



Kanton Zürich
Baudirektion
**Amt für
Abfall, Wasser, Energie und Luft**
Abfallwirtschaft und Betriebe / Gewässerschutz / Wasserbau

Methoden zur Untersuchung von belasteten Standorten in Seen

AWEL Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft

Dr. von Moos AG

Oktober 2016

Dr. von Moos AG

Geotechnisches Büro

Beratende Geologen und Ingenieure

8037 Zürich / 5401 Baden / 8214 Gächingen www.geovm.ch



**Kanton Zürich
Baudirektion
Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft**



Inhalt

1.	Einführung	4
2.	Ziele des Berichts	4
3.	Im See betroffene Schutzziele	4
4.	Beurteilungskriterien	5
4.1	Kriterien für das Schutzziel aquatische Umwelt	5
4.2	Kriterien für das Schutzziel Mensch	7
5.	Historische Untersuchung des landseitigen Standortes	7
6.	Evaluation von Untersuchungsmethoden	8
7.	Generell geeignete Untersuchungsmethoden	11
7.1	Bathymetrie	11
7.2	Feststoffproben und Analytik	11
7.2.1	Feststoffbeprobung aus Sedimentkernen	11
7.2.2	Feststoffbeprobung durch Taucher	13
7.2.3	Feststoffbeprobung im unmittelbaren Uferbereich	14
7.2.4	Aufbereitung der Feststoffproben	14
7.2.5	Analytik Feststoffproben	14
7.3	Wasserproben und Analytik	16
7.3.1	Seewasserproben	16
7.3.2	Porenwasserproben	16
7.3.3	Freisetzungsversuche	16
7.3.4	Analytik Wasserproben	17
7.4	Weitere Untersuchungsmethoden	17
8.	Bewilligungen und Kommunikation	17
9.	Standortbeurteilung	18
10.	Zusammenfassung	18
	Referenzen	19



Autoren/Projektgruppe im Auftrag des AWEL:

Dr. Bettina Flury (Projektleitung)	AWEL, Abfallwirtschaft und Betriebe, Altlasten, Weinbergstrasse 34, 8090 Zürich
Cornelia Menge	AWEL, Abfallwirtschaft und Betriebe, Altlasten, Weinbergstrasse 34, 8090 Zürich
Christian Balsiger	AWEL, Gewässerschutz, Gewässerschutzlabor, Hardturmstrasse 105, 8090 Zürich
Dr. Pius Niederhauser	AWEL, Gewässerschutz, Oberflächengewässerschutz, Hardturmstrasse 105, 8090 Zürich
Dr. Beat Rick	Dr. von Moos AG, Bachofnerstrasse 5, 8037 Zürich
Dr. Stefan Wallier	Dr. von Moos AG, Mäderstrasse 8, 5401 Baden



1. Einführung

Bis in die 60er Jahre gelangten durch unaufbereitetes Siedlungsabwasser und gewerblich genutztes Wasser grosse Mengen nicht oder nur schwer abbaubarer Schadstoffe in die Schweizer Seen. Es resultierten eine diffuse anthropogene Hintergrundbelastung in den Seesedimenten sowie punktuelle Verschmutzungen, die in Einzelfällen ein Risiko für Mensch und Umwelt darstellen.

Im Rahmen eines AWEL-Pilotprojekts wurde unter Einbezug von Experten nach einem geeigneten Vorgehen zur kosten- und aufwandoptimierten Ermittlung von ufernahen Sedimentbelastungen in den Seen des Kantons Zürich gesucht. Die daraus gewonnenen Erfahrungen wurden für Untersuchungen von Belastungen (Erstabklärung für KbS-Eintrag sowie Standortbeurteilung und weitergehende Untersuchungen) im Zürichsee bereits einige Male angewendet. Das generelle Vorgehen, welches im vorliegenden Bericht dokumentiert ist, kann auch auf andere Seen angewendet werden, es wurde aber für den Zürichsee optimiert.

Die Altlastenverordnung (AltIV [2]) ist primär für Standorte an Land ausgelegt. Daher wurden in einem separaten Bericht Kriterien festgelegt, ab wann eine Belastung signifikant über der diffusen Hintergrundbelastung des Zürichsees liegt und als belasteter Standort im See erfasst wird [1]. Weiter wurden der speziellen Situation im See angepasste Beurteilungskriterien erarbeitet, um einen belasteten Standort bezüglich seiner Gefährdung auf Mensch und Umwelt zu beurteilen und gegebenenfalls einen Sanierungsbedarf abzuleiten. Damit besteht in Kombination mit der AltIV eine solide Grundlage zur Erfassung eines belasteten Standortes im See sowie für dessen Gefährdungsabschätzung und altlastenrechtlichen Beurteilung.

2. Ziel des Berichts

Ziel des vorliegenden Dokuments ist, eine generell geeignete Methodik zur Abklärung von Belastungen in Sedimenten der Zürcher Seen aufzuzeigen. Durch das beschriebene Vorgehen werden Daten erhoben, welche gemäss [1] zur Erfassung von Flächen im Kataster der belasteten Standorte und zur Beurteilung und Gefährdungsabschätzung eines belasteten Standorts im See dienen. Für Spezialfälle ist die Vorgehensart gemäss den Standorteigenschaften individuell anzupassen oder zu ergänzen.

3. Im See betroffene Schutzziele

Belastete Seesedimente werden gemäss der Gefährdungsabschätzung und Beurteilung von belasteten Standorten in Seen [1] hinsichtlich der Risiken auf die vorhandenen Schutzziele beurteilt. Die Schutzziele sind:

- **Aquatische Umwelt: ökotoxikologisches Risiko, Gewässerökologie**
- **Mensch: humantoxikologisches Risiko**



Übergeordnet wird der Standort hinsichtlich seiner Auswirkungen auf **Trinkwasserfassungen** und seiner **Langzeitstabilität** bewertet. Dies beinhaltet die Erosionsanfälligkeit bei Seerutschungen, Überschwemmungen und anderen extremen Ereignissen.

4. Beurteilungskriterien

Die Gesamtbeurteilung hinsichtlich eines Handlungsbedarfs erfolgt für jedes Schutzziel aufgrund von Risikofaktoren. Ähnlich wie bei der altlastenrechtlichen Beurteilung am Land werden die Kriterien Schadstoffpotential, Exposition und Freisetzungspotential bewertet. Je nach Gewichtung bzw. Priorität der Risikofaktoren und/oder der Kombination von Gefährdungen besteht ein Sanierungsbedarf.

