



Schwarzwasser

Schwarzwasser ist das Abwasser, welches direkt aus der Toilette kommt. Es besteht aus Exkrementen (Urin und Fäkalien), Spülwasser und Toilettenpapier. Wird Schwarzwasser nicht behandelt, birgt es ein Risiko für die Gesundheit von Menschen und Umwelt. Auf der anderen Seite enthält es wertvolle Ressourcen, wie Nährstoffe, Energie und Wasser, die zurückgewonnen werden können. Basierend auf den lokalen Gegebenheiten eignen sich unterschiedliche Systeme für die Behandlung und die Ressourcenrückgewinnung aus Schwarzwasser. So umfassen off-grid-Systeme, also Lösungen direkt an Ort, die Behandlung an der Quelle. Dezentrale und semizentrale Lösungen hingegen schliessen die Lagerung vor Ort und den anschliessenden Transport und die Behandlung mit ein. Zentrale Lösungen schliesslich bedingen einen direkten Transport mit einer Kanalisation bis zur Behandlung.

Die Eawag will weltweit verbreitete Lösungen zur Abwasserbehandlung nachhaltiger gestalten. Deshalb forscht sie auf den drei Ebenen «off-grid», «dezentral» und «zentral», mit dem Ziel, Abwasserströme zu behandeln und Ressourcen zurückzugewinnen. In der Zukunft wird die Sanitärplanung in Städten viel ganzheitlicher sein als bisher (city-wide inclusive sanitation CWIS) und eine Kombination von verschiedenen Lösungen beinhalten, die nebeneinander und auf allen drei Ebenen eingesetzt werden.

Teure zentrale Lösungen

In einkommensstarken Ländern, wie der Schweiz, wird das Abwasser fast ausschliesslich in zentralen Anlagen gerei-

nigt. Diese sind zwar sehr effizient, wenn es darum geht, die Hygiene sicherzustellen. Sie sind aber auch kosten-, ressourcen- und energieintensiv: Zentrale Anlagen brauchen viel Infrastruktur, Wasser und Energie für den Transport und die Behandlung des Abwassers. In diesem System wird Wasser – oft Trinkwasser – benutzt, um Exkremente durch die Kanalisation zur Abwasserreinigungsanlage zu transportieren. Dadurch werden auch grosse Mengen an (Trink-)wasser kontaminiert. Off-grid und dezentrale Lösungen reduzieren die Menge an Wasser, welches behandelt werden muss, da die Exkremente nicht mit Grauwasser (siehe [Faktenblatt zu Grauwasser \[1\]](#)) und Regenwasser gemischt werden. Zusätzlich kann das getrennt gesammelte Grau- und Regenwasser für die Toilettenspülung oder für andere Anwendun-

gen verwendet werden, die keine Trinkwasserqualität erfordern. Der ressourcen-intensive Gebrauch von Trinkwasser fällt somit weg. Durch die starke Urbanisierung, erreichen zentrale Systeme ihre Kapazitätsgrenzen. Hierfür könnten off-grid und dezentrale Ansätze eine nachhaltigere Alternative bieten, um die Kapazität zu erhöhen.

Schwarzwasser wird oft gar nicht behandelt

In vielen einkommensschwächeren Ländern wird Schwarzwasser vorwiegend in dezentralen und semizentralen Systemen behandelt (Fäkalschlammmanagement), zum Beispiel durch die Lagerung in Grubenlatrinen oder Klärgruben [2]. Diese Lösungen haben das Potential, eine angemessene Sanitärversorgung bereitzustellen, solange die gesamte Servicekette funktioniert. In der Realität sieht das allerdings oft anders aus: Grosse Mengen an Schwarzwasser landen immer noch unbehandelt in urbanen Gebieten. Off-grid und dezentrale Lösungen können helfen, dieses Defizit zu beheben, in dem sie ermöglichen, Schwarzwasser in dichten, städtischen Gebieten effizient und platzsparend zu reinigen, ohne Transport zu einer zentralen Anlage.

