

RISIKOBEWERTUNG VON SEDIMENTEN

METHODEN ZUR BEWERTUNG DER SEDIMENTQUALITÄT

Um die Wasserorganismen zu schützen, sollten sich in Sedimenten keine Schadstoffe anreichern. Entsprechende Überwachungsprogramme beruhen in erster Linie auf der chemischen Quantifizierung einer Reihe traditioneller Verbindungen, doch ihre Abdeckung ist lückenhaft und ihre Umsetzung wenig einheitlich. Der vorliegende Artikel beschreibt einen allgemeinen risikobasierten Managementrahmen und zeigt die Methoden, die für dessen praktische Anwendung zur Verfügung stehen. Es werden vor allem standardisierte Labormethoden und Ansätze für *In-situ*-Untersuchungen der Sedimenttoxizität vorgestellt, die sich relativ leicht etablieren lassen.

*M. Carmen Casado-Martinez**; Benoît J. D. Ferrari; Inge Werner, Centre Ecotox Eawag/EPFL; Nathalie Chèvre, UNIL

RÉSUMÉ

MÉTHODES D'ÉVALUATION DES RISQUES DES SÉDIMENTS

Les sédiments sont un élément central des écosystèmes aquatiques. Le droit suisse prévoit qu'afin de protéger la vie aquatique, aucun polluant ne doit s'accumuler dans les sédiments. En fait, les sédiments sont déjà couverts dans une certaine mesure par des programmes de surveillance: ceux-ci sont principalement basés sur la quantification chimique d'un certain nombre de substances traditionnelles, mais la couverture de ces programmes est incomplète et leur mise en œuvre dans les cantons n'est pas uniforme. Une première publication sur ce sujet dans *Aqua & Gas* [2] a donné un aperçu du degré de mise en œuvre et de l'expertise en matière d'évaluation de la qualité des sédiments en Suisse, y compris les méthodes d'analyse chimiques utilisées, à savoir l'échantillonnage et le prétraitement, ainsi que les critères de qualité numériques qui sont actuellement utilisés pour l'interprétation des concentrations chimiques mesurées. Le présent article en est la suite logique et décrit un cadre général de gestion axé sur les risques; il donne également un aperçu des méthodes disponibles pour son application pratique. Des méthodes de laboratoire et des approches standardisées sont notamment présentées pour les études de toxicité des sédiments *in situ*. Elles s'avèrent relativement faciles à mettre en place dans les laboratoires cantonaux et orientés sur la pratique.

EINLEITUNG

Sedimente sind ein zentraler Bestandteil aquatischer Ökosysteme. Die Schweizer Gesetzgebung sieht vor, dass sich in den Sedimenten keine Schadstoffe anreichern sollten, um die Wasserorganismen zu schützen [1]. Zwar werden Sedimente in der Schweiz an vielen Orten bereits überwacht, doch ohne einen etablierten Rahmen bei der Bewertung der Sedimentqualität bleibt es schwierig, Standorte zu kartieren und zu priorisieren. Eine erste Veröffentlichung zu diesem Thema in *Aqua & Gas* [2] im Jahr 2012 gab einen Überblick über den Umsetzungsgrad bei der Bewertung der Sedimentqualität in der Schweiz und ermittelte die zwei wichtigsten Bedürfnisse der Fachpersonen aus der Praxis:

- Etablierung von Qualitätskriterien oder -standards für die Interpretation der gemessenen Chemikalienkonzentrationen
- Entwicklung harmonisierter Protokolle für die Probenahme und Aufbereitung von Sedimentproben für die analytischen Messungen.

Der vorliegende Artikel ist nun eine Fortsetzung: Er stellt einen allgemeinen risikobasierten Rahmen für die Bewertung der Sedimentbelastung vor und bietet einen Überblick über

* Kontakt: carmen.casado@centrecotox.ch

die Methoden, die für die Bewertung der Sedimentqualität zur Verfügung stehen. Neben der Quantifizierung von Chemikalien in Sedimenten durch chemische Analyse werden standardisierte Methoden zur Bestimmung der Sedimenttoxizität (Labor und *in situ*) vorgestellt, die sich leicht in praxisorientierten Labors etablieren lassen. Diese zwei Arten von Methoden sind Komponenten des sogenannten Triaden-Ansatzes, der weltweit am häufigsten für die Bewertung der Sedimentqualität genutzt wird. Zusätzlich zur Verwendung von chemischen Schwellenwerten sollte sich die Bestimmung der Sedimentqualität auch auf solche integrativen, biologischen Testmethoden stützen. Um die Unsicherheiten und die komplexen Prozesse zu berücksichtigen, die die Bioverfügbarkeit von Schadstoffen in Sedimenten beeinflussen, sind verschiedene Informationsstränge notwendig [3, 4].

RISIKOBASIERTER RAHMEN ZUR SEDIMENTBEWERTUNG

In vielen Ländern werden die Sedimentqualität und die von schadstoffbelasteten Sedimenten ausgehenden Risiken bereits bewertet. Dabei wird bestimmt, ob sedimentgebundene Chemikalien untragbare Risiken für Wasserlebewesen, Wildtiere und/oder die menschliche Gesundheit bergen. Solche Bewertungen können im Rahmen der Überwachung von Oberflächengewässern, für die Risikobewertung von Chemikalien im Zulassungsverfahren oder für das Management belasteter Standorte erforderlich sein [2, 5]. Umweltaufsichtsbehörden unterstützen die Entwicklung von logischen systematischen Vorgehensweisen, um sicherzustellen, dass die Sedimente umfassend, transparent und einheitlich bewertet werden [6]. Die regulatorische Umsetzung solcher Methoden ist in der Schweiz und in vielen anderen Teilen Europas jedoch noch nicht erfolgt [7].

Der Umgang mit belasteten Sedimenten ist mit zahlreichen und vielschichtigen Schwierigkeiten verbunden. Es gibt jedoch einen allgemeinen risikobasierten Rahmen für die Bewertung und das Management von Sedimenten und auch Leitfäden für die richtige Planung von Probenahmekampagnen, damit eine fundierte Entscheidung über mögliche Sanierungsmassnahmen möglich wird. Ein Beispiel dafür findet sich in *Figur 1*.

