

Ökotoxikologische Verfahren bei belasteten Standorten: Überblick über verfügbare Methoden zur Beurteilung von Einwirkungen auf aquatische Ökosysteme

Expertenbericht im Auftrag des Bundesamts für Umwelt BAFU

Abschlussbericht – 4. März 2025



Impressum

Herausgeber

Schweizerisches Zentrum für angewandte Ökotoxikologie, 1015 Lausanne & 8600 Dübendorf

Auftraggeber

Bundesamt für Umwelt BAFU

Autoren

Rébecca Beauvais, Carmen Casado,
Cornelia Kienle, Etienne Vermeirssen, Schweizerisches Zentrum für angewandte Ökotoxikologie
Benoît Ferrari

Kontakt

Rébecca Beauvais, rebecca.beauvais@centrecotox.ch

Zitat

Beauvais, R., C. Casado, C. Kienle, E. Vermeirssen et B. Ferrari. Ökotoxikologische Verfahren bei belasteten Standorten: Überblick über verfügbare Methoden zur Beurteilung von Einwirkungen auf aquatische Ökosysteme. Schweizerisches Zentrum für angewandte Ökotoxikologie, Lausanne & Dübendorf.

Disclaimer

Diese Studie wurde im Auftrag des BAFU verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Fotos auf der Titelseite: Oekotoxzentrum

Oekotoxzentrum | Eawag | Überlandstrasse 133 | 8600 Dübendorf | Schweiz
T +41 (0)58 765 55 62 | info@oekotoxzentrum.ch | www.oekotoxzentrum.ch

Centre Ecotox | EPFL-ENAC-IIE-GE | Station 2 | CH-1015 Lausanne | Suisse
T +41 (0)21 693 62 58 | info@centrecotox.ch | www.centrecotox.ch

Zusammenfassung

In der Schweiz ist der Einsatz von ökotoxikologischen Tests (Biotests) zur Beurteilung von Einwirkungen auf die Wasser- oder Sedimentqualität weder für den Schutz von Oberflächengewässern noch für die Untersuchung belasteter Standorte gesetzlich vorgeschrieben. Bei Letzteren wird gemäss der Verordnung über die Sanierung von belasteten Standorten (AltIV) die Beurteilung der Gefährlichkeit von Schadstoffen mit Hilfe von chemischen Analysen für jeden einzelnen Schadstoff vorgenommen. Die gemessenen Konzentrationen werden mit Grenzwerten verglichen, die auf der Grundlage humantoxikologischer Daten festgelegt werden. Im Rahmen der Abschätzung von Auswirkungen auf Ökosysteme können jedoch ökotoxikologische Tests eine relevante ergänzende Methode darstellen. Diese wurden in einer inzwischen nicht mehr gültigen Vollzugshilfe für die Beurteilung von Eluaten aus belasteten Standorten (z.B. Altlasten und Deponien) vorgeschlagen. Diese Vollzugshilfe empfahl die Verwendung einer Reihe von ökotoxikologischen Tests (mit Leuchtbakterien, Algen und Crustaceen) und in einigen Fällen zusätzliche Studien zur Gentoxizität oder chronischen Toxizität. Trotz Aufhebung der Vollzugshilfe wurden und werden ökotoxikologische Tests weiterhin regelmässig in Projekten angewendet, die von kantonalen oder kommunalen Behörden in Auftrag gegeben wurden. Biotests können sehr interessant sein, da sie die Mobilität, Mischung und Bioverfügbarkeit von Chemikalien berücksichtigen und Auskunft über die Gefährlichkeit von Chemikalien für Wasserorganismen geben. Biotests mit Sedimenten können sich auch im Zusammenhang mit belasteten Standorten in Oberflächengewässern als relevant erweisen. Der vorliegende Bericht gibt einen Überblick über ökotoxikologische Methoden, die zur Altlastenbeurteilung eingesetzt werden können, um zu ermitteln, ob und wie diese für eine neue Vollzugshilfe zur AltIV in Frage kommen könnten.

Inhalt

Zusammenfassung	i
1 Einleitung.....	1
2 Ökotoxikologische Beurteilung von Eluaten und wässrigen Matrices	4
2.1 Vollzugshilfe für die Anwendung ökotoxikologischer Tests an Eluaten in der Schweiz....	4
2.2 Einige Studienbeispiele zur ökotoxikologischen Beurteilung von Eluaten in der Schweiz	5
2.3 Überwachung der Wasserqualität in der Schweiz	6
2.4 Überblick über die Anwendung von aquatischen Biotests in Europa	8
3 Ökotoxikologische Beurteilung von belasteten Sedimenten	14
3.1 Überwachung der Sedimentqualität in der Schweiz	14
3.2 Überblick über die Konzepte zum Umgang mit belasteten Sedimenten in Nordamerika und Europa.....	15
3.3 Beispiele für nationale Empfehlungen zu ökotoxikologischen Tests mit Sedimenten in Europa.....	17
3.3.1 Schweden.....	17
3.3.2 Norwegen	17
3.3.3 Belgien.....	18
3.3.4 Niederlande	19
3.3.5 Deutschland.....	19
3.3.6 Frankreich.....	20
4 Schlussfolgerungen zum Potenzial der Anwendung ökotoxikologischer Tests.....	23
5 Bibliographische Referenzen	26
6 Anhang	33

1 Einleitung

Heute gibt es in der Schweiz rund 38'000 belastete Standorte, davon rund 4'000 belastete Standorte, d.h. Standorte, die eine Gefahr für Mensch und Umwelt darstellen können und deshalb über kurz oder lang saniert werden müssen. Zu den belasteten Standorten gehören unter anderem Deponien, Betriebsstandorte, Schiessanlagen oder Unfallstandorte. Von diesen 38'000 Standorten befinden sich rund 8'000 in unmittelbarer Nähe eines Oberflächengewässers (BAFU 2020). Dabei handelt es sich um belastete Standorte oberhalb (ca. 1'200 Deponien), neben (ca. 6'400 Standorte) oder unterhalb (ca. 400 Standorte) eines Gewässers. Diese belasteten Standorte können über das Oberflächenwasser und/oder die Sedimente aquatische Ökosysteme beeinträchtigen. Belastete Standorte können sehr heterogene Schadstoffmischungen aufweisen, wodurch die Interpretation chemischer Analysen manchmal komplex wird, während sich die Analysen auf eine begrenzte Anzahl von Einzelsubstanzen beschränken. Trotz der ständigen Verbesserung der chemischen Methoden und des möglichen Einsatzes semiquantitativer Analysen durch Screening können Bioverfügbarkeit und Mischungseffekte (additive, antagonistische oder synergetische Effekte) mit diesen Ansätzen nur begrenzt evaluiert werden. Darüber hinaus können nicht analysierte Stoffe zu Umweltauswirkungen führen, die mit einem belasteten Standort in Verbindung stehen. Schliesslich beruhen die in der Verordnung über die Sanierung von belasteten Standorten (Altlasten-Verordnung, AltIV, SR 814.680) verfügbaren Sanierungswerte (Konzentrationswerte) und Beurteilungen der Gefährdung auf der Humantoxikologie und eignen sich nicht für die Risikobeurteilung von Einwirkungen auf die Umwelt.

Ökotoxikologische Tests (Biotests) sind Methoden, bei denen lebende Zellen, Organismen oder Gemeinschaften verwendet werden, um die Wirkungen und die Gefährlichkeit von Chemikalien zu beurteilen, denen sie einzeln oder in Mischungen ausgesetzt sind, wie sie in Umweltproben vorkommen. Sie gehören zu den sogenannten «effektbasierten Methoden» («effect-based methods» oder EBM), zu denen Biotests, Biomarker und Bioindikatoren gehören (Connon et al. 2012, Wernersson et al. 2014). Biotests werden nach der biologischen Organisationsebene (von Molekülen bis zum Ökosystem), der Dauer (kurzfristig für die sogenannte akute Toxizität oder langfristig für die sogenannte chronische Toxizität) und der Art der Exposition (im Labor oder im Freiland - *in situ*) klassifiziert. Der Einsatz dieser biologischen Methoden kann sehr interessant sein, da sie die Mobilität und Bioverfügbarkeit von Chemikalien berücksichtigen und Auskunft über ihre Gefährlichkeit für aquatische und benthische Organismen geben. In der Schweiz ist kein Biotest gesetzlich vorgeschrieben, aber ökotoxikologische Tests und/oder Prüfwerte werden in der AltIV¹ und in den Vollzugshilfen «Pflichtenheft für die technische Untersuchung von belasteten Standorten»² (BUWAL 2000), «Anforderungen an die Einleitung von Deponiesickerwasser»³ (Hermanns-Stengele & Moser 2012) und «Belastete Standorte und Oberflächengewässer»⁴ (BAFU 2020) genannt.

Die Altlasten-Verordnung soll im Sinne des Umweltschutzgesetzes (USG, SR 814.01) sicherstellen, dass «belastete Standorte saniert werden, wenn sie zu schädlichen oder lästigen Einwirkungen auf die Umwelt führen oder die konkrete Gefahr besteht, dass solche Einwirkungen entstehen». Gemäss der Gewässerschutzverordnung (GSchV, SR 814.201; Art. 1) sind die Oberflächengewässer und das Grundwasser vor nachteiligen Einwirkungen zu schützen und eine nachhaltige Nutzung der Gewässer zu ermöglichen. Zu den ökologischen Zielen in Anhang 1 (Art. 1(3)) gehört unter anderem, dass «Stoffe, die Gewässer verunreinigen können und die durch

¹ In Anhang 1 der AltIV, Abs. 5: «Auf die Durchführung eines Eluatversuches nach Absatz 2 kann verzichtet werden, wenn die Unter- oder Überschreitung der Konzentrationswerte im Eluat des Materials auf Grund anderer Angaben festgestellt werden kann, wie [...] ökotoxikologische Untersuchungen [...]».

² S. 21 im «Analyseprogramm».

³ S. 20-21 «Ökotoxikologische Beurteilung für das eingeleitete Abwasser. Erfordert es die Beurteilung, sind die Anforderungen an das Deponiesickerwasser zu verschärfen oder zu ergänzen. Von der Forderung des Nachweises kann abgewichen werden, wenn aufgrund der Art der Deponie und des Sickerwassers ausgeschlossen werden kann, dass ökotoxikologisch bedenkliche organische Substanzen vorhanden sind.»

⁴ Über belastete Standorte in einem Gewässer, S. 55 «Sofern notwendig, sind nebst den Untersuchungen der Abfälle und der belasteten Sedimente auch solche zur Gefährdungsabschätzung anrechenbar (z.B. ökotoxikologische Untersuchungen).»

menschliche Tätigkeit ins Wasser gelangen können, ...keine nachteiligen Einwirkungen auf die Lebensgemeinschaften von Pflanzen, Tieren und Mikroorganismen sowie auf die Nutzung der Gewässer haben» dürfen. Eine 1999 vom Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL, heute Bundesamt für Umwelt BAFU) veröffentlichte Vollzugshilfe («Anwendung ökotoxikologischer Testverfahren auf Sickerwasser und Eluate von belasteten Standorten», BUWAL 1999) wurde in den 2000er Jahren von einigen Kantonen verwendet, um das ökotoxikologische Potenzial belasteter Standorte, insbesondere von Deponien, über die Qualität des Sickerwassers, des Grundwassers oder der Oberflächengewässer zu beurteilen. Dieses Dokument legte die Modalitäten für die Implementierung des ökotoxikologischen Ansatzes im allgemeinen Verfahren fest, das durch die AltIV für die Phasen der Untersuchungen, der Überwachung und der Sanierung belasteter Standorte festgelegt ist. Heute ist diese Vollzugshilfe nicht mehr in Kraft, aber das Interesse an der Verwendung ökotoxikologischer Ansätze bei der Beurteilung von Umweltbeeinträchtigungen durch belastete Standorte besteht weiterhin und hat in den letzten Jahren zugenommen.

Zuletzt hat das BAFU im Jahr 2020 eine Vollzugshilfe zu belasteten Standorten in der Nähe von Oberflächengewässern veröffentlicht («Belastete Standorte und Oberflächengewässer», BAFU 2020). Die Publikation hilft bei der konkreten Herleitung, welche belasteten Standorte in, über oder in der Nähe von Oberflächengewässern als belastete Standorte im Sinne der AltIV gelten und welche nicht nach dieser Verordnung beurteilt und saniert werden müssen. Zu diesem Zweck werden belastete Standorte in der Nähe von Oberflächengewässern in drei Kategorien eingeteilt: (i) belastete Standorte an einem Gewässer, (ii) belastete Standorte über einem Gewässer und (iii) belastete Standorte in einem Gewässer. Für jede dieser Kategorien gibt die Vollzugshilfe an, ob und wie die Standorte gemäss den Bestimmungen der AltIV untersucht, beurteilt und gegebenenfalls saniert werden müssen.

Da Oberflächengewässer Wasser und Sedimente umfassen, können letztere auch zur Gefahr beitragen, die von einem belasteten Standort in der Nähe von Oberflächengewässern ausgeht. Die Untersuchungen, ob ein belasteter Standort schädliche oder lästige Einwirkungen auf das Oberflächenwasser verursachen kann, können daher sowohl die wässrigen Phasen - z. B. Eluate⁵, Sickerwasser⁶, oder Oberflächengewässer - als auch die Sedimente einbeziehen. Während die Vollzugshilfe «Belastete Standorte und Oberflächengewässer» die Notwendigkeit ökotoxikologischer Bewertungen anerkennt, wird nicht im Detail festgelegt, ob die Bewertung auf der Grundlage eines chemischen Ansatzes (und dem Vergleich mit Umweltqualitätskriterien auf der Grundlage ökotoxikologischer Effekte) ausreicht, oder ob zusätzliche Instrumente wie Biotests erforderlich sind, um die Unsicherheit bei der Bewertung und Verfügung von Massnahmen zu verringern, sei es für gelöste Schadstoffe in wässrigen Phasen oder für kontaminierte Sedimente.

Ziel des vorliegenden Berichts ist es daher, einen Überblick und eine Aktualisierung der verfügbaren ökotoxikologischen Instrumente für die Beurteilung der Einwirkung auf die Umwelt von belasteten Standorten im Zusammenhang mit der Qualität von Oberflächengewässern zu geben. Das Hauptziel ist die Herleitung, ob und welche ökotoxikologischen Tests nützlich sein können, um:

- i. die Toxizität eines belasteten Standorts und die Gefahr, die er für die Ökosysteme darstellt, zu beurteilen
- ii. den Sanierungsbedarf eines belasteten Standorts zu beurteilen,
- iii. die zeitliche Entwicklung der toxischen Auswirkungen einer Verschmutzung auf ein Ökosystem zu überwachen
- iv. die Toxizitätsniveaus stromabwärts eines belasteten Standorts im Vergleich zu stromaufwärts, und ob der Unterschied für Massnahmen am belasteten Standort relevant ist, zu bestimmen

⁵ «Im Rahmen eines im Labor durchgeführten Säulenversuchs resultiert beim Durchströmen von Wasser durch Feststoffproben vom untersuchten Standort eine wässrige Probe» (BUWAL 1999).

⁶ «Wasser, das sich beim Versickern durch einen belasteten Standort hindurch mit Schadstoffen anreichern kann. Sickerwasser kann unter gewissen Umständen als Eluat betrachtet werden» (BUWAL 1999).

- v. die Ziele der Sanierung festzulegen und
- vi. die Wirksamkeit der Sanierungsmassnahmen zu beurteilen.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurde eine Übersicht über die Literatur und die von anderen Ländern angewandten Methoden erstellt. Die Zusammenfassung dieses Überblicks sollte es ermöglichen, die Fälle zu identifizieren, in denen ökotoxikologische Tests relevant sind, und in welcher Phase oder in welchen Phasen der Untersuchungen sie durchgeführt werden sollten.

Aufgrund der begrenzten Ressourcen für das Projekt konzentrierte sich die Literaturrecherche auf nationale und internationale Regulierungsansätze und -rahmen, während die wissenschaftliche Literatur nicht umfassend geprüft wurde und nur einige Beispiele angeführt werden. Dennoch stellt es eine Wissensgrundlage dar, die es später ermöglichen wird, die Grenzen, Vor- und Nachteile der verschiedenen Tests ausführlicher zu behandeln und einen Interpretationsrahmen im Hinblick auf Qualitätskriterien für Wasser und Sedimente und die Werte aus der AltIV vorzuschlagen. Ziel ist es, die ökotoxikologischen Tests als eine Hilfe zur Verfügung zu stellen, die den in der AltIV entwickelten Ansatz, der auf chemischen Analysen beruht, ergänzt.

Entsprechend der derzeitigen Praxis und den verfügbaren Grundlagen ist der vorliegende Bericht wie folgt aufgebaut: In einem ersten Teil werden ökotoxikologische Ansätze für Eluate und wässrige Phasen von belasteten Standorten und Abfällen sowie die verfügbaren Instrumente aus dem Biomonitoring erläutert. In einem zweiten Teil wird die Untersuchung der Qualität von Sedimenten in der Schweiz vorgestellt, gefolgt von Konzepten für den Umgang mit schadstoffbelasteten Sedimenten in Nordamerika und Europa. In den Schlussfolgerungen werden ökotoxikologische Ansätze und Tests vorgeschlagen, die in den verschiedenen Phasen der Behandlung belasteter Standorte angewendet werden sollten, sowie zukünftige Arbeiten, die in Betracht gezogen werden sollten.

2 Ökotoxikologische Beurteilung von Eluaten und wässrigen Matrices

Im Sinne der AltIV können an einem belasteten Standort verschiedene Arten von Wasserproben entnommen werden. Man unterscheidet zwischen Emissionen - d.h. Sickerwasser, Eluat, Oberflächenabfluss oder Stauwasser, das von einem belasteten Standort in die Umwelt gelangt - und Immissionen, d.h. Proben, die die Einwirkung auf Schutzgüter widerspiegeln. Im letzteren Fall geht es um die Beurteilung der Qualität von Oberflächengewässern, die Emissionen von Altlasten aufnehmen.

