

Qualitätsüberwachung von Sedimenten in der Schweiz

Aktueller Stand der verfügbaren Methoden und Erstellung von Empfehlungen

Übersetzung der folgenden Aqua & Gas Publikation: Flück, R.; Campiche S., De Alencastro, L.F.; Rossi, L., Ferrari, B.J.D., Santiago, S., Werner, I., Chèvre, N. (2012) Surveillance de la qualité des sédiments en Suisse: État actuel des méthodes disponibles et mise en place de recommandations. Aqua & Gas 04, 18-22

Sedimente stellen ein dynamisches und wesentliches Kompartiment der aquatischen Ökosysteme dar. Sie sind für viele Tier- und Pflanzenarten von grosser Bedeutung und spielen eine wichtige Rolle als Habitate oder Laichplätze. Sedimente haben jedoch die Eigenschaft, Schadstoffe zu adsorbieren, die für die Organismen giftig sein können. Sie dienen somit als Schadstoffspeicher und stellen eine langfristige Quelle für eine sekundäre Kontamination dar. Folglich ist ihre Überwachung notwendig, um die ökologische Integrität der aquatischen Ökosysteme zu schützen.

EINLEITUNG

In der Schweiz sind Sedimente verschiedenen Verschmutzungsquellen ausgesetzt – Landwirtschaft, Mülldeponien, Industriestandorten, städtischer Verschmutzung usw. In städtischen Gebieten oder in Gebieten mit hohem Verkehrsaufkommen beispielsweise transportiert das Wasser aus dem Oberflächenabfluss und aus Überläufen der Mischkanalisation metallische Schadstoffe (z. B. Cu, Zn) und organische Schadstoffe (z. B. polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)). Diese Schadstoffe können sich in den Sedimenten anreichern. Im Rahmen des Projekts STORM [2] wurden die Sedimente oberhalb und unterhalb von Regenüberläufen in drei Schweizer Fließgewässern auf ihre Belastung untersucht und Biotests zur Messung der Ökotoxizität durchgeführt [3,4]. Diese Studien haben ergeben, dass die Überläufe und die Regenwasserabflüsse der Autobahn die Sedimentqualität durch die Ansammlung toxischer Substanzen erheblich beeinträchtigen. Auch die hinter Staudämmen angesammelten Sedimente sind erheblich belastet. Zum Beispiel zeigte eine Untersuchung der Sedimente im Wasserkraftwerk Verbois, dem Hauptwasserkraftwerk der Rhone in Genf, eine erhebliche Anreicherung von Schwermetallen, PAK und polychlorierten Biphenylen (PCB) [5,6].

Sedimente in der Schweiz sind also belastet und können ein Risiko für die aquatische Umwelt darstellen, mit potentiell negativen Auswirkungen auf Fauna und Flora. Ein Risiko besteht über eine direkte und indirekte Exposition auch für den Menschen (z. B. durch den Verzehr von kontaminiertem Fisch). Das Fehlen von numerischen Werten zur Wirkung (Qualitätskriterien) und von harmonisierten Empfehlungen zur Überwachung der Sedimentqualität in der Schweiz ist problematisch.