Diese Vorgehensweise kann an fast alle Situationen und Ziele angepasst werden. Der Prozess beginnt gewöhnlich damit, dass sich die Stakeholder über die Ziele der Bewertung und den zu wählenden Ansatz einigen (Phase 1 in *Fig. 1*: Vorbewertung). Nach der Formulierung der Forschungsfragen und der Risikohypothesen (*Box 1*) werden die vorhandenen Informationen analysiert, um zu bestätigen oder zu verwerfen, dass das untersuchte Sediment belastet ist und ein Problem darstellt (Phase 2 in *Fig. 1*: Erste Bewertung). Reichen die vorhandenen Informationen nicht aus, so sind weitere Sediment- oder Standortuntersuchungen erforderlich, damit die benötigten Informationen erlangt werden (Phase 3 in *Fig. 1*: Sediment- oder Standortbewertung). Nützlich dabei sind Informationen zur früheren oder aktuellen Nutzung des Standorts, zu den regionalen Bodennutzungsstrukturen, zu den Eigenschaften von Abwasser- und Regenwassereinleitungen in der Nähe des Standorts oder zu den lokalen hydrologischen Bedingungen. Anhand dieser Informationen kann entschieden werden, ob für eine Entscheidungsfindung detailliertere Untersuchungen notwendig sind. Diese Informationen helfen den Fachleuten dabei, die Sedimentstudie so zu planen, dass ein Problem mit belasteten Sedimenten bestätigt oder verworfen werden kann. Auch Art, Ausmass und Umfang des von den Sedimenten ausgehenden Risikos können so geklärt werden. Es können ein oder mehrere Methoden zur

Bewertung der Sedimentqualität erforderlich sein, um genügend Informationen für die Wahl einer Managementoption zu gewinnen (Phase 4 in *Fig. 1*: Beurteilung und Wahl von Managementoptionen). Die Ergebnisse dieser ersten Sedimentstudie können als Referenzbedingungen dienen, um die (positiven) Auswirkungen der gewählten Managementoptionen am Standort zu prüfen (Phasen 5 und 6 in *Fig. 1*).

FORSCHUNGSFRAGEN ZUR BEWERTUNG DER SEDIMENTQUALITÄT UND DER RISIKEN

- Sind die Sedimente mit toxischen und/oder bioakkumulativen Substanzen belastet?
- Beeinträchtigen die kontaminierten Sedimente das aquatische Ökosystem?
Wenn ja: Welche Nutzungszwecke werden beeinträchtigt (z. B. Fischerei, Baden, Trinkwasser)?
- Welche Substanzen verursachen eine Beeinträchtigung der Nutzung oder tragen grundlegend zu einer Beeinträchtigung der Nutzung bei?
- Wie gross ist das Ausmass der Sedimentbelastung?
- Wo sind die Standorte, die die höchste Priorität aufweisen/am meisten zu Besorgnis Anlass geben?
- Welche Massnahmen sind erforderlich, damit die unbedenkliche Nutzung des aquatischen Ökosystems wieder gewährleistet ist?

Box 1



Fig. 1 Allgemeiner Bewertungs- und Managementrahmen für belastete Sedimente (angepasst von [6]). In den blauen Evaluierungsphasen kann eine Bewertung der Sedimentqualität erforderlich sein
Cadre général d'évaluation et de gestion pour les sédiments contaminés (adapté d'après [6]). Dans les phases d'évaluation en bleu, un examen de la qualité des sédiments peut être nécessaire

METHODEN ZUR BEWERTUNG DER SEDIMENTQUALITÄT

Um das Vorhandensein oder Nichtvorhandensein von Risiken im Zusammenhang mit belasteten Sedimenten festzustellen und um den optimalen Umgang mit solchen Risiken zu bestimmen, wird eine Reihe von physikalischen, chemischen und biologischen Informationen benötigt [3, 4]. Der Triaden-Ansatz stützt sich ursprünglich auf Physikochemie, Ökotoxikologie und die Untersuchung benthischer Lebensgemeinschaften und geht davon aus, dass jeder dieser Beweisstränge einzigartige Informationen für die Bewertung liefert:

- Die physikochemische Charakterisierung gibt Informationen zur Anwesenheit und Menge sedimentgebundener Schadstoffe.
- Die Untersuchung benthischer Lebensgemeinschaften gibt Informationen zur *In-situ*-Veränderung der Lebensgemeinschaften aufgrund vorhandener Schadstoffeinflüsse.
- Die ökotoxikologischen Labormethoden geben Informationen zur Verbindung zwischen der chemischen Gesamtbelastung und deren Toxizität für Organismen [8].

Das ursprüngliche Konzept des Triaden-Ansatzes sieht vor, dass alle Analysen auf derselben Untersuchungsebene bzw. -phase durchgeführt werden. Der Ansatz kann jedoch auch als gestufter Prozess

umgesetzt werden, in dem jede Bewertungsstufe oder -ebene eine von zwei Optionen zur Folge hat: a) die Beendigung des Bewertungsprozesses, da genügend Informationen für die Beantwortung der Bewertungsfragen gesammelt wurden, oder b) die Fortsetzung der Bewertung, da für eine Managemententscheidung nicht genügend Informationen vorliegen. Der Triaden-Ansatz ist somit ein flexibles Instrument, da er den Einbezug zusätzlicher Informationsstränge erlaubt, wenn sich spezifische Forschungsfragen ergeben, etwa in Bezug auf potenziell bioakkumulative Substanzen [9]. Ausserdem werden den Zielen der Bewertung und den formulierten Forschungsfragen angepasste Methoden gewählt, damit unterschiedliche Arten von Informationen gesammelt werden können (Fig. 2).