2.1 Vollzugshilfe für die Anwendung ökotoxikologischer Tests an Eluaten in der Schweiz

Im Jahr 1999, ein Jahr nach Inkrafttreten der Altlasten-Verordnung (AltIV), wurde eine Vollzugshilfe mit dem Titel «Anwendung ökotoxikologischer Testverfahren auf Sickerwasser und Eluate von belasteten Standorten» veröffentlicht, die bei der Abschätzung der Gefährdung aquatischer Ökosysteme durch Altlasten helfen sollte (BUWAL 1999). Die Vollzugshilfe wurde von Kristen Becker van Slooten, Dominique Rossel und Joseph Tarradellas, Forschende in der Gruppe «Gestion des écosystèmes – écotoxicologie» am «Institut de l'aménagement des terres et des eaux» der ETH Lausanne, mit Unterstützung der Kantone Bern, Freiburg, Genf, Jura, Tessin, Waadt und Wallis, des BUWAL und von Ingenieurbüros verfasst. Die Erstellung des Dokuments wurde vom BUWAL und der «Commission intercantonale romande pour le traitement des déchets» (CIRTD) unterstützt.

Ziel war es, ein Arbeitsinstrument für eine «einfache, sachgerechte und angemessene Umsetzung der Altlasten-Verordnung (AltIV)» zu empfehlen, um Umweltgefährdungen zu beurteilen. Der vorgeschlagene Ansatz und die Wahl der Biotests basierten auf früheren Erfahrungen mit mehreren belasteten Standorten in der Schweiz (Arrizabalaga 1997) sowie auf Studien aus benachbarten Ländern (Scheibel et al. 1991, Clément 1994, Clément et al. 1996, Clément et al. 1997). Die Ökotoxikologie wurde damals aufgrund mehrerer positiver Aspekte gegenüber der alleinigen chemischen Analyse hervorgehoben, nämlich die Erfassung von Auswirkungen von Mischungen mehrerer Stoffe, von unbekannten Stoffen, teure und/oder komplexe Analysen sowie die Einbeziehung der Bioverfügbarkeit, der Mobilität und des Verhaltens der Substanzen. Im Zusammenhang mit der Sanierung von Altlasten stand die Kostenoptimierung ebenfalls im Vordergrund. Laut Vollzugshilfe trägt der Einsatz von ökotoxikologischen Tests zu «einem angemessenen Schutz der Ökosysteme in der Schweiz mit möglichst geringen Kosten» bei. Aufgrund der raschen Entwicklung der (bio-)analytischen Techniken sei jedoch eine weitere, eingehendere Studie zu den Kosten der verschiedenen Ansätze erforderlich.

Die in der Vollzugshilfe vorgeschlagene Batterie ökotoxikologischer *In-vivo-Tests* umfasste einen Lumineszenzhemmtest mit Bakterien (z.B. *Aliivibrio fischeri*) (ISO 2007a), einen Wachstumshemmtest mit Grünalgen (*Raphidocelis subcapitata*) (ISO 2012a) und einen Mortalitätstest mit Crustaceen (*Daphnia magna*) (ISO 2012b). Diese Tests sind heute alle standardisiert und werden weiterhin verwendet. Die Empfehlung dieser Testbatterie war mit der Empfehlung verbunden, weitere Tests zu verwenden, insbesondere wenn mit der Basis-Testreihe keine Effekte nachgewiesen wurden, obwohl das Vorhandensein ökotoxischer Stoffe vermutet wurde. «Bei der Wahl der Tests ist bewusst eine gewisse Freiheit zuzulassen». Je nach Testergebnis wurden die Proben als «nicht toxisch», «mitteltoxisch» oder «stark toxisch» eingestuft (BUWAL 1999).

Die ökotoxikologische Beurteilung wird auch heute noch bei der Einleitung von Deponiesickerwasser in der Vollzugshilfe «Anforderungen an die Einleitung von Deponiesickerwasser» des BAFU aus dem Jahr 2012 empfohlen (Hermanns-Stengele & Moser 2012). Darin wird festgestellt, dass die ökotoxikologische Beurteilung aufzeigt, «ob der Zustand des Gewässers eine Anpassung der Anforderungen an die Einleitung von Deponiesickerwasser erfordert». Es werden jedoch keine konkreten Biotests oder Verfahren vorgeschlagen, da «die Entwicklung der Testver-

fahren nicht abgeschlossen ist». Es wird darauf hingewiesen, dass man sich an Spezialisten wenden soll, die mit den neuesten Entwicklungen vertraut sind, wie das Oekotoxzentrum. Weiter heisst es: «Wenn bei Deponiesickerwasser ökotoxikologisch nachteilige Auswirkungen festgestellt werden können, sollte nach Möglichkeit abgeklärt werden, welche Stoffe dafür verantwortlich sind.» (Hermanns-Stengele & Moser 2012).

2.2 Einige Studienbeispiele zur ökotoxikologischen Beurteilung von Eluaten in der Schweiz

Seit der Veröffentlichung der Vollzugshilfe im Jahr 1999 wurden in der Schweiz mehrere ökotoxikologische Studien mit Eluaten durchgeführt, die diese Tests beinhalten, welche je nach Fortschritt der Entwicklungen in diesem Bereich mit zusätzlichen Tests (chronische Toxizität, spezifische Wirkungsweisen) ergänzt wurden. Einige Beispiele sind unten aufgelistet:

- In den Jahren 2001 und 2003 wurde die Qualität des Sickerwassers einer Deponie im Kanton Waadt aus physikalisch-chemischer und ökotoxikologischer Sicht untersucht (Santiago 2004). Die drei ökotoxikologischen Tests der Vollzugshilfe wurden auf das Eluat (Zustrom und Abstrom der Deponie) und auf Grundwasserproben aus Piezometern unterhalb der Deponie und aus dem Aquifer angewendet. Es zeigte sich eine erhebliche chronische Toxizität des Grundwassers auf Grünalgen. Nach dem Klassifizierungssystem der Vollzugshilfe wurde das Wasser des lokalen Grundwasserleiters als stark toxisch eingestuft, was insgesamt gut mit den Informationen aus den chemischen Analysen übereinstimmte, insbesondere im Hinblick auf die Konzentrationen von Zink und adsorbierbaren organischen Halogenverbindungen (AOX). Das ökotoxikologische Potenzial des Wassers des Aquifers, das dem Verdünnungsgrad entspricht, der nach der Immission erforderlich wäre, um die Grenzwerte im aufnehmenden Gewässer einzuhalten, war bei den Biotests am höchsten. Unseres Wissens wurden keine ökotoxikologischen Studien im Bach unterhalb der Deponie durchgeführt, obwohl dies Aufschluss über die ökotoxikologischen Auswirkungen des belasteten Standorts auf die Oberflächengewässer unterhalb der Deponie hätte geben können.
- Im Jahr 2009 wurde in einem Bericht des Oekotoxzentrums mit Soluval Santiago eine ökotoxikologische Beurteilung von Eluaten einer Mülldeponie mit mehreren ökotoxikologischen Tests durchgeführt. Angewendet wurden ein kombinierter Toxizitätstest mit der Grünalge *R. subcapitata* (Hemmung der Photosynthese und des Wachstums, wird derzeit standardisiert), ein akuter Toxizitätstest mit einem Amphipoden (*Gammarus fossarum*) sowie ein chronischer Test zur Hemmung der Fortpflanzung mit einer anderen Daphnienart (*Ceriodaphnia dubia*) (ISO 2008a) (Kienle et al. 2009). Dabei wurden keine toxischen Effekte beobachtet, was zeigt, dass keine Einwirkung auf das aquatische Ökosystem bezüglich der betrachteten Effekte zu erwarten ist.
- Im Jahr 2010 wurde das ökotoxikologische Potenzial von Eluaten aus mehreren Deponien anhand der drei Tests der Vollzugshilfe mit Leuchtbakterien, Algen und Daphnien beurteilt (unveröffentlichte Ergebnisse). Die Ergebnisse der ökotoxikologischen Tests zeigten eine Toxizität in den unverdünnten Proben, die jedoch bereits bei geringen Verdünnungen nicht mehr messbar war. Eine der Schlussfolgerungen lautete, dass diese Ergebnisse jedoch im Hinblick auf eine chronische Exposition interpretiert werden sollten. Es wurde empfohlen, spezifische und chronische Biotests anzuwenden, die jedoch nur als ergänzende Ergebnisse zu den chemischen Analysen verstanden werden sollten.
- Im Jahr 2015 wurde das ökotoxikologische Potenzial von Eluaten aus drei Deponien beurteilt, und zwar anhand des Lumineszenzhemmtests mit dem Bakterium *A. fischeri*, dem kombinierten Algentest, dem Daphnientest und Tests mit spezifischen Wirkungsmechanismen: Messung der östrogenen Aktivität im «Yeast Estrogen Screen» (YES) (ISO 2018a), der androgenen Aktivität im «Yeast Androgen Screen» (YAS) und der Mutagenität im Ames-Fluktuationstest (ISO 2005a). Das Oekotoxzentrum hatte den kombinierten Algentest durchgeführt, der keine ökotoxikologische Wirkung zeigte.

- Im Jahr 2023 befasste sich eine vom BAFU in Auftrag gegebene Studie des Expertenbüros bafob GmbH und des Oekotoxizentrums mit hormonaktiven Stoffen in flüssigen Kunststoffen, die in Bauprodukten verwendet werden und schliesslich auf Deponien landen (Dilmi et al. 2023). Für die ökotoxikologische Beurteilung wurden mehrere Biotests mit Leuchtbakterien, Algen und Daphnien verwendet, zusätzlich zu spezifischen *In-vitro*-Tests wie dem umu-Gen-toxizitätstest (ISO 2000a) und der östrogenen Aktivität (ER α -CALUX^{®7}) (ISO 2018b, OECD 2021). Die Beurteilung ergab eine hohe Eluatoxizität und besorgniserregende Ergebnisse für die Entsorgung von epoxidharzhaltigem Bauschutt auf Deponien des Typs B.
- Derzeit läuft am Oekotoxizentrum ein Projekt zur Risikobeurteilung einer Deponie, bei den neuen Methoden getestet werden. So wurde ein Panel von neun CALUX[®] *In-vitro*-Tests zur Beurteilung der Zelltoxizität, des Schadstoffmetabolismus, des oxidativen Stresses, der östrogenen und antiandrogenen Aktivität, der Genotoxizität und des Vorhandenseins von Per- und polyfluorierten Alkylverbindungen (PFAS) (Veränderung des Schilddrüsenstoffwechsels) oder polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) (binden spezifisch an den Aryl-Hydrocarbon-Rezeptor, AhR) in menschlichen Zellen eingesetzt (van der Burg et al. 2013). Darüber hinaus wurde ein Test an Fischembryonen (Entwicklung und Überleben) (OECD 2013) durchgeführt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die in der Vollzugshilfe von 1999 empfohlene ökotoxikologische Testbatterie nach und nach durch bzw. mit Tests zur chronischen Toxizität, mit denen die längerfristigen Auswirkungen einer Kontamination untersucht werden können (z. B. Reproduktionstest mit *C. dubia*), und Tests mit spezifischen Wirkmechanismen (z. B. umu-Gen-toxizitätstest) ersetzt oder ergänzt wurde. Einzelne dieser zusätzlichen Tests waren bereits in Anhang 3 der Vollzugshilfe von 1999 aufgelistet. Darüber hinaus können die oben erwähnten *In-vitro*-Biotests, wie z.B. CALUX[®]-Tests zur Erfassung verschiedener spezifischer Wirkungen und der Fischembryotest weitere wichtige Stoffgruppen und Wirkungen erfassen.

2.3 Überwachung der Wasserqualität in der Schweiz

In der Schweiz wurden die ökotoxikologischen Ansätze für Eluate aus der Vollzugshilfe von 1999 ab Anfang der 2000er Jahre auch auf Umweltproben angewendet, insbesondere im Rahmen einer Arbeitsgruppe der Internationalen Gewässerschutzkommission für den Genfersee, die 2002 einen Leitfaden veröffentlichte (Santiago et al. 2002). Später wurde im OSPAR-Übereinkommen (OSPAR 1992), dem auch die Schweiz angehört, die WEA für «whole effluent assessment» oder ganzheitliche Beurteilung von Abwässern entwickelt (OSPAR 2007).

Im Jahr 2015 wurde am Oekotoxizentrum eine Übersicht über die verfügbaren aquatischen Biotests zur Beurteilung der Wasserqualität erarbeitet und in einem Expertenbericht veröffentlicht (Kienle et al. 2015a) mit dem Ziel, die Ökotoxikologie in das Modul-Stufen-Konzept zu integrieren (<https://modul-stufen-konzept.ch/fr/modul-stufen-konzept/>). Um geeignete Biotests auszuwählen, wurden eine Literaturrecherche, eine Expertenbefragung und ein Expertenworkshop durchgeführt. Ziel dieser Arbeiten war es, die relevantesten biologischen Wirkungsmechanismen von Umweltschadstoffen und die Biotests zur Messung dieser Effekte zu identifizieren. Für die Beurteilung der Biotests wurden mehrere Kriterien festgelegt, wie z. B.: (i) Anwendbarkeit auf Umweltproben, (ii) Empfindlichkeit, (iii) Robustheit, (iv) Grad der Validierung/Standardisierung, (v) Kosteneffizienz und gute Anwendbarkeit in der Routine, (vi) Anwendbarkeit in (kantonalen) Gewässerschutz- und Privatlaboren. Darüber hinaus wurden die Interpretierbarkeit (z. B. Kann der Test zwischen akzeptablen und inakzeptablen Bedingungen auf wissenschaftliche und rechtsgültige Weise entscheiden?), die Relevanz (z. B. Kann eine Verbindung zu negativen Effekten auf anderen biologischen Organisationsebenen hergestellt werden?) und die Vorhersageeigenschaften (z. B. Ermöglicht der Test Rückschlüsse auf Effekte, bevor schwere Schädigungen auftreten)

⁷ CALUX-Tests für «Chemically Activated Luciferase gene eXpression» sind ökotoxikologische Tests auf der Grundlage von Biolumineszenz, die auf Zellen beruhen, die so verändert wurden, dass sie ein Luciferase-Gen exprimieren, wenn eine spezifische Chemikalie an einen spezifischen Rezeptor bindet, z. B. intrazelluläre Östrogenrezeptoren für den Test ER-CALUX[®].

(Frühwarnsystem)?) berücksichtigt. In der Folge wurde eine zusammenfassende Beurteilung der Wasserqualität in mit Abwasser belasteten Flüssen mithilfe ökotoxikologischer Biotests vorgeschlagen, die zunächst den kombinierten Algentest und einen Test zur Beurteilung von Stoffen mit östrogenen Aktivität umfassen (Kienle et al. 2015b, Kienle et al. 2015c). Methoden, die für die Beurteilung der Abwasserqualität und der Qualität von Oberflächengewässern als geeignet angesehen werden, sind im Prinzip auch für die Beurteilung von Eluaten aus Deponien geeignet.

Im Folgenden sind mehrere Beispiele für Projekte aufgelistet, die am Ökotoxzentrum durchgeführt wurden oder an denen das Ökotoxzentrum beteiligt war und die sich mit dem Einsatz von ökotoxikologischen Tests in verschiedenen Kontexten befassen, wie z. B. der Überwachung der Auswirkungen von Abwasserreinigungsanlagen, dem Biomonitoring oder der Qualität von Karstgewässern:

- Die ersten Arbeiten betrafen die Beurteilung der Abwasserqualität und von weitergehenden Abwasserreinigungsmethoden mit mehreren Studien in den letzten 18 Jahren (Abegglen et al. 2009, Stalter et al. 2010, Bundschuh et al. 2011, Kienle et al. 2011, Margot et al. 2013, Schindler Wildhaber et al. 2015, Völker et al. 2019, Kienle et al. 2022). Insbesondere wurden ökotoxikologische Tests durchgeführt, um die Veränderungen der Wasserqualität nach der Ozonung und/oder Behandlung des Abwassers mit Aktivkohle zu quantifizieren. Dabei handelte es sich sowohl um *In-vitro* Biotests zum Nachweis endokriner, genotoxischer und mutagener Effekte sowie der Toxizität für Grünalgen und Bakterien als auch um *In-vivo*-Biotests unter Verwendung von Wirbellosen wie Oligochaeten (Wenigborster), Daphnien, Bachflohkrebsen und den frühen Lebensstadien der Regenbogenforelle. Die Ergebnisse der Biotests haben gezeigt, dass weitergehende Reinigungsmethoden ein breites Spektrum an Mikroverunreinigungen und damit verbundenen Effekten zu mehr als 80 % eliminieren können. Um das Risiko des Eintrags toxischer und biologisch abbaubarer Transformationsprodukte in die Gewässer zu verringern, sollte der Ozonung immer eine Stufe mit biologischer Aktivität folgen, z. B. ein Sandfilter oder eine Behandlung mit Aktivkohle (Kienle et al. 2015b, Kienle et al. 2022). Auf der Grundlage dieser Studien wurde von der Eawag und dem Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (VSA) ein Ozon-Testverfahren entwickelt (Schindler Wildhaber et al. 2015, Wunderlin et al. 2015). Mit diesem Testverfahren kann beurteilt werden, ob ein Abwasser für die Ozonung geeignet ist. Dieses Verfahren muss heute von allen Betreibern von Abwasserreinigungsanlagen angewendet werden, die diese weitergehende Reinigungsmethode für ihr Abwasser in Betracht ziehen (Grelot et al. 2020). Im Rahmen dieser Beurteilung liefern die Biotests wichtige Informationen für die Entscheidung, ob eine Ozonung eingesetzt werden kann oder nicht.
- Ebenfalls im Abwasserbereich wurden im Rahmen des Eawag-Projekts «EcoImpact» ökotoxikologische Tests zur Beurteilung der Wasserqualität im Zustrom und Abstrom von Abwasserreinigungsanlagen in kleinen bis mittelgrossen Fließgewässern angewendet (Kienle et al. 2015c, Kienle et al. 2019). Des Weiteren startete im Jahr 2024 ein vom Kanton Solothurn in Auftrag gegebenes Projekt mit dem Ziel, die Effizienz der Abwasserreinigungsanlage Falkenstein vor und nach ihrer Erweiterung anhand von ökotoxikologischen Tests mit Abwasserproben und Wasserproben aus der Dünnern zu überprüfen (Kienle et al. 2024).
- Neuerdings wird eine automatisierte Überwachung der Qualität von kommunalem und industriellem Wasser mithilfe von Wasserorganismen getestet. Eingesetzt werden Algen (*Chlorella vulgaris* im Algae Toximeter, <http://www.bbe-moldaenke.de>), Wasserflöhe (*D. magna* im DaphTox II, www.bbe-moldaenke.de) und Amphipoden (*Gammarus pulex* im Sensaguard, www.remondis-aqua.com/). Diese Testsysteme könnten als Frühwarnsignale für Veränderungen in der Abwasserzusammensetzung eingesetzt werden, wenn möglich auch parallel zur chemischen Analyse (online oder in Mischproben) (Kizgin et al. 2023, Kizgin et al. 2024).
- Beim im Jahr 2017 veröffentlichten Projekt «Kartox» wurde die Ökotoxizität von Stichproben aus sechs Karstwasserquellen mittels ökotoxikologischer Tests *in vitro* (sechs CALUX®-Tests), und *in vivo* (*A. fischeri*, *D. magna*, *C. dubia*, *R. subcapitata*, Wasserlinse *Lemna minor* (ISO 2005b) und Rädertier *Brachionus calyciflorus* (ISO 2008b)) beurteilt (Ferrari et al. 2017).