BESTEHENDE GESETZLICHE BESTIMMUNGEN UND EMPFEHLUNGEN IN DER SCHWEIZ UND IN EUROPA

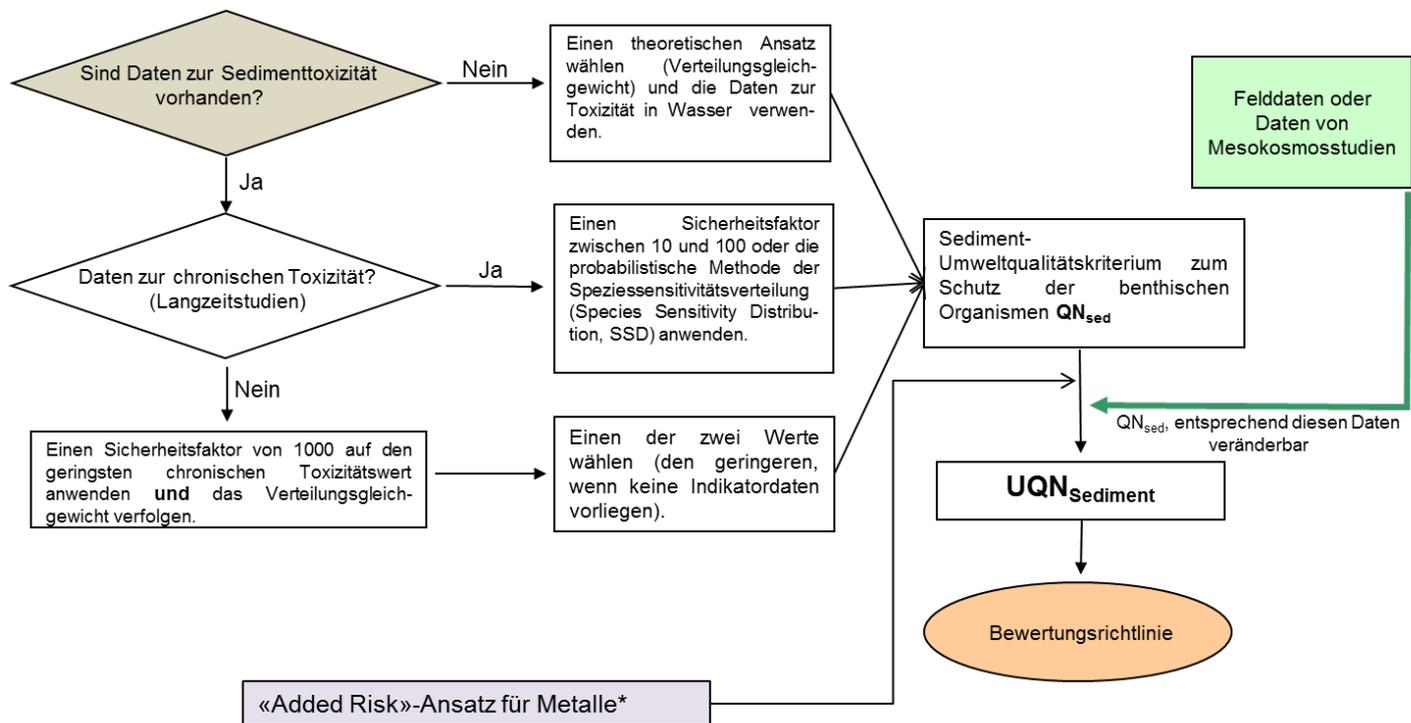
DIE SCHWEIZER METHODE

In der Schweiz legt die Gewässerschutzverordnung (GSchV [7]) fest, dass die Qualität der Oberflächengewässer so beschaffen sein muss, dass «[...] in den Sedimenten keine künstlichen, langlebigen Stoffe enthalten sind» (GSchV, Anhang 1.3 b) und dass «[...] andere Stoffe, die Gewässer verunreinigen können und die durch menschliche Tätigkeit ins Wasser gelangen können, [...] in Pflanzen, Tieren, Mikroorganismen, Schwebstoffen oder Sedimenten nicht angereichert werden [...] [und] die biologischen Prozesse zur Deckung der physiologischen Grundbedürfnisse von Pflanzen und Tieren, wie Stoffwechselforgänge, Fortpflanzung und geruchliche Orientierung von Tieren, nicht beeinträchtigen.» (GSchV, Anhang 1.3 c). Mit diesen Prinzipien sind jedoch keine definierten Grenzwerte verbunden, die bei sedimentgebundenen Schadstoffen nicht überschritten werden dürfen (Qualitätskriterien). Ausserdem gibt es keine harmonisierten Empfehlungen für Untersuchungsmethoden für Sedimente und die Bewertung der Risiken, die von den kontaminierten Sedimenten für Mensch und Umwelt ausgehen. Gemäss der geltenden Gesetzgebung sollte die Chemikalienbelastung der Sedimente jedoch überwacht werden.