CHEMISCHE METHODEN

Die Quantifizierung von Chemikalien in Sedimenten wird routinemässig als Schlüsselindikator für die Ökosystemgesundheit verwendet, da sie Aufschluss darüber gibt, ob und in welchem Ausmass die Sedimente am untersuchten Standort Schadstoffe enthalten. Im ökotoxikologischen Kontext sind dabei zwei Komponenten von Bedeutung: die chemische Analyse sowie die physikalische und geochemische Analyse, insbesondere die Partikelgrössenverteilung und der Gehalt an organischem Material. Diese ergänzenden Messungen sind notwendig, da die Wechselwirkungen

zwischen den physikochemischen Komponenten und den Organismen komplex sind und die Bioverfügbarkeit der Schadstoffe und ihre biologischen Auswirkungen beeinflussen. Bei der Wahl der zu untersuchenden Chemikalien sollten Informationen über frühere und aktuelle Belastungsquellen genutzt werden. Auch die Wahrscheinlichkeit, dass diese Substanzen aufgrund ihrer physikochemischen Eigenschaften in Partikel und Sedimente partitionieren, sollte berücksichtigt werden. Oft wird routinemässig eine Reihe von Chemikalien untersucht, die häufig in Sedimenten vorkommen, die durch Stadt- und Industriegebiete beeinflusst werden. Dazu gehören Spurenmetalle (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn sowie das Metalloid As), polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) und polychlorierte Biphenyle (PCB). Es handelt sich hierbei auch um die Chemikalien, die von den kantonalen Ämtern bei der Überwachung der Sedimentqualität berücksichtigt werden [2]. Im Zusammenhang mit der Wasserrahmenrichtlinie der EU wurden weitere Substanzen bestimmt, die in Sedimenten überwacht werden sollten: bromierte Diphenylether, Chloralkane, polyaromatische Kohlenwasserstoffe und verschiedene organische Chlorverbindungen wie Hexachlorbenzol [4]. Weitere Substanzen können den guten ökologischen Zustand von Wasserkörpern beeinträchtigen, zum Beispiel Organophosphate und Phthalate. Die Bewertung der Sedimentqualität

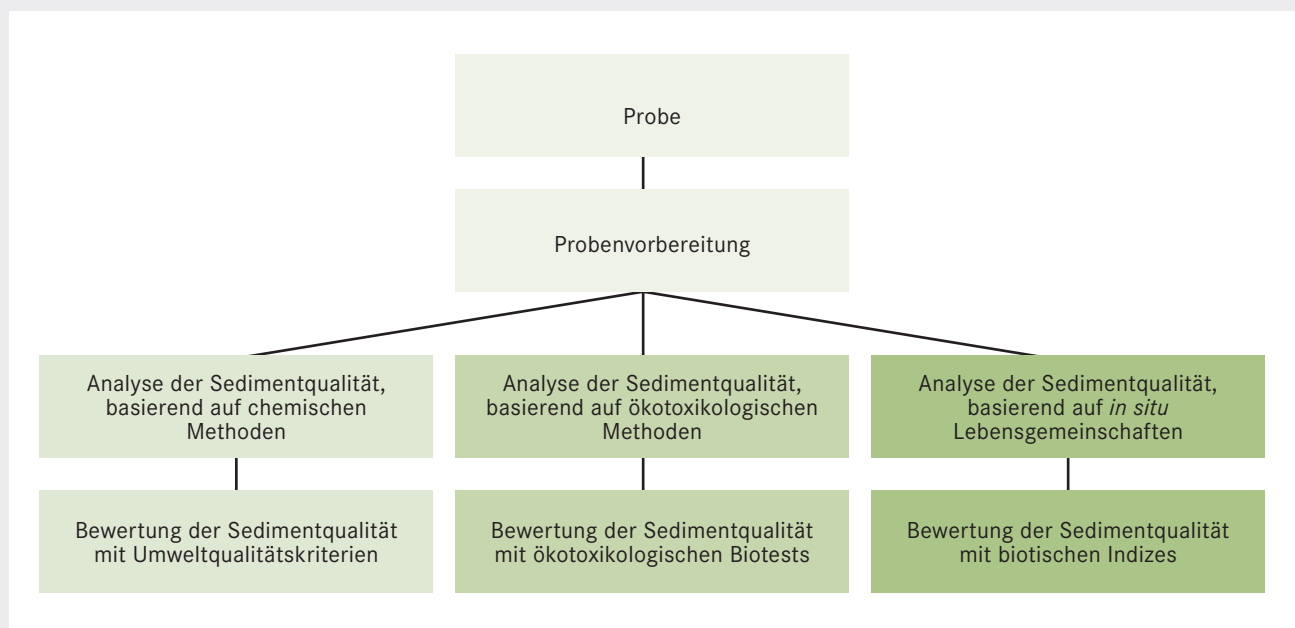


Fig. 2 Die Komponenten eines traditionellen Triaden-Ansatzes für die Bewertung der Sedimentqualität (angepasst von C. Kienle)

Composantes d'une approche en triade traditionnelle pour l'évaluation de la qualité des sédiments (adapté d'après C. Kienle)

mit Hilfe von Sediment-Qualitätskriterien wird im Kapitel «*Risikobewertung*» beschrieben.

ÖKOTOXIKOLOGISCHE METHODEN

Toxizitätstests oder Biotests im Labor liefern die Daten, um Sediment-Qualitätskriterien auf der Grundlage ökotoxikologischer Wirkungen abzuleiten. Die Tests werden im Triaden-Ansatz verwendet, weil sie die Quantifizierung der biologischen Wirkungen ermöglichen, die durch eine oder mehrere chemische Substanzen in Sedimenten verursacht werden. Sie messen die kombinierte Wirkung aller vorhandenen Chemikalien, einschliesslich solcher, die nicht routinemässig gemessen werden (können). In den meisten Fällen ist die relevanteste Testmatrix das Gesamtsediment (Festphase), da dieses

und/oder andere subletale Endpunkte wie zum Beispiel Wachstum oder Reproduktion. Während manchmal mit akuten Biotests genügend Informationen gewonnen werden können (z. B. bei hohen Belastungen), sind bei einer mässigen Belastung oder bei spezifischen Schadstoffarten möglicherweise längere Expositionszeiten oder die Messung spezifischer sublethaler Wirkungen notwendig. Tests zur chronischen Toxizität sind besonders bei benthischen Invertebraten sinnvoll, die geringeren Verschmutzungen über längere Zeit standhalten können. Es wird empfohlen, eine Testbatterie mit mehreren Biotests mit verschiedenen Testorganismen, Expositionspfaden (z. B. Haut, Ernährung) und Lebensläufen sowie mit verschiedenen Endpunkten und Expositionsperioden durchzuführen,

Test	Testorganismen	Medium ^a	Endpunkte ^b	Dauer	SOP
Bakterien	<i>Arthrobacter globiformis</i>	S	F	6 h	[33]
Ostrakoden	<i>Heterocypris incongruens</i>	S	S, G	72 h	[34]
Insektenlarven	<i>Chironomus riparius</i> ; <i>Chironomus dilutus</i>	S	S, G, E, R	7 to 44 d	[35-37]
Oligochaeten	<i>Lumbriculus variegatus</i>	S	G, R	28 d	[38]
Nematoden	<i>Caenorhabditis elegans</i>	L, S	G, R	4 d	[39]
Amphipoden	<i>Hyalella azteca</i>	S	S, G	14-28 d	[40,41]
Makrophyten	<i>Myriophyllum spicatum</i> ; <i>Myriophyllum aquaticum</i>	S	G	10-14 d	[42,43]