Ausserdem sollten Empfehlungen für den möglichen Einsatz von Biotests als Ergänzung zu physikalisch-chemischen Charakterisierungsansätzen bei der Beurteilung von mit Abfällen belasteten Standorten, die sich in Karstgebieten befinden, gegeben werden.

- Ökotoxikologische Tests wurden auch in mehreren Projekten zur Überwachung der Qualität kleiner Fliessgewässer angewandt. Im Jahr 2021 wurde eine Batterie von 15 *In-vitro*- und *In-vivo*-Tests, die grösstenteils standardisiert waren, auf 15 Oberflächenwasserproben angewendet, die an extensiv, landwirtschaftlich oder landwirtschaftlich und städtisch genutzten Standorten entnommen worden waren. Die Biotests mit den meisten Überschreitungen von effektbasierten Schwellenwerten waren mehrere CALUX®-Tests mit Reporterorganen, ebenso wie der kombinierte Algentest (Parameter Wachstumshemmung) und die akuten Toxizitätstests mit Fischembryonen und einer Fischzelllinie (Kienle et al. 2023a, Kienle et al. 2023b). Ausserdem wurden Biomarker in Bachforellen analysiert, die im Freiland gefangen wurden (Voisin et al. 2023). Im Anschluss an dieses Pilotprojekt wurden zwei Projekte in den Kantonen Genf (Ruisseau des Marais) und Bern (La Suze) in Flüssen durchgeführt, die unter einem Rückgang der Fischpopulationen leiden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die verschiedenen oben genannten Projekte gezeigt haben, dass ökotoxikologische Tests die chemischen Analysen ergänzen, indem sie insbesondere die Erkennung von Stellen mit Einwirkung auf das aquatische Ökosystem verbessern oder als Frühwarnsignal fungieren. Bei der Zusammenstellung einer Biotestbatterie sollte die Auswahl der Biotests an den Zweck der Studie angepasst werden. Im Allgemeinen sollte jedoch versucht werden, das Vorhandensein von mindestens drei verschiedenen trophischen Ebenen, einem Primärproduzenten, einem Primär- und einem Sekundärkonsumenten, sowie spezifische Effekte, die der erwarteten Verschmutzung an den Standorten angepasst sind, zu überprüfen. Bisher werden aquatische Biotests in der Schweiz regelmässig bei der Einführung von Ozonierungssystemen in Abwasserreinigungsanlagen und zunehmend auch bei der Überwachung der Oberflächenwasserqualität durch die Kantone eingesetzt.

2.4 Überblick über die Anwendung von aquatischen Biotests in Europa

In Europa wird die ökotoxikologische Beurteilung von Eluaten anhand von Biotestbatterien durchgeführt, die den in der Vollzugshilfe der Schweiz von 1999 empfohlenen ähneln. Beispielsweise werden im Rahmen der europäischen Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle (EC 2008) fünfzehn HP-Kriterien (HP = hazardous properties) angewendet, um zu entscheiden, ob ein Abfall gefährlich oder nicht gefährlich ist. Das Kriterium HP14 (ökotoxisch) bezeichnet «Abfälle, die unmittelbare oder mittelbare Gefahren für einen oder mehrere Umweltbereiche darstellen oder darstellen können» und beinhaltet die Durchführung von ökotoxikologischen Tests an Eluaten mit dem Lumineszenzhemmtest an Bakterien, dem Algenwachstumshemmtest, dem akuten Toxizitätstest an Daphnien, und dem chronischen Reproduktionstest an Ceriodaphnien oder Rädertieren. Eine einzige toxische Antwort reicht aus, um den Abfall als ökotoxisch einzustufen (UBA 2013).

In Deutschland wurde diese Richtlinie 2002 in Gesetze umgesetzt (UBA 2013). Eine umfangreiche Literaturrecherche hatte zur Auswahl ökotoxikologischer Tests und zur Ableitung von Toxizitätsschwellenwerten geführt (LUBW 2004a, b). Ausserdem wurde ein internationaler Ringversuch durchgeführt (Becker et al. 2007). Ebenfalls in Deutschland wurde die Anwendung ökotoxikologischer Tests auf Grundwasser im Rahmen der Überwachung belasteter Standorte vom Typ Deponie in mehreren Bundesländern und in verschiedenen Arbeitsgruppen, z. B. in Hessen, diskutiert (HLUG 2014). Der aus diesen Arbeiten hervorgegangene Leitfaden kann sich in einigen Fällen als nützlich erweisen, allerdings war zum Zeitpunkt der Veröffentlichung nicht vorgesehen, dass ökotoxikologische Tests in das Verfahren der Altlastenbearbeitung integriert werden.

In den Niederlanden werden die Empfehlungen für Testbatterien – *in vivo*, aber innovativ auch *in vitro* – nicht nur auf Eluate und Grundwasser, sondern auch auf Oberflächengewässer ausgedehnt (Abb. 1). Ausführliche Informationen sind mit Informationsblättern auf der Website

der Stiftung für angewandte Forschung in der Wasserwirtschaft (STOWA) verfügbar (www.sleutelfactortoxiciteit.nl/verdieping/werken-met-het-bioassayspoor/aan-de-slag-met-standaard-bioassays-gevoelig-en-algemeen) (Pronk et al. 2021). In den Vorschriften sind derzeit (noch) keine Biotests implementiert, die Diskussionen werden jedoch im Rahmen des Projekts « Effect Based Monitoring » (EBM) der « Global Water Research Coalition » (GWRC) weitergeführt.

Test Battery	Water Type	Bioassays
Minimal (e.g. no laboratory access)	All	Bacterial toxicity
Practical	Wastewater/ recycled water	ER, Oxidative Stress, AhR
Practical + DBP	Drinking water	ER, Oxidative Stress, Mutagenicity/genotoxicity, AhR
Comprehensive	All	ER, AR, GR, PR
		Oxidative Stress, p53, NF-κB
		AhR, PPAR, PXR
		Fish embryo toxicity, Daphnia immobilization, Algal growth inhibition

xenobiotic metabolism; hormone receptor-mediated effects; adaptive stress responses; apical effects
 AhR: aryl hydrocarbon receptor; AR: androgen receptor; ER: estrogen receptor; GR: glucocorticoid receptor;
 PPAR: peroxisome proliferator-activated receptor; PXR: pregnane X receptor; PR: progesterone receptor

Abbildung 1 : Vom GWRC empfohlene Verfahren zur Überwachung mittels Biotests für Abwasser («wastewater»), Oberflächengewässer («recycled water») und Trinkwasser («drinking water»), sowie ein zusätzliches Set von Biotests («all») (Pronk et al. 2021).

Im Zusammenhang mit der Überwachung von Oberflächengewässern unter der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) (EC 2000) wurde der Einsatz von Biotests mehrfach diskutiert und war Gegenstand mehrerer technischer Berichte auf europäischer Ebene (Carere et al. 2021) oder in den Mitgliedsländern (z.B. in Frankreich (Manier et al. 2023)). Im europäischen Dokument wurde das Potenzial effektbasierter Methoden im Rahmen der Überwachung hervorgehoben. Sie können beispielsweise eingesetzt werden um eine Rangfolge der Wasserkörper zu erstellen, die genauer untersucht werden sollen. Sie können zudem als Frühwarnsysteme für Standorte dienen, die weit entfernt von lokalen Quellen liegen und grundsätzlich als risikofrei gelten. Sie können auch im Rahmen von Untersuchungen eingesetzt werden, um unbekannte Mischungen oder Chemikalien zu berücksichtigen und generell die Beurteilung der Wasserqualität (und der Sedimente) zusätzlich zu unterstützen (Carere et al. 2021).

In Frankreich wurde kürzlich ein detailliertes Verzeichnis und eine Beurteilung ökotoxikologischer Methoden veröffentlicht, um sie im Rahmen der Wasserrahmenrichtlinie zu verwenden (Manier et al. 2023). Auf zwölf Seiten werden über 60 aquatische Biotests (allgemeine oder spezifische Toxizität) und 13 *in-situ* Tests (z. B. Exposition von Amphipoden (*G. fossarum*) in Käfigen direkt im Fließgewässer (AFNOR 2023)) oder kontinuierliches Biomonitoring aufgelistet (par ex. ToxMate Lab, www.toxmate.fr/). Der im Jahr 2015 veröffentlichte und oben zitierte Synthesebericht des Oekotoxizentrums (Kienle et al. 2015a) hat sich als solide Wissensgrundlage für diese Bestandsaufnahme, aber auch für die Beurteilung und Einstufung der Tests nach ähnlichen Kriterien erwiesen. Im Einzelnen umfassten die für das Ranking der Tests herangezogenen Kriterien neun wissenschaftliche Kriterien (z. B. Spezifität der Reaktion, Standardisierung, Anwendbarkeit, ökologische Relevanz, Interpretation usw.) und sieben technisch-ökonomische Kriterien (Hälterung der Testorganisation, Kosten, erforderliche Kompetenzen usw.). Die Einstufung der Biotests erfolgte für zwei Anwendungsszenarien im Zusammenhang mit den Zielen der WRRL: (i) «Beur-

teilung der Qualität von Abwässern, Auswirkungen von Einleitungen auf das aufnehmende Gewässer» und (ii) «Allgemeine Überwachung der Qualität von Oberflächengewässern».

In Bezug auf Szenario i. empfiehlt der Bericht einen abgestuften Ansatz für die Durchführung von Biotests für allgemeine Toxizität und endokrine Aktivität. So wird für die Erfassung allgemeiner Ökotoxizität vorgeschlagen, in zwei Phasen zu arbeiten:

- Phase 1: Die Berücksichtigung von Biotests, die Auskunft über die akute Ökotoxizität der zu testende Matrix für mindestens 2 trophische Kompartimente geben (z. B. Primärproduzent *L. minor* und Primärverbraucher *D. magna*).
- Phase 2: Abhängig von der beobachteten Ökotoxizität werden Tests durchgeführt, die Aufschluss über die chronische Ökotoxizität für mindestens 2 trophische Kompartimente geben (z. B. Grünalgenwachstumstest und chronische Toxizität auf das Rädertier *B. calyciflorus*).

Bezüglich des Szenarios ii, das in der folgenden Abbildung dargestellt ist, empfiehlt der Bericht die Verwendung von Biotests zur allgemeinen chronischen Toxizität in Verbindung mit Biotests, die Auskunft über eine spezifische Toxizität geben (Abb. 2). Anders als bei der Beurteilung von Einleitungen gibt es hier keine akuten Toxizitätstests. Die Auswahl spezifischer Biotests muss von Fall zu Fall und je nach Fortschritt der Entwicklung und Standardisierung neuer Methoden angepasst werden.

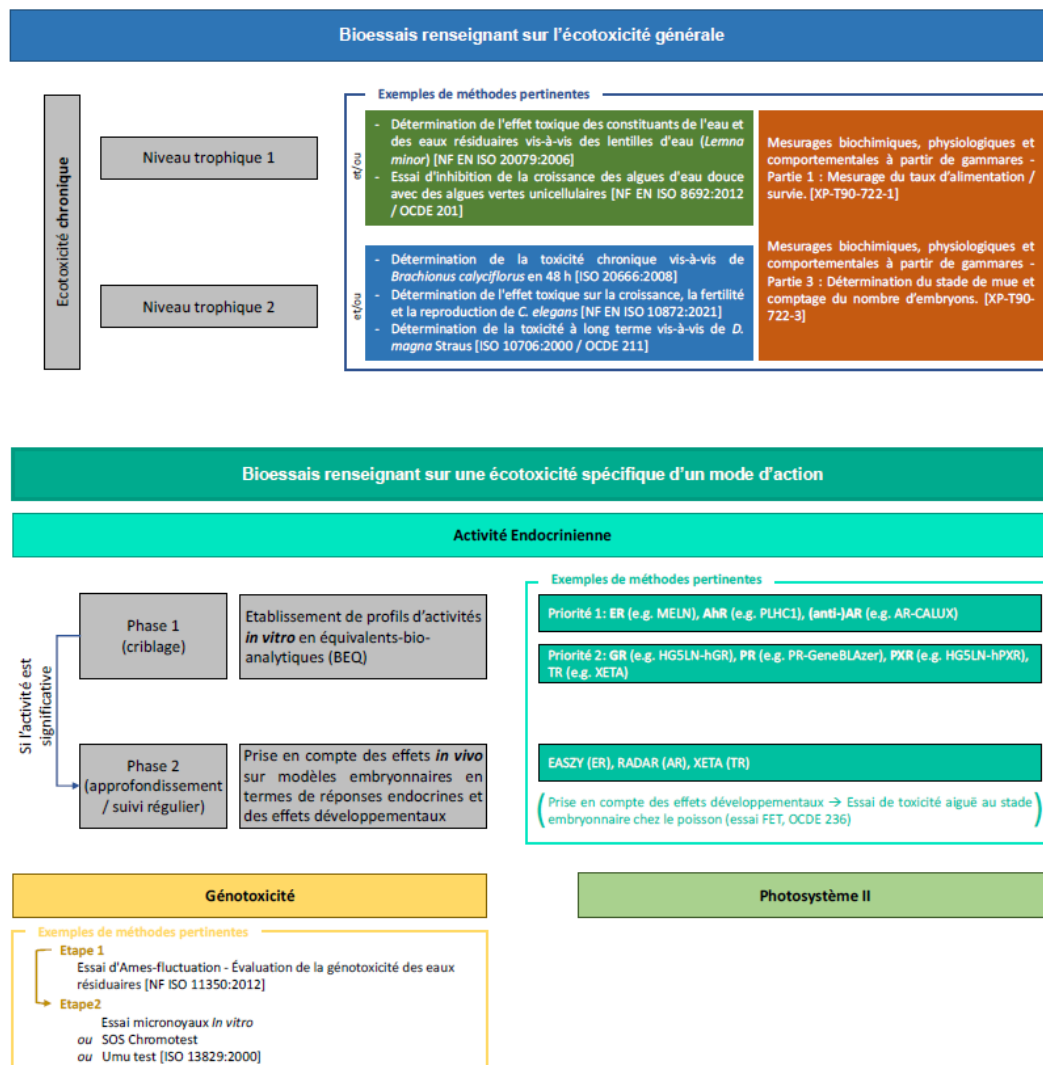


Abbildung 2: Struktur der Biotestbatterie und Beispiele für mögliche Tests, anwendbar auf Szenario ii. « Allgemeine Überwachung der Qualität von Oberflächengewässern » (Manier et al. 2023).

Als Beweis für das Interesse und den Bedarf an effektbasierten Methoden sieht ein Vorschlag zur Änderung der Wasserrahmenrichtlinie, der Grundwasserrichtlinie und der Richtlinie über Umweltqualitätsnormen, der derzeit von der Europäischen Kommission entworfen wird, reduzierte Wasserqualitätskriterien für Steroidöstrogene wie 17 β -Estradiol vor und erwähnt auch die Verwendung von *In-vitro-Biotests* zur Messung der Aktivität dieser Verbindungen (EC 2022).

Im Rahmen der Abfallvorschriften ist die ökotoxikologische Beurteilung von Abfällen in Europa zwar über das Kriterium HP14 gesetzlich vorgeschrieben, die Methoden wurden jedoch noch nicht validiert. Ein kürzlich von italienischen Forschern veröffentlichter Artikel zeigt jedoch, wie nützlich es ist, die ökotoxikologische Beurteilung von Eluat vor der Deponierung zu integrieren (Bakterien-, Algen- und Daphnientests), und schlägt Klassifizierungssysteme vor, die notwendig sind, um die Ergebnisse der ökotoxikologischen Tests zu integrieren (Alias et al. 2024).

Die ökotoxikologischen Tests für Wasserproben wurden in der folgenden Tabelle (*Tab. 1*) zusammengefasst. Sie enthält die meisten der oben genannten Tests und weitere Tests, die standardisiert sind oder sich in der Standardisierung befinden.

Tabelle 1: Nicht erschöpfende Liste der verfügbaren ökotoxikologischen Tests für Wasserproben. Grün gefärbte Zellen zeigen Tests an, die in Vorschriften integriert sind entsprechend Bericht von Kienle et al. (2015a).

