

Ansätze für eine quantitative und reproduzierbare Abschätzung von potenziellen Murvolumen in bayerischen Wildbacheinzugsgebieten

Quantitative and reproducible estimation of potential sediment storage in mountain torrent catchment areas in Bavaria

Andreas Dietrich¹, Si-Yen Luu-Chucholowski², Michael Krautblatter³, Andreas Rimböck⁴, Karl Mayer⁵

¹ B.Sc., Andreas Dietrich, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, Technische Universität München, Deutschland, a.dietrich@tum.de

² M.Sc., Si-Yen Luu-Chucholowski, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, Technische Universität München, Deutschland, s.luu@tum.de

³ Prof. Dr.rer.nat, Michael Krautblatter, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, Fachgebiet für Monitoring, Analyse und Frühwarnung von Hangbewegungen, Technische Universität München, Deutschland, m.krautblatter@tum.de

⁴ Dr. Ing. Andreas Rimböck, Hochwasserschutz und alpine Naturgefahren, Landesamt für Umwelt, Augsburg, Deutschland, andreas.rimboeck@lfu.bayern.de

⁵ Karl Mayer, Hochwasserschutz und alpine Naturgefahren, Landesamt für Umwelt, Augsburg, Deutschland, karl.mayer@lfu.bayern.de

Zusammenfassung

In alpinen Wildbächen stellen Murereignisse nicht zuletzt durch die Ausweitung von Siedlungsflächen und des globalen Klimawandels eine zentrale Gefahrenquelle dar. Bayernweit ereigneten sich von 1996 bis 2004 rund 39 Murereignisse mit zum Teil erheblichen Schäden sowohl an öffentlichen Straßen als auch an privaten Gebäuden (Bayer. Landtag 2005:56). Um die Gefahrenquelle besser einschätzen zu können, soll eine einheitliche Vorgehensweise in der Geschiebefrachtabschätzung für Bayern herausgegeben werden. Mit Hilfe von mathematischen Funktionen (Polynom 2.-6. Grad) nach SCHROTT et al. (2003) wird die Sedimentmächtigkeit im Bachbett abgeschätzt. Durch Anwendung der Polynome sind die Resultate objektiv und reproduzierbar. Mittels einer geophysikalischen Messung (Gleichstrom-Widerstandstomographie) kann das Ergebnis verifiziert werden. Am Beispiel des Wildbachs im Steigbachtal wurden an 27 Querprofilen das Sedimentvolumen nach dem Polynomverfahren abgeschätzt. Bei der Verwendung einer mathematischen Funktion variiert die Genauigkeit und Tauglichkeit der Methode mit der Form des Tals. Durch die Option niedrige Polynomgrade zu verwenden, ist das Verfahren von unruhiger Hangmorphologie unabhängig. Diese Erkenntnisse liefern mögliche Ansätze zur Geschiebefrachtabschätzung für die geplanten Leitlinien in Bayern.

Schlüsselworte: Murvolumen, Wildbach, Sedimentmächtigkeit, Naturgefahren

Abstract

From 1996 till 2004, approximately 39 debris flows caused damage to Bavaria's public infrastructure and private buildings (Bayer. Landtag 2005:56). In order to better evaluate the potential hazard posed by mud and debris flows, we contribute to a standardized guideline for Bavaria. The guideline will help water management offices and engineering companies to approach a systematic valuation of a torrent's hazard and risk. Our ambition is to make evaluations and risk analysis of mountain torrents performed by different experts more reproducible. Different methods to survey and evaluate mountain torrents were introduced by the Austrian "ETAlp" method (PROJEKTTEAM ETALP 2003), by the Swiss "Schweizer Empfehlungen" method (LANDESHYDROLOGIE UND -GEOLOGIE 1996) and by the SABO Association (SABO DIVISION et al. 1999). In Germany such guidelines are not yet available.

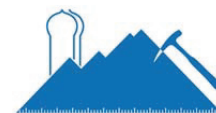
Sediment storage capacity is a decisive factor for a torrent's hazard and risk. Here we develop a reproducible method to estimate the streambed's sediment storage capacity. We test its explanatory power in the mountain torrent Steigbach, Immenstadt, Oberallgäu in South-West Bavaria (~ 120 km south-western of Munich). We use mathematical functions (polynomial grades 2-6) determined by SCHROTT et al. (2003) to calculate the storage capacity. The of applying these functions rather than estimating depth are objective and reproducible sediment volumes in torrent beds. For verification, we use DC-Resistivity measurements. Along the Steigbach torrent, we took 27 cross sections to evaluate our mathematical models. We then compared the results of the resistivity surveys to the polynomial models. The method's accuracy and capability varies with valley geometry of the valley. Low polynomial grades produced the best results in uneven slope morphology. These results provide field verification of sediment storage capacity estimates for the planned guideline of the Landesamt für Umwelt.