^aS: Gesamtsediment; L: Sediment-Flüssigphasen
^bF: Enzymaktivität; S: Überleben; G: Wachstum; E: Emergenz; R: Reproduktion

Tab. 1 Standardbiotests für Süßwassersedimente in Europa
Essais biologiques standard pour les sédiments d'eau douce en Europe

den natürlichen Bedingungen vor Ort am nächsten kommt. Es gibt verschiedene standardisierte Biotests und auch Richtlinien zur Probenahme, zum Umgang mit den Sedimentproben sowie zu deren Charakterisierung [z. B. 4, 5]. Weiter unten befindet sich eine Übersicht über die Festphasentests (Tab. 1). Andere Sedimentphasen wie Porenwasser, flüssige Eluate und flüssige Extrakte, die nach dem Mischen von Sedimenten mit einem organischen Lösungsmittel entstehen, können je nach Projektziel ebenfalls auf ihre Toxizität getestet werden. Für eine detailliertere Beschreibung von Flüssigphasentests für Sedimente wird auf Box 2 verwiesen. Zu den gebräuchlichsten Toxizitätstests für Gesamtsedimente gehören sowohl akute (Exposition von 10 bis 14 Tagen) als auch chronische Biotests (Exposition von 21 bis 60 Tagen), die die Sterblichkeit der exponierten Organismen messen

um die Bandbreite der unterschiedlichen Empfindlichkeiten abzudecken, die benthische Organismen im Feld zeigen können [3, 7, 10, 11]. Es gibt immer noch deutlich weniger standardisierte Tests zur Bewertung von Sedimenten als zur Bewertung von Süßwasser. Einige Sedimentbiotests werden jedoch seit mehr als zwanzig Jahren routinemässig angewendet und es konnten mit ihnen umfassende Erfahrungen gesammelt werden, so zum Beispiel mit den Chironomiden- und Amphipodentests in den USA [12]. Zurzeit werden neue Tests entwickelt, darunter *In-vitro*-Tests für spezifische toxische Wirkungsmechanismen wie endokrine, dioxin-ähnliche, mutagene und genotoxische Wirkungen [13-15]. Es gibt auch Konzepte, die kosteneffiziente Instrumente zur Ermittlung von Toxizitätsprofilen mit einer effektdirigierten Analyse kombinieren. Ihre Anwendung auf Sedimen-

FLÜSSIGPHASENTESTS ZUR BEWERTUNG DER SEDIMENTTOXIZITÄT

Porenwasser, also das Wasser, das die Hohlräume zwischen den Sedimentpartikeln ausfüllt, kann durch Zentrifugation oder durch die Anwendung von Druck oder Vakuum gewonnen werden. Die Verwendung von Porenwasser stellvertretend für potenzielle *In-situ*-Wirkungen des belasteten Sediments beruht auf der Annahme, dass die Toxizität für benthische Organismen hauptsächlich durch den Kontakt mit der Flüssigphase belasteter Sedimente auftritt. Diese Annahme wurde jedoch durch die Tatsache infrage gestellt, dass viele benthische Organismen ihre Röhren oder Höhlen mit dem darüberliegenden Wasser bewässern und eher durch die Aufnahme belasteter Nahrung und Partikel exponiert sind. Verfahren zur Isolierung und Handhabung von Porenwasserproben aus ganzen Sedimenten wurden in [32] und [33] beschrieben. Am häufigsten verwendet werden Biotests, die zur Prüfung von Wasserproben entwickelt wurden.

Wässrige Eluate und Schwebstoffe werden durch die Mischung der Sedimente mit dem darüber liegenden Wasser gewonnen. Sie können in Biotests verwendet werden, um die potenzielle Schadstoffabgabe der Sedimente an die Wassersäule bei einer Deponierung von Baggergut oder bei einer Sedimentresuspension zu messen. Der Unterschied besteht darin, dass sich das aufgewirbelte Sediment bei den Tests mit Eluaten zum Zeitpunkt der Prüfung wieder gesetzt hat.

Eine Wirkungsbewertung kann auch **organische Extrakte** umfassen, die für die Prüfung der Toxizität der sedimentgebundenen organischen Chemikalien von Bedeutung sind. Die Prüfung organischer Extrakte beinhaltet die Extraktion von Sedimenten mit Lösungsmitteln, um eine für die Prüfung geeignete Probe zu erhalten. Die Extraktion und Vorbereitung der organischen Extrakte hängt von der Art der betrachteten Substanzen und den Biotests ab. Organische Extrakte werden hauptsächlich für *In-vitro*-Tests und effektdirigierte Analysen verwendet.

Box 2

te ist ebenfalls vielversprechend [16, 17]. Die Standardisierung solcher Methoden für die Prüfung von Oberflächenwasser wird ihre Anwendung auf komplexere Matrices wie Sedimente erleichtern.

Die Kombination von chemischen, ökotoxikologischen und biologischen Instrumenten hilft dabei, ökologische Veränderungen *in situ* (z. B. die Zusammensetzung benthischer Gemeinschaften) einer bestimmten chemischen Belastung zuzuschreiben. Es bleibt jedoch schwierig, Ergebnisse aus Laborstudien mit Feldbeobachtungen zu verknüpfen und, vor allem im Feld, zwischen anthropogenen Effekten und natürlicher Variabilität zu unterscheiden. Um solche Fragen anzugehen, verwendet man seit ungefähr zehn Jahren vermehrt sogenannte *In-situ*-Biotests, bei denen Organismen in Käfigen direkt im Sediment vor Ort exponiert werden [18]. Für solche *In-situ*-Biotests nimmt man in der Regel Organismen, die entweder im Labor gezüchtet oder an einem sauberen Referenzstandort gefangen worden sind. Im Vergleich zu Labortests werden durch diesen Ansatz Artefakte aufgrund der Probenahme, des Transports und der Lagerung der Sedimentproben minimiert. Es gibt jedoch noch keine standardisierten *In-situ*-Biotestsysteme. Vor allem muss die experimentelle Kontrolle verbessert werden, bevor solche Methoden in regulatorischen Programmen eingesetzt werden können. Obwohl diese Methoden komplex sind, sind sie aber auch vielversprechende Werkzeuge für die Zusammenführung von chemischen und biologischen Beweissträngen [19].