Taxonomische Gruppe	Methode und Arten	Wirkungen / Mechanismen	Standard / Referenz
Primärproduzenten	Algen-Wachstumshemmtest (<i>Raphidocelis subcapitata</i>) (akute/chronische Toxizität)	Hemmung des Wachstums	ISO 8692 (ISO 2012a)
	Kombinierter Algentest (<i>R. subcapitata</i>)	Hemmung der Photosynthese und des Wachstums	wird derzeit von ISO standardisiert
	Wasserlinsen-Wachstumshemmtest (chronische Toxizität) (<i>Lemna minor</i> , <i>Spirodela polyrhiza</i>)	Hemmung des Wachstums	ISO 20079 (ISO 2005b) ISO 20227 (ISO 2017b)
Bakterien	Leuchtbakterientest (akute Toxizität) (<i>Aliivibrio fischeri</i>)	Hemmung der Lumineszenz	ISO 11348 (ISO 2007a)
	Wachstumshemmtest mit Bakterien (chronische Toxizität) (<i>Pseudomonas putida</i> , <i>Photobacterium phosphoreum</i>)	Hemmung des Wachstums	ISO 10712 (ISO 1995) DIN 38412-L37 (Deutsches Institut für Normung 1999)
Makroinvertebraten (Primärkonsumenten, Zerkleinerer etc.)	Bestimmung der Hemmung der Beweglichkeit von <i>Daphnia magna</i> Straus (Cladocera, Crustaceen) (akute Toxizität)	Hemmung der Mobilität	ISO 6341 (ISO 2012b)
	Chronischer Wachstumshemmtest mit Wasserlinsen (<i>D. magna</i> , <i>Ceriodaphnia dubia</i>)	Hemmung der Fortpflanzung und Sterblichkeit	ISO 10706 (ISO 2000b) ISO 20665 (ISO 2008a)
	Molekulare, physiologische und verhaltensbezogene Messungen bei Bachflohkrebsen (Amphipoden, Crustaceen), Teil 1: Bestimmung der Enzymaktivität Acetylcholinesterase (AChE)	Neurotoxische Wirkungen (Enzymaktivität Acetylcholinesterase)	AFNOR XP T 90-722-1 (AFNOR 2020a)
	Molekulare, physiologische und Verhaltensmessungen bei Bachflohkrebsen (Amphipoden, Crustaceen), Teil 2: Messung von Fortpflanzungsmarkern	Hemmung der Fortpflanzung	AFNOR XP T 90-722-2 (AFNOR 2020b)
	Molekulare, physiologische und Verhaltensmessungen bei Bachflohkrebsen (Amphipoden, Crustaceen), Teil 3: Messung der Frassaktivität	Auswirkungen auf die Frassaktivität	AFNOR XP T 90-722-3 (AFNOR 2020c)
	<i>In-situ</i> Exposition von Bachflohkrebsen zur Messung der Bioakkumulation von Chemikalien	Bioakkumulation	AFNOR NFT90-721 (AFNOR 2023), wird derzeit von ISO standardisiert
Vertebraten (Fische) (Sekundärkonsumenten)	Bestimmung der akuten Toxizität von Abwasser auf Zebrafisch-Eier (<i>Danio rerio</i>)	Auswirkungen auf das Überleben von Fischeiern	ISO 15088:2007 (ISO 2007b)
	Test auf akute Toxizität im von Fischembryonen (fish embryo toxicity test, FET)	Auswirkungen auf die Entwicklung (subletale Effekte) und das Überleben von Fischembryonen und -larven.	OECD 236 (OECD 2013)
	Test auf akute Toxizität bei Fischen	Mortalität	OECD 203 (OECD 1992)
	Molekulare Biomarker in Zelllinien der Leber von Regenbogenforellen	Subletale Effekte, Genexpression: Biotransformation, oxidativer Stress, endokrines System, Immunsystem, Stoffwechsel, Stressreaktion, Reaktion auf Metalle	z. B. Voisin et al. 2023
	Biomarker in der Leber und im Gehirn von Bachforellen aus dem Freiland		

Tabelle 1 (Fortsetzung).

Taxonomische Gruppe	Methode und Arten	Wirkungen / Mechanismen	Standard / Referenz
Zytotoxizität	Cytotox-CALUX® (menschliche Zelllinien)	Schädigung von Zellbestandteilen wie Membranen, Zellkernen und Lysosomen	van der Burg et al. 2013
	Test an Zelllinie aus Kiemen der Regenbogenforelle RTgill-W1	Stoffwechselaktivität, Integrität der Zellmembran und Integrität der lysosomalen Membranen	ISO 21115 (ISO 2019)
	PXR-CALUX® (Pregnane X Receptor)	Nachweis von Xenobiotika	van der Burg et al. 2013
Oxidativer Stress	Nrf2-CALUX®	Zellreaktion auf oxidativen Stress	
Metabolismus von Schadstoffen	PAH-CALUX®	Aktivierung der Zellreaktion auf polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe	van der Burg et al. 2013, wird derzeit von ISO standardisiert
	DR (Dioxin Receptor)-CALUX®	Induktion des Arylhydrocarbon-Rezeptors durch Dioxin-ähnlich wirkende Stoffe	
	PFAS-CALUX®	Aktivierung der Zellantwort auf per- und polyfluorierte Alkylverbindungen (PFAS)	van der Burg et al. 2013
Endokrine Aktivität	Bestimmung des östrogenen Potenzials von Wasser und Abwasser, Teil 1: Hefezell-östrogentest (<i>Saccharomyces cerevisiae</i>)	Östrogene Aktivität	ISO 19040-1 (ISO 2018c)
	Bestimmung des östrogenen Potenzials von Wasser und Abwasser, Teil 2: Östrogenitätstest (A-YES, <i>Arxula adeninivorans</i>)		ISO 19040-2 (ISO 2018a)
	Bestimmung des östrogenen Potenzials von Wasser und Abwasser, Teil 3: <i>In-vitro</i> Test an menschlichen Zellen mit Reportergen (z. B. ER-CALUX®)		ISO 19040-3 (ISO 2018b), OECD 455 (OECD 2021)
	Hefezellandrogenitätstest (<i>Saccharomyces cerevisiae</i>) (Anti-AR-CALUX®)	(Anti)androgene Aktivität	OECD 458 (OECD 2023b)
Gentoxizität und Mutagenität	Bestimmung der Gentoxizität von Wasser und Abwasser mit Hilfe des umu-Tests	Gentoxizität	ISO 13829 (ISO 2000a)
	Bestimmung der Gentoxizität von Abwasser - Salmonella/Mikrosomen-Test (Ames-Fluktuations-Test)	Mutagenität	ISO 11350 (ISO 2012c)

3 Ökotoxikologische Beurteilung von belasteten Sedimenten

Oberflächengewässer, Seen, Teiche, Flüsse und Bäche sind entsprechend der GSchV Schutzgüter. Belastete Standorte in unmittelbarer Nähe können ihre Qualität gefährden. Da Oberflächenwasserkörper aus verschiedenen Kompartimenten bestehen, dem Wasser und den Sedimenten, können beide durch eine Altlast in der Nähe von Oberflächengewässern beeinträchtigt werden. Zudem können Sedimente auch selbst einen belasteten Standort darstellen. Eine Schwierigkeit bei der Untersuchung solcher Standorte besteht insbesondere in der Frage, ob und wann ein mit Schadstoffen belastetes Sediment einen belasteten Standort im Sinne der AltIV darstellt. Um Massnahmen zur Sanierung der Sedimente aus Sicht der Altlastengesetzgebung einzuleiten, muss gezeigt werden, dass die Sedimente Teil eines belasteten Standorts sind und dass die Kontamination der Sedimente (und indirekt auch der Biota) die Qualität des Oberflächen- oder Grundwassers beeinträchtigt und dessen Nutzung (Trinkwasser, Fischerei, Schutz geschützter Biozönosen...) verhindert (BAFU 2020). Die 2020 veröffentlichte Vollzugshilfe zu belasteten Standorten und Oberflächengewässern, die auf Wunsch der Kantone erstellt wurde, soll dieser Problematik einen Rahmen geben (BAFU 2020).

3.1 Überwachung der Sedimentqualität in der Schweiz

Sedimente können mit vielen historischen oder aktuellen Schadstoffen belastet sein, was zu einer Gefahr für benthische Organismen und das gesamte Ökosystem führen kann. Die Veröffentlichung der Strategie des Ökotoxizentrums zur Bewertung der Sedimentqualität in der Schweiz aus dem Jahr 2021 (Casado et al. 2021) ist eine wertvolle Hilfe für Fachleute bei der Durchführung von Probenahmen nach harmonisierten Methoden, die auf das Untersuchungsziel abgestimmt sind. Darüber hinaus entwickelt das Ökotoxizentrum, Qualitätskriterien nach der europäischen Methode zur Herleitung von Umweltqualitätsnormen (EC 2018) für eine Liste von Stoffen. Im Gegensatz zur Oberflächengewässern ist es nicht vorgesehen, diese Kriterien als gesetzliche Werte in die GSchV für Sedimente aufzunehmen. Diese Werte können jedoch weitere ökotoxikologische oder chemische Untersuchungen auslösen.

In der Schweiz wurden am Ökotoxizentrum in den letzten Jahren mehrere Projekte durchgeführt, die sich mit der Anwendung von ökotoxikologischen Tests zur Überwachung der Oberflächenwasserqualität, aber auch im Rahmen von Untersuchungen belasteter Standorte befassen. Für letztere können wir beispielhaft zwei aktuelle Projekte nennen:

- Im Jahr 2023 wurde ein Projekt durchgeführt, das die Auswirkungen eines Feuerwehrrümpfplatzes auf die Qualität zweier Flüsse im Abstrom untersuchte. Die chemischen Analysen zeigten hohe PFAS-Konzentrationen und der ökotoxikologische Test mit dem Ostrakoden (Muschelkrebse) *Heterocypris incongruens* (ISO 2012d) zeigte eine Einwirkung auf benthische Organismen auf (Beauvais et al. 2024).
- Derzeit läuft ein Projekt, das die ökotoxikologische Qualität von Sedimenten eines Kanals, die industriellen Einleitungen ausgesetzt sind, mithilfe einer Biotestbatterie untersucht, die Tests mit dem Ostrakoden *H. incongruens*, der Zuckmücke *Chironomus riparius* (AFNOR 2010) und dem Nematode (Fadenwurm) *Caenorhabditis elegans* (ISO 2020) umfasst.

Für die Überwachung der Sedimentqualität können wir einige Beispiele für die Anwendung ökotoxikologischer Testbatterien nennen, die auch für Studien über die Gefährdungsabschätzung durch belastete Standorte nützlich sein könnten:

- Zur Beurteilung der Sedimentqualität von drei Kanälen im Walliser Chablais wurde im Jahr 2019 vom Ökotoxizentrum, das vom Kanton Wallis beauftragt wurde, ein integrierter Triadenansatz gewählt. Dieser Ansatz beinhaltet drei Untersuchungsbereiche, chemische Analysen (Chemie), Biotests (Ökotoxikologie) und die Untersuchung der Zusammensetzung der vorhandenen Lebensgemeinschaften (Ökologie). Die Biotests umfassten Tests mit Nematoden (*C. elegans*) und Ostrakoden (*H. incongruens*) (Beauvais et al. 2020). Die Triade zeigte

problematische Standorte in Bezug auf die chemische Belastung, aber auch in Bezug auf die toxischen Auswirkungen auf benthische Organismen.

- Im Jahr 2021 zeigte eine Messkampagne mit Biotests in mehreren Kantonen, die an Sedimenten kleinerer Flüsse durchgeführt wurde, die Komplementarität der drei Biotests mit *H. incongruens*, *C. riparius* und *C. elegans* (Casado-Martinez et al. 2023), aber auch die Komplementarität der Biotests an Sedimenten zu den aquatischen Biotests (Kienle et al. 2023a, Kienle et al. 2023b).
- Im Jahr 2023 wurden im Rahmen von zwei Projekten, die von kantonalen Ämtern in Auftrag gegeben wurden, die Sedimente von zwei Flüssen entnommen, nachdem unerklärliche Rückgänge der Fischpopulationen aufgetreten waren. Die Sedimente von drei Standorten wurden mit Biotests mit den Testorganismen *H. incongruens* und *C. riparius* getestet. An denselben Standorten wurden auch Wasserproben mit verschiedenen Biotests untersucht und die Zusammensetzung der Oligochaeten-Gemeinschaften⁸ erfasst. In einem der Flüsse war insbesondere die Emergenz von Zuckmücken um 50 % reduziert, was auf eine starke Kontamination der Sedimente hindeutet, deren Ursache noch ermittelt werden muss (Oekotoxzentrum, unveröffentlicht).

Um eine integrative Beurteilung der Qualität eines Oberflächengewässers zu ermöglichen sind Biotests mit Sedimenten eine wertvolle Ergänzung zu Biotests mit Wasserproben. Bei den oben genannten Projekten zeigte der Test mit Ostrakoden die höchste Sensitivität für den Nachweis von Effekten. Ein Kanton testet derzeit die routinemässige Einführung dieses Biotests zur Überwachung der Flüsse als Ergänzung zur chemischen Analyse. Im Rahmen der oben genannten Studien und weiterer Projekte, die am Oekotoxzentrum entwickelt werden, ist es das Ziel, bei der Auswahl der Tests mitzuwirken (Teilnahme an Ringversuchen und Studien an Pilotstandorten) und einen Interpretationsrahmen für die Schweiz zu entwickeln, der bei der Überwachung, aber auch, falls erwogen, bei der Untersuchung von belasteten Standorten eingesetzt werden könnte.

3.2 Überblick über die Konzepte zum Umgang mit belasteten Sedimenten in Nordamerika und Europa

Die ersten Konzepte für den Umgang mit belasteten Standorten wurden in den Vereinigten Staaten entwickelt, die bei der Entwicklung und Einbeziehung von Biotests in den Beurteilungsrahmen für die Sanierung und Überwachung von belasteten Sedimenten Pionierarbeit geleistet haben. Um die Identifizierung von Standorten mit unannehmbaren Umweltrisiken zu erleichtern, hat die US-Umweltschutzbehörde (USEPA) im Rahmen des Superfund-Programms (Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act of 1980) Leitlinien für die Durchführung von Beurteilungen von ökologischen Risiken entwickelt (USEPA 1997). Diese Beurteilung dient zur Identifizierung und Charakterisierung der «aktuellen und potenziellen Gefahren» für die Umwelt, die sich aus der Freisetzung gefährlicher Stoffe ergeben, und der Herleitung von Sanierungsstufen, die die natürlichen Ressourcen vor unannehmbaren Risiken schützen würden. Die Beurteilung der ökologischen Risiken integriert eine breite Palette von Biotests und Studien einschliesslich der Daten von Toxizitätstests (USEPA 1999), um zu ermitteln, ob an einem Standort unannehmbare ökologische Risiken bestehen oder nicht. In einem ersten Schritt der Beurteilung werden die gemessenen Schadstoffkonzentrationen mit einem effektbasierten Referenzwert oder Schwellenwert verglichen. Die Schwellenwerte geben den Superfund-Standortmanagern ein Instrument an die Hand, das ausschliesslich zur Priorisierung verwendet werden soll, und stellen keine regulatorischen Kriterien, standortspezifische Sanierungsstandards oder Sanierungsziele dar. Wenn die Konzentration im Sediment den Schwellenwert überschreitet, ist eine weiterge-

⁸. Der Gemeinschaftsindex IOBS (Indice Oligochètes de Bioindication des Sédiments, IOBS), der auf der Artzusammensetzung von Oligochaeten im Feinsediment von Fliessgewässern beruht, gibt das Ausmass von toxischen Belastungen an und ergänzt so die ökologischen Informationen von anderen Bioindikatoren wie dem IBCH für Wirbellose am Gewässersgrund und dem DI-CH für Kieselalgen. Für weitere Informationen: <https://www.oekotoxzentrum.ch/news-publikationen/news/genetischer-sedimentwurm-index-nimmt-weitere-huerde>.

hende/vertiefte Beurteilung gerechtfertigt, z. B. durch Biotests, als Indikatoren für das Potenzial negativer Auswirkungen vor Ort. Diese können als Indikatoren für mögliche Auswirkungen auf die Schutzziele verwendet werden. Beispielsweise können Auswirkungen auf Algen oder Wirbellose bei Toxizitätstests im Labor als Indikatoren für mögliche Auswirkungen auf Gewässerorganismen verwendet werden, obwohl das Schutzziel die gesamte aquatische Gemeinschaft ist (einschliesslich Fische höherer trophischer Ebenen, die von den niedrigeren trophischen Ebenen der Gemeinschaft abhängen). In diesem Konzept werden Biotests auch als notwendig erachtet, um den Grad der Bioverfügbarkeit eines Schadstoffes an einem bestimmten Standort zu ermitteln, insbesondere bei anorganischen Stoffen.

So wurden in den USA ökotoxikologische Tests bereits in zahlreiche Untersuchungen, Überwachungen und Sanierungen einbezogen, beispielsweise für Metalle, einschliesslich Quecksilber, oder organische Schadstoffe wie PCB. Beispiele hierfür finden sich unter <https://www.usgs.gov/search?keywords=sediment+remediation>. So wurden beispielsweise Tests zur Kontakttoxizität von Sedimenten mit dem Amphipoden *Hyaella azteca* (ISO 2013a) und der Zuckmücke *Chironomus dilutus* (ASTM 2020) sowie zur Bioakkumulation mit dem Oligochaeten *Lumbriculus variegatus*, im Rahmen eines «weight of evidence»-Ansatzes durchgeführt, um die Risiken zu beurteilen und Sanierungsziele für die Sedimente am PCB-haltigen Standort Anniston festzulegen (Ingersoll et al. 2013).

Ebenfalls in Nordamerika stellt das «Canada-Ontario Decision Framework» einen umfassenden Leitfaden für die Beurteilung der Kontamination von Sedimenten in den Great Lakes dar. Dieser beruht auf mehreren Fragen, darunter, ob ein potenzielles Risiko besteht, ob eine Biomagnifikation vorliegt, ob Gemeinschaften betroffen sind und ob das Sediment toxisch ist (Environment Canada 2008). Sedimenttoxizitätstests werden empfohlen, wenn die Konzentrationen eines oder mehrerer Stoffe über den Schwellenwerten liegen und sich statistisch signifikant von den Referenzbedingungen unterscheiden, und nach einer sorgfältigen fachlichen Bewertung, um ihre Notwendigkeit zu beurteilen. Falls erforderlich, werden Sedimenttoxizitätstests im Labor mit drei oder vier geeigneten, empfindlichen Standardarten durchgeführt, die in Sedimenten leben und/oder mit Sedimenten vergesellschaftet sind (z. B. *Hexagenia*, *Hyaella*, Zuckmücken, Oligochaeta). Die Testorganismen sollten den am Standort auf der Grundlage der verfügbaren Daten vorkommenden oder zu erwartenden Arten einigermaßen ähnlich sein und Endpunkte wie Überleben, Wachstum und Reproduktion in den Tests erfasst werden (d. h. akute und chronische Parameter und biologische Merkmale, die für die Überwachung der Auswirkungen auf Populationsebene relevant sind). Eine Entscheidungsmatrix ermöglicht die Durchführung weiterer Untersuchungen oder die Untersuchung tieferer Sedimente. Es handelt sich also um einen ökosystemaren Ansatz zur Beurteilung von Sedimenten und zur Unterstützung von Sanierungsentscheidungen, die sich in erster Linie auf die Ergebnisse der biologischen Untersuchungen stützen.