Für die Bewertung der Auswirkungen von belasteten Ablagerungen im See auf das Schutzziel **aquatische Umwelt** wurden in Zusammenarbeit mit der Eawag folgende Risikofaktoren berücksichtigt [1]:

- Schadstoffpotential = ökotoxikologisches Risiko
- Exposition = Kontakt mit aquatischer Umwelt (u.a. Aufnahme in Nahrungskette)
- Freisetzungspotential = Mobilisierbarkeit von Schadstoffen durch mechanische oder thermische Einwirkungen

Die Methodik zur **humantoxikologischen Gefährdungsabschätzung** von belasteten Seesedimenten wurde durch das Schweizerische Zentrum für Angewandte Humantoxikologie (SCAHT) erarbeitet [1]. Das Gesundheitsrisiko, welches von belasteten Seesedimenten auf den Menschen ausgeht, hängt nicht nur davon ab, wie giftig eine Substanz ist und wie viel davon in der Umwelt vorhanden ist, sondern auch davon, wie viel und auf welchem Weg sie in den menschlichen Körper gelangt (Verschlucken, über die Haut, Einatmen). Bei der Beurteilung des Gesundheitsrisikos müssen besonders empfindliche Bevölkerungsgruppen, wie Ältere, Kranke, Schwangere, Säuglinge und Kinder besonders berücksichtigt werden. Beim Gesundheitsrisiko durch schadstoffbelastete Seen stehen Kleinkinder im Alter von 1-3 Jahren im Vordergrund.

- Schadstoffpotential = zusätzliches Gesundheitsrisiko durch Schadstoffaufnahme
- Exposition = Risiko eines Direktkontaktes mit Schadstoffen

Nachfolgend werden die einzelnen Faktoren kurz beschrieben und die zu ermittelnden Grössen aufgezählt. Ein detaillierter Beschrieb findet sich in [1]. Je nach Ausgangslage (Standorteigenschaften, Schadstoffe etc.) können zusätzliche Grössen ermittelt werden, die zur Beurteilung eines belasteten Standorts im See beitragen.

4.1 Kriterien für das Schutzziel aquatische Umwelt

Schadstoffpotential

Das Schadstoffpotential wird anhand der Schadstoffkonzentration im Sediment, bezogen auf das Trockengewicht, bestimmt (vgl. Tabelle 1). Das ökotoxikologische Risiko wird anhand von anerkannten Richtwerten ermittelt (z.B. TEC: threshold effect concentration und PEC: probable effect concentration [4];).



Exposition

Für den Kontakt zwischen Schadstoffen und Organismen ist die **Einlagerungstiefe der Schadstoffe im Sediment** entscheidend. Der typische Transfer zwischen Schadstoffen im Sediment und dem Ökosystem See erfolgt über den direkten Eintrag in die Nahrungskette und die diffusive Freisetzung von Schadstoffen in gelöster Form.

Freisetzungspotential

Das Freisetzungspotential hängt von der **Wassertiefe**, der **Einlagerungstiefe von Schadstoffen im Sediment** sowie von der **Mobilisierbarkeit der Schadstoffe** ab.

Die **Wassertiefe** spielt für das Risiko einer Schadstoffmobilisierung aus Sedimentschichten eine zentrale Rolle (Wellen bei Sturmereignissen, saisonale Erwärmung, menschliche Einwirkungen).

Die **Einlagerungstiefe** von Belastungen im Sediment ist auch hinsichtlich einer mechanischen Verletzung des Sediments von Bedeutung (z.B. Anker).

Schadstoffe im Sediment sind in verschiedenem Masse wasserlöslich. Gelöste Stoffe im **Porenwasser** können aus dem Sediment ins Seewasser übertreten. Zur Abschätzung dieses Freisetzungspfades wird das Porenwasser des kontaminierten Sediments und das Wasser direkt über der Sediment-Wasser-Grenze beprobt und analysiert.

Durch mechanische Störungen (Rutschungen, Hochwasser, Bagger, Anker etc.) können in kurzer Zeit grosse Mengen an Schadstoffen mobilisiert werden. Um diesem Aspekt Rechnung zu tragen, sollten Tests durchgeführt werden, welche die Schadstofffreisetzung durch eine **Aufwirbelung** simulieren (Freisetzungsversuche).

Tabelle 1: Schutzziel aquatische Umwelt, Beurteilungskriterien, Datenerhebung

Kriterium	Grösse	Datenerhebung, Methodik (Auswahl)
Schadstoffpotential	Schadstoffkonzentration im Sediment	Chemische Analysen an Feststoffproben (z.B. Sedimentkerne, Tauchproben)
Exposition	Einlagerungstiefe im Sediment	Tiefenzonierte Beprobung und Analysen an Feststoffproben aus Sedimentkernen
Freisetzungspotential	Wassertiefe	Bathymetrie, Echolot
	Einlagerungstiefe im Sediment	Tiefenzonierte Beprobung und Analysen an Feststoffproben aus Sedimentkernen
	Schadstoffkonzentration im Porenwasser, im Seewasser	Chemische Analysen an Wasserproben: z.B. Porenwasser, Überstandswasser Sedimentkern, Eluattests bei geeignetem Sediment
	Schadstoffkonzentration im Überstandswasser nach Aufwirbelung	Freisetzungsversuche an Sedimentkernen



4.2 Kriterien für das Schutzziel Mensch

Schadstoffpotential

Ziel ist festzustellen, ob die Schadstoffaufnahme ein Gesundheitsrisiko für den Menschen bzw. für eine besonders empfindliche Bevölkerungsgruppe wie Kleinkinder darstellt. Dabei wird die Schadstoffaufnahme aus dem See mit den **zulässigen gesundheitlich unbedenklichen Grenzwerten** für die einzelnen Schadstoffe sowie mit der **unvermeidbaren Hintergrundbelastung** des Menschen gegenüber den gleichen Chemikalien aus der Atemluft, der Nahrung und anderen Konsumgütern und Gebrauchsgegenständen verglichen (Tabelle 2).