INDIZES FÜR BENTHISCHE IN-SITU-LEBENS-GEMEINSCHAFTEN

Während Toxizitätstests und chemische Daten das Potenzial für nachteilige Wir-

kungen aufzeigen können, ermöglicht es die Analyse der benthischen Lebensgemeinschaften vor Ort, tatsächliche Effekte auf der Populationsebene aufzuzeigen (*Ground Truthing*). Benthische Makroinvertebraten sind relativ sesshaft und leben (fast) während ihres gesamten Lebenszyklus in enger Verbindung mit Sedimenten. Ausserdem kommen sie in grossen Mengen und auf einer grossen Bandbreite an Sedimenttypen vor und lassen sich einfach sammeln. Es wurden mehrere Messgrössen und Indizes zur Bewertung der Struktur von Lebensgemeinschaften benthischer Invertebraten als Indikatoren für die Wasserqualität entwickelt und implementiert. Diese sind in der Schweiz gut etabliert (Tab. 2). Sie beruhen auf der Vielfalt der gefundenen Organismen und auf der Empfindlichkeit gewisser Taxa gegenüber abiotischen Einflüssen. Der französische IBGN (*Indice biologique global normalisé* – normierter biologischer Gesamtindex) [20–22] stellt die Grundlage für den Schweizer IBCH (*Indice biologique normalisé en Suisse* – normierter biologischer Index in der Schweiz) dar [23], unterscheidet sich jedoch von diesem in der Probenahme-strategie [24].

Der IBCH berücksichtigt die verschiedenen Arten von Habitaten und deren Eignung für eine Besiedlung durch Organismen, doch die geringe Dichte von makrobenthischen Organismen kann seine Verwendung für die Bewertung der Sedimentqualität erschweren. Eine der einfachsten Methoden für die Untersuchung der Zusammensetzung des Zoobenthos

in Sedimenten ist das Vorkommen bzw. Fehlen gewisser Taxa. Das Fehlen empfindlicher Organismen wie Amphipoden und EPT-Taxa (*Ephemeroptera* – Eintagsfliegen; *Plecoptera* – Steinfliegen; *Trichoptera* – Köcherfliegen) wird als deutlicher Beweis für eine Zustandsverschlechterung besonders bei Hartbodensubstraten betrachtet. Auf verschlechterte Bedingungen in den Sedimenten deutet auch die Vorherrschaft verschmutzungstoleranter Arten wie Würmer (Oligochaeten, insbesondere Tubificiden) und Mückenlarven (Chironomiden) hin [25]. Zu den spezifischen Indizes für weiche Sedimente gehören der französische IOBS (*Indice oligochètes de bioindication des sédiments*), der sich für Fließgewässer in Siedlungsgebieten eignet [26], sowie der IOBL (*Indice oligochètes de bioindication lacustre*), der für Seen entwickelt wurde [27]. Der IOBS und der IOBL können als alleinige Methoden eingesetzt werden, wenn an einem bestimmten Standort die Feinsedimente dominieren. In der Schweiz wurden sie in Verbindung mit anderen biotischen Indizes wie dem IBGN oder dem IBCH auch schon grossflächig für Situationen verwendet, in denen die Feinsedimente nicht dominierten [28, 29]. In den letzten Jahren wurden ausserdem weitere Methoden entwickelt, z. B. der *NemaSPEAR*-Index für gefährdete Nematodenarten [30]. Nematoden sind eine Schlüsselgruppe und dominieren die Lebensgemeinschaften der Meiofauna, kleiner benthischer Invertebraten. Die Arten innerhalb dieser Gruppe decken eine grosse Bandbreite an trophischen Ebenen

Index	Ziel	Anmerkungen	Richtlinie/SOP
IBGN (<i>Indice biologique global normalisé</i>)	Gesamtqualität innerhalb eines Habitat-typs (Strömung und Substrat); zeitliche und räumliche Entwicklung (flussaufwärts-flussabwärts entstehende Störung)	Nicht auf Quellen und tiefe Gewässer (grosse Tieflandflüsse und Kanäle) anwendbar	[20–22]
IBCH (<i>Indice biologique normalisé en Suisse</i>)	Gesamtverschlechterung bei der Zusammensetzung von Makroinvertebratengemeinschaften; Vorkommen und Verteilung der häufigsten Makroinvertebraten	Nicht anwendbar auf tiefe Wasserläufe (z. B. Rhein, Aare, Teile der Reuss, Limmat), Quellen oder Wasserläufe, bei denen kein Kicksampling möglich ist.	[23]
BMWP-Score (<i>Biological Monitoring Working Party</i>) und ASPT-Score (<i>Average Score per Taxon</i>)	Gesamtverschlechterung bei der Zusammensetzung von Makroinvertebratengemeinschaften	Auf der Grundlage einer Punktzahl, die ermittelt wird, indem verschiedenen Invertebratenfamilien je nach ihrer Toleranz gegenüber organischer Verschmutzung Punkte zugeteilt werden.	[44]
Saprobien-Index (SI)	Dieser Index wurde ursprünglich zur Beurteilung der Auswirkungen organischer Verschmutzung durch Abwasser entwickelt.	Er wurde so abgeändert, dass auch andere Belastungsfaktoren einbezogen werden können.	[45]
IOBS, IOBL (<i>Oligochaeten-Index für Sedimente</i>)	Gesamtqualität stabiler feiner und sandiger Sedimente; ökologische Auswirkungen von Verschmutzung	Abdeckung von 60 Prozent des Grundes mit Sedimenten; begrenzte Anwendung auf Quellen und kleine alpine Wasserläufe.	[26,27]

Tab. 2 Überblick über die biotischen Indizes zur Bewertung von benthischen Lebensgemeinschaften
Vue d'ensemble des indices biotiques pour l'évaluation des communautés benthiques

und Ernährungsstrategien ab. Zusätzlich zu den herkömmlichen Messgrößen bietet der *NemaSPEAR*-Index auch ein System zur Klassifizierung von Arten nach ihrer Empfindlichkeit oder Toleranz gegenüber bestimmten toxischen Belastungen. Dies kann bei der Identifizierung der Verschmutzungsquelle hilfreich sein. Derzeit ist beim *NemaSPEAR*-Index noch eine Interkalibrierung und Standardisierung notwendig, bevor er im Rahmen von Überwachungsprogrammen routinemäßig eingesetzt werden kann.

