



# ACCUM PLUS 1.0

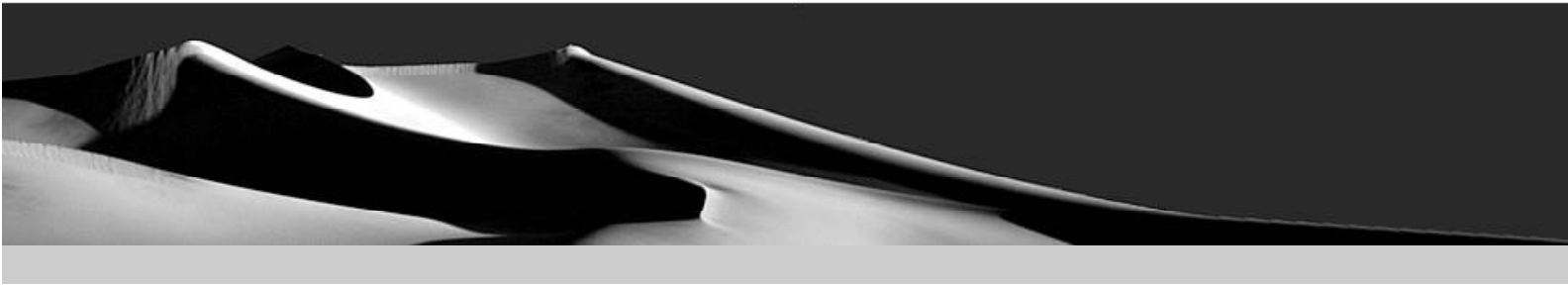
## – Hydrologische Analysen unter Berücksichtigung von Senken und ihrer zeitlichen Einflussdauer –

### Autor:

Dr. Holger Schäuble (Geograph und GIS-Analyst)  
TERRACS, Vor dem Kreuzberg 28, 72070 Tübingen (Germany)  
Web: [www.terracs.com](http://www.terracs.com)  
Email: [schaeuble@terracs.com](mailto:schaeuble@terracs.com)  
Tel.: +49-7071-6039740  
Fax: +49-7071-6039734

## Zusammenfassung

Im vorliegenden Text/Vortrag wird eine neue Methodik zur GIS-gestützten Simulation des Abflussgeschehens (Flow Accumulation) vorgestellt, bei der sowohl Senken (Staudämme, Dolinen, durchlässige Böden, etc.) wie auch die Dauer ihres zeitlichen Einflusses berücksichtigt werden kann. Dies ermöglicht realitätsnahe hydrologische Simulationen in Einzugsgebieten mit räumlich und zeitlich stark variablen anthropogenen Einflüssen. Die grundsätzliche Anwendbarkeit wird am Beispiel von Sedimentfrachtsimulationen in einem von Staudämmen dominierten Einzugsgebiet veranschaulicht. Die neue Methodik ist in der GIS-Erweiterung ACCUM PLUS 1.0 implementiert. Diese steht unter der Webseite [www.terracs.com](http://www.terracs.com) zum kostenlosen Download bereit.