Exposition

Im Rahmen der humantoxikologischen Risikobeurteilung von belasteten Seesedimenten wird beurteilt, ob ein Direktkontakt des Menschen bzw. Kleinkindes mit dem belasteten Sediment möglich ist.

Tabelle 2: Schutzziel Mensch, Beurteilungskriterien, Datenerhebung

Kriterium	Grösse	Datenerhebung, Methodik (Auswahl)
Schadstoffpotential	Schadstoffaufnahme im Vergleich zum Grenzwert und zur unvermeidbaren Hintergrundbelastung	Chemische Analysen an Feststoffproben (z.B. Sedimentkerne, Tauchproben)
Exposition	Wassertiefe	Bathymetrie, Echolot, Doppelmeter

5. Historische Untersuchung des landseitigen Standortes

Eine Belastung im See kann vielfach mit einem landseitigen Standort in Zusammenhang gebracht werden. Die historische Untersuchung des landseitigen Standortes bildet daher eine wichtige Grundlage für die Untersuchung der Seesedimente.

Die historische Untersuchung des landseitigen Standortes dient dazu, die Art der Belastung resp. des Schadstofftyps festzustellen. Sie liefert Hinweise, wie und wo umweltrelevante Stoffe in das Seesediment gelangt sein könnten. Bei Betriebsstandorten sind insbesondere Angaben über Gewässereinleitungen und Versickerungsstellen in Erfahrung zu bringen und Informationen über Prozessabläufe und Stoffflüsse zu erheben. Recherchen sind jedoch nicht immer einfach und manchmal auch nur bedingt möglich. Belastete Standorte sind häufig mehrfach genutzt worden oder es stehen keine relevanten Unterlagen zur Verfügung. Zudem können belastete Seesedimente nicht in jedem Fall eindeutig einem Verursacher zugewiesen werden oder es kommen mehrerer Betriebe in Frage, da diese z.B. die selbe Seeinleitung verwendet haben.

Je umfangreicher das Wissen über einen Standort an Land, desto gezielter kann die technische Untersuchung im See durchgeführt werden (Probenahmestandorte, Art der Probenahme, Analysenprogramm etc).



6. Evaluation von Untersuchungsmethoden

Mit Industrieabwasser und/oder Deponiesickerwasser eingeleitete Stoffe können sich in Abhängigkeit der Stoffeigenschaften und der Beschaffenheit des Abwassers auf mehr oder minder grossen Flächen asymmetrisch um den Einleitungspunkt im See verteilen. Die Mehrheit der abgelagerten Stoffe ist visuell nicht wahrnehmbar (z.B. Schwermetalle) und/oder wird durch unbelastete Sedimente überlagert.

Im Rahmen eines Pilotprojekts wurde die Anwendbarkeit verschiedener Methoden zur Erfassung und Untersuchung von belasteten Seesedimenten im Zürichsee evaluiert (Tabelle 3). Auf generell geeignete Untersuchungsmethoden wird im Kapitel 7 eingegangen.

Tabelle 3: Methodenevaluation zur Erfassung und Untersuchung von belasteten Seesedimenten im Zürichsee

Methoden	Beschreibung/Bemerkung	Eignung
Bathymetrie	Als Bathymetrie bezeichnet man die Vermessung der topographischen Gestalt der Meeres- und Seeböden. Moderne Geräte sind in der Lage, den Seegrund auf wenige Zentimeter genau zu vermessen (z.B. Multibeam-Scanner für Wassertiefen > 5 m, LIDAR evtl. für geringe Wassertiefe, jedoch schwierige Auswertung infolge Wasserpflanzen). Die Auswertung der morphologischen Strukturen erlaubt Rückschlüsse auf Ablagerungen z.B. bei Einleitungen, Umlagerungsprozesse und Massenbewegungen. Die Daten können für digitale Höhenmodelle verwendet werden. Vgl. Kap 7.1	<ul style="list-style-type: none"> - Hochauflösendes Abbild des Seegrunds - Optimierung von Beprobungsrastern - Gefährdungsabschätzung/ Mobilisierbarkeit durch Rutschungen von belasteten Standorten - Daten vom Zürichsee und vieler anderer Schweizer Seen vorhanden - Keine Informationen über Schichtaufbau (z.B. Felslage)
Seismik	Die Reflexionsseismik untersucht durch künstlich erzeugte seismische Wellen den Schichtaufbau des Untergrunds, indem die Wellen an Grenzflächen reflektiert und gebrochen werden. Die Eindringung der Wellen ist relativ tief und die Auflösung verhältnismässig grob, so dass die interessierenden, obersten 1-2 m nicht im Detail aufgelöst werden können. Im Zürichsee wurden bereits systematisch seismische Profile aufgenommen	<ul style="list-style-type: none"> - Geringe Auflösung der obersten Sedimentschichten - Bereits aufgenommene Profile im Zürichsee und anderen Seen können angefordert werden und geben z.B. über die Felslage Auskunft - Höchstens Zusatzinformation hinsichtlich Verfrachtungsmöglichkeit (Rutschpotential) - Keine Probengewinnung



