlichen Abweichungen gemacht. Für diese Zwecke bzw. zur Formulierung eines neuen Sedimentfrachtmodells ist die Funktion *Model Simulation* auf der folgenden Seite vorgesehen.

4.3 Model Simulation:

Diese Funktion bildet zusammen mit *Complex Mean* das Grundgerüst zu Erstellung einer neuen Sedimentfrachtformel oder aber zur Anpassung einer Bestehenden an verfügbares Datenmaterial. Während aber mit *Complex Mean* lediglich die mittleren Eigenschaften von Einzugsgebieten untersucht werden können, dient *Model Simulation* **zur verfeinerten Kalibrierung oder zur Erstellung neuer Sedimentfrachtmodelle**, und das mit oder ohne Berücksichtigung von Sedimentsenken und ihrer zeitlichen Veränderung. Im einzelnen wird die Kalibrierung oder aber die Erstellung eines Sedimentfrachtmodells nach einem der beiden Muster ablaufen:

- *Verfeinerte Kalibrierung eines bestehenden Sedimentfrachtmodells*

In diesem Fall werden die Variablen einer schon bestehenden Sedimentfrachtformel einzeln in ihrer Gewichtung an vorhandenes Datenmaterial angepasst. Hier kann sofort die unten beschriebene Prozedur verwendet werden.

- *Erstellung eines neuen Sedimentfrachtmodells*

In diesem Fall muss zuerst ein vorläufiges Sedimentfrachtmodell erstellt werden, das in einem abschließenden Schritt mit *Model Simulation* korrigiert und verfeinert wird. Die generelle Vorgehensweise dazu ist bei SCHÄUBLE (2004) beschrieben und besteht darin, zuerst mit *Complex Mean* die Mittelwerte aller Geofaktoren in den Einzugsgebieten zu ermitteln, diese statistisch auszuwerten und daraus dann ein vorläufiges Sedimentfrachtmodell zu erstellen, entweder in einer additiven oder multiplikativen Form:

Additive Modellformel: $SSY = a \cdot \text{Faktor}_1 + b \cdot \text{Faktor}_2 + \dots + z \cdot \text{Faktor}_n + X_{\text{cal}}$

Multiplikative Modellformel: $SSY = \text{Faktor}_1^a \cdot \text{Faktor}_2^b \cdot \dots \cdot \text{Faktor}_n^z \cdot X_{\text{cal}}$

mit $SSY = \text{Sedimentfracht in t/km}^2/\text{a}$ und $X_{\text{cal}} = \text{Kalibrierungszahl zur allgemeinen Anpassung}$

Das vorläufige Sedimentfrachtmodell kann nun in einem abschließenden Schritt mit einer Optimierung der zuvor ermittelten Gewichtungen a, b, \dots, n entscheidend verbessert werden. Die dabei notwendige Prozedur ist die Gleiche wie bei der verfeinerten Kalibrierung eines bestehenden Sedimentfrachtmodells, deshalb gelten die folgenden Erklärungen für beide Vorhaben gleichermaßen.

Das grundlegende Funktionsprinzip von *Model Simulation* ist in Abb. 17 veranschaulicht. Es besteht darin, dass der Benutzer dem Programm STools ein Sedimentfrachtmodell vorgibt, in dem die Gewichtungen der einzelnen Einflussvariablen innerhalb definierter Grenzen schwanken und mit Hilfe von STools auf eine größtmögliche Übereinstimmung mit den Messdaten hin optimiert werden. Im unteren Beispiel ist z.B. ein multiplikatives Modell mit folgenden Eigenschaften vorgegeben:

- Art des Modells: Multiplikativ (Option *Multipl.-Table* im Auswahlfenster *Model*)
- Formel des Modells: $\text{Sedimentfracht } SSY = \text{Slope}^a \cdot \text{Density}^b \cdot \text{Pcpmax}^c$
(die Faktorraster werden in den Auswahlfenstern *Factor 1 – Factor 4* ausgewählt)
- Startwerte der Gewichtungsvariablen: $a = 0.5, \quad b = -2.2, \quad c = 0.2$
- Endwerte der Gewichtungsvariablen: $a = 1.2, \quad b = -1.2, \quad c = 0.7$
- Analyseschritte zwischen Start- und Endwert: $a = 5, \quad b = 3, \quad c = 5$
- Größe jedes einzelnen Analyseschrittes: $a = 0.18, \quad b = 0.5, \quad c = 0.13$
(Berechnung mit $(\text{Start} - \text{End}) / (\text{Steps} - 1)$)

Das vorgegebene Modell wird von STools mit allen erlaubten Gewichtungen wiederholt umgesetzt. D.h. mit den einzelnen Rastern (Slope, Density und Pcpmax im oberen Beispiel) wird solange immer wieder ein verändertes Sedimentfrachtmodell erstellt (= das Raster SSY_{Model} in Abb. 17 und 18), bis entweder alle definierten Möglichkeiten durchgerechnet worden sind (z.B. bei Auswahl der Optionen *Multipl.-Table* bzw. *Additive-Table* im Optionsfenster *Model*) oder aber mit einer einfachen Optimierungsroutine eine geeignete Anpassung erreicht worden ist (z.B. bei Auswahl der Optionen *Multipl.-Auto* bzw. *Additive-Auto* im Optionsfenster *Model*). Nach jeder Berechnung wird das jeweils aktuelle Sedimentraster SSY_{Model} als Gewichtungsgitter benutzt und die mittlere Sedimentfracht für jeden Messpunkt ermittelt. Die simulierten Werte werden mit den real gemessenen verglichen und statistisch ausgewertet. Dabei gibt es je nach gewählter Option zwei unterschiedlichen Möglichkeiten:

- Bei Auswahl der Optionen *Additive-Table* und *Multipl.-Table* wird eine sehr umfangreiche Tabelle ausgegeben, (vgl. Tabelle im unteren Bild), die umfassende statistische Angaben über die Aussagekraft jedes einzelnen durchgespielten Sedimentfrachtmodells macht. Ihre Größe richtet sich nach der Anzahl aller berechneten Sedimentfrachtmodelle SSY_{Model} , die umso höher ist, je mehr Variablen und Analyseschritte berücksichtigt wurden (im oberen Beispiel wären dies bei 3 Variablen und den gewählten Schritten insgesamt $5 * 3 * 5 = 75$ einzelne Modelle)
- Bei der Auswahl der Optionen *Additive-Auto* und *Multipl.-Auto* wird dagegen eine sehr viel kleinere Tabelle ausgegeben, die zwar die gleiche Anzahl an Spalten besitzt, jedoch weit weniger Zeilen. Dies liegt daran, weil die hier verwendete einfache Iterationsroutine versucht, mit möglichst wenigen Schritten zu einem optimal angepassten Modell zu kommen und daher die Gewichtungen der Variablen rasch der Reihe nach optimiert. In der Regel dürfte die ausgegebene Tabelle kaum mehr als 20-40 Zeilen umfassen

Recno	Formula	Slope	Density	Pcpmax	<None>	DRGmean	SSYmean	DIFmean	DIFstdev	DIFvarc
1	Slope*[Wgt]*Density*[Wgt]*Pcpmax*[Wgt]	0.50000	-2.20000	0.20000	0.00000	684	435	248	1065	
2	Slope*[Wgt]*Density*[Wgt]*Pcpmax*[Wgt]	0.67500	-2.20000	0.20000	0.00000	684	600	84	1265	
3	Slope*[Wgt]*Density*[Wgt]*Pcpmax*[Wgt]	0.85000	-2.20000	0.20000	0.00000	684	835	-151	1588	
4	Slope*[Wgt]*Density*[Wgt]*Pcpmax*[Wgt]	1.02500	-2.20000	0.20000	0.00000	684	1171	-488	1984	
5	Slope*[Wgt]*Density*[Wgt]*Pcpmax*[Wgt]	1.20000	-2.20000	0.20000	0.00000	684	1657	-973	2602	
6	Slope*[Wgt]*Density*[Wgt]*Pcpmax*[Wgt]	0.50000	-1.70000	0.20000	0.00000	684	75	608	632	
7	Slope*[Wgt]*Density*[Wgt]*Pcpmax*[Wgt]	0.67500	-1.70000	0.20000	0.00000	684	104	580	643	
8	Slope*[Wgt]*Density*[Wgt]*Pcpmax*[Wgt]	0.85000	-1.70000	0.20000	0.00000	684	145	538	660	
9	Slope*[Wgt]*Density*[Wgt]*Pcpmax*[Wgt]	1.02500	-1.70000	0.20000	0.00000	684	205	479	686	
10	Slope*[Wgt]*Density*[Wgt]*Pcpmax*[Wgt]	1.20000	-1.70000	0.20000	0.00000	684	291	393	730	

Die ausgegebene Ergebnistabelle hat entweder den Namen „*Simulation*“ (bei Wahl von *Additive-Table/Multipl.-Table*) oder der Namen „*Iteration*“ (bei Wahl von *Additive-Auto/Multipl.-Auto*), gefolgt vom Datum und der genauen Uhrzeit, zu der die Simulation beendet wurde. Sie besteht unabhängig von der Art ihrer Erstellung - ob iterativ oder im tabellarischen Modus – immer aus den folgenden 24 Spalten, in welchen die Ergebnisse der statistischen Auswertung aller berechneten Modelle angegeben sind:

Spalte	Titel	Beschreibung
1	Recno	Nummer des gerade ausgewerteten Modells
2	Formula	Dokumentation der gewählten Berechnungsformel (Art des Modells, die Faktoren und ihre Gewichtungen), dabei ist [Wgt] ein Platzhalter für die jeweilige Gewichtung, die in einer der nächsten 4 Spalten angegeben wird
3-6	Namen der verwendeten Raster	Höhe des spezifischen Gewichtungsfaktors beim gegenwärtigen Modell, die Spaltenbezeichnungen richten sich nach den Namen der ausgewählten Grids, im oberen Beispiel die Raster Slope, Density und Pcpmax (<None> bezeichnet das Fehlen eines Faktorgrids an dieser Stelle)
7	ORGmean	Mittlere gemessene Sedimentfracht aller Messstationen oder Einzugsgebiete (meist in t/km ² /a)
8	SSYmean	Mittlere simulierte Sedimentfracht mit dem gegenwärtigen Model (meist in t/km ² /a), gilt ebenso für alle Einzugsgebiete der Messstationen
9	DIFmean	Mittlere Differenz zwischen gemessener und simulierter Sedimentfracht, berechnet nach folgender Formel: DIFmean = 1/n \sum SSY _{Messung x} - SSY _{Model x}
10	DIFstdev	Standardabweichung der Differenzen zwischen gemessener und simulierter Sedimentfracht
11	DIFvarcoeff	Relative Streuung der Differenz zwischen gemessener und simulierter Sedimentfracht (= Variationskoeffizient), berechnet nach folgender Formel: DIFvarcoeff = DIFstdev / DIFmean * 100
12	AbsDIFmean	Mittlere absolute Differenz zwischen gemessener und simulierter Sedimentfracht, berechnet nach folgender Formel: AbsDIFmean = 1/n \sum SSY _{Messung x} - SSY _{Model x}
13	SqrDIFmean	Mittlere quadratische Abweichung zwischen gemessener und simulierter Sedimentfracht, berechnet nach folgender Formel: SqrDIFmean = 1/n \sum (SSY _{Messung x} - SSY _{Model x}) ²
14	DIFmin	Niedrigster Differenzwert zwischen gemessener und simulierter Sedimentfracht
15	DIF25	25% Quantil der Differenzwerte zwischen gemessener und simulierter Sedimentfracht
16	DIF50	50% Quantil der Differenzwerte zwischen gemessener und simulierter Sedimentfracht
17	DIF75	75% Quantil der Differenzwerte zwischen gemessener und simulierter Sedimentfracht
18	DIFmax	Maximaler Differenzwert zwischen gemessener und simulierter Sedimentfracht
19	Correlation	Korrelation zwischen gemessener und simulierter Sedimentfracht (Korrelationskoeffizient nach Pearson als Maß für die Güte des Modells, vgl. BAHRENBERG ET AL. 1990)
20	Efficiency	Effizienz des Simulationsmodells nach NASH & SUTCLIFFE (1970), berechnet nach folgender Formel: Efficiency = 1 - [\sum (SSY _{Messung x} - SSY _{Model x}) ² / \sum (SSY _{Messung x} - SSY _{Messung 0}) ²]
21	Fit10Perc	Anzahl der Einzugsgebiete mit einer Abweichung von < 10% von der gemessenen Sedimentfracht, berechnet mit: Num = SSY _{Messung x} - SSY _{Model x} < (SSY _{Messung x} * 0.1); entspricht einer sehr guten Anpassung
22	Fit25Perc	Anzahl der Einzugsgebiete mit einer Abweichung von < 25% von der gemessenen Sedimentfracht, berechnet mit: Num = SSY _{Messung x} - SSY _{Model x} < (SSY _{Messung x} * 0.25); entspricht einer guten Anpassung
23	Fit50Perc	Anzahl der Einzugsgebiete mit einer Abweichung von < 50% von der gemessenen Sedimentfracht, berechnet mit: Num = SSY _{Messung x} - SSY _{Model x} < (SSY _{Messung x} * 0.5); entspricht tolerablen Anpassung
24	Progress	Fortschritt der Berechnung bei der tabellarischen Simulation in %, Orientierung für den Fall, dass die Berechnung aufgrund der langen Dauer vorzeitig abgebrochen worden ist und die Tabelle separat geladen wird
Legende: n = Anzahl der Messstationen bzw. Einzugsgebiete SSY _{Messung x} = gemessene Sedimentfracht (in t/km ² /a) am Ort der Station x SSY _{Model x} = simulierte Sedimentfracht (in t/km ² /a) am Ort der Station x SSY _{Messung 0} = mittlere gemessene Sedimentfracht (in t/km ² /a) an allen Messpunkten Num = Anzahl der Gebiete, die eine bestimmte Bedingung erfüllen		