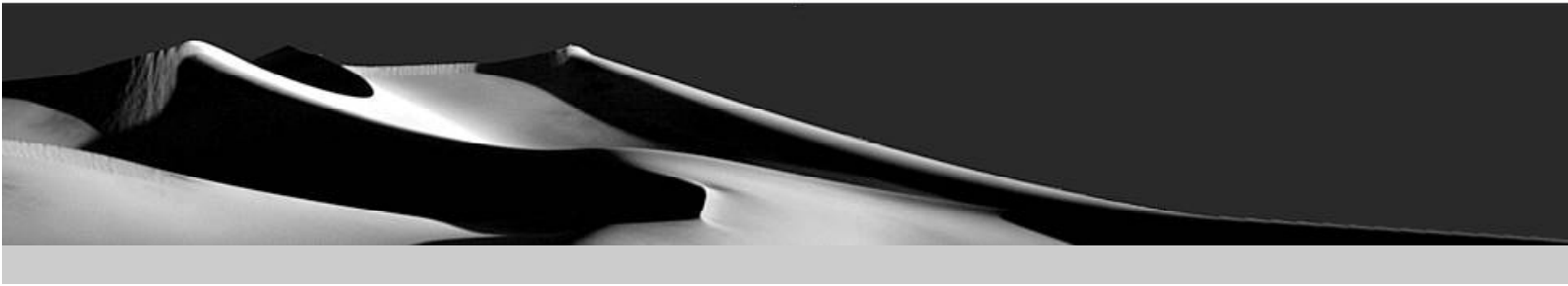


## 1. Hintergründe

Hydrologische Größen wie Abflussmenge oder Sedimentfrachten werden von verschiedenen Prozessen beeinflusst, flächenhaft wirkenden Steuerfaktoren im Einzugsgebiet (Niederschlagsintensität, Neigung, Bodenpermeabilität, Vegetationsdichte, etc.) und der Transportkapazität im Flusssystem. Flächenhaft wirkende Steuerfaktoren liefern das Ausgangsmaterial, linienhafte flusssynamische Prozesse sorgen für den Abtransport aus dem Einzugsgebiet hinaus. Hindernisse wie Staudämme, Reservoirs oder natürliche Seen vermindern jedoch die Strömungsgeschwindigkeit in Flüssen und lösen so eine vorzeitige Ablagerung oder Verminderung aus. Folglich wird am Ausgang und in den Tiefenlagen eines Einzugsgebiets weit weniger gemessen, als dies aufgrund der flächenhaft wirkenden Steuerfaktoren eigentlich der Fall sein müsste.

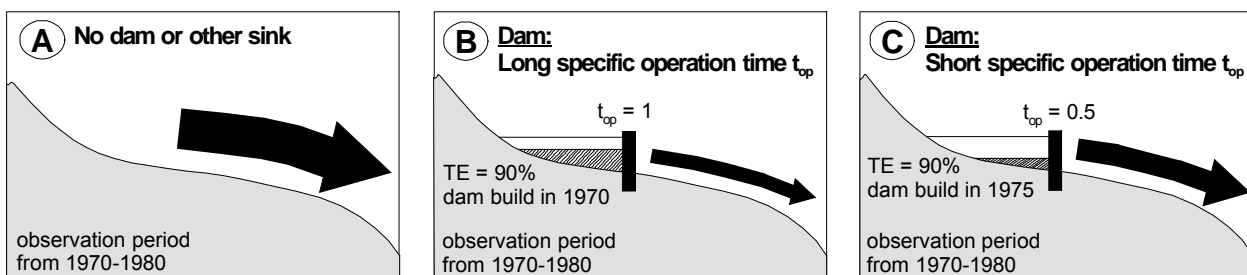
Durch anthropogene Eingriffe hat sich die Zahl und räumliche Verteilung von Senken (Staudämme, Reservoirs) in allen Einzugsgebieten stark verändert. Wurden um 1900 global nur etwa 1.000 größere Staudämme registriert, so hat sich ihre Zahl bis zum Jahr 2000 auf knapp 50.000 erhöht (WCD, 2000). Parallel zum zeitlichen Wandel hat sich so auch beständig (!) die Rückhaltekapazität innerhalb der Einzugsgebiete verändert, und mit ihr die Höhe des an den Ausgang transportierten „hydrologischen Materials“ (Abflussmenge, Bodenpartikel, gelöste chemische Substanzen, etc.). Dies führt zum Problem, dass Messdaten von verschiedenen Einzugsgebieten bzw. Messstellen innerhalb eines Einzugsgebiets kaum miteinander vergleichbar sind, da sie i.d.R. zu verschiedenen Zeiträumen erhoben wurden und somit in ganz unterschiedlicher Weise durch die wechselnde Zahl an Senken überprägt worden sind (SCHÄUBLE, 2005, ICOLD, 2000).

Der große Einfluss von Senken im Zusammenhang mit dem Jahr ihrer Entstehung und der jeweils spezifischen Mess- oder Beobachtungsperiode wird anhand eines einfachen Beispiels in Abb. 1 skizziert (vgl. SCHÄUBLE et al., 2007). Während in einem Einzugsgebiet ohne Senken viel Material zum Ausgang transportiert wird (Abb. 1, A), bewirkt der Bau eines Staudamms einen – je nach Fertigstellungsjahr – unterschiedlich starken Rückgang: eine extreme Reduktion im Falle einer Fertigstellung vor einer gegebenen Messperiode (Abb. 1, B) und eine entsprechend geringere Reduktion im Fall einer Inbetriebnahme während oder gegen Ende einer gegebenen Messperiode (Abb. 1, C). Die genaue Reduktion hängt also neben der eigentlichen Rückhaltekapazität der Senke selbst (= trap-efficiency TE) immer von ihrem Entstehungsjahr und der jeweiligen Messperiode ab, mit anderen Worten: von ihrer relativen Einflussdauer (= specific operation time  $t_{op}$ ), welche mit der folgenden Formel berechnet werden kann:



$$t_{op} = t_o / t_p$$

wobei:  $t_o$ : Betriebsjahre während der Messperiode,  $t_p$ : Gesamtdauer der Messperiode