Grosse Variabilität erschwert die Behandlung

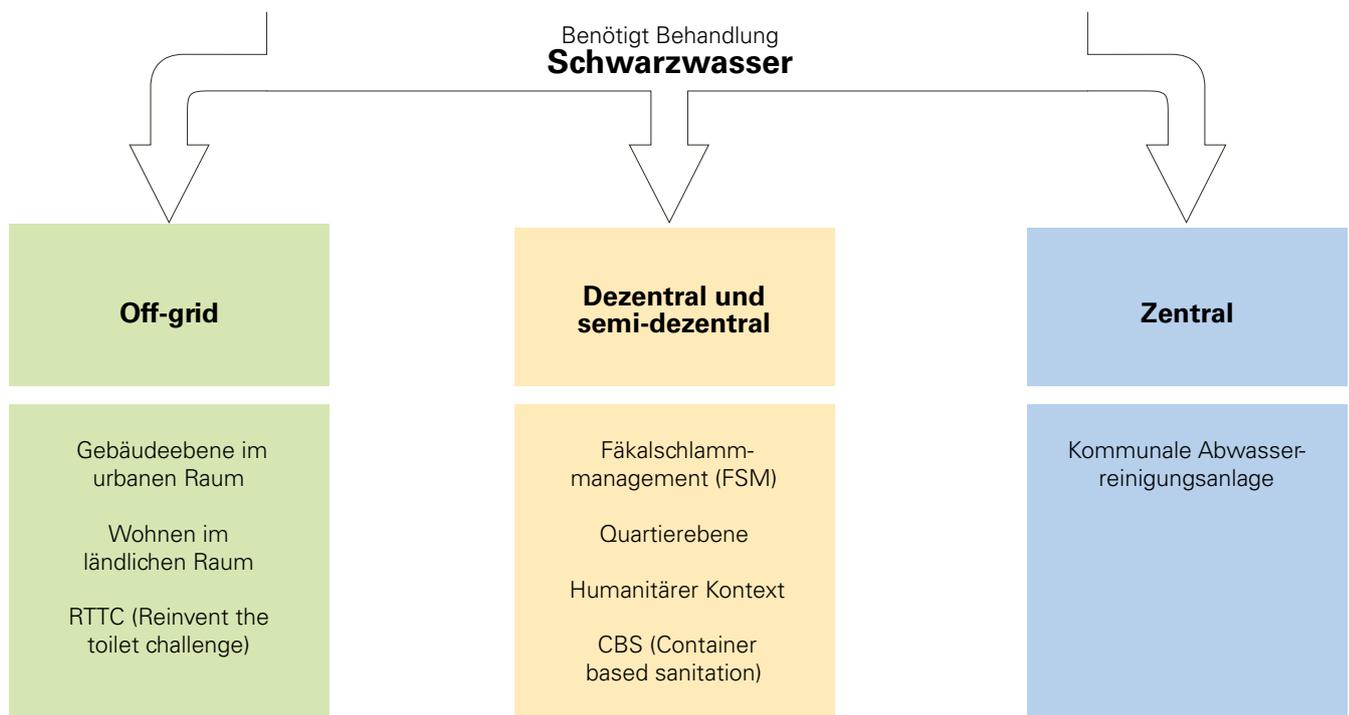
Damit Schwarzwasser effizient behandelt werden kann, muss dieses zuerst entwässert werden. Damit ist die Tren-

nung der festen von den flüssigen Bestandteilen gemeint. Beide Teile müssen danach angepasst behandelt werden, bevor Ressourcen zurückgewonnen werden können. Die Behandlung beinhaltet die Inaktivierung von Krankheitserregern und das Nährstoffmanagement.

Die Behandlung durch off-grid- und dezentrale Systeme wird erschwert durch die grosse Variabilität der Menge und Zusammensetzung des Schwarzwassers – jede Toilettenspülung setzt sich anders zusammen. Im Gegensatz dazu stehen zentralen Lösungen, in denen das Schwarzwasser durch den Transport durch die Kanalisation und die hohe Zahl der angeschlossenen Haushalte homogener anfällt. Aufgrund dieses Unterschieds können etablierte Technologien aus der zentralen Abwasserbehandlung nicht direkt in der dezentralen Behandlung angewendet werden.

