Verlandung im Sihlsee und Lokalisierung des Schlammabtrages im Einzugsgebiet der Minster mittels Kartierung und Schlammuntersuchung

Autor(en): **Ammann, Meinrad**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **81 (1989)**

Heft 1-3

PDF erstellt am: **29.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-940450

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Verlandung im Sihlsee und Lokalisierung des Schlammabtrages im Einzugsgebiet der Minster mittels Kartierung und Schlammuntersuchung

Meinrad Ammann

Zusammenfassung

Über 60 % des Abtrages im Sihlsee-Einzugsgebiet bestehen aus Schlamm, der sich im Sihlsee ablagert. Innerhalb des Einzugsgebietes der Minster (Hauptzufluss) konnten sehr unterschiedliche Abtragsintensitäten für Schlamm festgestellt werden (von 0,02 mm/a bis 1,5 mm/a).

Résumé: Envasement du Sihlsee et localisation des zones d'ablation de matériel fin dans le bassin versant de la Minster à l'aide d'une carte géotechnique et d'analyses des sédiments du lac et de cet affluent.

Plus de 60 % des sédiments issus du bassin versant du Sihlsee est constitué de silts. Dans le bassin versant du Minster, qui représente l'affluent le plus important, l'intensité de l'érosion (materiaux fins) est très variable (de 0,02 mm/a à 1,5 mm/a).

Summary: Silting-up in the Sihlsee and localization of erosion in the drainage area of the river Minster by means of mapping and analysing of mud-samples.

More than 60 % of the erosion material of the Sihlsee drainage area consists of silt deposited in the Sihlsee. Within the drainage area of the main affluent (river Minster) occur significantly different erosion rates for silt material (0,02 mm/a to 1,5 mm/a).

1. Problemkreis Abtrag

Im Sommer 1987 haben Hochwasserkatastrophen aufhorchen lassen. Seither wird vermehrt die Frage nach den Ursachen dieser vermeintlich häufiger auftretenden Spitzenhochwasser gestellt und insbesondere auch die negative Einflussnahme des Menschen auf das Einzugsgebiet diskutiert (Landschaftsversiegelung, Schädigung des Waldbestandes).

An das Hochwasserereignis ist auch Abtrag und Transport von Feststoffen, nämlich Schwimmstoffen (Holz usw.), Schwebstoffen (Schlamm) und Geschiebe (Kies), gekoppelt. Dabei spielen die geologischen Verhältnisse und die Vegetationsdecke im Einzugsgebiet eine zentrale Rolle. Die geologischen Verhältnisse bestimmen in erster Linie, ob ein Gerinne vorwiegend Schwebstoffe oder Geschiebe führt. Die Vegetationsdecke schützt die Fest- und Lockergesteine vor dem Abtrag. Dem Einfluss des Menschen auf die Ausbreitung und Qualität der Vegetationsdecke wird richtigerweise grosse Bedeutung zugemessen.

Der Abtrag verstösst gegen die Interessen des Menschen, da durch Erosion einerseits Bauwerke im Abtragsgebiet bedroht oder zerstört werden können, andererseits aber auch der landwirtschaftlich genutzte Boden (Kulturerde) durch Abtrag verlorengehen kann. Im Alpenraum sind allerdings meistens die Auswirkungen in den Ablagerungsgebieten augenscheinlicher und primär gravierender. Dabei kann es zu Zerstörungen im Bereich der Schuttfächer und auf Talböden und zur Verfüllung von Stauhaltungen kommen. Je nach Transportkraft des Gewässers und Lage der Stauseen werden vor allem Geschiebe oder Schwebstoffe in die Stauhaltung eingetragen.

Die Messung des Abtrages ist schwierig. Bei spektakulären Ereignissen wie Bergstürzen kann die Grösse des fehlenden Gesteinsvolumens geschätzt oder gemessen werden. Im Normalfall findet die Gebietserniedrigung aber in verborgener Form statt und beträgt nur Bruchteile eines Millimeters pro Jahr. Diese kleinen Beträge lassen sich nicht an Ort ermitteln. Die Frage nach der Gebietserniedrigung lässt sich deshalb nur indirekt beantworten, indem man die Abtragsmengen während des Transports im Gerinne misst (was sehr schwierig ist und eine möglichst kontinuierliche Messung erfordert) oder indem man die in künstlichen oder natürlichen Ablagerungsräumen akkumulierten Feststoffmengen misst. Aber auch die Ermittlung der akkumulierten Mengen ist nicht einfach, da normalerweise mehrere gestaffelte Ablagerungsräume in Betracht zu ziehen sind, die räumlich weit auseinander liegen können. So wird das Geschiebe zum Teil schon auf Bachschuttkegeln oder in Geschiebefängern im Einzugsgebiet abgelagert, die Schwebstoffe hingegen lagern sich zum grossen Teil erst in einem Staubecken oder in einem natürlichen See ab. Zudem muss auch der Anteil an chemisch Gelöstem, der ebenfalls zur Gebietserniedrigung beiträgt, mitberücksichtigt werden.

Im vorliegenden Beitrag werden die Verhältnisse am Sihlsee diskutiert. Es ist ein Teilaspekt einer umfassenderen Arbeit [1].

2. Der Sihlsee als Ablagerungsraum

Der Sihlsee liegt im Voralpenraum in einer natürlich vorgeprägten Wanne südlich des Zürichsees (Bild 1). Der Sihlgletscher hat während der Eiszeiten nordöstlich von Einsiedeln einen Moränenkranz abgelagert, der als natürlicher Riegel das Tal gegen den Raum Zürichsee abschliesst. Deshalb waren für den Aufstau des Sihlsees (Oberfläche 10,9 km², Nutzinhalt 91,8 Mio m³) nur kleine Kunstbauten nötig (vgl. [3]).