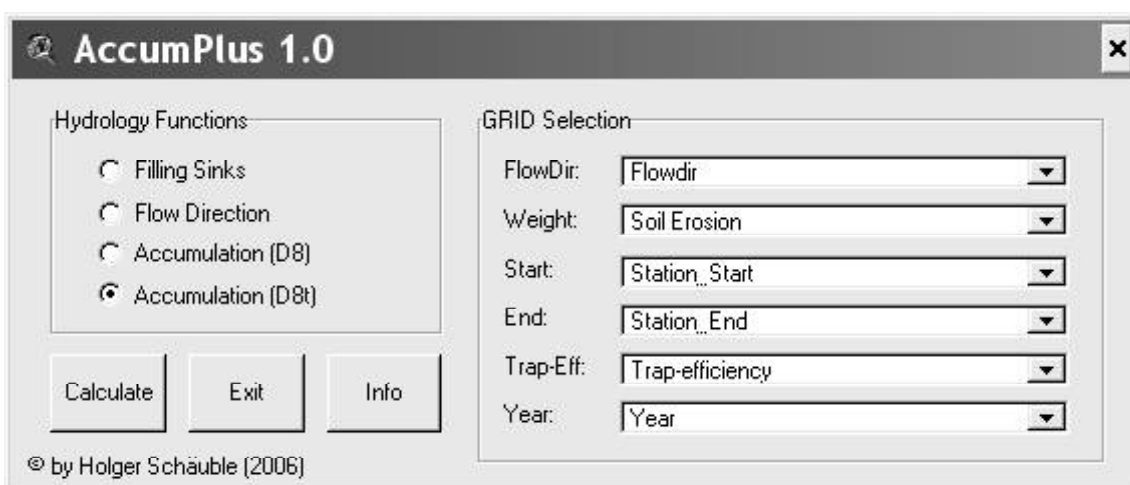
**Abb. 1:** Einfluss von Senken und der Zeit bei hydrologischen Berechnungen am Beispiel eines Staudamms mit einer Rückhaltekapazität (TE) von 90% der eintreffenden Sedimentfracht. Die Dicke des schwarzen Pfeils wächst proportional zur Sedimentfracht (aus: SCHÄUBLE et al., 2007).

Vorgänge und Prozesse der eben genannten Art können mit keinem der derzeit verfügbaren GIS-Programme analysiert werden, da diese weder die Verminderung durch Senken (= trap-efficiency TE) noch den zeitlichen Aspekt (= specific operation time  $t_{op}$ , d.h. das Entstehungsjahr eines Damms und den Beginn und das Ende einer Messperiode) berücksichtigen. Folglich sind mit GIS (ArcView, ArcGIS, IDRISI, GRASS, PCRaster, etc.) nur statische „steady-state“ Simulationen möglich, nicht jedoch dynamische hydrologische Analysen von Einzugsgebieten, in denen sich die Zahl von Senken von Jahr zu Jahr und im Verlauf einer Messperiode verändert hat und immer noch ändert. Hydrologische Analysen von Einzugsgebieten werden mangels Alternativen daher gegenwärtig nur mit einfachen D8-Single-Flow Algorithmen durchgeführt (= Flow accumulation mit einem Fließrichtungs- und ev. noch einem zusätzlichen Gewichtungsraster; vgl. WILSON & GALLANT, 2000). Ein Vergleich zwischen mit GIS simulierten und am Fluss gemessenen Werten (Abflussmengen, gemessene Suspensions- oder Lösungsfrachten) ist so aber nicht möglich, weil die gemessenen Werte durch die Senken und die zeitlichen Veränderungen stark überprägt worden sind.

Dieser Missstand wird durch das vorgestellte Programm ACCUM PLUS 1.0 behoben (Abb. 2), das unter [www.terracs.com](http://www.terracs.com) zum kostenfreien Download bereitsteht. In ACCUM PLUS sind zwei verschiedene Fließalgorithmen implementiert, ein herkömmlicher **D8-Algorithmus** (WILSON & GALLANT, 2000), der in allen GIS-Programmen mit hydrologischen Funktionalitäten enthalten ist, sowie erweiterter Fließalgorithmus, mit dem der Zeitfaktor und die Rückhaltekapazität von Senken unterschiedlichster Art berücksichtigt werden kann



(**D8t-Algorithmus**, SCHÄUBLE et al., 2007). Auf diese Weise sind auch komplexeste Analysen von Einzugsgebieten im regionalem oder globalem Maßstab möglich, bei denen der Anwender das zeitlich variable Verhalten genau simulieren kann (SCHÄUBLE, 2005).