Lokale Bedürfnisse erfüllen

Wir entwickeln verschiedene Lösungen für die off-grid und dezentrale Behandlung, um aus den zurückgewonnenen Ressourcen Produkte herzustellen. Sowohl die Technologien, welche für die Ressourcenrückgewinnung eingesetzt werden, als auch die entstehenden Produkte, müssen stets auf die lokalen Bedürfnisse angepasst sein. Dabei verfolgen wir zwei Ziele: Schutz der allgemeinen Gesundheit und der Umwelt.



Off-grid: Es werden innovative off-grid-Lösungen entwickelt, um Schwarzwasser direkt an der Quelle zu behandeln (onsite). Dadurch entfällt der Transport zu einer externen Reinigungsanlage und das Ressourcenrückgewinnungspotential wird erhöht.

Dezentral und semi-zentral: Ein Drittel der Weltbevölkerung wird momentan durch eine Abwasserreinigung bedient, die unabhängig von einer Kanalisation ist. Dabei wird das Schwarzwasser vor Ort gesammelt, gelagert und erst später abtransportiert, um es in einer dezentralen oder semi-zentralen Anlage zu behandeln. In Ländern mit niedrigem und mittlerem Einkommen wird dies als Fäkalschlammmanagement bezeichnet.

Zentral: Das Schwarzwasser zusammen mit Grauwasser wird in der Schweiz zu 99% durch die Kanalisation zu zentralen Abwasserreinigungsanlagen transportiert. Zusätzlich wird je nach Ort Regenwasser in die Kanalisation eingeleitet, welches somit ebenfalls in die Abwasserreinigungsanlagen gelangt. Weltweit bedient die zentrale Abwasserreinigung 57% der Haushalte. Von diesem zentral anfallenden Abwasser werden rund zwei Drittel angemessen gereinigt [3].

Potential

Öffentliche Gesundheit und Umwelt: Ein wirksamer Umgang mit Schwarzwasser minimiert die Gesundheitsrisiken und kontrolliert die Ausbreitung von Krankheiten durch Unterbrechung der fäkal-oralen Übertragungswege. Hinzu kommt, dass die unkontrollierte Entsorgung von Schwarzwasser in der Umwelt zu einer Verschmutzung des Bodens, des Oberflächenwassers und des Grundwassers führt. Die Behandlung von Schwarzwasser schützt somit die öffentliche Gesundheit und die Umwelt.

Nährstoffe und organische Stoffe: Zurückgewonnene Feststoffe sind reich an organischem Material und Phosphor. Sie können mit anderen organischen Stoffen co-kompostiert oder zur Verwendung als Bodenverbesserer pelletisiert werden. Die organische Substanz fördert die Wasserhaltefähigkeit und Vielfalt der Mikroorganismen im Boden. Zusätzlich kann der Bodenverbesserer mit Düngemitteln kombiniert werden, die aus separat gesammeltem Urin gewonnen werden (siehe [Faktenblatt \[4\]](#) zu Urin).

Energie: Aus entwässertem Schwarzwasser können Pellets, Kohle oder Briketts hergestellt werden, die als alternative Trockenbrennstoffe genutzt werden können. Diese Endprodukte haben einen ähnlichen Heizwert wie Holzprodukte und wurden als Brennstoff in Industrieöfen in Senegal und Uganda getestet [\[5\]](#). Energie kann auch durch die Produktion von Biogas gewonnen werden. Die Ausscheidungen von einer Person können deren Wärme- und Energiebedarf nicht vollständig decken, aber sie können einen wertvollen Beitrag zur Beleuchtung, Heizung und zum Kochen liefern oder in grösserem Umfang in das Stromnetz eingespeist werden [\[6\]](#). Darüber hinaus reduzieren dezentrale und off-grid-Lösungen den Energiebedarf für die Brauch- und Trinkwasseraufbereitung, da weniger Trinkwasser zentral aufbereitet werden muss und sich der Energieaufwand für das Pumpen reduziert.

Biomasse: Mit verschiedenen Technologien kann mit Hilfe von Schwarzwasser Nahrung für Vieh oder Fische produziert werden; zum Beispiel Pflanzen aus Pflanzenkläranlagen und bepflanzten Trockenbeeten oder Proteine aus Insektenlarven. So können Schwarze Waffenfliegen (Black Soldier Flies) die Feststoffe im Schwarzwasser schnell verzehren und in Insektenbiomasse umwandeln.