Keywords: debris flow, mountain torrent, natural hazard, sediment storage capacity

1 Einleitung

In alpinen Wildbächen stellen Hochwasser- und vor allem Murereignisse durch die Ausweitung von Siedlungsflächen

und des globalen Klimawandels eine zentrale Gefahrenquelle dar. Daher fordert das Bayerische Wassergesetz (Art. 46), dass Wildbachgefährdungsbereiche ausgewiesen werden müssen. Hierbei ist auf die „wildbachtypischen Eigenschaften



ten“ einzugehen, d.h. insbesondere auf den Geschiebetransport. Im Projekt „Integrale Entwicklungskonzepte für Wildbacheinzugsgebiete“ im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt soll dieses Thema näher betrachtet werden.

In den alpinen Anrainerstaaten sind Verfahren zu Geschiebefrachtabschätzungen bereits weit verbreitet, jedoch oft schwer reproduzierbar. In Bayern existiert bislang noch keine einheitliche Vorgehensweise. Neben empirischen, GIS-basierten und geometrischen Abschätzverfahren sind Geländeerhebungen und Modellierungen gängig. In diesem Projekt wurde am Beispiel des Wildbacheinzugsgebiets Steigbachtal (Immenstadt, Allgäu) eine Abschätzung der Geschiebefracht durchgeführt und bestehende Ansätze verglichen. Die Geschiebefracht wird in der Regel maßgeblich durch das Sedimentvolumen der Bachsohle bestimmt. Um dieses Volumen abzuschätzen, kann die maximale Erosionstiefe des Baches mithilfe unterschiedlicher geometrischer Ansätze bestimmt werden.

Geologisch liegt das Steigbachtal im Bereich der Faltenmolasse. Die Gesteine bestehen aus Wechselfolgen von Konglomeraten, Sand- und Mergelsteinen. Sie gehören der Unteren Süßwassermolasse an und entstanden im Oligozän (BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT, 1983).

2 Methodik

2.1 Polynomverfahren

Im späten 19. Jahrhundert erkannte MCGEE (1883), dass ehemals vergletscherte Täler eine U-Form besitzen. Seitdem wird immer wieder versucht, die Querschnitte dieser Täler mit mathematischen Formeln zu beschreiben. SVENSSON (1958) näherte Profile in Nordschweden anhand eines quadratischen Polynoms an. SCHRÖTT et al. (2003) wandten dieses Verfahren im Rheintal in den Bayerischen Alpen an. Deren Methodik wurde auch in der vorliegenden Arbeit im Steigbachtal angewandt.

Das Projektgebiet wurde in 13 Homogenbereiche gegliedert (siehe Abb. 1). Die Parameter, aufgrund derer die Differenzierung in Homogenbereiche erfolgt sind \pm konstante Längsneigung des Bachbettes, \pm konstanter Bach-Querschnitt und \pm gleiche Sohlbedingungen des Baches. Anschließend wurden mit Hilfe eines 1m-DGMs 27 Querprofile des Flusses und der angrenzenden Böschungen erstellt. In Abb. 1 ist die Lage der Profile dargestellt. Jedes dieser Profile besitzt in dem jeweiligen Homogenbereich eine Gültigkeitslänge L_{GA} . Während dieser Länge verändern sich die oben genannten Parameter nur in geringem Maße. Aus den Profilen wurden die Höhen- und Längenwerte extrahiert und daraus Punktdiagramme erstellt. Anhand einer Trendlinie $f(x)$, die in den Querprofilen zwischen Grad 2 und 6 variiert, wird die Böschung modelliert (Abb. 2). In die Berechnung gehen die Werte der maximal benetzbaren Bachsohle (z.B. Hochwasserereignis) nicht mit ein. Durch die entstehende Übertiefung in der Bachsohle kann die Sedimentmächtigkeit berechnet werden. Als Vergleich wird in

Abb. 2 der modellierten Böschung die reale Böschung gegenübergestellt. In einem folgenden Schritt wurde die Fläche zwischen Bachsohle und Polynom ermittelt. Um das Sedimentvolumen zu bestimmen, wurde die erhaltene Fläche mit der Länge des Flussabschnittes multipliziert, für den das Querprofil seine Gültigkeit besitzt:

$$V [m^3] = \int_a^b (g(x) - f(x)) dx \cdot L_{GA}; \text{ dabei sei } a < b \text{ und } f(i) = g(i) \text{ für } i \in \{a, b\};$$

$g(x)$ = Gerade durch die Böschungspunkte a, b , die bei einem Hochwasser noch benetzt werden, $f(x)$ = Polynomfunktion.