**Abb. 2:** Programmoberfläche von ACCUM PLUS 1.0 für ArcView (aus: SCHÄUBLE et al., 2007).

## 2. ACCUM PLUS 1.0 für ArcView

Im Gegensatz zu den hydrologischen Funktionen bestehender GIS-Software (ArcView, ArcGIS, IDRISI, GRASS, PC Raster, etc.) können in ACCUM PLUS 1.0 zusätzliche Parameter für hydrologische Simulationen berücksichtigt werden (Abb. 2):

- die Rückhaltekapazität einer Senke in % (Versickerungsraster im Feld „Trap-Eff“)
- das Entstehungsjahr einer Senke (Jahresraster im Feld „Year“)
- das Startjahr einer Zeit- oder Beobachtungsperiode (Jahresraster im Feld „Start“)
- das Endjahr einer Zeit- oder Beobachtungsperiode (Jahresraster im Feld „End“)

Auf diese Weise können sowohl das Abflussgeschehen wie auch der Transport von Sediment- und Lösungsfrachten sehr detailliert analysiert werden. Neben einfachen Simulationen ähnlich denen der beste-

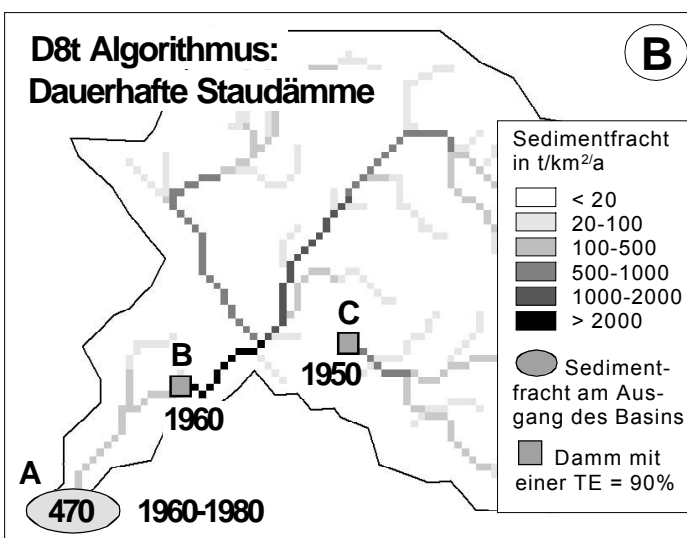
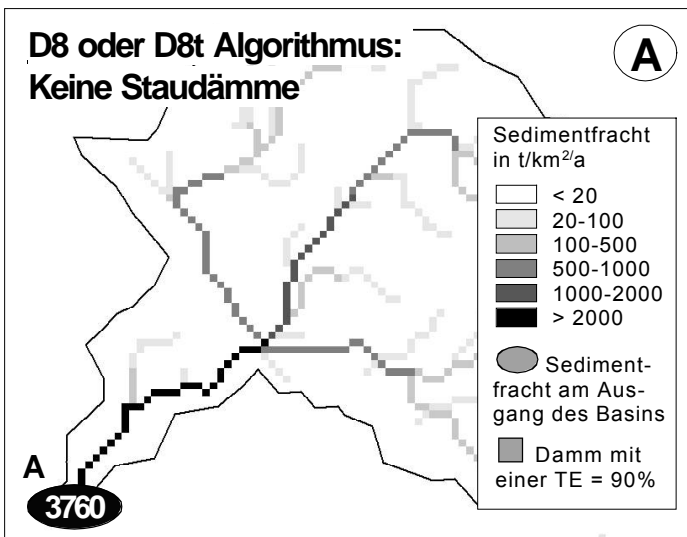