Für die gesamte Berechnung benötigt Model Simulation mindestens 3 verschiedene Rasterdateien und Angaben zu den unterschiedlichsten Analyseoptionen. Es müssen im einzelnen folgenden Daten vorhanden sein:

- Ein Raster im Optionsfenster *Source* mit Angaben zur gemessenen Sedimentfracht (meist in t/km²/a). Dabei werden alle Zellen, die keine NoData-Werte besitzen als Meßstellen interpretiert, und die dort vorhandenen Zahlenwerte als real gemessene Sedimentfracht. Nur die rückwärtigen Einzugsgebiete dieser Zellen werden bei der nachfolgenden Analyse berücksichtigt, ähnlich wie bei *Complex Mean* oder *Calibration Value*.
- Ein Fließrichtungsraster im Optionsfenster *Direction*, das zuvor mit der Funktion *Flow Direction* erstellt worden ist

- Entweder ein Transferraster im Optionsfenster *Sinks* oder keines (nur bei Wahl der Option *Standard Mode* im Auswahlfenster *Advanced*). Hierbei gelten die gleichen Bedingungen wie zuvor: bei Wahl der Option *Time Variability* muss nicht nur ein Transferraster ausgewählt worden sein, sondern es müssen sich zusätzlich 3 sogenannte Jahresraster mit ihren spezifischen Namen im jeweils aktiven View befinden (d.h. mit den Endungen „_start“, „_end“ und „_year“, vgl. nähere Angaben dazu weiter oben bei der Funktion *Complex Mean*)
- Beim Auswahlfenster *Method*, in dem die Gewichtung der einzelnen Einzugsgebiete bestimmt werden kann, gelten die gleichen Hinweise, die schon bei der Funktion *Calibration Value* weiter oben zu finden sind
- Im Unterschied zu den vorigen Funktionen wird bei *Model Simulation* ein zusätzliches Optionsfenster *Model* zur Verfügung gestellt. Hier muss sowohl der Typ des Sedimentfrachtmodells als auch die Art der Berechnung spezifiziert werden. Dabei sind folgende Optionen möglich:

1. Multipl.-Table

Definition eines multiplikativen Modelltyps (nach dem Muster: $SSY = \text{Faktor}_1^a * \text{Faktor}_2^b * \dots * \text{Faktor}_n^z * X_{\text{cal}}$) und einer Berechnung aller vorgegebenen Möglichkeiten. Dabei werden die unter *Model Formulation* selektierten Variablenraster auf multiplikative Weise miteinander verknüpft und so viele unterschiedliche Kombinationen durchgerechnet, wie in den ganz rechts liegenden Auswahlfeldern *Steps* angegeben sind (im oberen Beispiel also $5*3*5 = 75$ Kombinationen). Eine Iteration findet hier nicht statt, sondern es werden nur alle Kombinationen der Reihe nach berechnet und ausgewertet. Mit den im oberen Beispiel getätigten Eingaben ergäbe sich folgender Rechengang:

$$\begin{aligned} SSY_1 &= \text{Slope}^{0.5} * \text{Density}^{-2.2} * \text{Pcpmax}^{0.2} \\ SSY_2 &= \text{Slope}^{0.675} * \text{Density}^{-2.2} * \text{Pcpmax}^{0.2} \\ SSY_3 &= \text{Slope}^{0.85} * \text{Density}^{-2.2} * \text{Pcpmax}^{0.2} \\ \dots &= \dots \\ SSY_{75} &= \text{Slope}^{1.2} * \text{Density}^{-1.2} * \text{Pcpmax}^{0.7} \end{aligned}$$