Der Sihlsee eignet sich gut für vergleichende Untersuchungen. Dafür gibt es mehrere Gründe: Einerseits ist die Auffangkapazität des nur knapp 25 m tiefen Speicherbeckens

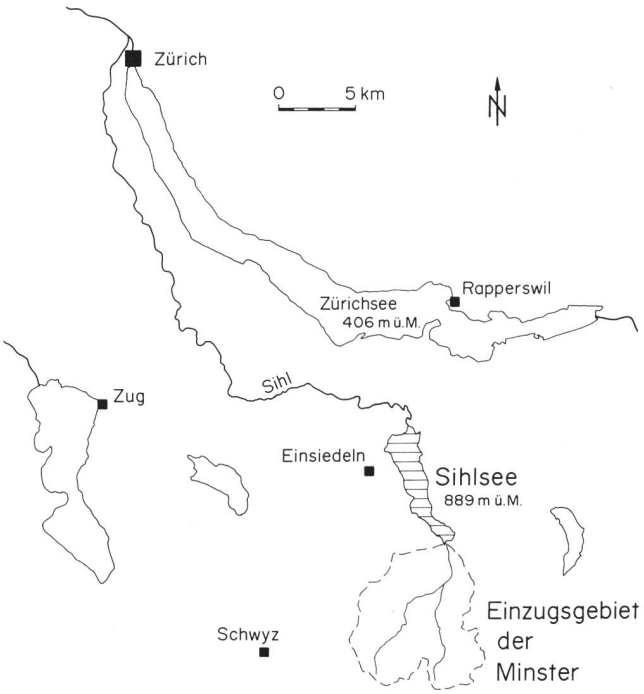


Bild 1. Geographische Übersicht. Das Einzugsgebiet der Minster umfasst etwa 40% des Einzugsgebietes des Sihlsees.

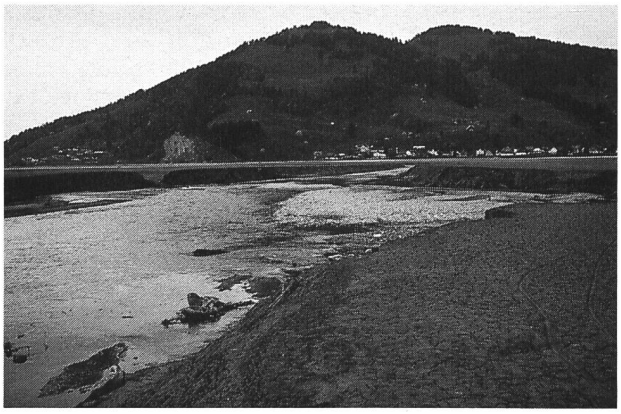


Bild 2. Schlammablagerungen im südlichen Sihlseebecken. Die Minster fliesst hier in einem Canyon durch den abgelagerten Schlamm, der hier 2 bis 3 Meter mächtig ist. Im Hintergrund das Dorf Euthal. Aufnahme im Frühjahr bei abgesenktem Seespiegel.

gross. Das Verhältnis zwischen Nutzinhalt und jährlicher Zuflussmenge beträgt etwa 2,5. Dies bietet Gewähr, dass der grösste Teil der durch die Zuflüsse eingetragenen Feststoffe im See aufgefangen wird. Da der Sihlsee im Gegensatz zu den meisten Speicherbecken im Alpenraum lediglich durch Zuflüsse aus dem natürlichen Einzugsgebiet gespeist wird, ist die Materialbilanz bedeutend leichter zu erstellen als für andere Speicherbecken. Weiter eignet sich das Einzugsgebiet des Sihlsees wegen des geologisch vielfältigen Aufbaus gut für vergleichende Untersuchungen. Bei den Lockergesteinen dominieren siltig-tonige Ablagerungen (hauptsächlich Moräne oder Gehängelehm) und grobkörnige Ablagerungen (Bachschutt und Gehängeschutt). Die Festgesteine umfassen Kalke, Dolomite, quarzreiche und tonige Tiefseeablagerungen und eine Vielfalt von tonig-siltig-sandigen Sedimentgesteinen (u.a. Flysch und Molasse).

Mit einem Kurzkern-Rammrohr konnten zahlreiche Rammkerne vom Boot aus entnommen werden. Diese Rammkerne geben Aufschluss über den Aufbau des Sediments im Sihlsee. Weiter lässt sich die Beschaffenheit der in den Sihlsee eingetragenen Sedimente im Frühjahr bei Seetiefstand in den Deltabereichen der Zuflüsse studieren (Bild 2). Es zeigt sich, dass ins Sihlseebecken vor allem Schwebstoffe eingetragen und als feinkörnige Sedimente (Schlamm) abgelagert werden. Über die Sedimentmächtigkeit im Seebecken liegen verschiedene Angaben vor. Einerseits wurden von den Etzelwerken entlang von 13 Echolot-Messprofilen die Auflandungen seit Inbetriebnahme des Werkes ermittel [5]. Andererseits konnten mittels der Rammkerne ebenfalls Mächtigkeitsangaben erhalten werden. Die Resultate sind in Bild 3 zusammengetragen. Die bei den 13 Querprofilen angegebenen Werte geben die mittlere Höhenänderung längs der Profile seit dem ersten Aufstau im Jahre 1937 bis Ende der siebziger Jahre an. Die negativen Werte im nördlichen Seeteil können durch Setzungen im überfluteten Seegrund und/oder durch Zersetzung der im ursprünglichen Talboden nachgewiesenen Torfschichten erklärt werden. Wegen dieser unbekannten Höhenänderungen des alten Talbodens müssen die positiven Werte der anderen Profile als Minimalwerte für die Sedimentmächtigkeit angesehen werden. Ebenfalls sind auch die Punktmessungen mittels Rammkernen, in denen die ganze Sedimentschicht bis zum ursprünglichen Talboden durchstochen wurde, als Minimalwerte aufzufassen, da bei der Rammkernentnahme eine geringfügige Setzung der entnommenen Sedimentkerne nicht verhindert werden kann. Die in den Sihlsee seit der Inbetriebnahme der Stauhaltung eingetragene Menge Schlamm lässt sich aus diesen Angaben (Bild 3) auf 3 Millionen Kubikmeter schätzen. Die Ablagerung von Kies im Sihlsee spielt nur eine untergeordnete Rolle, da im Einzugsgebiet weitere selbständige Akkumulationsräume für Geschiebe vorhanden sind (vor allem Kunstbauten wie Geschiebesammler, aber auch natürliche Ablagerungsräume wie Hangschuttkegel).