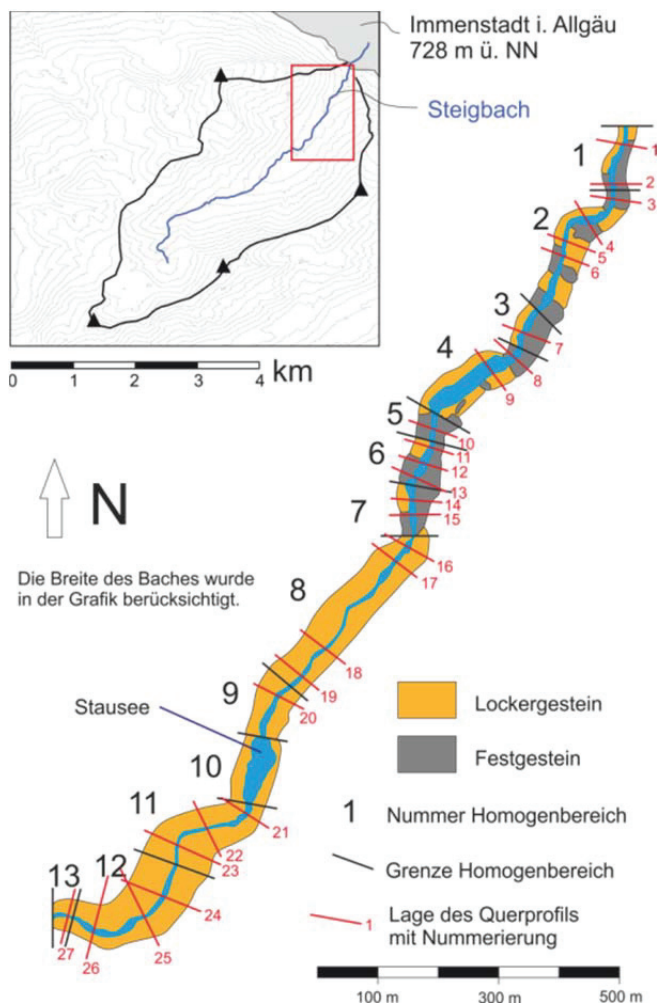


Abb. 1: Einteilung des Steigbaches in Homogenbereiche (schwarze Striche stellen die Grenzen dar) und Lage der Querprofile (rote Striche).

Fig. 1: Classification of the Steigbach in homogenous passages (black lines illustrate the borders) and location of the cross profiles (red lines).

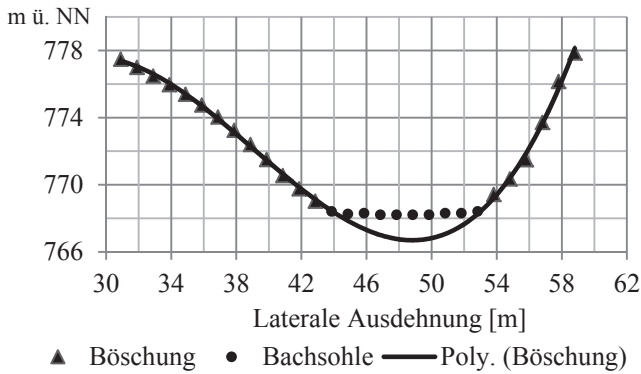


Abb. 2: Oben: Mathematische, reproduzierbare Abschätzung der potenziellen Mur-Geschiebefracht an einem Querschnitt im Bachprofil. Die schwarze Linie beschreibt das Polynom, das durch die Böschungspunkte (▲) interpoliert wurde. Die (●) stellen die Bachsohle dar, wobei diese nicht mit in die Berechnung einhergeht. Unten: Entsprechendes Querprofil im Wildbach.

Fig. 2: On top: Mathematical, reproducible estimation of potential sediment storage based on a cross section in a mountain torrent. The black line describes the polynomial, which is interpolated by points (▲) of the slope. The (●) illustrate some points of the stream bed. These points were not used for the calculation of the polynomial. At the bottom: Appropriate cross section in the mountain torrent.

2.2 ETALP

Die Abschätzung der Sedimentmächtigkeit folgt hierbei ebenfalls nach geometrischen Methoden. Im Unterschied zum Polynomverfahren werden bei dieser Methode die an den Bach angrenzenden Böschungen in die Tiefe extrapoliert. Als Ausgangswerte für die Extrapolation werden diejenigen Punkte an den Böschungen gewählt, die bei einem Hochwasser gerade noch benetzt werden. Aus dem Schnittpunkt der beiden Geraden ergibt sich die abgeschätzte Sedimenttiefe t (Abb. 3). Anhand geologischer Bedingungen kann als Erosionsform entweder ein Dreieck oder ein Rechteck angenommen werden (Formfaktor f , Dreieck $f = 0,5$ Rechteck $f = 1$). Für jedes Querprofil, das für einen Abschnitt in einem Homogenbereich steht, werden diese Daten erhoben (PROJEKTTEAM ETALP 2003). Besteht die Sohle des Baches nicht nur aus Lockermaterial, wird ein Abminderungsfaktor a eingeführt. Tritt beispielsweise in einem Abschnitt des Baches 50 % Fels in der Sohle auf, reduziert sich das Sedimentvolumen dementsprechend um 50 % (PROJEKTTEAM ETALP 2003, 2005).