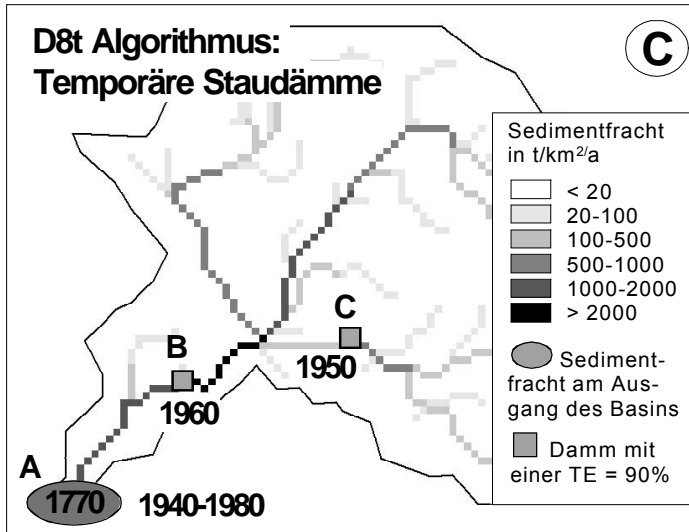
henden GIS-Systeme (Abb. 1, A), lassen sich so auch die Auswirkungen komplexer zeitlicher Entwicklungen analysieren (Abb. 1, B und C). Zur Veranschaulichung sind im Folgenden **drei exemplarische Berechnungen** aufgeführt (Abb. 3), die zeigen, wie sich die Akkumulationswerte – in diesem Falle die Suspensionsfracht in einem Flusssystem in  $t/km^2/a$  – unter Berücksichtigung von Senken und der Zeit verändern. Alle Berechnungen beziehen sich auf dasselbe in topographischer und klimatischer Hinsicht identische Einzugsgebiet: in einem Fall ohne Fließhindernisse, in den beiden anderen mit jeweils zwei Staudämmen und einer Trap-Efficiency von 90% (d.h. im Betriebszustand werden 90% der ankommenden Sedimentfracht zurückgehalten und 10% über die Staudammmauer weitertransportiert). Die Berechnungsbeispiele sind bewusst einfach gehalten, so dass das Grundprinzip deutlich wird. Der Sedimentaustrag wird als konstant angenommen (pro Zelle wird exakt die gleiche Sedimentmenge mit einem Wert von  $1 t/km^2/a$  mobilisiert) und ausser den beiden Staudämmen nicht weiter reduziert, d.h. konsequent an die jeweils tiefer liegenden Zellen weitergegeben. Auf die Möglichkeiten zu verfeinerten Analysen wird im nächsten Abschnitt eingegangen.

Bei herkömmlichen Akkumulationsberechnungen nach Art der bestehenden GIS-Programme (= keine Senken oder Staudämme) sammelt sich mit zunehmender Entfernung von den Wasserscheiden im Fluss immer mehr Material an, das am Messpunkt A den Maximalwert von  $3760 t/km^2/a$  erreicht (Abb. 3, A: vollständige Weitergabe ohne Reduktion). Im Falle von während der Beobachtung bestehender und bei der Simulation berücksichtigter Senken reduziert sich die Sedimentfracht entsprechend. Im vorliegenden Fall werden von ACCUM PLUS 1.0 nur noch sehr geringe Werte von  $470 t/km^2/a$  berechnet (Abb.3, B: Staudämme mit einer Rückhaltekapazität von 90%, die während der gesamten Beobachtungsperiode von 1960-1980 in Aktion sind). Ein ganz anderes Bild ergibt sich, wenn dagegen Senken bzw. Staudämme erst im Verlauf einer Beobachtungsperiode entstehen bzw. gebaut werden und so nur während eines (Bruch)teils der Messperiode aktiv sind (Abb. 3, C: Staudämme mit einer Rückhaltekapazität von 90% bei einer Beobachtungsperiode von 1940-1980). Hier reduziert sich die Sedimentfracht zwar auch und zwar auf einen Wert von  $1770 t/km^2/a$ , jedoch bei weitem nicht mehr so stark wie zuvor, da – trotz gleicher baulich bedingter Rückhaltekapazität der Staudämme – die Wirkungsdauer und damit die tatsächliche Sedimentfrachtreduktion vermindert ist. So ist z.B. der Staudamm B nur während der Hälfte der Beobachtungsdauer in Betrieb, was seine tatsächliche Rückhaltekapazität um effektiv die Hälfte vermindert (= von 1940-1960 kein Sedimentrückhalt; von 1960-1980 ein Sedimentrückhalt von 90%). Entsprechendes gilt für den zweiten Staudamm C weiter oben im Einzugsgebiet, der zu  $\frac{3}{4}$  der Beobachtungsdauer in Betrieb ist und folglich eine tatsächliche Rückhaltekapazität von 67,5% aufweist (= von 1940-1950 kein Sedimentrückhalt, von 1950-1980 ein Sedimentrückhalt von 90%).