Methoden	Beschreibung/Bemerkung	Eignung
Georadar	In Ergänzung zu Feststoffproben und Analysen kann das Georadar unter Umständen zusätzliche Information über die Ausdehnung von Belastungen geben. Es handelt sich um eine zerstörungsfreie Methode, die insbesondere am Land eingesetzt wird. Das Georadar liefert dreidimensionale Informationen der Sedimentstrukturen und erlaubt daher auch die Berechnung der entsprechenden Volumina. Da sich jedoch die Auflösung mit zunehmender Wassertiefe verringert und tonige Sedimente ein Eindringen der Strahlung in den Untergrund erschweren resp. verunmöglichen, ist der Einsatz des Georadars beschränkt.	<ul style="list-style-type: none"> - Vermutlich nur lokal unter speziellen Rahmenbedingungen geeignet - Indirekte Methode, ergibt keine quantitativen Angaben zur Belastung - Keine Probengewinnung
Bioindikation Wasserpflanzen und Tiere	Wasserpflanzen werden als Bioindikatoren für den Nährstoffgehalt von Gewässern verwendet. Es gibt jedoch keine Grundlagenarbeiten, die den Wasserpflanzenarten Zeigerwerte für Schadstoffe zuordnen. In grösseren Seen beeinflussen zu viele und von Ort zu Ort verschiedene Faktoren das Pflanzenwachstum, so dass nicht direkt auf eine Sedimentbelastung geschlossen werden kann. Ähnliches gilt für auf oder im Sediment lebende Tiere.	<ul style="list-style-type: none"> - Aufwendige Erfassung - Fehlende Grundlagenarbeiten - botanische/zoologische Artenkenntnisse erforderlich - Ab 6 m Tiefe, nimmt die Makrophytendichte rasch ab (Lichtmangel)
Sedimentbe- probung mit Kolbenlot	Von einem Boot aus werden Sedimentkerne gestochen. Die Methode wurde speziell für Seesedimente entwickelt und hat sich in der Forschung und Praxis bewährt (Rammkernbe- probung mit Fallgewicht, in der Seeforschung seit Jahrzehnten etabliert, Eindringtiefe abhängig von Apparatur, Sedimenteigenschaften und Wassertiefe). Vgl. Kap. 7.2.1	<ul style="list-style-type: none"> - Liefert Sedimentproben für spätere Analytik und Tests - Hohe geometrische Genauigkeit (Standort, Sedimenttiefe) - Eindeutige Objektbeschreibung möglich - Zusammenarbeit mit Eawag, ETH oder anderer Seeforschungsinstitution notwendig
Sedimentbe- probung durch Taucher	Der Taucher nimmt oberflächennahe Sedimentproben und erkennt allfällige Anzeichen, die auf Verschmutzungen hindeuten. Vgl. Kap. 7.2.2	<ul style="list-style-type: none"> - Bei guten Sichtverhältnissen machbar - Insbesondere in sensiblen Bereichen einzusetzen (Badeanstalten, untiefer Bereich,) und bei grobkörnigen Untergrundverhältnissen - Probenahme nur oberflächlich und im wenig tiefen Wasser (i.d.R. < 10 m)
Sedimentbe- probung vom Land aus	Vom begehbaren Uferbereich werden oberflächennahe Sedimentproben erhoben. Vgl. Kap. 7.2.3	<ul style="list-style-type: none"> - Bis Wassertiefen von ca. 1 m - Bereiche, in denen Badende direkt mit dem Sediment in Kontakt kommen - Probenahme nur oberflächlich
Analytik Sedi- mentproben	Durch die organische und anorganische chemische Analyse des Sediments können die Belastungen nach Art und Quantität bestimmt werden. Vgl. Kap. 7.2.5	<ul style="list-style-type: none"> - Bestimmung der Art und Konzentration der Belastung (Schadstoffpotential) - Analysen können in akkreditiertem Labor durchgeführt werden



Methoden	Beschreibung/Bemerkung	Eignung
Analytik See-wasserproben	Durch die organische und anorganische chemische Analyse von Wasserproben (z.B. Uferbereich, Wasser direkt über der Sediment-Wasser-Grenze) können die Kontaminationen des Wassers nach Art und Quantität bestimmt werden. Vgl. Kap. 7.3.1	<ul style="list-style-type: none"> - Bestimmung der Art und Konzentration der Belastung - Analysen können in akkreditiertem Labor durchgeführt werden
Porenwasserproben	Durch die organische und anorganische chemische Analyse von extrahiertem Porenwasser (im Labor oder in situ mit Diffusionsschwertern) können Schadstoffe nach Art und Quantität bestimmt werden. Vgl. Kap. 7.3.2	<ul style="list-style-type: none"> - Bestimmung der Art und Konzentration der Belastung - Hinweis auf Schadstofffreisetzung - Analysen können in akkreditiertem Labor durchgeführt werden - Spezialuntersuchungen z.B. durch Eawag (z.B. Diffusionsschwerter)
Ökotoxikologische Labortests	Es existieren standardisierte Labortests, mit welchen nachvollziehbare Aussagen bezüglich einer Beeinflussung der biologischen Aktivität möglich sein sollten. Es sind jedoch keine stoffspezifischen Aussagen, sondern nur allgemeine Hinweise auf vorliegende Belastungen möglich. Beispiele: Ökotox-Kontakttest mit <i>Arthrobacter globiformis</i> , chronischer Toxizitätstest mit <i>Chironomus riparius</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Standardisierte Ökotox-Tests (z.B. DIN 38412 L48) - Nur allgemeiner Hinweis auf Belastung - Spezielles Labor und Geräte nötig - Sediment muss frisch sein - Z.T. lange Testdauer - Z.T. kostenintensiv - Vom AWEL veranlasste Tests an belasteten Sedimenten ergaben keine nutzbaren Ergebnisse
Enzymaktivitätsmessung	Natürlicherweise im Sediment vorhandene Bakterien geben Exoenzyme ins Porenwasser ab. Das Porenwasser wird aus der Sedimentprobe abgeschieden. Nach Zugabe eines Testsubstrats kann mittels Photometrie / Fluoreszenz die Menge / Aktivität der Exoenzyme gemessen werden. Bei Schadstoffbelastungen wäre eine verringerte Enzymaktivität zu erwarten.	<ul style="list-style-type: none"> - Aussagekraft scheint beschränkt; zu viele störende Faktoren (Anteil organischer Substanz, Überlagerung von Effekten) - Test nicht zum Nachweis von Schadstoffbelastungen entwickelt - Temperaturabhängigkeit



7. Generell geeignete Untersuchungsmethoden

Die Wahl der Untersuchungsmethode ist zum einen abhängig vom Standort und zum anderen vom Ziel der Untersuchungen resp. der altlastenrechtlichen Stufe (Ersterfassung für KbS-Eintrag, altlastenrechtliche Beurteilung, weitergehende Untersuchungen wie Detailuntersuchung).

7.1 Bathymetrie

Als Bathymetrie bezeichnet man die Vermessung der topographischen Morphologie des Seebodens. Moderne Geräte sind in der Lage, den Seegrund in einem engmaschigen Raster auf wenige Zentimeter genau zu vermessen. Ältere Vermessungsdaten (Pläne von Wassertiefen etc.) stützen sich auf punktuelle Echolotaufnahmen, welche die feinen morphologischen Merkmale nicht erkennen lassen. Die modernen Daten erlauben Rückschlüsse auf Ablagerungen z.B. bei Einleitungen, Umlagerungsprozesse oder Massenbewegungen und können für digitale Höhenmodelle verwendet werden. Zur Kartierung von Seeböden stehen verschiedene Techniken zur Verfügung. Der Multibeam-Scanner oder Fächerlot (Boot) ist für Wassertiefen > 5 m geeignet. Für geringere Wassertiefen oder kleinere, untiefe Seen sind andere Vermessungstechniken z.B. mittels LIDAR (Helikopter, Flugzeug) in der Entwicklung.