Geometriedaten ETALP

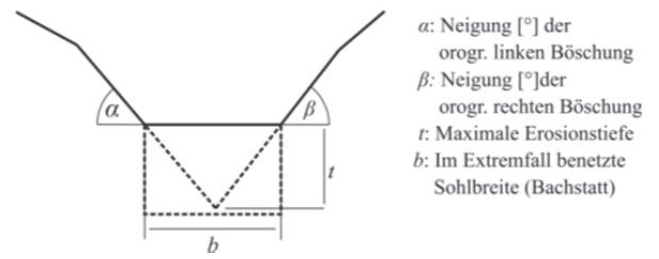


Abb. 3: Geometrische Daten, die im Gelände für das ETALP-Verfahren erhoben werden (verändert nach PROJEKTTEAM ETALP 2005).

Fig. 3: Geometric data, which are acquired/collected in the field (modified after PROJEKTTEAM ETALP 2005).

Die Volumenberechnung erfolgt wiederum unter Berücksichtigung der Länge des Gültigkeitsbereiches L_{GA} des Querprofils und der Breite des Baches b :

$$V [m^3] = b \cdot t \cdot f \cdot L_{GA} \cdot a$$

2.3 Schweizer Modell

Auch für dieses Abschätzverfahren wird der Bach in homogene Abschnitte mit einer Länge L_{GA} unterteilt. Für den Gerinneabschnitt wird folgend eine durchschnittliche Gerinnebreite b festgelegt. Dieser Wert wird für den gesamten Abschnitt angenommen. Der nächste Schritt ist die Bestimmung der Erosionstiefe d . Dafür werden „Pauschalwerte“ verwendet. Für Murgänge beträgt das Verhältnis von Eintiefung zur Gerinnebreite 1:5. Zudem wird ein Reduktionsfaktor für die Sohle (k_{So}) eingeführt. Dieser hat den Sinn, dass nicht immer die Sohle des ganzen Gerinneabschnittes erodiert werden kann, z.B. aufgrund von einer abschnittsweise auftretenden Felssohle, sehr großen Blöcken, oder verschiedenen Sperren aus Holz oder Stein. Diese Faktoren besitzen Werte zwischen 0,3 und 1 (LANDESHYDROLOGIE UND – GEOLOGIE 1996).

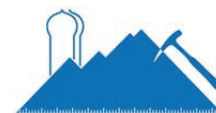
Das erodierbare Sedimentvolumen errechnet sich folgend:

$$V [m^3] = k_{So} \cdot L_{GA} \cdot b \cdot d$$

2.4 Geoelektrik

Der Grundgedanke der Gleichstrom-Widerstandsmessung beruht darauf, dass unterschiedliche Materialien den Strom unterschiedlich gut leiten. Reziprok lassen sich somit durch die Messung von Leitfähigkeiten Rückschlüsse auf die Art des Materials ziehen (KNEISEL 2006).

Zwischen zwei Elektroden wird ein Gleichstrom angelegt. Während dessen wird zwischen einem zweiten Elektrodenpaar die Potentialdifferenz gemessen. Die maximale Eindringtiefe des Gleichstroms ist durch die Entfernung der Elektroden gegeben, an denen der Strom angelegt wird und beträgt beim Wenner Array rund $\frac{1}{6}$ dieser Distanz. Durch die Variation der Entfernung der Elektroden an denen der Strom angelegt wird und der Elektroden, zwischen denen die Potentialdifferenz gemessen wird, können Informationen über den Untergrund gewonnen werden. In Abb. 4 sind die zwei im Gelände angelegten Profillinien zu sehen. Dabei können drei Böschungstypen (A, B und C) unterschied-



den werden. Profil 1 befindet sich in einem Abschnitt (A), in dem der Steigbach auf beiden Seiten von großen Lockergesteinsarealen umgeben ist. Die Länge des Profils beträgt 100 m. Profil 2 führt durch eine 64,75 m lange Fließstrecke. Abschnitt (B) besitzt eine Festgesteinsböschung, im Bereich C tritt ein Wechsel von Locker- zu Festgestein ein. Es wurde als Stromstärke 1 mA angelegt. Als Anordnung der Elektroden wurde der Wenner Array angewandt.

Wechsel von Locker- und Festgesteinsböschungen sind mittlere Sedimentvolumina zu erwarten. Die Werte der Geophysik stimmen mit den anderen Verfahren weitestgehend überein. Zu ist allerdings zu beachten, dass die Geophysik lediglich angibt, wie viel Sediment prinzipiell zur fluviatilen Umlagerung zur Verfügung steht. Wie viel davon tatsächlich bei einem Extremereignis mobilisiert wird, wird durch die genannten Methoden abgeschätzt.