2. Additive-Table

Definition eines additiven Modelltyps (nach dem Muster: $SSY = a*\text{Faktor}_1 + b*\text{Faktor}_2 + \dots + c*\text{Faktor}_n + X_{\text{cal}}$) und einer Berechnung aller vorgegebenen Möglichkeiten. Dabei werden die unter *Model Formulation* selektierten Variablenraster auf additive Weise miteinander verknüpft und so viele unterschiedliche Kombinationen durchgerechnet, wie in den ganz rechts liegenden Auswahlfeldern *Steps* angegeben sind. Die Rechenfolge würde im Gegensatz zu oben wie folgt aussehen:

$$\begin{aligned} SSY_1 &= 0.5 * \text{Slope} - 2.2 * \text{Density} + 0.2 * \text{Pcpmax} \\ SSY_2 &= 0.675 * \text{Slope} - 2.2 * \text{Density} + 0.2 * \text{Pcpmax} \\ SSY_3 &= 0.85 * \text{Slope} - 2.2 * \text{Density} + 0.2 * \text{Pcpmax} \\ \dots &= \dots \\ SSY_{75} &= 1.2 * \text{Slope} - 1.2 * \text{Density} + 0.7 * \text{Pcpmax} \end{aligned}$$

3. Multipl.-Auto

Definition eines multiplikativen Modelltyps nach dem oberen Muster. Allerdings werden hier nicht mehr alle möglichen Kombinationen berechnet, sondern in der Reihenfolge ihres Auftretens mit einem einfachen Iterationsalgorithmus optimiert, d.h. im oberen Beispiel würde zuerst die Gewichtung der Variablen *Slope*, dann die der Variablen *Density* und abschließend die der Variablen *Pcpmax* verbessert werden. Die in den Optionsfeldern *Start* und *End* angegebenen Werte begrenzen den Bereich, innerhalb dessen die Iteration stattfinden darf. Die Iteration wird dann automatisch abgebrochen, wenn keine Verbesserung des Ergebnisses mehr möglich ist. Dabei verwendet STools die **Methodik der kleinsten Quadrate**, d.h. d.h. STools versucht innerhalb der definierten Grenzen, die Gewichtung der Variablen solange zu verbessern, wie die mittlere quadrierte Abweichung zwischen der simulierten und der gemessenen Sedimentfracht kleiner wird. Im Falle einer gegen-

3. **Multipl.-Auto** (Forts.)

...läufigen Tendenz bricht STools sofort die Iteration ab und speichert alle bis zu diesem Zeitpunkt berechneten Auswertungen in einer Tabelle mit der Anfangsbezeichnung "Iteration:". Eine erfolgreich verlaufene Iteration zeichnet sich durch zwei Eigenschaften aus, die gleichzeitig erfüllt sein müssen:

- Die letzte Zeile der Auswertungstabelle besitzt die geringste mittlere quadratische Abweichung von allen übrigen Zeilen (SqrDIFmean => minimal)
- Die Gewichtungen aller Variablen in der Ergebnisformel befinden sich innerhalb der zuvor angegebenen Grenzen. Liegt nur eine Gewichtung leicht außerhalb, dann deutet dies auf eine unvollständige Iteration hin, bei der die optimale Gewichtung eigentlich außerhalb des definierten Wertebereichs liegen müsste. Hier muß die Iteration mit einem veränderten Wertebereich noch einmal wiederholt werden.

Damit die Iterationsberechnung nicht übermäßig lange dauert (insbesondere bei falsch gewählten Werten in den Auswahlfeldern Start und End), bricht STools nach einer festgelegten Anzahl von Durchgängen, je nach Anzahl der gewählten Variablen, die Iteration automatisch ab.

4. **Additive-Auto**

Definition eines additiven Modelltyps nach dem oberen Muster. Die Rechenprinzipien und die Ausgabe sind mit den eben bei *Multipl.-Auto* beschriebenen identisch, nur der Modelltyp und die Art der Verknüpfung unterscheiden sich.

5. **Other Model**

Eine Option, die noch ohne Funktion ist. Sie dient als Platzhalter für zukünftige Verbesserungen, vor allem für verfeinerte Iterationsalgorithmen, die zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht implementiert sind.

- Die benötigten Dateien für das Sedimentfrachtmodell und Angaben zur Gewichtung der einzelnen Variablen werden in der Rubrik *Model Formulation* angegeben. Die Optionsfenster *Factor 1* bis *Factor 4* dienen zur Auswahl der Variablenraster. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Raster der Reihe nach ausgewählt werden und sich keine Lücke zwischen zweien von ihnen befindet, da die Bezeichnung *<None>* in einem der Auswahlfenster von STools als Ende der Sedimentfrachtformel interpretiert wird (so würde z.B. die Auswahl von zwei Rastern in den Auswahlfenstern *Factor 1* und *Factor 3* zwar keinen Programmabsturz verursachen, die resultierende Rechenformel bestünde in diesem Fall jedoch nur aus dem in *Factor 1* gewählten Variablenraster). Insgesamt bietet STools also bei der Erstellung einer Sedimentationsformel durchaus vielfältige Möglichkeiten, da diese je nach Definition aus 1-4 Variablen bestehen kann.

Zusätzlich zu den Variablenrastern müssen in den Eingabefenstern *Start* und *End* die Grenzen angegeben werden, innerhalb derer die Gewichtungsfaktoren schwanken dürfen. Dabei sind positive und negative Zahlen aller Art erlaubt. STools überprüft hierbei nicht, ob eine Eingabe Sinn macht oder nicht. Im Gegensatz dazu sind die maximal möglichen Analyseschritte begrenzt, STools erlaubt im Auswahlfenster *Steps* zwischen 1 und 15 Schritten, jeweils für jede einzelne Variable getrennt. Bei Angabe von nur 2 Schritten verwendet STools den angegebenen Start- und Endwert, bei Angabe von nur einem Schritt wird dagegen der Mittelwert aus *Start* und *End* berechnet und dann verwendet.

Obwohl STools im Tabellenmodus bis 15 Analyseschritte erlaubt, sei an dieser Stelle ausdrücklich auf die Problematik zu vieler Schritte bei umfangreichen Sedimentfrachtformel hingewiesen. Mit jedem Analyseschritt mehr vergrößert sich die benötigte Rechenzeit überproportional: Bei einer Sedimentfrachtformel mit lediglich zwei

Variablen wäre eine Erhöhung von 5 auf 8 Analyseschritte noch tragbar ($8*8=64$ gegenüber $5*5=25$ einzelne Rechenoperationen im Table-Modus), bei 3 Variablen jedoch würde dies zu einem überproportional hohen Ansteigen der Rechendauer führen ($8*8*8=512$ gegenüber $5*5*5=125$). Es muss also immer überlegt werden, ob sich eine Erhöhung der Rechenschritte in jedem Fall lohnt.