Eine Übersicht der Abtragssituation im Einzugsgebiet des Sihlsees, bezogen auf die wichtigsten Akkumulationsräume (Sihlsee und Geschiebesammler), gibt Tabelle 1. Aus der

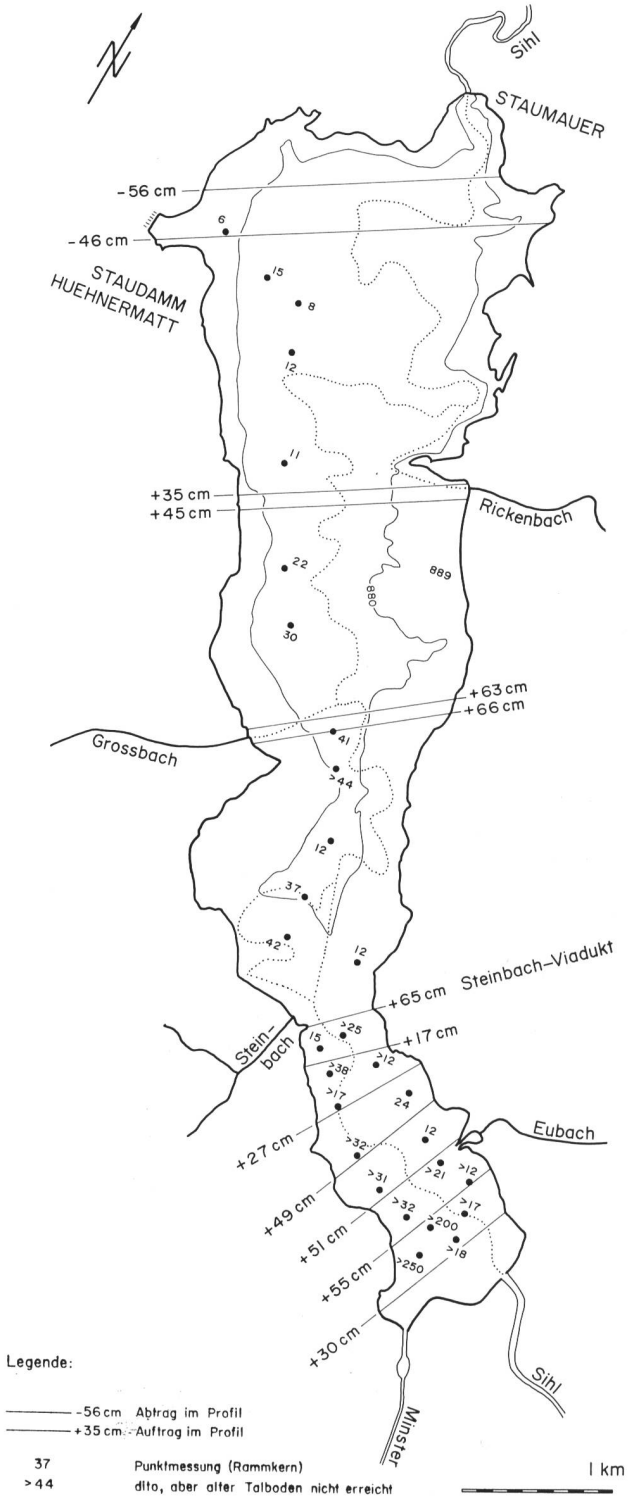


Bild 3. Sedimentmächtigkeiten im Sihlsee. Gemittelte Höhenänderungen längs der Messprofile im Zeitraum von 1937 bis 1978/79 (aus *Ziegler* 1981) und Punktmessungen mittels Rammkernen. Aus diesen Angaben lässt sich die Schlammenge im Sihlsee auf 3 Mio m³ abschätzen.

Tabelle 1. Abtragsintensität im Einzugsgebiet des Sihlsees. Der Abtrag in Form von Schlamm überwiegt.

Abtragsmaterial	Abtragsintensität im Einzugsgebiet des Sihlsees	Berechnungsgrundlagen
Kies (untergeordnet Schlamm)	0.05 mm/a	Kiesentnahmen aus Kiesfängen, vgl. ZIEGLER 1981
Schlamm	0.16 mm/a	Schlammablagerungen im Sihlsee, vgl. Bild 3
Lösung	0.05 mm/a	Vergleichswerte von Limmat, Thur und Rhein, vgl. BFU 1979-1982
Totalabtrag rund	0.25 mm/a	

Tabelle ist ersichtlich, dass der Schlammabtrag mengenmässig klar dominiert. Der Abtrag durch chemische Lösung und durch Geschiebe ist als weniger bedeutend einzuschätzen.

3. Herkunft des Schlammes

Die kleinsten Komponenten der Festgesteine in einem Einzugsgebiet bestehen aus festverwachsenen Mineralfragmenten. Die Grösse dieser Mineralfragmente schwankt je nach Gesteinstyp von Bruchteilen von Mikrometern bis zu wenigen Zentimetern. Das Geschiebe der Bäche besteht vorwiegend aus Geröllen solcher Festgesteine. Zu jedem Geröll des Geschiebes kann im Prinzip das entsprechend aufgebaute Gestein im Einzugsgebiet gefunden werden und damit die Geschiebeherkunft auf das Einzugsgebiet aufgeschlüsselt werden. Vor allem im Schweizer Mittelland wird dieses Prinzip aber durch die häufig anzutreffenden glazigenen Lockergesteine erschwert, da deren Geröllinhalt aus dem Einzugsgebiet des ehemaligen Gletschers stammt, das nicht mit dem heutigen fluviatilen Gewässernetz übereinstimmt.

Die Schwebstoffe eines Baches sind meist kleiner als 1 mm. Sie bestehen vor allem aus Mineralfragmenten, aber auch aus winzigen Gesteinsbruchstücken, die ihrerseits aus Mineralfragmenten aufgebaut sind. Diese Mineralfragmente sind im Gegensatz zu den Bachgeröllen nur in sehr geringem Masse herkunftstypisch, sondern weisen eine generelle Verbreitung auf. Im Falle der Gesteinsbruchstückchen ist eine Zuordnung zum Liefergestein meist zu aufwendig. Schlamm in den Deltas unserer Stauseen und in den Bachbetten unserer Bäche und Flüsse besteht normalerweise zu 60 bis 70 % aus Quarz, Calcit, Dolomit, Muscovit und Feldspat. Der Rest setzt sich vor allem aus Tonmineralien zusammen. Eine Herkunftsanalyse an Schlamm ist wegen der meist fehlenden Herkunftsspezifität mit grossen Schwierigkeiten verbunden.

Bei Schlammuntersuchungen ist nun aber beobachtet worden, dass Schlamm je nach Herkunftsgebiet eine charakteristische prozentuale Zusammensetzung aufweist. Diese Untersuchungen verwenden röntgenographische Verfahren, können hier aber nicht im Detail erläutert werden (vgl. [1]). Im folgenden Abschnitt werden die im Minster-Einzugsgebiet gewonnenen Resultate dargestellt.