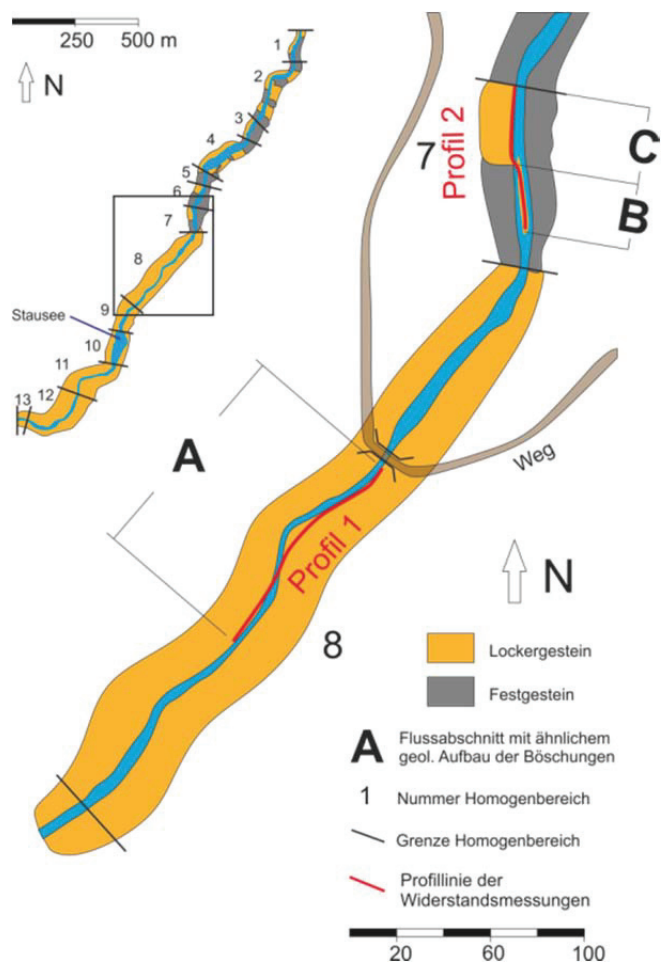
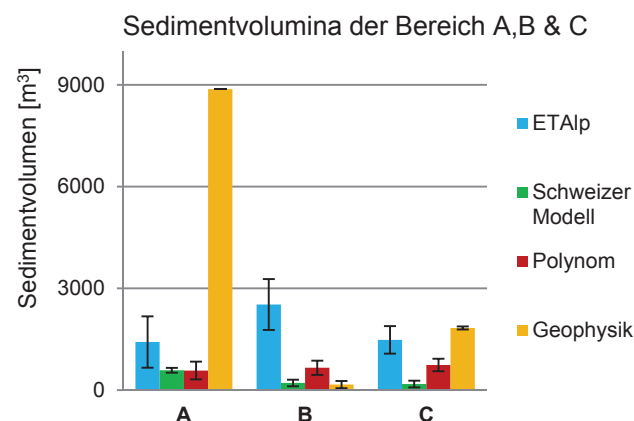


Abb. 4: Geographische Lage der geophysikalischen Messprofile im Steigbach. Die Buchstaben A, B und C markieren jeweils charakteristische Böschungsabschnitte.

Fig. 4: Geographic position of the geophysical profiles in the Steigbach. The letters A, B and C each mark characteristic slope-passages.

3 Ergebnisse

In Abb. 5 sind die Ergebnisse der Schätzverfahren den Messungen der Geophysik in den Bereichen A, B und C gegenübergestellt (die Bereiche sind in Abb. 4 eingezeichnet). Die Ergebnisse des Schweizer Modells wurden von LUU-CHUCHOŁOWSKI (2011) übernommen und angepasst. Bei Lockergesteinsböschungen ergibt die Geophysik sehr hohe Sedimentvolumina. Die anderen Verfahren ergeben deutlich geringere Werte. Bei Festgesteinsböschungen treten bei der Gleichstrom-Widerstandstomographie sehr geringe Volumina auf. Alle anderen Methoden ergeben etwas höhere Resultate, mit Ausnahme des Schweizer Modells. Bei einem



A = Lockergesteinsböschung, B = Festgesteinsböschung, C = Wechsel zw. Locker- und Festgesteinsböschung

Abb. 5: Abgeschätzte Sedimentvolumina anhand der verschiedenen Methoden in drei ausgewählten Bereichen.

Fig. 5: Estimated sediment-volumes with different methods in three selected areas.

Die Ergebnisse der Gleichstrom-Widerstandstomographie sind in der folgenden Abb. 6 gegeben. Die Auswertung erfolgte mit der Software RES2DInv. Die blauen Farben stehen für geringe spez. Widerstände, reziprok für eine gute Leitfähigkeit. Die Bereiche mit rötlichen Farben besitzen geringe elektr. Leitfähigkeiten, also hohe spez. Widerstände.