DIE EUROPÄISCHE METHODE

Schon seit mehreren Jahrzehnten werden Sedimente in Nordamerika untersucht, das bei der Bewertung der von Sedimenten ausgehenden ökotoxikologischen Risiken eine Vorreiterrolle einnimmt. In Europa hingegen wird die Wichtigkeit von Sedimenten für die Bewertung des ökologischen Zustands von Wasserläufen erst seit Anfang des 21. Jahrhunderts anerkannt. Die Wasserrahmenrichtlinie (WRRL), die sich «den guten ökologischen Zustand» der Wasserläufe bis zum Jahr 2015 zum Ziel gesetzt hat, empfiehlt in ihrem Einzugsgebietsansatz, die Belastung der natürlichen Sedimente nicht zu vernachlässigen oder zu ignorieren. Diese sei zwar komplex, doch der ökologische Status der Oberflächengewässer hänge davon ab [8-10].

Zur Bewertung der Gewässerverschmutzung müssen die Umweltkonzentrationen mit einer Umweltqualitätsnorm (UQN) verglichen werden. Definiert wird diese als «die Konzentration eines bestimmten Schadstoffs oder einer bestimmten Schadstoffgruppe, die in Wasser, Sedimenten oder Biota aus Gründen des Gesundheits- und Umweltschutzes nicht überschritten werden darf». Die Bestimmung solcher Normen für prioritäre Substanzen erfolgt in der EU nach einer spezifischen Methode [11] und variiert je nach Schutzziel. Die Methode für die Berechnung der Umweltqualitätskriterien zum Schutz der benthischen Organismen (QN_{sed}) ist in *Abbildung 1* zusammengefasst.



* Für Metalle können die Hintergrundkonzentrationen zum QN_{sed} hinzugefügt werden, der also einen Höchstwert für zusätzliche Belastungen darstellt.

Abbildung 1: Methode zur Berechnung der Umweltqualitätskriterien zum Schutz der benthischen Organismen QN_{sed} (abgeleitet von der technischen Richtlinie der Europäischen Kommission zur Berechnung von Umweltqualitätsnormen [11]).

Auf der europäischen Ebene wurden noch weitere Methodendokumente veröffentlicht, die darauf abzielen, die Umsetzung der WRRL zu erleichtern und den Harmonisierungsgrad zu erhöhen. Ein solches Dokument ist zum Beispiel der Leitfaden zum Monitoring von Sedimenten [12]. Dieser Leitfaden kann an die regionalen und lokalen Gegebenheiten angepasst werden. Schliesslich sieht der Leitfaden eine erste Stufe vor, in der die gemessenen Sedimentkonzentrationen mit den Qualitätsnormen verglichen werden. Werden die Qualitätsnormen überschritten, wird diese von einer zweiten Stufe gefolgt, die auf ökologischen *In-situ*-Studien, Biotests oder der Einschätzung der Bioverfügbarkeit basiert, d. h. einem ähnlichen Ansatz wie dem weiter unten beschriebenen Triaden-Ansatz.

GEGENWÄRTIGER WISSENSSTAND DER SCHWEIZER KANTONE BEI DER UNTERSUCHUNG DER SEDIMENTE

Eine Betrachtung der in den Schweizer Kantonen vorhandenen Expertisen ist ein unerlässlicher erster Schritt, um harmonisierten Empfehlungen erarbeiten zu können. Die 26 Schweizer Kantone wurden daher gebeten einen Fragebogen auszufüllen. Ihre Antworten haben wichtige Informationen für die

Priorisierung der durchzuführenden Massnahmen sowie Hinweise für weitere Empfehlungen geliefert. Die Ziele dieser Umfrage bestanden darin, a) die verschiedenen Methoden zur Untersuchung von Sedimenten kennenzulernen, die momentan in den Kantonen eingesetzt werden und/oder verfügbar sind (chemische, ökologische und ökotoxikologische Methoden), sowie b) Empfehlungen für das weitere Vorgehen zu erarbeiten, indem die Kantone über ihre Interessen und Erwartungen befragt wurden. Ausserdem ermöglichte es uns der Kontakt zu den Kantonen, bereits gemessene Sedimentdaten zu sammeln und mit Sedimentqualitätskriterien zu vergleichen [13, 14]. In *Abbildung 2* sind die Ergebnisse dieser Umfrage zusammengefasst.