Ähnlich gelagerte Berechnungen sind mit ACCUM PLUS 1.0 – genügend Arbeitsspeicher vorausgesetzt – in allen Einzugsgebieten bis zu einer Größe von maximal 32000\*32000 Pixel möglich. Dabei beschränkt sich die Anwendbarkeit nicht nur, wie hier exemplarisch gezeigt, auf die Simulation der Sedimentfracht, sondern auf hydrologische Größen aller Art.





**Abb. 3:** Simulation des Sedimenttransports mit ACCUM PLUS 1.0. A: Einzugsgebiet ohne Senken (D8-Algorithmus); B: Einzugsgebiet mit Senken, welche die ganze Zeit existieren (D8t-Algorithmus); C: Einzugsgebiet mit Senken, welche erst im Verlauf der Beobachtungsperiode entstehen (D8t-Algorithmus) (verändert nach SCHÄUBLE et al., 2007).

### 3. Algorithmus und erweiterte Berechnungsoptionen

In ACCUM PLUS sind zwei verschiedene Berechnungsalgorithmen implementiert, ein auf dem Single-Flow Prinzip basierender **D8-Algorithmus**, der in identischer Form in allen wichtigen GIS-Programmpaketen enthalten ist, z.B. ArcGIS, ArcView, IDRISI oder GRASS (vgl. WILSON & GALLANT, 2000), sowie der **neu entwickelte D8t-Algorithmus**, der in SCHÄUBLE et al. (2007) ausführlich beschrieben wird. Kurzgefasst ist der D8t-Algorithmus ein um zeitgestützte Versickerungsberechnungen erweiterter D8-Algorithmus. D.h. die Berechnungen finden in rekursiver Weise statt, wobei in einem ersten Schritt das jeweilige Einzugsgebiet von der Messstelle aus in flussaufwärtiger Richtung durchlaufen wird (Abb. 4, A). An der Wasserscheide „kippt“ die Bewegungsrichtung und die Berechnung (d.h. Aufsummierung der durchflossenen Zellen bzw. Zelleninhalte) findet in Richtung des größten Gefälles statt. Beim Erreichen eines Staudamms oder Hindernisses wird das „Material“ (= aufsummierte gewichtete oder ungewichtete Pixel) mit folgender Formel multipliziert:

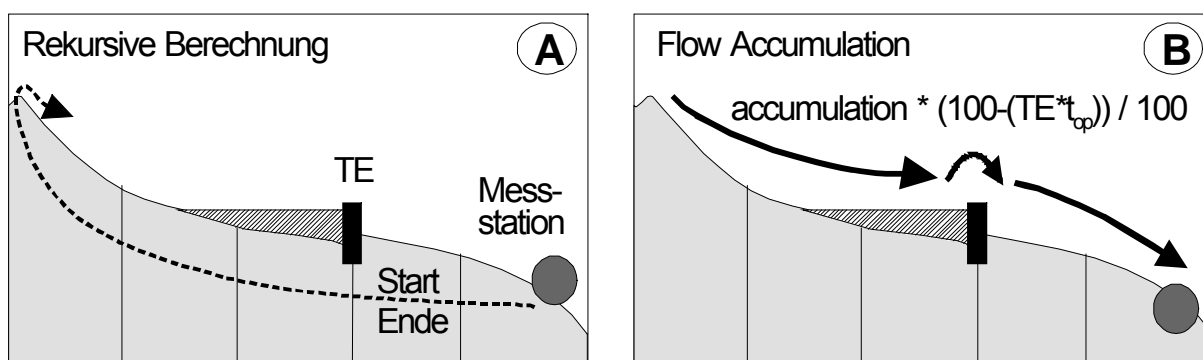


$$\text{Accum}_1 = \text{Accum}_0 * [100 - (\text{TE} * t_{op})] / 100$$

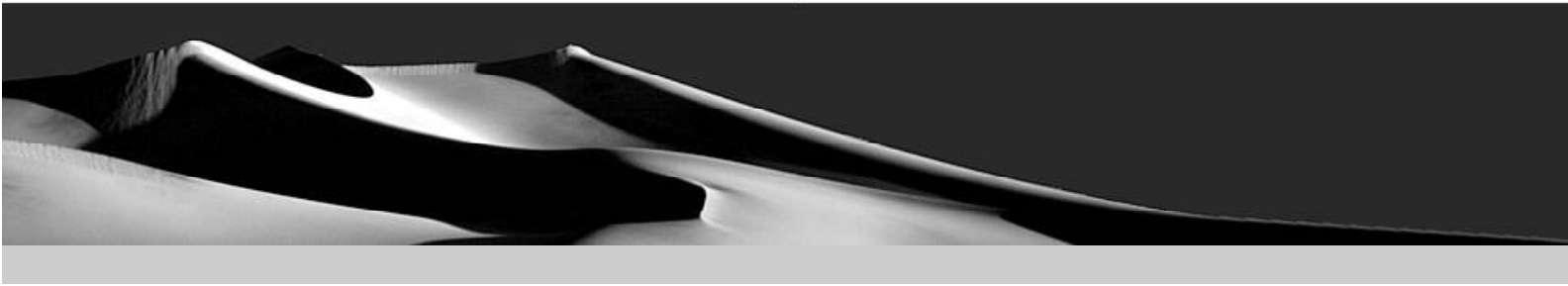
wobei: Accum = aufsummierte Pixel vor (Accum<sub>0</sub>) bzw. nach (Accum<sub>1</sub>) der Staudammmauer/Senke,  
 t<sub>op</sub> = relative Einflussdauer, TE = Trap-Efficiency in %