Ein weiteres Beispiel: Im Rahmen des Aktionsplans St. Lorenz 2011-2026 werden zwei ökotoxikologische Tests mit *H. azteca* (Überleben, Wachstum) und *C. riparius* (Überleben, Wachstum) in einem Leitfaden für die physikalisch-chemische und toxikologische Charakterisierung von Sedimenten genannt. Diese Tests sollten bei der Einleitung von Sedimenten in den Fluss oder bei Sanierungsprojekten nach kanadischen Standards durchgeführt werden (MELC-CFP_Canada 2016).

In Europa haben mehrere Literaturübersichten die verschiedenen verfügbaren Instrumente und den Nutzen zusammengefasst, den die Untersuchung kontaminierter Sedimente bei der Beurteilung der Wasserqualität gemäss der Wasserrahmenrichtlinie haben kann (EC 2010). Beispiele sind die Veröffentlichungen:

- “Contaminated sediment in European river basins” des europäischen Sedimentforschungsnetzwerks SedNet (Salomons et al. 2004). Darin werden die Hauptquellen, Transportprozesse und Auswirkungen kontaminierter Sedimente sowie die wichtigsten Instrumente - chemische, biologische und Wirkungsstudien - für die Beurteilung und den Umgang mit diesen Sedimente beschrieben.

- “Integrated Risk Assessments for the Management of Contaminated Sediments in Estuaries and Coastal Systems” (Apitz 2011). Ziel dieses Buchkapitel ist es, verschiedene Aspekte der Beurteilung der Sedimentqualität (Chemie, Ökotoxikologie, Bioakkumulation) unter verschiedenen Managementzielen (Sanierung, Baggerung) zu beschreiben.
- “Integrated sediment management guidelines and good practices in the context of the Water Framework Directive” (Ausili et al. 2022). Dieses Dokument zielt darauf ab, ein harmonisiertes Verständnis der Rolle von Sedimenten bei der Erreichung der Ziele der Wasserrahmenrichtlinie und allgemein der Qualität von Oberflächengewässern zu schaffen.

Auf freiwilliger Basis haben mehrere europäische Länder Leitfäden zur Implementierung von ökotoxikologischen Tests im Umgang mit kontaminierten Sedimenten oder für das Biomonitoring veröffentlicht. Dies gilt zum Beispiel für Schweden und Norwegen, Belgien (Region Flandern), die Niederlande, Deutschland und Frankreich. Dennoch ist die Implementierung von Biotests für Sedimente, in den Vorschriften dieser Länder nicht vorgesehen.

3.3 Beispiele für nationale Empfehlungen zu ökotoxikologischen Tests mit Sedimenten in Europa

3.3.1 Schweden

In Schweden gibt es derzeit keinen offiziellen Leitfaden für die Beurteilung des Risikos von kontaminierten Sedimenten, obwohl man sich bemüht, einen Rahmen für den Schutz aquatischer Ökosysteme zu schaffen (Severin et al. 2018). Um die Ziele für die Beurteilung von Sedimenten zu identifizieren, wurden Regierungsstellen konsultiert. Von fünf Regierungsbehörden und -agenturen wurde eine Website, [renasediment.se](https://www.renasediment.se), entwickelt, auf den Informationen über kontaminierte Sedimente gesammelt werden. Diese Informationen sind wichtig, um vorrangig zu sanierende Altlasten zu identifizieren und die zeitliche Entwicklung der Kontamination zu verfolgen.

Laut dem 2008 von der schwedischen Umweltschutzbehörde veröffentlichten Bericht «Strategy for the assessment of environmental risks from contaminated sediments» (Sternbeck et al. 2008) basiert die Beurteilung des Risikos auf den bestehenden Methoden für Böden, lehnt sich aber auch an den amerikanischen Ansatz an. Der Ansatz ist abgestuft («tiered»). Sedimenttoxizitätstests gehören zu den Methoden, die für die Beurteilung der Effekte verwendet werden können. Die Ergebnisse dieser Tests können dann zusammen mit den Ergebnissen der Beurteilung der Exposition in die Risikobewertung einfließen. Die Auswahl der Biotests sollte auf die Fallstudie abgestimmt sein, z. B. auf die besorgniserregenden Stoffe und die gefährdeten Rezeptoren.

3.3.2 Norwegen

In Norwegen hat die Umweltagentur im Jahr 2015 einen technischen Leitfaden für die Beurteilung von Umweltrisiken durch kontaminierte Sedimente in Fjorden und Küstengebieten veröffentlicht (Breedveld et al. 2015). Er wurde erstellt, um Regierungsbeamten, Betroffenen, Beratern und anderen Personen bei der Beurteilung von Gebieten mit Meeressedimenten im Hinblick auf mögliche Massnahmen zu helfen. Ziel ist es, das Risiko von Umweltschäden oder Einwirkungen auf die Gesundheit durch die Sedimente zu beurteilen und zu beurteilen, ob das Risiko in einem Managementkontext, der Teil des Verfahrens zur Sanierung von kontaminierten Sedimenten ist, akzeptabel ist oder nicht. Die Beurteilung des Risikos beruht auf einem dreistufigen Ansatz mit zunehmender Komplexität und Anforderungen sowie der Berücksichtigung lokaler Daten. Biotests werden in der Anfangsphase einbezogen. In dieser werden Tests zur Erfassung allgemeiner Toxizität durchgeführt (mit der Grünalge *Skeletonema costatum*, mit benthischen Crustaceen (z. B. dem Copepoden *Tisbe battaglia*) und mit Wirbellosenlarven (z. B. der Auster *Crassostrea gigas*)). In diesen Tests wird das Porenwasser der Sedimente untersucht, um die Toxizität von Mischungen und nicht gemessenen Chemikalien zu berücksichtigen. Wenn Dioxine oder dioxin-ähnliche Schadstoffe im Sediment vermutet werden, wird in diesem ersten Schritt ein Test mit einem organischen Sedimentextrakt für den spezifischen Nachweis dieser Stoffe empfohlen (DR-

CALUX®). In einem zweiten Schritt wird das Risiko von Auswirkungen auf das Ökosystem anhand der berechneten Konzentrationen der Schadstoffe, denen die Organismen im Wasser und in den Sedimenten ausgesetzt sind, im Vergleich zu den relevanten Schwellenwerten und dem Ergebnis eines Sedimenttoxizitätstests mit dem Polychäten *Arenicola marina* (Wattwurm) oder dem amphipod Crustacea *Corophium volutator* beurteilt. Schliesslich kann in einem dritten Schritt eine weitergehende Bewertung durchgeführt werden, die spezifisch auf die lokale Situation zugeschnitten ist. Dies können z.B. Untersuchungen zur Bioakkumulation und zum trophischen Transfer sein. Ziel ist es, die Risikobewertung zu verfeinern und festzustellen, ob Sanierungsmassnahmen erforderlich sind.

3.3.3 Belgien

In Belgien, in der Region Flandern, wurde die Triade (Chapman 1990) relativ früh nach den USA angewendet. Seit 2000 werden für Sedimente der akute Toxizitätstest mit dem Amphipoden *H. azteca*, aber auch Tests mit dem Porenwasser der Sedimente (Wachstumshemmtest mit der Grünalge *R. subcapitata*, Mortalitätstest mit dem Crustacea *Thamnocephalus platyrus* (ISO 2011)) empfohlen (de Deckere et al. 2000). In dem zitierten Bericht findet sich auch eine ausführliche Beschreibung für die Untersuchung morphologischer Missbildungen der Mundwerkzeuge von Zuckmückenlarven im Stadium IV, die ein Biomarker für die Exposition der Organismen gegenüber toxischen Schadstoffen sein können. Seit 2002 wurde die Batterie um einen Test erweitert, den Sedimentkontakttest mit *H. incongruens* (Chial & Persoone 2002). Dadurch wird ein Marker für chronische Effekte (Wachstum) hinzugefügt. Für die Interpretation der Daten und eine einfache Kommunikation werden 4 Qualitätsklassen verwendet (blau-nicht belastet, grün-leicht belastet, gelb-belastet und rot-stark belastet). Die Biotests sind in eine Triade integriert (Tab. 2). Inspiriert vom «Verfahren zur standortspezifischen ökologischen Risikobewertung von Bodenkontaminationen (Triade-Ansatz für die Bodenqualität)» (ISO 2017a) ermöglicht die Integration der Ergebnisse einfache Vergleiche von Zustrom zu Abstrom oder vor und nach der Sanierung sowie die Priorisierung von Standorten. Die Hauptanwendung dieser Triade bleibt jedoch das Biomonitoring. Die Flämische Umweltgesellschaft (VMM) verwendet diese Prüfmethode zur Überwachung der Sedimentqualität. Das Überwachungsnetz umfasst rund 600 Standorte, die seit 2000 alle vier Jahre analysiert werden. Im Jahr 2008 wurde die Anzahl der Standorte pro Zyklus auf 300 Überwachungsstandorte reduziert. Seit 2016 wird ein 6-Jahres-Zyklus beibehalten. Die Ergebnisse der Messkampagnen sind auf einer Online-Karte zugänglich (<https://www.geopunt.be>). Darüber hinaus werden auch Schwebstoffe überwacht. Damit ist das Land in Europa führend und kann als Vorbild für die Entwicklung eines Überwachungsrahmens für die Schweiz dienen. Die Überwachungsdaten sind online verfügbar <https://www.vmm.be/data/waterkwaliteit>.

Tabelle 2: Beispiel für die Triade, die seit fast 25 Jahren in Flandern für die Überwachung der Sedimentqualität durch die staatliche Umweltagentur angewandt wird.

Komponenten	Verwendete Techniken	Informieren über...
Physikalisch-chemische Charakterisierung	Analyse der intrinsischen Eigenschaften von Sedimenten	Sedimenttyp (Korngrösse, organische Substanz), Art und Grad der Kontamination (Metalle, PAK, PCB...)
Ökotoxikologie	Biotests im Labor : - Feste Phase: <i>H. azteca</i> und/oder <i>H. incongruens</i> - Flüssige Phase: <i>R. subcapitata</i> und <i>T. platyrus</i>	Potenzielle Gefahr für benthische Organismen (allgemeine Toxizität)
Biologie	Analyse der Zusammensetzung und Häufigkeit von auf und im Sediment lebenden Organismen	Ökologische Qualität des Sediments, Lebensraum für benthische Organismen.

Auf der Managementseite wird in einer aktuellen Veröffentlichung der erste flämische Aktionsplan (2022-2027) zum Sedimentmanagement für die Flussgebietseinheit Schelde und Maas vorgestellt (Coördinatiecommissie_Integraal_Waterbeleid 2020). Ziel ist es, die Sanierung von zehn Hotspots zu planen (fünf haben inzwischen bereits begonnen). Die Beurteilung der Sedi-

mentqualität basiert dann auf Schwellenwerten, die weitere Untersuchungen auslösen, um zu entscheiden, ob eine Sanierung notwendig ist.

Ein «Code of Good Practice» wurde bereits 2022 von der flämischen öffentlichen Abfallagentur OVAM veröffentlicht, entsprechend den Zielen des Berichtes für die Sedimentuntersuchungen (OVAM 2022): Verwendung des ausgebaggerten Sediments, Identifizierung der Sedimentqualität, Herleitung der Auswirkungen und des Ausmasses der Sedimentkontamination. Derzeit wird in Flandern im Auftrag des OVAM ein aktueller Literaturüberblick (letzte zehn Jahre) über Biotests für Sedimente vorbereitet (Vito 2024). Die Motivation für diesen Bericht über Ökotoxikologie beruht auf der Tatsache, dass es keine gesetzlichen Sanierungswerte für Sedimente gibt. Der vorläufige Bericht bietet detaillierte Merkblätter, die den Fachleuten bei der Auswahl ökotoxikologischer Tests als Orientierungshilfe dienen sollen. Darin finden sich insbesondere Tests, die bereits häufig in Studien des Ökotoxizentrums verwendet werden, z. B. der Nematode *C. elegans*, die Zuckmücke *C. riparius*, der Ostracode *H. incongruens*, aber auch Amphipoden, Oligochaeta und Pflanzen (z. B. *Myriophyllum sp.*). Ziel ist es, eine Basis-Testbatterie durch chronische Sedimentkontakttests zu ergänzen. Der Bericht geht von zwei Szenarien aus: Im Falle einer starken chemischen Kontamination werden zwei Tests auf chronische Toxizität vorgeschlagen mit *C. elegans* und *H. incongruens*. Wenn die Tests negativ ausfallen, können andere, empfindlichere oder längere Tests hinzugefügt werden. Diese werden auch bei mittlerer Kontamination (Ergebnis zwischen zwei Schwellenwerten) zusätzlich zu den ersten beiden Tests empfohlen. Die Auswahlkriterien für die Beurteilung von Biotests in diesem Bericht beinhalten unter anderem ökologische Relevanz, Standardisierungsgrad, Anwendbarkeit (Erfahrung), Verfügbarkeit und Empfindlichkeit des Testorganismus, Testbedingungen und eine Schätzung der Implementierungskosten (Vito 2024). Dieser Teil wird die Entwicklung des Beurteilungselements «ökotoxikologisches Risiko» unterstützen, das die Teile «Dispersionsrisiko» und «toxikologisches Risiko» ergänzt.

3.3.4 Niederlande

Ein niederländischer Leitfaden enthält Methoden zur Bestimmung, inwieweit das Erreichen von Wasserqualitätszielen durch kontaminierte Sedimente behindert werden kann. Dazu werden je nach Schutzziel (z. B. Überschreitung der EQS-Qualitätskriterien für Wasser oder Biota, Verschlechterung der ökologischen Qualität ...) verschiedene Modelle konstruiert (Hin et al. 2010). Biotests werden nur als ergänzende spezifische Methoden genannt, insbesondere in Fällen, in denen die Analyse der Makroinvertebratengemeinschaften ein unbefriedigendes Ergebnis zeigt. Biotests sind in diesem Zusammenhang ein wichtiges Element der Beurteilung. Wenn keine Toxizität festgestellt wird, kann die endgültige Beurteilung der Sedimentqualität von schlecht auf mittel hochgestuft werden.

3.3.5 Deutschland

In Deutschland werden Sedimentkontakttests zur Beurteilung der Immissionen von belasteten Standorten empfohlen (HLUG 2014). Genannt werden der Nematodentest, ein Test an Fischeibryonen *Danio rerio* (ISO 2007b, Keiter et al. 2010), und der Kontakttest mit dem Bakterium *Arthrobacter globiformis* (ISO 2024). Für den Umgang mit kontaminiertem Baggergut (Sediment) in Bundeswasserstrassen (BfG 2017) werden die gleichen Tests wie zur Prüfung von Abfällen vorgeschlagen, d. h. an Eluat von Sedimenten. Das deutsche Konzept, das von Hafenbehörden, Behörden, die für Baggararbeiten zuständig sind, oder von Flussgebietsbewirtschaftern getestet wurde (Ahlf et al. 2002), empfiehlt die Verwendung eines abgestuften Ansatzes, bei dem Biotests gegenüber chemischen Analysen Vorrang haben. Es gibt auch einen Teil zur ökologischen Beurteilung, aber nicht alle Instrumente sollten systematisch angewendet werden, sondern es hängt vom Ziel der Studie ab. In der ersten Phase wird eine Batterie vorgeschlagen, die einen Lumineszenzhemmtest und einen Sedimentkontakttest mit Bakterien umfasst. In der dritten Phase werden weitere Biotests für eine eingehendere Beurteilung empfohlen, wie z. B. der Nematodentest, der Zuckmückentest oder der Fischeitest für die Prüfung von Rohsedimenten, und Tests mit dem Makrophyten *Lemna*, oder Tests für spezifische Wirkungsweisen mit Eluat oder Extrakten (Mutagenität, Gentoxizität, Zytotoxizität, endokrines Potenzial).

3.3.6 Frankreich

In Frankreich wird in einem Leitfaden ein abgestuftes Verfahren zur Beurteilung des Gefahrenpotenzials von Altlasten in Süßwassersedimenten vorgeschlagen, insbesondere im Zusammenhang von Arbeiten oder Massnahmen, die eine Ausbaggerung, Ausräumung oder Umlagerung von potenziell kontaminierten Sedimenten beinhalten können (Babut et al. 2016, Babut et al. 2019). Die Tests umfassen in einem ersten Schritt eine Biotestbatterie mit Tests mit Bakterien, Nematoden und Ostrakoden, und in einem zweiten Schritt Tests mit Zuckmücken, Bachflohkreben und Oligochaeten. Diese Testbatterien können auch zur Diagnose der Ursachen für die Herabstufung eines Standorts, z.B. in einen schlechten Zustand, bei der Qualitätsüberwachung im Rahmen der Wasserrahmenrichtlinie geeignet sein. Sie könnten somit auch für die Untersuchung von Einwirkungen auf die Umwelt durch belastete Standorte im Zusammenhang mit Oberflächenwasser geeignet sein. Sollen die ausgebagerten Sedimente hingegen an Land entsorgt werden, gelten sie als Abfall, der gemäss der EU-Abfallrichtlinie entsorgt werden muss (siehe 2.4.). Wenn bei Sedimenten die Konzentrationen von Metallen, PCBs, PAKs und Tributylzinn Schwellenwerte überschreiten, sind verschiedene ökotoxikologische Tests mit dem Porenwasser des Sediments, dem Eluat und der festen Matrix durchzuführen (Mouvet 2013, Bataillard et al. 2017).

Die ökotoxikologischen Tests für Sedimentproben wurden in der folgenden Tabelle zusammengefasst. Darin finden sich die meisten der oben genannten Tests sowie weitere Tests, die standardisiert sind oder sich in der Standardisierungsphase befinden (*Tab. 3*).