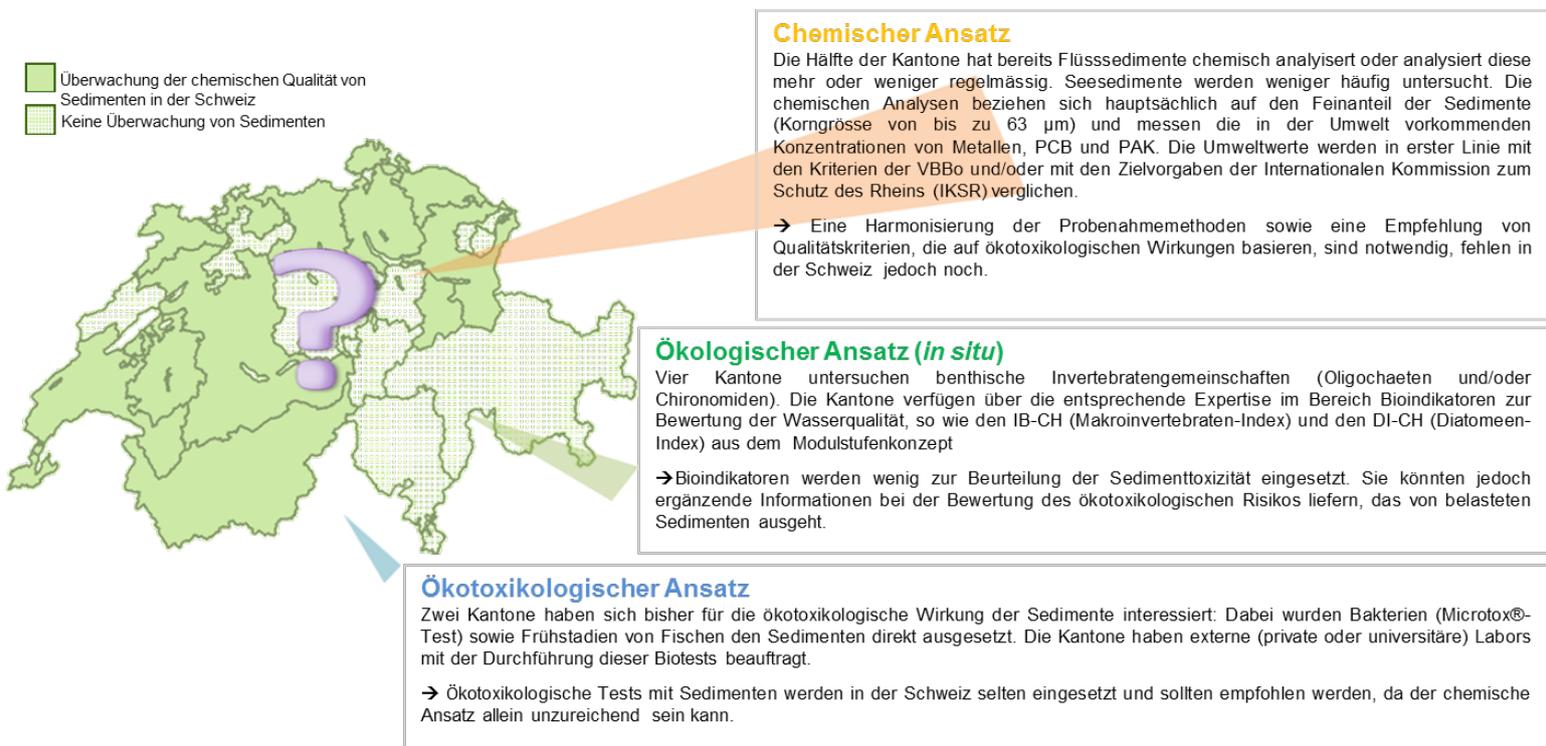


Abbildung 2: Ergebnisse der Umfrage zu den Methoden für die Bewertung der Sedimentqualität bei den 26 kantonalen Umweltschutzämtern der Schweiz. Es wurden dabei die drei Aspekte Chemie, Ökologie und Ökotoxikologie angesprochen [15].