RISIKOBEWERTUNG

Insgesamt ist die Risikobewertung von Sedimenten jener von Oberflächengewässern ähnlich, auch die Datenauswertung gestaltet sich nicht viel anders. Die ökotoxikologische Relevanz von in Sedimenten gemessenen Konzentrationen wird mithilfe von numerischen Sediment-Qualitätskriterien bestimmt. Die sogenannten Schwelleneffektkonzentrationen (*Threshold Effect Concentrations*, TEC) und die wahrscheinlichen Effektkonzentrationen (*Probable Effect Concentrations*, PEC) eignen sich als Sediment-Qualitätskriterien zur Bestimmung von Risiken, die von belasteten Sedimenten für benthische Gemeinschaften ausgehen [2]; Konzentrationen über dem entsprechenden PEC-Wert stellen ein wahrscheinliches Risiko für benthische Lebensgemeinschaften dar, während Konzentrationen unter dem entsprechenden TEC-Wert kein Risiko für die benthischen Invertebratengemeinschaften mit sich bringen. Im Graubereich zwischen dem TEC- und dem PEC-Wert besteht Ungewissheit – dies ist zuweilen auf die experimentellen Daten zurückzuführen, die zur Ermittlung der Werte verwendet wurden, oder auf eine (fehlende) Validierung. Für natürlich vorkommende Schadstoffe wie Metalle wird bei einer Überschreitung der Sediment-Qualitätskriterien ein Vergleich der gemessenen Mengen mit den natürlichen Hintergrundkonzentrationen empfohlen, damit Anomalien auf regionaler und lokaler Ebene bestimmt werden können. An Standorten mit chemischen Konzentrationen, die in den Übergangsbereich der Konzentrations-Wirkungskurve fallen, kann das Risiko für eine schädliche Wirkung besser abgeschätzt werden, indem standortspezifisch auf der Grundlage von ökotoxikologischen Tests und *In-situ*-

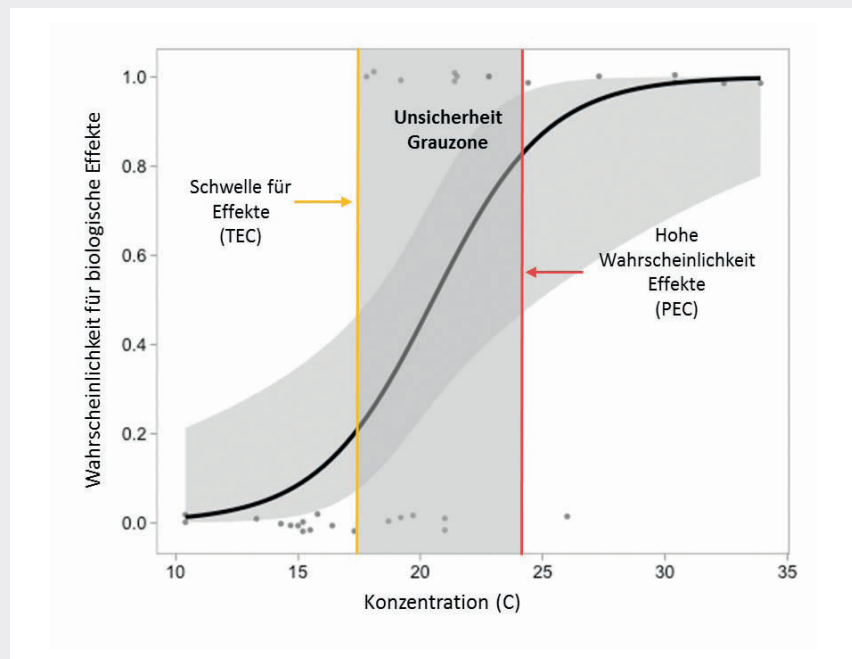


Fig. 3 Beispiel der Verteilung von biologischen Wirkungsdaten (Punkte) über einen Bereich von Schadstoffkonzentrationen in Sedimenten und verallgemeinertes Konzentrations-Wirkungsmodell, das für die Entwicklung von Sediment-Qualitätskriterien eingesetzt wird. In der Grauzone zwischen den ermittelten TEC- und PEC-Werten herrscht eine Ungewissheit, da zum Beispiel die experimentellen Daten unzureichend sind, die den Werten zugrunde liegen, oder da eine Validierung fehlt. Nachteilige Wirkungen bei Konzentrationen, die in den Unsicherheitsbereich der Konzentrations-Wirkungskurve fallen, lassen sich durch standortspezifische Bewertungen besser abschätzen

Exemple de la distribution de données de réponse (points) sur une plage de concentrations de polluants dans les sédiments et modèle dose-réponse généralisé, utilisé pour l'élaboration de critères de qualité des sédiments. Il subsiste une incertitude dans la zone grise entre les valeurs TEC et PEC moyennes, car, par exemple, les données expérimentales qui sont les valeurs sous-jacentes sont insuffisantes ou parce qu'il manque une validation. Les effets indésirables des concentrations, qui relèvent de la plage d'incertitude de la courbe d'efficacité de concentration, peuvent être mieux estimés au moyen d'évaluations spécifiques au site

Lebensgemeinschaften bewertet wird (Fig. 3). Für die Interpretation von Biotest-Ergebnissen gibt es kaum numerische Qualitätskriterien wie die chemischen TEC- und PEC-Werte. Das Risiko für nachteilige Wirkungen wird meist durch den Vergleich mit einer Kontroll- oder Referenzsituation dokumentiert. Bei den ökotoxikologischen Tests wird parallel zu jeder Probengruppe ein Referenz- oder Kontrollsediment von einem nicht kontaminierten Standort getestet. Standardisierte Protokolle bieten Informationen dazu, wie die Proben analysiert und die Ergebnisse interpretiert werden sollen. Dies schliesst Zulässigkeitskriterien ein (z. B. minimale Überlebens-, Wachstums- oder Reproduktionsrate im Kontrollsediment; Erhaltung der Eigenschaften der Wasserqualität während der Exposition). Auch für subletale Endpunkte werden Toxizitätsschwellen ermittelt [10, 11].