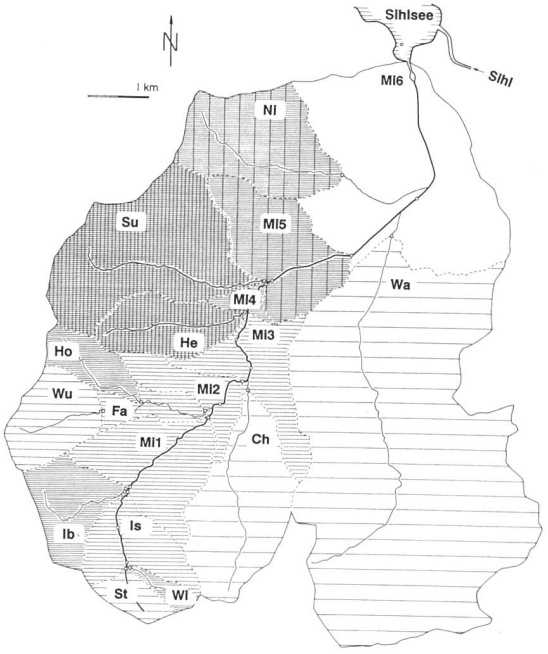
4. Schlammabtragskarte des Minster-Einzugsgebietes

Aus den Schlammuntersuchungen im Sihlsee liess sich ableiten, dass bis etwa ⅘ des Schlammes im südlichen Sihlseebecken (d.h. hinter dem Steinbach-Viadukt) von der Minster geliefert wurden. Im Vergleich mit den anderen direkten Zuflüssen dieses Seeteils liefert das Minster-Einzugsgebiet also bedeutend mehr Schlamm, als man von der Einzugsgebietsgrösse her vermuten würde.

Die Minster entwässert flächenmässig etwa 40 % (57,9 km²) des Sihlsee-Einzugsgebietes, dieses ist geologisch-geotechnisch abwechslungsreich aufgebaut. Um den Schlammabtrag im Einzugsgebiet der Minster genauer lokalisieren zu können, wurde nun folgendes Vorgehen eingeschlagen (weitergehende Darstellung unter [1]): Das Einzugsgebiet wurde in einem ersten Schritt in 18 Teilfelder unterteilt (Bild 4). Diese Unterteilung wurde wesentlich durch das Gewässernetz vorbestimmt, indem bei jeder wichtigen Gewässergabelung (Tripelpunkt) zwei neue Fel-

Tabelle 2. Der geologisch-geotechnische Aufbau der 17 Felder der Schlammabtragskarte (Bild 4). Zahlenangaben in Flächenprozenten.

	Geologisch-geotechnische Baueinheit	FELDER															
		He	Su	Mi5	Ni	Mi4	Ib	Ho	Wi	Mi1	Mi2	Fa	Mi3	Is	Wu	St	Ch	Wa
FESTGESTEINE	a) Mergelschiefer und Mergelkalke (Helvetikum), grösstenteils verrutscht	90	60	60		55	50	85		30	60	70	20	5			10	12.5
	b) Flysch (Mergelschiefer, mit Siltsteinen, Sandsteinen und Kalken), häufig verrutscht		35	10	95		35	15		2.5		10		10	100	60		2.5
	c) Ophiolithdecke von Iberg, inkl. versackte Anteile und Hangschutt								100	20				15		40	2.5	
	d) Dolomitgesteine, inkl. Hangschutt						5			7.5				20			17.5	
	e) Kalke (Helvetikum), eingelagert Sandsteine und Mergel, inkl. Hangschutt	5	5	20		25				5		10	25				40	65
LOCKERGESTEINE	f) Sandig-siltig-tonige Ablagerungen (vorwiegend Moräne)	5		5	5	15	10			35	40	10	55	50			30	10
	g) Vorwiegend grobkörnige Ablagerungen (Alluvionen, Bachschuttkegel)			5		5												10



SIGNATUR	KLASSE	SF-WERT	SCHLAMMABTRAGS-INTENSITAET (mm/a)
	• IV	> 8	> 1.52
	•III	4 - 8	0.76 - 1.52
	• II	2 - 4	0.38 - 0.76
	• I	1 - 2	0.19 - 0.38
	- I	0.5 - 1	0.09 - 0.19
	- II	0.25 - 0.5	0.05 - 0.09
	-III	0.125 - 0.25	0.02 - 0.05
	- IV	< 0.125	< 0.02

Bild 4. Schlammabtragskarte für das Einzugsgebiet der Minster. Die Schlammabtragsintensitäten schwanken bis zu 2 Grössenordnungen in den unterschiedenen Teilgebieten. Weitere Erläuterungen im Text.

der geschaffen wurden, die die beiden bergwärts liegenden Einzugsgebiete umfassen. Jedes dieser beiden neuen Felder konnte aber je nach Gewässernetzaufbau weiter unterteilt werden, nach Möglichkeit in geologisch-tektonisch einheitlich aufgebaute Felder. An jedem Tripelpunkt wurden nun nach mehreren Hochwasserereignissen jeweils drei Schlammproben aus dem wasserfreien Teil des Bachbetts (Überflutungsbereich des Hochwassers) entnommen und deren Gehalt an Calcit, Dolomit, Quarz, Muscovit, Mikroklin und organischem Material bestimmt. Die Resultate erwiesen sich als sehr gut reproduzierbar und charakteristisch für die jeweiligen Einzugsgebiete. Da die im Sihlsee seit der Betriebsaufnahme abgelagerte Schlammenge ungefähr bekannt ist und der Anteil der Minster durch Schlammuntersuchungen abgeschätzt werden kann, konnte vom Sihlsee aus ins Einzugsgebiet hinein die Schlammenge aufgeschlüsselt werden. Die Verhältniswerte «Schlammanteil eines Feldes dividiert durch den Flächenanteil eines Feldes (= SF-Wert)» wurden für die Klassifizierung der Felder benützt (vgl. Bild 4). Als Endergebnis konnte 17 der 18 ausgeschiedenen Feldern ein Wert für die Abtragsintensität in mm/a zugeordnet werden. Bei der Einrechnung der Schlammanteile vom Sihlsee her ins Einzugsgebiet der Minster hinein liessen sich die Fehlerschranken der Ausgangsgrössen zu einer Fehlerabschätzung heranziehen. Durch die Fehlerfortpflanzung entsteht eine grosse rechnerische Unsicherheit in der Klassifikation der Felder. Danach können die sihlseenahen Felder eventuell 1 bis 2 Klassen und die sihlseefernen (ab Mi1 und Fa) 3 bis maximal 4 (Wi und St) Klassen zu tief bewertet sein.