IDENTIFIZIERUNG DER LÜCKEN UND DER BEDÜRFNISSE

Die Ergebnisse der Umfrage bestätigten, dass die Kantone daran interessiert sind, im Rahmen der Bewertung der Gewässerqualität auch die Sedimente zu überwachen. Als ein Hauptanliegen hat sich die Verfügbarkeit von Qualitätskriterien herausgestellt, um die Sedimente nach ihrer potenziellen Ökotoxizität einteilen zu können. Da in der Schweiz keine offiziellen Empfehlungen zu diesen Werten vorliegen, beziehen sich die Kantone hauptsächlich auf die Richtwerte der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo [16]). Diese wird häufig auch in Verbindung mit den Zielvorgaben der

Internationalen Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) [17, 18] verwendet, da sich die Mehrheit der Schweizer Kantone im Einzugsgebiet des Rheins befindet.

Der Fragebogen ermöglichte es, die in den Schweizer Kantonen verfügbaren chemischen Analysemethoden und die verwendeten Qualitätskriterien aufzulisten. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass keine Einheitlichkeit besteht – weder bei den Methoden zur Probenahme noch bei den verwendeten Qualitätskriterien. Ausserdem nutzen nur vier Kantone zur Untersuchung der Sedimente Bioindikatoren. Auch ökotoxikologische Tests kommen erst selten zum Einsatz (*Abbildung 2*).

AUSBLICK

In einem ersten Schritt scheint es empfehlenswert, Sedimentqualitätskriterien für die Schweiz festzulegen, um den Kantonen bei der Interpretation der gemessenen Schadstoffkonzentrationen zu helfen. Wir stellen solche Kriterien weiter unten vor. Die Harmonisierung der Probenahmemethoden und -strategien ist ebenfalls ein wichtiges Ziel. Schliesslich sind in einem zweiten Schritt auch spezifische, an die Sedimente angepasste Bioindikatoren und ökotoxikologische Tests notwendig, um das von den Sedimenten ausgehende ökotoxikologische Risiko vollständig zu bewerten.

EMPFEHLUNGEN FÜR SEDIMENTQUALITÄTSKRITERIEN FÜR DIE SCHWEIZ

Qualitätskriterien auf der Grundlage von ökotoxikologischen Daten ermöglichen es, das Toxizitätsrisiko für benthische Organismen abzuschätzen. Die von MacDonald [19] vorgeschlagenen TEC- und PEC-Werte scheinen den im Rahmen der GSchV festgelegten Schutzziele am besten zu entsprechen. Der TEC-Wert («Threshold Effect Concentration») entspricht der Konzentration, unterhalb derer keine Effekte auf Organismen zu erwarten sind. Der PEC-Wert («Probable Effect Concentration») entspricht der Konzentration, ab der eine grosse Wahrscheinlichkeit besteht, dass Effekte auftreten. TEC und PEC-Werte wurden für 28 Substanzen festgelegt. Einige davon werden in *Tabelle 1* aufgeführt und mit anderen bestehenden Kriterien verglichen. Jedoch werden in Europa (QS_{sed}) und insbesondere in Belgien (BF-NQE_{sed} [20]) momentan auch andere Vorschläge für Qualitätskriterien entwickelt. In einer ersten Phase empfehlen wir also die Verwendung der TEC- und PEC-Werte zur Bewertung der ökotoxikologischen Qualität von Sedimenten. Es ist jedoch denkbar, diese Werte unter Einbeziehung der in der Schweiz gemessenen Daten anzupassen oder im Lichte neuer Toxizitätsdaten für benthische Organismen zu aktualisieren. Dabei sollten auch die in Europa erzielten Fortschritte im Auge behalten werden.

	TEC	PEC	QS _{sed} ¹	BF-NQE _{sed} ²	OSol ³	CIPR ⁴
Metalle (mg/kg Trockengewicht)						
Arsen	9.79	33.00	noch ausstehend	19.00	-	40.0
Cadmium	0.99	4.98	2.3	1.00	0.8	1.0
Chrom	43.40	111.00	X	62.00	5.0	-
Kupfer	31.60	149.00	0.8	20.00	40.0	50.0
Quecksilber	0.18	1.06	3.6	0.55	0.5	0.5
Nickel	22.70	48.60	noch ausstehend	16.00	50.0	50.0
Blei	35.80	128.00	53.4	40.00	50.0	100.0
Zink	121.00	459.00	37.0	147.00	150.0	190.0
PCB (µg/kg Trockengewicht)						
Summe der 7 PCB*	59.80	676.00	X	0.1-0.9 / PCB	-	28.0
PAK (µg/kg Trockengewicht)						
Summe der 16 USEPA-PAK**	1.61	22800.00	X	100-370 / PAK	1000	-