Bei der Bewertung von *In-situ*-Lebensgemeinschaften kann das Ausbleiben von Veränderungen ausreichen, um daraus zu schliessen, dass keine problematische Belastung vorliegt. Hingegen deutet die Abwesenheit von benthischen Organismen in Sedimenten nicht unbedingt darauf hin, dass ein Sediment belastet ist. Benthische Invertebraten reagieren nicht nur auf Schadstoffe, sondern auch auf eine Vielzahl von biotischen und abiotischen Faktoren, etwa auf einen niedrigen Gehalt an gelöstem Sauerstoff, Veränderungen der Korngrößenverteilung oder die Nährstoffqualität von Substraten, erhöhte Temperatur, Wassergeschwindigkeit oder Abrieb. Ein Referenzstandort, der die gesamte Bandbreite der physikalischen und chemischen Eigenschaften von Wasser und Sedimenten an den Teststandorten abdeckt, ist hilfreich, um herauszufinden, wo Sedimente belastet sind. Oft ist es al-

lerdings eine Herausforderung, geeignete Referenzstandorte mit einem geringen Belastungsgrad zu finden. Die Kombination von chemischen, ökotoxikologischen und biologischen Instrumenten hilft dabei, *In-situ*-Veränderungen auf eine chemische Verschmutzung zurückzuführen.

SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Noch fehlt in der Schweiz ein regulatorischer Rahmen für die Bewertung der Sedimentqualität und der davon ausgehenden Risiken. Derzeit gibt es jedoch deutliche Fortschritte bei der Entwicklung und Implementierung einer harmonisierten Methodik für die Sedimentbewertung. Dieser Prozess wird den kantonalen Ämtern dabei helfen, die Sedimentqualität zu überwachen und an belasteten Standorten notwendige Managemententscheidungen zu treffen. Die Entscheidungsfindung benötigt einen risikobasierten Managementrahmen, der flexibel genug ist, um die relevanten Fragen fallspezifisch beantworten zu können. Dies kann durch einen gestuften Ansatz erreicht werden, der aus einer Reihe von Stufen mit zunehmender Untersuchungsintensität und abnehmender Ungewissheit besteht. Die Umsetzung eines solchen Ansatzes erlaubt es auch, beim Sammeln der für die Entscheidungsfindung erforderlichen Informationen die Ressourcen optimal zu nutzen. Die Verfügbarkeit von Standardprotokollen und -methoden, die für eine standortspezifische Bewertung erforderlich sind, sowie die auf internationaler Ebene gemachten Erfahrungen bieten eine Grundlage für die zeitgerechte Umsetzung einer entsprechenden Methodik in der Schweiz.

DANK

Die Autoren bedanken sich bei der Sediment-Diskussionsgruppe für ihren Beitrag zum Projekt «Bewertung der ökotoxikologischen Sedimentqualität: Empfehlungen für die Schweiz» sowie bei *Stefan Gautschi* und *Rolf Fankhauser* für ihren Input zu einer früheren Version des Manuskripts.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Office Fédéral de la Protection de l'Environnement (1998): Ordonnance du 28 octobre 1998 sur la protection des eaux (OEaux). No. RS 814.201. Berne, Suisse
- [2] Flück, R. et al. (2012): Surveillance de la qualité des sédiments. État actuel des méthodes disponibles et mise en place de recommandations. *Aqua & Gas* 4. Avril 2012
- [3] ECHA (2013): Proceedings of the Topical Scientific Workshop on Risk Assessment for the Sediment Compartment. European Chemical Agency, Helsinki May 2013. Information available at www.echa.europa.eu
- [4] EU (2010): Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive: (2000/60/EC). Guidance Document No: 25 Guidance on chemical monitoring of sediment and biota under the Water Framework Directive. Luxembourg, pp. 74
- [5] U.S. EPA (2001): Methods for Collection, Storage and Manipulation of Sediments for Chemical and Toxicological Analyses: Technical Manual EPA 823-B-01-002. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, DC, pp. 208
- [6] Wenning et al. editors. (2005): Use of sediment quality guidelines and related tools for the assessment of contaminated sediments. *Pensacola: Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC)*. 815 p
- [7] den Besten, P.J. et al. (2003): Biological effects-based sediment quality in ecological risk assessment for European waters. *Journal of Soil and Sediments* 3: 144–162
- [8] Chapman, P.M. (1990): The sediment quality triad approach to determining pollution-induced degradation. *Science of the Total Environment* 97–98: 815–825
- [9] Chapman, P.M. et al. (2006): Should the sediment quality triad become a tetrad, a pentad, or possibly even a hexad? *Journal of Soils and Sediments* 6: 4–8
- [10] Feiler, U. et al. (2013): Sediment contact tests as a tool for the assessment of sediment quality in German waters. *Environmental Toxicology and Chemistry* 158: 2999–3010
- [11] Babut, M. et al. (2014): Vers une démarche graduée d'évaluation écotoxicologique des sédiments fluviaux: présentation et premiers tests. *La Houille Blanche, International Water Journal* (accepted)
- [12] U. S. EPA (1994): Methods for measuring the toxicity and bioaccumulation of sediment associated contaminants with freshwater invertebrates. Technical Manual EPA/600/R-94/024. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, pp.133
- [13] Schmitt, C. et al. (2010): Characterising field sediments from three European river basins with special emphasis on endocrine effects – A recommendation for *Potamopyrgus antipodarm* as test organism. *Chemosphere* 80: 13–19
- [14] Eichbaum, K. et al. (2014): In vitro bioassays for detecting dioxin-like activity – Application potential and limits of detection, a review. *Science of The Total Environment* 4: 37–48
- [15] Hubert, F.V. et al. (2012): Mutagenicity and genotoxicity of suspended particulate matter in the Seine river estuary. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis* 741: 7–12
- [16] Hamers, T. et al. (2010): Toxicity profiling: an integrated effect-based tool for site-specific sediment quality assessment. *Integrated Environmental Assessment and Management* 6: 761–73
- [17] Brack, W. et al. (2007): Effect-Directed Analysis of key toxicants in European river basins, a review. *Environmental Science Pollution Research*, 14: 30–38
- [18] Ferrari, B.J.D. et al. (2014): In situ aquatic bioassays. In: *Encyclopedia of aquatic ecotoxicology*, Féraud J.-F. & Blaise C. (Eds.), Springer publishers, ISBN: 978-94-007-5040-1 (Print) 978-94-007-5704-2 (online)
- [19] Burton, A.G. et al. (2012): A sediment ecotoxicity assessment platform for in situ measures of chemistry, bioaccumulation and toxicity. Part 1: System description and proof of concept. *Environmental Pollution* 162: 449–456
- [20] AFNOR (2004): Qualité écologique des milieux aquatiques. Qualité de l'eau. Détermination de l'indice biologique global normalisé (IBGN), Association française de normalisation, Norme expérimentale T 90-350
- [21] AFNOR (2009): Qualité écologique des milieux aquatiques. Qualité de l'eau. Prélèvement des macro-invertébrés aquatiques en rivières peu profondes, Association française de normalisation, Norme expérimentale T 90-333
- [22] AFNOR (2010): Qualité écologique des milieux aquatiques. Qualité de l'eau. Traitement au laboratoire d'échantillons contenant des macro-invertébrés de cours d'eau, Association française de normalisation, Prénorme expérimentale XP T 90-388
- [23] Stucki, P. (2010): Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau en Suisse. Macrozoobenthos – niveau R. Office fédéral de l'environnement, Berne. L'environnement pratique n° 1026: 61 p.
- [24] Stucki, P. et al. (2008): Comparaison de 3 méthodes d'échantillonnage du macrozoobenthos utilisées en Suisse. CSCF, EAWAG, OFEV, Hintermann & Weber
- [25] Lang, C. (2010): Etat écologique des sédiments de deux lacs de montagne indiqué par les oligochètes et les chironomes. *Bulletin de la société vaudoise des sciences naturelles* 92: 47–60
- [26] AFNOR (2002): Qualité de l'eau – Détermination de l'indice oligochète de bioindication des sédiments (IOBS). Association française de normalisation, Norme expérimentale NF T90-390
- [27] AFNOR (2005): Qualité de l'eau – Détermination de l'indice oligochète de bioindication lacustre (IOBL). Association française de normalisation, Norme expérimentale NF T90-391
- [28] Lods-Crozet, B. et al. (2004): Réponses des communautés benthiques du Léman à l'amélioration de l'état trophique du léman entre 1983 et 2003.