Als **generelle Anwendungsempfehlung** sei zum Abschluss noch folgende Vorgehensweise vorgeschlagen:

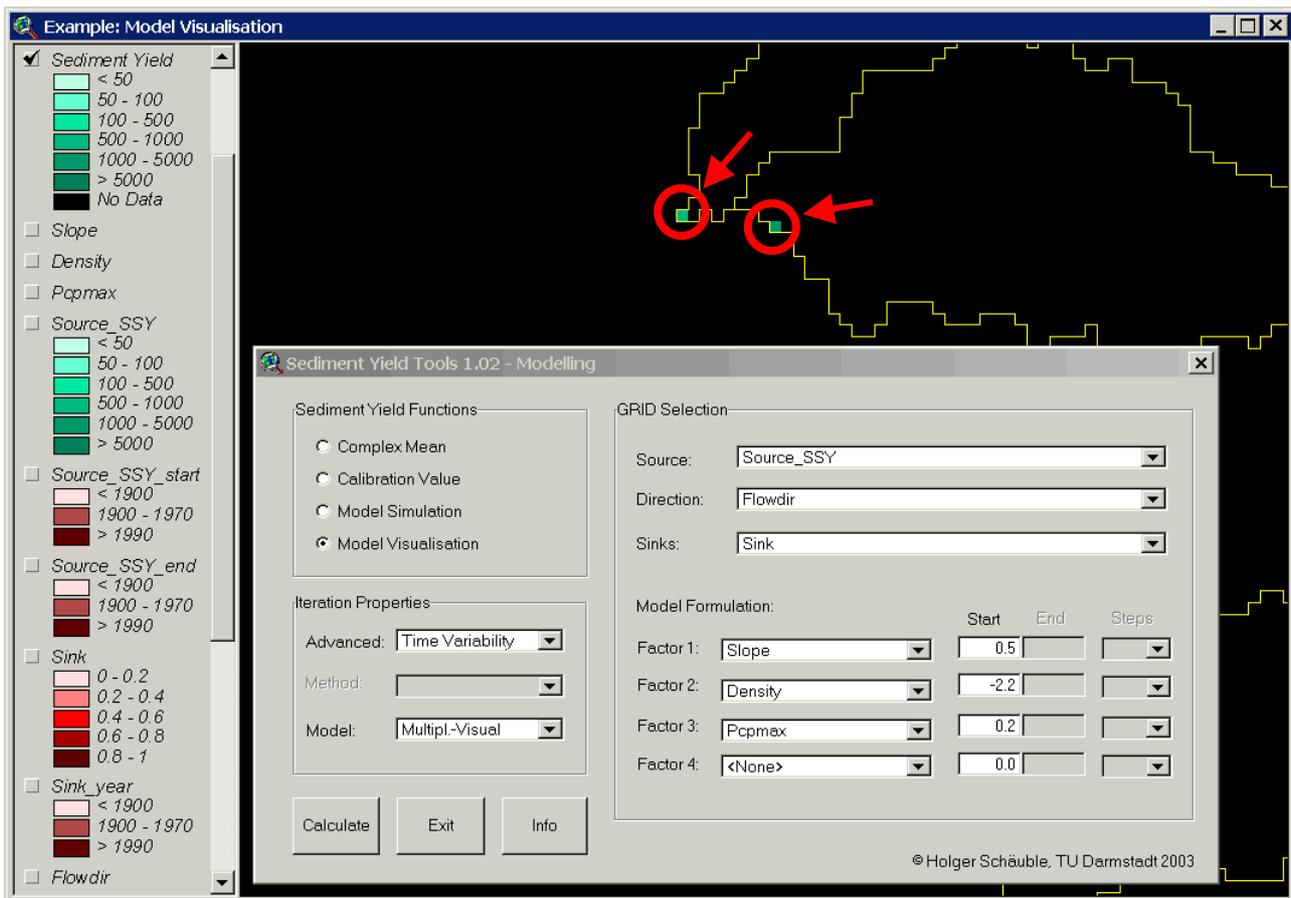
Mit einem ersten Schritt sollte mit den Optionen *Additive-Table* bzw. *Multipl.-Table* eine ausführliche Auswertungstabelle erstellt werden, aus der eine oder zwei mögliche und sinnvolle Formeln ausgewählt werden. Die darin enthaltenen Gewichtungen der Einflußvariablen können in einem zweiten Schritt dann mit den Rechenoptionen *Additive-Auto* bzw. *Multipl.-Auto* iterativ verfeinert werden. Es empfiehlt sich jedoch nicht, ausschließlich die Iterationsroutine zu benutzen, da der verwendete Iterationsalgorithmus nicht in jedem Fall zu befriedigenden Ergebnissen führt. In Kombination mit einem aufgrund geowissenschaftlicher Kriterien vorselektierten Modell dürften die Ergebnisse jedoch eine hohe Qualität erreichen.