Tab. 1: Schwelleneffektkonzentration TEC und Wahrscheinliche Effektkonzentration PEC für 8 Metalle, die Summe der polychlorierten Biphenyle (PCB) sowie die Summe der polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) für Süsswassersedimente, wie von McDonald entwickelt [18], im Vergleich mit den ersten europäischen QS_{sed} und den belgischen BF-NQE_{sed}. Die VBBo- und IKSR-Werte, welche sehr oft von den Kantonen zur Interpretation der Umweltdaten herangezogen werden, sind ebenfalls angegeben.

¹ Quelle: <http://www.ineris.fr/substances/fr/page/9> - am 20.01.2012

² Ökologische und ökotoxikologische Kriterien (nach dem Triaden-Ansatz) [19]

³ Richtwerte der Verordnung über Belastungen des Bodens [16]

⁴ Umweltqualitätsnormen für prioritäre Substanzen im Rhein, ausser Cadmium, Blei und Summe der PCB, für die es bewirtschaftungsziele gibt [17; 18]

- kein Richtwert

X nicht als prioritär geltende Substanz(en)

*Summe von PCB 28, PCB 52, PCB 101, PCB 118, PCB 138, PCB 15 und PCB 180. Für die BF-NQE_{sed} werden die Minimal- und Maximalwerte angegeben, in denen man die Kongenere findet.

**Summe der 16 PAK, die von der amerikanischen Umweltschutzbehörde (USEPA) empfohlen werden: Naphtalin, Acenaphtylen, Acenaphthen, Fluoren, Phenanthren, Anthracen, Fluoranthren, Pyren, Benzo(a)anthracen, Chrysen, Benzo(b)fluoranthren, Benzo(k)fluoranthren, Benzo(a)pyren, Indeno(1,2,3-

c,d)pyren, *Dibenzo(a,h)anthracen* und *Benzo(g,h,i)perylene*. Für die BF-NQEsed werden die Minimal- und Maximalwerte angegeben, in denen man die einzelnen PAK findet

Toxizitätsschwellen können auch *in situ* durch die Untersuchung benthischer Makroinvertebratengemeinschaften bestimmen werden, indem die chemischen Analysen mit dem Ergebnis der Bioindikatoren korreliert werden. Solche Toxizitätsschwellen konnten beispielsweise durch eine Untersuchung der Oligochaeten(Wenigborster)gemeinschaften in mehreren Schweizer Fließgewässern entwickelt werden [21].

Schliesslich ist anzumerken, dass für die Bestimmung von Qualitätskriterien zur Bewertung von Sedimenten zunächst eine Liste von prioritären Substanzen für dieses Kompartiment in der Schweiz erarbeitet werden muss..

FÜR EINE HARMONISIERUNG DER PROBENAHMEMETHODEN UND -STRATEGIEN

Ob es sich um die untersuchte Fraktion, die Entnahmemethode oder das Trocknungsverfahren handelt – die Methoden der Probenahme sind von Kanton zu Kanton unterschiedlich. Doch um schweizweit vergleichbare Werte zu erzielen, ist die Harmonisierung dieser Methoden wichtig. Durch Schaffen einer Arbeitsgruppe soll dieses Ziel erreicht werden. Dabei geht es darum, den aktuellen Stand der Technik auf diesem Gebiet zu bestimmen sowie eine Vollzugshilfe für die Kantone zu erarbeiten. Es ist darauf hinzuweisen, dass harmonisierte Methoden auf europäischer Ebene bereits vorhanden sind [12] und in Frankreich vor Kurzem veröffentlicht wurden [22]. Es sollten aber auch die amerikanischen und kanadischen Methoden sowie jene einzelner europäischer Länder berücksichtigt werden.