Auf der Schlammabtragskarte (Bild 4) fällt auf, dass die Schlammabtragsintensitäten der unterschiedenen Felder bis zu zwei Grössenordnungen schwanken können. Die niedrigsten Schlammabtragsintensitäten zeigen die Felder Wa und Ch. Für beide betragen sie weniger als 0,02 mm/a. Darauf folgt sukzessive eine grosse Gruppe von Feldern mit Abtragsintensitäten von 0,02 bis 0,19 mm/a. Extrem hohe Abtragsintensitäten zeigen die Felder Su und He (0,76 bis 1,52 mm/a). Dieser Befund lässt sich in groben Zügen aufgrund der geologisch-geotechnischen Eigenschaften der einzelnen Felder (Tabelle 2) erklären. Im Einzugsgebiet der Minster können sieben geologisch-geotechnische Baueinheiten ausgeschieden werden. Diese sind in der Vertikalen von Tabelle 2 aufgelistet (im folgenden Text wird jeweils stellvertretend für die Namen der einzelnen Baueinheiten nur die unterstrichene Kurzbenennung verwendet). In der Horizontalen sind die Felder von Bild 4 gemäss abnehmender Abtragsintensität von links nach rechts aufgereiht. Für jedes Feld sind die prozentualen Anteile an den einzelnen Baueinheiten angegeben. Die Felder mit der grössten Abtragsintensität (Su und He) haben sehr hohe Anteile an der Baueinheit «Mergelschiefer und Mergelkalke». Die Felder mit der geringsten Abtragsintensität (Ch und Wa) hingegen zeigen hohe Anteile der Baueinheit «Kalke».

5. Feldkartierung «Gewässersohlenqualifizierung und Kartierung der Schlammquellen im Einzugsgebiet der Minster»

Eine zweite Möglichkeit, den Schlammabtrag aus einem Einzugsgebiet genauer zu lokalisieren, besteht in der Kartierung der schlammproduzierenden Stellen (= «Schlammquellen»). Für das Einzugsgebiet der Minster wurde eine derartige Kartierung erstellt (siehe Faltbeilage).

Eine problemorientierte Abtragskartierung stellt eine Spezialarbeit dar, für die keine direkten Vorbilder bestehen und deshalb auch nicht auf bestehende Kartierungsnormen zurückgegriffen werden kann. Das bedeutet, dass die Kartierungselemente zuerst gefunden werden müssen. Sie lassen sich nur durch genaue Kenntnis des Problems und des zu kartierenden Gebietes festlegen. Ihre Definition muss über die ganze Kartierungsphase beibehalten werden. Der Abtrag von Schlamm hängt kausal mit dem Niederschlags- und Abflussregime eines Gebietes zusammen. Im Einzugsgebiet der Minster, das über eine dichte Vegetationsdecke verfügt, konzentrieren sich die wesentlichen schlammproduzierenden Stellen auf das Umfeld der Wasserläufe. Die Kartierung erfasst deshalb nur die Wasserläufe und die benachbarten Uferbereiche. Die Erfassung der Gewässersohle ist deshalb von wesentlicher Bedeutung, da sich Veränderungen in der Gewässersohle meist unmittelbar auf die angrenzenden Uferbereiche, aber auch auf ganze Talflanken auswirken können. Bei den neu ins Geschiebe aufgenommenen Geröllen ist auffällig, dass sie entweder sehr rasch (z.B. Mergel), d.h. schon nach vielleicht hundert Meter Transport, in die Bestandteile zerrieben werden oder aber sehr abriebresistent sind und nur sehr langsam durch Abrieb verkleinert werden (z.B. Kieselkalk). Der Abrieb der schnell zerriebenen Gerölle wird als Schwebstoff weitertransportiert.

Der Abtrag von Schlamm im Einzugsgebiet der Minster kann mittels folgender die Bachsohlen und Ufergebiete klassifizierenden Kartierungselemente erfasst werden (siehe Faltbeilage).

Sohle der fliessenden Gewässer

S1: *Eintiefende Sohle im Lockergestein.* Die Sohle des Baches oder Flusses tieft sich allmählich im Lockergestein ein (Tiefenerosion). Dies ist verbunden mit der Gefahr der Aktivierung von Massenbewegungen in den angrenzenden Uferregionen.

Tabelle 3. Abhängigkeit des Gewässernetzes und der Ufertypen vom lithologischen Aufbau des Einzugsgebietes. Insbesondere die Einheiten a und b zeigen hohe Zahlenwerte, was deren Bedeutung als Schlammlieferant unterstreicht. Angabe der Verhältniszahlen in km/km².

	FESTGESTEINE					LOCKERGESTEINE	
	a) Mergelschiefer u. Mergelkalke (Helvetikum)	b) Flysch	c) Ophiolithdecke von Iberg	d) Dolomitgesteine	e) Kalke (Helvetikum)	f) sandig-siltig -tonige Ablagerungen	g) grobkörnige Ablagerungen
Fläche	14.2 km²	10.4 km²	0.8 km²	1.0 km²	16.3 km²	7.1 km²	4.6 km²
Kartierbare Strecke/km² *)	4.0	3.4	1.2	0.7	1.6	2.6	4.3
Erosionsstrecke/km² (= eintiefende Sohle/km²)	2.8	3.0	1.0	0.7	0.4	2.0	0
Nachrutschende Uferstrecke/km² (= Fuss von aktiven Rutschmassen)	1.7	0.7	0	0.1	0.1	0.3	0
Ufertyp Lockergestein mit geringer Abtragsresistenz/km²	0.3	0.3	0.8	0.1	0.1	0.5	0
Ufertyp Festgestein mit geringer Abtragsresistenz/km²	1.0	0.4	0	0	0.1	0.1	0

*) entspricht angenähert der Flussdichte (= Gewässernetzlänge/km²)

S2: *Eintiefende Sohle im Festgestein.* Vorgänge und Gefahren wie bei S1. Tiefenerosion aber viel langsamer, je nach Art des Festgesteins.

S3: *Sohle im Beharrungszustand, Verbauungsstrecke.* An sich ein Übergangszustand. Die Bachsohle tieft sich weder ein noch landet sie auf. Mit Verbauungen versucht man, die Bach- oder Flusssohle in einen künstlichen Beharrungszustand zu zwingen.