Dies hat zur Folge, dass das akkumulierte "Material" entsprechend der Trap-Efficiency der Senke (Stausee, Damm oder sonstiges Hindernis) und der relativen zeitlichen Einflussdauer reduziert wird. Nach der Passage des Hindernisses wird die Berechnung auf die bekannte Art des D8-Algorithmus weitergeführt bis beim nächsten Hindernis wieder die obere Reduktionsformel zur Anwendung kommt. Um etwaigen Unklarheiten vorzubeugen, muss in diesem Zusammenhang auf zweierlei Punkte hingewiesen werden:

- Der Wert der faktischen Trap-Efficiency (TE \* t<sub>op</sub>) wird von 100 subtrahiert, da berechnet wird, wieviel „Material“ weiter flussabwärts gelangt und nicht wieviel „Material“ hinter dem Hindernis verbleibt.
- Die rekursive Berechnungsweise ist zwingend notwendig, da ansonsten die relative Einflussdauer nicht ökonomisch berechnet werden könnte. Im ersten Schritt werden (Jahres)daten zum Start und Ende der Messperiode von der Messstation ausgelesen und als Variablen quasi „huckepack“ während der Berechnungsroutine das Einzugsgebiet hinaufgeschleppt (Abb. 4, A). Bei der darauf folgenden Akkumulationsberechnung in flussabwärtiger Richtung werden diese beide Variablen (Start/Ende der Messperiode) dann verwendet, um die spezifische Einflussdauer des Hindernisses zu berechnen (Abb. 4, B).



**Abb. 4:** Funktionsweise des D8t-Algorithmus von ACCUM PLUS. A: Erster Schritt – Durchlaufen des Einzugsgebiets in flussaufwärtiger Richtung (Bottom-up); B: Zweiter Schritt – Berechnung der Akkumulation (Top-down) in Fließrichtung.



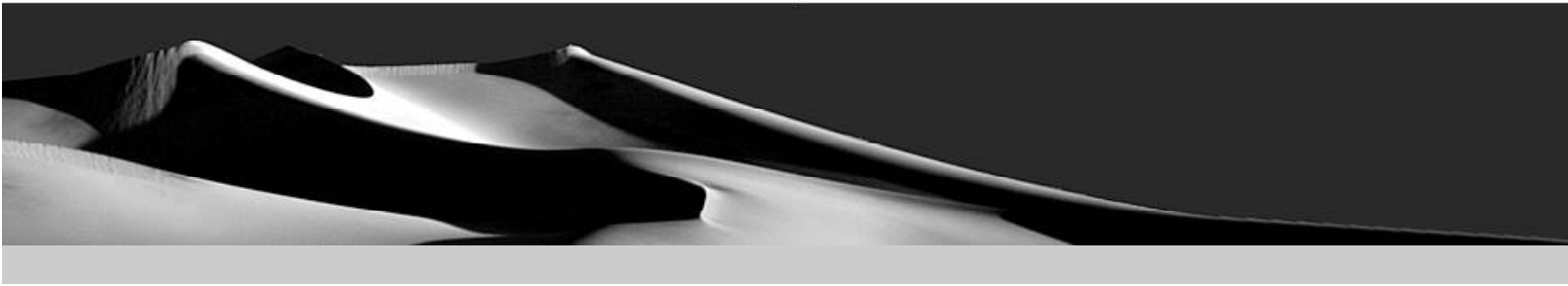
Neben dem hier vereinfacht skizzierten Berechnungsprinzip bietet der D8t-Algorithmus von ACCUM PLUS noch weitere Möglichkeiten. So kann der Ausgangswert jeder einzelnen Rasterzelle beliebig gewichtet werden, z.B. um den Sedimentaustrag verschiedener Flächen mit einem eigenen Gewichtungsraster zu berücksichtigen (vgl. SCHÄUBLE, 2006). Ebenso können über die Definition einzelner Staudammensenken hinaus, mit dem Optionsraster „Trap-Eff“ beliebig große Flächen mit beliebigen Versickerungswerten berücksichtigt werden. Eines sollte aber in jedem Fall berücksichtigt werden. ACCUM PLUS wurde für die Berechnung der hydrologischen Eigenschaften (= Flow Accumulation) großer Einzugsgebiete entworfen, die jenseits eines Maßstabes von 1:25000 liegen. Durch die Konzeption als Single-Flow Algorithmus werden außerdem divergierende Fließrichtungen ebenso wenig berücksichtigt, wie umflossene Hindernisse oder Flussverbreiterungen in einem Flussverlauf. Exakte Flussdaten sind jedoch im überregionalen Maßstab ohnehin kaum zu bekommen, so dass die Anwendbarkeit darunter nicht nennenswert leidet.