BEDEUTUNG DER BIOLOGISCHEN UND ÖKOTOXIKOLOGISCHEN INSTRUMENTE

Beim sogenannten Triaden-Ansatz werden ergänzend zu den chemischen Analysen benthische Organismengemeinschaften *in situ* untersucht sowie ökotoxikologische Tests durchgeführt. Sie stellen wegen der Komplexität der Sedimentmatrix die geeignetste Methode zur Bewertung des ökotoxikologischen Risikos dar, das von den Sedimenten ausgeht. Zusammen mit der bereits ins Leben gerufenen Arbeitsgruppe wird das Ökotoxzentrum den aktuellen Stand der Sedimentbiotests (Tests mit direktem Sedimentkontakt oder mit Extrakten) auf verschiedenen trophischen Ebenen (Bakterien, Algen, Makroinvertebraten, Pflanzen usw.) begutachten. Empfehlungen zu ergänzenden biologischen und ökotoxikologischen Methoden sollen mit den Modulen des Modulstufenkonzepts (<http://www.modul-stufen-konzept.ch>) in Einklang stehen, die in der Schweiz bereits zur Bewertung der Fließgewässer erarbeitet und angewendet werden. Zusammen mit den Kantonen, die auch belastete Standorte vorschlagen können, sollen Referenzstandorte bestimmt werden. Dies sollte eine Beurteilung der Methoden sowie deren Transfer an die zuständigen Behörden ermöglichen.

SCHLUSSFOLGERUNG

Die Qualität der Oberflächengewässer hat sich in den letzten Jahren deutlich verbessert, zum Beispiel durch neue Technologien in Kläranlagen oder durch den Bau von Becken zur Rückhaltung von Regenwasser. Dennoch zeigen Studien, dass die Sedimente in manchen Gebieten der Schweiz schadstoffbelastet sind oder belastet waren. Sedimente spielen für den allgemeinen ökologischen Zustand der Wasserläufe eine äusserst wichtige Rolle.

Die Kantone sind für die Sicherstellung der Qualitätsüberwachung der Sedimente sowie die Umsetzung der Gesetzgebung verantwortlich. Sie benötigen deshalb Methoden, damit Sedimente in die Überwachungsprogramme für die Gewässer integriert werden können. Es müssen geeignete, harmonisierte Methoden zur Verfügung stehen, um die Qualität und die Ökotoxizität der Sedimente zu beurteilen. Auf diese Weise kann gewährleistet werden, dass aquatische Ökosysteme in einem gesunden Zustand bleiben oder dieser wiederhergestellt werden kann. Die vom Oekotoxzentrum geleitete Arbeitsgruppe «Sedimente» wird sich dafür weiterhin engagieren und eine Methodenempfehlung basierend auf dem Triaden-Ansatz zur Überwachung der Sedimente erarbeiten.

DANKSAGUNG

Die Verfasser bedanken sich bei allen Mitgliedern der Diskussionsgruppe «Sediment» für die Zusammenarbeit: bei Rico Ryser (Kanton Bern), Frank Lang (Kanton Schaffhausen) und den Vertretern der Kantone Waadt und Genf, bei den Vertretern aus der Privatwirtschaft und dem akademischen Bereich sowie bei den Verantwortlichen der 26 kantonalen Umweltämter.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Chapman, P.M. (1990): *The sediment quality triad approach to determining pollution-induced degradation. Science of the Total Environment 97-98: 815-825*

[2] Rossi, L.; Krejci, V.; Kreikenbaum, S. (2004): *Projekt «STORM : Assainissement par temps de pluie».* («STORM: Abwassereinleitung aus Kanalisationen bei Regenwetter»). «Exigences légales en matière d'assainissement par temps de pluie». («Anforderungen an die Abwassereinleitung aus Kanalisationen bei Regenwetter»). *Gas-Wasser-Abwasser, Nr. 6/2004: 431-438.*

[3] Margot, J. (2008): *Impacts des déversoirs d'orage sur les cours d'eau. Application de la méthodologie STORM et validation par le biais d'analyses écotoxicologiques et chimiques. Masterprojekt in Umweltingenieurwissenschaften, Sciences et ingénierie de l'environnement, Polytechnische Hochschule Lausanne (EPFL).*