Wasser: Ein grosser Anteil des Wassers nach der Entwässerung kann zurückgewonnen und für die Bewässerung oder Toilettenspülung wiederverwendet werden. Wir evaluieren die Möglichkeit, dieses noch verschmutzte Wasser zusammen mit dem Grauwasser aufzubereiten. Ausserdem kann durch den Einsatz von dezentralen und off-grid-Technologien Frischwasser eingespart werden.

Herausforderungen

Entwässerung: Schon kleine Mengen von Ausscheidungen können relativ grosse Wassermengen verunreinigen. Schwarzwasser enthält in der Regel weniger als 1-5% Feststoffe im Verhältnis zum Wasser. Die Fest-Flüssig-Trennung ist nach wie vor das fehlende Puzzlestück in vielen Verfahren, zur dezentralen und off-grid-Ressourcenrückgewinnung. Es ist daher notwendig, die grundlegenden Mechanismen der Entwässerung zu verstehen, um eine angemessene Behandlung des Schwarzwassers für die Ressourcenrückgewinnung zu gewährleisten.

Entwicklung und Einführung von Behandlungstechnologien: Obwohl es umfangreiches Wissen über die Abwasserbehandlung in zentralen Systemen gibt, ist ein direkter Wissenstransfer von diesen Systemen auf dezentrale Systeme nicht möglich, da die anfallenden Mengen und Eigenschaften des Schwarzwassers in dezentralen und off-grid-Systemen viel stärker schwanken. Wir arbeiten daran, bestehendes Wissen in den off-grid und dezentralen Kontext zu übertragen, wie z.B. die mechanische Entwässerung. Etablierte Aufbereitungstechnologien für dezentrale und semizentrale Lösungen, in Ländern mit niedrigem und mittlerem Einkommen, sind Trocknungsbeete, Co-Kompostierung und Absetz- und Eindickbehälter. Um Lösungen mit geringerem Platzbedarf zu entwickeln und innovative Lösungen im Markt zu etablieren ist weitere Forschung erforderlich.

Echtzeit-Messung Die Entwässerung von Schwarzwasser kann erheblich verbessert werden, wenn die Dosierung von Konditionierungsmitteln (z. B. Flockungsmittel) auf den jeweiligen Eigenschaften des Schwarzwassers basiert. Für die dezentrale und Off-grid-Aufbereitung braucht es Methoden zur Echtzeit-Charakterisierung. Jüngste Forschungsarbeiten der Eawag haben gezeigt, dass dies durch die Inline-Überwachung von pH-Wert, elektrischer Leitfähigkeit, Textur oder Farbe möglich ist [\[7\]](#). Wir evaluieren den Einsatz von Sensoren in Schwarzwasser. Dies ist jedoch aufgrund der Verschmutzung der Sensoren und der Störung der Messung durch die komplexe Zusammensetzung des Schwarzwassers schwierig.

Akzeptanz der Endprodukte Die Akzeptanz von Produkten aus der Behandlung von Schwarzwasser kann, durch Sensibilisierung und Informationen über die tatsächlichen Risiken, verbessert werden. Der Gesundheitsschutz kann mit einem risikobasierten Ansatz gewährleistet werden. Werden die Endprodukte zum Beispiel durch Verbrennung verwertet, ist die Sorge um die Verbreitung von Krankheitserregern kleiner. Dasselbe wird erreicht, wenn die Endprodukte als Bodenverbesserer bei Baumkulturen statt bei essbaren Bodenkulturen eingesetzt werden, da so ein physischer Abstand gewahrt wird.

Technologieentwicklung an der Eawag

Water Hub: Im Water Hub testet die Eawag zusammen mit Industriepartnern Technologien unter realen Bedingungen. Das ist wichtig, um Technologien bis zur Marktreife zu bringen. Zurzeit getestet werden mechanische Entwässerungstechnologien, Sensoren und Konditionierungsmittel (Flockungs- und Koagulationsmittel).

Aldo Todaro, Eawag



Volaser: Der Volaser misst direkt an Ort das Volumen von Schwarzwasser in Zwischenlagerungstanks (Fäkalschlamm). Aus den Daten kann abgeschätzt werden, wie viel Schwarzwasser auf Quartier- bis Stadtebene behandelt werden muss. Der Volaser und die Sludge Snap App werden zurzeit in acht Ländern getestet.