Tabelle 3: Nicht erschöpfende Liste der verfügbaren ökotoxikologischen Tests für Sedimentproben. Grün gefärbte Zellen kennzeichnen Tests, die in diesem Bericht zitiert werden. Adaptiert von (Vito 2024).

Taxonomische Gruppe	Testorganismus / Spezies	Wirkungen	Standard / Referenz
Primäre Produzenten	<i>Nitzshia palea</i> (bentische Kieselalgen)	Hemmung des Wachstums	Roig et al. 2015
	<i>Myriophyllum aquaticum</i> (Makrophyten)	Hemmung des Wachstums (Biomasse, Länge)	ISO 16191 (ISO 2013b)
	<i>Myriophyllum spicatum</i> (Makrophyten)		OECD 239 (OECD 2014)
	<i>Lemna gibba</i> , <i>Lemna minor</i> (Wasserlinsen)	Hemmung des Wachstums	OECD 221 (OECD 2006), ISO 20079 (ISO 2005b)
	<i>S. saccharatum</i> , <i>L. sativum</i> , <i>S. alba</i> (Landpflanzen)	Keimung und Wachstum (Phytotox kit)	ISO 18763 (ISO 2016)
Bakterien	<i>Arthrobacter globiformis</i>	Aktivität des Enzyms Dehydrogenase	ISO 18187 (ISO 2024)
	<i>Aliivibrio fischeri</i>	Hemmung der Lumineszenz	ISO 21338 (ISO 2010)
Bentische Makroinvertebraten	<i>Caenorhabditis elegans</i> (Nematoden)	Wachstum und Fortpflanzung	ISO 10872 (ISO 2020)
	<i>Tubifex tubifex</i> (Oligochaeten)	Überleben, Wachstum, Kokonproduktion	ASTM E1706 (ASTM 2020)
	<i>Lumbricus variegatus</i> (Oligochaeten)	Wachstum und Fortpflanzung	OECD 225 (OECD 2007)
	<i>Chironomus riparius</i> (Dipteren-Insekten)	Überleben, Wachstum, Emergenzrate und -zeit, Anzahl der männlichen und weiblichen Tiere	NF T 90-339-1 (AFNOR 2010), OECD 218 (OECD 2023a)
	<i>C. tentans</i> = <i>C. dilutus</i> (Dipteren-Insekten)		E1706 (ASTM 2020)
	<i>Chironomus sp.</i>	Fortpflanzung, Entwicklungszeit, Fruchtbarkeit, Schlupfrate, Überleben und Emergenz der folgenden Generationen.	OECD 233 (OECD 2010), EPA100.5 (USEPA 2000)
	<i>Ephoron virgo</i> (Polymitarcydiae)	Überleben und Wachstum	De Lange et al. 2005
	<i>Hexagenia spp.</i> (Ephemeroidea)	Wachstum und Häutung	ASTM E1706 (ASTM 2020)

Tabelle 3 (Fortsetzung).

Taxonomische Gruppe	Testorganismus / Spezies	Wirkungen	Standard / Referenz
Epibenthische Makroinvertebraten	<i>Hyalella azteca</i> (Amphipoden, Crustaceen)	Überleben und Wachstum	ISO 16303 (ISO 2013a)
		Überleben und Wachstum, Fortpflanzung	Bericht RM/33 (Environnement_Canada 2017)
			EPA 100.4 (USEPA 2000), ASTM E1706 (ASTM 2020)
	<i>Gammarus sp.</i> (Amphipoden, Crustaceen)	Bestimmung der Aktivität des Enzyms Acetylcholinesterase (AChE)	AFNOR XP T 90-722-1 (AFNOR 2020a)
		Messung von Reproduktionsmarkern	AFNOR XP T 90-722-2 (AFNOR 2020b)
		<i>In-situ</i> Inkubation zur Messung der Bioakkumulation von Chemikalien.	AFNOR XP T 90-722-3 (AFNOR 2020c)
	<i>Heterocypris incongruens</i> (Ostrakoden, Crustaceen)	Überleben und Wachstum	ISO 14371 (ISO 2012d)
	<i>Potamopyrgus antipodarum</i> (Muscheln)	Überleben, Fortpflanzung (Anzahl der Embryonen, verwendet als Indikator für endokrine Störungen)	OECD 242 (OECD 2016)
Vertebraten (Fische)	<i>Brachydanio rerio</i> (Larve/Embryo Zebrafisch)	Überleben, Entwicklung	DIN 38415-6 (Deutsches Institut 2003)

4 Schlussfolgerungen zum Potenzial der Anwendung ökotoxikologischer Tests

Die obige Übersicht über die nationalen Leitfäden und Dokumente zeigt, dass mehrere Länder bereits Konzepte zur Beurteilung des ökologischen Risikos belasteter Standorte oder Biomonitoring-Programme entwickelt haben, die ökotoxikologische Tests beinhalten, sei es für Eluate und wässrige Matrices oder für belastete Sedimente.

- Im ersten Teil wurden mehrere Fallstudien vorgestellt, die die Empfehlungen der Vollzugshilfe «Anwendung ökotoxikologischer Testverfahren auf Sickerwasser und Eluate von belasteten Standorten» (BUWAL 1999) umgesetzt haben. Allerdings scheint der Einsatz von Biotests in der Schweiz nicht weit verbreitet zu sein und hängt vom Interesse der Bewirtschafter, Regulierer oder Eigentümer ab. Es wäre jedoch interessant, mit Hilfe der kantonalen Ämter weitere Untersuchungsergebnisse zusammenzutragen, um damit eine umfassende Bilanz zu den bisherigen Erfahrungen mit der Anwendung Biotests für die Beurteilung belasteter Standorte ziehen zu können.
- Auf internationaler Ebene haben beispielsweise Deutschland und die Niederlande die Verwendung von Biotests für Eluate (von Abfällen und Deponien oder ausgebaggerten Sedimenten) und für Grund- oder Oberflächenwasser im Zusammenhang mit belasteten Standorten vorgeschlagen. In der Europäischen Abfallrahmenrichtlinie (EC 2008) sind Biotests für Abfälle geregelt.
- Für kontaminierte Sedimente werden Biotests in Nordamerika seit fast 20 Jahren empfohlen und eingesetzt. Für die USA lassen sich vielfältige Beispiele finden, sei es für Problemfällen im Zusammenhang mit organischen Substanzen, PCB oder PFAS, Metallen oder Munition. Eine weitere Literaturrecherche könnte sich als interessant erweisen und auch Kanada einbeziehen.
- Erst seit kurzem ist in Europa die Bereitschaft vorhanden, ökotoxikologische Tests für den Umgang mit kontaminierten Sedimenten einzusetzen. Die Arbeiten laufen in den Regierungsbehörden, wie z.B. in Belgisch-Flandern und Schweden, mit denen sich das Oekotoxzentrum über ein Expertennetzwerk und Arbeitsgruppen (SedNet) austauscht. Eine Beteiligung der Schweizer Behörden könnte dazu beitragen, diese Arbeiten voranzutreiben.

Aufgrund der begrenzten Ressourcen, die für das Projekt zur Verfügung standen, konzentrierte sich die Literaturanalyse auf nationale und internationale Regulierungsansätze und -rahmen, während die wissenschaftliche Literatur nicht umfassend gesichtet wurde und nur einige Beispiele vorgestellt werden. Die Beispiele umfassen Fallstudien im Zusammenhang mit belasteten Standorten, die das Potenzial der Anwendung ökotoxikologischer Tests, meist in einem integrierten Ansatz, der chemische Analysen, Biotests und ökologische Studien kombiniert, aufzeigen (vgl. Anhang). Biotests werden dort sowohl zur Beurteilung des Sanierungsbedarfs (Vergleiche von stromaufwärts zu stromabwärts) als auch zur Überwachung vor, während oder nach der Ergreifung von Massnahmen durchgeführt.

Die verschiedenen aktuellen und begründeten Vorstösse in einigen europäischen Ländern sowie die zahlreichen Rückmeldungen am Oekotoxzentrum und in der Literatur zeigen, dass der Einsatz von ökotoxikologischen Tests zur Beurteilung von Einwirkungen auf aquatische Ökosysteme an belasteten Standorten sinnvoll und vielversprechend ist. Zusammenfassend werden in der folgenden Tabelle die Ziele mit Testbeispielen für den Einsatz von Biotests zur Bewertung des ökotoxikologischen Potenzials von Emissionen und Immissionen, aber auch für die Überwachung und Beurteilung der Wirksamkeit von Massnahmen bei der Behandlung belasteter Standorte dargestellt (Tab. 4).

Tabelle 4: Ziele und Beispiele für ökotoxikologische Tests in den verschiedenen Phasen der Behandlung belasteter Standorte.

Behandlungsphase	Ökotoxikologische Ansätze	Emissionen: Eluate, Sickerwasser	Immissionen: Oberflächenwasser	Immissionen: Sedimente
Herleitung des ökotoxikologischen Potenzials	Batterie von Biotests in einem integrierten Ansatz (chemische Analysen, Bioakkumulation, Gemeinschaften)	Tests auf akute und chronische Toxizität: z.B. Bakterien, Algen, Daphnien, Fischembryonen + <i>In-vitro</i> -Tests je nach vorhandenen Schadstoffen (z.B. Östrogenität)	Tests auf chronische Toxizität: z. B. kombinierter Algentest, Daphnien, Amphipoden, Fischembryonen	Tests auf chronische Toxizität: z. B. Ostrakoden, Zuckmücken, Nematoden
Beurteilung des Sanierungsbedarfs eines belasteten Standortes	Verwendung von Schwellenwerten für die Verfügung (Toxizitätsschwellen), Integration in die analytische Beurteilung	Herleitung von Verdünnungsstufen	Untersuchungen im Zustrom / Abstrom Eventuell Hinzufügung von <i>In-vitro</i> -Tests mit spezifischen Wirkungsweisen	
Dringlichkeit und Ziel der Sanierung	Verbunden mit dem Schutzziel, das durch die ökotoxikologische Beurteilung hervorgehoben wird, während der im Idealfall die Ursache der Einwirkung gefunden wurde.			
Überwachung: zeitliche Entwicklung	Batterie von Biotests in einem integrierten Ansatz (chemische Analysen, Bioakkumulation, Gemeinschaften)	Entsprechend den Tests, die in der Untersuchung geantwortet haben, auszuwählen		
Wirksamkeit der Massnahmen				

Bezüglich der Untersuchungsphase könnte das ökotoxikologische Potenzial eines belasteten Standorts durch die Kombination von ökotoxikologischen Tests für Emissionen (wässrige Matrices) und Immissionen (Oberflächengewässer, einschliesslich Sedimente) zur Evaluation des Sanierungsbedarfs eines belasteten Standorts beitragen. Die Beurteilung von Sickerwasser oder Eluat könnte mit einer Reihe von Biotests erfolgen, die Tests auf akute Toxizität (z. B. Bakterien, Fischembryonen) und chronische Toxizität (z. B. Daphnienreproduktion) sowie einen oder mehrere *In-vitro*-Tests (z. B. für endokrine Störungen) umfassen. Bei Immissionen beruhen die empfohlenen Tests eher auf der chronischen Toxizität (Langzeitwirkungen), wobei z. B. für Sedimente eine Testbatterie mit Ostrakoden, Zuckmücken und Nematoden (Tab. 4) verwendet wird. Die Testbatterien sollten im Zustrom und Abstrom von belasteten Standorten zur Beurteilung des Sanierungsbedarfs angewendet werden. Wir empfehlen, sie in integrierten Ansätzen zu verwenden, die chemische Analysen (einschliesslich z. B. Messungen der Bioakkumulation von Schadstoffen in Organismen) und Untersuchungen der Lebensgemeinschaften in Gewässern und Sedimenten kombinieren. Wenn die ökotoxikologischen Tests eine hohe Toxizität anzeigen (Schwellenwerte sind noch festzulegen), wird das ökotoxikologische Potenzial des Standorts als hoch definiert, was auf den Sanierungsbedarf und die Dringlichkeit einer Sanierung hinweist. Wenn die Schadstoffe keine Ökotoxizität zeigen und das Potenzial als niedrig eingestuft wird, könnte eine weitere Untersuchung in Betracht gezogen werden, um die Diagnose zu bestätigen (z. B. zusätzliche Tests auf chronische Toxizität oder mit spezifischem Wirkungsmechanismus). Im Falle eines als mittel eingestuften ökotoxikologischen Potenzials könnten die ökotoxikologischen Tests zur Überwachung eingeführt werden. Nach der Phase der vertieften Untersuchung könnte das Antwortniveau einer ökotoxikologischen Testbatterie bei der Priorisierung der zu sanierenden Standorte helfen durch die Festlegung entsprechender Sanierungsfristen.

Wie in der Vollzugshilfe zu ökotoxikologischen Tests von 1999 (BUWAL 1999) und in der Vollzugshilfe zur Einleitung von Eluat aus Deponien (Hermanns-Stengele & Moser 2012) dargestellt, werden die Biotests zusätzlich zu den chemischen Analysen durchgeführt. Wenn die Einstufungen nach chemischen Analysen und nach ökotoxikologischen Tests konsistent sind, kann das Vorgehen nach AltIV fortgesetzt werden. Bei Inkonsistenzen sollten hingegen zusätzliche chemische und/oder ökotoxikologische Analysen in Betracht gezogen werden. In bestimmten Phasen der Untersuchung oder Überwachung belasteter Standorte kann es insbesondere interessant sein, die Ergebnisse ökotoxikologischer Tests als Warnsystem oder Screening zu verwenden.

den, um zu weitergehenden chemischen Analysen zu leiten. Auch die sogenannte effektgeleitete Analyse (*effect-directed analysis*, EDA) könnte in Betracht gezogen werden. Ziel dieser Methode ist es, die für biologische Wirkungen verantwortlichen toxischen Verbindungen mithilfe eines analytischen Ansatzes zu identifizieren, der durch physikalisch-chemische Fraktionierungen und Biotests gesteuert wird (EC 2014).

Bei der zeitlichen Beurteilung von Standorten kann die Ökotoxizität an einer Probenahme-stelle während der Überwachung eines Standortes aus folgenden Gründen zunehmen: eine erhöhte Mobilität der Schadstoffe, die durch eine Änderung der physikalisch-chemischen Eigenschaften des Standortes verursacht wird oder das Auftreten einer Verschmutzungsfront. Ökotoxikologische Tests können daher als Alarmsignal verwendet werden, das anzeigt, dass eine Sanierung des Standorts notwendig wird oder sogar dringend erforderlich ist. In diesem Fall sollten Biotests gewählt werden, die sich in der ersten Phase der Untersuchung als empfindlich erwiesen haben.

Das Sanierungsziel besteht darin, den Standort in einen Zustand zu versetzen, der den Kriterien der AltIV entspricht, d. h. das Risiko von Einwirkungen auf die Umwelt zu verhindern. Dies kann insbesondere dadurch erreicht werden, dass das Vorhandensein oder die Bioverfügbarkeit von Schadstoffen verringert wird. Während der Sanierung können Biotests daher Aufschluss über den guten Verlauf der Massnahmen geben. Ökotoxikologische Tests könnten sich auch als nützlich erweisen, um vor einer mit den Arbeiten verbundenen Beeinträchtigung zu warnen, die zu einer neuen Verschmutzung führen könnte, z. B. durch die Warnung vor einer veränderten Bioverfügbarkeit von Problemstoffen im Verlaufe einer Sanierung oder während einer Überwachungsphase (siehe Beispiele im Anhang).

Zusammenfassend haben wir in diesem Bericht gesehen, dass bei belasteten Standorten (ob am Rand, über oder in einem Oberflächengewässer) der Mehrwert von ökotoxikologischen Tests an flüssigen Proben (Extrakt, Eluat, Grund- oder Oberflächenwasser) oder von direkten Kontakttests an Sedimenten allein oder in Kombination mit chemischen und biologischen Ansätzen unbestreitbar zu sein scheint. Die Übersichtsarbeiten zu aquatischen Biotests des Ökotoxizitätszentrums (Kienle et al. 2015a) und des wissenschaftlich-technischen Programms AQUAREF (Manier et al. 2023) sowie der in Belgisch-Flandern in Vorbereitung befindliche Bericht mit einer genauen Beurteilung von *In-vivo*-Kontakttests für Süßwassersedimente (Vito 2024) werden künftig eine grosse Hilfe sein, zur Auswahl der Tests. Diese Auswahl sollte gleichzeitig im Rahmen von Biomonitoring- oder Pilotkampagnen an belasteten Standorten fortgeführt werden. Die Auswahl der ökotoxikologischen Tests hängt von mehreren Kriterien ab: vom Ausgangswissen über den Standort (Schadstoffe und erwartete Expositions- und Wirkungsniveaus), aber auch vom Ziel der Studie. Jeder Test kann jedoch Vor- und Nachteile in seiner Durchführung, Komplexität, Kosten und Interpretation aufweisen und spezifische Antworten liefern (akute oder chronische Toxizität, Wirkungsweise, Empfindlichkeit gegenüber bestimmten Schadstoffen...).

Wir empfehlen, bei grösserem Interesse an ökotoxikologischen Ansätzen eine Arbeitsgruppe einzurichten, die Experten für belastete Standorte, Oberflächengewässer (auch Hochwasserschutz und Renaturierung) und Ökotoxikologie vereint, um die in diesem Bericht angesprochenen Fragen zu vertiefen. Darüber hinaus sollte eine Umfrage bei den kantonalen Ämtern in Betracht gezogen werden, um deren bisheriger Erfahrungen mit der Anwendung ökotoxikologischer Tests bei belasteten Standorten zu erfassen. Langfristiges Ziel wäre es, eine neue Vollzugshilfe für die ökotoxikologische Beurteilung belasteter Standorte mit einem soliden Interpretationsrahmen zu erstellen, der neben den bereits bestehenden AltIV-Konzentrationswerten auch Biotests und Qualitätskriterien für Wasser und Sedimente berücksichtigt. Wir empfehlen, die Vollzugshilfe von 1999 als Ausgangspunkt zu verwenden. Die Entscheidungsflussdiagramme könnten angepasst, eventuell vereinfacht und für die Beurteilung von belasteten Gewässern und Sedimenten ergänzt oder dupliziert werden. Um Testbatterien für Wasser und Sedimente zu testen wären Fallstudien an belasteten «Pilot»-Standorten empfehlenswert.