Hochaufgelöste bathymetrische Daten zeigen zahlreiche Geländekanten, Terrassen, Rutschungen, Bachschuttkegel, Erosionsrinnen, Leitungen und andere morphologische Phänomene und liefern wichtige Hinweise über das Risiko von Rutschungen resp. die Mobilisierbarkeit von belasteten Seesedimenten. Sie können zur Optimierung von Sondierkonzepten genutzt werden.

Seegrundaufnahmen mittels eines Multibeam-Scanners wurden in den meisten grossen Schweizer Seen bereits durchgeführt, so auch im Zürichsee. Die Datensätze können als Höhenmodell bei den Forschungsinstitutionen bezogen werden. Das AWEL ist im Besitz der Daten vom Zürichsee.

7.2 Feststoffproben und Analytik

7.2.1 Feststoffbeprobung aus Sedimentkernen

Das Stechen von Sedimentkernen eignet sich zur Untersuchung von Seesedimenten, weil die Kerne einerseits Auskunft über die Geologie der obersten Sedimentschichten geben und andererseits genügend und ungestörtes Probenmaterial für weiterführende Untersuchungen liefern. Somit können in Kombination mit chemisch-physikalischen Analysen Kennwerte zur Bestimmung des Schadstoffpotentials (Schadstoffkonzentration in Feststoffen), der Exposition (Einlagerungstiefe) und der Schadstofffreisetzung (Einlagerungstiefe, Porenwasserchemie, Aufwirbelungsversuche) ermittelt werden.

Zur Entnahme und Beprobung von Sedimentkernen ist folgende Ausrüstung erforderlich:

- Kernstechgerät (Kolbenlot)
- Boot, vorzugsweise mit Seilwinde
- GPS
- Echolot
- Apparatur zur Öffnung der Kerne



Aufgrund der erforderlichen Spezialausrüstung ist die Zusammenarbeit mit einem Seeforschungsinstitut notwendig (z.B. Eawag, ETH Zürich, Uni Bern). Grundsätzlich kann die Probenahme auch von kleinen Booten aus ohne Seilwinde erfolgen. Sind jedoch mehr als nur einzelne Kerne gefordert, ist eine Seilwinde unerlässlich.

Für die Gewinnung von Sedimentkernen braucht es in der Regel drei Personen: ein Bootsführer (mit Bootsführerschein für die entsprechende Bootskategorie) und zwei Personen für die Kernentnahme. Für die Arbeiten auf dem Boot sind entsprechende Sicherheitsvorkehrungen zu treffen und die Anweisungen des Bootsführers zu befolgen (Schwimmwesten, schadstoffresistente Handschuhe etc.). Das Kernstechgerät besteht aus einem Kopf mit Gewicht, Flügel und Verschlussmechanismus (Abb. 1). In das Gerät können Plexiglasrohre unterschiedlicher Länge eingespannt werden (Durchmesser Eawag-Modell: rund 6 cm). Die Soll-Koordinaten der Probestandorte werden mittels GPS-Navigation auf wenige Meter genau angesteuert. Am Beprobungsstandort wird die Wassertiefe mittels Echolot ermittelt.

Erfahrungen zeigen, dass unter optimalen Bedingungen (Wetterverhältnisse, Ausrüstung, bindiges Sediment, eingespieltes Team, kleine Umsteldistanzen) mehr als 20 Sedimentkerne pro Tag gestochen werden können. Die Beprobung kann im Prinzip während des ganzen Jahres erfolgen, die Probenahme im Winterhalbjahr ist jedoch vorzuziehen, da der private Schiffsverkehr und die Anzahl der Wassersportler deutlich kleiner ist als im Sommerhalbjahr. Weiter sind Zeitpunkte der Fischlaichung und Brutperioden von Wasservögeln zu berücksichtigen (vgl. Kap. 8).

Zur Erstabklärung, ob Belastungen überhaupt vorhanden sind, reicht die Entnahme einzelner Kerne innerhalb einer aus der historischen Untersuchung abgeleiteten Fläche aus. Zur Standortabgrenzung und zur groben Abschätzung von belasteten Volumina ist ein Rasterabstand zwischen den Sedimentkernen von < 50 m zu wählen. Für spezielle Fragestellungen ist allenfalls ein engeres Raster nötig. Ist die Eindringtiefe des Kolbenlots zu gering (Untergrenze der Verschmutzung nicht erreicht), sind geeignete Methoden für eine grössere Eindringtiefe mit dem kollaborierenden Seeforschungsinstitut abzusprechen.

Das Aufschneiden der Sedimentkerne erfolgt je nach Forschungsinstitut unterschiedlich. Entweder wird das Plexiglasrohr der Länge nach aufgeschnitten oder das Seesediment aus dem Rohr ausgestossen. Damit das Sediment zur Dokumentation verfügbar ist, wird der Sedimentkern entlang der Längsachse mit Blechen (Kontaminationen vermeiden, Eawag verwendet z.B. Kupferbleche) durchstochen und aufgeklappt (Abb. 1).

Die Dokumentation umfasst fotografische Aufnahmen des Kernguts und die geologische Ansprache der Sedimente auf den Sedimenttyp, Kornzusammensetzung, Schichtung, Farbe, Fremdkörper und das Festhalten von optischen und/oder geruchlichen Auffälligkeiten.