4 Diskussion

4.1 Polynomverfahren

Im Abschnitt A und C der Widerstandsmessung (siehe Abb. 5) wird das Sedimentvolumen im Vergleich zur Geophysik unterschätzt. Problematisch ist hierbei, dass im Bereich A nur niedrige, flach geneigte Böschungen vorhanden sind. Aus der interpolierten Funktion ergeben sich deshalb nur geringe Sedimenttiefen und dementsprechend geringe Volumina. Im Abschnitt B der Geophysik werden im Gegensatz zu den anderen Abschätzverfahren deutlich realistischere Werte errechnet, die aber immer noch über denen der Widerstandsmessung liegen. Die Böschungen fallen in diesem Bereich B relativ steil ein. Eine gute Annäherung wird durch die Auswahl eines niedrigen Polynomgrades erreicht. Bei dieser Methode wird der weitere Verlauf der Einhänge links und rechts des Baches für die Berechnung der Funktion berücksichtigt. Je enger das Tal ist, das durch den Bach gebildet wird und je steiler die Einhänge einfallen, desto mehr wird eine Mulde bzw. Trogt durch ein Polynom betont.

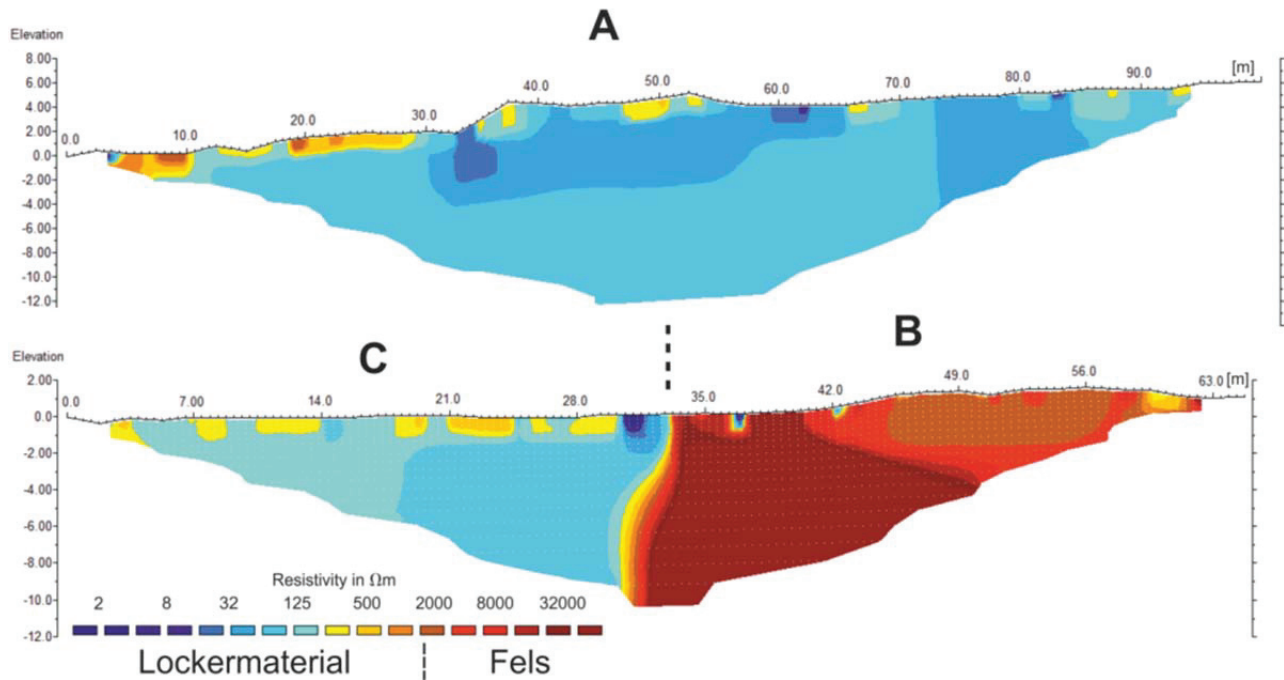


Abb. 6: Die Resultate der Gleichstrom-Widerstandsmessung. Oben: Tiefeninterpretation von Profil 1 (Abschnitt A). Unten: Interpretation von Profil 2 (Abschnitte B und C). Die Farben stehen für unterschiedliche spez. Widerstände.

Fig. 6: Results of the DC-Resistivity measure. On top: Interpretation of profile 1 (area A). At the bottom: Interpretation of profile 2 (areas B & C).

Dies birgt die Gefahr in sich die Sedimentmächtigkeit zu überschätzen. Des Weiteren hat die Wahl des Polynomgrades einen Einfluss auf die modellierte Form des Querprofils. Je höher der Grad des Polynoms, desto besser passt dieses sich an die Einhänge an. Dadurch wird aber wiederum eine starke Muldenform bzw. Trog betont. Allerdings soll diese Methode nicht die Böschungen genau abbilden, sondern die Form des Talgrundes, die derzeit mit Sediment verfüllt ist. Messungen von SCHROTT et al. (2003) im Reintal zeigen, dass diese Methode den geophysikalischen Messungen insgesamt aber relativ nahe kommt. Aber auch dort wurden Überschätzungen des Sedimentvolumens bis zum Faktor 5 erreicht. Es wurde nachgewiesen, dass es in Bereichen mit steilen Flanken zur höchsten Überschätzung kommt. Diese Methode hat gegenüber den anderen Methoden aber zwei entscheidende Vorteile. Erstens sind die Ergebnisse unabhängig vom Bearbeiter sehr ähnlich. Eine Variable besteht zwar noch in der Wahl des Grades des Polynoms, trotzdem sind die erhaltenen Werte aber deutlich besser reproduzierbar. Zweitens ist diese Methode unabhängiger von unruhiger Hangmorphologie. Durch die Wahl eines möglichst niedrigen Polynomgrades werden diese Hangphänomene, wie quartäre Felsstürze, nicht berücksichtigt (SCHROTT et al. 2003).