- Campagne 2003. Rapport de la Commission Internationale pour la protection des eaux du lac Léman contre la pollution: 99-109
- [29] Vivien, R. et al. (2014): Use of oligochaete communities for assessing the quality of sediments in watercourses of the Geneva area (Switzerland) and Artois-Picardie basin (France): proposition of heavy metal toxicity thresholds. *Ecohydrology and Hydrobiology* 14: 142-151
- [30] Höss, S. et al. (2011): Nematode species at risk – A metric to assess pollution in soft sediments of freshwaters. *Environment International* 37: 940-949
- [31] ASTM (2007): Standard test method for pore water extraction and determination of the soluble salt content of soils by refractometer. ASTM D4542-07, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007, www.astm.org
- [32] U.S. EPA (2013): SESD Operating Procedure SES-DPROC-513-R2. Pore water sampling. 16 pp.
- [33] ISO/DIS (2011): Water Quality – Determination of the inhibition of dehydrogenase activity of *Arthrobacter globiformis* – Solid contact test using the redox dye resazurine. ISO/DIS 10871. International Organization for Standardization, Switzerland
- [34] ISO/DIS (2011): Water quality–Determination of fresh water sediment toxicity to *Heterocypris incongruens* (Crustacea, Ostracoda). ISO/DIS 14371. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland
- [35] AFNOR (2004): Qualité de l'eau–Détermination de la toxicité des sédiments d'eau douce vis-à-vis de *Chironomus riparius*. Partie 1: Sédiments naturels. Association française de normalisation, Norme expérimentale XP T90-339-1
- [36] OECD (2004): Guideline for testing of chemicals 218: Sediment-water chironomid toxicity test using spiked sediment
- [37] OECD (2010): Guideline for testing of chemicals 233: Sediment-Water Chironomid Life-Cycle Toxicity Test Using Spiked Water or Spiked Sediment.
- [38] OECD (2007): Guideline for testing of chemicals 225. Sediment-Water *Lumbriculus Toxicity Test Using Spiked Sediment*
- [39] ISO (2010): Water Quality – Determination of the Toxic Effect of Sediment and Soil Samples on Growth, Fertility and Reproduction of *Caenorhabditis elegans* (Nematoda). ISO 10872. ISO/DIS 14371. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland
- [40] ISO (2013): Water quality – Determination of toxicity of fresh water sediments using *Hyalella azteca*. ISO 16303. ISO/DIS 14371. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland
- [41] AFNOR (2003): Qualité de l'eau–Détermination de la toxicité des sédiments d'eaux douces vis-à-vis de *Hyalella azteca*. Partie 1: Sédiments naturels. Association Française de Normalisation, Norme expérimentale XP T 90-338-1
- [42] ISO/CD (2010): Water quality – Determination of the Toxic Effect of Sediment and Soil on the Growth Behaviour of *Myriophyllum aquaticum* – *Myriophyllum Test*. ISO/CD 16191. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland
- [43] OECD (2014): Guideline for testing of chemicals 239: Water-Sediment *Myriophyllum spicatum Toxicity Test*
- [44] ISO-BMWP (1979): Assessment of biological quality of rivers by a macroinvertebrate score. ISO/TC147/SCS5/WG6/N5. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland
- [45] Rott, E. et al. (1997): Indikationslisten für Aufwuchsalgen. Teil 1: Saprobielle Indikation. 73pp. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft



ASCHEWOLKEN KOMMEN HEUTE NUR NOCH AUS ISLAND.

THIS IS **SICK**
Sensor Intelligence.

Ob Stromerzeugung, Zementherstellung, Müllverwertung oder Erdgasverteilung: Je komplexer die Anlagen, desto höher die Anforderungen an Systemengineering und Services. Bei der Überwachung von Emissionen, der Messung von Gasen zur optimalen Prozesssteuerung und der eichfähigen Messung in Pipelines hat SICK in allen Industriesegmente die Nase vorn. Mit perfekt an die Prozesslandschaft angepassten Gesamtlösungen für Gasanalyse, Staubmessung und Durchflussmessung. Mit höchster Geräteverfügbarkeit, einfacher Handhabung, zertifiziertem Explosionsschutz und robuster Messtechnik mit langen Wartungszyklen. Wenn es auf saubere Lösungen ankommt, misst die Welt mit SICK. Wir finden das intelligent. www.sick.ch