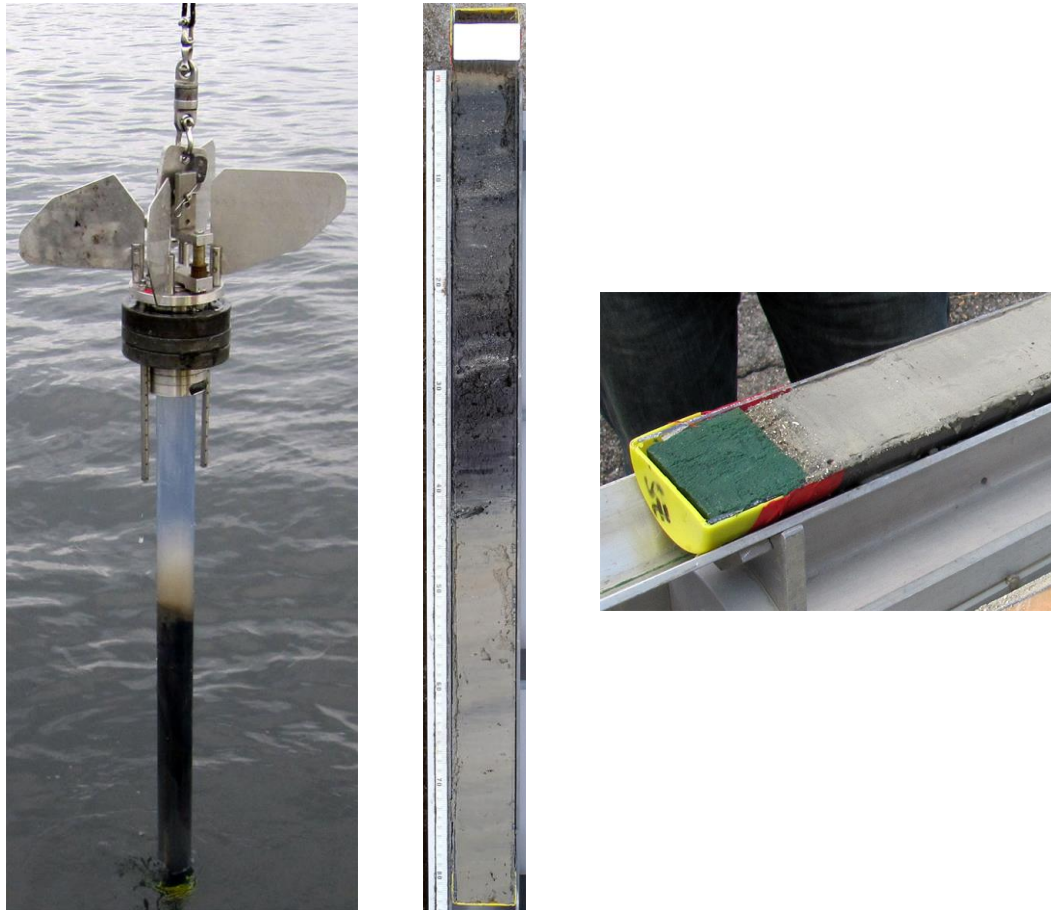


Abbildung 1: links Kolbenlot nach erfolgreicher Kernentnahme; Mitte und rechts aufgeschnittene Sedimentkerne

Das Sediment wird tiefenzoniert aus den Halbschalen entnommen und in geeignete Probebehälter abgefüllt (Sicherheitsvorkehrungen bezgl. Schadstoffen beachten). Bei der Erstabklärung werden in der Regel aus der ersten Halbschale ein oberes Profil von 0-30 cm und ein unteres Profil von 30-60 cm für die anschließende Untersuchung entnommen. Bei längeren Sedimentkernen empfiehlt sich eine gleichzeitige Entnahme einer Rückstellprobe des untersten Profils von > 60 cm. Für weiterführende Untersuchungen und eine abschliessende altlastenrechtliche Standortbeurteilung [1] ist insbesondere die oberste Schicht von 0-10 cm von Bedeutung. Je nach Schichtung und standortspezifischer Fragestellungen ist eine geeignete Horizontierung der Proben zu wählen.

Zu berücksichtigen ist, dass entlang der Mantelflächen des Plexiglasrohrs Sediment aus den oberen Schichten in den Bereich der unteren Schichten verschleppt werden kann. Eine Kontamination tieferer Sedimentschichten durch obere Schichten ist bei der Materialentnahme zu vermeiden (Proben sind aus der Mitte des Kerns zu entnehmen). Die für die jeweiligen Analysen minimal benötigten Probemengen sind bei der Sedimentbeprobung zu berücksichtigen.

7.2.2 Feststoffbeprobung durch Taucher

Im Bereich von Badeanstalten, im untiefen Uferbereich oder bei einem Standort, an dem die Probenahme vom Boot aus nicht erfolgreich war, können Taucher zur oberflächlichen Beprobung des Sediments eingesetzt werden. Dabei werden Probegefäs-



se direkt am Seegrund mit Sediment gefüllt. Es werden die obersten 5 bis 10 cm Sediment erfasst. Durch diese Probenahme ist der Verlust eines Anteils der Feinkornfraktion in Kauf zu nehmen. Je nach Sichtverhältnissen kann der Taucher den Seegrund auf Auffälligkeiten bezüglich Verschmutzungen absuchen. Werden Taucher auch in grösseren Wassertiefen eingesetzt, sind die entsprechenden Restriktionen der Tauchzeit zu berücksichtigen. Der Taucher ist auf die mögliche Gefährdung durch Schadstoffe und eine angemessene Schutzausrüstung aufmerksam zu machen.

7.2.3 Feststoffbeprobung im unmittelbaren Uferbereich

Vom Sediment des begehbaren Uferbereichs können Feststoffproben direkt entnommen werden (z.B. mit Schöpfkelle aus Kunststoff oder Schaufel aus Edelstahl). Dabei werden die obersten 5 bis 10 cm Sediment erfasst. Sensorische Auffälligkeiten sind vor Ort feststellbar. Die Proben dienen der Ermittlung des Schadstoffpotentials in Bereichen, wo Kinder spielen und Badende mit dem Sediment direkt in Kontakt kommen. Ein Direktkontakt bei der Probenahme mit dem Sediment ist zu vermeiden.

7.2.4 Aufbereitung der Feststoffproben

Die Aufbereitung der Sedimentproben erfolgt im Labor. Zur Durchführung der Standardprogramme (vgl. Abb. 2) werden die feuchten Sedimentproben im Trockenschrank bei 40°C während 48 Stunden getrocknet. Die Aufbereitung erfolgt unter entsprechenden Sicherheitsvorkehrungen (Staubmaske, Schutzbrille, Handschuhe). Die getrockneten Proben werden mit dem Backenbrecher zerkleinert und direkt über den Probenverteiler in die Probegefässe für die nachfolgenden Analysen abgefüllt. Wenn für einzelne Analysen notwendig, werden die Proben weiter homogenisiert. Um eine Kontamination zu verhindern, müssen stark belastete Proben separat aufbereitet werden.