4.2 ETAI_p

In Flussabschnitten mit flach einfallenden Lockergesteinsböschungen kann es Schwierigkeiten bereiten, repräsentative Einhänge in die Tiefe zu extrapolieren. Dadurch ergeben sich, abgängig vom Bearbeiter, sehr hohe oder niedrige Volumenabschätzungen. Bei sehr steil einfallenden oder überhängenden Böschungen (Bereich B in Abb. 4 & 5) ergeben sich unrealistisch hohe Sedimenttiefen. Aufgrund

dessen wird im Abschnitt B das Sedimentvolumen massiv überschätzt. In Bereich mit konstant mittelstark geneigten Böschungen wird das verfügbare Sedimentvolumen gut angenähert (Bereich C in Abb.4 & 5).

Problematisch ist die Festlegung der Böschungshöhe, die bei einem Extremereignis benetzt werden kann. Wenn historische Berichte über Hochwässer vorhanden sind, mag eine grobe Schätzung möglich sein. Falls es aber keine Aufzeichnungen gibt, fällt die Festlegung schwer. Die errechneten Sedimentvolumina können um mehrere 100% voneinander abweichen.

4.3 Schweizer Modell

Da die Berechnung allein von der Bachbreite abhängt, sind die Ergebnisse gut reproduzierbar. In den Bereichen B und C werden aufgrund der geringen Bachbreite relativ niedrige Volumina errechnet. Dafür ist auch die Berücksichtigung verschiedener anthropogener Schutzmaßnahmen in der Volumenberechnung verantwortlich. Somit wird durch das Vorhandensein von Sperren aus Holz oder Stein das zur Verfügung stehende Sedimentvolumen reduziert (LANDESHYDROLOGIE UND -GEOLOGIE 1996). Die konstante Annahme der Erosionstiefe von $\frac{1}{5}$ der Bachbreite ist für Murgänge allerdings sehr allgemein. Die Neigung der Böschungen und deren geologischer Aufbau werden für die Volumenermittlung der Sohle nicht beachtet. Die Geophysik zeigt zudem eine Abhängigkeit des Sedimentvolumens der Sohle von dem Aufbau der Böschungen. Bei einem Hochwasser werden auch Bereiche in der Umgebung des Bachbettes benetzt und könnten Sediment zur Verfügung stellen. Dies wird bei der Berechnung ebenfalls nicht berücksichtigt.



4.4 Geophysik

In der Gleichstrom-Widerstandstomographie wurden Bereiche mit niedrigem spezifischem Widerstand als Lockermaterial interpretiert (blaue Bereiche in Abb. 6). Im Profil 1 (Abschnitt A) wurde bis in eine Tiefe von 12 m nur Lockermaterial gemessen. Umgekehrt wurden hohe spez. Widerstände als Festgestein angesprochen (rote Bereiche in Abb. 6). Im Bereich B steht knapp unter der Bachsohle bereits der Fels an. Hingegen ist im Bereich C bis in eine Tiefe von 10 m nur Lockermaterial festzustellen. Die Grenzen zwischen Locker- und Festgestein sind allerdings nicht klar definiert. In Tab. 1 sind die typischen Widerstandsbereiche verschiedener Materialien wider gegeben. Zu erkennen ist hierbei, dass jedes Material eine große Bandbreite an Widerständen aufweist. Maßgebend für den Widerstand sind die Wassersättigung der Sedimente bzw. Gesteine, die Zusammensetzung des Porenwassers, die Struktur und das Volumen der Poren sowie die Temperatur der Gesteine und Sedimente (KNEISEL 2006). Zeitlich ändern sich die Werte dieser Parameter. Jede Tomographie ist nur eine Momentaufnahme der Natur.

Tab. 1: Typische spezifische Widerstandsbereiche von verschiedenen Materialien (verändert nach KNEISEL 2006 & NABIGHIAN 1988).

Tab. 1: Typical specific resistance range of different materials(modified after KNEISEL 2006 & NABIGHIAN 1988).