## 4. Abschliessende Bemerkungen

Mit ACCUM PLUS 1.0 ist ein einfach zu bedienendes Tool verfügbar, mit dem einfache und komplexe hydrologische Simulationen in Einzugsgebieten aller Größen möglich sind. Das hier gezeigte Beispiel der Sedimentfrachtsimulation zeigt nur eine exemplarische Anwendung. Ebenso kann ACCUM PLUS auch für hydrologische Berechnungen anderer Art verwendet werden, z.B.:

- zur Simulation des Wasserabflusses in unterschiedlich großen Einzugsgebieten
- zur Kalibrierung von Messwerten, die über einen langen Zeitraum in vom Menschen überprägten und beeinflussten Einzugsgebieten gewonnen worden sind
- zur Abschätzung der Auswirkung von Wasserschutzgesetzen, bei denen ab einem bestimmten Zeitpunkt der Austrag von Schadstoffen in die Flüsse reduziert wird

Darüber hinaus kann ACCUM PLUS 1.0 auch für viele nichthydrologische Fragestellungen eingesetzt werden und zwar immer dort, wo eine räumliche Ausbreitung mit zeitlich wechselnden Hindernissen (Senken) simuliert werden soll, z.B. zur Simulation von Luftschadstoffen, Handelsströmen, Flüchtlingsbewegungen oder Epidemien. Die Möglichkeit, beliebig viele zeitlich variable und invariable Hindernisse einzufügen, eröffnet dem Modellierer in jedem Fall sehr weitreichende Möglichkeiten.



## Danksagungen

ACCUM PLUS hat seinen Ursprung in einer von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Dissertation (Projekt 643/1-1) am Institut für Angewandte Geowissenschaften der TU Darmstadt. Wertvolle Staudammdaten für die Entwicklung verdanke ich Lyle Steffen vom US Department of Agriculture und Bill Renwick von der University of Miami.

## Literatur

- INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD, 2000): World Register of Dams 1998. Computer Database. Paris. <http://www.icold-cigb.net/listepublications.aspx>
- SCHÄUBLE, H. (2005): Sedimentfrachtprognosen mit GIS. Neue Strategien für globale Modellgleichungen unter besonderer Berücksichtigung von Staudämmen und des zeitlichen Wandels. Dissertation an der TU Darmstadt (Darmstadt). <http://elib.tu-darmstadt.de/diss/000653/>
- SCHÄUBLE, H. (2006): AV EROSION. Ein Programm zur Simulation der Bodenerosion nach den Modellen USLE und MUSLE87. Download unter: [www.terracs.com](http://www.terracs.com).
- SCHÄUBLE, H.; MARINONI, O.; HINDERER, M. (in press, 2007): A GIS-based method to calculate flow accumulation by considering dams and their specific operation time. In: Computers & Geosciences.
- WILSON, J.P.; GALLANT, J.C. (2000): Terrain Analysis. Principles and Applications. John Wiley and Sons, New York.
- WORLD COMMISSION ON DAMS (WCD) (2000): Dams and Development. A New Framework for Decision-Making. The Report of the World Commission on Dams. Earthscan Publishers, London. <http://www.dams.org/report/>

## Quelle

Artikel aus: „Angewandte Geoinformatik 2007. Beiträge zum 19. AGIT Symposium in Salzburg. Wichmann Verlag“. Bei Amazon unter: <http://www.amazon.de/Angewandte-Geoinformatik-2007-Beitr%C3%A4ge-AGIT-Symposium/dp/3879074518>