Joel Kinobe, Kizito Andrew



Sludge Snap App: Diese App zielt darauf ab, die Eigenschaften des Schwarzwassers auf der Grundlage von Fotos zu ermitteln. Die App nutzt ein Fotobearbeitungsmodul, welches Farb- und Texturdaten des Schwarzwassers extrapoliert und Texturdaten des Schwarzwassers extrahiert. Zusätzlich zum Foto, können einfach zu messende Daten eingegeben werden, wie pH-Wert, Leitfähigkeit und Art der Zwischenlagerung des Schwarzwassers. Basierend auf einer bestehenden Datenbank und mithilfe von Machine Learning werden dann die Eigenschaften des Schwarzwassers ermittelt [8].

Barbara J. Ward, Eawag



Automatisierte Dosierung von Konditionierungsmitteln: Die Unter- oder Überdosierung von Konditionierungsmitteln beeinträchtigt die Entwässerungsleistung erheblich. Aufbauend auf unserer bisherigen Forschung, entwickeln wir derzeit Lösungen für die automatische Dosierung von Konditionierungsmitteln, dafür braucht es eine Echtzeit-Messung der physikalischen und chemischen Eigenschaften. Dazu gehört auch die Identifizierung von Methoden, um das optimale Konditionierungsmittel zu wählen.

Michael Vogel, Eawag



Bestimmungen

Eine DIN-Norm (DIN 30762:2021-06) für *Vorgefertigte Sanitärsysteme ohne Anschluss an Wasserversorgung und Kanalisation* ist zurzeit in Entwicklung [9]. In dieser Norm werden die Mindestanforderungen solcher Systeme beschrieben, damit ein hohes Mass an Qualität, Komfort und Sicherheit gewährleistet werden kann.

Weitere Standards finden sich in der DIN-Norm Qualitätssicherung von Recyclingprodukten aus Trockentoiletten zur Anwendung im Gartenbau (DIN SPEC 91421:2020-12) [10].

In Europa gibt es derzeit keine speziellen Vorschriften für das Schwarzwasserrecycling. Allerdings gibt es Vorschriften für die Abwasserbehandlung im Allgemeinen:

CH: Seit 2006 ist die direkte Verwendung von Klärschlamm aus kommunalen Kläranlagen als Düngemittel in der Landwirtschaft nicht mehr erlaubt. Dieser Klärschlamm muss getrocknet und in Verbrennungsanlagen oder Zementwerken verbrannt werden [11]. Die Schweiz hat jedoch beschlossen, dass ab dem 1. Januar 2026 Phosphor aus kommunalen Abwässern und anderen phosphorreichen Abfallströmen zurückgewonnen werden muss [12].

DE: Kläranlagen werden dazu angehalten, Nährstoffe aus dem Abwasser zurückzugewinnen. Klärschlamm aus Kläranlagen kann verbrannt oder in Übereinstimmung mit den Leitlinien als Düngemittel in der Landwirtschaft verwendet werden [13].

EU: Flüssigkeiten: Im Jahr 2020 hat die Europäische Union die Verordnung *«Mindestanforderungen an die Wasserwiederverwendung»* erlassen. Die Verordnung schafft einen Rahmen für die Mitgliedsstaaten, die Wasser aus Abwasser für Bewässerungszwecke wiederverwenden wollen [14].

Feste Stoffe: Weder in der Verordnung für die *«Bereitstellung von Düngeprodukten auf dem Markt»* [15] noch in anderen EU-Verordnungen existieren Regulierungen für menschliche Fäkalien..