Je nach Analysenparameter und Spezialprogrammen (Abb. 2) sind andere Methoden der Probenaufbereitung erforderlich. So müssen flüchtige oder instabile Stoffe wie VOC/CKW direkt aus dem feuchten Material bestimmt werden.

7.2.5 Analytik Feststoffproben

Die Sedimentproben sind durch ein akkreditiertes Labor auf die standortrelevanten Parameter untersuchen zu lassen.

Das AWEL Gewässerschutzlabor hat für die Erstabklärung von belasteten Seesedimenten ein generell geeignetes Untersuchungsprogramm ausgearbeitet, welches in Abbildung 2 zusammengestellt ist. Im Folgenden sind die vom AWEL Gewässerschutzlabor erarbeiteten Analysen exemplarisch aufgeführt. Für weiterführende Untersuchung kann das Analysenprogramm gemäss den Vorkenntnissen aus durchgeführten Untersuchungen gezielt angepasst werden.



Standardprogramme (Übersicht)

Anorganische Analytik

- Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Hg
- Screening ICP-MS

Organische Analytik

- PAK
- Screening GC-MS

Spezialprogramme (Ergänzende Untersuchungen bei Hinweisen)

- Aufgrund Ergebnisse Übersichtsuntersuchungen
- Aufgrund von Hinweisen aus geologischen Untersuchungen und von KbS Land

Ergänzende Spezial- untersuchungen

Anorganische Analytik

- weitere Schwermetalle/
Elemente (bei Hinweisen aus
ICP-MS Screening)
- Salze insb. Anionen

Organische Analytik

- VOC inkl. CKW
- PCB (bei Hinweisen aus GC-MS Screening)
- Phenole/ weitere Chlorverbindungen und
Mikroverunreinigungen

Abbildung 2: Untersuchungsprogramm (Untersuchungskonzept AWEL Gewässerschutzlabor)

Übersichtsanalysen (Standardprogramm)

In möglichst umfassenden Übersichtsanalysen werden in der anorganischen Analytik Schwermetalle (SM), Metalle sowie weitere interessierende Elemente mittels der ICP-Massenspektrometrie (ICP-MS) bestimmt. Bei den organischen Schadstoffen werden mit der GC-Massenspektrometrie (GC-MS) die PAK quantitativ bestimmt.

Neben den quantitativen Bestimmungen der aufgeführten Elemente und Stoffe werden sowohl in der anorganischen Analytik (ICP-MS) wie auch in der organischen Analytik (GC-MS) halbquantitative Screening-Verfahren angewendet, um ergänzende Hinweise auf weitere Schadstoffbelastungen zu erhalten.

Mit den für die Untersuchung von Sedimenten ausgearbeiteten Screening Methoden kann der Erstaufwand in der organischen Analytik deutlich reduziert werden. Diese Untersuchungen erfolgen in Anlehnung an die Standardarbeitsanweisungen des AWEL Gewässerschutzlabors.

Ergänzende Untersuchungen (Spezialprogramme)

Aufgrund der Ergebnisse der Übersichtsanalysen und Hinweisen aus der geologischen Untersuchung, sowie der Erkenntnisse von bekannten, belasteten Standorten oder Punktquellen vom Land, werden die Übersichtsanalysen durch gezielte Untersuchungen auf ausgewählte Schadstoffe und Parameter ergänzt (z.B. KW-Index (C10-C40), PCB, chlorierte Lösungsmittel, andere flüchtige organische Verbindungen, Phenole und Nitroverbindungen, organische Zinn-, Quecksilber-, Arsenverbindungen, Radioaktivität u.a.m.).



7.3 Wasserproben und Analytik

Zur Bestimmung der Schadstofffreisetzung eines belasteten Sediments (Lösungsprozesse, Diffusion, Durchsickerung) kann einerseits die Wasserqualität direkt über den belasteten Sedimenten bestimmt werden oder, wie in Anhang 1 der AltIV [2] vorgesehen, mit dem belasteten Material ein Säuleneluattest durchgeführt werden.

Der Säuleneluattest ist für die meist feinkörnigen und damit eher schlecht durchlässigen Seesedimente allerdings unzuweckmässig. Die freisetzbaren Schadstoffkonzentrationen sind mit den Gegebenheiten angepassten Untersuchungen zu bestimmen (z.B. Porenwasserzusammensetzung, Freisetzungsversuche). Die gemessenen Schadstoffkonzentrationen sollen zumindest qualitativ mit den Konzentrationswerten im Anhang 1 AltIV [2] verglichen werden können (Gleichsetzung mit Eluatversuchen).

7.3.1 Seewasserproben

Durch die organische und anorganische chemische Analyse von Wasserproben können die Kontaminationen des Wassers nach Art und Quantität bestimmt werden.

Schöpfproben aus dem Badebereich geben quantitative Resultate bezüglich einer möglichen Schadstoffaufnahme durch Verschlucken oder über die Haut (humantoxikologisches Risiko).

Schadstoffe im Seesediment sind in verschiedenem Masse wasserlöslich. Gelöste Stoffe können aus dem Sediment ins Seewasser übertreten (Freisetzung von Schadstoffen). Die höchsten Konzentrationen sind deshalb im Seewasser direkt über der Sedimentoberfläche zu erwarten. Das beim Stechen der Sedimentkerne im Rohr vorhandene Seewasser über dem Sediment kann beprobt und analysiert werden.

7.3.2 Porenwasserproben

Zur Untersuchung der Porenwasserzusammensetzung können Porenwasserproben auf verschiedene Arten gewonnen werden. Beispielsweise kann das Porenwasser des frischen Sediments aus einem Sedimentkern abgenutscht und anschliessend analysiert werden. Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz von Diffusionsschwertern (Diffusionssampler), welche in den Sedimenten durch Taucher gesetzt werden. Bei dieser Methode nähert sich das Wasser in den einzelnen Kammern des Samplers dem diffusen Gleichgewicht zum umgebenden Porenwasser, so dass die Wasserzusammensetzung in den Kammern jener des Porenwassers entspricht. Somit können Konzentrationsprofile ermittelt werden, die Aufschluss über den diffusiven Stofftransport und über die Abgabe von Schadstoffen aus dem Sediment in das Seewasser liefern. Diffusionsschwerter können z.B. von der Eawag bereitgestellt werden.