4.4 Model Visualisation:

Diese Funktion dient zur **Kontrolle des kalibrierten bzw. neu erstellten Sedimentationsmodells**. Da mit der Funktion *Model Simulation* nur eine Tabelle ausgegeben wird, in welcher die Ergebnisse zusammengefasst dargestellt werden, wäre eine nachträgliche Kontrolle anhand einzelner Einzugsgebiete oder gar eine visuelle Darstellung in einer Karte nicht möglich. Dies gilt insbesondere für die Ergebnisse von Modellsimulationen, bei denen der zeitliche Einfluß von Senken berücksichtigt worden ist. Diesen Mangel beseitigt die Funktion *Model Visualisation*. durch die **Berechnung eines Rasters**, welches die simulierte Sedimentfracht an allen Orten zeigt, wo auch Messwerte vorhanden sind. Aus diesem Grund unterscheidet sich die Bedienung von *Model Visualisation* kaum von derjenigen der Funktion *Model Simulation*. Es sind fast die gleichen Eingaben und Optionen erforderlich, lediglich die Auswahlfenster *End*, *Steps* und *Method* sind inaktiv, weil nun statt einer ganzen Simulationsreihe nur ein einzelnes Raster berechnet wird. Die Rechenprozedur ist jedoch genau dieselbe, nur wird eben ein einziges Grid mit konstanten Gewichtungsfaktoren berechnet (= Definition in den Auswahlfenstern *Start*) und im Auswahlmü *Model* stehen ausschließlich die Optionen *Additive-Visual* und *Multipl.-Visual* zur Verfügung. Dabei wird mit *Additive-Visual* ein additives Sedimentfrachtraster berechnet ($SSY_{\text{Model}} = a \cdot \text{Faktor}_1 + b \cdot \text{Faktor}_2 + \dots + z \cdot \text{Faktor}_n + X_{\text{cal}}$), mit *Multipl.-Visual* dagegen ein multiplikatives Sedimentfrachtraster ($SSY_{\text{Model}} = \text{Faktor}_1^a * \text{Faktor}_2^b * \dots * \text{Faktor}_n^z * X_{\text{cal}}$). Das im unteren Beispiel gezeigte Grid „Sediment Yield“ entspricht übrigens genau dem Raster, das einige Seiten vorher von der Funktion *Model Simulation* als erstes berechnet wurde (vgl. die Ausgabetabelle „Simulation: 13.1.2004 3:06“, erste Zeile).

Bei der Nutzung von *Model Visualisation* müssen zusammengefasst folgende Sachverhalte beachtet werden:

- Die Bedienung und die Optionen entsprechen weitgehend denen von *Model Simulation*, die unter der Rubrik *Start* eingetragenen Gewichtungen sind für das berechnete Sedimentfrachtraster maßgeblich und ändern sich nicht
- Das im aktiven View ausgegebene Ergebnisraster hat den Namen „Sediment Yield“ und besteht zu einem großen Teil aus NoData-Werten, die im unteren Beispiel als schwarze Fläche sichtbar wird. Lediglich diejenigen Pixel, die auch im Messpunktraster (Grid im Auswahlfenster *Source*) definiert sind, bekommen im Ergebnisraster „Sediment Yield“ auch Werte zugewiesen (= simulierte Sedimentfracht, rot umrandete Pixel im unteren Bild). Damit lassen sich für alle Meßstationen die gemessenen und simulierten Sedimentfrachten vergleichen.



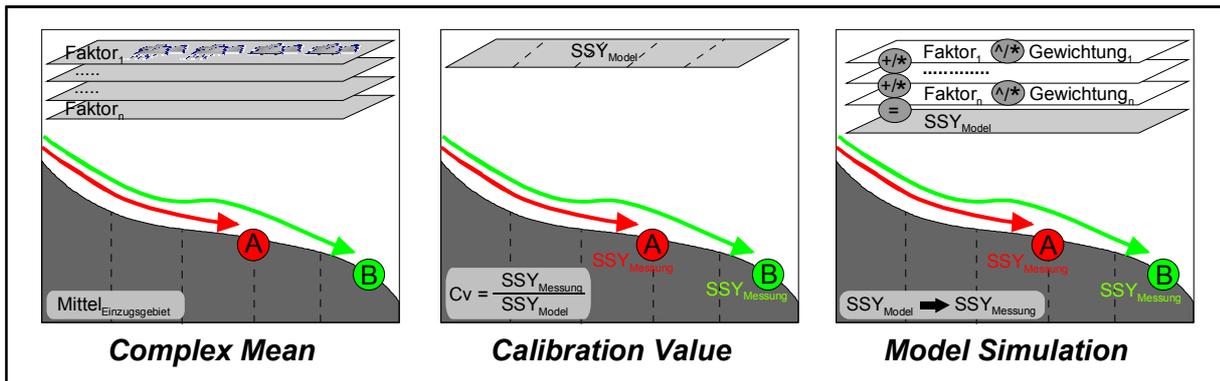
PS: Beispieldateien zur Illustration der Beschreibungen

Alle Raster, die in den oberen Screenshots abgebildet worden sind, finden sich im **Installationsfile stools103.zip** auf der beiliegenden CD-ROM bzw. auf der Internetseite www.terracs.de. Sie dienen der Illustration der Erläuterungen zum Analysefenster „Modelling“ und sollen beim Start eigener Sedimentfrachtanalysen mit STools helfen. Ihre Namen und Inhalte werden in der folgenden Tabelle beschrieben:

Dateiname	Name in den abgebildeten Views	Inhalt der Datei
slope	Slope	Geländeneigung in °
density	Density	Lagerungsdichte des Bodens in g/cm ³
pcpmax	Pcpmax	Maximaler Monatsniederschlag in mm
dem	nicht im View abgebildet	Digitales Höhenmodell mit Höhen in m
basins	nicht im View abgebildet	Einzugsgebiete der Messstellen (Werte wie bei ssy_id)
ssy	Source_SSY	Gemessene Sedimentfracht in t/km ² /a
ssy_id	Source_ID	ID-Nummer der Messstelle
ssy_start	Source_ID_start oder Source_start	Beginn der Messung an der jeweiligen Station
ssy_end	Source_ID_end oder Source_end	Ende der Messung an der jeweiligen Station
sink	Sink	Transferwert des jeweiligen Staudamms, berechnet mit: sink = (100 - trap efficiency) / 100
sink_year	Sink_year	Baujahr des Staudamms
flowdir	Flowdir	Raster mit Fließrichtungen und Werten von 1-128
????	Model_SSY	Simulierte Sedimentfracht in t/km ² /a, muß erst noch mit dem MapCalculator berechnet werden, im oberen Beispiel berechnet mit: ssy_model = pcpmax*slope
????	Sediment Yield	Modellierte Sedimentfracht in t/km ² /a, wird mit Model Visualisation erst noch berechnet

Abbildung 17:

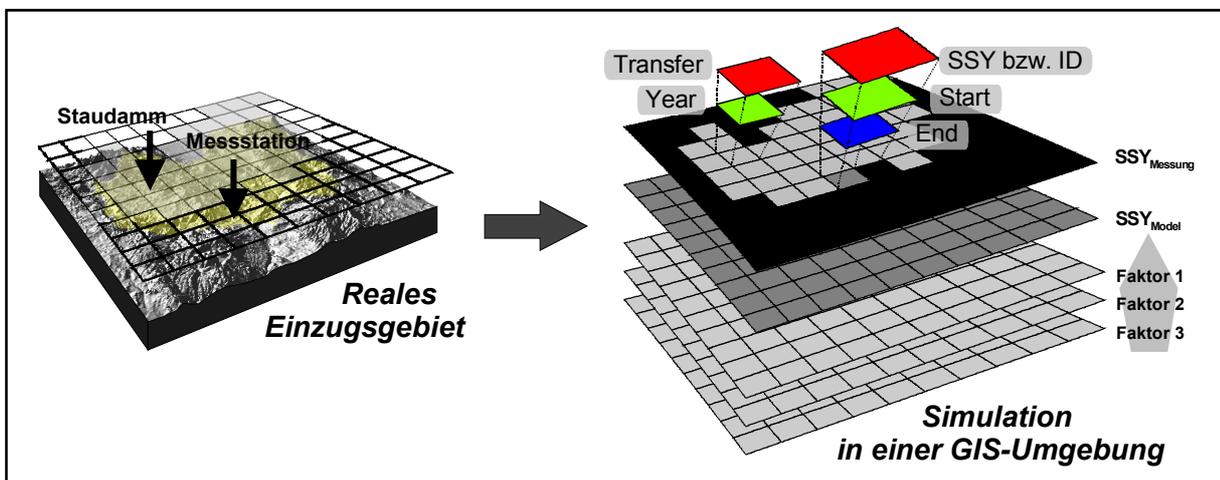
Illustration der Analysefunktionen



Analysefunktionen im Fenster „Modelling“, illustriert am Beispiel eines von Staudämmen und Senken unbeeinflussten Einzugsgebietes (der grundlegende Berechnungskern ist in Abbildung 15/16 dargestellt); **Links:** Berechnung der Mittelwerte, die ausgewählte Variablen in einem Einzugsgebiet besitzen; alle hellgrau gefärbten Variablenraster durchlaufen nacheinander dieselbe Rechenroutine, mit denen ihr spezifischer Mittelwert für jedes Einzugsgebiet berechnet wird; **Mitte:** Kalibrierung einer Sedimentfrachtformel mit einem Modellraster $\text{SSY}_{\text{Modell}}$ und einzelnen Messpunkten (= Stationen A und B mit Messdaten zur Sedimentfracht); die Zellenwerte im Modellraster $\text{SSY}_{\text{Modell}}$ sind Sedimentfrachten, die mit der Sedimentfrachtformel simuliert worden sind, die Zahlenwerte an Punkt A und B dagegen reale Messwerte; zur Ermittlung der Kalibrierungszahl C_v wird die Summe aller real gemessenen Werte $\text{SSY}_{\text{Messung}}$ durch die Summe aller simulierten Werte $\text{SSY}_{\text{Modell}}$ geteilt; **Rechts:** Iterative Anpassung eines Sedimentfrachtmodells an vorhandene Messdaten; dabei wird eine Sedimentfrachtformel solange modifiziert, bis eine größtmögliche Anpassung erreicht ist bzw. alle möglichen Kombinationen der Reihe nach berechnet worden sind. Die simulierten Werte werden mit den gemessenen verglichen und statistisch ausgewertet; Das jeweils aktuelle Sedimentfrachtmodell (graues Raster) dient dabei als Gewichtungsgrid und wird durch Multiplikation/Addition aus einzelnen Faktorrastern gewonnen, deren Gewichtung nach den Angaben des Benutzers systematisch verändert wird.

Abbildung 18:

Dateninput von komplexen Sedimentfrachtanalysen mit GIS



Notwendige Daten und ihre Ableitung für zeitabhängige Analysen der Sedimentfracht mit GIS; **Links:** Illustration eines realen Einzugsgebietes mit einer Messstation und einem Staudamm im rückwärtigen Einzugsgebiet; **Rechts:** Benötigte Daten und ihre Struktur für GIS-gestützte Analysen der Sedimentfracht, hellgraue Raster unten = notwendige Variablenraster zur Berechnung eines vorläufigen Sedimentfrachtmodells, dunkelgraues Raster in der Mitte = berechnetes vorläufiges Sedimentfrachtmodell, das als Gewichtungsgrid bei der nachfolgenden Sedimentfrachtanalyse benutzt wird, oberes Raster = Ausdehnung des Einzugsgebietes, innerhalb dessen die Simulation stattfindet, farbige Rasterzellen = zusätzlich benötigte Raster mit Angaben zum Beginn (grüne Rasterzellen) oder zum Ende (blaue Rasterzelle) eines Ereignisses bzw. mit Angaben über die Eigenschaften der jeweiligen Rasterzelle (rote Rasterzellen)

5. Literatur

ALLEN, S.A. (1997):

Earth Surface Processes. Cambridge 1997 (= Blackwell Science).

BAHRENBERG, G.; GIESE, E.; NIPPER, J. (1990)

Statistische Methoden in der Geographie. Teil 1. Stuttgart 1990 (=Teubner Studienbücher Geographie)

BURROUGH, P.A. & MCDONNELL, R.A. (1998):

Principles of Geographical Information Systems. Oxford 1998 (= Oxford University Press).

COSTA-CABRAL, M.C.; BURGESS, S.J. (1994):

Digital elevation model networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. In: Water Resources Research, 1994, no.6, p.1681-1692.

HARRISON, C.G.A.(2000):

What factors control mechanical erosion rates ? In: International Journal of Earth Sciences, 2000, no.88, p.752-763.

HINDERER, M.; SCHÄUBLE, H.; SÜSS, M.P. (2002):

Denudation Processes at Various Scales - Towards a New GIS-based Global Model. In: Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Teil I, Jahrgang 2001, no.3/4. p.377-397.