- [4] Curdy, R. (2010): *Proposition d'une méthode pour l'évaluation de la pollution et de la toxicité des sédiments : Application pour un site sur la rivière Urtenen dans le canton de Berne. Masterprojekt in Umweltingenieurwissenschaften, Sciences et ingénierie de l'environnement, Polytechnische Hochschule Lausanne (EPFL).*
- [5] Institut Forel (2007): *Aspects sédimentaires de la gestion du barrage de Verbois. Ein im Auftrag der Genfer Umweltstellen (Services environnementaux de l'État de Genève) und der «Services Industriels de Genève» (SIG) erstellter Bericht.*
- [6] Institut Forel (2010): *Échantillonnage et analyse de sédiments du réservoir de Verbois : Complément d'investigations. Ein im Auftrag der Genfer Umweltstellen (Services environnementaux de l'État de Genève) und der «Services Industriels de Genève» (SIG) erstellter Bericht.*
- [7] BAFU (1998): *Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998 (GSchV). SR 814.201. Bundesamt für Umwelt, Bern.*
- [8] European Parliament and Council (2000): *Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for the Community action in the field of water policy.*
- [9] European Parliament and Council (2001): *Decision No 2455/2001/EC of 20 November 2001 establishing the list of priority substances in the field of water policy and amending Directive 2000/60/EC.*
- [10] Förstner, U. (2007): *Environmental quality standards (EQS) applicable to sediment and/or biota. Journal of Soils and Sediments. 7(4): 270.*
- [11] EC (2011): *Technical Guidance For Deriving Environmental Quality Standards. Guidance Document No. 27. Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/CE). Technical Report – 2011 – 055. European Commission.*
- [12] EC (2010): *EU guidance on chemical monitoring of sediment and biota under the water framework directive. Guidance Document No. 25. Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/CE). Technical Report – 2010 – 041. European Commission.*
- [13] Oekotoxzentrum (2010): *Use of sediment quality criteria for the assessment of sediment toxicity: Applicability to Switzerland. Ein im Rahmen des Projekts «Bewertung der Sedimentqualität» erstellter Bericht. Zentrum für angewandte Ökotoxikologie Eawag-EPFL, Lausanne. Verfügbar unter http://www.oekotoxzentrum.ch/projekte/sedimentqualitaet/index_EN.*
- [14] Oekotoxzentrum (2012): *Qualitätsüberwachung von Sedimenten in der Schweiz: Aktueller Stand der verfügbaren Methoden und Einsetzung von Empfehlungen. Ein im Rahmen des Projekts «Bewertung der Sedimentqualität» erstellter Bericht. Zentrum für angewandte Ökotoxikologie Eawag-EPFL, Lausanne. Verfügbar unter <http://www.oekotoxzentrum.ch/dokumentation/berichte>*
- [15] Oekotoxzentrum (2011): *Qualitätsüberwachung von Sedimenten in der Schweiz: Zusammenfassung einer Umfrage. Ein im Rahmen des Projekts «Bewertung der Sedimentqualität» erstellter Bericht. Zentrum für*

angewandte Ökotoxikologie Eawag-EPFL, Lausanne. Verfügbar unter <http://www.oekotoxzentrum.ch/dokumentation/berichte>

[16] BAFU (1998): [5] Verordnung vom 1. Juli 1998 über Belastungen des Bodens (VBBo). SR 814.12. Bundesamt für Umwelt, Bern.

[17] IKSR (2007): Vergleich des Istzustandes des Rheins 1990 bis 2004. Bericht Nr. 159. Internationale Kommission zum Schutz des Rheins, Koblenz.

[18] IKSR (2009): Ableitung von Umweltqualitätsnormen für die Rhein-relevanten Stoffe. Bericht Nr. 164 Kaiserin-Augusta-Anlagen 15, D 56068 Koblenz.

[19] MacDonald, D.; Ingersoll, C.; Berger, T. (2000): Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 39(1): 20-31.

[20] de Deckere, E.; De Cooman, W.; Leloup, V.; Meire, P.; Schmitt, C.; von der Ohe, P.C. (2011): Development of sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. *Journal of Soils and Sediments* 11(3): 504-517.

[21] Vivien, R.; Lafont, M; Perfetta, J. (2011): Proposition d'un seuil de toxicité des métaux lourds des sédiments mis en évidence par les vers oligochètes dans quelques cours d'eau. *Bulletin der «Société vaudoise des sciences naturelles»* 92.4: 153-164.

[22] Schiavone, S.; Coquery, M. (2011): Guide d'échantillonnage et de pré- traitement des sédiments en milieu continental pour les analyses physico-chimiques de la DCE. Cemagref, Lyon.