S4: *Auflandende Sohle und Umlagerungssohle.* Die Transportkraft des Gewässers reicht nicht aus, das neu anfallende oder bereits mitgeführte Geschiebe sofort weiter zu transportieren. Das Geschiebe wird abgelagert (auflandende Sohle) oder zwischendeponiert (Umlagerungssohle). Die direkte Folge der auflandenden Sohle und der Umlagerungssohle ist eine Bettverbreiterung. Damit besteht die Gefahr, dass das Gewässer mäandriert und dabei Seitenerosion verursacht.

Uferregionen

Unter dem Begriff Uferregion wird hier das weitere an das fliessende Gewässer angrenzende Gebiet verstanden, also nicht nur die unmittelbare Uferböschung.

U1: *Fuss von aktiven Rutschmassen.* Rutschungen und Sackungen, die durch Translations- oder Rotationsbewegungen sporadisch Feststoffe in die Uferregion nachliefern. An der Oberfläche meist vegetationsbedeckt, d.h. die Vegetation reitet passiv mit. Der Feststoffnachschub hängt nebst der Erosionsleistung des Gewässers von weiteren externen Ursachen ab, vor allem vom Niederschlagsregime und der Hangentwässerung. Die in das Bachbett einrutschenden Feststoffe bestehen aus einem grossen Anteil an feinkörnigem Material, das im Gewässer als Schwebstoff wegtransportiert wird.

Kartiert wurde nur die unmittelbare, vom Vorfluter verursachte Abtragsböschung, nicht aber das Einzugsgebiet der Massenbewegung.

U2: *Lockergestein mit geringer Schlammabtragsresistenz (Moräne, Gehängelehm usw.), ohne Vegetationsdecke.* Die Vegetationsdecke ist abgeglitten (oder war nie vorhanden), es können aber keine tiefgründigen Rutschungs- oder Sakkungsmechanismen festgestellt werden. Das Lockergestein ist ungeschützt, flächenhafter Abtrag (Denudation) überwiegt.

U3: *Festgestein mit geringer Schlammabtragsresistenz, ohne Vegetationsdecke.* Unter Festgestein mit geringer Schlammabtragsresistenz werden schiefrige, mergelige und tonige Gesteine verstanden, deren Kornverband schlecht verkittet ist und/oder die eine hohe Klüftigkeit aufweisen. Sonst wie U2.

In der Literatur lassen sich thematisch ähnliche Kartierungen finden (Bodenerosionskarten und grossmassstäbige Gefahrenkarten). Ende der sechziger Jahre begann eine Phase der systematischen Forschung und kartographischen Darstellung im Zusammenhang mit der Wildbachforschung. Meist war das Ziel, nebst der Kartierung von Geschiebeherden auch deren Abtragsgefährdung im Hinblick auf künftige Schadenfälle (Hochwasserereignisse) abzuschätzen und dadurch Grundlagen für Verbauungsmassnahmen zu liefern. Ebenso wurden aber auch allgemeinere Gefahrenkarten entwickelt. Als Beispiel soll die kombinierte geomorphologische Gefahrenkarte von Grindelwald (BE) erwähnt werden [4]. Einzelne der oben aufgeführten Kartierungselemente sind ähnlich wie in dieser Arbeit definiert.

Die Kartierung ist dieser Arbeit als Faltbeilage beigefügt. Sie zeigt ein recht uneinheitliches Bild. Auffällig sind die stark verrutschten Gebiete im Bereich des Surbrunnenbaches und des Heikentobels (Bildmitte links). Da diese Rutschmassen hohe Anteile an feinkörnigem Material haben, sind hier sicher die Gebiete mit der grössten Schlammproduktion zu lokalisieren.

Das Einzugsgebiet der Waag (rechts unten) unterscheidet sich klar vom übrigen Kartierungsgebiet. Schlammproduzierende Uferbereiche treten hier stark in den Hintergrund, die Sohlen der Seitenbäche liegen zum grossen Teil direkt auf dem anstehenden Fels. Dies ist eine Folge des tektonischen und geologischen Aufbaus dieses Tales. Das Tal der Waag weist eine enge innere Wanne auf mit mächtigen Schuttkegeln an den steilen Talflanken (Bild 5). Die Steilstufe dieser Wanne wird gebildet durch helvetische Kalkgesteine, insbesondere den Schrattenkalk der Kreidezeit. Über der Steilstufe liegt terrassenförmig ein weniger steiler äusserer Talbereich. Ein Bereich mit jüngeren, leichter erodierbaren Gesteinen liegt südöstlich des Roggenstockes. Ebenso quert ein Gürtel jüngerer Gesteine das nördliche Waag-Tal von Oberiberg im SW gegen den Stock im NE. Der andersartige Charakter dieser beiden Gebiete innerhalb

des Waag-Tales äussert sich klar im Kartierungsbild, indem hier vermehrt einrutschende Uferabschnitte festzustellen sind.

Eine Eigenstellung beansprucht auch das Einzugsgebiet des Nidlaubaches (Bildmitte oben). Die Bachsohlen des Gewässernetzes sind hier überwiegend in Eintiefung begriffen, Abrutschen der Vegetationsdecke ist lokal verbreitet, was zur Freilegung schlammproduzierender Uferbereiche führt. Das Gebiet wird aufgebaut durch Flyscheinheiten. In Flyschgebieten ist ein rascher vertikaler Wechsel zwischen weichen tonigen und harten kalkreicheren Sedimentschichten charakteristisch. Die Sedimentproduktion umfasst neben Schlamm daher auch viel Material in Sand- und Kiesfraktion.

Das restliche Einzugsgebiet der Minster (Bild 6) bildet eine Landschaft bestehend aus weiträumigen, flachen Hängen mit einzelnen ausgeprägten Schluchtabschnitten. Die mittlere Hangneigung beträgt etwa 17 bis 18°. Das baumartig verästelte Gewässernetz ist grösstenteils eintiefend mit Ausnahme der Minster, die über weite Bereiche Umlagerungssohle und Sohle im Beharrungszustand (verbaute Streckenanteile) aufweist. Mergelige Gesteine der Oberkreide und Flyschgesteine sind dominierend. Dies führt zu folgendem generellen Bild: Schlammproduzierende Uferbereiche sind sehr häufig, in Gebieten mit hangparallelem Einfallen der Gesteinsschichten treten zudem zahlreiche Rutschgebiete auf (Heikentobel und Einzugsgebiet des Surbrunnenbaches).