Quellen:

- 1 Morgenroth, E.; Doll, C.; Hess, A.; Hubaux, N.; Reynaert, E.; Hammes, F.; Julian, T.; Bryner, A.; Penicka, P. (2021) Fact sheet. *Grauwasser*, Eawag, Dübendorf, Switzerland https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Beratung/Beratung_Wissenstransfer/Publ_Praxis/Factsheets/fs_greywater_0221.pdf
- 2 Strande, L., M. Ronteltap, and D. Brdjanovic, *Faecal sludge management: Systems approach for implementation and operation*. (2014), London: IWA Publishing. <https://www.dora.lib4ri.ch/eawag/islandora/object/eawag:10885>
- 3 UN Habitat and WHO, 2021. *Progress on wastewater treatment – Global status and acceleration needs for SDG indicator 6.3.1*. United Nations Human <https://www.unwater.org/publications/progress-on-wastewater-treatment-631-2021-update/>
- 4 Udert, K.; Doll, C.; Bryner, A.; Penicka, P.; Etter, B. (2019) Fact sheet. Urinseparierung, Eawag, Dübendorf, Switzerland. https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/eng/projekte/nest/factsheet_urine_march19_de.pdf
- 5 Gold, Moritz, et al. "Faecal sludge as a solid industrial fuel: a pilot-scale study." *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development* 7.2 (2017): 243-251. <https://www.dora.lib4ri.ch/eawag/islandora/object/eawag%3A15049/>
- 6 Andriessen, N.; Ward, B.J.; Strande, L. "To char or not to char? Review of technologies to produce solid fuels for resource recovery from faecal sludge." *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development* 9.2 (2019): 210-224. <https://www.dora.lib4ri.ch/eawag/islandora/object/eawag:18906>
- 7 Ward, B. J.; Andriessen, N.; Tembo, J. M.; Kabika, J.; Grau, M.; Scheidegger, A.; Morgenroth, E.; Strande, L. (2021) *Predictive models using "cheap and easy" field measurements: can they fill a gap in planning, monitoring, and implementing fecal sludge management solutions?*, *Water Research*, 196, 116997 (12 pp.). <https://www.dora.lib4ri.ch/eawag/islandora/object/eawag:22336>
- 8 Ward, B. J., Allen, J., Escamilla, A., Sivick, D., Sun, B., Yu, K., Strande, L. (2021). *Sludge snap: a machine learning approach to fecal sludge characterization in the field* (p. 1234 (2 pp.)). Presented at the 42nd WEDC international conference. Equitable and sustainable WASH services: future challenges in a rapidly changing world. <https://www.dora.lib4ri.ch/eawag/islandora/object/eawag:24096>
- 9 DIN 30762:2021-06, *Prefabricated sanitation systems without connection to water supply and sewage system - Requirements and product features*; Draft (2021). <https://www.beuth.de/en/draft-standard/din-30762/338299741>
- 10 DIN SPEC 91421:2020-12 (2020); *Quality assurance of recycling products from dry toilets for use in horticulture*. <https://www.beuth.de/de/technische-regel/dinspec-91421/330937272>
- 11 Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, (2003) *Verordnung über umweltgefährdende Stoffe* (Stoffverordnung, StoV), <https://www.admin.ch/gov/de/start/dokumentation/medienmitteilungen.msg-id-1673.html>
- 12 Der Schweizerische Bundesrat, (2015), *Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen* Art. 1 and Art. 51, <https://fedlex.data.admin.ch/eli/cc/2015/891>
- 13 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2017) *Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung*, <https://www.bmu.de/gesetz/verordnung-zur-neuordnung-der-klaerschlammverwertung/>
- 14 The European Parliament and the Council of the European Union (2020), *Regulation (EU) 2020/741 of 25 May 2020 on minimum requirements for water reuse*, <http://data.europa.eu/eli/reg/2020/741/oj>
- 15 The European Parliament and the Council of the European Union (2019), *Regulation (EU) 2019/1009 of 5 June 2019 laying down rules on the making available on the market of EU fertilising products and amending Regulations (EC)*, <http://data.europa.eu/eli/reg/2019/1009/oj>

Mehr Informationen: www.eawag.ch/waterhub, www.autarky.ch

Ansprechperson, Dr. Linda Strande, Abteilung Sandec, +41 58 765 5553, linda.strande@eawag.ch

Mitarbeit an diesem Factsheet: Carina Doll (Verfahrenstechnik); Linda Strande, Michael Vogel, Stanley Sam, Barbara J. Ward (Siedlungshygiene und Wasser für Entwicklung); Andri Bryner, Peter Penicka (Kommunikation)

Adresse: Eawag, Überlandstrasse 133, CH-8600 Dübendorf, Schweiz, +41 58 765 5511, info@eawag.ch, eawag.ch