5 Bibliographische Referenzen

- Abegglen C, Escher B, Hollender J, Koepke S, Ort C, Peter A, Siegrist H, von Gunten U, Zimmermann S, Koch M, Niederhauser P, Schärer M, Braun C, Gälli R, Junghans M, Brocker S, Moser R, Rensch D (2009) Ozonung von gereinigtem Abwasser. Schlussbericht Pilotversuch Regensdorf, Eawag.
- AFNOR (2010) Qualité de l'eau – Détermination de la toxicité des sédiments d'eau douce vis-à-vis de *Chironomus riparius* - Partie 1 : sédiments naturels. NF T 90-339-1. Association Française de Normalisation.
- AFNOR (2020a) Qualité de l'eau — Mesures moléculaires, physiologiques et comportementales chez le gammare (crustacé amphipode) — Partie 1 : Dosage de l'activité enzymatique acétylcholinestérase (AChE). XP T 90-722-1. Association Française de Normalisation.
- AFNOR (2020b) Qualité de l'eau — Mesures moléculaires, physiologiques et comportementales chez le gammare (crustacé amphipode) — Partie 2 : Mesure de marqueurs de reproduction. XP T 90-722-2. Association Française de Normalisation.
- AFNOR (2020c) Qualité de l'eau — Mesures moléculaires, physiologiques et comportementales chez le gammare (crustacé amphipode) — Partie 3 : Mesure du taux d'alimentation. XP T 90-722-3. Association Française de Normalisation.
- AFNOR (2023) Qualité de l'eau — Encagement in situ de gammares pour la mesure de la bioaccumulation de substances chimiques NF T90-721. Association Française de Normalisation.
- Ahlf W, Hollert H, Neumann-Hensel H, Ricking M (2002) A guidance for the assessment and evaluation of sediment quality: a German Approach based on ecotoxicological and chemical measurements. *Journal of Soils and Sediments* 2, 37-42.
- Alias C, Cioli F, Abbà A, Feretti D, Sorlini S (2024) Ecotoxicological assessment of waste foundry sands and the application of different classification systems. *Integrated Environmental Assessment and Management* 20, 2294-2311.
- Apitz S (2011) Integrated Risk Assessments for the Management of Contaminated Sediments in Estuaries and Coastal Systems. *Treatise on Estuarine and Coastal Science*. Ed. Wolanski E and McLusky DS 4, 311-338.
- Arrizabalaga P (1997) Etude des lixiviats de décharges: Approche écotoxicologique. . Rapport de la Commission internationale de protection des eaux du Léman, Campagne 1996: 203-225.
- ASTM (2020) Standard Test Method for Measuring the Toxicity of Sediment-Associated Contaminants with Freshwater Invertebrates.
- Ausili A et al. (2022) Integrated sediment management. Guidelines and good practices in the context of the Water Framework Directive. Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC).
- Babut M, Ferrari B, Durand C, Devin S, Colas F, Garric J, Charlatchka R, Ferard J-F (2016) Vers une démarche graduée d'évaluation écotoxicologique des sédiments fluviaux : présentation et premiers tests. *La Houille Blanche*, 85-100.
- Babut M, Stamm E, Garnier R (2019) Guide pour l'évaluation de la dangerosité des sédiments contaminés en eau douce. Guides et protocoles Agence française pour la biodiversité 41 p.
- BAFU (2020) Belastete Standorte und Oberflächengewässer. Übersicht und Hilfestellung für den Altlastenvollzug. *Vollzug Umwelt* 2015, 60.
- Bataillard P, Michel P, Mossmann J-R, Lefebvre G, Hébrard C (2017) Caractérisation de la dangerosité des sédiments dragués et gérés à terre - principes et méthodes. Rapport final. BRGM/RP-67318-FR, 25.
- Beauvais R, Vivien R, Ferrari BJD, Casado-Martinez MC (2020) État des sédiments de canaux artificiels. *Aqua & Gas* 100, 73-81.
- Beauvais R, Casado C, Ferrari BJD (2024) Analyse des substances per- et polyfluoroalkylées (PFAS) dans les sédiments du Talent et de la Tioleire autour de la piste d'entraînement des sapeurs-pompiers de la Rama, Lausanne, Centre suisse d'écotoxicologie appliquée, Lausanne.

- Becker R, Donnevert G, Römbke J (2007) Biologische Testverfahren zur ökotoxikologischen Charakterisierung von Abfällen. Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes FuE-Vorhaben Förderkennzeichen 206 33 302. Publikationen des Umweltbundesamtes.
- BfG (2017) Handlungsanweisung für den Umgang mit Baggergut aus Bundeswasserstraßen im Binnenland (HABAB-WSV 2017. Bundesamt für Gewässerkunde.
- Breedveld G, Ruus A, Bakke T, Kibsgaard A, Arp HP (2015) Veileder for risikovurdering av forurenset sediment - Guidelines for risk assessment of contaminated sediments. Norges geotekniske institutt, Norsk institutt for vannforskning 409, 106.
- Bundesgesetz über den Umweltschutz (Umweltschutzgesetz, USG) vom 7. Oktober 1983. RS 814.01.
- Bundschuh M, Pierstorf R, Schreiber WH, Schulz R (2011) Positive effects of wastewater ozonation displayed by *in situ* bioassays in the receiving stream. Environmental Science & Technology 45, 3774-80.
- BUWAL (1999) Anwendung ökotoxikologischer Testverfahren auf Sickerwasser und Eluate von belasteten Standorten. Vollzug Umwelt 220, 41.
- BUWAL (2000) Pflichtenheft für die technische Untersuchung von belasteten Standorten. Vollzug Umwelt VU-3406-D, 24
- Carere M et al. (2021) Technical Proposal for Effect-Based Monitoring and Assessment under the Water Framework Directive.
- Casado-Martinez C, Beauvais R, Ferrari BJD, Cirelli S, Schaad EJ, Chiaia-Hernandez AC, Höss S, Loizeau J-L (2023) Évaluation de la qualité des sédiments. Projet pilote d'application d'une batterie de bioessais à l'échelle nationale. Aqua & Gas 103, 34-41.
- Casado C, Wildi M, Ferrari BJD, Werner I (2021) Stratégie d'évaluation de la qualité des sédiments en Suisse. Étude élaboré sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement, Centre suisse d'écotoxicologie appliquée.
- CE (2000) Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau.
- CE (2008) Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE).
- CE (2010) Guidance on chemical monitoring of sediment and biota under the Water Framework Directive. Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC), Guidance Document No. 25. Office for Official Publications in the European Communities, Luxembourg.
- CE (2018) European Technical Guidance document (TGD) for Deriving Environmental Quality Standards. Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC). Guidance Document No. 27. Technical Report-96 2011-055. Update 2018. Office for Official Publications in the European Communities, Luxembourg.
- CE (2022) Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL amending Directive 2000/60/EC establishing a framework for Community action in the field of water policy, Directive 2006/118/EC on the protection of groundwater against pollution and deterioration and Directive 2008/105/EC on environmental quality standards in the field of water policy.
- Chapman PM (1990) The sediment quality triad approach to determining pollution-induced degradation. Science of The Total Environment 97-98, 815-825.
- Chial B, Persoone G (2002) Cyst-based toxicity tests XIV--application of the ostracod solid-phase microbioassay for toxicity monitoring of river sediments in Flanders (Belgium). Environ Toxicol 17, 533-7.
- Clément B (1994) La toxicité aiguë des lixiviats de décharge, apports respectifs et complémentarité des approches biologique et physico-chimique., Université de Savoie, France.
- Clément B, Guido P, Colin J, Le Dû-Delepierre A (1996) Estimation of the hazard of landfills through toxicity testing of leachates—I. Determination of leachate toxicity with a battery of acute tests. Chemosphere 33, 2303-2320.
- Clément B, Colin JR, Anne LD-D (1997) Estimation of the hazard of landfills through toxicity testing of leachates: 2. Comparison of physico-chemical characteristics of landfill

- leachates with their toxicity determined with a battery of tests. *Chemosphere* 35, 2783-2796.
- Connon RE, Geist J, Werner I (2012) Effect-based tools for monitoring and predicting the ecotoxicological effects of chemicals in the aquatic environment. *Sensors (Basel)* 12, 12741-71.
- Coördinatiecommissie_Integraal_Waterbeleid (2020) Voorontwerp Vlaams sedimentbeheerconcept voor het Schelde- en Maasstroomgebiedsdistrict 2022-2027.
- de Deckere E, De Cooman W, Florus M, Devroede-Vander Linden M (2000) Characterising the beds of Flemish Watercourses: a Manual. Ministry of the Flemish Community and the Vlaamse Milieumaatschappij.
- De Lange HJ, De Haas EM, Maas H, Peeters ETHM (2005) Contaminated sediments and bioassay responses of three macroinvertebrates, the midge larva *Chironomus riparius*, the water louse *Asellus aquaticus* and the mayfly nymph *Ephoron virgo*. *Chemosphere* 61, 1700-1709.
- Deutsches Institut fN (2003) Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Suborganismische Testverfahren (Gruppe T) - Teil 6: Giftigkeit gegenüber Fischen; Bestimmung der nicht akut giftigen Wirkung von Abwasser auf die Entwicklung von Fischeiern über Verdünnungsstufen (T 6). DIN 38415-6.
- Deutsches Institut für Normung (1999) Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Testverfahren mit Wasserorganismen (Gruppe L) - Teil 37: Bestimmung der Hemmwirkung von Wasser auf das Wachstum von Bakterien (*Photobacterium phosphoreum*; Zellvermehrungs-Hemmtest) (L 37). DIN 38412-L37.
- Dilmi J, Bounenni R, Gervasi D, Howald C, Baumann S, Vermeirssen E (2023) Hormonaktive Flüssigkunststoffe in Bauabfällen Wie problematisch ist die Entsorgung von Flüssigkunststoffhaltigen Bauabfällen auf Deponien B? . Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU).
- Environnement_Canada (2008) Cadre décisionnel pour Canada-Ontario concernant l'évaluation des sédiments contaminés des Grands Lacs. En164-14/2007F-PDF.
- Environnement_Canada (2017) Méthode d'essai biologique : Essai de survie, de croissance et de reproduction de l'amphipode dulcicole *Hyalella azteca* dans les sédiments et l'eau.
- Ferrari BJD, Vermeirssen E, Simon E, Bucher T, Santiago S (2017) Projet Kartox : Ecotoxicité des eaux issues d'exutoires karstiques évaluée à l'aide de tests *in vitro* et *in vivo*. Etude réalisée sur mandat de l'OFEV. Centre suisse d'écotoxicologie appliquée, Lausanne.
- Gewässerschutzverordnung (GSchV) vom 28. Oktober 1998. RS 814.201.
- Grelot J, Wunderlin P, Bleny H (2020) Abklärungen Verfahrenseignung Ozonung - Erkenntnisse aus mehrjährigen Erfahrungen. *Aqua & Gas*, 48-57.
- Hermanns-Stengele R, Moser R (2012) Exigences applicables au déversement du lixiviat de décharge. Recommandations relatives à son évaluation, à son traitement et à son déversement. Office fédéral de l'environnement, Berne. L'environnement pratique 1223, 62.
- Hin JA, Osté LA, Schmidt CA (2010) Methods to determine to what extent the realization of water quality objectives of a water system is impeded by contaminated sediments. Guidance Document for Sediment Assessment. Dutch Ministry of Infrastructure and the Environment.
- HLUG (2014) Ökotoxikologische Verfahren als Bewertungshilfe bei Altlastenverfahren. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie. Handbuch Altlasten Band 3, Teil 8.
- Ingersoll CG, Steevens JA, MacDonald DD (2013) Evaluation of Toxicity to the Amphipod, *Hyalella azteca*, and to the Midge, *Chironomus dilutus*; and Bioaccumulation by the Oligochaete, *Lumbriculus variegatus*, with Exposure to PCB-Contaminated Sediments from Anniston, Alabama. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2013–5125.
- ISO (1995) Qualité de l'eau — Essai d'inhibition de la croissance de *Pseudomonas putida* (Essai d'inhibition de la multiplication des cellules de *Pseudomonas*). ISO 10712:1995.
- ISO (2000a) Qualité de l'eau — Détermination de la génotoxicité des eaux et des eaux résiduelles à l'aide de l'essai umu. ISO 13829:2000.
- ISO (2000b) Qualité de l'eau — Détermination de la toxicité à long terme de substances vis-à-vis de *Daphnia magna* Straus (Cladocera, Crustacea). ISO 10706:2000.

- ISO (2005a) Qualité de l'eau — Détermination de la génotoxicité des eaux et des eaux résiduelles — Essai de *Salmonella*/microsome (essai d'Ames). ISO 16240:2005.
- ISO (2005b) Qualité de l'eau — Détermination de l'effet toxique des constituants de l'eau et des eaux résiduelles vis-à-vis des lentilles d'eau (*Lemna minor*) — Essai d'inhibition de la croissance des lentilles d'eau. ISO 20079:2005.
- ISO (2007a) Qualité de l'eau — Détermination de l'effet inhibiteur d'échantillons d'eau sur la luminescence de *Vibrio fischeri* (Essai de bactéries luminescentes). ISO 11348:2007.
- ISO (2007b) Qualité de l'eau — Détermination de la toxicité aiguë des eaux résiduelles vis-à-vis des oeufs de poisson-zèbre (*Danio rerio*) ISO 15088:2007.
- ISO (2008a) Qualité de l'eau — Détermination de la toxicité chronique vis-à-vis de *Ceriodaphnia dubia*. ISO 20665:2008.
- ISO (2008b) Qualité de l'eau — Détermination de la toxicité chronique vis-à-vis de *Brachionus calyciflorus* en 48 h. ISO 20666:2008.
- ISO (2010) Qualité de l'eau — Détermination cinétique des effets inhibiteurs des échantillons de sédiment, autres solides et des échantillons colorés sur la luminescence de *Vibrio fischeri* (essai cinétique de bactéries luminescentes). ISO 21338:2010.
- ISO (2011) Qualité de l'eau — Détermination de la toxicité aiguë envers *Thamnocephalus platyurus* (Crustacea, Anostraca). ISO 14380:2011.
- ISO (2012a) Qualité de l'eau — Essai d'inhibition de la croissance des algues d'eau douce avec des algues vertes unicellulaires. ISO 8692:2012.
- ISO (2012b) Qualité de l'eau — Détermination de l'inhibition de la mobilité de *Daphnia magna* Straus (Cladocera, Crustacea) — Essai de toxicité aiguë. ISO 6341:2012.
- ISO (2012c) Qualité de l'eau — Évaluation de la génotoxicité des eaux résiduelles — Essai de *Salmonella*/microsome (essai d'Ames-fluctuation). ISO 11350:2012.
- ISO (2012d) Qualité de l'eau — Détermination de la toxicité des sédiments d'eau douce envers *Heterocypris incongruens* (Crustacea, Ostracoda). ISO 14371:2012. International Organization for Standardization.
- ISO (2013a) Qualité de l'eau — Détermination de la toxicité des sédiments d'eau douce vis-à-vis de *Hyalella azteca*. ISO 16303:2013.
- ISO (2013b) Qualité de l'eau — Détermination de l'effet toxique des sédiments sur la croissance de *Myriophyllum aquaticum*. ISO 16191:2013.
- ISO (2016) Qualité du sol — Détermination des effets toxiques des polluants sur la germination et les premiers stades de croissance des végétaux supérieurs. ISO 18763:2016.
- ISO (2017a) Qualité du sol — Procédure d'évaluation des risques écologiques spécifiques au site de la contamination des sols (approche TRIADE de la qualité du sol). ISO 19204:2017.
- ISO (2017b) Qualité de l'eau — Détermination des effets d'inhibition sur la croissance de la lentille d'eau *Spirodela polyrhiza* par les eaux usées, les eaux naturelles et les produits chimiques — Méthode utilisant un bioessai miniaturisé indépendant d'une culture mère. ISO 20227:2017.
- ISO (2018a) Qualité de l'eau — Détermination du potentiel œstrogène de l'eau et des eaux résiduelles. Partie 2: Test d'œstrogénicité (A-YES, *Arxula adenivorans*). ISO 19040-2:2018.
- ISO (2018b) Qualité de l'eau — Détermination du potentiel oestrogène de l'eau et des eaux résiduelles. Partie 3: Essai *in vitro* sur cellules humaines avec gène rapporteur. ISO 19040-3:2018.
- ISO (2018c) Qualité de l'eau — Détermination du potentiel œstrogénique de l'eau et des eaux résiduelles. Partie 1: Essai d'œstrogénicité sur levures (*Saccharomyces cerevisiae*). ISO 19040-1:2018.
- ISO (2019) Qualité de l'eau — Détermination de la toxicité aiguë d'échantillons d'eau et de produits chimiques vis-à-vis de la lignée cellulaire de branchies de poissons (RTgill-W1). ISO 21115:2019.
- ISO (2020) Qualité de l'eau et du sol — Détermination de l'effet toxique d'échantillons de sédiment et de sol sur la croissance, la fertilité et la reproduction de *Caenorhabditis elegans* (Nematodes). ISO 10872:2020
- ISO (2024) Qualité du sol — Essai contact pour échantillons solides utilisant l'activité déshydrogénase de *Arthrobacter globiformis*. ISO 18187:2024.