Das Resultat der Kartierung lässt sich weiter auswerten. Beispielsweise können die gesamte kartierbare Bachnetzlänge (in km) pro km² sowie die Anteile an den Sohlen- und Ufertypen auf die in Tabelle 2 ausgeschiedenen geologisch-geotechnischen Baueinheiten a bis g aufgeschlüsselt werden. Es zeigen sich dann einige interessante Zusammenhänge, die in Tabelle 3 zusammengefasst sind. So ist die Bachnetzlänge in den Einheiten a, b, f und g bedeutend grösser als in den Einheiten c, d und e. Die Einheit g ist insofern ein Spezialfall, als hier die Bäche teilweise mäandrieren und dadurch ein langes Bachnetz entsteht. Die Einheiten a, b und f sind aus tonigem, feinkörnigem Gesteinsmaterial aufgebaut und weisen eine fette Verwitterungsschicht auf. Zudem sind in den Einheiten a und b (Festgesteine) die Klüfte meist mit Feinmaterial gefüllt. Als Folge kann das Oberflächenwasser schlecht versickern, was dann offenbar zur Anlage eines bedeutend längeren Gewässernetzes als in den übrigen Einheiten (c, d und e) führt. Analog ist auch der Anteil Erosionsstrecke (in km) pro km² für a, b und f bedeutend höher als für die restlichen Einheiten. Bei den in Tabelle 3 aufgeführten abtragskontrollierenden Ufertypen ergibt sich ebenfalls für die Einheiten a und b klare Dominanz gegenüber den anderen Einheiten. Die Einheit a dominiert insbesondere im Wert für nachrutschende Uferstrecke (in km) pro km². Dieser Ufertyp ist für den Schlammabtrag im Einzugsgebiet der Minster von entscheidender Bedeutung, da diese rutschenden Gesteine (Mergelschiefer und Mergelkalke [a] als auch der Flysch [b]) viel Feinstoffgehalt aufweisen. Der geologisch-geotechnische Aufbau eines Einzugsgebietes bestimmt also nicht nur die Gestalt, sondern auch die Länge des Gewässernetzes und die abtragsbestimmenden Eigenschaften wie die Sohlenbeschaffenheit und vor allem die Uferbeschaffenheit der Bäche und damit je nach Lithologie auch die Abtragsmengen.

6. Zukunftsaussichten

In dem vorliegenden Beitrag wurde gezeigt, dass die Erfassung des Abtrages von feinkörnigem Material, das in den Bächen als Schwebstoff transportiert wird, möglich ist. Die abtragsaktiven Gebiete können kartografisch ausgeschieden werden, auch lässt sich die Schwankung der Abtragsintensitäten quantitativ ausdrücken. Unter Mitberücksichtigung des Abtrages durch Lösung und Geschiebetransport müssten daher Aussagen über die gesamte Gebietserniedrigung auch für kleinere Einzugsgebiete möglich sein. Da die Vegetation generell den Abtrag hemmt, könnten diese Fragestellungen in Zukunft wegen der vermehrt festgestellten Waldschäden stark an Bedeutung gewinnen.

Die Arbeit lokalisiert den Abtrag feinkörnigen Materials, der durch die Summe vieler Hochwasserereignisse verursacht wird. Der noch weit komplexere Problemkreis der Vorhersage des Abtrags in einem Einzelereignis (Hochwasser) und dessen Zusammenhang mit Niederschlagsintensität, geotechnischen Gebietseigenschaften, orografischen Parametern usw. ist damit nicht beantwortet.

Literatur

[1] *Ammann, M.* (1988): Herkunft und Zusammensetzung von Silt in fliessenden Gewässern und Stauseen – geotechnische Abtragsanalysen im Alpenraum. – Beitr. Geol. Schweiz, geotech. Ser. 78.

Bild 5. Steile Talflanken im Waag-Tal mit teilweise bewaldeten Hangschuttkegeln.

Bild 6. Blick von Oberiberg gegen die Ibergeregg, links am Horizont ragt der Gr. Schijen empor. Die Abtragsintensität (= Gebietserniedrigung in mm pro Jahr), bezogen auf den Sihlsee als Akkumulationsniveau, ist hier bedeutend grösser als im Gebietsausschnitt auf Bild 5.

[2] BUS (1979–1982): Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz. – Bundesamt für Umweltschutz (BUS), Eidg. Dept. des Innern, Bern.

[3] *Jacky, W.* (1936): Die Bauarbeiten am Etzelwerk. – «Schweiz. Baumeisterztg. Hoch- u. Tiefbau» 1936 (34–36).

[4] *Kienholz, H.* (1977): Kombinierte geomorphologische Gefahrenkarte 1:10000 von Grindelwald mit einem Beitrag von *Walter Schwarz.* – Geographica bernensia G4.

[5] *Ziegler, A.* (1981): Verlandungen beim Etzelwerk. – Mitt. Versuchsanst. Wasserbau, Hydrol. u. Glaziol. 53, 215–222.

Verdankung:

Dieser Beitrag behandelt einen Teilaspekt einer Dissertation. Diese wurde geleitet von Prof. Dr. *C. Schindler* und Prof. Dr. *D. Vischer,* denen der Verfasser hier nochmals für die Unterstützung und Beratung danken möchte. Den heutigen Arbeitgebern, Dr. *J. F. Schneider* und Dr. *F. Matousek,* CH-5400 Baden, dankt der Verfasser für die grosszügige Förderung der Arbeit.

Die Faltkarte Gewässersohlenqualifizierung und Kartierung der Schlammquellen im Einzugsgebiet der Minster ist vor Seite 9 eingeheftet.

Adresse der Verfassers: *Meinrad Ammann,* Spyristrasse 23, CH-8044 Zürich.

Stahlfaserbeton

Ein neuer Werkstoff setzt sich durch

Gunther Brux

Die Anwendung von Stahlfaserbeton hat in den letzten Jahren merklich zugenommen. Neben technischen wurden auch wirtschaftliche Vorteile erzielt. Stahlfaserbeton wird vorwiegend für Betonflächen und -auskleidungen, als Spritz- und Pumpbeton im Stollen-, Tunnel- und Wasserbau verwendet. Bemessungsansätze für Stahlfaserbeton wurden entwickelt [1].