LUDWIG, W.; PROBST, J.-L. (1998):

River Sediment Discharge to the Oceans: Present-Day Controls and Global Budgets. In: American Journal of Science, 1998, Nr.298, S.265-295.

O'CALLAGHAN, J.F. & MARK, D.M. (1984):

The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data. In: Computer Vision, Graphics and Image Processing, 1984, no.28, p.323-344.

MEADE, R.H.; PARKER, R.S. (1985):

Sediment in Rivers in the United States. In: United States Geological Survey Water Supply Paper, 1985, no.2275, p.49-60.

MILLIMAN, J.D.; RUTKOWSKI, C.; MEYBECK, M. (1995):

River Discharge to the Sea. A Global River Index (GLORI). Den Burg (Netherlands) 1995 (=LOICZ Reports and Studies)

MOORE, I.D. (1996):

Hydrologic modeling and GIS. In: Goodchild, M.F.; Steyaert, L.T.; Parks, B.O. (ed.): GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues. Fort Collins 1996 (USA) (= GIS World Books). p.143-148.

MORRIS, L.G.; FAN, J. (1997):

Reservoir Sedimentation Handbook. Design and Management of Dams, Reservoirs and Watersheds for Sustainable Use. New York 1997 (= McGraw-Hill).

NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J.V. (1970):

River Flow Forecasting Through Conceptual Model. Part 1: A Discussion of Principles. In: Journal of Hydrology, 1970, no.10, p.282-290.

QUINN, P.F.; BEVEN, P.; CHEVALLIER, P.; PLANCHON, O. (1991):

The Prediction of Hillslope Flow Paths for Distributed Hydrological Modeling Using Digital Terrain Models. In: Hydrological Processes, 1991, no.5, p.59-79.

SCHÄUBLE, H. (1999):

Erosionsprognosen mit GIS und EDV. Ein Vergleich verschiedener Bewertungskonzepte am Beispiel einer Gäulandschaft. Diplomarbeit am Geographischen Institut der Eberhard-Karls Universität Tübingen 1999.

SCHÄUBLE, H. (2004) (IN VORBEREITUNG):

Sedimentfrachtprognosen mit GIS. Auf dem Weg zu einem globalen Prognosemodell - Erste Schritte, dargestellt am Beispiel der USA. Dissertation am Institut für Angewandte Geowissenschaften der TU Darmstadt 2004.

SINGH, V.P. (HRSG.) (1995):

Computer Models of Watershed Hydrology. Highlands Ranch, Colorado 1995 (USA) (= Water Resources Publications).

TARBOTON, D.G. (1997):

A New Method for the Determination of Flow Directions and Upslope Areas in Grid Digital Elevation Models. In: Water Resources Research, 1997, no.2, p.309-319.

WILSON, J.P. & GALLANT, J.C. (HRSG.) (2000):

Terrain Analysis. Principles and Applications. New York 2000 (= John Wiley & Sons).

6. Schlusswort

Das Programm Sediment Yield Tools 1.03 wurde von mir im Laufe meiner Doktorarbeit am Institut für Angewandte Geowissenschaften der TU Darmstadt geschrieben und dient primär der Erstellung und Kalibrierung von Sedimentfrachtmodellen. Es enthält darüber hinaus wichtige Funktionen zur hydrologischen Analyse von Einzugsgebieten und zur Simulation von Stoffflüssen, die bei den aktuellen GIS-Programmen immer noch fehlen. Mit seiner weitgehend intuitiven Bedienbarkeit und der vollständigen Integration in ArcView 3.x soll STools zu verbesserten Sedimentfrachtmodellen im überregionalen und lokalen Skalenbereich beitragen und die Lücke zwischen herkömmlicher GIS-Software (wie z.B. ArcView, Idrisi, GRASS) und speziellen Analyseprogrammen schließen. Hier und nur hier ist der Anwendungszweck von STools zu sehen. Spezielle Fragestellungen im Mikrobereich oder komplexe Simulationen von Hydrologie und kleinräumigem Sedimenttransport bleiben auch weiterhin einschlägigen Expertenprogrammen vorbehalten. Die Nutzung von Sediment Yield Tools ist im privaten und wissenschaftlichen Bereich (Universitäten, Öffentliche Forschungseinrichtungen und Schulen) frei, eine Anwendung im kommerziellen Bereich ist dagegen nur mit meiner ausdrücklichen Zustimmung erlaubt. Um STools und diese kurze Anleitung verbessern zu können, bin ich auf Ihre Mitarbeit angewiesen und würde mich daher über Anregungen und Kommentare jedweder Art sehr freuen. Schicken Sie doch einfach eine kurze (oder auch lange :) Mail an folgende Adresse: holger.schaeuble@gmx.de

Viel Spaß mit Sediment Yield Tools wünscht Ihnen,

Holger Schäuble

7. Impressum

Verfasser: Holger Schäuble, Dipl.-geogr.
Adresse: Institut für Angewandte Geowissenschaften, Technische Universität Darmstadt
Schnittspahnstrasse 9, 64287 Darmstadt, Deutschland
Fachgebiet Angewandte Sedimentologie, Leiter: Prof. Dr. Matthias Hinderer
Version: 1.03, Stand Dezember 2003
Zweck: Hydrologische Analyse von Einzugsgebieten und Stoffflüssen, Kalibrierung und Erstellung neuer Modelle zur Berechnung der Sedimentfracht
Programm: Erweiterung für ArcView 3.x und den SpatialAnalyst ab Version 1.x
Nutzung: Kostenlose Nutzung für den privaten Gebrauch und für wissenschaftliche Zwecke
Kommerzielle Nutzung nur mit ausdrücklicher Erlaubnis des Verfassers
Kontakt: holgers@geo.tu-darmstadt.de
holger.schaeuble@gmx.de
Website: www.terracs.de
Dateien: yield.avx (Steuerungsdatei von Sediment Yield Tools)
yield.dll (Laufzeitbibliothek mit den erweiterten Funktionen von Sediment Yield Tools)
Beispiele (Verzeichnis mit Beispieldateien zur Illustration von Sediment Yield Tools)