7.3.3 Freisetzungsversuche

Zur Simulation einer Sedimentaufwirbelung durch äussere Einflüsse (z.B. Ankerung, Grabung) oder Rutschungen und der damit verbundenen, potentiellen Schadstofffreisetzung kann eine belastete Probe einem sogenannten Aufschlammversuch unterzogen werden. Dabei handelt es sich um ein nicht normiertes Verfahren, welches vom AWEL Gewässerschutzlabor entwickelt und bereits an verschiedenen belasteten Standorten im Zürichsee angewendet wurde. Die obersten ca. 10 cm eines Sedimentkerns werden im Kernrohr mit überstehendem original Seewasser während 3 min auf-



gewirbelt und stehen gelassen. Das überstehende Wasser (unfiltriert) wird vor der Aufwirbelung und danach nach bestimmten Zeitintervallen (nach 2h, 6h und 24h Absetzzeit) beprobt und analysiert.

7.3.4 Analytik Wasserproben

Die Wasserproben sind durch ein akkreditiertes Labor auf die standortrelevanten Parameter untersuchen zu lassen. Für die Analytik der Wasserproben müssen geeignete Analysemethoden zur Einhaltung der geforderten Bestimmungsgrenzen gemäss BAFU-Vollzugshilfe [3] eingesetzt werden. Bereits bei der Probenahme müssen dabei die Regeln der Spurenanalytik befolgt werden.

7.4 Weitere Untersuchungsmethoden

Kapitel 6 gibt einen Überblick über mögliche Methoden zur Untersuchung von belasteten Seesedimenten. Die im Kapitel 7 ausgeführten, generell geeigneten Untersuchungsmethoden sind für die Mehrzahl der Kontaminationen im See zielführend und haben sich bei mehreren Standortuntersuchungen im Zürichsee (Kanton Zürich) bewährt. Standortbezogen ist das Untersuchungsziel und die Vorgehensart gemäss den Standorteigenschaften individuell zu überdenken, anzupassen oder zu ergänzen. Je nach Schadstoffgruppen und betroffener Schutzziele sind externe Experten (Gewässerökologie, Öko- und Humantoxikologie) beizuziehen.

8. Bewilligungen und Kommunikation

Zur Planung und Durchführung von Untersuchungen im See und im Uferbereich ist frühzeitig mit den betroffenen Behörden, Institutionen und Privatpersonen Kontakt aufzunehmen. Ziel ist, über die bevorstehenden Arbeiten zu informieren und gegebenenfalls Bewilligungen einzuholen (Kanton Zürich):

- AWEL, Abteilung Abfallwirtschaft und Betriebe, Sektion Altlasten
- AWEL, Abteilung Gewässerschutz
- Seepolizei: Befahren Uferzonen, allgemeine Information, spez. Anordnungen im Bereich von Schiffsrouten und Anlagestellen der öffentl. Schifffahrt
- ALN, Fachstelle Naturschutz: Naturschutzgebiete, Schilfgürtel, Brutvögel
- ARE, Kantonsarchäologie: Archäologische Schutzzonen, allgemeine Information
- ALN, Fischereiaufsicht: Kontakt Berufsfischer, Zeitpunkt und Standorte Fischlaichung, saisonale Fanggebiete
- Gemeinde: allgemeine Information, Badeanstalten, öffentlich genutztes Ufer
- Kantonales Labor: Trinkwasserwerke, Wasserqualität, Badeanstalten
- Evtl. private Seeanstösser



9. Standortbeurteilung

Die Erstabklärung stellt fest, ob die angetroffenen Belastungen in den Kataster der belasteten Standorte aufgenommen und weiter untersucht werden müssen.

Die belasteten Standorte werden hinsichtlich ihrer Risiken auf die Schutzziele aquatische Umwelt und Mensch beurteilt (vgl. Kap. 4). Übergeordnet wird der Standort hinsichtlich seiner Auswirkungen auf Trinkwasserfassungen und seiner Langzeitstabilität bewertet.

Als Entscheidungsgrundlage für einen Handlungsbedarf dient im Kanton Zürich das Dokument Gefährdungsabschätzung und Beurteilung von belasteten Standorten in Seen [1].

10. Zusammenfassung

Durch die Einleitung unbehandelter Abwässer entstanden in den Sedimenten z.B. des Zürichsees einerseits eine diffuse anthropogene Hintergrundbelastung, andererseits aber auch punktuelle Verschmutzungen mit Sanierungsbedarf. Verdachtsflächen sind mittels einer Erstabklärung zu untersuchen und gegebenenfalls in den Kataster der belasteten Standorte aufzunehmen. Bekannte Sedimentbelastungen gilt es zu untersuchen, deren Gefährdung auf Mensch und Umwelt abzuschätzen und die belasteten Standorte bezüglich des Handlungsbedarfs zu klassieren. Kriterien zur Beurteilung eines belasteten Standorts im See wurden durch das AWEL im Grundlagenbericht „Gefährdungsabschätzung und Beurteilung von belasteten Standorten in Seen“ [1] erarbeitet. Der vorliegende Bericht liefert eine generell geeignete Untersuchungsmethodik, welche sowohl zur Erfassung von Flächen im Kataster der belasteten Standorte als auch zu weiterführenden Untersuchungen von KbS-Flächen im See dient.



Referenzen

- [1] Gefährdungsabschätzung und Beurteilung von belasteten Standorten in Seen, Oktober 2016, AWEL, Dr. von Moos AG, SCAHT, Eawag
- [2] Verordnung über die Sanierung von belasteten Standorten (Altlasten-Verordnung, AltIV) vom 26. August 1998, Stand: 1.3.2015
- [3] Analysenmethoden im Abfall- und Altlastenrecht, Stand 2013, Umwelt-Vollzug, BAFU
- [4] Development and Evaluation of Consensus-Based Sediment Quality Guidelines for Freshwater Ecosystems, Archives of Environmental Contamination and Toxicology, D. D. MacDonald, C. G. Ingersoll, T. A. Berger, 2000