Material	Bereich des Widerstandes [Ωm]
Ton	1-100
Sand	$100\text{-}5\cdot 10^3$
Kies	$100\text{-}5\cdot 10^4$
Konglomerat	$10^3\text{-}10^4$
Granit	$5\cdot 10^3\text{-}10^6$
Gneis	$100\text{-}10^3$
Grundwasser	10-300

In den Tomographiebildern sind Widerstandswerte vorhanden, die sowohl Lockermaterial als auch festem Konglomerat zugeordnet werden könnten. Aufgrund dessen wurden Abschätzungen für unterschiedliche Widerstandsgrenzen durchgeführt und ein Mittelwert bestimmt. Diese Methode der Gleichstrom-Widerstandstomographie unterscheidet sich von den bisher behandelten Abschätzverfahren insofern, als dass bei diesem Verfahren physikalische Parameter der Gesteine unterhalb der Bachsohle untersucht und bestimmt wurden. Diese Methode ist deshalb sehr zuverlässig und aussagekräftig. Allerdings ist auch der Zeit- und Kostenfaktor gegenüber den anderen Verfahren erhöht. Durch die maximale Eindringtiefe von rund $\frac{1}{6}$ der Profillänge sind der Tiefe der Messung Grenzen gesetzt. Die Methode ist notwendig für Gebiete, in denen die Verfüllung mit Lockermaterial genau bestimmt werden soll.

5 Schlussfolgerungen

Anhand der geophysikalischen Messungen wird konstatiert, dass bei steilen Festgesteinsböschungen die geringsten Sedimentvolumina in der Sohle zu erwarten sind, bei flach

geneigten Lockergesteinsböschungen hingegen die höchsten Werte. Das Sedimentvolumen, das aus der Sohle berechnet werden kann, zeigt also bei den vorhandenen Werten eine Abhängigkeit von dem geologischen Aufbau der Böschungen. Die vorgestellten Verfahren zeigen alle Vor- und Nachteile. Das ETAlp-Verfahren ist einfach, liefert aber weniger gut reproduzierbare Ergebnisse. Die Reproduzierbarkeit ist beim Schweizer Modell und dem Polynomverfahren gegeben. Bei letzterem wird zudem der Böschungverlauf berücksichtigt. Es werden moderate Erosionstiefen abgeschätzt. Das Verfahren ist von unruhiger Hangmorphologie unabhängig. Aufgrund dessen könnte das Polynomverfahren zu einer reproduzierbaren und verlässlicheren Abschätzung von Murvolumen in eingetieften Wildbächen dienen.

Literatur

- BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT [Hrsg.] (1983): Geologische Karte von Bayern 1:25 000. Erläuterungen zum Blatt Nr. 8427 Immenstadt i. Allgäu. – 258 S., München (Bayerisches Geologisches Landesamt).
- KNEISEL, C. (2006): Assessment of subsurface lithology in mountain environments using 2D resistivity imaging. – *Geomorphol.*, **80**: 32-44, Amsterdam (Elsevier).
- LANDESHYDROLOGIE UND -GEOLOGIE [Hrsg.] (1996): Empfehlung zur Abschätzung von Feststofffrachten in Wildbächen. Teil I - Handbuch. – 46 S., Bern (Landeshydrologie und -geologie).
- LUU-CHUCHOLOWSKI, S.-Y. (2011): Gefahrenbeurteilung des Steigbachs bei Immenstadt. – Unveröff. Master-Arb., Lst. f. Ingenieurgeologie, TU München, – 56 S., München.
- MCGEE, W. J. (1883): Glacial Cañons, *Science*, **2**: 315-316, Washington (AAAS).
- NABIGHIAN, M. N. [Eds.] (1988): *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics: Theory*. – 529 S., Tulsa (Society of Exploration).
- PROJEKTTEAM ETALP [Hrsg.] (2003): ETAlp - Erosion, Transport in Alpinen Systemen. Gesamtheitliche Erfassung und Bewertung von Erosions- und Transportvorgängen in Wildbacheinzugsgebieten. – 126 S., Wien (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft).
- PROJEKTTEAM ETALP [Hrsg.] (2005): ETAlp – Erosion, Transport in Alpinen Systemen. Gerinneaufnahmeblatt Detail, mit Erläuterungen. – 8 S., Wien (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft).
- SABO DIVISION, SABO DEPARTMENT, RIVER BUREAU, MINISTRY OF CONSTRUCTION [Eds.] (1999): *Guideline for survey of debris-flow-prone streams and survey of debris flow hazard areas (proposal)*.
- SVENSSON, H. (1958): Morphometrischer Beitrag zur Charakterisierung von Glazialtälern. – *Z. Gletsch.kd. Glazialgeol.*, **4**: 99-104, Innsbruck (Universitäts-Verlag Wagner).
- SCHROTT, L., HUFSCHMIDT, G., HANKAMMER, M., HOFFMANN, T. & DIKAU, R. (2003): Spatial distribution of sediment storage types and quantification of valley fill deposits in an alpine basin, Reintal, Bavarian Alps, Germany. – *Geomorphol.*, **55**: 45-63, Amsterdam (Elsevier).