Stahlfaserbeton hat ein günstigeres Formänderungsverhalten als Normalbeton, der bei höheren Festigkeiten spröde ist, denn durch Zugabe von Stahlfasern in die zementgebundene Matrix wird der Beton zu einem zähen, duktilen Werkstoff. Schwind-, Temperatur- und andere Risse werden vermieden und grosse Dehnungen in viele kleine und daher unsichtbare Risse aufgeteilt. Stahlfaserbeton hat eine grössere Bruchdehnung und kann sich deshalb bis zum endgültigen Bruch weiter verformen, so dass ein Versagen des Bauteils nicht schlagartig eintritt. Dieses Arbeitsvermögen ist vom Anteil Stahlfasern, ihren Verbundeigenschaften und der Stahlgüte abhängig. Stahlfaserbeton darf sich beim Bereiten und Einbau nicht entmischen oder zum Bluten neigen. Durch einen niedrigen Wasser/Zement-Wert (ggf. Zugabe von Fliessmitteln zur besseren Verarbeitung) erzielt man günstige mechanische Eigenschaften der Matrix und durch eine ausreichend lange Nachbehandlung den guten Verbund mit den Fasern.

Die Stahlfasern im Bereich der Bauteiloberfläche rosten unter Einfluss der Witterung; dies führt jedoch erfahrungsgemäss nicht zu Betonabplatzungen, da die Korrosion wegen guter Betonhaftung nicht tiefer wirken kann [2, 3]; soll das Rosten aus ästhetischen Gründen vermieden werden, trägt man die Deckschicht ohne Fasern auf.

Hinsichtlich der Bruchdehnung haben die Stahlfaserarten unterschiedliches Verhalten. Bei Fasern mit rauher Oberfläche verformt sich der Beton bis zum Auftreten des ersten Makrorisses plastisch, was im Tunnel- und Stollenbau und bei Industrieböden wegen des Korrosionsschutzes und der Wasserdichtigkeit vorteilhaft ist. Glatte Fasern mit ausgeprägten Endverankerungen ergeben ein ausgezeichnetes Arbeitsvermögen des Betons zur Aufnahme oder Umwandlung von Energie aus Aufprallasten [4], Explosionsdrücken (KKW) und Erdbebenerregung. Stahlfaserbeton ist wegen seines günstigen Verformungsverhaltens und seiner geringen Rissneigung feuerbeständiger als Normalbeton und wird deshalb zum Ummanteln tragender Bauteile [5] verwendet. Weitere Anwendungen sind Fertigteile, die sich früher ausschalen und mit geringeren Abmessungen, also leichter ausführen lassen, die Sicherung von Hängen, Böschungen und Baugruben [6], was in kürzerer Zeit und mit geringeren Mengen an Beton und Bewehrung möglich ist, und die Instandsetzung von Tosbecken (Tarbela/Pakistan) und Klärbecken [7], wobei man die geringe Rissneigung und hohe Verschleissfestigkeit des Stahlfaserbetons nutzt. Die meisten Stahlfasern werden zum Herstellen von Industrieböden verarbeitet. Im Tunnel-, Stollen- und Bergbau verwendet man Stahlfaser*spritzbeton* [8, 9] bei Ausbesserungen [10] und Verstärkungen sowie zusammen mit Gitterträgern und/oder Felsankern in Spritzbetonbauweise (NATM) für die Tunnelaussenschale [11] oder einschaligen Ausbau, Stahlfaser*pumpbeton* im Extrudierverfahren für die Tunnelinnenschale [12] oder bei einschaligem Ausbau und Stahlfaserbeton-Tübbinge beim Schildvortrieb bei zwei- und einschaligem Ausbau.

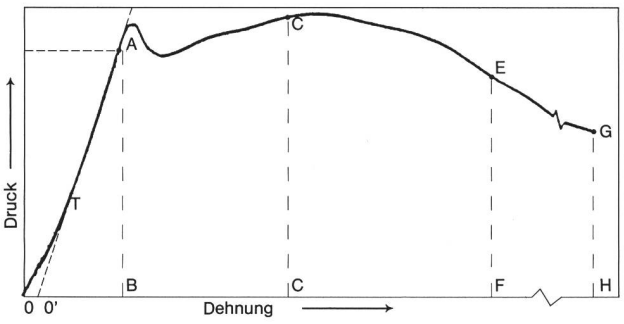


Bild 1. Spannungsdehnungsverhalten von Stahlfaserbeton zum Bestimmen seiner Biegezähigkeit nach ASTM C 1018 (USA).

Bis heute verfügen nur zwei Länder über *Normen* zum Bestimmen der Eigenschaften von Stahlfaserbeton mit verformungsgesteuerten Versuchen. In den USA beschränkt man sich nach der ASTM C 1018 auf die Druckfestigkeit, wogegen man in Japan nach den JSCE-SF 3 und -SF 5 die von der Fasergeometrie (Länge/Durchmesser) abhängige Druck- *und* Biegezugfestigkeit – wie auch in den Niederlanden entsprechend der CUR-Empfehlung Nr. 10 – prüft und so eine Bemessung ermöglicht, die die wirklichen Eigenschaften des Stahlfaserbetons berücksichtigt.

Literatur

[1] Stahlfaserbeton – Ein Werkstoff setzt sich durch. 9. Juni 1988, Haus der Technik, Essen.

[2] *Zerna, W.* u.a.: Korrosionsuntersuchungen an Stahlfaserbeton. «Beton» *29* (1979) Nr. 10, S. 353–354.

[3] *Brux, G.; Linder, R.; Ruffert, G.:* Spritzbeton – Spritzmörtel – Spritzputz; Herstellung, Prüfung und Ausführung. Verlagsges. Rudolf Müller, D-5000 Köln 41 (Braunsfeld).

[4] *Stangenberg, F.:* Stahlfaserbeton als hervorragender Baustoff für stossbeanspruchte Bauteile. «Bauingenieur» *61* (1986) Nr. 8, S. 339–345.

[5] *Roik, K.* u.a.: Verbundstützen mit Stahlfaserbeton – Brandverhalten. «Bauingenieur» *62* (1987) Nr. 4, S. 179–182.

[6] *Stocker, K.* u.a.: Fasernasssspritzbeton und Einsatzmöglichkeiten. «Tiefbau» *25* (1983) Nr. 9, S. 526–530.

[7] *Hahlhege, R.* u.a.: Einsatz von Stahlfaserspritzbeton bei der Sanierung von Wasserbauten. «Unser Betrieb» *36* (1986) Nr. 4, S. 338–340.

[8] *Schilling, K.:* Anwendung von Stahlfaserspritzbeton. SIA-Dokumentation 11 (1982) Band 56, S. 35–41.

[9] *Hahlhege, R.* u.a.: Stahlfaserspritzbeton im Tunnelbau. Qualität und Dauerhaftigkeit. «Beton» *38* (1988) Nr. 2, S. 62–65.