- Keiter S, Peddinghaus S, Feiler U, von der Goltz B, Hafner C, Ho NY, Rastegar S, Otte JC, Ottermanns R, Reifferscheid G, Strähle U, Braunbeck T, Hammers-Wirtz M, Hollert H (2010) DanTox—a novel joint research project using zebrafish (*Danio rerio*) to identify specific toxicity and molecular modes of action of sediment-bound pollutants. *Journal of Soils and Sediments* 10, 714-717.
- Kienle C, DiPaolo C, Tropiano D, Santiago S (2009) Ökotoxikologische Beurteilung des Sickerwassers einer Deponie, Oekotoxzentrum, Eawag/EPFL.
- Kienle C, Kase R, Werner I (2011) Evaluation of bioassays and wastewater quality. *In vitro* and *in vivo* bioassays for the performance review in the project "Strategy micropoll", Swiss Centre for Applied Ecotoxicology (Ecotox Centre), Eawag-EPFL.
- Kienle C, Gauch R, Vermeirssen E, Werner I (2015a) Methoden zur Beurteilung der Wasserqualität anhand von ökotoxikologischen Biotests. Ergebnisse einer Literaturrecherche und einer Expertenbefragung, Oekotoxzentrum, Schweizerisches Zentrum für angewandte Ökotoxikologie Eawag-EPFL.
- Kienle C, Kase R, Schärer M, Werner I (2015b) Ökotoxikologische Biotests. Anwendung von Biotests zur Evaluation der Wirkung und Elimination von Mikroverunreinigungen. *Aqua & Gas* 95, 18-26.
- Kienle C, Vermeirssen E, Kunz P, Werner I (2015c) Grobbeurteilung der Wasserqualität von abwasserbelasteten Gewässern anhand von ökotoxikologischen Biotests. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Oekotoxzentrum, Schweizerisches Zentrum für angewandte Ökotoxikologie Eawag-EPFL.
- Kienle C, Vermeirssen ELM, Schifferli A, Singer H, Stamm C, Werner I (2019) Effects of treated wastewater on the ecotoxicity of small streams – Unravelling the contribution of chemicals causing effects. *PLOS ONE* 14, e0226278.
- Kienle C, Werner I, Fischer S, Lüthi C, Schifferli A, Besselink H, Langer M, McArdell CS, Vermeirssen ELM (2022) Evaluation of a full-scale wastewater treatment plant with ozonation and different post-treatments using a broad range of *in vitro* and *in vivo* bioassays. *Water Research* 212, 118084.
- Kienle C, Beauvais R, Casado-Martinez C, Voisin A-S, Werner I, Vermeirssen E, Ferrari B (2023a) Ökotoxikologische Biotests und -marker. Biologische effektbasierte Methoden zur Beurteilung der Wasser- und Sedimentqualität. *Aqua & Gas* 103, 18-22.
- Kienle C, Bramaz N, Schifferli A, Olbrich D, Werner I, Vermeirssen E (2023b) Beurteilung der Wasserqualität mit einer Biotestbatterie. *Aqua & Gas* 103, 24-33.
- Kienle C, Bramaz N, Bürgmann H, Christen V, Fischer M, Langer M, Okoniewski N, Schifferli A, Schirmer K, Vivien R, Wälchli D, Züger D, Vermeirssen E, Ferrari B (2024) Effektbasierte Wirkungskontrolle der Dünnern vor und nach Ausbau der ARA Falkenstein – Untersuchungen vor Ausbau. , Schweizerisches Zentrum für angewandte Ökotoxikologie, Dübendorf.
- Kizgin A, Schmidt D, Joss A, Hollender J, Morgenroth E, Kienle C, Langer M (2023) Application of biological early warning systems in wastewater treatment plants: Introducing a promising approach to monitor changing wastewater composition. *Journal of Environmental Management* 347, 119001 (12 pp.).
- Kizgin A, Schmidt D, Bosshard J, Singer H, Hollender J, Morgenroth E, Kienle C, Langer M (2024) Integrating Biological Early Warning Systems with High-Resolution Online Chemical Monitoring in Wastewater Treatment Plants. *Environmental Science & Technology* 58, 23148-23159.
- LUBW (2004a) Ökotoxikologische Charakterisierung von Abfall – Literaturstudie. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.
- LUBW (2004b) Ökotoxikologische Charakterisierung von Abfall – Verfahrensentwicklung für die Festlegung des Gefährlichkeitskriteriums „ökotoxisch (H14)“. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.
- Manier N, Ait-Aïssa S, Pandard P (2023) Inventaire et évaluation des méthodes biologiques issues de l'écotoxicologie en vue de leur utilisation dans le cadre de la DCE. Rapport AQUAREF, 66 p.
- Margot J, Kienle C, Magnet A, Weil M, Rossi L, de Alencastro LF, Abegglen C, Thonney D, Chèvre N, Schärer M, Barry DA (2013) Treatment of micropollutants in municipal wastewater:

- ozone or powdered activated carbon? Science of The Total Environment 461-462, 480-498.
- MELCCFP_Canada (2016) Guide de caractérisation physico-chimique et toxicologique des sédiments. Ministère du développement durable, de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques.
- Mouvet C (2013) Test du protocole d'écotoxicologie (critère H14) pour l'évaluation du caractère dangereux de sédiments destinés à une gestion à terre. Rapport final. BRGM/RP-61420-FR, 51.
- OECD (1992) Test No. 203: Fish, Acute Toxicity Test.
- OECD (2006) Test No. 221: *Lemna sp.* Growth Inhibition Test
- OECD (2007) Test No. 225: Sediment-Water *Lumbriculus* Toxicity Test Using Spiked Sediment
- OECD (2010) Test No. 233: Sediment-Water Chironomid Life-Cycle Toxicity Test Using Spiked Water or Spiked Sediment.
- OECD (2013) Test No. 236: Fish Embryo Acute Toxicity (FET) Test.
- OECD (2014) Test No. 239: Water-Sediment *Myriophyllum spicatum* toxicity Test.
- OECD (2016) Test No. 242: *Potamopyrgus antipodarum* Reproduction Test.
- OECD (2021) Test No. 455: Performance-Based Test Guideline for Stably Transfected Transactivation *In Vitro* Assays to Detect Estrogen Receptor Agonists and Antagonists.
- OECD (2023a) Test No. 218: Sediment-Water Chironomid Toxicity Using Spiked Sediment.
- OECD (2023b) Test No. 458: Stably Transfected Human Androgen Receptor Transcriptional Activation Assay for Detection of Androgenic Agonist and Antagonist Activity of Chemicals.
- OSPAR (1992) Convention du 22 septembre 1992 pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est (RS 0.814.293).
- OSPAR (2007) Practical Guidance Document on Whole Effluent Assessment. OSPAR Commission.
- OVAM (2022) Examination of water bottom and banks - Code of good practice. www.ovam.be.
- Pronk TE, de Baat ML, van der Berg SJP, van der Oost R (2021) Achtergronddocument Basis-Set Bioassay Selectie. Achtergronddocument beschikbare kennis bij de sleutelfactor Toxiciteit. Versie 1, 21 december 2021. . KIWK-Toxiciteit Notitie. Amersfoort, Nederland. Kennis Impuls Water Kwaliteit.
- Roig N, Sierra J, Nadal M, Moreno-Garrido I, Nieto E, Hampel M, Gallego EP, Schuhmacher M, Blasco J (2015) Assessment of sediment ecotoxicological status as a complementary tool for the evaluation of surface water quality: the Ebro river basin case study. Science of The Total Environment 503, 269-278.
- Salomons W, Brils J, contractors S, Panel SS, participants S (2004) Contaminated Sediments in European River Basins. European Sediment Research Network.
- Santiago S, Becker van Slooten K, Chèvre N, Pardos M, Bennighoff C, Dumas M, Thybaud E, Garrivier F (2002) Guide pour l'utilisation des tests écotoxicologiques avec les daphnies, les bactéries luminescentes et les algues vertes, appliqués aux échantillons de l'environnement. Groupe de travail Tests écotoxicologiques de la CIPEL.
- Santiago S (2004) Suivi analytique des eaux liées à la décharge (Combe-de-Ville, Sainte-Croix, Vaud). Rapport d'analyses 2001-2003, Soluval Santiago.
- Scheibel H-J, Harborth PDB, Lang E, Hanert HHPD (1991) Einsatz des Leuchtbakterien- und Daphnien-tests zur toxikologischen Bewertung von Grundwasser- und Bodenreinigung bei der Altlastensanierung.
- Schindler Wildhaber Y, Mestankova H, Schärer M, Schirmer K, Salhi E, von Gunten U (2015) Novel test procedure to evaluate the treatability of wastewater with ozone. Water Research 75, 324-335.
- Severin M, Josefsson S, Nilsson P, Ohlsson Y, Stjärne A, Wernersson A-S (2018) Förorenade sediment-behov och färdplan för en renare vattenmiljö. Uppsala, SE: Taylor & Francis Online.
- Stalter D, Magdeburg A, Weil M, Knacker T, Oehlmann J (2010) Toxication or detoxication? In vivo toxicity assessment of ozonation as advanced wastewater treatment with the rainbow trout. Water Research 44, 439-48.

- Sternbeck J, Aquilonius K, Josefsson K, Marelus F, Petsonk A (2008) Strategi för miljöriskbedömning av förorenade sediment. "Stratégie d'évaluation des risques environnementaux liés aux sédiments contaminés". Naturvårdsverket rapport 5886.
- UBA (2013) Handlungsempfehlung zur ökotoxikologischen Charakterisierung von Abfällen. Deutsche Umweltbundesamt.
- USEPA (1997) Ecological Risk Assessment Guidance for Superfund: Process for Designing and Conducting Ecological Risk Assessments. EPA540-R-97-006. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC.
- USEPA (1999) Ecological risk assessment and risk management principles for Superfund sites. EPA540-R-97-006. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Emergency and Remedial Response. Washington DC. OSWER Directive 9285.7, 28.
- USEPA (2000) Methods for Measuring the Toxicity and Bioaccumulation of Sediment-associated Contaminants with Freshwater Invertebrates. EPA 600/R-99/064. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development Mid-Continent Ecology Division, Duluth, Minnesota and Office of Science and Technology, Office of Water. Washington, D.C.
- van der Burg B, van der Linden S, Man H-y, Winter R, Jonker L, van Vugt-Lussenburg B, Brouwer A (2013) A Panel of Quantitative Calux® Reporter Gene Assays for Reliable High-Throughput Toxicity Screening of Chemicals and Complex Mixtures, High-Throughput Screening Methods in Toxicity Testing, pp. 519-532.
- Verordnung über die Sanierung von belasteten Standorten (Altlasten-Verordnung, AltIV) vom 26. August 1998. RS 814.680.
- Vito (2024) Ecotoxicologisch onderzoek waterbodem – voorstel pilootstudie. "Étude écotoxicologique du sédiment - proposition d'étude pilote" Draft rapport – fase I van project. Studie uitgevoerd in opdracht van OVAM.
- Voisin A-S, Fasel M, Beauvais R, Kienle C, Ferrari B, Werner I (2023) Un outil biomarqueurs pour la surveillance de la qualité de l'eau avec la truite de rivière. Aqua & Gas 103, 42-48.
- Völker J, Stapf M, Miehe U, Wagner M (2019) Systematic Review of Toxicity Removal by Advanced Wastewater Treatment Technologies via Ozonation and Activated Carbon. Environmental Science & Technology 53, 7215-7233.
- Wernersson AS, Maggi C, Carere M. Technical report on aquatic effect-based monitoring tools. Technical Report 2014–077. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities; 2014.
- Wunderlin P, Mestankova H, Salhi E, Schindler Wildhaber Y, Schärer M, Schirmer K, von Gunten U (2015) Behandelbarkeit von Abwasser mit Ozon. Testverfahren zur Beurteilung. Aqua & Gas 95, 28-38.

Anhang: Beispiele von wissenschaftlichen Studien über die Sanierung und Überwachung von schadstoffbelasteten Sedimenten.

Kontext	Ökotoxikologische Tests	Schlussfolgerungen	Referenzen
Sanierungsbedarf / Zustrom-Abstrom-Vergleich Gerberei in Brasilien starke Chrombelastung der Sedimente	Triaden-Ansatz: Mortalitätstest mit Zuckmücken (<i>Chironomus xanthus</i>) und Reproduktion von Daphnien (<i>Ceriodaphnia silvestrii</i>), benthische Makrofauna-Gemeinschaften, chemische Analysen	Die kontaminierten Sedimente führten zum Absterben der Zuckmücken und zu Deformationen der Mundwerkzeuge, was eine Gefährdung der benthischen Organismen belegt.	Alves & Rietzler 2015
Wahl der Sanierung / Wirksamkeit von Massnahmen Test der Bioremediation von künstlich mit Rohöl kontaminierten Süßwassersedimenten in Québec, Kanada	Mortalität und Wachstumshemmung von Ostracoden (<i>H. incongruens</i> , <i>H. azteca</i>)	Der Test mit Ostrakoden erwies sich als mindestens so empfindlich wie der Amphipoden-Test. Effektives Werkzeug zum Testen verschiedener Behandlungen. Die Mortalität der Organismen nimmt mit der Zeit nach der Behandlung ab.	Chial et al. 2003
Wirksamkeit der Massnahmen Mikrobielle Sanierung von Sedimenten, die mit Metallen kontaminiert sind	Mortalität, Wachstums- und Fortpflanzungshemmung, Absterben von Keimbahnzellen und Bioakkumulation von Metallen bei <i>C. elegans</i>	Biotests zeigten in Übereinstimmung mit der Beurteilung des ökologischen Risikos einen Rückgang der Toxizität nach der Sanierung.	How et al. 2023
Wahl der Sanierung Dekontamination von Sedimenten im Industriehafen von Venedig	Lumineszenzhemmtest mit <i>Vibrio fischeri</i> (Microtox®) und Test auf Überleben und Missbildungen von Embryonen der Auster <i>Crassostrea gigas</i> (Elutriatetest)	Einige der getesteten Technologien konnten die Toxizität der Sedimente nicht signifikant verringern, was möglicherweise mit der Mobilität und der Bioverfügbarkeit der verbleibenden Schadstoffpotenziale zusammenhängt.	Libralato et al. 2018
Wirksamkeit der Massnahmen Nachsorge des ökotoxikologischen Potenzials nach Einstellung der Emissionen von Industrieabwässern	Triadenansatz zum Vergleich von Standorten mit steigendem Kontaminationsgrad und Referenzstandort: Mortalitäts- und Bioakkumulationstests (Labor) und Vielfalt der benthischen Makrofauna	Trotz der Beendigung der Einleitungen sind die Sedimente auch nach 10 Jahren noch kontaminiert, was zu Mortalität, Bioakkumulation von Metallen und Veränderungen der bestehenden Gemeinschaften führt.	Lopes et al. 2014
Überwachung Einwirkung auf Sedimente infolge von Grundwasserfahnen und verschmutzten Deponien	<i>In-situ</i> -Überlebenstest mit <i>H. azteca</i> und <i>C. riparius</i> (Käfige teilweise im Sediment versenkt)	Vielversprechende Ergebnisse, die jedoch durch Labortests und chemische Analysen ergänzt werden sollten.	Roy & Grapentine 2024

Anhang (Fortsetzung).

Kontext	Ökotoxikologische Tests	Schlussfolgerungen	Referenzen
Überwachung nach der Sanierung Anwendung der TIE-Methode für «toxicity identification evaluation» nach der Sanierung eines stark verschmutzten Flusses	Kombination aus chemischer Analyse und <i>In-vivo</i> -Test. Hier Anwendung des akuten Toxizitätstests mit <i>H. azteca</i> an Sedimenten und Porenwasser	Der Ansatz identifizierte die nach der Sanierung verbleibenden toxischen Verbindungen Ammoniak, Metalle und PAK im Porenwasser.	Wang et al. 2021
Sanierungsbedarf / Wirksamkeit der Massnahmen. Mit Metallen und PAK belastete Sedimente von Wasserstrassen in Amsterdam, NL; obwohl die Schadstoffquellen behandelt oder saniert wurden, keine deutliche Verbesserung in 10 Jahren	25 Sedimentproben wurden an 4 Organismen in Tests auf chronische Toxizität getestet	Schwerwiegende Auswirkungen wurden bei Ostrakoden, Zuckmücken und Würmern beobachtet, deren Überleben, Wachstum oder Fortpflanzung um mehr als 50 % verringert wurde. Es wurde geschlussfolgert, dass jede Massnahme zur Behebung bzw. Entfernung des kontaminierten Sediments einen positiven Effekt auf das benthische Leben haben wird.	Projekt geleitet von Eco-fide (OVAM 2022)
Nach der Sanierung PCB-kontaminierte Sedimente	Die erste Phase der Sanierung der Sedimente führte zu einer Verringerung der PCB-Konzentrationen an diesem Standort. Obwohl die Sedimente keine erhöhte Sterblichkeit mehr verursachen, wurden bei langfristigen Expositionen (in Verbindung mit hohen Metall-, PCB- und PAK-Konzentrationen) subletale Effekte der Schadstoffe in den Sedimenten dieses Standorts auf Amphipoden beobachtet.		Kemble et al. 2000

Referenzen

- Alves RH, Rietzler AC (2015) Ecotoxicological evaluation of sediments applied to environmental forensic investigation. *Brazilian Journal of Biology* 75, 886-893.
- Chial BZ, Persoone G, Blaise C (2003) Cyst-based toxicity tests. XVIII. Application of ostracodtoxkit microbiotest in a bioremediation project of oil-contaminated sediments: sensitivity comparison with *Hyalella azteca* solid-phase assay. *Environmental Toxicology* 18, 279-83.
- How CM, Kuo Y-H, Huang M-L, Liao VH-C (2023) Assessing the ecological risk and ecotoxicity of the microbially mediated restoration of heavy metal-contaminated river sediment. *Science of The Total Environment* 858, 159732.
- Kemble NE, Hardesty DG, Ingersoll CG, Johnson BT, Dwyer FJ, MacDonald DD (2000) An Evaluation of the Toxicity of Contaminated Sediments from Waukegan Harbor, Illinois, Following Remediation. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 39, 452-461.
- Libralato G, Minetto D, Lofrano G, Guida M, Carotenuto M, Aliberti F, Conte B, Notarnicola M (2018) Toxicity assessment within the application of in situ contaminated sediment remediation technologies: A review. *Science of The Total Environment* 621, 85-94.
- Lopes ML, Rodrigues AM, Quintino V (2014) Ecological effects of contaminated sediments following a decade of no industrial effluents emissions: The Sediment Quality Triad approach. *Marine Pollution Bulletin* 87, 117-130.
- OVAM (2022) Examination of water bottom and banks - Code of good practice. www.ovam.be.
- Roy JW, Grapentine L (2024) Insights into *In Situ* Benthic Caging Tests for Ecotoxicity Assessments Targeting Discharging Groundwater Contaminant Plumes. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 87, 78-93.
- Wang BR, Dahms HU, Wu MC, Jhuo NJ, Hsieh CY (2021) After remediation - Using toxicity identification evaluation of sediment contamination in the subtropical Erren river basin. *Chemosphere* 262, 127772.